海峽兩岸及香港、澳門地區
職業安全健康學術研討會
1993

第三十一屆海峽兩岸及香港、澳門地區
職業安全健康學術研討會

31.ª Conferência de Segurança e Saúde Ocupacional entre os dois lados do Estreito, Hong Kong e Macau

2026.09.09-10

職安健新典範：科技、創新與關懷

Novo paradigma na segurança e saúde ocupacional: tecnologia, inovação e cuidados

論文集

主辦單位：
Entidades organizadoras:

勞工事務局 Direcção dos Serviços para os Assuntos Laborais DSAL

澳門職業安全協會 MCSA

合辦單位：
Entidades co-organizadoras:

中國職業安全健康協會 COSHA

SINOSTEEL 中钢安环院

ISHA

CAWS

序　言

“海峽兩岸及香港、澳門地區職業安全健康學術研討會”是每年一度的重要學術交流平台，由海峽兩岸及香港、澳門地區相關機構輪流主辦。多年來，研討會匯聚各地職安健專家、學者及專業人士，促進理論研究、實務經驗與新趨勢交流，對提升職安健水平和推動安全文化發展發揮積極作用。

研討會已舉辦至第三十一屆，並由澳門勞工事務局與澳門建築安全協會在澳門主辦，以及由中國職業安全健康協會、中鋼集團武漢安全環保研究院、中華安全衛生協會、香港職業安全健康局、香港職業安全衛生協會及中國安全生產協會合辦。本屆以「職安健新典範：科技、創新與關懷」為主題，期望各地專家學者和專業人士聚首澳門，圍繞職安健議題深入交流，分享研究成果、實務經驗及發展新趨勢。以科技賦能安全，以創新引領發展，以關懷守護健康，共同提升職安健水平，創設更美好的職安健文化。

本論文集收錄了海峽兩岸及香港、澳門地區職安健領域的研究成果與實務經驗，內容涵蓋產業安全、職業健康、建築安全、人才培育、應急管理、科技創新與應用、以及職安健應對策略等，展現各地在職安健工作中的探索與成果。

期望透過本屆研討會，進一步促進各地交流與合作，凝聚共識，互學互鑑，謹向各主辦及合辦機構、投稿作者、與會嘉賓和各界同仁致以誠摯謝意。

目　录

主題演講及專題演講

“雙軌驅動”職安健政策模式：澳門職安健政策的整合與優化
……陳俊宇，鄧穎琪，馮超賢　1
淺談澳門建築行業“施工安全優先於速度”的哲學邏輯與實踐路徑
……駱增毅　9
关于建立中国大陆注册职业卫生师制度的探讨与展望
……吴　松　16
科技赋能安全创新　协同共筑健康未来
……王　雷　17
脊髓损伤：摧毁工人一生的意外
……林楚賢　18
数智驱动：员工身心健康与行为风险管控的创新实践
……展之发，冯　柯，徐厚友，张　丽　19
台灣地區綠能產業發展現況與安全關注重點研究報告
……黃建平，黃信慈，詹鈞丞　27
科技賦能　安全同行
……楊中源　32
香港以數字化和科技方案提升職業安全健康及福祉的經驗分享
……楊冠全　38

職安健創新與科技應用

基於大語言模型的職安健「學・考・用」一體化智能平台
……盧展宏，游浩泓，何竣浠，雷茜晴　44
基於三維 TDOA 訊號的複雜工地人員與物體實時定位提升施工安全
……吳沛林，孫維澤，關憲章，吳文志，李華超　55
“從安全關懷到卓越體驗”澳門綜合旅遊休閒企業職安健管理的轉型實踐與價值共創
……陳嘉怡　62
基於智能電錶的安全及應急管理重塑
……黃濠華，陳志堅，容志匡　68
新质生产力背景下江苏职业健康智能监测与应急管理体系建设研究
……许曙青，姚　淼，宗俊秀，汪　蕾　79

粤港澳大湾区有限空间智能感知与风险防控研究——以横琴冷冻水管网为例
……杨　哲　84
基于 GraphRAG 的工业安全隐患排查法规匹配研究——以 DeepSeek 为例
……王昕怡　89
数智化技术在冶金安全风险管控中的应用
……邬姗姗，张　蒙，牛恩阳，李克梅　95
垂直领域 AI Agent 在职业安全健康教学中的构建逻辑与效能验证
……姚　淼　99
AI 赋能《职业健康与安全》课程建设的研究
……袁　媛，许曙青　106

建築業職安健發展

粤澳深合區協同發展下澳門水運工程安全管控體系優化研究
……何金城，付大雪，張帆富，歐維士，趙崇傑　111
跨境水運工程視野下澳門與大陸安全管理人員職責差異及最佳化措施淺析
……何金城　118
淺談建築安全管理工作中存在的不利因素及相關對策
……張濠龍，雷永康，莊俊龍　124
论风险分级管控在建筑施工项目安全生产管控的重要性
……陈　伟　128
中空長跨度工作平臺架
……梁杏笑　144
建築業創新科技監督與安全作業最新發展
……譚銘康　150
澳門輕軌大型基建建設安全生產風險管控與應急管理
……李華超　156
香港創科時代的職安健發展前瞻
……林喜財　162
澳門建築業職安健最新發展——安全文化與安全領導的新趨勢
……袁詠琪　169
基於 BIM 的建築安全管理協同模式
……莊俊龍　176
淺談澳門共同管道附屬系統建造的安全管理
……劉　藕，梁英倫　181
气候变化背景下户外作业人员热应激风险防控策略研究——以建筑施工行业为例
……刘亚龙，郭　昆，王梦婷，乔淑君，周　艳，鲁祖凤　186

工作場所職安健促進與應對策略

异地职业卫生技术服务流程优化的探讨
……熊佳琪，张　丽，陈　强，王立娟　193
職業衛生檢查員專業知能提升方案：知能整合與技術支援之實務綜述
……施昆岑　198
以永續健康勞動力為目標之勞工健康服務跨領域合作模式建構
……闕妙如，黃德琪，李芝涵　204
高風險職場自主健康管理系統建構
……謝明宏，吳家汶，林心妮，張正杰，董湘羚，陳琬玲　209
有機過氧化物常見安全防護盲點與探討
……謝明宏，吳家汶，林心妮，李芳均　215
算法管理下劳动者心理压力研究
……牛恩阳，张　蒙，邬姗姗，李克梅　220
湖北省非煤矿山企业职业健康管理现状调研
……朱灿松，张志勇，华超　，陈　强，张　丽，郭　旭，林坤峰　225
被重构的焦虑——AI 职场替代焦虑与职业心理健康问题研究进展
……张　丽，陈　强，张志勇，朱灿松，冯　柯　228

產業安全與應急管理

基于 Massflow 模型的干堆尾矿库溃坝数值模拟研究
……万　飞，尹里刚，林坤峰，刘　豪，俞熊志，胡浩川，刘帅军　232
TC4 增材制造原料气雾化制备工艺粉尘爆炸风险分析与本质安全研究
……乐有邦，吴晓煜，胡维西，高一峰，徐　松　239
铝镁粉尘湿式除尘器重大风险管控及防爆评估研究
……吴晓煜，周奥辉，乐有邦，胡维西，张倩倩，游　毅，陈　晨，高一峰　245
金属粉尘湿式除尘的爆炸风险分析及防控
……王　蕾，张倩倩，陈　晨，徐　松，霍文超　253
铁路工程施工中的职业危害识别与防护对策研究
……秦梓航　257
固态储氢合金生产过程中涉爆粉尘风险识别与防爆对策研究
……游　毅，李梦超，刘敏娜，王　岩，田　磊，汪　强，解远智　261
苏州市安全生产“六化”建设要求及运行情况调研与分析
……胡　敏，汤建荣，卜延超，王　欢　267

中小企職業安全發展與健康策略

澳門中小企職業安全健康發展策略：挑戰、機遇與路徑
……高俊雄　271

澳門中小型建築企業職安健管理挑戰與優化建議
……李宏熙　277
酒店房務部體力處理操作之探討
……吳　燕　282
智慧賦能，以人為本——論 Safety 4.0 時代職業安全健康的科技創新與關懷實踐
……許佳峰　287
以 AI 提升職業安全健康：從心理健康正視科技關懷探索
……葉頴昕　杜錚豪　291
陶瓷中小企业职业健康管理现存困境与综合治理路径
……王立娟　297
中小企业职业安全健康生存与发展的筑基与攀登双轨策略
……张晴川　302
中国小微企业职业卫生与全员健康管理发展策略
……肖　登，张　丽，陈　强，秦梓航，但成栋，杨梓涵　307

職安健政策發展與應對

香港在應對氣候變化和極端天氣的職安建策略
……游　雯　313
超越紙張主義：大型綜合渡假村人性化職業安全管理藍圖
……楊宏豐　317
電力作業的主動式風險防護方案
……王開原，李雅媛，周子雯，李志釗　323
澳門建造業僱員職業健康之研究：結合參與式研究（PI）與網絡分析方法
……龍綺汶　331
醫療服務中熱壓力管理的策略方向：香港醫療機構成功案例分享
……馬婉婷　342
新兴产业安全健康政策研究
……李　莎　348
高等职业院校赋能传统村落防灾减灾路径研究
……徐素军，许曙青，陈章余　353
基于全链条责任追溯视角下平台经济职安健政策研究与对策
……李繁生　358

職安健人才培育

面向职安健人才培养的体验式培训场馆设计研究
……陈馨雨，乐有邦，吴晓煜，吕　垒，郑一帆　362

香港強制性基本安全訓練（平安卡）課程改革研究
……廖家俊　367
澳門建造業安全員的創新功能衍生及執行先導培訓與成效
……李紹鋒　373
安全人員的定位、思維及知識
……李光昇　379
施工场景滑倒、绊倒与跌倒事故研究现状与发展趋势
……方翊臻，文兆铖，李　凡，陈海寿　383
“岗课赛证训”五维融通：五年制高职防灾减灾救灾技术专业人才培养模式探索
……宗俊秀，崔炳辉，许曙青，陈章余　391
虚实融合驱动下安全生产与应急救援虚拟仿真实训基地的构建与实践
……崔炳辉，宗俊秀，许曙青，陈章余　396
北京工业职业技术学院城市安全学院安全应急类专业群建设路径与实践
……赵卫强，沈　杰，张明珠　401
服务“平安卫士”培养的职业安全健康技术技能人才实践教学体系构建与效能验证
……许曙青，汤　涛，崔炳辉，姚　淼，宗俊秀　410

職業健康關懷、監測與管理

科技有溫度：多模態 AI 輔助澳門年長及數碼弱勢從業人員職安健文書應用探索
……林澤堯　417
高風險機械設備安全標準與確效機制之推動成果以產業自主安全管理模式為例
……湯家柔　423
應用擴增實境技術優化堆高機操作者職能可行性研究
……楊欣宸　430
TRIZ 方法於堆高機職業災害預防與改善之研究
……曾宇群，許宏德　435
香港飲食業四大工傷意外成因剖析與對策
……林　莉　442
面向冶金过程参数越限的智能体安全研判方法
……张智舟　447
全維度空間治理（TSG）：融合職業安全與健康與人體工學的 6Ws 職場優化框架
……詹敏儀　453
暑濕高溫環境–建築業職業性中暑的中醫藥病機探析與防控應急策略
……藍清平　459
物業管理在極端天氣下的安全韌性策略
……謝津權　467

氣候變化下空中服務員職業安全與健康的挑戰與協作應對
……王肇鋒，許嘉晞　474
核心研究一款新型碳基降溫背心搭配醫護個人防護裝（PPE），在高溫環境下對人體熱應激、生理指標及代謝水準的影響
·Patarawadee Sainiyom，MSc， Vitoon Saeangsirisuwan，PhD， Clarence Hong Wei Leow，BSc，Jason Kai Wei Lee，PhD，阮偉傑　480
漸變中的建築業安全管理
……黃達安　484
從澳門安全管理實踐到國際認可：如何以實務經驗推動安全科技革新
……陳詠輝　488
建築施工與安全並存發展
……譚俊威　493
某冶金技术研发机构职业病危害现状评价分析
……但成栋，肖　登，秦梓航，杨梓涵　499
某涂镀板公司职业危害调查
……张志勇，朱灿松，张　丽，陈　强，辜　伟　504
基于职业健康检测的准确性提升–微孔滤膜中钙含量研究
……张　蒙，邬姗姗，牛恩阳　509
某电子器件制造企业职业健康危害控制效果的分析
……李克梅，邬姗姗，牛恩阳，张　蒙　513
基于 LEC 法与 ICMM 法的铝精深加工企业职业病危害关键岗位识别研究
……陈　强，张　丽，熊佳琪，朱灿松，张志勇，肖　登　518
职业危害共暴露复杂度与职业健康管理需求关联研究
……王均云，吴丽娜，王泽辉，王小春，丁春光　526

「第三十一屆海峽兩岸及香港、澳門地區職業安全健康學術研討會」論文集刊登的署名文章，乃作者之個人意見，文責與本局無關。

原則上，其他刊物可轉載原刊於本論文集之文章，但需指明出處及原作者，並獲得有關許可。

“雙軌驅動”職安健政策模式：澳門職安健政策的整合與優化

陳俊宇副局長，鄧穎琪廳長，馮超賢高級技術員
澳門勞工事務局

摘　要：職業安全與健康是保障勞動權益、維持企業穩定營運、構建宜居宜業城市及促進社會可持續發展的重要基礎。澳門特別行政區政府勞工事務局多年來以貫徹“政府引導、勞資參與”的理念，因應本地產業結構的特殊性與城市建設的大型基建推進，逐步建立職安健的雙軌驅動政策模式。

所謂“雙軌驅動”政策，是指勞工事務局針對本地產業結構及工作意外特點所制定的一套職業安全與健康監管策略，透過“第一軌”對建築業實施法律強制、分級監管與經濟激勵等政府主導策略，以及“第二軌”引導綜合旅遊休閒企業落實自主管理，形成兩條並行的推動路徑。

本文結合澳門近年職安健統計數據與施政政策，深度剖析澳門三個重點關注產業（博彩業、酒店及飲食業與建築業）在職安健法制建設、階梯式培訓體系及經濟激勵機制的演進歷程與成效。研究結論顯示，“雙軌驅動”職安健政策模式有效體現了澳門在面對多元產業風險與治理挑戰下的創新思維與務實管理：透過第一軌政策有效壓降建築業的違規行為與工作意外率，推動行業由“被動合規”邁向“主動預防”；透過第二軌引導大型企業建立自主管理機制，促使職安健文化融入企業營運中。整體而言，澳門整體千人意外率持續下降，展現出政策執行的積極成效，為推動城市整體實現“零意外、零傷亡”的願景提供具備理論深度與實務價值的新視角。

關鍵詞：職業安全健康、雙軌驅動政策

前　言

職業安全與健康是保障勞動者基本權益、維護企業可持續運營、促進社會和諧發展的重要基石。隨著澳門特區政府持續推進「1+4」適度多元的經濟發展戰略，產業結構呈現出以綜合旅遊休閒業為核心、新興產業加快培育的態勢，同時大型基建項目密集推進，城市建設步伐不斷加快，職業安全與健康的治理面臨前所未有的複雜挑戰。不同行業風險特徵差異顯著，傳統的單一監管模式已難以全面應對第三產業的隱性風險與第二產業的高危作業並存的雙重壓力。為此，澳門特別行政區政府勞工事務局秉持“政府引導、勞資參與”的核心理念，創新提出“雙軌驅動”職安健政策模式，針對博彩業、酒店及飲食業、建築業等重點行業，實施差異化、精準化治理路徑。

1　澳門產業結構與職業安全健康的挑戰

澳門長期以來以第三產業作為整體經濟發

展的核心支柱，為進一步促進本澳經濟適度多元，特區政府全面落實經濟和社會發展第二個五年規劃[1]，並正踏入第三個五年規劃開局之年，紮實推進經濟適度多元發展，高質量推進橫琴合作區建設，統籌教育、科技、人才一體化發展等，更好融入和服務國家發展大局。回顧在二五規劃中，明確提出「1+4」經濟適度多元發展策略：即以做優做精綜合旅遊休閒業為「1」，同時全力培育中醫藥大健康、現代金融、高新技術、會展商貿及文化體育四大重點產業為「4」。

1.1 澳門產業概況

根據澳門統計暨普查局發布的數據，澳門 2026 年上半年的本地生產總值初步數值為 2,098.9 億澳門元[2]，而根據最新的產業結構數據[3]，澳門的第三產業的增加值總額佔整體本地生產總值的 95.15%，而第二產業（包括建築業）的比重則為 4.85%。按行業計算，則呈現“博彩業為核心支柱、非博彩多元化協同輔助“的顯著特徵：

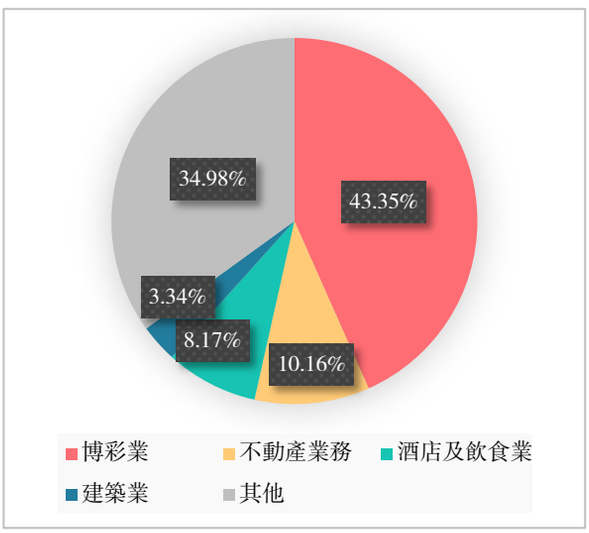


圖 1–1　澳門行業結構（前三位及建築業）

1.2 澳門的就業人口

澳門 2026 年第二季的總就業人口為 37.64 萬人[4]，其中，博彩業的就業人口最多，佔 17.56%（6.61 萬人），其次是酒店及飲食業，佔 14.21%（5.35 萬人）。

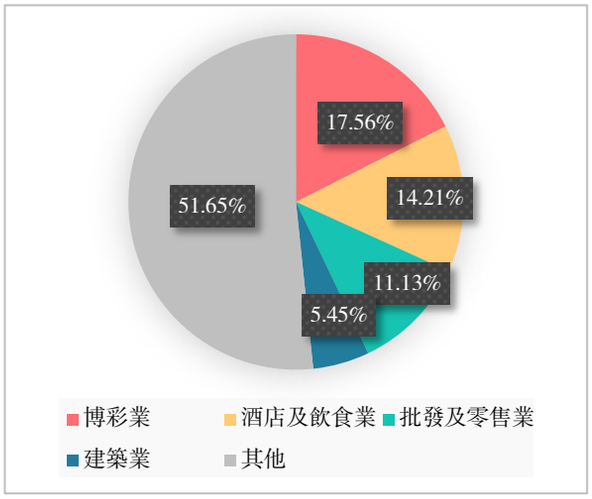


圖 1–2　澳門就業人口狀況（前三位及建築業）

1.3 澳門的工作意外狀況

根據澳門勞工事務局的工作意外統計[5]，澳門 2025 年全年合共 5,088 宗工作意外。其中，工作意外數量、千人意外率及嚴重性（每一宗工作意外導致的平均缺勤日數）三項最高的行業分別是博彩業（1,534 宗）、酒店及飲食業（29.4‰）及建築業（26.5 日/宗）。

表 1–1　澳門工作意外統計（2025 年）

	博彩業	酒店及飲食業	建築業	澳門整體
工作意外	1,534 宗	1,474 宗	306 宗	5,088 宗
千人意外率	18.8‰	29.4‰	13.1‰	13.6‰
嚴重性	14.3 日/宗	9.5 日/宗	26.5 日/宗	11.8 日/宗

1.4 澳門職安健政策面對的挑戰

基於澳門的特殊經濟結構與社會發展需求，各類工作場所的安全與健康風險日趨複雜：

1.4.1 產業結構高度集中且風險差異顯著

澳門經濟長期依賴第三產業，尤以博彩、旅遊為主，但各行業面臨的安全挑戰截然不同：

- 第三產業：博彩業、酒店與飲食業的就業人口龐大（合計約 12 萬人，佔 32%），但近年千人意外率持續上升，人體功效學傷害、輪班疲勞、心理壓力等新型職業健康問題浮現。

• 第二產業：建築業作為澳門的第二產業的主要行業，雖然只佔整體本地生產總值的3.3%，但屬嚴重性最高的行業。

1.4.2 傳統監管模式難以應對新興風險

回顧澳門的職安健監管歷程，澳門已由“事故處置、事後追責”轉變成為“常態巡查、預防為主”的監管模式，但面對以下新型挑戰已顯不足：

• 服務業：工作模式靈活、班次密集、人力密集，傳統巡查難以深入日常操作細節。

• 建築業：價格競爭導致安全預算被壓縮、“口述安全”現象普遍。

• 新興產業：會展搭建、零工經濟、平台外送等非典型就業模式興起，傳統以固定場所為基礎的監管機制面臨挑戰。

1.4.3 大型基建項目帶來安全管理壓力

近年澳門推進多項重大工程（如輕軌東線、填海工程），具有以下特點：

• 施工期長、參與單位多、交叉作業頻繁。

• 使用大型機械、涉及高空、密閉空間、海底隧道等高危工序。

• 外判鏈條長，易出現責任不清、溝通斷層。

1.4.4 企業治理能力差異

• 澳門建築業中小型企業眾多，安全管理能力相對薄弱，需由政府直接介入支持。

• 綜合旅遊休閒企業均為大型集團，擁有完善的人力資源與管理體系，具備推動自主管理的條件。

1.4.5 配合「1+4」經濟適度多元發展戰略

特區政府推動“做精做優綜合旅遊休閒業，培育四大新興產業”，意味著：

• 新產業將引入新設備、新材料、新工藝，衍生新型安全風險。

• 平台經濟與零工模式可能模糊僱主責任，增加職安健保障難度。

1.5 面對挑戰的政策思維

面對上述各項新型挑戰，若沿用“一刀切”的管理模式，將難以有效應對多元風險。因此，職安健治理必須由傳統的“被動執法”與“主動預防”，進一步邁向“自主安全”模式——即使在沒有監管部門的巡查監察的情況下，企業與從業人員亦能主動辨識並自行化解風險，構建常態化的自主防禦防線。為此，勞工事務局因應企業能力差異，已採取“扶助弱者、激勵強者”的雙軌策略，建立具彈性的職安健治理架構，全力支撐經濟適度多元發展。

2 “雙軌驅動”政策體系

“雙軌驅動”政策是澳門特別行政區政府勞工事務局針對本地產業結構及工作意外特點所制定的一套職業安全與健康監管策略。該政策以“政府引導、勞資參與”為核心理念，根據不同行業的風險特性與管理基礎，採取差異化、針對性的管理模式，形成兩條並行的推動路徑：

2.1 第一軌 政府主導：資源鼓勵＋法規監察

2.1.1 法律強制 邁向建築安全新里程：《建築業職業安全健康法》

2023 年 11 月 1 日生效的第 2/2023 號法律《建築業職業安全健康法》[6]，標誌着澳門建築業職安健法制建設的里程碑。

• 明確主體責任：清晰界定承造商、分判商、安全管理人員及指定工程師的法定安全義務。

• 安全人員配置：強制規定工地必須按工人規模配置專職性的安全主任，並以安全督導員為前線執行安全事務的角色，以及建立安全管理人員准照制度。

• 配套技術規範：同步頒布第 32/2023 號行政法規《建築業職業安全及健康技術規範》，對高空工作、密閉空間、起重吊運及用電等高危工序訂定安全規範和技術要求。

2.1.2 分級監管　監管關口前移與“即罰即停”

澳門勞工事務局推動職安健工作由事故處理轉向風險預防：

• 事前技術審查與預防把關：針對大型重點工程與密閉空間、大型吊運等高危工序，提前對施工方案提供專業技術建議，確保在設計與施工前提前籌備做好安全措施。

• 密集巡查與“即罰即停”：每年實施至少三次全澳突擊密集巡查。對可能嚴重危害生命安全的違例情況採取“即罰即停”的零容忍策略；對一般與安全相關的管理問題則提供指導與改善期限，形成剛柔並重的監管模式。

2.1.3 經濟激勵　設立《安全項目投入計劃》

為解決承造商因價格競爭而壓縮安全預算的痛點，澳門勞工事務局聯合的本地工務部門於 2020 年 6 月推行《安全項目投入計劃》。

• 適用項目對象：適用於判給金額大於 1,000 萬澳門元且聘有監察實體的公共工程。

• 資金獨立機制：在工程判給合約中，獨立預留一筆專項安全費用（不包含在工程項目判給的總金額內），由工程開展實體按判給金額的特定比率訂定，確保專款專用。

• 按月動態綜合評分發放機制：經費用途被嚴格限定於實施安全措施、裝備、培訓和建立良好的安全管理體制。款項發放採取每月評估機制，由施工過程中的“工地安全表現”（佔 70%）與“安全培訓”（佔 30%）兩部分組成。

2.1.4 市場聯動　承造商職安健評分與“商社通”app 查詢平台

澳門勞工事務局自 2009 年推出《承造商的建築工程職安健評分系統》，以承造商近三年的違規情況、事故、停工令及安全比賽獲獎進行客觀數據評級。該評分作為澳門的工務部門評標時了解承造商安全表現的參考要素。近年系統與澳門“商社通”應用程式平台對接，承造商可隨時透過線上查看自身評分，引導企業高層將職安健視為安全形象與競爭力指標。

表 2–1　“雙軌驅動”政策

	第一軌　政府主導 （資源鼓勵+法規監察）		第二軌　政策引導 （企業自主管理）	
對象	建築業		博彩業、酒店及飲食業	
主要措施	•法律強制 •經濟激勵	•分級監管 •市場聯動	•制度建設 •社會責任	•自願約章 •健康推廣
政策基礎	階梯式安全培訓體系			

2.2 第二軌　政策引導：企業自主管理

2.2.1 制度建設　制度化與常態化自我規管

綜合旅遊休閒企業在 ISO 45001 體系的基礎上建立專責職業安全健康委員會與專業部門，形成制度化的安全管理。澳門勞工事務局持續透過與綜合旅遊休閒企業多方合作，促進職安健管理與資源投入成為企業核心常規性的策略方針，以及使其成為綜合旅遊休閒企業必須履行的責任義務。此外，澳門勞工事務局亦因應現行的職安健法規，配合業界職安健持續發展的需要，製作並推出《綜合旅遊休閒產業員工職業安全健康指引》，為綜合旅遊休閒企業的各個營運部門提供規範性的工作安全指引，以及為管理層訂定安全政策與相應措施的重要依據。

2.2.2 自願約章　鼓勵企業簽署《職業安全健康約章》

澳門勞工事務局鼓勵綜合旅遊休閒企業、酒店、飲食業企業的勞資雙方積極簽署《職業安全健康約章》，將職安健管理延伸至每一位員工身上，共同關心，加強自我規管的向心力。

2.2.3 社會責任　提升員工福祉的核心驅動力

澳門特區政府與綜合旅遊休閒企業簽訂特

許經營批給合同時，已明確要求企業履行社會責任，當中必須關注工作人員的勞動權益，包括提供安全健康的工作環境、職業發展機會及完善的勞動保護。此外，綜合旅遊休閒企業還需關注員工身心健康，並透過定期教育訓練與福利提升，促進工作與生活之間的平衡。

2.2.4 健康推廣 “送服務上門”健康職場路演

澳門勞工事務局與綜合旅遊休閒企業定期合辦“健康職場生活話你知”路演，透過職場安全體驗、工作坊和路演攤位，向工作人員推廣職業健康意識，將安全常駐在心。於 2025 年，參與路演活動的綜合旅遊休閒企業工作人員數量合共 52,488 人次。

2.3 階梯式安全培訓體系

安全知識普及與工作習慣的養成，是預防不安全行為的根本。澳門勞工事務局已建立一套系統化、分層級、可持續發展的職業安全健康人才培育機制。它根據從業人員的角色與職責，將培訓分為四個層級，從“基層工人”到“管理人才”，逐步深化知識與技能，實現“人人有基礎、行行有專才、企業有骨幹”的目標。

圖 2–1 澳門勞工事務局階梯式安全培訓體系

2.3.1 第一階：安全基礎

為提升澳門重點行業基層勞動者的職業安全與健康意識，保障工作人員在高風險環境中的工作安全，勞工事務局開辦《建築業職安卡》及《酒店及飲食業職安卡》培訓課程，藉此推動各行業建立安全有序的工作文化，落實“安全第一”的職場原則。

• 建築業職安卡[7]：自 2002 年開辦，2014 年立法實施。課程涵蓋職安健法規、工地基本安全概念、預防工作意外措施及個人防護裝備實操訓練等。課程開辦至今參與 6 小時課程的學員合格率為 92.4%，而 5 年期滿後修讀的 3 小時重溫班，合格率提升至 96.7%，整體升幅達 4.3%，印證了從業人員已實現由“認識知曉”向“預防為先”，達至在安全意識上的實質轉變。

• 酒店及飲食業職安卡[8]：聚焦酒店業、飲食業的工作場所和營運部門的工作安全要點，包括體力處理操作、用電安全和化學品安全等。截至 2026 年 6 月，持有效卡人數已達 104,525 人，建立了行業安全基礎教育基線。

2.3.2 第二階：深化專項訓練

針對高空工作、用電安全、吊運工作及密閉空間作業等高風險工序，澳門勞工事務局推出《建築安全特定訓練計劃》，旨在強化相關人員的危害認知與防範能力。其中《密閉空間危險評估及安全管理進階課程》專為中高層管理人員設計，著重培養風險評估、工作許可簽發與現場監督能力。

2.3.3 第三階：高階管理專才

為滿足企業職安健自我規管以及對管理人才的需求，澳門勞工事務局與澳門大學、澳門科技大學、澳門生產力暨科技轉移中心及澳門建築安全協會等機構合作，開辦多項高階管理證書課程：

• 建築業安全督導員培訓課程：培育前線安全管理專業人員。

• 建築業安全主任與安全審核員培訓課

程：培養企業安全管理階層專業人才。

• 職業安全健康主任證書課程：專為跨行業（包括綜合旅遊休閒企業及酒店飲食業）培育管理階層人才。

2.3.4 第四階：表彰激勵

作為階梯式安全培訓體系中最高階層，《飲食業職安健獎勵計劃》與《建築業安全施工獎勵計劃》扮演著“激勵卓越、樹立典範”的關鍵角色。這兩項計劃不僅肯定在職安健表現上出類拔萃的企業與個人，更透過公開評審、獎項表揚與經驗分享，將優秀實踐轉化為行業標竿，推動由“合規”邁向“優質安全文化”的升級。它們既是對長期投入職安管理的企業與人員的最高認可，也發揮“以點帶面”的輻射效應，鼓勵全行業追求更高標準，真正實現“人人有基礎、行行有專才、企業有骨幹”的職安發展願景。

3 政策多元下的綜合治理與成效評估

在“雙軌政策”的引領與業界的積極參與下，澳門整體職業安全狀況持續改善。透過對建築業、酒店及飲食業與博彩業在 2016 年至 2025 年間千人意外率變化的分析[9]，可全面反映出“雙軌驅動”政策對不同行業職安健發展的實質成效。

3.1 建築業的安全水平呈現顯著提升

建築業持續保持平穩向好發展，呈現出“高風險、低發生率”的有效防控局面。

• 違規、起訴及千人意外率呈顯著下降[10]：建築業每年在巡查總次數 3,000 多次的實地監督下，澳門勞工事務局提出的改善建議由 2016 年 1,558 項次下降至 2025 年 266 項次；同期的起訴與處罰個案則由 489 項次下降至 24 項次；停工令由 30 項下降至 1 項；千人意外率由 23.7‰下降至 12.6‰。

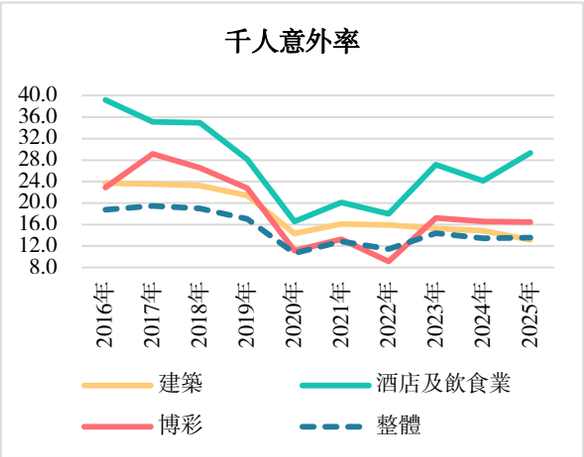


圖 3–1 澳門三個重點行業的近年工作意外千人率狀況（單位：‰）

• 承造商職安健評分顯著向高分區間集中[11]：按統計顯示，獲得“良好”高評級的承造商佔比，由早期約 40%的水平上升至 60%左右；同時，代表安全風險較高的“不滿意”與“差”劣評佔比下降至 2%左右，體現出施工現場的職安健情況實現了向優質階梯的結構性位移。

由此可推斷，澳門建築業已由過去的“違規高發”轉向“合規施工”的水平，彰顯建築業在勞資政三方共同努力下，職安健表現漸見成效。

表 3–1 澳門建築業職安健巡查及執法情況明細表（2016 ~ 2025）

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
年巡查次數（次）	3,149	3,564	3,197	4,095	3,342	3,658	3,001	3,780	3,520	3,262
提出改善建議（項次）	1,558	1,447	1,486	1,386	1,241	1,204	583	444	395	266
起訴個案（項次）	180	234	142	133	97	91	65	51	5	10
處罰個案（項次）	309	490	252	221	201	152	92	87	7	14
停工令個案（項次）	30	87	39	23	15	13	3	3	4	1
千人意外率（‰）	23.7	23.5	23.2	21.4	14.3	16.1	15.9	15.3	14.9	12.6

表 3–2 《承造商的建築工程職安健狀況評分系統》統計數據（2016～2025）（單位：%）

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
良好（91～100 分）	41.9	40.3	42.6	49.2	56.0	63.0	69.5	49.2	56.0	63.0
滿意（76～90 分）	48.4	46.4	39.9	32.7	28.4	25.0	21.5	32.7	28.4	25.0
普通（50～75 分）	8.4	10.4	13.1	13.9	12.4	9.8	7.5	13.9	12.4	9.8
不滿意（30～49 分）	1.2	2.6	3.7	3.6	2.8	1.8	1.1	3.6	2.8	1.8
差（0～29 分）	0.2	0.4	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.6	0.4	0.4

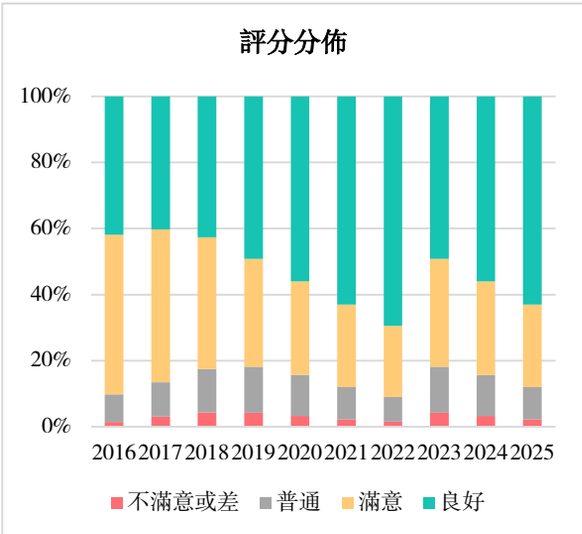


圖 3–2 《承造商的建築工程職安健狀況評分系統》評分分佈圖（2016～2025）（單位：%）

3.2 博彩業與酒店及飲食業仍受挑戰

博彩業與酒店及飲食業的就業人口約佔整體就業人口的三成，屬於澳門經濟與勞動市場的核心組成部分。隨著近年旅遊業全面復甦及業務量增長，該等行業的職業安全狀況出現波動與反彈。具體而言，博彩業的工作意外千人率總體保持平穩且呈輕微下降趨勢；酒店及飲食業的意外率近年雖有明顯回升，但整體表現仍優於 2019 年之前的水平。這反映“雙軌驅動”政策已初見成效，惟未來仍須因應行業差異，尋求合適的方案，深化相應的措施，以推動澳門第三產業穩步健康發展。

4 結 論

“雙軌驅動”職安健政策模式體現了澳門在面對多元產業風險與治理挑戰下的創新思維與務實管理。透過“第一軌”對建築業實施法律強制、分級監管與經濟激勵相結合的政府主導策略，有效壓降違規行為與工作意外率，推動行業由“被動合規”邁向“主動預防”；同時，透過“第二軌”引導綜合旅遊休閒等大型企業建立自主管理機制，強化制度建設、自願約章與健康推廣，促進職安健文化融合為企業安全文化的一部分。數據顯示，澳門整體千人意外率持續下降，展現政策執行的積極成效。其中，建築業整體安全表現顯著提升，而博彩業與酒店及飲食業的職安健水平仍有待提升。展望未來，隨著新興產業發展與非典型就業形態興起，面對龐大就業基數與行業復甦時產生的波動影響，職安健治理需進一步深化科技應用、強化風險預警能力、提高服務高峰時期的抗干擾性，並推動跨域協作與區域學術交流。唯有持續優化“雙軌驅動”機制，擴大政策覆蓋面與靈活性，方能穩步實現“零意外、零傷亡”的長遠願景，為澳門建設宜居宜業、安全可持續的現代化城市奠定堅實基礎。

參考資料

[1] 澳門特區政府,《澳門特別行政區經濟和社會發展第二個五年規劃（2021–2025 年）》。

[2] 澳門統計暨普查局,《2026 年上半年本地生產總值初步數值》

[3] 澳門統計暨普查局,2025 年《本地生產總值》報告

[4] 澳門統計暨普查局, 2026 年第 2 季《就業調查》

報告

［5］ 澳門勞工事務局, 2025 年工作意外統計數據

［6］ 澳門第 2/2023 號法律《建築業職業安全健康法》。

［7］ 澳門勞工事務局,《建築業職安卡》數據庫。

［8］ 澳門勞工事務局,《酒店及飲食業職安卡》數據庫。

［9］ 澳門勞工事務局,《工作意外統計報告》及《工傷統計分析報告》（2016 ~ 2025）。

［10］ 澳門勞工事務局,《職安健巡查工作統計資料》（2016 ~ 2025）。

［11］ 澳門勞工事務局,《承造商建築工程職安健評分系統》數據庫（2016 ~ 2025）。

［12］ 澳門勞工事務局,《全方位提升澳门建筑业职安健发展政策》, 第二十八屆海峽兩岸及香港、澳門地區職業安全健康學術研討會論文。

［13］ 澳門勞工事務局,《全方位提昇澳門酒店業及飲食業的職安健水平》, 第二十九屆海峽兩岸及香港、澳門地區職業安全健康學術研討會論文。

［14］ 澳門勞工事務局,《營造職安健創新思維：以公共工程安全投入的發展策略分析》, 第三十屆海峽兩岸及香港、澳門地區職業安全健康學術研討會論文。

淺談澳門建築行業“施工安全優先於速度”的哲學邏輯與實踐路徑

駱增毅
澳門建築安全協會

摘　要：在建築工程安全管理領域，安全與工期速度的權衡取捨，是建築行業長期存在的核心難題，亦是澳門建築業實現高質量、可持續發展的關鍵命題。本文立足澳門建築業真實施工場景，結合本地多年工地巡查、安全評審、行業規範落地與企業安全輔導的實務經驗，依托「人民至上、生命至上」的安全生產核心理念，對標內地《安全生產法》、香港《工廠及工業經營條例》、《職業安全及健康條例》與澳門《建築業職業安全健康法（第 2/2023 號法律）》立法精神及實施規範，整合粵港澳三地工程管理差異、本地事故數據與真實項目案例，從存在論、價值論、系統論等維度系統剖析“施工安全”與“施工速度”的辯證關係。針對澳門工程體量偏小、施工場地密集、舊改項目集中、施工節點趕工剛性強、中小型項目管理水平參差的行業特徵，客觀梳理本地安全管理的發展成效與現存短板，借鑒鄰近地區及國際成熟工程安全管理經驗，探討一套適配澳門場景、可落地、可執行、可推廣的安全優先管控實踐路徑，為澳門建築業優化職安健治理體系、正視因趕工引發的安全隱患、推動行業精細化與規範化升級提供實務參考。

關鍵詞：施工安全；施工速度；澳門建築業；職安健管理；安全生產；工程現場管控；實踐路徑

引　言

澳門建築業是本地城市更新、舊區活化、基礎設施迭代、文旅配套升級的核心支柱行業，同時具備施工密度高、場地受限、作業風險集中的行業屬性。不同於內地大規模基建工程與香港標準化大型公共工程，澳門建築項目普遍呈現「場地狹窄、立體交叉作業密集、施工動線緊湊、小型零散項目多、商業交付節點剛性極強」的鮮明特點，這也使得本地安全與工期的矛盾更為突出。

多數發展項目受文旅旺季、商業運營節點影響，普遍存在重工期、重效益、輕隱患、輕長期風險的行業慣性，為趕節點、搶開業、追進度，常出現壓縮施工工序、簡化驗收流程、夜間超時施工、弱化現場安全監管等問題，均是澳門建築工傷事故與隱患反覆發生的核心誘因。安全是工程發展的根本前提，脫離安全保障的工期進度與經濟效益皆不具備實際意義。對照澳門勞工事務局歷年職安健數據可見，本地絕大多數施工安全事故，均與不合理趕工、安全工序讓位施工速度、現場管控缺位直接相關[1]。對比其他地區剛性安全管控、工地零容忍執法模式，澳門建築業在安全與速度的動態平衡管控方面，仍有較大提升空間。

基於澳門本土工程實務特點與行業發展現狀，本文跳出單純理論層面，務實厘清安全與速度的本末邏輯，客觀探討本地行業發展成效

與真實短板，結合粵港澳三地優秀工程實踐與國際成熟管理經驗，搭建適配澳門中小型密集施工場景的安全優先管理體系，破解「趕工必存隱患、提速必然降標」的行業頑疾，推動澳門建築業從趕工模式向「安全穩速、精細高效」的高質量發展模式轉型。

一、安全與速度的本質關係：行業實務視角下的哲學邏輯

（一）存在論：人員安全是施工開展的先決條件

從建築安全現場實操層面來看，工程施工的核心主體是現場從業人員，而單非機械設備與施工進度。哲學層面「存在先於本質」的內涵，落實於澳門工地場景可具象為：人員安全健康是一切施工生產開展的基礎前提[2]。澳門工地普遍存在空間壓縮、多工種交叉、立體同步作業的特點，風險集中度遠高於常規標準化工地。若為追逐施工速度、壓縮工期，省略防護建設、隱患排查、工序間歇、現場監督等剛性環節，極易引發如高空墜落、物體打擊、機械傷害、高溫不適等連鎖安全事故。

從法理與行業合規層面，澳門 2023 年正式施行的《建築業職業安全健康法》，已從法律層面明確安全工序的剛性屬性，禁止因工期壓力、商業節點壓縮或豁免安全流程。對比內地《安全生產法》、香港《工廠及工業經營條例》可見，粵港澳三地監管邏輯高度統一：施工進度可靈活調整、施工方案可優化迭代，但人員生命安全底線絕對不容讓步。現場實踐充分證明，所有盲目趕工的短期提速，均以隱患積累、安全透支為代價，一旦發生安全事故，所有工期成果、經濟收益都將徹底歸零。

（二）價值論：生命價值遠高於項目短期工期效益

從行業價值排序來看，舍勒價值層級理論所闡述的「生命價值優先於功利價值」，完全契合建築安全管理的一線實況[3]。習近平總書記亦多次明確指出：人命關天，發展決不能以犧牲人的生命為代價。這必須作為一條不可逾越的紅線[4]。

在建築行業，任何商業收益、工期紅利、項目業績，都無法與從業人員的生命健康、家庭幸福相提並論。澳門建築項目多處於城區核心地段，緊鄰民居、商場、文旅人流密集區，施工安全不僅關乎一線工友，更關係到城市公共安全與社會穩定，其公共價值遠遠超過項目短期的經濟收益。

從行業事故複盤與治理經驗來看，輕微工傷事故便會造成工人就業受限、項目停工整改、工期滯後、企業信譽受損、行政處罰等連鎖損失；重大安全事故更會對企業、行業乃至社會造成不可逆的負面影響。澳門《勞動關係法》、《建築業職業安全健康法》均明確賦予作業人員拒絕危險作業、抵制違規趕工的合法權利，從制度層面築牢生命優先的發展底線。對比鄰近地區成熟的安全零容忍文化、內地嚴格的安全責任終身追究機制，澳門行業安全治理水準近年已實現大幅提升，但部分中小型商業項目仍存在重利輕安的僥倖思維，是行業持續優化整治的重點領域。

（三）系統論：安全穩定是施工連續推進的核心基石

依據一般系統論原理，工程施工是一個人員、設備、環境、工序高度耦合的動態系統[5]，這一點在澳門高密度施工場景中體現得尤為明顯。內地大型工地空間相對充足、工序分區清晰、設施標準化程度高，風險緩衝空間大；香港公共工程監管嚴格、工序驗收剛性，隨意趕工情況較少。而澳門多數施工場地空間受限、工序緊湊、交叉作業頻繁，整個施工系統的容錯率極低、抗風險能力偏弱。

從現場管理實務來看，規範的安全工序並非拖慢進度的負擔，而是保障工期穩定、實現高效施工的核心支撐。防護搭設、工序檢測、

隱患排查、惡劣天氣停工等法定安全環節，表面上佔用一定工期，本質上是保障施工安全、杜絕及規避事故停工的關鍵舉措。諸多本地項目實例證明，大量工程為趕速度省略安全，短期看似提升進度，後續易出現施工瑕疵、防護失效、隱患堆積等問題，最終引發大面積整改，整體工期與經濟效益反而大幅受損。由此可見，唯有安全管理體系穩定運行，施工系統才能實現連續、高效、有序推進。

二、澳門建築業安全與速度失衡的實證分析（行業實務視角）

（一）本地負面案例复盘：趕工思維帶來的現場真實損失

梳理澳門歷年施工安全事故與行業巡查數據可發現，本地安全事故高發於商業改造、酒店擴建、舊區更新等趕工需求強烈的項目，事故誘因高度集中，核心問題均為追逐商業節點、人為壓縮安全管理環節、放鬆現場管控標準。

以某酒店改造擴建項目為例，為趕春節文旅旺季開業節點，施工單位壓縮施工周期，現場管理團隊為迎合工期要求，調整施工組織方案，開展夜間高風險交叉作業，夜間安全監督弱化、簡化防護設施檢查。最終在作業過程中，因現場防護不到位、風險管控缺失，引發工人高空墜落事故。事故發生後，勞工事務局依法啟動立案調查，項目全面停工整改，不僅原定的開業計劃落空，產生巨額整改成本與工期滯後損失，企業同時面臨行政處罰、信譽受損、後續投標受限等深層影響。

從行業層面复盘，該案例並非個例，集中反映了澳門商業項目的普遍痛點：過度追求商業時效，施工管理團隊存在僥倖心理，認為小型改造項目風險低、短期趕工不會出大事，最終造成「求速則慢、趕必誤工」的反向結果，是本地行業需要長期警示的典型教訓。

（二）優秀項目借鑒：安全從不衝突高效施工

從澳門本地眾多高質量示範項目運行成效來看，「安全優先」與「高效施工」並不衝突，規範化、標準化的安全管理，反而能夠有效規避隱患、保障工期穩定，實現安全、效率的協同統一。

澳門某大型口岸基建項目，是本地安全與進度平衡管理的正面範例（是澳門本地大型基建項目首個獲得“年度 ENR 全球最佳工程–優異獎”項目）。項目團隊嚴格落實澳門職安健法律規範，創新將安全巡查、工序合規、隱患整改與班組績效、工程款支付掛鉤，從制度上杜絕搶進度、輕安全的行為。項目建設期間雖受颱風、暴雨等極端天氣影響短暫停工，但全程無重大隱患、無安全事故、無大面積返工，最終高質量、按時完成交付，整體施工效率遠高於同類粗放趕工項目，充分驗證适配澳門場景的安全管理模式，能夠實現安全、質量、效率三者統一。

鄰埠地區高鐵隧道工程等高風險重點項目，同樣具備借鑒價值。項目面對複雜地質與工期壓力，管理團隊始終堅持安全底線不讓步，嚴格執行工序驗收、風險排查、分層管控機制，不接受任何不合理趕工要求，最終實現零重大隱患完工。這類先進案例證明：真正高效的工程管理，是穩中求進、安全先行，而非盲目提速、冒險趕工。

（三）區域對比：澳門行業真實優劣態勢

對比粵港澳三地建築行業發展態勢可發現澳門行業鮮明特徵：本地單體項目規模有限，重大群死群傷事故發生概率較低，但項目密度大、施工場景複雜，小型隱患與常見工傷事故高發；事故直接經濟損失相對可控，但工期節點延誤、商業運營損耗、企業品牌信譽受損等間接影響更為深遠。

從行業規律來看，科學的安全投入、規範的現場管控，是降低返工、穩定工期、減少停工損耗的核心手段。中國內地、香港眾

多項目數據與實踐均證明，堅持安全優先的項目，綜合效益遠高於粗放趕工項目。澳門仍有部分企業只看到安全管理的短期投入，忽視了事故、返工、整改帶來的長期損失，是行業長期存在的認知誤區，也是後續行業優化升級的重點。

三、澳門建築業安全管理現狀與提升空間

（一）制度體系完善，但現場執行存在彈性空間

從客觀數據分析而言，近年澳門建築業職安健體系迎來質的飛躍，隨著第 2/2023 號法律及配套行政法規落地，本地行業有了明確、完善、系統的法律依據，監管標準、責任劃分、處罰機制全面升級，早年無規可依、管理標準模糊的局面徹底扭轉，全行業合規水平整體大幅提升。是全行業有目共睹的進步，也是多年行業整治、社會推廣、企業自律的重要成果。

但從一線落地實況來看，目前存在「立法完善、執行偏軟、參差分化」的現實問題。當前澳門大型公建、政府重點項目執行標準較高、管控極嚴、示範性強，但大量小型舊改、私人商業翻新、零散民建項目，因為體量小、工期短、隱蔽性強，存在監管覆蓋不足、執法尺度相對寬鬆的情況。部分業主與施工方容易利用這一特點，以商業節點為由尋求管理讓步，簡化安全流程、放鬆現場管控，監管層面偶有柔性處置，導致違規趕工問題難以徹底根治，成為行業管理的主要短板。

（二）智慧化管控逐步普及，但中小項目落地不足

近年在政府推動與行業協會引導下，澳門重點項目、大型合資項目已開始引入數字化、智慧化安全管控手段，BIM 技術、實時監控、AI 視像化巡查逐步落地，行業智慧化水平較過去有明顯提升。但智慧工地、數字孿生管控模式，等智慧化建設仍處於初級階段。

目前本地大多數中小型項目，仍依賴傳統人工巡查、肉眼排查、事後整改的傳統模式，管理效果主要依靠安全管理人員經驗，只能被動解決顯性的隱患，較難識別工人精神疲勞作業、高溫透支體力、隱性工序簡化、高危區域違規進入等深層風險。傳統單一管控模式，日後難以適配澳門高密度、高強度的施工場景，也是小型隱患反覆發生的核心技術短板。

（三）從業隊伍素質整體提升，但基層管控仍有短板

伴隨澳門“建築業職安卡”強制培訓、常态化普法宣導、行業社會公益培訓的持續開展，近幾年本地建築從業人員的安全意識、合規理念、自我保護能力較早年大幅提升，一线工人從「不懂安全、無視規範」逐步轉變為「知風險、守規範、懂防護」，基層安全管理體系日趨完善。

但澳門用工結構的特殊性，導致基層管理仍存在固有短板。本地施工隊伍以流動務工、臨時班組為主，人員流動性大、更替頻繁，系統化培訓難以全覆蓋，部分工人專業素質參差不齊。在現場趕工壓力下，多數工人為保證就業、配合工期，習慣被動服從管理指令，缺乏主動識別風險、拒絕違規作業的底氣與意識。同時中小型項目普遍存在安全人員配置不足、崗位獨立性不夠的問題，安全管理人員時常受工期考核、上級干預影響，難以剛性落實監管職責，導致基層管控容易流於形式。

（四）行業安全氛圍持續向好，但主動安全文化尚未成型

基於長期參與服務澳門建築行業的經驗和理解，本地行業安全文化建設成效十分顯著。早年那種「憑經驗施工、靠運氣趕工、輕視安全規範」的粗放行業風氣已經大幅改觀，現階段全行業合規意識普遍提升，正規企業、絕大多數項目都能建立常态化自查、安全培訓、施工前交底和隱患整改等機制，安全生產已經成為行業常態共識。

但對比其他地區較成熟的「零容忍」自治文化、全域共治的安全氛圍，澳門行業文化仍處於持續轉型升級階段。目前多數企業負責人和前線從業人員的安全行為，仍以「合規避罰、應對檢查」的被動執行為主，尚未真正形成「安全是效益、安全是效率、安全是口碑」的主動型行業理念。部分小型民營項目、零散改造項目仍殘留趕工僥倖思維，企業主動投入安全建設、培育安全文化的積極性不足，是後續行業軟實力提升的核心方向。

四、適配澳門的安全優先管理優化實踐路徑

結合澳門本地工程施工特性、監管落地現狀與行業發展短板，同時借鑒粵港澳三地及國際成熟工程安全管理經驗，本文從制度、技術、管理、文化四個核心維度，探索一套貼合澳門實況、落地性強、可複製推廣的本土化安全優先管理實務方案，以助力行業破解安全與速度的平衡難題。

（一）制度層面：壓實剛性約束，縮小大小項目管理差距

針對本地「大項目規範、小項目鬆散」的差異化管理問題，建議進一步強化制度執行剛性，統一全行業執法與管控標準，減少柔性執法與杜絕趕工豁免。首先，推行法定安全工期預留機制，將安全施工方案設計、集體防護、安全檢測、工序驗收等不可壓縮的安全環節，明確納入施工合同與施工組織設計，從合同源頭杜絕不合理工期壓力，禁止以商業節點壓縮安全工期。其次，強化跨部門聯合聯檢機制，針對夜間施工、小型舊改、隱蔽性改造等高風險場景，開展常态化隨機檢查，對未經許可的強令趕工、簡化工序、弱化安全管控的行為實施零容忍處罰，大幅提升違規成本。再而，加強安全績效掛鉤機制，將企業安全合規記錄、事故情況、整改成效與本地投標資格、信譽評級、行業公示直接掛鉤，使中小企業主動落實安全主體責任，實現全行業管理標準統一升級。

（二）科技技術層面：引入國際輕量化智慧設備，強化源頭預控

結合澳門項目體量小、預算靈活、場地密集、高溫作業多的特點，未必需要照搬內地大型重資智慧工地體系，可優先引入於工程界成熟應用的輕量化、高實用、低成本的智能管控工具，適配本地中小項目場景。

如人員健康監測手環，替代傳統單一功能電子安全工卡，該手環集成實時體溫、心率、體力疲勞監測、超時作業記錄、高精度定位、高危區域報警、SOS 緊急呼救等功能，可實時監測工人高溫疲勞、超時趕工、違規闖區等隱性風險，後台自動預警、數據留痕，協助解決人工巡查無法發現的較深層安全隱患，精准匹配澳門職安健法對於人員健康與安全動態管控的要求。同時，在重點項目普及簡易 BIM 風險模擬技術，提前排查工序衝突與趕工風險；針對大型公建項目搭建簡易數字化實時監控平台，實現風險從事後整改向前置預控轉變，全面提升現場精細化管控水平。

（三）管理層面：優化基層機制，激活全員安全自律性

基於澳門用工特性與基層管理短板，強化工友安全代表制度與全員安全責任機制，搭建適配本地的基層管控體系。一，全面推行本地化工友安全代表制度，從各工地選取資深、持證、經驗豐富的本地工人擔任安全代表，獨立於施工管理體系，賦予隱患舉報、違規制止、緊急停工的實權，解決基層監管缺位、安全崗位不獨立的問題。二，建立常態化安全激勵機制，從項目工程款中提取專項安全獎金，對零隱患、零違規、零事故的班組與個人給予獎勵，將安全表現與薪酬、評優掛鉤，調動一線工人主動守安全、拒趕工的積極性。三，固化班前安全培訓和危害分析、完善培訓需求分析、細化分層分類培訓機制，針對流動工人、新入場工人開展針對性培訓，重點講解趕工作

業危害、高危風險識別與自身權益保護，全面提升從業隊伍整體安全素養。

（四）文化層面：鞏固現有成效，培育本土主動安全文化

依托澳門行業平台、政府監管部門與從業企業的多方合力，持續鞏固現有安全治理成果，推動行業安全文化從「被動合規」向「主動自律」深度升級。一，常態化開展本土案例警示教育，以澳門本地整改案例、優秀示範項目、真實事故教訓為載體，直觀傳遞盲目趕工的風險隱患與安全管理的核心價值，強化全行業風險認知。二，深耕示範引領機制，持續表彰安全管理優秀企業、零事故示範工地，系統總結可複製、可推廣的本土管理經驗，以行業標桿帶動整體水平提升。三，強化行業輿論引導與規範普及，常态化宣貫《建築業職業安全健康法》等相關規範，逐步破除行業殘存的速度崇拜、趕工僥倖思維，培育「安全優先、穩速增效、合規自律」的澳門本土建築安全文化，成為區域內行業安全管理的先導者。

五、結論與展望

結合哲學邏輯推演、區域行業對比、真實案例複盤與本地工程實務可明確得出核心結論：

（一）生命是終極目的，速度只是工具：

（1）人的生命與健康具備內在價值，本身就是人類一切生產建設的終極目的。建造工程、基建開工，根本目的是服務人的生存、生活、使用需求；工人的生命存在，是所有勞動能夠發生的前提。

（2）施工速度、工期進度屬於工具價值。搶進度、趕工期僅是實現工程落地的手段，手段永遠不能凌駕目的。

（3）本體上：生命是目的，速度是工具，工具服從目的；規律上：安全是穩定施工的必要條件，無安全則無長期速度；價值上：進度損失可挽回，生命損失不可逆；實踐上：犧牲安全趕工短期有利、長遠全盤失利。

因此在任何施工場景，安全具邏輯必然性的優先地位，施工速度只能在安全邊界之內追求，絕不能反向逾越安全底線。

（二）進度可調，生命不可重來

施工安全優先於施工速度，是澳門高密度、小型化、商業導向施工場景的必然選擇，也是行業高質量發展的核心底線。

綜觀，近年澳門建築業安全發展及治理成效顯著，法律規範體系日趨完善、監管機制持續優化、從業人員素質穩步提升、全行業安全氛圍大幅向好，扭轉了早年粗放施工、安全缺失的落後局面。但對比內地、香港部分先進工程管理模式，本地在行業執行剛性、中小項目智慧化管控覆蓋、基層全員安全共治、主動安全文化培育等方面，仍存在合理的提升空間。整體來看，澳門建築業安全問題並非制度體系缺失，而是企業領導層落地執行參差、技術管控薄弱、基層自律不足、行業理念轉型不徹底帶來的階段性行業短板。

未來澳門建築業高質量發展，需持續鞏固現有安全治理成果，堅持「人民至上、生命至上」的核心理念，徹底摒棄速度優先的落後思維，緊扣本地項目發展特性，借鑒粵港澳及國際先進管理經驗，通過強化制度剛性落地、推廣輕量化技術賦能、優化基層管控機制、培育本土安全文化，實現一套適配澳門、操作性強及可持續運行的安全優先管理體系，實現安全、速度、效益的辯證統一，推動澳門建築業向精細化、標準化、智慧化、高質量化全面轉型，為本地城市更新與基礎設施建設保駕護航。

參考文獻

［1］ 澳門特別行政區政府勞工事務局. 2023 年澳門建築業職業安全健康報告［R］. 2024.

［2］ 薩特 J. P. 存在主義是一種人道主義［M］. 周煦良, 湯永寬, 譯. 上海：上海譯文出版社, 2012.

［3］ 舍勒 M. 倫理學中的形式主義與質料的價值倫理學

［M］. 倪梁康, 譯. 北京：商務印書館, 2010.

［4］《習近平關於安全生產重要論述讀本》. 第一篇第一条. 2013.

［5］貝塔朗菲 L. V. 一般系統論：基礎、發展和應用［M］. 秋同, 袁嘉新, 譯. 北京：社會科學文獻出版社, 1987.

关于建立中国大陆注册职业卫生师制度的探讨与展望

吴　松
中国职业安全健康协会

摘　要：职业健康是落实健康中国战略、保障劳动者权益的核心民生工程，中国大陆职业健康治理正由传统事后管控模式向全域主动健康促进转型。2017—2023 年中国大陆职业病总体发病规模呈下降趋势，但传统尘肺病负担仍较重，噪声、振动等物理危害及职业性耳鼻喉疾病等新型职业风险持续攀升，新老危害交织叠加，职业病防治工作面临严峻挑战。当前中国大陆尚未建立统一标准化的职业卫生执业资格认证体系，职业卫生专业人才存在供需缺口巨大、队伍结构失衡、学科培育滞后、服务能力参差不齐等突出短板，已成为制约职业健康治理现代化的薄弱环节。本文依托国家职业病防治相关政策导向，结合中国职业安全健康协会多年行业实践，系统阐释注册职业卫生师制度的构建逻辑、四维复合型能力评价框架与五大核心执业职能，梳理协会在教材开发、标准化培训、能力考核、团体标准制定、人才培养等方面落地成效；对标美国 CIH、英国 NEBOSH、日本注册职业卫生师等国际成熟行业自律认证模式，总结全球职业卫生人才职业化发展共性路径。结合国家卫生健康委政策规划，预判未来将通过完善学科建设、调整国家职业资格目录、修订《职业病防治法》等途径，推动注册职业卫生师制度法治化落地。研究表明，注册职业卫生师制度能够填补行业统一人才评价标准空白，培育复合型职业健康专业技术队伍，打通政府监管、企业主体责任落实、劳动者健康保障的专业支撑通道，是构建“政府监管、企业负责、社会服务、劳动者参与”多元协同职业健康治理体系的关键举措。

关键词：职业健康；注册职业卫生师；人才评价；职业病防治；行业自律认证

科技赋能安全创新　协同共筑健康未来

王　雷
中国安全生产协会副秘书长 高级工程师

摘　要：本文为第三十一届海峡两岸及香港、澳门地区职业安全健康学术研讨会大会发言材料，围绕“职安健新典范：科技、创新与关怀”主题，阐述科技创新赋能职业安全健康事业发展的实践与思考。在人民至上、生命至上理念指引下，我国实施科技兴安战略，依托系列政策规划引导职安健工作从事后处置转向事前预防。面对新型工业化、新就业形态带来的传统与新型职业健康风险叠加挑战，需要依靠科技创新破解治理难题。中国安全生产协会构建“基金赋能、奖励激励、成果推广、学术交流、人才培育”五位一体工作体系，通过设立安全应急科技创新基金、安全科学技术奖，创办英文国际期刊，开展标准研制与区域学术交流等举措，推动安全科技成果转化落地。当前智能风险预警、职业病危害防护、数字化安全培训、新业态职安健研究等技术应用不断深化，但仍存在中小企业应用成本高、技术适配性不足等现实问题。文章提出两岸四地应坚守守护劳动者健康的初心，用好学术平台共享创新成果，互鉴标准经验帮扶中小微企业，深化人才交流培养，携手推进区域职业安全健康治理能力提升，共同筑牢劳动者安全健康屏障。

脊髓損伤：摧毁工人一生的意外

副主席林楚賢教授
香港職業安全健康局

摘　要：脊髓損傷（SCI）是工業意外中最具破壞性的傷害之一，常導致多種器官功能障礙與永久性殘疾。在所有工業事故類型中，當中工人從高處墜落或被墜落物體擊中是引發嚴重脊髓損傷最常見且最直接的成因。這類意外往往對頭部、頸部或背部造成劇烈衝擊、壓迫或扭曲，導致傷者面臨長期康復、功能受限及生活品質嚴重下降的挑戰。為預防此類不可逆的傷害，企業必須落實系統性的職安健風險管理，從源頭上杜絕此類嚴重傷害的發生。

在傷害發生後，SCI 康復以結構化、分階段的臨床管理為核心，旨在最大程度地促進功能恢復並提升生活質量。介入重點包括脊柱的早期穩定、预防繼發性併發症、呼吸及心血管管理、腸道與膀胱功能訓練、痙攣控制、疼痛管理，以及長期隨訪。跨學科團隊—涵蓋物理治療、職業治療、輔助技術及心理社會支持—幫助受傷工人在恢復活動能力、提升獨立性及促進重返社區方面發揮關鍵作用。

儘管新興療法具發展潛力，現階段臨床康復仍以循證策略、功能訓練，以及根據不同損傷類型與恢復軌跡量身制定的個體化照護路徑。本報告旨在為企業與職安健從業人員提供關於脊髓損傷後果與康復過程的概要說明，並再次強調：唯有透過源頭控制與積極預防，才能真正避免此類嚴重職業傷害的發生。

数智驱动：员工身心健康与行为风险管控的创新实践

展之发，冯　柯，徐厚友，张　丽
中钢集团武汉安全环保研究院　武汉　430081

摘　要：钢铁行业作业环境复杂，高温、高负荷等因素易导致员工身心疲劳累积，进而诱发不安全行为，增加生产安全风险。针对传统员工健康管理存在监测手段单一、风险识别滞后、预警能力不足等问题，本文以数智化职业健康管理为导向，构建了基于多源生理指标融合的员工疲劳智能识别方法，为员工身心健康监测与行为风险管控提供技术支撑。研究选取 123 名钢铁企业员工开展现场数据采集，融合心率、体温及血压等多源生理指标，并结合主客观疲劳评价筛选关键特征，在此基础上构建员工疲劳智能识别模型，并验证了其在疲劳状态识别中的有效性。结果表明，多源生理指标能够有效反映员工疲劳状态，优化后的支持向量机（SVM）模型能够稳定实现疲劳与非疲劳状态识别，为员工健康状态实时感知和风险预警提供可靠支撑。研究进一步表明，多源生理信息融合与智能识别技术可有效提升员工健康风险感知能力，为钢铁企业构建“监测—识别—预警—干预”一体化的数智化员工身心健康管理与行为风险管控模式提供了实践参考。

关键词：多源生理指标；疲劳智能判定；支持向量机（SVM）；职安健创新与科技；动态风险管控。

1　绪　论

1.1　研究背景

随着钢铁行业智能制造和安全生产要求的不断提升，人员因素已逐渐成为影响企业安全绩效的重要变量之一[1]。在高温、高强度及连续倒班等复杂作业环境下，员工长期处于较高生理负荷状态，极易产生不同程度的疲劳。大量研究表明，疲劳不仅会降低个体的注意力水平、反应速度及决策能力，还会显著增加误操作和事故发生概率。因此，如何准确识别作业人员疲劳状态并实施针对性干预，已成为职业健康与安全管理领域的重要研究课题[2]。

目前工业企业普遍采用主观量表评价、行为观察以及简单生理指标监测等方式开展疲劳管理。其中，主观评价法主要依赖作业人员自我报告，容易受到个体认知偏差及主观意愿影响；行为观察法依赖管理人员经验判断，标准化程度较低；单一生理指标监测虽具有一定客观性，但难以全面反映人体复杂疲劳过程。上述方法普遍存在实时性不足、准确性有限以及推广成本较高等问题，难以满足现代工业场景下动态风险管控需求[3]。

近年来，人工智能技术的发展为疲劳状态识别提供了新的技术路径。通过融合多源生理数据并利用机器学习算法建立疲劳判定模型，可以从大量复杂数据中提取潜在规律，实现疲劳状态的客观评价和智能预测。其中，支持向量机（Support Vector Machine，SVM）因其良好的泛化能力和小样本学习优势，在职业健康监测、生物医学信号识别等领域获得广泛应用。因此，构建基于多源生理指标融合的疲劳智能判定模型，对于提升钢铁企业职业健康管理水平和强化安全风险预警能力具有重要现实意义[4]。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 疲劳评价研究现状

疲劳通常被定义为人体在持续体力或脑力活动过程中产生的功能下降状态，其表现为生理机能减退、注意力下降以及工作效率降低。目前疲劳评价方法主要包括主观评价法、行为评价法和生理评价法三类。

主观评价法以 Borg 评分量表、RPE 量表及 Karolinska 困倦量表为代表，具有实施简单、成本较低等优点，但评价结果易受个体认知和心理因素影响。行为评价法主要通过作业表现、面部表情、动作特征及眼动参数进行判断，能够反映疲劳外在表现，但稳定性和实时性受到环境条件限制。相比之下，生理评价法通过监测人体客观生理变化评估疲劳程度，被认为是当前较具发展潜力的研究方向[5]。

1.2.2 机器学习疲劳识别研究现状

随着数据驱动方法的发展，机器学习技术逐渐应用于疲劳状态识别领域。常见算法包括 BP 神经网络、随机森林、K 近邻算法以及支持向量机等。其中，BP 神经网络具有较强非线性拟合能力，但易陷入局部最优；随机森林具有较好的分类性能，但模型解释性相对不足；支持向量机通过构建最优分类超平面实现样本分类，在小样本、高维数据条件下具有较好的泛化能力。

现有研究表明，SVM 能够有效处理复杂非线性分类问题，在医学诊断、生理信号识别以及职业健康监测领域表现出较高识别精度。然而针对钢铁行业作业人员疲劳状态的研究仍相对有限，多数研究缺乏真实工业场景验证，模型实用性和推广价值有待进一步提升。

1.3 现有研究不足

综述现有研究可以发现，当前疲劳识别研究主要存在以下不足：

（1）疲劳评价指标体系较为单一，难以全面反映人体疲劳状态变化规律；

（2）部分研究样本来源局限于实验室环境，缺乏工业生产场景验证；

（3）模型参数优化与特征降维研究不足，影响模型泛化能力和识别精度；

（4）研究成果与企业安全管理实践结合程度不高，工程应用价值有待提升。

1.4 研究内容与技术路线

针对上述问题，本文以某钢铁企业 123 名员工为研究对象，采集心率、体温、收缩压及舒张压等生理指标，并结合量表构建疲劳标签。通过统计学方法筛选显著疲劳特征，采用主成分分析法降低特征维度，在此基础上建立基于支持向量机的疲劳判定模型，并利用网格搜索与五折交叉验证实现参数优化。最后通过模型验证分析其疲劳识别性能，为工业场景职业健康风险预警提供技术支撑。

2 疲劳判定数据获取与处理

2.1 样本来源与数据采集

本研究以某大型钢铁企业一线作业人员为研究对象，共采集 123 名员工样本数据。研究对象涵盖热修工、点检工等典型岗位，能够较好反映钢铁生产过程中不同作业环境下人员疲劳特征。

为保证数据真实性与有效性，所有样本均在正常生产状态下完成采集。采集指标包括心率、体温、收缩压和舒张压。

同时，为获得疲劳标签数据，组织受测人员填写 Borg's RPE 主观疲劳量表，对个体疲劳程度进行评价[6]。量表结果作为模型训练过程中的分类依据，用于构建疲劳与非疲劳样本标签。

表 1 主观疲劳程度量表夏尔洛—威尔克检验结果

变量	Obs	W	V	z	Prob>z
主观量表	123	0.98752	1.201	0.401	0.34092

对疲劳量表进行 KMO 检验，得出 KMO 统计量值为 0.819>0.5，且在 0.8～0.9 之间，说明主观疲劳量表具有较高效度。

2.2 显著性特征筛选与数据处理

为识别与疲劳状态显著相关的关键生理指标，本研究采用 Shapiro-Wilk 方法进行正态性检验，根据检验结果选择相应统计分析方法。

对于生理指标服从正态分布的个体，进行 T 检验，对于生理指标不服从正态分布的个体，进行秩和检验，进而得到用于后续评判疲劳度的生理指标。在本实施例中，通过 T 检验得到个体的生理指标中，体温、舒张压、收缩压和心率的显著性 P 值均小于 0.05，代表生理指标体温、舒张压、收缩压和心率对应的特征值具有显著性差异，能够作为判定人员疲劳值的指标。

表 2 疲劳状态生理指标配对样本 T 检验结果

	柯尔莫戈洛夫-斯米诺夫 a			夏皮洛-威尔克			
	统计	自由度	显著性	统计	自由度	显著性	
HR 差（B_A）	0.068	123	.200*	0.986	123	0.214	HR 差（B_A）
DBP 差（B_A）	0.091	123	0.014	0.983	123	0.133	DBP 差（B_A）
SBP 差（B_A）	0.062	123	.200*	0.984	123	0.171	SBP 差（B_A）
ST 差（B_A）	0.102	123	0.003	0.978	123	0.045	ST 差（B_A）
a.里利氏显著性修正							
*.这是真显著性的下限。							

由 T 检验结果可知，显著性 P 值<0.05，表明这些生理指标特征值具有显著性差异，可作为疲劳状态判定的重要输入特征。将采集的个体生理指标通过 LabelEncoder 将标签转换为模型可识别的数值类型，并对数据进行标准化处理，以消除量纲差异对模型的影响。

2.3 PCA-SVM 疲劳判定模型

考虑到多源生理指标之间存在一定相关性，为降低特征冗余并提升模型计算效率，本文采用主成分分析法（PCA）对原始特征进行降维处理。

PCA 通过线性变换将原始变量映射至新的正交特征空间，在保留主要信息的前提下减少特征维数。降维后的主成分作为模型输入变量。

在此基础上，构建支持向量机疲劳判定模型。SVM 通过引入核函数将低维样本映射至高维空间，并构建最优分类超平面实现疲劳状态识别。考虑到生理指标与疲劳状态之间存在非线性关系，本文选用径向基核函数（RBF）作为模型核函数。

为获得最佳分类性能，采用网格搜索方法对惩罚因子 C 和核函数参数 γ 进行优化，并结合五折交叉验证评估模型泛化能力，最终建立疲劳智能判定模型。

3 模型构建与参数优化

3.1 SVM 模型建立

支持向量机（SVM）是一种基于统计学习理论的监督学习算法，通过构建最优分类超平面实现不同类别样本的有效划分，具有良好的泛化能力，尤其适用于小样本、非线性及高维数据分类问题。

以预处理后的生理指标作为输入特征，RPE 量表标注结果作为监督学习标签，将员工疲劳状态划分为疲劳和非疲劳两类。其中，输入特征包括心率、体温、收缩压及舒张压四项显著性指标，输出标签采用二分类形式表示疲劳状态。考虑到不同生理指标与疲劳程度之间并非简单线性关系，模型采用径向基函数（RBF）作为核函数，将原始特征映射至高维特征空间，从而提高模型对复杂样本的分类能力。

模型中，损失函数表达式为：

$$L(\omega,b)=\max\frac{1}{2}\|\omega\|^2+C\sum_{i=1}^{n}\max\left(0,1-y_i(\omega^* x_i+b)\right);$$

其中，w 是超平面的法向量，b 是偏置项，是样本的真实标签，是样本的特征向量，C 是正则化参数，max 为最大值操作。

3.2 PCA 降维处理

PCA 通过对原始变量进行线性变换，将多个相关变量转换为若干相互独立的主成分，在尽可能保留原始数据信息的基础上减少特征维数，从而降低模型训练复杂度，提高计算效率。降维后的主成分能够综合反映各项生理指标的主要变化特征，同时减少多重共线性对模型分类结果的影响[7]。

通过降维处理，在保证分类精度的同时有效提升了模型运行效率。本研究引入主成分分析（PCA）算法对高维生理特征空间进行降维，并绘制了在 RBF 核函数最优参数下的多维决策边界图

3.2.1 二维决策边界

图 3-1 为将心率、体温、血压等特征降维至二维 PCA 空间后的决策边界可视化图。从点集的空间分布来看，大部分双色样本点清晰地分居于非线性决策边界的两侧。基于 RBF 核函数的平滑性质，决策边界呈现出平滑的非线性弯曲弧度，这直观地展示了最优核函数在高维映射后所形成的清晰边界，成功调和了生理指标个体差异带来的局部噪声。

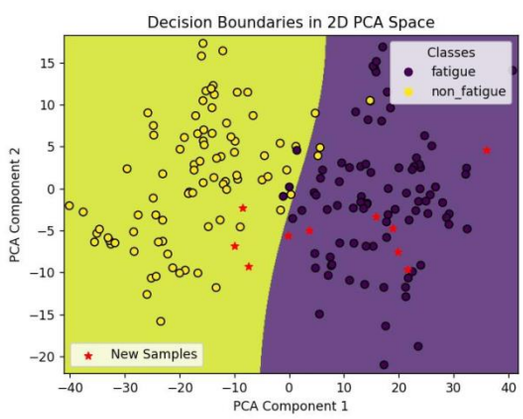


图 3-1 经 pca 降维后的二维决策边界图

3.3.2 三维决策边界

在三维空间坐标系中，双色样本点集呈现出更为清晰的空间聚类特性，疲劳域与非疲劳域构成了曲率平滑的非线性分离曲面。三维可视化不仅再次印证了多指标联合特征的鲁棒性，还证明了引入训练集寻优值优化可使复杂生理多变量特征的局部非线性关联权重得到充分利用，极大提高了疲劳判定的灵敏度。

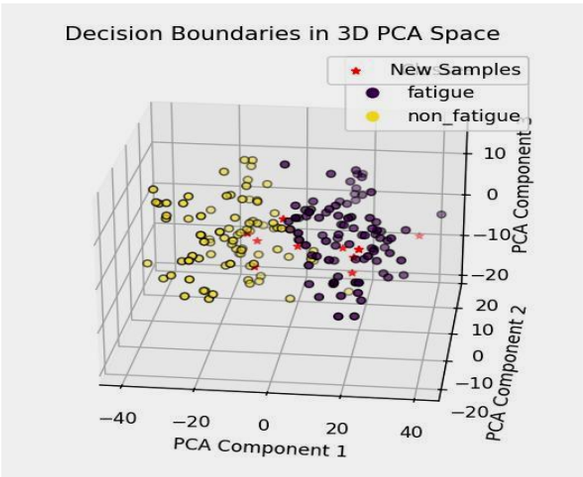


图 3-2 经 pca 降维后的三维决策边界图

3.3 网格搜索参数优化

SVM 模型分类性能受惩罚因子 C 和核函数参数 γ 影响较大，不同参数组合对应不同分类效果。为获得最佳模型性能，本文采用网格搜索方法对模型参数进行优化。[8]

网格搜索通过预先设定参数搜索范围，对不同参数组合逐一进行训练和验证，计算每组参数对应的分类性能，并选择综合评价指标最优的参数组合作为最终模型参数。其中，惩罚因子 C 用于调节模型复杂度与泛化能力之间的平衡。当 C 值较小时，模型允许一定程度的误分类，具有较好的泛化能力；随着 C 值增大，模型对误分类样本的惩罚增强，能够提高训练精度，但过大的参数可能导致过拟合。核函数参数 γ 决定单个样本对分类超平面的影响范围，γ 过小易导致欠拟合，而 γ 过大会使模型对局部样本过于敏感，从而降低模型稳定性。

通过网格搜索和交叉验证来对训练集上以网格为单位进行所有参数组合遍历，再经历训练验证循环计算每个参数组合的平均准确率，采用准确率作为评估指标，输出最佳参数组合，最终筛选出交叉验证性能最优的参数组合。

最终确定的最优模型参数组合为：核函数 kernel=rbf（径向基核函数），正则化参数 C=10，核函数带宽参数 gamma=0.01。在此最优参数配置下，模型在测试集中的表现呈现出高准确度与强鲁棒性。

本模型中，kernel 的表达式为：

$$k(x_i, x_j) = \exp(-\frac{\|x_i - x_j\|}{2\delta^2};$$

其中，为核函数，为第 i 个样本的特征向量，为第 j 个样本的特征向量，为指数函数，为核函数的带宽参数，a 取值范围为［0，1］，b 取值范围为［0，0.1］。

本文以模型分类准确率作为参数优化的主要评价指标，同时结合混淆矩阵和决策边界分析不同参数组合下模型的分类效果。当混淆矩阵中正确分类样本数量达到最大、决策边界能够较好区分两类样本且模型分类准确率稳定保持在 0.97 以上时，可认为参数组合达到最优。最终获得适用于钢铁企业员工疲劳识别的最优模型参数，提高了模型识别精度和泛化能力。

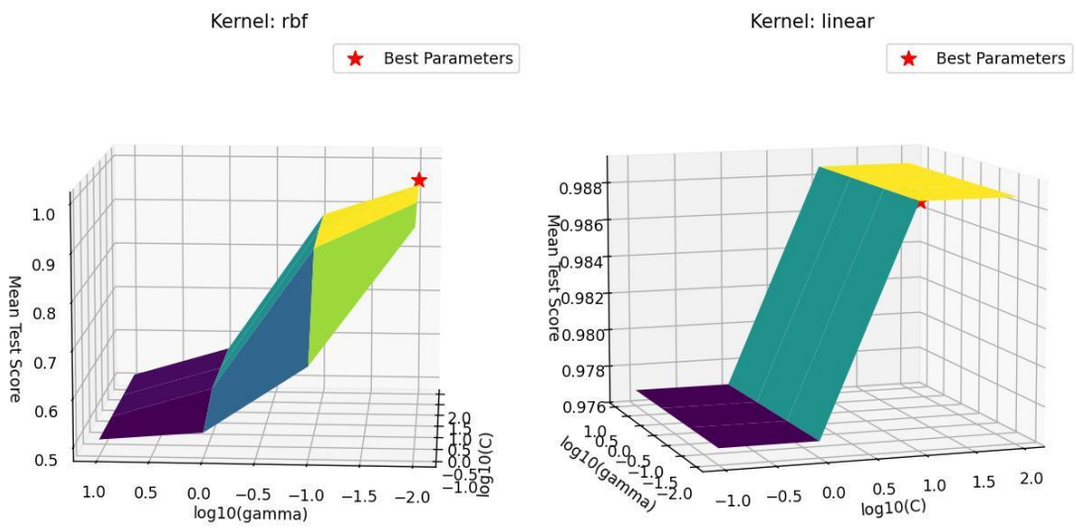


图 3–3　核函数效果图

3.4　五折交叉验证

为避免模型因训练样本划分不同而产生偶然误差，提高模型评价结果的可靠性，本文采用五折交叉验证（对模型性能进行验证。

将全部样本随机划分为五个互不重叠的子集，每次选取其中一个子集作为验证集，其余四个子集作为训练集完成模型训练，共进行五轮循环验证，在每轮交叉验证过程中，分别输出分类准确率、混淆矩阵及分类评价指标，对模型识别性能进行综合评价。混淆矩阵用于统计疲劳与非疲劳样本的分类结果，能够直观反映模型误判情况；分类评价指标则从准确率、精确率及召回率等多个角度评价模型性能。与此同时，结合决策边界图分析样本空间分布情况，进一步验证模型对不同类别样本的区分能力。

五折交叉验证结果表明，优化后的模型在不同训练数据划分条件下均保持较高的分类稳

定性，模型分类准确率稳定达到 0.97～0.99，各项评价指标波动较小，说明所建立的疲劳智能判定模型具有良好的泛化能力。

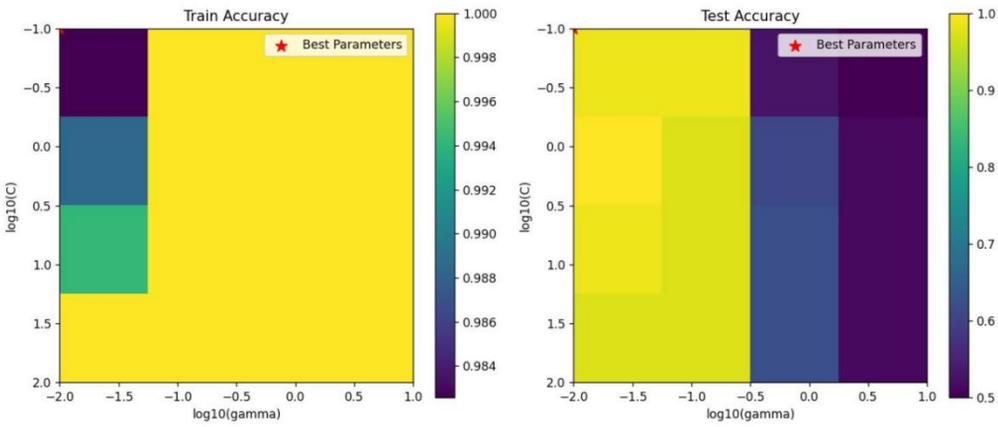


图 3–4　分类精度图

该模型经参数调优后，选择的最佳参数点（Best Parameters），在训练集和测试集中的精度为 0.984–1.0 之间，效果较好[9]。

4　结果性能分析与模型效果评价

在将生理指标输入至疲劳判断模型中后，得到预测疲劳度，将预测疲劳度和主观疲劳度进行对比，得到混淆矩阵图和分类精度预测报告，根据所述混淆矩阵图和分类精度预测报告可以得到当前模型的预测精度，将其作为评估指标老对参数组合进行优化，经过多轮迭代，使得参数组合朝着指定方向进行收敛，直至预测精度符合预设要求，则疲劳判断模型训练完成[10]。

4.1　模型训练结果分析

4.1.1　混淆矩阵分析

混淆矩阵是评估分类模型在各类别上预测表现的直观手段，其对角线上的数值越大、颜色越深，代表模型的预测正确率越高。本研究在划分出的含 74 组样本的独立测试集上对优化后的 SVM 模型进行测试，得到的混淆矩阵如图 4–1 所示。

在非疲劳状态的样本中，有 36 例被模型正确预测为非疲劳，仅 1 例被误诊为疲劳；在疲劳状态的样本中，同样有 36 例被模型正确识别，仅 1 例被误诊为非疲劳。主对角线上的深色方块集中了绝大多数样本（共 72 例），这强有力地证明了该多源生理指标融合模型在“疲劳”与“非疲劳”两类特征空间的动态切分上具有极高的精确度

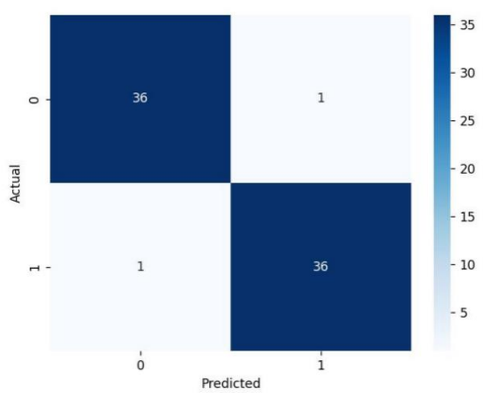


图 4–1　SVM 模型混淆矩阵图

4.1.2　分类评价指标报告分析

基于上述混淆矩阵的定量表现，模型训练输出的精细化分类报告从多维度对模型效能进行了度量，结果如图 4–2 所示

分析分类报告可知，模型对于疲劳和不疲劳状态的各项评估得分均达到了 0.97。这种高度对称且处于高位（符合技术预设的 0.97－0.99 优良

区间）的评分数据表明，模型在最优参数下未出现偏向某一特定类别的过拟合或欠拟合现象，对均衡样本集具备优秀的非线性解析能力。

```
Best Parameters: {'C': 10, 'gamma': 0.01, 'kernel': 'linear'}

Classification Report:
              precision    recall  f1-score   support

           0       0.97      0.97      0.97        37
           1       0.97      0.97      0.97        37

    accuracy                           0.97        74
   macro avg       0.97      0.97      0.97        74
weighted avg       0.97      0.97      0.97        74

Accuracy: 0.97
```

图 4–2　精细化分类报告图

4.2　工程应用效果评价

为了验证上述构建的非线性优化判断模型在实际工业场景下的可行性与灵敏度，本研究开发了后端框架与桌面应用程序前端的动态监控系统，并将其应用到企业现场进行实际个体的疲劳度预测演练。

在实际生产应用中，系统通过现场检测设备动态采集了一线员工的基本生理指标，经由训练完成的 SVM 模型识别后实时输出判定结果如图 4–3。

```
请输入新员工的特征值（输入 'q' 退出）：
心率： 72
舒张压： 75
收缩压： 115
体温： 36.5

请输入新员工的特征值（输入 'q' 退出）：
心率： q

预测的第 1 个员工的类别是:  non_fatigue
```

图 4–3　根据模型进行新员工本的疲劳判断图

表 3　部分典型岗位员工的实际运行数据与判定状态。

员工	岗位	心率	低压	高压	体温	SVM 判定	员工	岗位	心率	低压	高压	体温	SVM 判定
J05	热修工	69	72	100	36.4	不疲劳	J09	翻车机工	89	95	134	36.7	疲劳
		75	79	116	36.5	不疲劳			72	78	116	36.5	不疲劳
		70	78	117	36.6	不疲劳			68	75	114	36.3	不疲劳
		92	93	130	36.7	疲劳			78	83	117	36.4	不疲劳
J09	点检工	81	104	159	36.8	疲劳	J10	上升管工	98	72	141	37.2	疲劳
		73	74	98	36.5	不疲劳			75	83	121	36.4	不疲劳
		68	72	100	36.5	不疲劳			68	73	112	36.5	不疲劳
		89	91	135	36.7	疲劳			89	92	130	36.7	疲劳
		70	74	102	36.4	不疲劳			70	74	105	36.5	不疲劳

实际运行效果评价表明：

1．强鲁棒性与实时性：系统能够对不同工种（如高温重载条件下的热修工、连续作业的翻车机工等）的生理指标异动进行客观、快速的捕捉，实现了员工生理性疲劳的科学管控，规避了传统主观测试和行为观察的动态滞后与主观偏差。

2．多指标融合的科学性与非线性映射优势：如在连续执行高温、高辐射热修作业后，J05 的多源生理指标发生了变化，心率达到 100bpm、血压处于高位（135/95mmHg）、体温升至 36.9° C 的高代谢状态下，模型利用 RBF 高维空间的非线性曲面精准判定其处于“疲劳”状态；而在心率及血压恢复正常、体温下降（36.4° C）后，模型及时更新为“不疲劳”。这充分说明基于 RBF 核的支持向量机模型具备动态追踪个体生理状态累计、动态判别风险源头的能力，从技术层面上有效保障了企业人员生命安全与工业安全生产。

3．基于多源生理指标融合的“疲劳智能判断算法”绝非孤立的模型构建，而是整个身心健康监控与企业安全行为管控系统的核心算法

引擎与动态数据源。

是算法与企业职业健康评估系统的闭环联动、具体工业应用场景以及其带来的工业价值阐述如下[11]：

在整体系统中，算法扮演着“感知识别”的角色，而系统平台则承担着“数据集成、风险预警与行为干预”的职能，两者互为表里，形成闭合的控制回路：

底层数据采集与算法动态解析：系统利用部署在工业现场的体测设备，动态采集一线员工的原始生理指标。这些多源生理特征向量被实时推送到后端的 SVM 疲劳判断算法引擎中进行高效的非线性解析。

前后端解耦的实时响应：算法实时输出的“疲劳度预测值”（0 代表不疲劳，1 代表疲劳）通过 Java SpringBoot 后端框架封装为标准的 JSON 数据格式，利用 HTTP 协议跨域安全响应给系统前端的桌面应用程序[12]。

系统联动干预与行为评估：系统前端在收到算法判定结果后，不仅在监控看板上对员工状态进行视觉化更新，还会将该“疲劳指数”作为核心权重，实时输入到系统大框架下的“员工安全行为评估系统”中。一旦算法判定某员工处于疲劳累计期，汇算入系统中的员工脆弱性分析中，系统会自动触发预警机制，从而将“生理风险”阻断在演变为“不安全行为”之前。将关口前移，本质安全：将安全行为管理的触角延伸至微观的“生理累计阶段”。在员工尚未因疲劳导致动作失误、违章操作或意识模糊之前，通过算法实现前置性的“物理阻断”，从源头上遏制因疲劳驾驶、高空坠落、高温灼伤等重大冶金生产安全事故的发生。科学量化，精准降本：告别了过去单纯依靠主观疲劳量表或人工经验轮班的粗放模式。利用多指标融合算法实现了员工疲劳度的数字化、客观化和标准化，为企业提供了精准的岗位轮换依据，避免了过度疲劳造成的工伤成本，也优化了人力资源利用效率。

参考文献

［1］ 王永斌. 钢铁企业职业危害防治综合评价指标体系研究［D］. 华北理工大学, 2016.

［2］ 郭晓宏, 陈仙. 危机管理与员工疲劳预防［J］. 中国安全科学学报, 2008,（3）: 46–52. DOI: 10. 16265/j. cnki. issn1003–3033. 2008. 03. 012.

［3］ 健康中国行动（2019—2030 年）：总体要求、重大行动及主要指标［J］. 中国循环杂志, 2019, 34（9）: 846–858.

［4］ 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述［J］. 电子科技大学学报, 2011, 40（1）: 2–10.

［5］ 张羽. 基于生理测量的疲劳与矿工不安全行为关系研究［D］. 西安科技大学, 2014.

［6］ 薛晓琳. “疲劳”症状的规范化研究：疲劳自评量表的研制及应用［D］. 北京中医药大学, 2006.

［7］ 谭璐. 高维数据的降维理论及应用［D］. 国防科学技术大学, 2005.

［8］ 王兴玲, 李占斌. 基于网格搜索的支持向量机核函数参数的确定［J］. 中国海洋大学学报（自然科学版）, 2005,（5）: 859–862. DOI:10. 16441/j. cnki. hdxb. 2005. 05. 032.

［9］ 奉国和. SVM 分类核函数及参数选择比较［J］. 计算机工程与应用, 2011, 47（3）: 123–124+128.

［10］ 祁亨年. 支持向量机及其应用研究综述［J］. 计算机工程, 2004,（10）: 6–9.

［11］ 李天慈, 赖贞, 陈立群, 等. 2020 年中国智能物联网（AIoT）白皮书［J］. 互联网经济, 2020,（3）: 90–97. DOI:10. 19609/j. cnki. cn10–1255 /f. 2020. 03. 016.

［12］ 陈亿根, 尹晓峰, 邵黎勋. 5G+工业互联网应用实践［J］. 中兴通讯技术, 2020, 26（6）: 2–6.

台灣地區綠能產業發展現況與安全關注重點研究報告

黃建平，黃信慈，詹鈞丞
中華安全衛生協會

摘　要：隨著全球節能減碳與永續發展趨勢興起，再生能源已成為各國能源政策核心。台灣地區政府積極推動綠能轉型，規劃於 2050 年達成淨零排放目標，並持續發展離岸風電、太陽光電、氫能、生質能及地熱等多元綠能技術。然而，隨著綠能場域快速擴張，相關職業安全衛生議題亦日益受到重視，包含高處作業、海上作業、重件吊裝、高溫熱危害、火災爆炸、化學品暴露、機械設備操作及天然災害應變等多面向風險，對產業永續發展及勞工安全帶來重大挑戰。

本研究透過文獻蒐集、現場輔導經驗、事故案例分析及相關資料彙整等方式，探討離岸風電、太陽光電、氫能、生質能及地熱等五大綠能領域，於規劃設計、施工監造及維運管理等生命週期階段之安全問題。研究顯示，各類綠能場域雖技術特性不同，但普遍面臨高處墜落、設備故障、特殊環境暴露及高風險作業管理等共通風險，同時亦具有各自特殊危害，例如離岸風電之海上作業與吊裝風險、氫能之洩漏與爆炸危害、生質能之粉塵燃燒風險以及地熱之高溫蒸氣與有毒氣體危害等。

因此，本研究建議應強化源頭風險評估與職業安全管理機制，並將職業安全要求納入綠能系統申請設置程序，以降低全生命週期之職災風險，達成綠能發展與勞工安全並重之目標。

關鍵詞：綠能產業、離岸風電、太陽光電、氫能、職業安全管理

壹、前　言

近年來，全球暖化與氣候變遷議題日益嚴峻，極端氣候事件頻繁發生，促使各國政府積極推動能源轉型，以再生能源取代傳統化石燃料，成為實現淨零排放目標之核心策略。在此背景下，綠能產業涵蓋之離岸風電、太陽光電、氫能、生質能及地熱等多元能源型態，已成為全球能源結構轉型之重要支柱，各項綠能技術均逐步成長。

台灣地區作為高度依賴進口能源之島嶼型經濟體，能源安全與氣候承諾雙重壓力之下，政府宣示 2050 年達成淨零排放，並規劃推動多元綠能並進之能源發展路徑。然而，隨著各類綠能場域快速擴張，從業人員之職業安全問題亦逐漸浮現並引發社會高度關注。綠能產業各領域在規劃設計、施工監造至後期維運各階段，均存在多種潛在危害：離岸風電面臨海上極端環境作業挑戰；太陽光電存在高壓電氣及高處墜落風險；氫能系統涉及高壓氣體爆炸及洩漏危害；生質能設施面臨有機粉塵爆炸及有害氣體暴露；地熱開發則面臨高溫蒸氣、有毒氣體及地質不穩定等複合性危害。

本會長期致力於協助產業提升職業安全衛生管理，並積極參與政府推動之綠能安全輔導計畫。本研究基於輔導經驗，整合現場調查數

據與事故案例分析，彙整台灣地區綠能產業在全生命週期中所面臨之職業安全問題，並提出改善建議，期能為綠能產業從業人員提供更完善之安全保障。

貳、研究目的與範圍

隨著綠能場域持續開發，各類綠能產業涉及複雜電氣設備、特殊作業環境及高度技術需求，其作業環境之複雜度與危險性高於部分傳統產業，職業安全衛生事故風險亦隨之提升。因此，強化綠能產業職業安全管理，已成為台灣地區推動綠能轉型的重要課題。

本研究旨在探討台灣地區綠能產業全生命週期之職業安全議題，辨識規劃設計、施工監造及維運管理各階段之危害因子，分析各類綠能場域之特定風險，並比較不同綠能領域之危害特性；同時檢視現行安全規範及職業安全法規之適用情形，提出改善建議，以降低職業災害風險，提升從業人員風險認知與職業安全文化。

本研究範圍涵蓋台灣地區主要綠能產業，包括離岸風電（含海上變電站及海底電纜）、太陽光電（含屋頂型、地面型、水面型及建築整合型）、氫能（含電解製氫、高壓儲氫及燃料電池）、生質能（含生物質燃燒、沼氣發電及生質燃料轉化），以及地熱發電（含探勘、鑽井及熱能轉換）。

參、台灣地區綠能產業發展現況

台灣地區自 2016 年起積極推動能源轉型政策，「2025 年非核家園」目標推動再生能源比重大幅提升，而 2050 淨零排放路徑圖之發布，更確立了多元綠能並進之長期發展框架。根據政府之規劃，2050 年再生能源發電占比目標達 60 至 70%，涵蓋太陽光電、風力發電（陸域及離岸）、氫能、生質能及地熱等多元類型，形成相互補充之能源組合。

在裝置規模方面，各類綠能領域目標如下：太陽光電 2026 年累計裝置容量目標達 20GW，2050 年達 40 至 80GW；離岸風電 2035 年裝置容量目標達 15GW，2050 年達 40 至 55GW；氫能預計 2030 年起逐步導入，2050 年混氫發電占比目標達 9 至 12%；生質能 2050 年預計達 1.3GW；地熱則規劃於 2030 年達 200MW，並完成多處地熱探勘及示範電廠建設。綠能發展預期將帶動建設投資與就業人口成長，同時對職業安全管理亦帶來挑戰。

一、離岸風電：

台灣地區離岸風電目前已進入商業化開發階段，離岸風力發電由海上風力機組、海上變電站、海底電纜及陸上併網設施組成，整體工程規模龐大、技術複雜度高。作業環境方面，風力機組施工及維護人員需在海上環境作業，面臨長達數小時之船運交通、複雜海象、高空吊掛及密閉空間等風險。

由於離岸環境特殊，救援時間遠高於陸地作業，一旦發生事故，後果往往更為嚴重。目前台灣地區已有多座離岸風場完成商業運轉，包含苗栗、台中、彰化及雲林外海之示範風場及多個潛力場址開發，預計未來十年內將有更多風場陸續完工併網，從業人員規模亦將大幅增加。

二、太陽光電：

太陽光電為台灣地區目前裝置規模最大之再生能源類型。根據經濟部能源署統計資料，截至 2025 年，台灣地區太陽光電累計裝置容量約為 15.47GW，在屋頂型、地面型、水面型及建築整合型等多元場域廣泛布建，其中以屋頂型為主，並逐步發展地面型及水面型。太陽光電系統在電氣安全、高處作業及熱危害等方面具有職業安全風險。

三、氫能發展：

台灣地區氫能發展目前以混氫發電與氫能交通兩大應用為主軸。在混氫發電方面，台電

公司選定高雄興達電廠作為混氫發電示範基地，以氫氣、天然氣混合設備，打造國內首部可混燒氫氣的發電機組。2025 年目標為燃氣混氫發電累積裝置量達 91MW，並同步推動燃煤混氨發電累積裝置量達 800MW。在加氫站建設方面，中油與聯華林德已於高雄啟用兩座加氫站，為台灣地區第一批加氫站，中油加氫站規劃總量能至少達 245 公斤，每日可供應 7 輛大客車使用，配合交通部「氫燃料電池大客車試辦運行計畫」推動氫能巴士應用。

在職業安全方面，氫能作業場域具有高度特殊性。氫氣爆炸下限（LEL）僅 4%，燃燒範圍廣（4%至 75%），且無色無味，洩漏時難以察覺。加氫站因兼具高壓氣體與爆炸危險區域之特性，符合危險性工作場所認定條件者，須依《危險性工作場所審查及檢查辦法》辦理，混氫發電廠區之氫氣輸送管線及儲槽區域，亦須完整進行爆炸危險區域劃分，並採用符合防爆等級之電氣設備與儀控系統，以防止氫氣洩漏引發點火爆炸。

四、生質能與地熱：

生質能主要利用農業廢棄物、畜牧廢水及都市廢棄物等生物質資源發電，其主要職業安全危害包括有機粉塵爆炸、沼氣（甲烷、硫化氫）洩漏引發之爆炸及中毒、高溫燃燒設備，以及密閉空間作業等風險。地熱發電則涉及探勘鑽井、蒸氣集輸及發電作業，主要危害包括高溫蒸氣及熱水燙傷、硫化氫中毒、高壓流體噴發、地層不穩定，以及鑽井與機械設備操作所造成之機械性危害。

肆、職業安全衛生特性與危害分析

一、共通性職業安全危害

綠能產業從其生命週期所涉及之規劃設計、施工監造及運轉維護等階段，普遍具有大型化、戶外化及高技術化等特性，使從業人員經常暴露於高風險作業環境之中，稍有不慎即可能造成職業災害。

（一）高處墜落與物體飛落：

在離岸風機作業中，塔架高度常超過 100 公尺，維修人員須在狹窄的機艙（Nacelle）內移動。太陽光電則廣泛布建於建築高處，施工時若缺乏穩定之防墜錨點或防護網，墜落事故為主要職業災害類型之一。此外，大型重件（如風機葉片或光電面板）在吊裝過程中的擺動與掉落，亦是工地管理的重要項目。

（二）熱危害與極端環境暴露：

台灣地區夏季的高溫潮濕對綠能案場作業者構成嚴重生理威脅。光電案場巡檢、風機基礎混凝土澆置及地熱鑽井作業，人員常需長時間暴露於 35℃以上之環境。這不僅引發中暑與熱衰竭，更會因脫水導致注意力分散，間接誘發機械夾捲或電擊等二次災害。

（三）電氣安全與能量隔離風險：

綠能設施涉及高壓直流（DC）與交流（AC）轉換。在設備老化、絕緣失效或維修過程中未落實上鎖掛牌（LOTO）時，勞工極易遭受電擊。特別是水面光電案場，水體導電性增加了漏電危害的擴散風險。

二、特定領域特殊危害剖析

針對各能源技術的特殊性，其風險因子分析如下：

（一）海事工程與離岸維運（離岸風電）：

1. 船舶碰撞與落海：海事施工涉及大量工作船、起重船與轉運船之協同作業。

2. 救援延遲與醫療瓶頸：離岸風場距離岸邊甚遠，受惡劣海象影響，緊急救援時間可能較陸域顯著增加。

3. 疲勞管理：採輪班制（Offshore Shift），長期海上生活與工作強度對人員心理健康與決策判斷影響巨大。

（二）化學製程與爆炸防護（氫能與生質能）：

1. 氫氣洩漏與防爆區域劃分：氫氣分子極

小，易在管路接頭滲漏。一旦在封閉空間達可燃範圍，極微小靜電即可引發爆炸。

2．氨氣中毒與腐蝕：混氨發電場域需嚴防氨氣外洩導致呼吸道灼傷。

3．生質能粉塵爆炸：木質顆粒或生質燃料在輸送、粉碎過程中產生的粉塵雲，具備極高的爆炸壓力上升率。

（三）高壓鑽井與有毒氣體（地熱）：

1．井噴與熱流體噴發：鑽井過程中遇地層超壓，高溫蒸氣可能瞬間噴出造成大規模燙傷。

2．硫化氫（H_2S）危害：地熱蒸氣中含有之硫化氫具備神經毒性與腐蝕性，且在高濃度時會使嗅覺麻痺，導致作業人員在無警覺狀態下窒息身亡。

伍、現行法規規範評估與精進建議

一、現行規範

台灣地區綠能產業之職業安全衛生管理，主要以該地區《職業安全衛生法》及其相關子法為核心架構，並依據各類綠能設施之技術特性，配合《電業法》、《再生能源發展條例》、《消防法》及相關能源管理法規共同規範。整體法規內容涵蓋危害辨識與風險評估、安全衛生設施設置、教育訓練、承攬管理、危險性設備管理及緊急應變等面向，作為各類綠能設施規劃、建置及維運之安全管理基礎。

在共通性規範方面，《職業安全衛生法》及《職業安全衛生設施規則》已針對高處作業、局限空間作業、機械設備危害、高壓氣體、化學品暴露、火災爆炸及其他職業危害建立基本管理要求。此外，《危險性工作場所審查及檢查辦法》則透過危害分析及製程安全評估機制，強化高風險工作場所之源頭管理與風險控制。

太陽光電產業之管理主要依循《再生能源發展條例》、《電業法》及相關設置管理規定辦理。現行制度已涵蓋設備設置、施工管理、維護通道規劃及後續管理維護責任等事項，並將部分職業安全衛生要求納入設施設置標準之中，形成較完整之管理架構。

離岸風電產業則以《職業安全衛生法》為主要管理依據，並配合勞動部門職業安全衛生署所發布之「離岸風電海域作業安全指引」，針對海上施工、海事協調、承攬管理及緊急應變等事項提供管理原則。此外，離岸風場開發亦須配合海事工程、港口管理及能源開發等相關法規辦理，以因應海上特殊作業環境之需求。

氫能產業之安全管理主要涉及《職業安全衛生法》、《高壓氣體勞工安全規則》、《高壓氣體安全衛生設施標準》及《消防法》等規範，管理重點涵蓋高壓氣體設備、可燃性氣體儲存與輸送、防火防爆措施、操作人員教育訓練及緊急應變管理等事項。近年隨著加氫站及氫能應用逐漸發展，相關主管機關亦陸續建立加氫站管理制度及技術規範，以提升氫能設施之安全管理水準。

生質能產業主要適用《職業安全衛生法》及相關化學品、高壓氣體與作業環境管理規定。其管理內容涵蓋沼氣設施安全、有害氣體暴露控制、粉塵危害預防及機械設備安全等事項，以降低火災、爆炸、中毒及機械傷害等風險。

地熱發電方面，目前主要依據《地熱能探勘與開發許可及管理辦法》辦理開發及營運管理，並配合《職業安全衛生法》及相關作業環境管理規範，針對高溫作業、有害氣體暴露、鑽井工程及設備安全等事項進行管理，以維護作業安全及設施穩定運轉。

整體而言，台灣地區已逐步建立涵蓋離岸風電、太陽光電、氫能、生質能及地熱等綠能產業之基本安全管理架構，並透過法規、技術規範及行政指引等多元工具，提供產業發展所需之安全管理依據。

二、現行規範之精進

（一）從源頭強化風險管理

目前各類綠能設施在申請建造許可或工作許可時，法規重點多聚焦於設備安裝規格及施工安全文件，職業安全衛生主管機關介入設計審查之機制仍有強化空間。職業安全風險源自設備配置不當、維修動線不足或緊急逃生路徑設計疏漏等設計問題，若能於規劃初期即導入安全設計理念，要求設計文件納入危害辨識與風險評估報告，將有助於從源頭降低後續施工及維運階段之風險。

（二）全生命週期安全管理

綠能設施普遍具有二十年之使用年限，然而目前《職業安全衛生法》框架下，各類設備之定期檢查週期主要依《危險性機械及設備安全檢查規則》規定，對於一般電氣設備及風機葉片、地熱管線等關鍵設施之長期完整性管理，缺乏系統性之強制檢查要求。雖然危險性工作場所辦法已規定至少每五年重新評估製程安全資料，但適用範圍尚未全面涵蓋各類型綠能場域，且針對設備老化、材料疲勞及腐蝕等長期退化機制之風險再評估機制，仍可進一步系統化及標準化。

（三）補足各領域專屬指引缺口

現行規範多以通則性要求為主，對各類綠能特殊作業環境之針對性規定仍有不足。具體而言：離岸風電方面，現行職業安全衛生法對海上安全與衛生作業著墨有限，「離岸風電海域作業安全指引」係以行政指引形式發布，法律位階相對較低；氫能方面，台灣地區目前相關管理主要散見於能源、消防及職業安全衛生等法規。；生質能方面，有機粉塵爆炸危害評估之專業標準仍未建立。建議主管機關參考國際標準，分類訂定具法規位階之各綠能領域職業安全技術指引，賦予業者明確之法律遵循依據。

（四）專業人才培育

各類綠能技術具備高度專業性，離岸風電方面，目前勞動檢查員進行離岸風場查驗，均須依全球風能組織（GWO）規定接受完整的基礎安全訓練課程（BST），並通過離岸風電相關工作體檢（OEUK）方能出海執行任務，顯示離岸風電作業之專業安全訓練要求極高，但此要求目前主要依業者自律及國際認證體系執行，尚未納入台灣地區職業安全衛生法規之強制性規定。建議逐步建立以下分類認證機制：離岸風電作業人員之基礎安全訓練法定認可、氫能危害防護操作人員培訓認證、地熱硫化氫作業防護認證，以及生質能粉塵爆炸危害管理人員認證，使各崗位人員之安全資格要求具備明確之法規依據。

陸、結論與建議

多元綠能並進是台灣地區實現 2050 年淨零排放目標的重要途徑，然而隨著離岸風電、太陽光電、氫能、生質能及地熱等綠能場域快速發展，相關電氣安全、機械設備及高風險作業等職業安全挑戰亦日益增加。各類綠能場域雖因技術特性不同而具有不同危害，但均面臨高處作業、電氣危害及機械設備等共通風險，並伴隨海上作業、高壓氣體、粉塵爆炸及高溫蒸氣等特定危害，因此應依不同場域特性建立相應之安全管理措施。

本研究認為，綠能產業職業安全管理應由傳統著重施工及維運階段，逐步提前至規劃設計階段，導入本質安全理念，將危害辨識、風險評估及職業安全衛生要求納入綠能設施設計及申設審查程序，並結合全生命週期安全管理機制，持續強化施工、運轉及維護各階段之風險管控，以兼顧綠能發展、產業永續與勞工安全。

科技賦能　安全同行

楊中源委員/前會長
香港職業安全衛生協會

摘　要：隨著高樓化、大型化及複雜化建築工程的迅速增加，建造業的職業安全與健康（Occupational Safety and Health，OSH）管理面臨著空前的挑戰。傳統建築工地長期依賴大量高強度的人工巡查、高危環境作業以及靜態且分散的紙本紙質管理，這不僅造成人力資源的巨大消耗，更使高危環節，例如使用塔吊進行吊運建築物料、危險區域（密閉空間）巡檢、人員動態監控等。始終處於高事故風險之中。

近年來，隨著物聯網（IoT）、人工智慧（AI）、50G/50G/低軌衛星高頻通訊、高精度感測器以及自動化機器人技術的快速突破，建造業正迎來一場深刻的「智慧建造與智慧安全（Smart Construction & Smart Safety）」變革。

本篇論文深度探討如何整合三項核心前沿科技，全方位構築智慧工地的安全防線：

1. 高空遠程控制塔吊天秤（Remote Control Tower Crane）技術：實現高空危險駕駛艙向地面安全控制中心的轉移，結合多鏡頭 AI 視覺傳感與力矩反饋，提升吊運安全，減低作業風險；

2. 四足機器狗（Robotic Dog/Quadruped Robot）智慧巡檢系統：替代人工進入極端環境（密閉空間）、高危結構區及夜間時段進行高頻次、無死角的立體化全景巡查與即時危害辨識；

3. 工地人員註冊與控制應用程式（Workers Registration & Access Control App）：結合生物識別、定位追蹤與安全培訓紀錄，實現前線人員從入場、實名認證、動態軌跡到違規預警的全生命週期數位化管控。

本文將從技術原理、系統架構、現場應用場景、安全效益量化分析以及未來發展趨勢五大維度進行深入剖析，旨在為建造業推行數位化安全轉型提供系統性的理論支撐與實用指導。

第一章　導言：傳統建造業安全瓶頸與科技轉型的必然性

1.1　建造業職業安全之現狀與挑戰

建造業歷來被公認為最高危的行業之一。根據各地勞工法規與職業安全健康的統計數據，建造業的嚴重工傷事故率與致命事故率常年位居各行業之首。在傳統工地現場，危險源（Hazards）呈現出多樣化、動態化與隱蔽性的特徵，主要事故類型包括：

- 高處墮下（Falls from Height）：塔吊天秤操作員登高作業、外牆架設、搭棚及邊緣作業等；
- 物體打擊（Struck-by Objects）：塔吊天秤吊運過程中的盲區吊裝、吊運物件脫落或懸吊路徑下有人員穿行；

• 密閉空間作業前氣體測試：人工進入密閉空間進行氣體測試遇上的安全隱患或指明危險（Specified Risk）；

• 人員管理漏洞：未經培訓的無牌人員違規進入工地工作、黑工混入、特種作業人員資質過期等。

傳統的安全管理模式多屬於「被動應對型（Reactive Safety Management）」，即依賴安全主任（RSO）或安全督導員的人工定期巡視。然而，人工巡檢受限於體力、視線盲區以及巡查頻率，極易出現「監管盲區」。一旦事故發生，往往只能進行事後追責與檢討，無法在危害發生前進行主動預防與預警。

1.2　智慧安全（Smart Safety）概念的崛起

為了從根本上扭轉建造業安全表現低迷的困境，香港建造業正全面轉向「主動預防型智慧安全（Proactive Smart Safety Management）」。智慧安全的的核心理念是利用前沿科技，建立一個「感知—分析—預警—控制」閉環的數位化防禦體系。

智慧安全體系的核心柱石可歸納為：

• 人機分離（Human-Machine Separation）：利用遠程控制技術，將作業人員從高危環境中撤離；

• 全時全域感知（Continuous & Ubiquitous Sensing）：透過四足機器狗與 IoT 設備，實現現場風險無死角監測；

• 實時數據決策（Data-driven Decision Making）：透過 AI 智慧演算法與行動端 App，實現對前線人員與施工設備的精準防禦與精細化管理。

第二章　遠程控制塔吊天秤（Remote Control Tower Crane）：重構高空起重作業安全生態

2.1　傳統塔吊天秤操作的極限與安全隱患

塔吊天秤（Tower Crane，俗稱塔吊）是大型建築工程項目不可或缺的起重設備。然而，傳統的塔天秤操作模式存在著顯著的安全與健康隱患：

1．高空攀爬與高空駕駛風險：操作員每天需攀爬數十公尺的爬梯 ladder 進入狹小的駕駛艙。若遭遇惡劣天氣（如強風、暴雨、高溫）時，攀爬與滯留駕駛艙極易引發高處墮下或誘發健康急症事故。另外，受制於環境及限制空間，導致拯救困難。

2．視線盲區與認知疲勞：高空駕駛艙距離地面吊裝點數十至上百公尺，操作員視線極易受建築物遮擋。吊運過程高度依賴地面訊號員（Rigger/Signalman）透過對講機進行指揮，溝通延遲或誤解極易導致物體打擊或碰撞事故。

3．職業健康危害：駕駛艙空間狹窄、缺乏洗手間設施，且長期承受高空震動與孤立環境，導致操作員極易產生生理與心理疲勞，影響操作及安全判斷能力。

2.2　遠程遙控塔吊天秤（Remote Control Tower Crane）之系統架構與技術原理

遠程控制塔吊天秤技術透過將「高空實體駕駛艙」物理分離，轉換為位於地面安全室內的「數位化遠程駕駛艙（Remote Operating Station，ROS）」，徹底解決了上述安全痛點。

（1）多通道超高清視覺感知系統

在塔天秤大臂、吊鈎正上方、塔身以及周邊關鍵節點安裝多台高幀率、防震、防眩光的 4K 超高清鏡頭。特別是「智能跟隨吊鈎鏡頭（Smart Hook Camera）」，由人工隨吊鈎升降而變焦，始終保持吊運物件及其周圍地面人員的清晰視角，完全消除傳統操作中的盲區。

（2）低延遲高可靠性通訊傳輸（5G&Optical Fiber）

遠程控制的生命線在於三重高速通訊。系統採用 5G 專網、5G 網橋及高頻光纖傳輸技術，將指令傳輸與影像回傳的端到端控制在少於 100 毫秒（ms）以內，確保地面操作員的動

作與高空機械響應達至毫秒級同步，防止因視訊延遲導致操控失誤。

（3）沉浸式人體工學地面座艙（ROS）

地面控制室配備具備人體工學設計的專業座椅、多螢幕環場顯示器。顯示器上除了實時高畫質畫面外，還會疊加抬頭顯示（HUD）資訊，包括實時風速、安全負重額、吊運物重量、額定力矩百分比、吊鈎高度、旋轉角度以超額吊運警報裝置。

（4）AI 智能輔助（AI Assistant）

系統導入 AI 視覺演算法與雷射雷達（LiDAR），能夠即時識別吊物下方是否有工人穿行或停留。一旦發現人員進入危險吊運區域，系統會即時在操作屏上發出紅色預警並發出警報。

2.3 安全效益與實踐效益分析

• 零高空作業風險：操作員全程在地面舒適環境下工作，徹底消除攀爬高塔及高空墜落風險。

• 起重盲區完全消除：吊鈎視角與多角度環景影像使操作員能夠清晰察覺吊運物離地、擺放及解扣的全過程。

• 人機工程改善與作業效率提升：地面良好的環境大幅減輕操作員的生理與心理疲勞，大幅提升吊運作業的安全性與持續性。

第三章 四足機器狗（Robotic Dog）：現場安全巡檢的「智慧哨兵」

3.1 傳統工地巡檢的侷限與盲點

施工現場地形複雜、環境瞬息萬變，包含深基坑、高支模、密閉空間（Confined Spaces）及未竣工結構層等危險區域。傳統由安全主任進行的人工巡檢面臨以下瓶頸：

• 人身安全風險高：安全人員進入高危區域（如存在有害氣體、結構不穩定、有坍塌風險的區域）進行巡查時，自身亦面臨極高的安全威脅；

• 巡查時間與頻率受限：受限於體力與工時，人工巡查無法實現 24 小時連續監測，尤其在夜間或惡劣天氣停工期間，工地容易出現火災或水浸等隱患；

• 巡查主觀性與紀錄碎片化：人工巡查依賴個人經驗，容易漏檢，且巡查結果多為照片與手工紀錄，難以形成可追溯、可量化的三維數位資產。

3.2 四足機器狗巡檢系統的技術特點

四足機器狗具備卓越的仿生地形適應能力，能夠輕鬆克服傳統輪式或履帶式機器人無法穿越的施工障礙（如階梯、碎石路、泥濘地面、高低落差及管道交錯區），成為現場巡檢的絕佳載體。

（1）卓越的地形穿越與自主導航（SLAM &Autonomous Navigation）

機器狗配備 3D 雷射雷達（LiDAR）與深度視覺感測器，結合即時定位與地圖構建（SLAM）技術，能夠在無 GPS 信號的室內或地下結構中精確自定位。其強大的動態平衡演算法使其能夠穩定爬樓梯、跨越障礙物等。

（2）多傳感器融合搭載模組（Multi-Sensor Payloads）

機器狗背部可根據巡檢任務彈性擴展多種高度整合的載荷：

• 雙光（可見光+熱紅外）AI 攝影機：用於識別設備過熱、電線短路火花及未有佩戴安全帽等行為；

• 高精度 3D 雷射掃描儀：快速獲取現場點雲數據，進行三維空間比對；

• 多氣體偵測儀（Multi-Gas Detector）：即時量測硫化氫（H2S）、一氧化碳（CO）、甲烷（CH4）及氧氣濃度（O2）。

（3）雲端 AI 影像識別與違規自動告警

機器狗在按照預設路線進行自主巡邏時，傳輸回傳的影像會即時經由邊緣運算（Edge Computing）或雲端 AI 進行分析。系統能精確

辨識：

• 臨邊防護欄杆（Guardrails）是否被拆除；

• 孔洞蓋板（Floor Opening Covers）是否移位或缺少警示標識；

• 滅火器配備是否到位及消防通道是否被堵塞；

• 現場施工人員是否佩戴合規的防護裝備（PPE）。

3.3　機器狗在典型工地場景中的應用

場景一：密閉空間與地下工程先遣勘查

在進入密閉空間（例如：管道、深基坑穴、隧道、沙井或地下室等）施工前，機器狗作為「先遣隊」率先進入。透過其搭載的氣體偵測器與紅外鏡頭，辨識內部空氣質素，包括無毒氣、氧氣足夠等風險後，方發放「密閉空間准入許可」，極大保障了工人入場前的人身安全。

場景二：夜間與非作業時段自主巡防

夜間是工地火災、偷盜及非法闖入的高發期。機器狗可設定為夜間自動定時巡邏模式，沿著固定路線巡視整個工地，利用紅外熱成像監測配電箱是否過熱、有無隱蔽火源，並透過聲光警示驅離非法闖入者。

場景三：BIM 數位雙生與施工進度/安全雙重對比

機器狗在巡邏過程中採集的 3D 點雲數據可自動上傳至 BIM（建築資訊模型）平台，將現場實際結構與設計模型進行動態比對。這不僅能追蹤施工進度，更能精確識別結構變形、支架移位等隱蔽的安全結構隱患。

第四章　智慧人員註冊與控制 App：建立人本安全的數位化管線

4.1　傳統工人管理的痛點

建築工程具有人員流動性大、分包層級多、工種複雜的特點。傳統的人員管理往往依賴紙本登記表或簡單的刷卡進出，產生眾多管理盲區：

• 冒名頂替與無證上崗：非授權人員或未通過安全培訓的工人透過借卡等方式混入工地；

• 特種作業資質監管缺失：吊運督導員、訊號員、埋碼員、起重機操作員、塔吊操作員、電工、棚架工等等特種作業人員的資質證書過期或人證不符，難以即時查驗；

• 緊急疏散時人員統計困難：一旦發生火災或坍塌事故，管理層無法在第一時間掌握場內精確的人數、名冊及具體位置，嚴重阻礙救援工作；

• 安全培訓與違規紀錄脫節：工人的工具箱講座（Toolbox Talk）、違規操作紀錄分散在紙本檔案中，無法形成個人安全信用檔案。

4.2　智慧人員註冊與控制 App 的功能模組設計

「智慧人員管理 App」是將全場工人、管理人員、分判商及安全管理團隊連接在一起的數位化樞紐。其核心架構以「實名制」為基礎，涵蓋以下四大核心功能模組：

（1）人臉識別實名制註冊與動態資質審核

• 數位化入場手續：工人進場前透過 App 上傳身份證件、建造業工人註冊證（如「綠卡」/「藍卡」）及特種作業許可證。

• OCR 與官方數據庫比對：系統自動透過光學字元識別（OCR）提取證件資訊，並與政府或產業官方數據庫連線比對，驗證證件真偽與有效期。證件即將過期前，App 會自動向工人及分判商發送續期提醒。

• 線上安全培訓與考核：工人需在 App 上完成入場安全簡介（Safety Induction）課程並通過線上測驗，方可激活進場權限。

（2）智慧閘機與動態電子圍欄

• AI 人臉識別閘機：工地出入口設置結合 AI 人臉識別與體溫檢測的智慧閘機，實現毫秒級無感通行，徹底杜絕冒名頂替與代刷卡

現象。

• 分級分區准入控制：針對高危區域（如吊裝作業區、深基坑下井區、高壓電房），系統設定動態電子圍欄。只有在 App 中具備相應特種作業資質且已被獲批當日作業許可（Permit-to-Work，PTW）的人員，其人臉或智慧手環方能解鎖該區域的電子閘門。

（3）實時定位、動態追蹤與緊急求救

• 微型定位標籤整合：將物聯網定位晶片（如藍牙 BLE 哨站、UWB 晶片）整合至安全帽或智能手錶中。

• 熱力圖與人員分布：中控台與移動端 App 可實時顯示全場人員動態熱力圖，清楚掌握各樓層、各分區的人員密度。

• SOS 一鍵求救與靜止警報：當工人發生突發疾病或受傷時，可按下及發出求救按鈕；若系統偵測到工人處於異常靜止狀態（如昏迷）超過設定時間，App 會自動向安全團隊發送包含精確座標的求救訊號。

（4）數位化安全記分制與獎勵機制（Safety Merit & Demerit System）

• 即時違規舉報與紀錄：前線管理人員及安全主任在巡查時若發現工人未戴個人防護裝備，例如安全帶、安全帽或違規抽煙，可直接透過 App 拍照、選取違規條款並即時提交。系統會扣減該工人的「個人安全積分」，並通知其所屬分判商。

• 正向激勵機制：App 內置安全獎勵模組，對長期保持零違規、主動回報現場安全隱患（Near-miss Reporting）的工人給予數位積分，積分可兌換禮券或個人防護裝備，從而實現從「被動遵守」到「主動參與」的安全文化轉變。

第五章　科技融合：三者協同作用下的全方位智慧安全網

遠程控制塔天秤、四足機器狗與智慧人員管理 App 並非孤立運行的「資訊孤島」，而是透過智慧工地管理平台（Smart Site Safety System，4S）進行數據互聯與系統整合，構建出「人-機-環」三位一體的全方位動態防禦體系。

5.1　協同場景一：塔吊吊運區域的動態人員防護

當遠程控制塔天秤開始進行大件構件（如預製件 MIC 模組）吊運時：

1．塔天秤 AI 視覺系統與地面 BLE 定位系統即時對接；

2．App 系統透過定位晶片獲知吊運物正下方投影區域內有工人停留，App 隨即向塔吊操作員及該名工人發出警報；

3．同時，遠程控制塔天秤地面座艙的螢幕上立刻發出視覺警示，並要求操作員減速及繼續下降；

4．機器狗被調遣至吊運警戒線邊緣進行現場巡視，確保物理警戒帶無人跨越。

5.2　協同場景二：危險作業准入與機器狗安全驗證

在進行高危的密閉空間作業前：

1．分判商工友透過 App 提交數位化「危險作業許可證（PTW）」，並附上相關特種工人的資質認證；

2．機器狗先行進入該作業區域進行環境掃描，驗證現場氣體濃度是否安全、臨邊防護欄杆是否穩固；

3．機器狗確認環境安全後，將數據上傳至中央平台；

4．App 隨即自動記錄，容許工人進入場地施工。

第六章　推廣應用所面臨的挑戰與應對策略

儘管遠程控制塔吊天秤、機器狗與智慧管理 App 帶來了革命性的安全提升，但在全面落地推廣過程中，行業仍需克服以下挑戰：

7.1　技術與成本門檻

• 挑戰：高精度機器狗、遠程控制天秤改造及 5G 專網部署的前期資本投入較高，中小型分判商難以獨自承受。

• 策略：政府與行業協會應發揮引導作用。例如建造業議會推行的「建造業創新及科技基金（CITF）」，為購買或租用智慧安全裝備的企業提供高額資助；同時鼓勵科技供應商推出的租賃模式，降低企業入門門檻。

7.2　數據私隱與網絡安全

• 挑戰：App 對工人進行人臉識別與實時定位，可能引發工人對個人私隱洩漏（Privacy Concerns）的疑慮；此外，遠程天秤控制訊號若遭受網路攻擊，將造成嚴重安全事故。

• 策略：嚴格遵守數據保護法規及個人資料私隱條例。App 採集的定位數據僅限於工地範圍內及工作時段，且數據進行去識別化與加密儲存；遠程控制網絡採用物理隔離的 5G 專網與雙重加密協議，確保控制權不被篡改。

7.3　工人科技接受度與安全文化轉型

• 挑戰：部分資深工人或年長勞工可能對智慧手機 App 操作感到陌生，甚至對機器人巡檢產生排斥情緒。

• 策略：簡化 App 用戶介面，採用大字體、語音輸入及圖示化設計；開展持續的數位技能培訓，並透過 App 內的「安全積分代幣」激勵工人主動使用，將科技轉化為對工人的實質關懷。

第八章　結論與未來展望

科技的本質是服務於人，建造業科技創新的終極目標是讓每一位建築工人都能夠「開開心心上班來，平平安安回家去」。

遠程控制塔天秤將操作員從百公尺高空的環境中解脫出來，重構了起重機作業的人機關係；四足機器狗以其卓越的地形穿越能力與多感測器整合能力，成為了施工現場永不疲倦的安全哨兵；智慧人員註冊與控制 App 則透過數位化手段，將看似複雜的人員管理轉化為精確、透明且具備正向激勵作用的動態生態系統。

展望未來，隨著人工智能生成式模型、數位雙生與 6G 通訊技術的進一步成熟，建造業的安全管理將實現從「自動化」向「自主智慧化（Autonomous Safety Systems）」的跨越。科技不再僅僅是輔助監管的工具，而是將深沉地融入工地的每一個工序與細節，為建造業的可持續發展與安全表現築起一座堅不可摧的智慧長城。

香港以數字化和科技方案提升職業安全健康及福祉的經驗分享

楊冠全首席顧問
香港職業安全健康局

摘　要：積極運用創新科技與數字化方案，可有效提升職業安全與健康水平。為促進技術普及與跨行業協作，香港政府與職業安全健康局正推動各行業創新科技轉型與技術整合。

政府透過財政與政策支援，推動智慧安全系統廣泛應用；職安局則舉辦創科博覽及設立獎項，鼓勵企業採用科技與人工智能，建立預防為先的安全文化。

目前多項技術已實際應用於提升職場安全健康表現：

1. 人工智能數據分析：分析現場數據，實現風險預警，將安全管理轉為「數據驅動、主動預測」模式。把安全管理由「靠人檢查、被動補救」轉為「用數據分析、主動預測、警示、精準防控」。

2. 智能遙控操作：以人工智能監控高風險作業，必要時自動警示，或透過遙控操作減少人員暴露於危險環境。

3. 數位孿生與管理平台：建構同步的數位孿生模擬與優化安全流程，實現動態風險管控。

4. 機器人與無人機巡查：以機器人與無人機執行高空、偏遠或高風險任務，並透過強化網路確保訊號穩定傳輸。

5. 健康風險預警工具：透過人工智能分析視網膜影像等數據，早期評估睡眠障礙、中風等健康風險。

6. 外骨骼技術：透過穿戴式外骨骼設備，減輕前線員工的體力負荷，降低因勞損引致的風險。

7. 數位化安全訓練平台：運用虛擬實境及體感互動技術提供沉浸式安全訓練，讓學員在虛擬環境中親身體驗意外的情境，提升危害識別能力與安全意識。

8. 生成式人工智能的應用：應用生成式人工智能協助規劃安全巡查計劃、編製及分析巡查報告、建立智能助理提供即時安全諮詢、以及製作宣傳刊物，從而提升安全管理效率。

9. 智慧穿戴設備：透過智慧穿戴設備的傳感器，持續監測員工的心率及體溫等生理狀況，實現中暑等健康異常狀況的早期偵測與即時預防。

10. 物聯網技術：整合各類傳感器以強化對工作安全的監控，例如：於臨時工程及支架裝設結構傾斜預警系統、於棚架連牆器裝設傳感器，以及應用智能安全帶以持續監察防墮系統及繫穩點的使用。

創新科技有助減少工作意外、推動預防文化並提升效率，但同時也帶來「科技焦慮」等挑戰。有效應對這些問題，是實現職場安全健康可持續發展的關鍵。此外，建立人工智慧輔助安全技術的國際評估標準，亦是確保技術效能與可靠應用的必要基礎。

一、前　言

隨着數字經濟迅速發展、人工智能技術日趨成熟，以及各行各業積極推動智慧化轉型，職業安全健康（職安健）管理亦正迎來重大變革。過往職安健工作主要依賴人員巡查、經驗判斷及事後改善措施，但隨着人工智能（AI）、物聯網（IoT）、機械人技術（Robotic）、數碼孿生（Digital Twin）、虛擬實境（VR）及生成式人工智能（Generative AI）等創新科技廣泛應用，職安健管理模式正逐步由「事後應對」轉向「主動預防」，進一步提升工作場所的安全水平及員工福祉。

香港作為國際城市，一直重視職業安全健康發展。近年香港特別行政區政府及職業安全健康局（職安局）積極推動創新科技及數字化方案在各行業的應用，透過政策支援、資助計劃、示範交流及推廣活動，鼓勵企業引入及應用先進技術，以科技協助辨識風險、預防意外、改善工作環境及促進員工健康。這些措施不僅為建造業等高風險行業帶來顯著效益，亦逐步擴展至其他行業，為香港建立更全面、更具前瞻性的職安健文化奠定基礎。

以下分享香港近年運用數字化及創新科技提升職業安全健康及福祉的經驗例子與發展方向，以及探討相關技術的應用成果、面對的挑戰及未來展望。

二、香港推動職安健科技化的發展歷程

香港近年持續推動職安健數字化轉型，並逐步建立智慧安全生態系統。在 2020 年前後，隨著資訊科技普及，建造業及高風險行業開始引入各類數碼工具協助安全管理，到了 2023 年，香港政府針對工地安全實施了一系列政策，要求工務工程上合約金額超過 3,000 萬元的基本工程合約必須全面採用「安全智慧工地系統」（Smart Site Safety System，簡稱 4S），推動業界廣泛採用數字化管理及安全監察技術。安全智慧工地系統是指透過物聯網（IoT）、感測器、人工智能（AI）、視像分析、智能穿戴設備及中央管理平台等技術，即時監察工地風險，提升工地安全表現。

政府透過財政支援及政策引導，協助企業引入智能設備及創新方案；職安局則透過舉辦創新科技博覽會、設立獎項及推行示範項目，鼓勵企業採用人工智能及數字科技，逐步建立「預防為先」的安全文化。

三、人工智能提升高風險工序安全管理

建造業一直是職業安全風險較高的行業。傳統安全監察主要依賴安全主任巡查，但大型工地面積廣闊、工序繁多，人手監察往往受到時間及資源限制。隨着人工智能（AI）影像辨識及電腦視覺技術日趨成熟，現時可透過閉路電視配合人工智能系統，自動識別危險行為及高風險狀況，提升監察效率及覆蓋範圍。例如，在吊運作業期間，人工智能系統可透過分析即時影像，自動偵測工人是否進入吊運危險區域或停留於吊運物下方，並即時向管理人員發出警報。系統亦能監察流動式起重機的支撐腳（Outriggers）是否完全伸展及穩固放置，避免因設置失誤而引致起重機傾倒事故。

在涉及多吊索吊運作業時，人工智能可辨識鈎環（Shackles）是否正確使用，協助防止吊運設備鬆脫或失效。此外，在挖掘工程中，系統可於指定範圍設立可偵測的危險區域，當工人誤闖指定危險區域時，即時發出警示，提醒工人及管理人員採取措施。

人工智能技術的應用不單限於監察工序安全，更可延伸至個人防護裝備的管理。例如透過智能辨識系統，自動監測從業人員是否已適當佩戴安全帽及反光衣等指定裝備，從而加強安全合規管理，確保各項防禦措施落實到位。

另一方面，人工智能系統能持續收集及分

析工地數據，協助企業了解高風險位置、常見違規行為及事故趨勢。透過分析這些數據，管理層可及早採取改善措施，例如優化施工安排、調整工作流程或加強針對性培訓，從源頭降低風險。透過全天候監察、即時預警及數據分析功能，人工智能有效補充傳統巡查工作的不足，不但能提高風險工序的安全管理水平，更有助推動職安健管理由「事故後應對」逐步轉向「風險預防」，建立更主動和更具前瞻性的安全文化。

四、數碼孿生技術推動智慧工地管理

數碼孿生是近年智慧建造的重要技術之一。其概念是利用三維建模及即時數據，建立與實際工地同步的虛擬環境，讓管理團隊能夠於數碼空間中監察整個工程項目的運作狀況。

透過數碼孿生平台，管理人員能夠即時掌握工地設備運行情況、人員分布、工程進度及潛在風險。系統將現場感測器、攝影鏡頭及物聯網設備所收集的數據整合至統一平台，提供更全面的管理視角。其中一項重要功能為接近警示系統（Proximity Detection）。當工人過於接近大型機械設備，或誤闖危險區域時，系統會立即通知監督人員採取行動，避免意外發生。此類智慧管理平台不僅提升工地安全水平，同時改善項目協調效率及決策能力，成為智慧工地的重要基礎。

五、沉浸式培訓加強安全意識

培訓是職安健管理的重要一環，但傳統課堂教學往往難以讓員工真正理解事故後果。為提升培訓成效，香港企業近年積極利用虛擬實境（VR）、混合實境（MR）及沉浸式環境（CAVE）技術，建立更貼近真實工作情境的安全培訓模式。

透過頭戴式裝置及四維互動介面，學員可親身體驗各類模擬工地事故，例如高處墮下、物件墮落、設備碰撞及密閉空間意外等情景。雖然整個訓練過程在虛擬環境中進行，但其視覺及互動效果高度逼真，能讓學員深刻體會不安全行為可能帶來的嚴重後果。

與傳統安全培訓相比，沉浸式訓練最大的優勢在於能夠讓學員在零風險的環境下體驗高危情境。例如學員可以模擬站於高空工作平台邊緣，感受沒有正確佩戴安全帶可能產生的後果，亦可體驗因錯誤操作設備而引致的模擬事故。對於新入職工友而言，這類體驗式學習特別有效。由於部分工人缺乏實際工作經驗，未必能充分理解安全規則背後的原因。透過視覺化及互動式培訓，學員可以更深刻認識危害因素及正確工作程序，提升培訓效果。同時，企業亦可根據不同工種設計專屬課程，提高訓練的針對性及實用性。

六、利用無人機及機械人應對密閉空間風險

進入密閉空間（例如沙井、污水渠、隧道、喉管、水缸等）工作的風險極高，容易出現有毒氣體、貧氧環境、被水淹沒而遇溺或被流動的固體淹沒而窒息、火警、爆炸或在其內因體溫上升以致中暑等情況。近年香港曾發生多宗與密閉空間相關的嚴重工業事故，包括工人在進行排水渠或地下管道維修工程期間，懷疑因吸入有毒氣體例如硫化氫中毒或缺氧窒息死亡等，可見其風險實在不容忽視。

為降低事故風險，業界開始利用無人機及機械人進行密閉空間巡查及檢測工作。在進入高危區域前，無人機可先進入現場收集影像及環境數據，識別潛在危害。機械人則可代替工人執行部分檢測及巡查工作，減少人員暴露於危險環境的需要。同時，系統可自動分析巡查結果並生成檢查報告，大幅提升工作效率及風險管理能力。這種「先以科技進入，再由人員跟進」的工作模式，有助從源頭減少意外風險。

除密閉空間外，無人機亦可應用於其他高危檢查工作。例如在高樓外牆、橋樑底部及偏遠斜坡等位置，過往往往需要工人搭建棚架或使用吊船進行檢查，不但耗時，而且存在高空工作風險。透過配備高清攝影機及熱成像技術的無人機，管理人員可迅速完成巡查工作，並即時分析設施狀況。另外，對於機械人而言，其應用範圍亦正不斷擴大，部分機械人已具備自主導航功能，可按照預設路線進行檢查及數據收集，進一步提升工作效率及安全水平。

這種以科技取代高危工序的趨勢，充分體現「以科技代替人員承受風險」的安全管理理念。

七、智能穿戴設備保障前線工作人員安全

智能穿戴設備已逐漸成為智慧工地的重要組成部分。以智能安全帽為例，相關系統結合全球定位系統（GPS）、物聯網感測器及通訊技術，可即時追蹤工人位置，掌握人員分布情況。系統亦能持續監測工作人員的生理數據，包括體溫、心率等健康指標。當出現異常情況時，系統可即時發出警報，提示管理人員採取適當措施。在香港炎熱天氣持續的情況下，熱壓力管理愈來愈受到重視。智能穿戴設備能夠持續監察工人的身體狀況，協助管理人員及早監測工人中暑風險。部分企業更會利用有關數據調整工作時間安排、休息頻率及補水措施，從而提升整體工作安全和員工福祉。

此外，智能安全帽可與危險區域監察系統連結，當工人接近高風險區域時即時發出警示。部分設備亦設有緊急求助按鈕，讓員工在遇到緊急情況時能迅速求援。

透過實時數據監察及快速應變機制，智能穿戴設備有效提升前線人員的安全保障。

八、生成式人工智促進多語言安全溝通

香港建造業廣納來自不同地區及文化背景的工作人員，語言差異有時會影響安全信息傳達的效果。近年生成式人工智能發展迅速，為解決跨語言溝通問題提供新方案。

透過生成式人工智能技術，可製作具備語音及影像功能的「數碼人像」（Talking Portraits），以不同語言向工友提供安全培訓內容。例如工具箱會議（Toolbox Talk）及安全簡報，可自動轉換為尼泊爾語、印地語及其他常用語言，讓不同國籍的工友均能充分理解工作風險及安全要求。另外，生成式人工智能技術能根據不同工作內容生成安全提示及工具箱會議內容。例如涉及高空工作或吊運工序時，系統可自動整理相關風險及控制措施，協助前線主管準備安全簡報。有關技術不僅提升培訓覆蓋率，同時有助減少因語言誤解而引致的安全事故。

九、虛擬建築安全助理

生成式人工智能在職安健領域的另一項重要發展，是建立具備安全知識的虛擬建築安全助理（Virtual Construction Safety Assistant）。

該系統結合大型語言模型（LLM）、電腦視覺（Computer Vision）及職安健法規知識庫，能夠分析工地影像並識別潛在違規情況。例如，系統可偵測工人在沒有防護設施的邊緣位置工作，或使用不安全木梯等情況。當發現問題時，系統可即時向安全管理人員發出提示及提出改善建議。

由於系統具備自然語言溝通能力及語意推理功能，使用者可透過對話方式查詢相關法規、風險控制措施及安全建議，猶如獲得一位全天候工作的虛擬安全顧問。

十、人工智能推動員工健康與福祉

職業安全健康不單涉及預防工傷，亦涵蓋員工整體健康與福祉。近年人工智能動作追蹤技術開始應用於平衡訓練及健康促進計劃。利

用三維動作分析技術，系統可即時比較使用者姿勢與標準動作，提供實時回饋及改善建議，而無需佩戴任何感測設備。相關平台亦具備遊戲化設計及互動評分功能，提高員工參與度及持續使用意願。此類方案特別適合辦公室在職人士及高齡勞動人口，鼓勵活躍多動生活模式，有助預防肌肉骨骼疾病、改善平衡能力及促進長遠健康管理。

此外，香港已有大學引入人工智能視網膜影像分析技術（Automatic Retinal Image Analysis，ARIA）。視網膜是人體唯一能直接看到血管和神經組織的部位，可以反映全身血管與神經疾病微小改變。透過眼底攝影機拍攝的視網膜影像，系統可利用人工智能進行分析，協助評估中風及認知障礙症風險。由於檢測過程屬非入侵性及高度自動化，因此能為員工提供更便捷的健康風險評估服務。

十一、技術發展帶來的新挑戰——科技壓力

雖然科技能夠提升安全水平及工作效率，但過度依賴科技亦可能帶來新的心理健康挑戰。近年「科技壓力」（Technostress）逐漸受到國際關注。隨着人工智能及數字工具廣泛應用，員工可能面對不同形式的壓力來源。

首先是科技超載，員工需更快完成更多工作；其次是科技複雜性，部分系統功能繁複，增加學習負擔。此外，員工可能擔心被人工智能取代，產生科技不安全感；亦可能因技術快速更新而需要持續重新學習，形成科技不確定性。另一項常見問題是科技入侵私人生活。當流動裝置及人工智能工具全天候連接工作系統時，工作與生活界線容易變得模糊，影響身心健康。因此，在推動數字化轉型過程中，必須同步關注員工心理健康及工作福祉。

十二、透過培訓管理科技壓力

有效培訓是管理科技壓力的重要策略。香港近年開始將生成式人工智能培訓納入職安健教育內容，包括介紹人工智能基本概念、職安健應用場景、提示詞設計技巧，以及利用人工智能聊天機械人處理工作場所安全問題等。透過實務操作及案例討論，參與者能更深入了解人工智能的優勢、局限及潛在風險，包括錯誤資訊、誤解讀結果及個人資料私隱等問題。當員工能夠正確理解及掌握科技工具時，便能減少焦慮感及不確定性，更有效運用科技協助工作。

十三、建立以人為本的數字化職安健策略

科技並非萬能。成功的數字化轉型必須以人為本。科技本身並不能取代安全文化的重要性。即使最先進的人工智能系統或智能設備，也需要配合管理層承諾、員工參與及持續改善機制才能發揮最大效益。因此，企業在推動數字化轉型時，除考慮技術投資外，亦應同步加強安全領導能力、員工溝通及組織文化建設。只有當員工願意理解和接受新技術，並視科技為協助保障自身安全和健康的工具，而非監察或增加工作壓力的手段，智慧職安健措施才能獲得長遠而持續的成功。這種以人為本、科技賦能的發展方向，亦是香港推動職業安全健康現代化的重要基礎。

企業應確保員工參與科技方案的規劃、設計、實施及監察過程，讓科技真正配合工作需要，而非增加額外負擔。其次，必須提供有系統及具針對性的培訓，讓員工具備安全使用新技術的能力，同時掌握應對新興風險的方法。此外，企業需建立完善的內部政策、技術標準及測試機制。在部署人工智能系統前，應透過基準測試、多專業團隊評估及安全測試等措施，檢視系統的準確性、可靠性、公平性、資訊安全及倫理風險。只有在技術應用與人員能力同步提升的情況下，創新科技才能真正發揮其促進職業安全健康的價值。

十四、總　結

香港近年積極推動以創新科技及數字化方案提升職業安全健康及福祉，從智慧工地安全系統、人工智能風險監測、數碼孿生平台、虛擬實境培訓、無人機及機械人巡查、智能穿戴設備，到生成式人工智能安全助手及健康管理工具，均展示科技在預防事故、保障員工健康及提升管理效能方面的巨大潛力。

未來，人工智能、物聯網、機械人及數字平台將進一步融入工作場所，推動職安健管理邁向更即時、更智能及更具預測性的發展模式。然而，科技發展亦伴隨科技壓力、數據安全及個人資料保障等新挑戰。因此，政府、企業、及勞工各持份者必須共同努力，在推動創新應用的同時，堅持以人為本的理念，建立完善的政策、培訓及管理制度。透過人機協作、科技賦能及持續創新，有望進一步提升職業安全健康水平，為各行各業建立更安全、更健康及更可持續發展的工作環境。

基於大語言模型的職安健「學・考・用」一體化智能平台

盧展宏，游浩泓，何竣浠，雷茜晴
澳門電力股份有限公司

摘　要：電力工程施工具有高風險、高投入與高技術的三高特性，前線工程團隊對職業安全健康（職安健）規範的熟練程度，是確保供電穩定與人身安全的關鍵要素。然而，傳統培訓模式面臨知識傳遞斷層與考核制度僵化的挑戰。為此，本研究開發一套基於大語言模型的職安健「學・考・用」一體化智能平台，旨在透過人工智能技術構建一套技術與創新並重的安全管理體系。

平台的核心設計圍繞「學、考、用」閉環邏輯展開。在「學」的階段，利用大語言模型對職安健規條和公司內部的工作指引進行智能分析與學習，提供個性化學習路徑。在「考」的階段，平台透過大語言模型生成考核和情境模擬題，深度驗證員工的安全意識和決策能力，並提供考題解析；在「用」的階段，將考核結果與實體工作許可融合，確保「知行合一」。

智能平台旨在顯著提升從業人員之職安健意識、熟練與應變能力，從根本上杜絕因認知偏差或操作疏漏所引發之工作安全風險。此外，智能平台核心優勢在於打破傳統上課安排之侷限，使學員能全天候隨想隨學。個性化之培訓與自動化的評估，實現「精準培訓」與「嚴格授權」之無縫銜接。此一創新機制推動企業的安全管理由被動防範向主動賦能的轉型，為電力工程行業落實職安健管理提供強大的支撐。

關鍵詞：人工智能、大語言模型、檢索增強生成、職安健、學考用一體化

1. 引　言

電力供應與安全是現代城市運作之命脈，其工程作業具有高風險、高投入與高技術的「三高」屬性。貫穿發電、輸配電至低壓設備全鏈路的預防檢查與缺陷修復工作中，澳門電力股份有限公司（下稱澳電）均要求前線工程師和技術人員在帶電環境中作出精準的安全判斷和風險評估。任何對職安健規範的認知偏差，輕則導致設備誤動作引發停電，重則造成人員傷亡。

然而，現行培訓制度在此類場景下存在許多結構性侷限：其一為知識斷層，電力設備定檢所倚賴的資深經驗難以完全通過指引傳導，並隨著人員退休而流失；其二為靜態化，集中授課難以兼顧不同工種與資歷人員的差異化需求；其三是課程之考核與實務的脫節，員工縱能複述條文和通過考核，但面對突發事件發生時不一定能作出正確響應，無法保證工作安全。為解決上述難題，本研究提出之職安健智能平台「澳電馭安智學平台」，以人工智能大語言模型重構職安健知識學習體系，生成結構化的學習計劃、個性化的考試題目和多樣化的安全隱患情景，為澳電團隊成員提供全天候安

全知識自主學習平台。

2. 電力行業的職安健培訓

本節首先梳理粵港澳三地的培訓政策，隨後剖析澳電內部培訓實踐與現存侷限，說明由傳統培訓向動態智能平台轉型的迫切需求。

2.1 粵港澳三地政府與電力行業的培訓政策

國內以《安全生產法》為總綱[1]，應急管理部《特種作業人員安全技術培訓考核管理規定》要求高低壓電工等特種作業者須經培訓考核，取得《特種作業操作證》才可上崗，該證全國有效，有效期六年且三年複審一次[2]。

香港對建造及高風險作業實施強制性安全訓練，《工廠及工業經營條例》指出，從業員須修畢俗稱「平安卡」的課程並通過筆試，才可進入工地，該證明書有效期為一至三年，期滿須重新甄審[3]。電力工作另受《電力條例》規管，須由機電工程署註冊電業工程人員（A 至 H 級）執行[4]。

澳門勞工事務局作為職安健的法定監管機構，推行了一系列切合本地工程特性的安全指引與培訓政策，其中強制要求工程人員必須考獲「職安卡」方可進入工地，確保從業員具備最基礎的危害識別能力[5]。局方更設有職安健網上學習平台，以動畫、模擬考試與學習歷程記錄推動自主學習[6]。

2.2 澳電的內部培訓實踐

澳電在內部職安健培訓上構建了嚴密的體系，自二零零七年起先後獲得多項國際管理標準，包括 ISO 9001 質量管理系統、ISO 14001 環境管理系統、ISO 45001 職業健康及安全管理系統、ISO 14064-1 溫室氣體管理系統，以及 ISO 20000-1 資訊科技服務管理系統，奠定了堅實的安全文化基礎。

澳電以整合管理體系（Integrated Management System）為骨幹，建立逾三十份職安健的工作指引，橫跨危害識別與風險評估、作業危害分析、上鎖掛牌等多個高危範疇[7]。為確保這套安全規程的管理體系能真正落地，澳電除了嚴格執行工程師和技術人員於入職前需考獲職安卡的規定，更定期舉辦「電力工程一級及二級課程」，當中專設「職業安全與健康」、「職業安全應用」、「進入電力設施安全須知」及「安全、健康、環境及品質管理體系」等職安健主題，以及「風險評估及工作前風險評估」課程，均以考試作為評核[7]，確保所有工程參與者在進入高危作業現場前，具備統一且專業的職安健意識與實踐能力。

然而，部門內部的培訓面臨侷限。第一，知識傳遞高度依賴傳統的師徒制以及資深人員的單向授課，此模式不僅使知識傳導效率受限，且大幅消耗資深人員的備課與工作時間。對輪班制的團隊更需重複授課，衍生了額外的超時工作成本和人力資源。第二，單向授課後缺乏量化的考核數據，導致管理層難以精準分析學員個人短板。第三，受限於現實條件，現有機制難以在真實電網中重現小概率但高風險的極端故障情境（如多重設備連鎖跳脫）。缺乏高逼真度情境模擬的訓練下，直接削弱了前線人員在突發狀況時的壓力管理、響應速度與精準決策能力。第四，電網運行標準與操作指引隨設備升級而頻繁修訂，容易出現新舊版本混淆，增加誤判風險。第五，培訓課程是定期舉辦，通常是半年或者一年為一個週期，在空窗期內學員因疏於操練而容易遺忘。第六，學員的本能和對知識掌握熟練程度存在極大差異，單向授課難以提供個性化的學習環境，學員可能因害羞而不敢在課堂中發問，單向授課難以達到優先補齊的目的。

儘管澳電已具備嚴密的職安健體系與考核機制，面對上述培訓的侷限，傳統單向授課的靜態培訓難以有效轉化為實際操作的精準決策力。這促使安全管理和培訓的實施路徑，亟需轉型至具備決策驗證與情境重現功能的智能培

訓平台，藉由模擬實際操作情況，直接強化前線人員對危險狀況下的反應和決策邏輯。

3. 電力行業和職安健培訓平台

電力行業一般沿用傳統的調度員培訓模擬器（Dispatcher Training Simulator，簡稱 DTS）。國內電網企業已經探討採用大模型和數字化學習平台。本節就這些應用進行客觀對比，以確立澳電職安健培訓平台的應用邊界與架構考量。

3.1 調度員培訓模擬器的演進與侷限

DTS 由 Latimer 於一九七七年提出，經美國電力研究院（EPRI）推廣後普及，澳電亦使用多年並已展開新 DTS 項目的工作。DTS 以電力系統調度員在擬真環境下受訓[8][9]。然而，受資料精度與維護資源受限，模擬場景可能存在錯誤而誤導學員[8]。更重要是，訓練是對電網模型的操控，而非職安健規程的內化。

3.2 國內電網企業大模型

國內電網企業以行業大模型突破。南方電網「大瓦特」為行業首個自主可控、跨自然語言處理與計算機視覺的大模型，具多輪對話、自動生成巡檢報告與知識增強等能力[10]。國網亦於 2025 年初完成 DeepSeek 部署並與「光明電力大模型」融合，在特高壓直流主設備狀態評估等場景將周級工作壓縮至分鐘級[11]；近期研究亦探索以大模型輔助調度決策[12]。但該模型定位為面向生產的決策大腦，而非職安健培訓閉環。

3.3 職安健數字化學習平台

近年國內和澳門的職業安全培訓由親身授課向數字化學習平台遷移。國內電網企業相繼以行業大模型構建知識問答助手，將規程檢索與培訓輔導嵌入日常工作[10]，此類平台多以線上課件、微學習與自動化測驗為主，提升了學習的可及性與彈性。澳門勞工局推出職安健網上學習平台，將《建築業職安卡》等課程數字化，以動畫拆解工傷成因、網上遊戲演練吊運與拆卸的安全程序，並支援分段學習、模擬考試與學習歷程記錄。惟數字化學習平台的內容多為預製課件與標準化題庫，難以根據學員的工種、短板、資歷及企業專屬指引動態生成學習資料與考核內容，更遑論將考核結果與實體作業授權銜接。

4. 澳電馭安智學平台

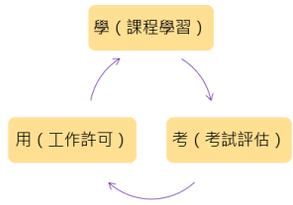
澳電馭安智學平台結合 DTS 對電網的模擬操控、電網企業大模型的知識增強和電網運行決策的優勢，以及職安健數字化學習平台的線上課程和題庫功能的優點，以創新閉環形式管理職安健知識的學習、考核與授權。以下將著重介紹澳電馭安智學平台的設計構思、架構和功能，以及目前效益。

4.1 設計理念

澳電馭安智學平台以大語言模型為核心引擎，旨在把靜態的電力系統專業技術與職安健知識，轉化為動態的智能管理架構，構建「學、考、用」的核心閉環。

圖一　澳電馭安智學平台設計理念

平台借鑒控制工程的閉環管理（closed-loop management），「學」之輸出為「考」之輸入，「考」之結果驅動「用」之授權，「用」之檢討為「學」之導向。在「學」與「考」的層面上，雖然大語言模型善於語意理解與生成，惟直接用於安全與風險攸關的場景內，其幻覺（hallucination）將成致命隱患[13]，任何杜撰的操作步驟或條文理解足以陷員工於險。本平台因而全面導入檢索增強生成（retrieval-augmented generation）技術，所有生成的安全指引均強制錨定於內部規程與法規向量庫，確保每項操作建議皆具備絕對準確性與可溯源性[12]。此外，平台更引入個性化學習，依學員答題的表現採用動態調整推送內容深度、闊度與順序，引導學員循序漸進。於擬真情境中思辨，將文本學習內化為近乎條件反射的安全直覺。通過不斷重複，針對學員的短板，透過個性化的學習軌跡，令學員的大腦產生反復刺激形成習慣，最後沉澱為個人知識。通過考核結果認知不足之處，以及定期覆檢來強化短板，添補新知識，這樣員工的安全意識和能力不再只是紙面上的分數，而是轉化為緊貼現實的個人內化知識和意識。

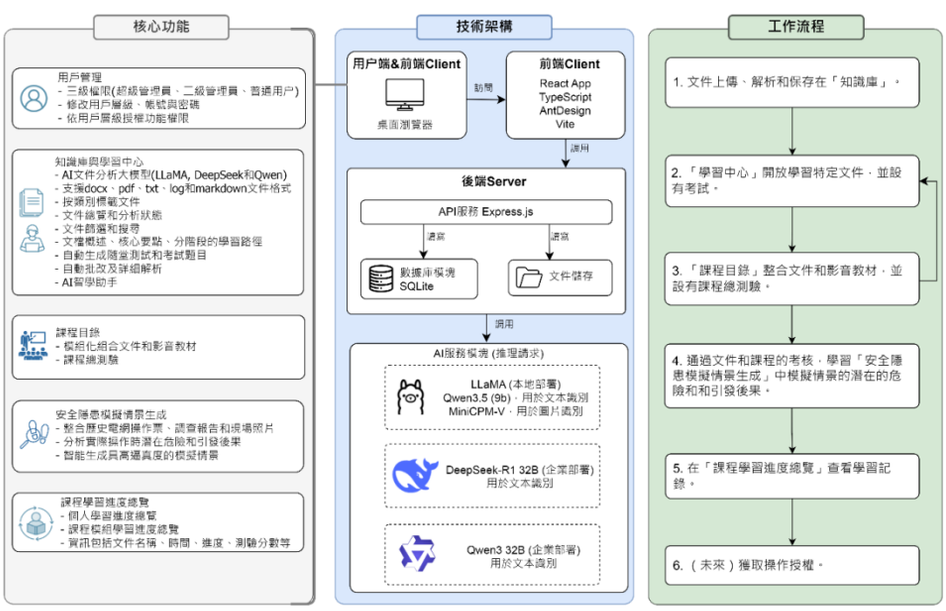


圖二　「學、考、用」閉環管理

4.2　架構與功能

平台以本地部署的 LLaMA、DeepSeek 和 Qwen 大模型作為核心工具，LLaMA 負責圖片內容識別、Qwen 和 DeepSeek 則分別負責長短文本的分析，本地部署大模型承接電網拓撲與關鍵設施的專業文件，以全閉環、本地化的方式實現資料保密，並且大模型的回答只限於本澳公開的法規、公司內部指引文件與培訓資料。

平台採用前後端分離設計（圖三），前端經桌面瀏覽器訪問並以 React、TypeScript、AntDesign、Vite 構建；後端以 Express.js 提供 API 接口，並搭配 SQLite 與本地文件儲存；AI 服務模組接入本地部署的 Llama、DeepSeek 和 Qwen 大模型引擎。平台的核心功能包括用戶管理、知識庫與學習中心（4.2.1 節）、課程目錄（4.2.2 節）、安全隱患模擬情景生成（4.2.3 節），以及課程學習進度總覽（4.2.4 節）。



圖三　平台的核心功能、技術架構與工作流程

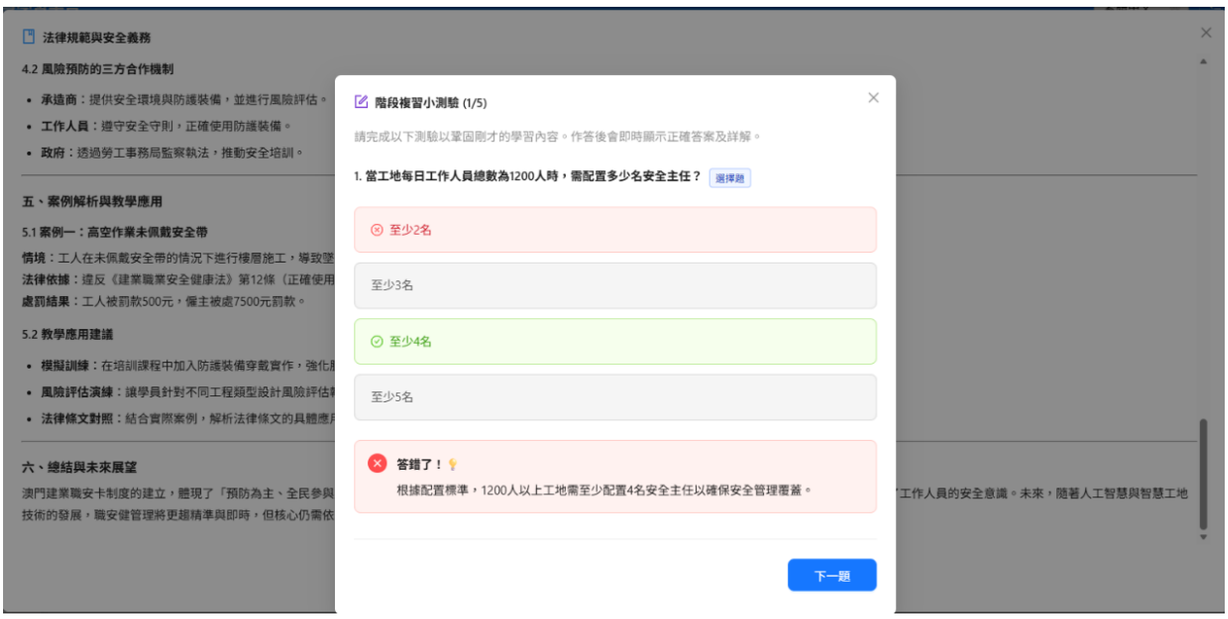
4.2.1 知識庫與學習中心

在「知識庫」中，學員可以用拖放形式把文件導入平台，或設定自動監控指定資料夾，一旦有新報告導入便自動開始分析，並顯示掃描時間與完成數量。平台支援 docx、pdf、txt、log 和 markdown 主流文件格式，並按文件的類型（如新人培訓、電網運行指南、設備操作手冊、國際標準、故障設備分類、故障根本原因等）做標籤。

以導入職安卡課程教材為例，分析過程中（圖四），平台先讀取文檔中的文字，後續逐張辨識圖片並描述其內容。分析完成後，平台輸出文件的文檔概述、核心要點和多個學習階段（圖五），以及考試題目（圖五），而學習階段的劃分是由平台根據文件的複雜性和內容而定。管理員更可對上述分析結果進行更改或重新生成，確保知識理解是經核實且準確無誤。

圖四　文檔分析進度

圖五　文檔概述、核心要點、分階段的學習路徑



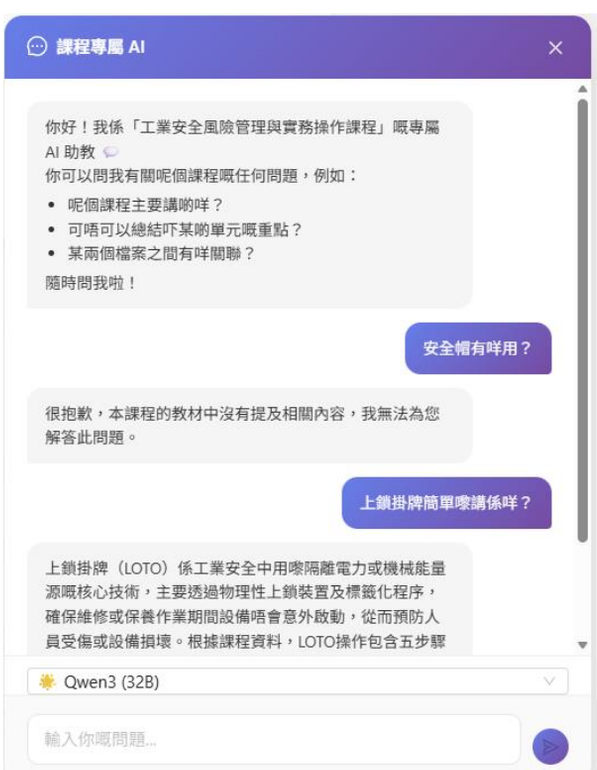
圖六　平台生成的考試題目

通過平台分析的所有文件可一覽展示（圖七），並提供文件的分類、分析狀態追蹤與檢索功能，管理員更可對文件進行管理。

圖七　知識庫的文件管理、AI 分析狀態與分類檢索介面

「學習中心」提供經開放學習的文檔（圖八），學員可透過圖五中的進度條掌握進度，而管理員可設定學習門檻，要求學員完成前置材料且考試成績達標，才可學習當前文檔。然而，AI 智學助手（圖九）秉持「有據則引、無據不答」的宗旨，對學員的疑問提供即時解釋和引用相關內容，若文件未提及，則據實提示而不臆造。

圖八　學習中心

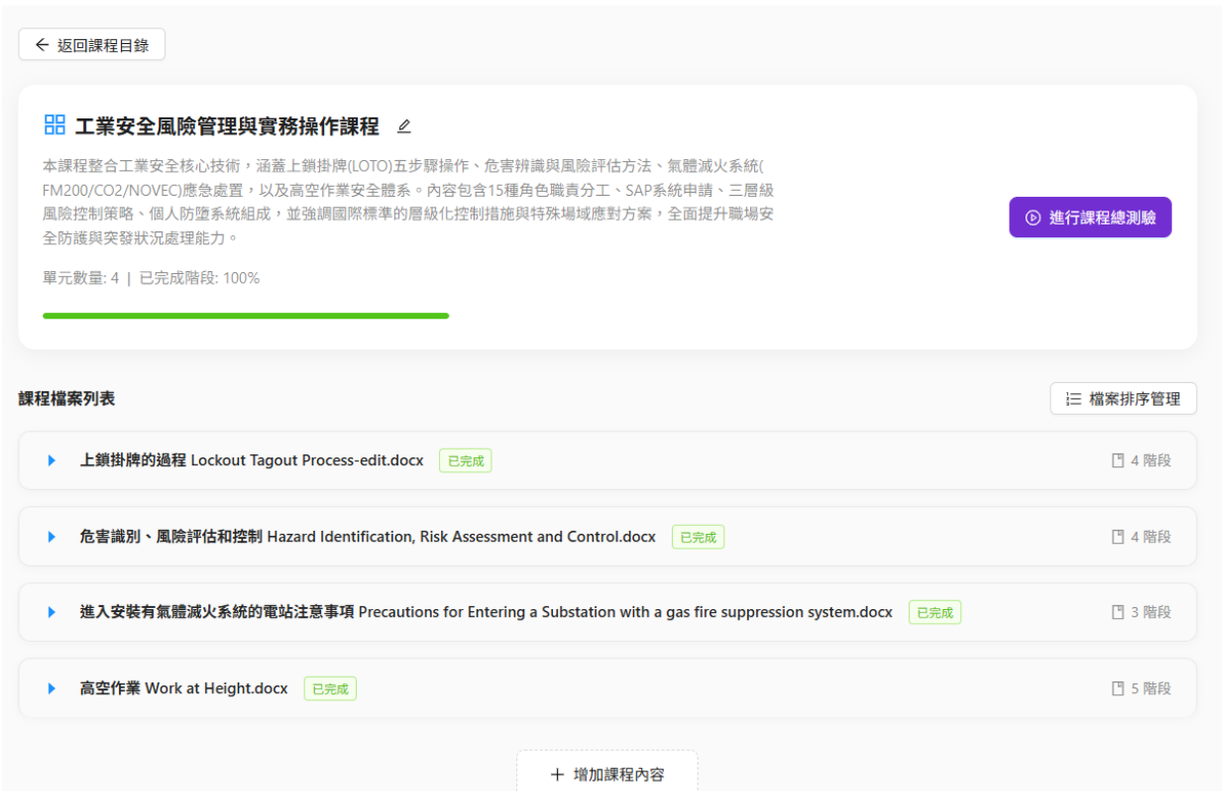


圖九　AI 智學助手

4.2.2　課程目錄

「課程目錄」賦予管理員編排教材的靈活性，管理員可針對複雜的工程作業、多個相互關連的知識點等，將已解析的文件與影片進行自定義組合，打破過往單一文檔碎片化學習的局限。學員必須完整閱覽該課程內的所有關聯教材，並通過課程總測驗，且成績達標，方可取得合格認證。

圖十　課程目錄總覽



圖十一　模組化培訓課程目錄

4.2.3　安全隱患模擬情景生成

平台透過整合單一或多份歷史電網操作票、調查報告和現場照片等資料，分析實際操作時潛在的危險、人為缺失和引發的後果，生成具有高逼真度的模擬情景，包括：執行摘要和嚴重程度（高／中／低）、故障發生位置、故障設備、視覺分析發現、技術細節、根本原因分析、後果評估。

平台生成的模擬情景案例如下，某天工程技術人員更換客戶變電站內低壓總掣櫃某相的保險絲，不慎把保險絲掉入兩相的保險絲底座之間，引發相間短路，產生電弧閃絡，並觸發保護設備動作，使上游的變壓器跳閘。此意外造成工程技術人員受傷和電力中斷。情景生成後的分析顯示（圖十二），前線人員因未依 JHA 穿戴完整個人防護裝備、現場未隔離帶電

部件等間接因素，造成受傷加劇。此功能生成一個在實際工作中可能出現之安全隱患，並能轉化為可重演、可重覆演練的培訓素材，彌補在真實電網中難以發現及演練的小概率高風險隱患，使學習由條文記誦邁向情境體現與決策。

圖十二　安全隱患模擬情景生成

4.2.4　課程學習進度總覽

「課程學習進度總覽」則以課程名稱或學員 ID 為索引，列出相應的學員於各課程模組的學習記錄，包括學習進度、分數、考核狀態和完成時間等資訊。管理員或導師可針對學員對知識點的薄弱區，推薦針對性複習內容，彌補知識缺口。

圖十三　學員課程學習進度總覽

4.3　多維度應用效益與安全授權閉環管理

平台打破因輪班制度導致的分班多輪授課和加班上課等傳統問題。此外，當公司內部的職安健規程更新時，平台即時同步更新推送，有效消除因版本滯後所衍生的安全問題。針對調度員、前線技術人員和工程師，平台可模擬各種電力系統故障和安全隱患，通過切入不同角度生成的故障情境模擬題，工程人員可透過對事故處理的反覆操練，補強真實環境內難以覆現的訓練盲區。

圖十四　智能平台使用人群

經由智能平台學習，澳電的安全文化由被動防範轉向主動賦能，全天候碎片化自學使安全學習融入日常生活與工作中（隨想隨學），考核與授權融合則使合規流程由紙面分數轉化為可管控的現場操作權限。循此，澳電可以在精準培訓與嚴格授權間無縫銜接，為工程作業構築數據與智能為支撐的安全防線，使「學·考·用」三環真正閉合知行縫隙，未來更考慮將智能平台由單純培訓工具升格為授權操作核准的中樞系統。

5. 結　論

本文提出的「澳電馭安智學平台」，以大語言模型為核心，結合檢索增強生成與個性化學習技術，構建「學・考・用」一體化閉環平台。平台突破傳統培訓的靜態化與知識斷層困境，實現培訓教材智能解析、情境模擬生成及考核授權融合，以提升澳電團隊成員的職安健意識，推動職安健管理從被動防範轉向主動賦能。

未來將透過累積學員答題與操作數據，持續優化大語言模型的推理精準性與學習路徑。最終目標是將平台擴展至電網調度和設備維護等更多場景，打造跨領域的智慧安全管理生態，徹底落實「知行合一」的電力安全文化。

6. 參考文獻

［1］ 中華人民共和國安全生產法（2021）。中華人民共和國應急管理部。

［2］ 特種作業人員安全技術培訓考核管理規定（2025）。中華人民共和國應急管理部。

［3］ 工廠及工業經營條例，香港法例第 59 章（2023）。

［4］ 電力條例, 香港法例第 406 章（2023）。

［5］ 建築業職安卡制度, 第 3/2014 號法律（2014）。

［6］ 澳門特別行政區政府勞工事務局。（2023）。職安健網上學習課程。

［7］ 澳門電力股份有限公司。（2026）。內部培訓教材與整合管理體系（IMS）職安健工作指引。

［8］ Dong, A. , Lai, X. , Lin, C. , Lin, C. , Jin, W. , &Wen, F. （2023）. A brief survey on the development of intelligent dispatcher training simulators. Energies, 16

（2）, 706.

［9］ GE Vernova.（n. d. ）. Enhancing grid orchestration with simulation training［White paper］. GE Vernova.

［10］《解密「大瓦特」：缺陷隱患識別效率提升 5 倍——廣西電網推動輸電人工智能大模型規模化應用》。（2024 年 6 月 12 日）。南網報。

［11］《智慧電管家——探訪我國電力行业首個千億級多模態大模型》。（2025 年 7 月 2 日）。中國紀檢監察報。

［12］ Cheng, Y. , Zhao, H. , Zhou, X. , Zhao, J. , Cao, Y. , Yang, C. , &Cai, X.（2025）. A large language model for advanced power dispatch. Scientific Reports, 15, 8925.

［13］ Zhang, W. , & Zhang, J.（2025）. Hallucination mitigation for retrieval-augmented large language models：A review. Mathematics, 13（5）, 856.

基於三維 TDOA 訊號的複雜工地人員與物體實時定位提升施工安全

吳沛林，　孫維澤，　關憲章，　吳文志，　李華超
香港大學　深圳大學　凱基建築工程顧問有限公司　深圳大學　澳門特別行政區公共建設局

摘　要：施工現場環境動態且複雜，存在多個危險區域及地帶。為提升施工安全，需對人員（包括工人等）和物體（例如履帶式起重機等可移動機械）進行即時三維（3D）定位，以警示並避免任何工人進入危險區域或地帶。本文介紹了一種基於到達時間差（TDOA）訊號的實時三維定位系統的開發與應用。該系統能夠在室外和室內環境中實現精確定位，在土木工程和樓宇建築施工現場中實現良好運行效果。該系統依托超寬頻（UWB）設備研發而成。這類設備具備信號低衰減、測距與測角覆蓋範圍廣以及可多目標追蹤的特性。整套系統由部署在工地指定位置的基站、由人員佩戴的便攜式標籤（如放入反光背心口袋內）、安裝在可移動機械上的標籤（如安裝在履帶式起重機的前部、後部和吊臂處）、伺服器以及定制軟件組成；該軟件可實現 TDOA 訊號處理、數據整理、圖形化展示和用戶操作交互。本文同時介紹了該系統在土木工程和樓宇建築工地的實際應用情況。

關鍵詞：訊號處理，實時三維定位，到達時間差，超寬頻

壹、研究背景

建築工地的環境通常複雜多變。廣義來說，建築工地可分為土木工程（包括基礎設施）和樓宇建築工地。土木工程工地較常涉及多變地形（例如土地平整和邊坡工程），直接暴露於各種天氣條件下的露天作業區，需要使用重型移動機械（例如履帶式起重機），並且可能存在較大的地下密閉空間（例如隧道和岩洞開挖）。樓宇建築工地較常涉及不同垂直分層（多層建築）的多種作業活動，存在大量且長時間的高空作業（例如外牆作業和電梯井道作業），並在建築樓層內部存在顯著的分間區隔（如剪力牆和隔間牆）。

施工現場環境複雜，有許多潛在安全隱患，例如高空墜落、物件墜落、機械或車輛撞擊、絆倒滑倒、觸電、工具使用不當、火災爆炸、氣體洩漏和化學品接觸等。其中，前三項（高空墜落、物件/機械/車輛撞擊）是現實工地安全事故的主要來源。大多數意外發生在危險區域及地帶，例如樓板開口、電梯井道、外牆、吊運區、重型移動機械作業區、車輛指定路線等。如果對危險區域及高風險地帶內的作業活動進行有效管控，並系統性地防止不必要的進入，可以避免許多事故的發生。

與其他行業相比，建築業的意外率一直居高不下。因此，必須以創新思維和有效手段來提升建築安全。值得注意的是，除了工地環境的複雜性之外，由於施工進度的推移，工地佈局也是動態的（即隨時間變化）。有鑑於此，

用於施工現場的實時定位技術具重要意義（Kanan et al.，2018；Rao et al.，2022）。本文作者對用於建築工地的實時三維（3D）定位技術進行了研究，此定位系統不僅能夠追蹤人員（工人），還能追蹤物體（例如履帶式起重機等移動機械），從而發出警報並阻止任何工人進入危險區域及地帶。該系統基於到達時間差（TDOA）訊號，本文將對此進行詳細闡述。

貳、基於 TDOA 訊號的定位系統開發

研究團隊充分考慮施工現場環境和應用特點，進行了需求分析，並製定了定位系統的以下功能：（1）三維空間定位，以處理平面方位和垂直高度差；（2）多目標追蹤，以便數百以至上千名工人同時使用；（3）根據衰減、覆蓋範圍和距離選擇合適的波長；（4）多基站聯網，以應對牆壁和樓板等訊號障礙造成的區域劃分；（5）厘米級精度，用於近距離識別；（6）防風雨設備，用於戶外部署；（7）圖形化展示和用戶指令交互，實現可視化操作；（8）劃分危險區域，用於人員進入控制和監察。

基於到達時間差（TDOA）的定位方法測量多個接收器之間訊號到達時間的差值，該系統專門用於降低非視距（NLOS）傳播條件下的誤差（Cao et al.，2017，2020）。鑑於建築工地普遍存在牆壁、樓板等訊號障礙物，此方法尤其適用。基站和標籤之間的空間差異被分解為二維和三維空間中的向量分量，並透過約束和非凸數值優化方法最小化 NLOS 誤差（Lin et al.，2013，Xiong et al.，2020，2023）。

在定位系統的初始開發階段，同時追蹤的目標數量設定為 1000 個，足以滿足大多數實際施工現場的需求，並且可以根據現實需要進一步增加目標數量。系統伺服器能夠記錄所有目標的軌跡，用戶介面能夠即時顯示所有目標，這將在本文後續部分進行詳細闡述。

訊號的波長取決於所選頻段（Tiemann & Wietfeld，2019）。本文選擇超寬頻（UWB）技術，因為它具有適當的高頻寬、低衰減、傳播範圍廣、抗遮蔽能力強，以及在距離和角度上覆蓋範圍廣（Van Herbruggen et al.，2024）。下文將解釋 UWB 裝置的概念，並與定向裝置進行比較。

如圖 1 所示，UWB 技術採用球面檢測。此系統具有球面偵測覆蓋範圍：每個基站都能接收位於其周圍近似球形區域內任意位置的標籤訊號，而無需考慮標籤與基站法線的夾角。通常，如果夾角較小，則目標距離最近的基站較近，其他基站對定位的重要性較低。相反，如果夾角較大，則最近的基站可能與其他基站距離相近，其他基站對定位的重要性較高。目前 TDOA 定位的演算法已充分考慮這種情況（Pérez-Solano et al.，2020；Huang et al.，2023）。

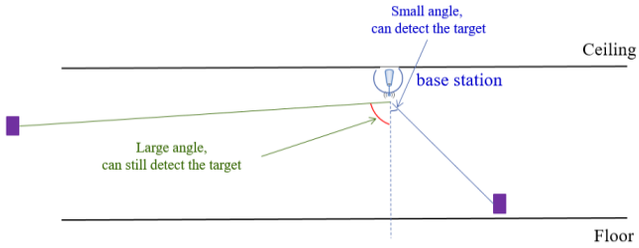


圖 1　球形偵測

另一方面，定向系統（例如定向藍牙）採用錐形檢測，如圖 2 所示。簡單而言，基站會設置一個具有特定偵測視角的錐形區域。只有位於該視角內的目標才能被偵測到，而位於錐形區域外的目標則無法被偵測到。對於典型的定向藍牙，其視角小於 110°，因此，舉例對於

3.5 公尺高的樓層，一個基站只能覆蓋直徑約 10 公尺的圓形區域。考慮到標籤是由工作人員佩戴於一定高度（高於地面 1 公尺以上）而非存在於地面上，基站的有效覆蓋範圍可近似為一個 6 公尺 ×6 公尺的正方形區域。換言之，一個 60 公尺 ×60 公尺的樓層需要多達 100 個基站，這是一個非常龐大的數量，難以實際應用。

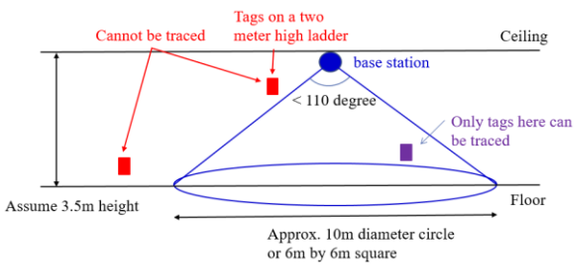


圖 2　錐形檢測

上文提到，TDOA 定位演算法能夠處理多個基站的訊號偵測。這使基站組網能夠應對牆壁和樓板或其他障礙物阻擋訊號傳輸的問題。此演算法採用最小絕對偏差（LAD）準則，以最大限度地減少視距（LOS）或非視距（NLOS）場景下的誤差和測量雜訊（Xiong et al.，2020；Huang et al.，2023）。

定位精度不僅取決於硬件規格和定位演算法，還取決於現場基站的間距（以及數量）。對於施工現場應用，厘米級的精度已可滿足需求。為了切合在建築工地實際應用，研究團隊設定並實現了 300 毫米的精度。這樣的精度足以準確捕捉人員和物體的位置，並進行可靠的近距離辨識。

叁、定位系統的部署設置

定位系統硬件包括用於訊號傳輸、數據處理和儲存的交換機和伺服器、固定在現場指定位置的基站、由人員攜帶或安裝在可移動機械上的便攜式標籤。圖 3 展示了定位系統硬件。此外，系統還配備了廣角攝影機和智能攝像頭，以提供顯示廣角影像和利用人工智能分析影像的附加功能，從而識別預先定義的危險行為，例如未佩戴安全帽等。

（a）交換機

（b）伺服器

（c）基站

（d）便攜式標籤

圖 3　定位系統硬件

基站和便攜式標籤均採用防風雨設計。基站只需配備簡易遮蔽罩，便可部署在室外。在

無電源供應的地點，基站可連接太陽能模組供電。便攜式標籤可由人員以任何方式攜帶。在本研究中，安排在工人的反光背心上縫製了一個額外的口袋，用於放置便攜式標籤。只需對便攜式標籤的外殼進行少量修改，即可根據需要將其安裝到可移動機械上。在本研究中，將標籤安裝在履帶式起重機的前部、後部和吊臂處。這種配置能夠識別履帶式起重機的前端、後端和吊臂位置，從而可靠地確定起重機的方向、作業範圍和吊運區域。

憑藉上述硬件設計和適應性部署措施，系統能夠在室外環境（如土地平整、邊坡施工和地基工程）以及室內或密閉環境（如建築物和隧道內部）中部署並進行精確定位。因此，該系統在土木工程和樓宇建築工地均能發揮良好效果。

肆、軟件開發

研究團隊開發了一款專門用於即時三維定位系統的定制軟件。該軟件能夠進行定位訊號處理、TDOA 演算法計算、數據結構化、提供用戶控制介面、即時圖形化顯示定位目標、並在人員違反預設安全規則時發出警報。

為了有效提醒進入高風險地帶的工人，並避免工人誤入危險區域，使用者可以透過可視化控制介面劃定高風險地帶（例如隧道和豎井入口、通往外牆和電梯井道的指定通道）和危險區域（例如樓板開口、履帶式起重機作業區域、車輛指定路線）。軟件程式會將這些劃分輸入轉換為系統代碼。工人團隊的便攜式標籤可在系統分組標記各組別進入高風險地帶的獲授權狀態。一旦偵測到任何未經授權的進入，系統將透過螢幕閃爍和警示聲響發出警報。另外，在任何情況下進入危險區域皆會即時觸發警報。

以下應用實例將展示用戶控制介面的一些佈局。此外，定位系統已整合到工地辦公室的儀錶板屏幕上，用於即時顯示項目訊息，例如實時視訊畫面、各種傳感器讀數等。

伍、應用實例

本研究的三維實時定位系統已成功應用於土木工程和樓宇建築工地。圖 4 展示了定位系統在土地平整和地基工程的應用。在用戶控制介面的地圖中，履帶式起重機的作業區域已被劃定為危險區域。

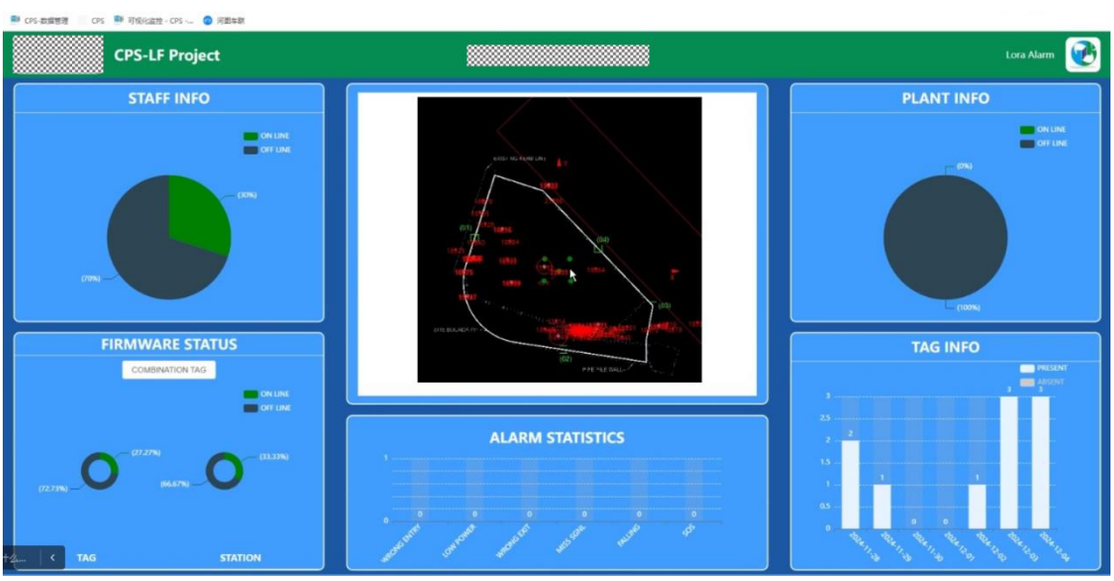


圖 4　土地平整和地基工程的應用

圖 5 展示了定位系統用於樓宇建築項目的高淨空樓層。為了便利場地的可視化，控制介面能夠顯示三維視圖，如圖 6 所示。此外，系統會記錄每個人員的身份和軌跡，並以表格形式輸出，如圖 7 所示。記錄總表也會顯示每個便攜式標籤的電池剩餘電量，以便利及時更換電池。

圖 5　樓宇建築項目高淨空樓層的應用

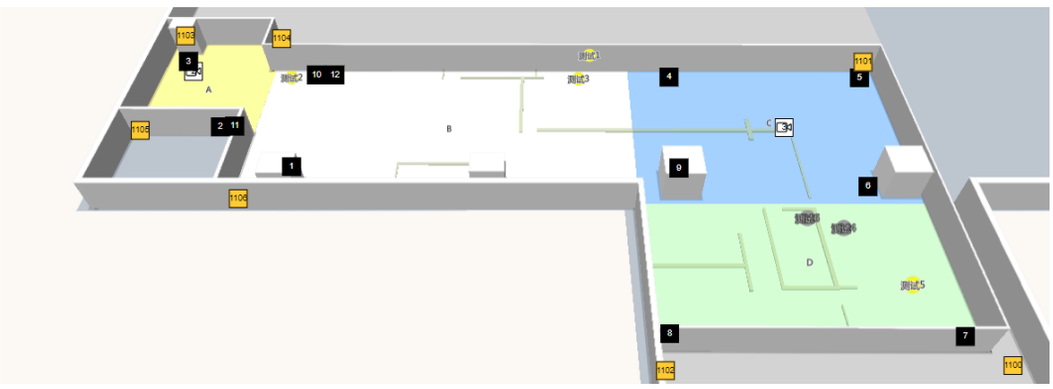


圖 6　實時定位的三維視圖

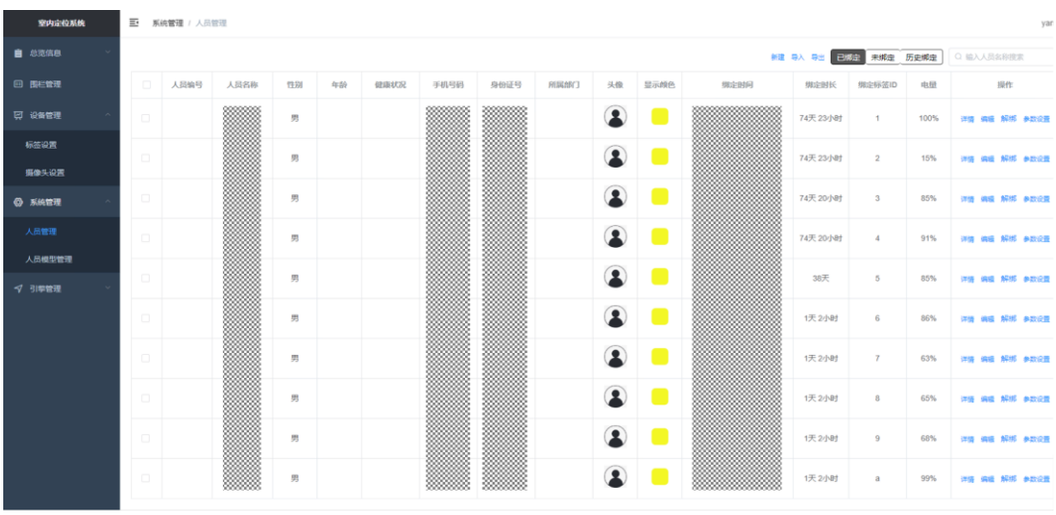


圖 7　定位記錄總表

圖 8 展示了定位系統用於樓宇建築項目中的電梯井道。作為安全管理的關鍵環節，電梯井道需要嚴格實行准入控制，只有獲授權的工人才能進入。這些工人佩戴專門標記用於進入電梯井道的便攜式標籤。物件墜落是電梯井道作業的高風險因素。因此，嚴禁在電梯井道內不同垂直高度同時作業。定位系統旨在對任何違規行為發出警報，以便立即採取干預措施，提升施工安全。

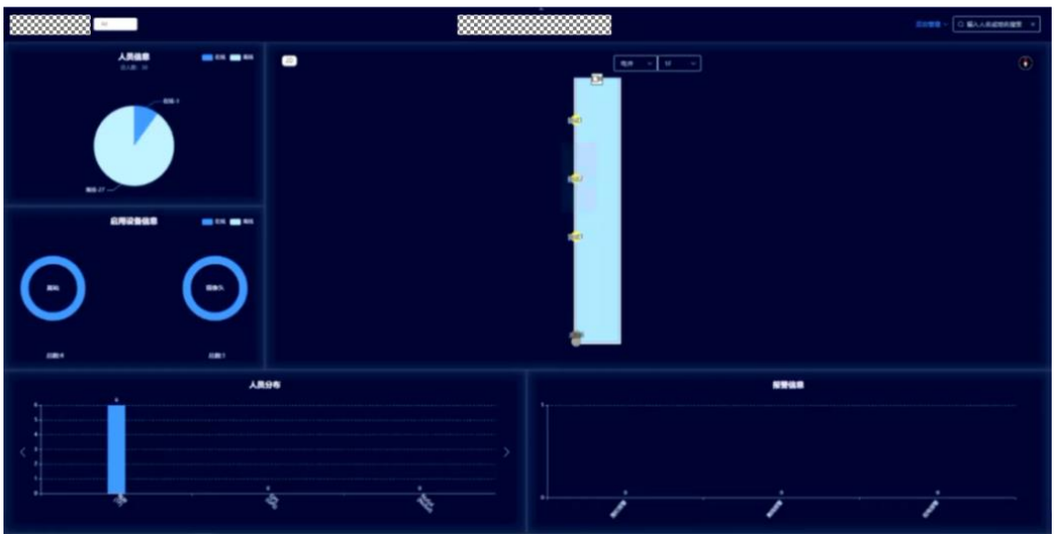


圖 8　樓宇建築項目電梯井道的應用

陸、結　論

本文介紹了一種基於實時三維 TDOA（到達時間差）訊號的定位系統，該系統應用於建築施工現場能實現良好運行效果。定位系統採用超寬頻（UWB）設備，可同時追蹤多個目標。系統由定位基站、標籤、交換機、伺服器等硬件組成，並配備專用軟件，提供可視化用戶控制介面，以實施人員進入控制和監察。本研究的定位系統已成功部署於土木工程和樓宇建築工地，有效提升施工安全。

參考文獻

［1］ Cao, H., Chan, Y. T. and So, H. C.（2017）, Maximum likelihood TDOA estimation from compressed sensing samples without reconstruction, IEEE Signal Processing Letters, Vol. 24, No. 5, pp. 564–568.

［2］ Cao, H., Chan, Y. T. and So, H. C.（2020）, Compressive TDOA estimation: Cram é r–Rao bound and incoherent processing, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 56, No. 4, pp. 3326–3331.

［3］ Huang, L. X., Chen, R. Z., Chen, Y., Guo, G. Y., Ye, F., Liu, Z. Y. and Chen, L.（2023）, Robust TDOA–based indoor localization using improved clock–sync–scheme and multilevel constrained ARPF, IEEE Sensors Journal, Vol. 23, No. 10, pp. 10633–10643.

［4］ Kanan, R., Elhassan, O. and Bensalem, R.（2018）, An IoT–based autonomous system for workers' safety in construction sites with real–time alarming, monitoring, and positioning strategies, Automation in Construction, Vol. 88, pp. 73–86.

［5］ Lin, L. X., So, H. C., Chan, F. K. W., Chan, Y. T. and Ho, K. C.（2013）, A new constrained weighted least squares algorithm for TDOA–based localization, Signal Processing, Vol. 93, No. 11, pp. 2872–2878.

［6］ P é rez–Solano, J. J., Ezpeleta, S. and Claver, J. M.

（2020）, Indoor localization using time difference of arrival with UWB signals and unsynchronized devices, Ad Hoc Networks, Vol. 99, pp. 102067：1–11.

［7］ Rao, A. S., Radanovic, M., Liu, Y. G., Hu, S. B., Fang, Y. H., Khoshelham, K., Palaniswami, M. and Ngo, T.（2022）, Real–time monitoring of construction sites：sensors, methods, and applications, Automation in Construction, Vol. 136, pp. 104099：1–22.

［8］ Tiemann, J. and Wietfeld, C.（2019）, Scalability, real–time capabilities, and energy efficiency in ultra–wideband localization, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 15, No. 12, pp. 6313–6321.

［9］ Van Herbruggen, B., Vanhie–Van Gerwen, J., Luchie, S., Durodié, Y., Vanderborght, B., Aernouts, M., Munteanu, A., Fontaine, J. and De Poorter, E.（2024）, Selecting and combining UWB localization algorithms：insights and recommendations from a multi–metric benchmark, IEEE Access, Vol. 12, pp. 16881–16901.

［10］ Xiong, W. X., Schindelhauer, C., So, H. C., Bordoy, J., Gabbrielli, A. and Liang, J. L.（2020）, TDOA–based localization with NLOS mitigation via robust model transformation and neurodynamic optimization, Signal Processing, Vol. 178, pp. 107774：1–10.

［11］ Xiong, W. X., Schindelhauer, C. and So, H. C.（2023）, Globally optimized TDOA high frequency source localization based on quasi–parabolic ionosphere modeling and collaborative gradient projection, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 59, No. 1, pp. 580–590.

“從安全關懷到卓越體驗”澳門綜合旅遊休閒企業職安健管理的轉型實踐與價值共創

陳嘉怡
澳娛綜合度假股份有限公司、澳門職業安全健康管理專業協會

摘　要：隨著澳門旅遊休閒產業向高質量發展邁進，特別是大型綜合休閒度假村作為多業態複合性的特殊商業體，其特徵在於工作場域與顧客消費空間的高度重疊。在前線服務的推行過程中，員工面臨高強度的情緒勞動、反覆性的體力消耗、輪班所帶來的生理壓力，以及逐步累積的心理疲勞。作為澳門職安健領域的資深管理者與教育者，筆者觀察到過去傳統的職業安全與健康治理模式通常側重於物理防護和被動式的法規合規，往往忽視了心理健康對於營運效能、顧客體驗及企業永續發展（ESG）的深遠影響（Choi et al.，2023）。本研究報告系統性分析了澳門綜合休閒企業如何透過導入智能科技的人機協作「硬體賦能」，以及將「職場心理健康治理」作為軟性關懷，實現從傳統「合規」到「卓越體驗與價值共創」的戰略轉型（Asian Development Bank，2024）。本論文提出一套具澳門特色的職安健做法，這些做法不再僅僅被視為成本負擔，而是成為推動澳門旅遊產業升級的戰略資源。「體驗導向型職安健管理模型」為業界提供了從理論落地到產業共融的轉型路徑，進而共同促進澳門建設更具幸福感與韌性的環境。透過此研究，我們希望能夠引起業界對職安健管理新模式的重視，並促進企業在提升員工心理健康和顧客體驗方面的積極探索，以實現企業的可持續發展和競爭力提升。

關鍵詞：職安健管理、心理健康、服務型機器人、價值共創、卓越體驗

壹、前　言

國際勞工組織與世界衛生組織近年於聯合宣言中明確指出，職場精神與心理健康已不再是企業可有可無的福利，而是現代職業健康不可分割的核心組成部分（World Health Organization & International Labour Organization，2022）。與此同時，國際標準化組織發布了全球首個管理職場心理社會風險的指引標準 ISO 45003:2021，旨在協助企業建構識別、評估與管控職場心理危害的系統化機制（Choi et al.，2023）。要求企業從工作組織、社會因素及工作環境三大維度重新設計流程，從源頭預防心理社會風險，從形式化關懷到企業層面心理安全關懷（European Parliament，2023）。

在國家推動「健康中國 2030」戰略，澳門特別行政區政府因應《健康澳門藍圖》與「1+4」經濟適度多元發展策略，積極倡導「健康企業」政策的宏觀背景下，將職場心理健康與企業永續治理深度結合，已成為提升企業整體營運效益與競爭力的戰略方向（國務院，2016；澳門特別行政區政府衛生局，2023）。而澳門大型綜合休閒度假村為私營部門的最大雇主，響應「健康企業」政策不僅是落實企業社

會責任的展現，更是配合特區政府構建「幸福澳門」與「世界旅遊休閒中心」戰略目標的核心舉措。

澳門作為國際著名的綜合旅遊休閒中心，其產業結構具有高度獨特的「場域重疊性」與「情感勞動密集性」。在大型綜合度假村中，酒店客房、娛樂場營運、頂級餐飲、綠化園區及大型展演設施等，既是前線員工每日履行職責的工作場所，同時亦是全球賓客直接感知與體驗的消費空間（Wong & Wang，2019）。前線員工長期在這種高壓、輪班及高頻率人際互動的環境中作業，極易面臨情緒枯竭、心理疲勞及職業倦怠（Grandey，2000）。傳統的職安健治理然而，過去的管理理論長期聚焦於物理環境的安全防護、事故後追責以及被動式的法規合規（Heinrich，1931），往往將職安健投入視為企業的純成本負擔，且忽略了員工心理健康狀態對顧客服務體驗的傳導效應。

為突破此一傳統管理盲點，本論文從澳門資深職安健管理者與教育者的產業觀察出發，聚焦於「職場心理健康」這一核心戰略方向，並探討日益發展的現代服務型機器人的導入並非為了取代人力，而是透過自動化技術代勞重複性、高強度及具物理危險的後勤作業，進而減輕員工的生理安全負擔與心理焦慮（Vanderborght et al.，2018）。當員工從體能極限中解放後，方能釋放「情緒資本」，專注於提供具備人性溫度與高品質的服務，由被動安全到主動關懷，繼而提升卓越服務體驗的企業營運效益回報。

貳、理論基礎和核心概念

一、勞動情緒與消耗關懷

在服務管理學研究中，Grandey（2000）指出前線員工在面對顧客時需進行高強度的「情緒勞動」。例如在大型綜合休閒度假村中，前線服務人員（如酒店前台、餐飲服務員、娛樂場籌碼員及會展接待）長期進行高密度的顧客互動。所以透過情緒勞動理論指出，員工在面對顧客時需管理自身的感情展現，第一種可以是表層扮演：員工僅在面部表情和肢體語言上偽裝出企業要求的熱情與微笑，但內心感受與外在表現存在衝突。這種情緒不一致會迅速消耗個體的心理資源，導致情緒耗竭、工作異化、服務品質下降（National Mental Health Commission，2024）。第二種是深層扮演：員工透過認知重構或同理心思考，主動調節內心真實感受，使內心情緒與外在展現保持一致（澳門特別行政區政府衛生局，2024）。深層扮演能引發正向的情緒傳染，使顧客感知到真誠的服務溫度，從而大幅提高顧客滿意度與重訪意願。

若企業缺乏相應的心理支持機制，員工被迫進行「表層表演」，將加速心理資本的耗損，並直接導致服務質量的下滑（Wong & Wang，2019）。正如，當前線員工被繁重的物理體力消耗（如長時間站立、搬運重物、重複性清潔）與認知疲勞壓垮時，其心理資源歸零，迫使其只能依賴「表層扮演」來應付工作。

二、心理安全感與情緒韌性

根據 Edmondson（1999）提出的「心理安全感」理論，當企業創造了一個具備關懷、尊重且無後顧之憂的職場環境時，員工更容易產生高水平的情緒韌性，並展現出真誠且具備熱情的服務行為（Guchait et al.，2014）。像在當企業導入服務型機器人承擔高體力與高風險的機械性工作時，也是一種組織層面傳遞出一種「企業重視員工福祉」的訊號，員工可能更願意進行積極主動地提供服務創新行為（Chunhao et al.，2023）。

三、卓越體驗與價值共創之完整因果鏈

將員工的「情緒資本」視為戰略資產，能促進員工與顧客之間的正向情緒傳遞，實現企業與顧客的「價值共創」。休閒企業透過人機協作與心理健康治理實現「卓越體驗與價值共

創」的理論因果鏈條可梳理如下：

（一）硬體代勞與減壓：服務型機器人接管高強度、重複性體力工作與危險作業，降低員工的身體疲勞與認知負荷。

（二）心理安全感建立：生理疲勞的減輕直接減少了職場中的情緒耗竭因子，搭配系統化心理健康支持（如 AI 健康評估），為員工構建良好的心理安全網。

（三）情緒資本活化：心理資源充裕的員工能夠將心理能量由「自我防衛」轉向「顧客關注」，實現從「表層扮演」向「深層扮演」的自然跨越。

（四）展現服務溫度與活力：員工在服務中展現真誠的同理心、靈活性與熱忱。

（五）價值共創與企業永續發展（ESG）（ESG）雙贏：顧客感受優質服務體驗，主動參與互動並提升品牌忠誠度（卓越體驗）；同時，企業實現了員工健康、服務品質與營運效益的永續發展（價值共創）。

參、產業現況分析：澳門綜合休閒業的職安健轉型洞察

一、服務型機器人在職安健管理的現況和心理賦能的實務

澳門綜合旅遊休閒企業近年廣泛導入各類服務型機器人，結合自動化後勤系統降低員工體力負荷，提升工務與清潔安全，全面覆蓋度假村的多複合場域，包括公共區域、會展中心、奢華酒店、頂級多元餐飲餐廳場所，實務應用主要集中於：

（一）酒店與物流場域：導入智能搬運行李機器人與自動導引車，承擔重型行李、後勤布草及倉儲物資的搬運，顯著降低員工急性腰部扭傷及肌肉骨骼勞損的發生率（Vanderborght et al.，2018）

（二）餐廳與餐飲場域：引進智能送餐機器人執行重複性的長距離傳菜，大幅降低餐飲前線人員的步行距離與體力耗損，將前線服務員從「跑腿傳菜」中解放出來，使其能聚焦於桌邊服務與顧客情感交流。

（三）環境與公共區域：承擔大面積會展大廳與酒店大堂的地面清潔，大幅減少清潔人員因長期彎腰、推拉重型設備導致的腰背肌骨骼損傷與夜班累積的生理疲勞，並有效預防因在濕滑地面情況下作業的滑倒意外。

（四）度假村室外/室內水上樂園與酒店游泳池：泳池清潔機器車於水底自主導航、高效過濾吸污、壁面爬行刷洗與水質狀態監測功能。能全面替代救生員與清潔人員高風險的水下作業及高強度體力刷洗，顯著降低水下意外事故與長期接觸化學消毒藥劑的健康風險。

表 1　澳門綜合休閒度假村服務型機器人應用場景與職安健物理/心理賦能效益對照表

機器人類別	部署場域	主要硬體功能	職安健　物理與心理賦能效益
智能清潔機器人	酒店大堂、會展中心、娛樂場公共區域	活水洗地、超薄避障、UV 消毒、自動加水排污	消除夜間大面積體力勞動，降低慢性腰椎與肌骨骼損傷風險。
餐飲傳菜機器人	綜合度假村自助餐廳、大型宴會廳	窄道通行、AI 托盤感應、多點送餐、語音互動	替代高頻率重物抬舉與長距離奔波，釋放服務員情緒資本以進行桌邊關懷。
客房樓域配送機器人	酒店客房樓層、後勤物流通道	自主乘梯、多艙口密封保護、高載重平穩運送	承擔高頻派送任務，提升派送效率，減少員工跨樓層體力消耗。
泳池清潔機器車	度假村室外/室內水上樂園、酒店游泳池	水底自主導航、高效過濾吸污、壁面爬行水質監測	替代救生員與清潔人員高風險水下作業及高強度體力刷洗，降低水下意外與化學藥劑接觸風險。

二、心理健康關懷與科技協同之實踐案例

除硬體科技賦能外，澳門不同休閒企業亦積極響應勞工事務局及衛生局相關的職業健康及身心政策，推行多元化的軟體關懷項目：

（一）澳門休閒企業的心理健康與職安健實踐

近年休閑企業內部都積極發展及推行多元化的職業安全及健康活動，例如每年舉辦的職業安全健康路演活動，與政府、機構合作開展多元化互動涵蓋健康檢查、體能測試、飲食健康、心理健康營造關懷與互助的企業文化（澳門特別行政區政府財政司司長辦公室，2024）。也會定期舉辦職場心理健康講座與相關工作坊，例如「正念減壓」、「職場情緒管理」及「輪班睡眠衛生」等主題講座，提升前線員工的心理素養（Goetzel et al.，2018）

而且，企業也熱衷於在公司設立不同類別的 AI 健康檢測，包括中醫診療、舌診站、面部皮膚測試、眼底照相機：利用人工智能影像分析技術為員工提供即時體質參考數據，更與澳門各醫院甚至大學合作提供個人化健康管理建議，員工都十分踴躍參與。

另一方面，通過「微笑計劃」與多元心理支持系統：硬體防線基礎上，企業推動「微笑計劃」，強調「真誠的笑容源於健康的心理」：透過心理講座傳授減壓技巧，並結合心理學「臉部回饋假說」（Facial Feedback Hypothesis），引導員工理解保持微笑對內在快樂因子的正向強化作用，將提供笑容轉化為自我心理調節的工具（Grandey，2000）。故此，部分企業推行「關懷大使」機制，培訓基層員工成為同儕間的心理支持樞紐，建立「同步關懷時間」，實現組織內部心聲的及時傳遞與共鳴（Edmondson，1999）。

（二）社區專業機構的整合支持

休閑企業也與本地專業機構（如聖公會澳門社會服務處）合作，建立 24 小時心理支援熱線與保密轉介機制，為面臨工作或家庭高壓力的員工提供一對一專業心理諮詢（聖公會澳門社會服務處，2022）。此外，企業亦與澳門博彩業職工之家、澳門基督教青年會（YMCA）、澳門婦女聯合總會及街坊會聯合總會等社團建立合作，共同構建涵蓋賭博失調預防、家庭關係協調與職場壓力緩解的支援網絡。

肆、結　論

本研究聚焦於「從安全關懷到卓越體驗」的轉移，筆者立足於資深職安健管理者與產業觀察者的視角，綜整國際政策趨勢、理論機制及澳門綜合旅遊休閒企業之實踐，導出以下核心戰略結論與策略建議：

一、洞察範式轉移：從「無意識演進」邁向「戰略自覺」

澳門綜合旅遊休閒企業的營運現況，筆者洞察到，本澳企業的職安健管理轉型實則處於一種「潛移默化」的悄然轉變過程中。許多休閒企業在導入服務型機器人或推行員工心理關懷時，初衷多源於解決人力短缺、提升營運效率或回應企業合規指標，企業自身未必已明確意識到，其營運調整實則正悄悄驅動著一場從「傳統物理合規」邁向「卓越體驗與價值共創」的職安健範式革命（Lu et al.，2020；Vanderborght et al.，2018）。本研究的關鍵價值，正是揭示並提煉這一隱性趨勢，幫助企業將自發的營運探索，升華為系統性的職安健戰略。

二、雙軌協同效益：解鎖前線情緒資本，奠定「卓越體驗」之隱形基石

這種悄然發生的轉變，核心在於硬體（服務型機器人）與關懷（身心健康推廣項目）在日常營運中的有機交織。企業在無形中為前線員工實現了「物理與心理的雙重減負」，化解了情緒枯竭，將基礎安全轉化為高水平的「心理安全感」與「情緒資本」（Edmondson，

1999；Grandey，2000），為展現真誠、高品質的服務溫度奠定了堅實的心理基石。

三、顯性化價值共創：建立貫穿職安健與營運效益之戰略閉環

本論文提煉並顯性化為貫穿「員工健康—情緒表現—顧客體驗—ESG 績效」的價值鏈量化評估體系。引導企業從「被動防禦」走向「主動戰略自覺」，透過釋放前線員工的情緒資本並引導其進行「深層扮演」，將健康的心理狀態轉化為極致的服務溫度，直接驅動賓客感知「卓越體驗」，最終實現「員工健康、顧客滿意、企業高效益」的三方「價值共創」。

參考文獻

［1］國務院（2016）。《「健康中國 2030」規劃綱要》。https://www.gov.cn/zhengce/2016-10/25/content_5124174.htm

［2］聖公會澳門社會服務處（2022）。《澳門職工心理健康與社區支援服務報告》。聖公會澳門社會服務處出版。

［3］澳門特別行政區政府財政司司長辦公室（2024）。《多措並舉致力保障僱員勞動權益及職業健康（勞工事務局）》。https://www.gsef.gov.mo/zh/posts/9117

［4］澳門特別行政區政府衛生局（2023）。“健康企業計劃啟動致力打造健康職場文化”。https://www.gov.mo/zh-hant/news/1032669/

［5］澳門特別行政區政府衛生局.（2024）.構建 24 小時心理健康支援平台及職場健康推廣.澳門特別行政區政府新聞局/TDM. https://www.tdm.com.mo/pt/news-detail/1106586

［6］Asian Development Bank.（2024）.Workplace mental health and well-being. ADB Publications. https://www.adb.org/sites/default/files/publication/1038141/workplace-mental-health-well-being.pdf

［7］Choi, M., Choi, Y., Kim, S. S., & Badu-Baiden, F.（2023）. Human vs robot baristas during the COVID-19 pandemic：Effects of masks and vaccines on perceived safety and visit intention. International Journal of Contemporary Hospitality Management, 35（2）, 469-491.

［8］European Parliament.（2023）. Mental health at work（Publication No. IPOL_STU（2023）740078）. Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2023/740078/IPOL_STU（2023）740078_EN.pdf

［9］Edmondson, A.（1999）. Psychological Safety and Learning Behavior in Work Teams. Administrative Science Quarterly, 44（2）, 350-383. https://doi.org/10.2307/2666999

［10］Goetzel, R. Z., Roemer, E. C., Holingue, C., Fallin, M. D., McCleary, K., Pratt, R., .& Chosewood, L. C.（2018）. Mental Health in the Workplace：A Call to Action Proceedings From the Mental Health in the Workplace Public Health Summit. Journal of Occupational and Environmental Medicine, 60（4）, 322-330. https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000001271

［11］Chunhao Ma, Biying Wang, Caozhi Sun, & Le Lin.（2023）. The spillover effect of emotional labor：How it shapes frontline employees' proactive innovation behavior. SAGE Open, July-September 2023：1－15 DOI:10.1177/21582440231191791

［12］Grandey, A. A.（2000）. Emotional Regulation in the Workplace：A New Way to Conceptualize Emotional Labor. Journal of Occupational Health Psychology, 5（1）, 95-110. https://doi.org/10.1037/1076-8998.5.1.95

［13］Guchait, P., Pasamehmetoglu, A., & Dawson, M.（2014）. Perceived Support for Service Recovery Error Management, Psychological Safety and Error Reporting in Hospitality Organizations. Journal of

Hospitality and Tourism Management, 21, 91–102. https://doi. org/10. 1016/j. jhtm. 2014. 09. 002

[14] Heinrich, H. W. (1931). Industrial Accident Prevention: A Scientific Approach. McGraw–Hill.

[15] International Organization for Standardization. (2021). Occupational health and safety management—Psychological health and safety at work—Guidelines for managing psychosocial risks (ISO Standard No. 45003:2021). https://www. iso. org/standard/64283. html

[16] International Labour Organization, & World Health Organization. (2022). Mental health at work: Policy brief (License CC BY–NC–SA 3. 0 IGO). World Health Organization and International Labour Organization. https://www. ilo. org/sites/ default/files/wcmsp5/groups/public/@ed_protect/@protrav/@safework/documents/publication/wcms_856976. pdf

[17] Lu, L. , Cai, R. , & Gursoy, D. (2020). Developing and Validating a Service Robot Integration Willingness Scale in Hospitality Environments. International Journal of Hospitality Management, 87, 102492. https://doi. org/10. 1016/j. ijhm. 2020. 102492

[18] National Mental Health Commission. (2024). Measuring mentally healthy workplaces: A practical guide for medium to large organisations. Australian Government. https://www. mentalhealthcommission. gov. au/sites/default/files/2024–09/measuring–mentally–healthy–workplaces–a–practical–guide–for–medium–to–large–organisa–tions. pdf

[19] Vanderborght, B. , Alimohammadi, M. , & Claeys, F. (2018). Physical Ergonomic Assessment in Human–Robot Collaboration for Industrial Heavy Material Handling. IEEE Robotics and Automation Letters, 3 (4), 4012–4019.

[20] Wong, I. A. , & Wang, S. (2019). Development and Validation of the Hospitality Emotional Labor Scale. International Journal of Hospitality Management, 77, 245–258. https://doi. org/10. 1016/ j. ijhm. 2018. 07. 006

[21] World Health Organization, & International Labour Organization. (2022). WHO/ILO Global Guidelines on Mental Health at Work. World Health Organization. https://www. who. int/publications/i/item/9789240053052

基於智能電錶的安全及應急管理重塑

黃濠華，陳志堅，容志匡
澳門電力股份有限公司（澳電）/客戶服務部

摘　要：將智能電錶加以推廣應看作是電力系統安全及應急管理重要的改革。以往以人工抄表為主的做法效率不高，又較易因人為錯誤而造成困擾；現在智能電錶能自動採集、遠端控制的方式來處理，可以減低人員介入程度，相應地減少工作風險，同時使資料更準確、更安全。而且智能電錶本身有遠端控制功能，能按規定制度對欠費用戶停電、對賬款已清者迅速恢復供電，由此簡化管理動作，防止遺漏所造成的經濟損失。有關極端天氣（例如颱風）應對，智能電錶可利用「白名單」機制來確定監測重點，把重要客戶或特殊區域列入優先考慮範圍，讓澳電更快識別異常點、分析問題、調配資源。文中亦列舉實例指出所提辦法對事故回應、對電網復原及對災害的抵抗都有實際助益。就整體效果來說，由智能電錶引發的治理改進既屬技術成就，也是能源方式的革新，對智慧城市、對防災均有重大意義。

壹、背景及研究動機

一、研究背景與現代城市電網挑戰

全球所經歷的氣候變遷正趨於嚴重，由此導致的極端性天氣現象（即超強颱風或暴雨、風暴潮等）正變得較頻繁、較強烈，對當代城市各項設施特別是電力系統提出了很大挑戰。就高密度現代城市（例如澳門特別行政區）而論，所轄商業與生活區域都很集中，部分地段的用電密度已達 30,000kW/km^2 以上。若低壓配電網長期處於如此高的負荷狀態，一旦有自然災害造成局部斷電，就會給社會運公共安全帶來非常不利的影響。

現在有關智慧電網的建設正被當作提高電網韌性的戰略來考慮。高級計量架構（Advanced Metering Infrastructure，AMI）屬於智慧電網核心的部分。但就目前來說 AMI 多只用于一般性計費或對用電量作基本統計，怎樣利用其資料資源、結合當代城市的運行現實以及特殊氣候條件所要求的應急手段，是有關能源調控、有關災害防禦所要重點思考、重點解決的實際問題。

二、研究動機與傳統電力管理痛點

傳統的低壓配電網管理模式長期存在「盲區多、響應慢、風險高」的局限性，主要體現以下三點：

1．日常運維的人為風險：傳統電力抄錶與線路巡檢高度依賴前線人力。對於高密度城區或特殊環境來說，採用人工抄錶不只效率差，而且對作業者本身有安全威脅；傳統上有關的供電控制方式也十分有限，若用戶欠費要停掉電力、或完成付款希望複電，電力公司就往往要派人前去逐項做停電、接電的機械性操作。所用方法使業務辦理時間變長、運營開銷增大，又容易因人與人之間配合不當或誤操作而造成營運困難。按月或按期搜集的資料也不能

準確指出某條饋線、某一使用者何時出現負載異常。

2．安全隱患防範滯後：傳統思路設計的系統沒有及時處理低壓配電網所涉線損、漏電及絕緣老化的方法。有關中性線電流的不正常狀態或因老化而來的微小長期漏電，在初現時一般不易查明，因而可能發展為較重的電力火災。

3．災後搶修與復電的盲目性：若颱風或風暴潮一類的極端天氣使沿海低地陷入較嚴重的水浸狀態，傳統電網就難以馬上查明所涉各千餘點供電設施是否損壞或斷電。目前搶修計畫一般是按客戶報告或既定巡路來安排，這種做法既會增加事故處理所需的時間，又對前線人員在極端環境下的外傷風險。

貳、高級計量架構（AMI）計劃背景

配合澳門智慧城市發展趨勢，並為了推動電力基礎設施數位化轉型，全面落實低壓配電網數據的「全維感知、精準治理與透明可視」，打造智慧電網的安全防線，電力網絡必須消除配電網末端的數據盲區。因此，澳門電力股份有限公司（下稱：澳電）於 2019 年啟動了 AMI 系統計畫。該專案不僅用於建立用於自動計費的智慧計量系統，還用於獲取全面的低壓計量數據以至一些高級應用。2020 年，經過末端通訊的全面測試，澳電決定採用 HPLC 作為 AMI 最後一哩通訊的主要技術，如圖 1 所示。

HPLC 是直接利用現有的低壓電力線網絡作為數據傳輸載體。對高密度城市老區或已有的地下電纜來說，它不用額外安排通信用光纖或信號線路的施工困難。就 HPLC 來說，其抄錶效率、數據獲取頻率及新設備聯網時間都較其他方法有優勢。而且電錶至變壓器映射和相位識別，對澳電的日常運行是很有用的輔助性資料。智能電錶、通信網路之外，主站系統是高級計量設施（AMI）的基本核心。澳電當前所用的 AMI 架構是傳統兩層式設計，即前端系統（HES）和電錶數據管理系統（MDM）。系統架構與功能如圖 2 所示。HES 主要處理計量、通信及數據獲取三類管理任務。它通過點對點方式從 DCU 或從電錶直接取得數據。MDM 負責有關設備的操作，即設置修改、時鐘同步、固件更新、遠控斷/複電諸項功能。同時，MDM 對數據加以利用，能執行自動抄錶、計費、能耗統計、損耗計算、負載觀察、停電分析等任務。

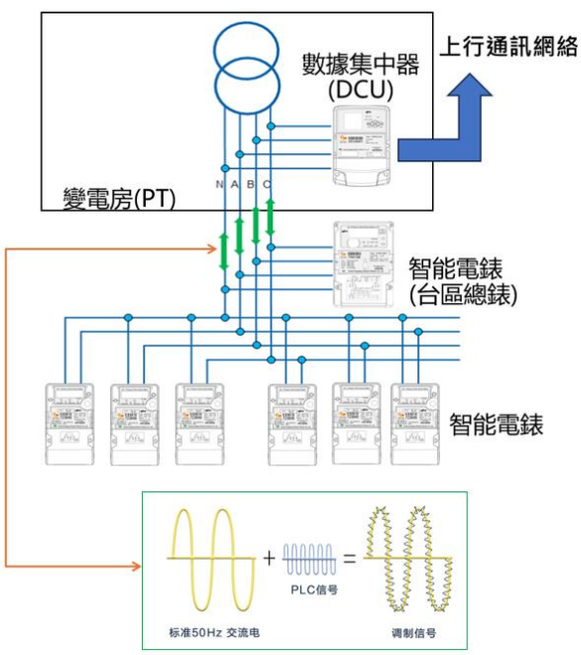


圖 1　HPLC 通信

自 2020 年澳電開始推動大規模電錶更換與通訊網路的佈建，於 2024 年底已完成智能電錶的全覆蓋。以下章節將結合真實營運數據與實際案例，深入分析智能電錶在提升低壓電網安全及優化應急管理流程方面所帶來的實質成效。

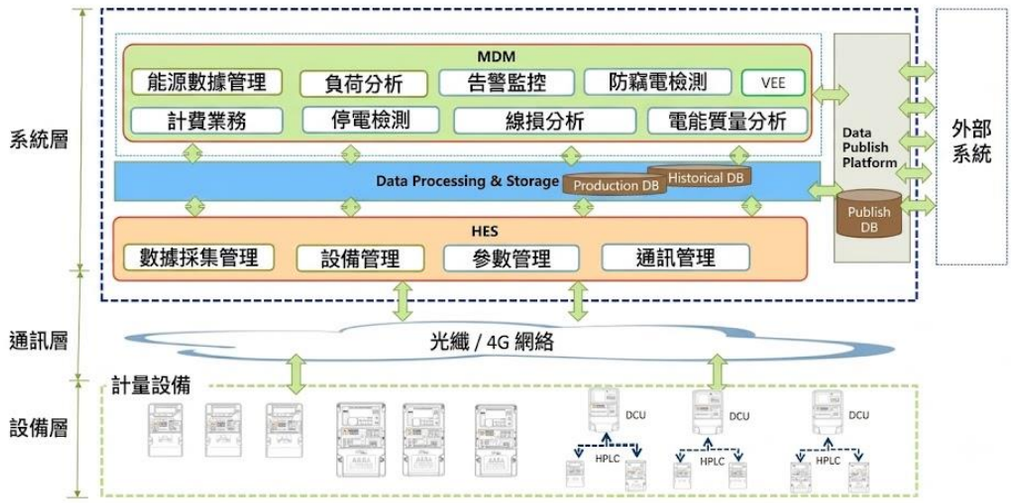


圖 2　澳電 AMI 系統總體系統架構

參、智能電錶全覆蓋驅動的日常維運安全

一、傳統現場作業的職安健困境與環境風險

若尚未將智能電錶全面投入使用，以往的人工抄錶及線下管理基本上要靠前線外勤人員到現場做事。但澳門所處的高密度城市為現場工作有帶來較多職業安健方面的危險：

1．電錶空間常被佔用：現有各類舊式高層建築及商業、餐飲設施所用的實體電錶箱附近，常有公共空間被用來堆物。有時電錶本身就在液化石油氣罐所占的廚房或狹小雜物間裡。若要對電錶做檢查而沒有適當條件，工作人員就容易因疏忽而發生高空跌落或觸電類事故。

圖 3　電錶房堆放雜物

2．特殊與偏遠環境難以到達：部分配電計量點分布於偏遠、狹窄的特殊區域（如戶外灌木叢或建築夾縫）。前線技術人員需要徒步穿越物理障礙，作業效率低下且易發生機械損傷

或滑倒。

圖 4　電錶安裝在戶外灌木叢

3．高頻率勞動造成的身體損耗：傳統人工抄錶長期面臨嚴苛的工作環境限制。從澳門目前的建築狀況看，很多舊式唐樓沒有電梯，抄表人要反復走樓梯，膝關節及有關運動器官就較易發生慢性勞損；另外所遇電錶的位置有時過於狹小（可參考圖 5），作業中多須採用攀爬、過分彎腰一類的不自然動作，對工作人員安全及體能都是較大負擔。

圖 5　傳統人工抄錶常面臨空間狹窄，且需以攀高或彎腰等不良姿勢作業

二、現場抄錶工作量的「減量化」數據實證

隨着 AMI 系統的推進，大部分抄錶工作轉為系統遠端自動採集，減少了現場作業的工作數量。按澳電已有資料計算，每年實際進行的現場抄讀次數隨智能電錶普及而逐年減少。有關 2022 至 2025 年的變化可參考圖 6：

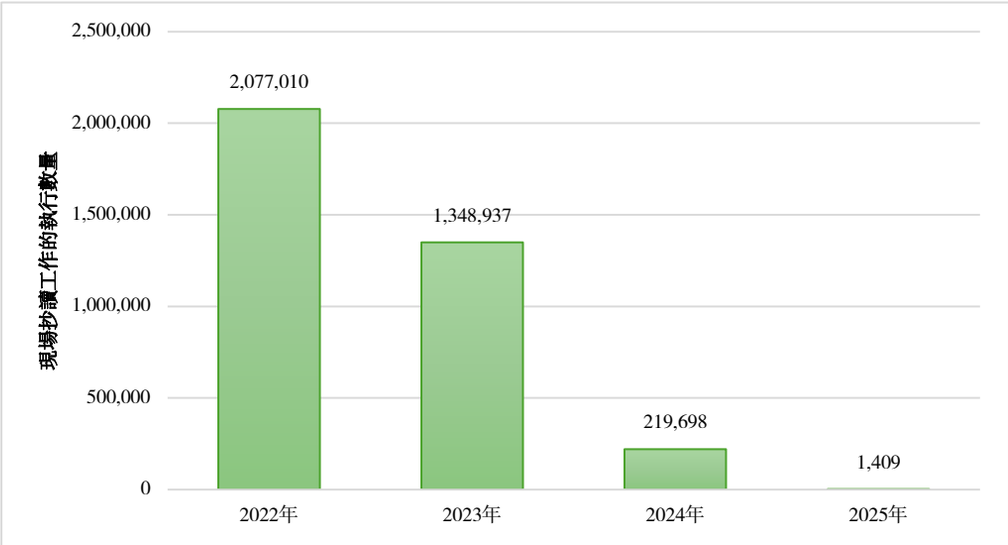


圖 6.　2022 年至 2025 年現場抄讀電錶工作的執行數量

當智能電錶在全澳達成全覆蓋後，每年現場電錶抄讀工作量由 2,077,010 次減至 1,409 次，降至原有數量的 0.1%。隨着現場工作數量的減少，作業人員避免了與複雜環境的接觸，大幅降低了面臨上述環境風險和意外的次數。

三、遠端停復電業務的數據實證與安全效益

除了日常抄錶自動化外，MDM 負責的設備控制功能「遠端停/復電」在營務管控上同樣帶來了顯著的安全防護效益。按傳統做法來說，要解決客戶欠費、或客戶因遷離、解除合約而提出停複電請求這一類的問題時，電力公司總得讓外勤人員去現場做手動停複電的操作。這種重複性的到戶作業本身即會增加業務時間、運營費用，又使外勤人手經受較多現場環境的不確定影響。現在借助 AMI 技術可將大部分現場動作轉為線上完成。2021 至 2025 年間全澳實際執行的停電與復電數據如表 1 所示：

表 1　2021 至 2025 年間全澳執行的停電與復電數據

業務類型 / 執行方式	2021	2022	2023	2024	2025
停電業務	3,828	4,276	9,411	20,386	12,508
現場執行	3,828	2,190	1,949	793	347
遠端執行	0	2,086	7,462	19,593	12,161
復電業務	3,698	3,875	8,907	19,924	11,995
現場執行	3,698	3,875	8,907	2,441	677
遠端執行	0	0	0	17,483	11,318

從上述數據顯示，現場停/復電業務的現場執行數量由 2021 年的三千多宗降至 2025 年數百宗，而遠端執行率大幅增至一萬二千多宗。大幅減少了前線人員前往現場處理業務的次數與相關運作風險，不僅提升了業務響應速度與客戶體驗，也避免了外勤技術人員在夜間或惡劣天氣下奔波現場的道路交通風險。

肆、智能電錶與 MDM 數據驅動的低壓配電網安全主動診斷與個案實證

傳統低壓配電網絡的分界點及用戶側設備，長期缺乏即時的電氣參數監測手段。諸如導線接頭虛接引起的持續過熱、中性線（N 線）接觸不良造成的電壓不平衡，以及設備絕緣老化引起的異常電流，在傳統模式下難以被即時察覺，極易演變為嚴重的電力火災或大面積停電事故。導入 AMI 高級計量架構後，電錶數據管理系統（MDM）具備高頻率數據擷取與電氣參數即時監測功能。當系統偵測到電壓、電流等瞬時量發生越限或相位異常時，能主動觸發告警，使運作團隊得以便在隱患演變為事故前進行精確定位與主動干預。以下透過三個典型個案，實證該系統在客務與環境安全隱患防範上的主動診斷效益：

一、個案一：用戶側來電虛接致計量設備熔斷異常診斷

• 個案背景：事件位於澳門某地鋪的用戶，現場計量採用電流互感器接線的配置。從 MDM 系統記錄顯示，可見該計量點於 4 月 16 日 06:30 開始，第一相電流出現異常的負數值。

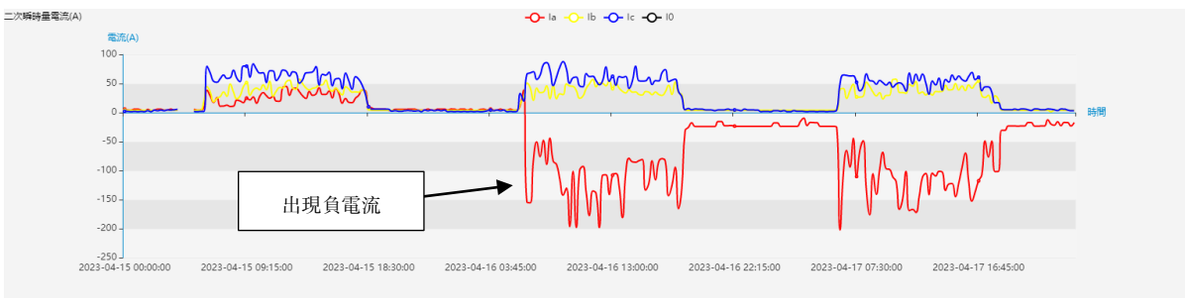


圖 7　瞬時電流紀錄

• 技術原因分析：經外勤技術人員赴現場排查與儀器量測，確認問題出在用戶側第一相的來電線路存在「虛接」（接觸不良）現象。虛接導致接觸電阻激增，在通過大電流時引起接線端發熱，進而導致第一相 CT 外殼及內部繞組燒毀熔斷。CT 受損後，導致 CT 第一相出現負電流及帶有 230V 的電壓，直接影響計量設備及客戶裝置安全。

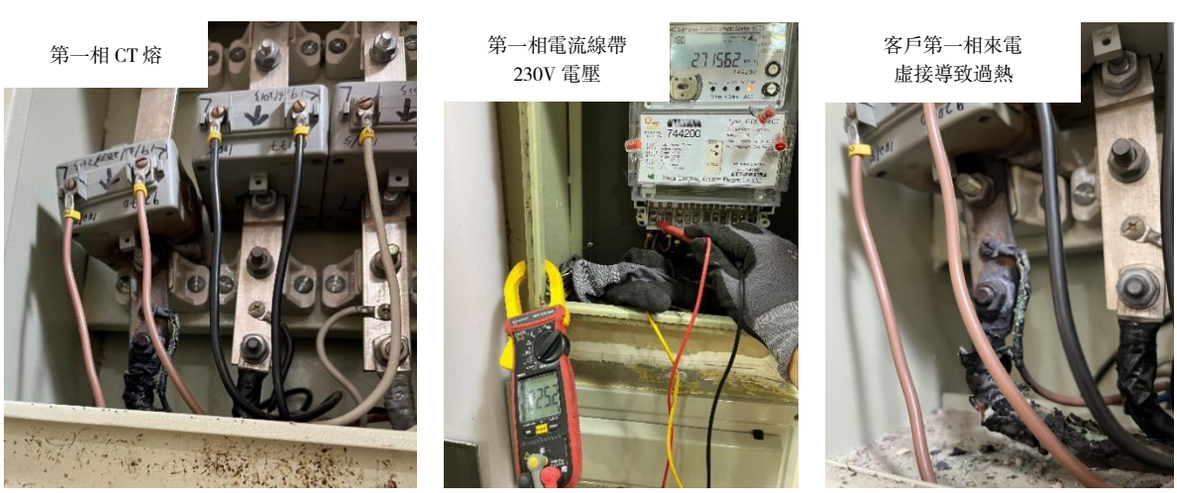


圖 8　客戶第一相來電虛接導致線路燒燬

• 後續處理：運用 MDM 的即時電流相位與數值告警，澳電團隊在現場尚未發生全面短路

或電氣火災前發現隱患，隨即通知客戶有關問題並由客戶進行線路修復，徹底消除該處的火災與安全風險。

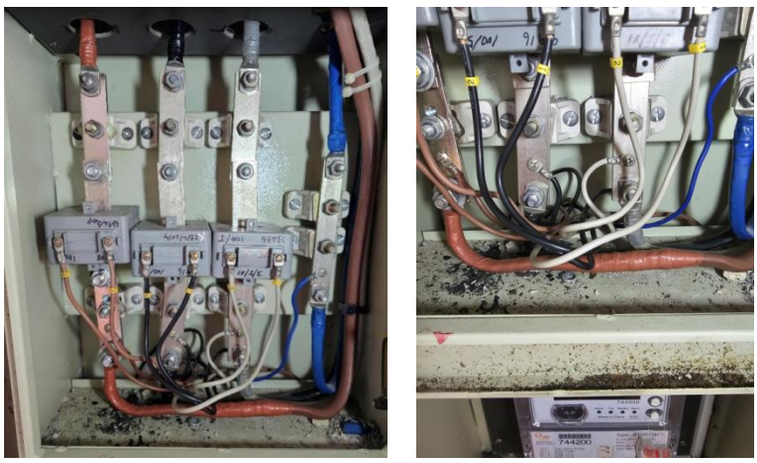


圖 9　客戶維修有關線路燒燬問題

二、個案二：商業大廈中性線銅巴虛接致三相電壓不穩診斷

• 個案背景：位於澳門某商業中心用戶。自 5 月 6 日起，MDM 系統即時擷取到該用戶的瞬時量電壓曲線出現劇烈波動（見圖 10），系統判定其「三相電壓出現不穩」並觸發運作告警。

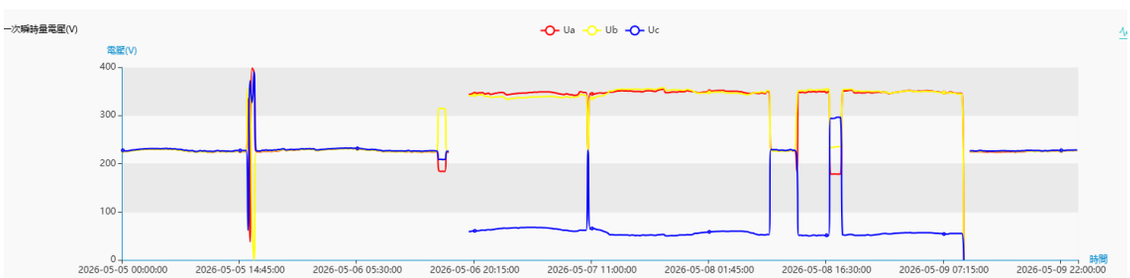


圖 10　客戶三相電壓不平衡

• 技術原因分析：根據 MDM 傳回的電壓數據圖表，電壓出現嚴重的三相不平衡，是典型中性線點電位偏移特徵。外勤人員對現場作了核實，確認該單位的低壓配電箱內，中性線（N 相）銅巴座存在虛接現象。

• 後續處理：在三相低壓供電系統中，若中性線（N 相）銅巴虛接或斷開會引發嚴重的中性點漂移，導致部分單相負載電壓飆升，最高可接近線電壓 380V–400V，此時電器易成批損壞、甚至起火。而 MDM 技術能自動地檢測電壓波動現象，使維運人員不必等到使用者設備出事才行動，用電安全因而可獲保障。

圖 11　客戶 N 相銅巴座出現虛位

三、個案三：住宅群組集體低電壓與上一級分線箱（CCL）火災隱患診斷

• 個案背景：位於澳門祐漢第一街某舊區唐樓住宅群組用戶。MDM 系統同時擷取到「電壓異常」告警在該樓宇用戶的鄰近錶位，最低電壓達至 180V（見圖 12）。

圖 12　該住宅群組電錶電壓數據均低至 180V

• 技術原因分析：根據系統數據分析，若單一用戶電壓偏低，較可能是該用戶端負載過大或線路老化所造成。然而本案同時觀察到鄰近錶位出現集體電壓偏低的情況，推測故障源並非在用戶內部，而可能是位於上一級電力裝置存在較大接觸電阻。經現場技術人員對該供電架構中的上一級電力裝置進行排查，發現分線箱內部存在嚴重的 N 線接觸不良。

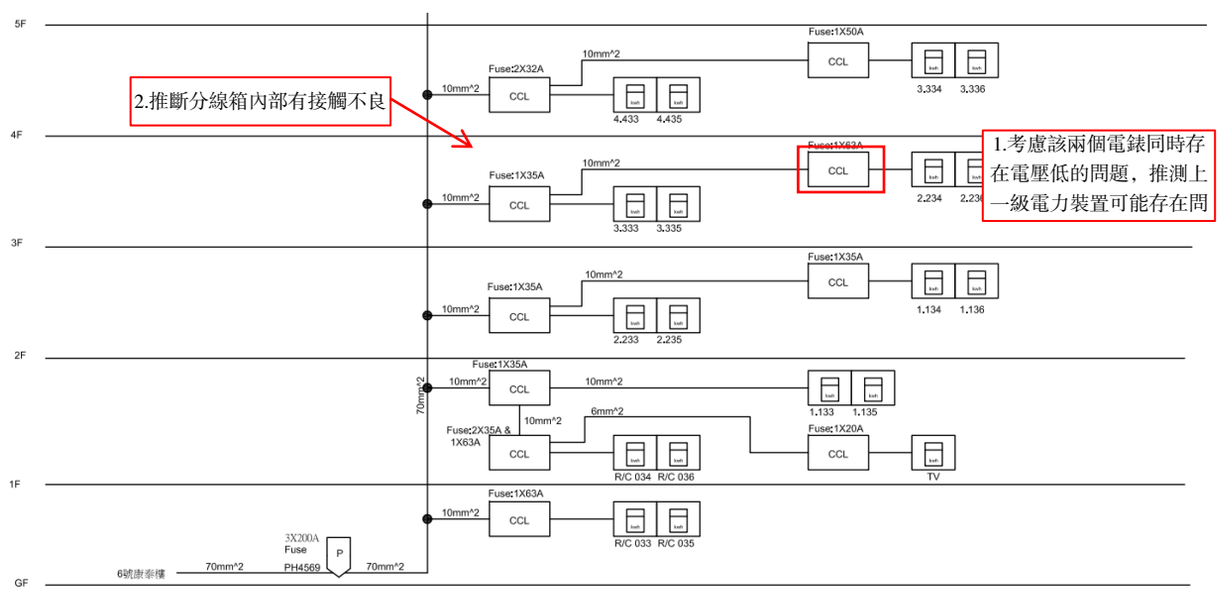


圖 13　分線箱內 N 線接觸不良

• 後續處理：排查結果證實該分線箱內部存在嚴重的 N 線接觸不良，該接頭因長期虛接引發高熱氧化，表面已出現明顯的燒焦跡象與碳化物質。

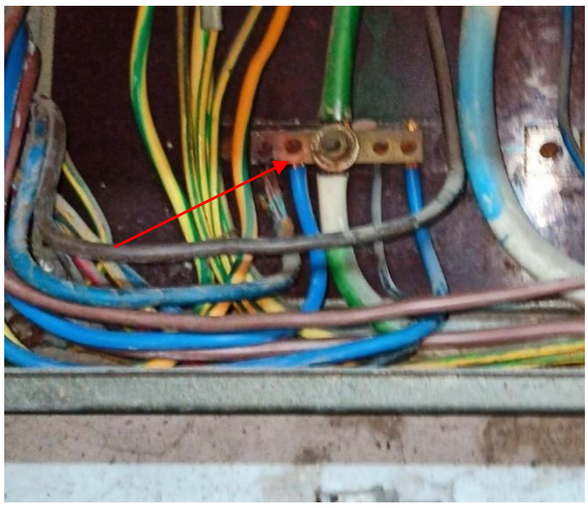


圖 14　分線箱內 N 線接觸不良

伍、應急管理重塑：極端天氣（颱風）下的電網韌性提升

從地理和氣候的角度看，海峽兩岸以及港澳長期要應對強颱風（即風暴潮或特大暴雨）一類的災害。就極端天氣而論，城市所具備的電力應急手段對社會、對安全均有直接意義。在面對極端天氣災害時，城市的電力應急能力直接關係到公共安全與社會秩序。本節將對比傳統的應急與早期智能電錶模式，並闡述如何透過硬件升級與軟體排程優化，來實現颱風發生時較完整的、更有效的應急管理。

一、傳統應急模式與初期智能電錶的技術瓶頸

在過去的傳統應急機制下，當颱風與風暴潮來襲時，澳電需提早安排大量工程人員於各節點待命。災害期間，若低窪地區發生嚴重水浸，為保障居民生命財產安全，工程部會果斷採取遠端分區停電措施。當颱風過後、水位回落之後，系統將依區域分次嘗試恢復供電。這時巡查所用的人力要冒風雨對停電區所有供電點作實地考察，同時利用居民提供的故障資訊做輔助判斷，查證是否已通電、有無隱患，再由人來登記、彙報資料並歸納統計結果，繼而調配材料、安排工作人員到現場替換零件。所採用的模式對人力需要很大、災害處理中又常有資訊和職安雙重滯後現象。

當智能電錶開始走向全覆蓋時，所收集到的初始資料是數位化的，但受原系統傳輸方法及各台區資料集中器（DCU）同時服務的電錶數量影響，電錶數據只能按「每小時」來劃分，定時上傳最近 15 分鐘的有關時段。此時即使後臺有人介入、主動提出要查核當前資料，要將台區內全部電錶的狀況都加以確認，一般仍需用去一兩個小時才可完成（圖 15）。因此從起點上說，即使電錶已實現全覆蓋，應急指揮所掌握的供電點狀態還是有大約一小時的時滯。就颱風過後亟待修復的分秒情形而言，此等監察延遲不能算是對調度、對回應的理想配合。

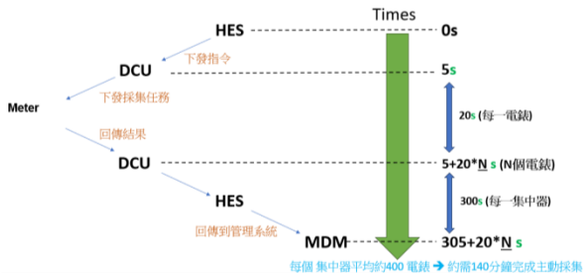


圖 15　一般數據集中器主動採集數據之回傳時間

二、基於高密度 DCU 與白名單管控的全新應急模式

為了打破上述技術瓶頸，澳電技術團隊提出了一套結合「硬件升級」與「系統邏輯優化」的全新智慧應急模式，從三個維度全面提升災後恢復效率：

1. 關鍵供電點的三相電壓電錶監測

在每個供電點的核心位置，篩選當中的三相電錶、各相線的單相電錶或安裝具備代表性的三相線路監察裝置作為「重要參考點」（圖 16），並在系統中建立重要參考點監測名單。在災後嘗試復電時，這些電錶能第一時間用作快速檢查供電點各相電壓是否平衡、數值是否正常以及故障診斷的核心依據。

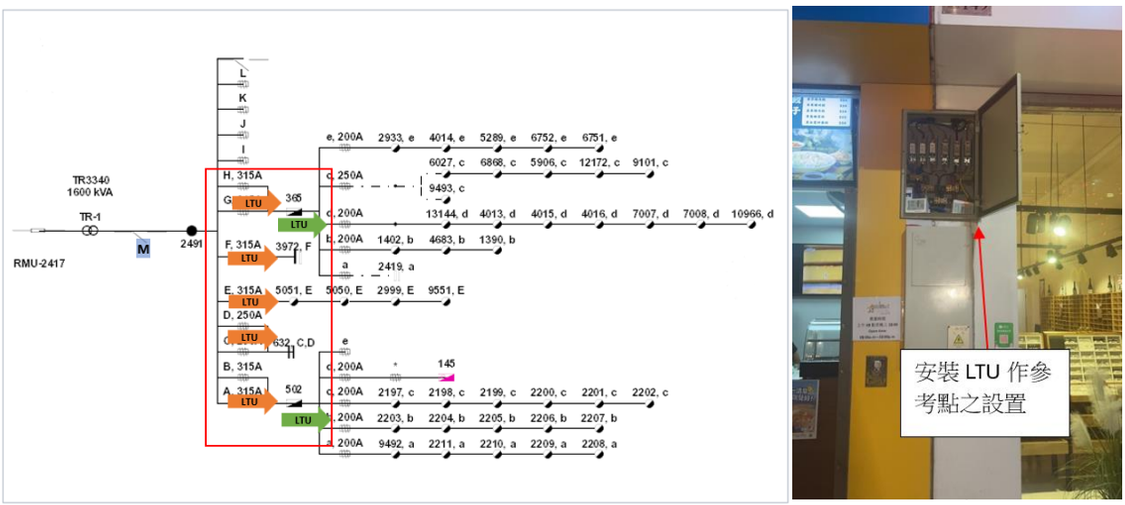


圖 16　重要參考點之設置

2．水浸區高密度數據集中器 DCU 升級

因應風暴潮警介區域，澳電進行數據集中器的整體性更換。升級為「高密度採集型 DCU」後，該 DCU 的數據傳輸頻率大幅提升數據採集實時性。此外，DCU 自身的通訊在線狀態可以視為一個關鍵指標：在颱風期間，DCU 離線即代表該台區已執行主動停電或發生重大故障，上線則代表供電正常。這為澳電應急指揮中心提供了最直觀的台區級別停復電參考依據（見圖 17）。

圖 17　復電狀態監測介面

3．智慧系統白名單管控與動態排程優化

由於重要參考點的電錶與一般普通居民電錶屬於同一台區、共用同一隻 DCU，在應急通訊頻寬有限的情況下，若同時採集海量電錶，極易因為數據擁堵而導致回傳速度變慢，失去時效性。針對此問題，澳電提出在 AMI 系統中引入了「動態白名單管控機制」。當進入颱風應急狀態時，系統會自動切換優先採集排程策略：將重要參考點納入白名單，配置最高優先級的採集排程，確保其關鍵數據能加快回傳。

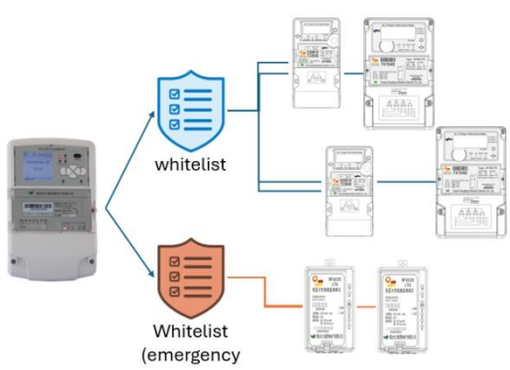


圖 18　動態白名單管控機制

陸、結　語

本文圍繞高級量測體系（AMI）與電錶數據管理系統（MDM）在低壓配電網的深度應用，系統性地論證了現代智慧電網在日常安全主動診斷與極端天氣應急重塑兩方面所涉技術及實際成果做系統分析。按目前智慧電錶普及的趨勢看，電力維運的基本思路已有實質性改變：

在日常營運中，它透過自動化與遠端化操作，有效消除了第一線員工的現場作業與衝突

風險；

在極端天氣（颱風）應急中，透過優先監測重要參考點的機制，讓澳電可以較好地安排搶修資源，加強電網修復效率。未來，隨著人工智慧與大數據算法的進一步融合，智能電錶將在兩岸四地的城市安全與防災能力建設中，發揮更加深遠且不可替代的基礎支撐作用。

新质生产力背景下江苏职业健康智能监测与应急管理体系建设研究

许曙青，姚　淼，宗俊秀，汪　蕾
江苏省南京工程高等职业学校　南京　211135

摘　要：新质生产力以科技创新为核心驱动力，为职业健康治理现代化提供了技术路径，亦对传统监测模式提出了变革性要求。江苏作为制造业大省，职业健康领域正面临传统危害与新兴风险交织叠加的复杂局面，监测手段滞后、数据孤岛林立、医防协同脱节等结构性矛盾日益凸显。本文基于江苏省南京工程高等职业学校及合作单位的科研实践，首先剖析新质生产力对职业健康监测的内在需求与作用机理；继而通过文献研究、政策文本分析与实证调研相结合的方法，系统厘清江苏省职业健康监测的现状图谱与深层瓶颈。在此基础上，提出构建“数据底座—技术架构—联动机制—人才支撑”四位一体的智能监测与应急管理体系建设方案。研究主张打破多部门数据壁垒，建立“异常识别—风险分级—资源调度—闭环反馈”的全链条协同机制；并创新性地引入产教融合视角，旨在培养懂职业健康、精智能运维的复合型人才，从源头破解系统“建而不用”的困局。研究成果可为江苏省职业健康数字化治理提供决策参考，亦可为全国制造业职业健康治理数字化转型提供“江苏样本”。

关键词：新质生产力；职业健康；智能监测；应急管理；产教融合

引　言

职业健康是健康中国建设的重要基石，亦是衡量社会文明进步与营商环境优化的关键标尺。《“健康中国 2030”规划纲要》[1]与《国家职业病防治规划（2021—2025 年）》[2]均将加强职业健康工作置于优先位置，明确提出推动职业病危害因素检测技术创新。2019 年，全国爱国卫生运动委员会办公室等七部门联合印发《关于推进健康企业建设的通知》[3]，进一步细化了健康企业建设的标准规范与数字化管理要求。从全球视野看，世界卫生组织与国际劳工组织的联合估算显示，2016 年全球因工作相关疾病与伤害导致的死亡人数约 190 万例[4]，职业健康疾病负担依然沉重；国际劳工组织 2023 年通过的《全球职业安全与健康战略及行动计划（2024—2030 年）》[5]亦将数字技术应用列为全球优先行动领域，欧美发达国家通过智能监测技术有效降低了事故率并提升了监测覆盖率，为我国提供了有益借鉴。

当前，新质生产力正以物联网、大数据、人工智能等颠覆性技术为核心，深刻重塑生产方式与劳动组织形态。2023 年 9 月，习近平总书记在黑龙江考察时首次提出“新质生产力”概念，并在二十届中央政治局第十一次集体学习时对其作出系统阐释，强调以科技创新为主导、以全要素生产率大幅提升为核心标志[6]；学界亦围绕其内涵特征与重要着力点展开了深入

论述[7]。江苏作为制造业大省，规模以上工业企业近 7 万家，其中中小企业占比高达 98.5%[9]；从全国看，接触职业病危害因素的劳动者达 870.38 万人，劳动者接害率为 39.36%[8]；仅南京地区接触职业病危害的劳动者就达百万人[10]。然而，传统的“年度体检式”人工监测模式因频次低、覆盖面窄、时效性差等固有缺陷，已难以适配智能制造实时化、精准化的生产需求。在此背景下，如何借力新质生产力动能，构建适应新时代要求的职业健康智能监测与应急管理体系，已成为亟待破解的现实课题。本文拟结合项目组前期在职业健康领域的理论研究、标准制定与技术应用成果，深入探讨江苏省在该领域的建设路径与实施策略。

一、内在机理：新质生产力赋能职业健康治理的理论逻辑

新质生产力对职业健康治理的赋能并非简单的技术叠加，而是涉及生产要素重组与生产关系的深层次变革[6-7]。从理论逻辑审视，这种赋能主要体现在三个维度：一是技术赋能，物联网传感器、AI 图像识别等技术使粉尘、噪声、有毒气体的实时感知成为可能，推动监测手段从“抽样点测”走向“全域连续”[13]；二是数据驱动，多源数据的汇聚与分析推动治理模式从“经验判断”向“数据决策”跃迁，这与《“数据要素×”三年行动计划（2024—2026 年）》将医疗健康、应急管理列为重点领域的部署高度契合[15]；三是模式重构，促使监管重心从“事后处罚”转向“事前预警、事中干预”的全周期管理，实现职业健康治理从“末端处置”向“源头预防、过程管控”的范式跃迁[14]。三者层层递进、相互耦合：技术赋能产生数据，数据驱动反哺算法，算法迭代支撑模式重构，最终体现为职业健康治理全要素生产率的提升。基于此，本文构建了“技术赋能—制度适配—人才跟进”的分析框架，以探究技术、制度与人力资源的协同演进路径。

二、现实挑战：新质生产力背景下的治理困境

尽管江苏省在职业健康领域已取得阶段性成效，但在新质生产力视域下，现有治理体系仍呈现出显著的不适应性，具体表现为以下四个方面：

第一，监测手段的代际落差。据项目组前期调研及《职业病危害项目申报系统》数据显示，全省企业在线监测系统普及率不足 30%。绝大多数企业仍沿袭人工定期检测的旧例，这种静态的监测方式无法捕捉动态生产过程中危害因素的瞬时波动，导致风险识别存在严重的“时间差”。国家卫生健康委统计公报显示，2023 年全国共报告各类职业病新病例 12087 例，其中职业性尘肺病及其他呼吸系统疾病 8105 例[11]；2024 年江苏省报告新发职业病 542 例[12]。监测滞后导致的漏报、迟报风险不容忽视，监测模式的实时化、连续化改造已刻不容缓。

第二，数据治理的孤岛效应。职业健康数据散落在卫健、应急、人社及企业等多个主体手中，缺乏统一的分类分级标准与接口规范。这种碎片化的数据分布状态，切断了“环境暴露—健康效应”的完整证据链，直接制约了 AI 预警模型的训练质量与应用落地。同时，职业健康数据包含大量敏感个人信息，《中华人民共和国数据安全法》《中华人民共和国个人信息保护法》对其采集、共享与使用提出了严格的合规要求，进一步抬高了跨主体数据流通的制度成本。

第三，监测与应急的机制性脱节。当前的职业健康监测系统与应急管理系统往往处于物理隔离或逻辑割裂的状态。监测端的异常数据无法自动转化为应急端的预警信号，应急响应过度依赖人工调度，协同效率低下，极易在急性职业中毒等突发事件中错失救治的“黄金窗口期”。

第四，专业人才的供需失衡。现有从业人员普遍缺乏智能监测系统的运维能力与海量数据的分析素养。项目组 2021 年对全国 470 余家用人单位的调查显示，69.41%的用人单位仍存在应急管理人才需求，而现有应急管理与减灾技术岗位中专职人员比例不足三成[18]。与此同时，职业院校的相关专业课程体系滞后于产业技术的迭代速度，导致先进的硬件系统因缺乏软件（人才）支撑而陷入“建而不用”或“大材小用”的尴尬境地。

三、体系构建：智能监测与应急管理的四位一体路径

针对上述挑战，结合前期研究成果，本文提出构建以“数据底座—技术架构—联动机制—人才支撑”为核心的“四位一体”智能监测与应急管理体系，四个维度层层递进、闭环联动。

1．夯实数据底座：统一标准与共享机制。数据是智能监测的核心。项目组前期已参与制定《企业职业病危害在线监测系统设置规范》（DB32/T 4270—2022）[16]等地方标准，为本研究奠定了坚实基础。在此基础上，需进一步制定职业健康智能监测数据的分类分级标准，明确数据采集、传输、存储、使用的规范，并同步落实《中华人民共和国数据安全法》《中华人民共和国个人信息保护法》对职业健康敏感数据的分级分类保护要求。重点打通三类数据链路：一是企业内部数据，整合生产环境监测、员工健康监护、职业病危害项目申报等数据；二是跨部门数据，推动卫健、应急、人社等部门间的数据共享与业务协同；三是产业链数据，探索上下游企业在职业健康管理上的数据联动。通过建立省级职业健康大数据中心，消除数据壁垒，释放数据要素在职业健康治理中的乘数效应[15]，为 AI 模型训练提供高质量数据燃料。

2．强化技术架构：智能监测与预警模型研发。依托物联网技术构建全方位感知网络，在重点行业（如化工、电子、新能源）的关键岗位部署智能传感器，实现对危害因素的 24 小时不间断监测。在系统架构上，可引入“云—边—端”协同模式，利用边缘计算保障数据处理的实时性，依托云计算实现监测数据的集约化管理[13-14]。同时，利用机器学习算法，基于历史数据训练风险评估模型，实现对职业病潜在风险的早期识别与智能预警。国际研究表明，人工智能在职业危害识别、风险预测与健康监护等方面已展现出显著效能[13]。例如，针对尘肺病防控，可结合粉尘浓度变化趋势与工人接尘时长，动态评估发病风险，并可引入数字孪生技术对重点岗位的暴露情景进行仿真推演，实现从“被动应对”到“主动预防”的转变。

3．完善联动机制：全链条应急管理闭环。打破监测与应急的分割状态，设计“异常识别—风险分级—资源调度—闭环反馈”的全链条协同机制，并与企业安全生产风险分级管控和隐患排查治理双重预防工作机制相衔接。当监测系统识别到异常指标时，自动触发预警，并根据预设的风险等级，启动相应的应急响应预案。系统应自动推送预警信息至企业管理者、属地监管部门及定点医疗机构，实现应急资源的精准调度。处置完成后，将结果反馈至系统，用于优化预警模型与应急预案，形成持续改进的闭环管理。这一机制已在项目组承担的“精准化职业性尘肺病防治体系关键技术的研究与应用”中得到初步验证，并获中国职业安全健康协会科学技术奖二等奖。

4．创新人才培养：产教融合的职教模式。体系的落地离不开人才支撑。江苏作为职业教育强省，应充分发挥职业院校在人才培养中的主阵地作用。《职业教育产教融合赋能提升行动实施方案（2023—2025 年）》明确提出，推动产业需求更好融入人才培养全过程[17]。基于

项目组前期开展的“应急管理人才培养需求及其工作现状的调查分析”[18]，对接疾控部门与企业需求，梳理职业健康智能监测岗位的胜任力模型。在职业院校应急管理专业中，增设智能监测技术、大数据分析等相关课程，开发虚拟仿真实训项目。依托“江苏省许曙青职业健康与科技创新名师工作室”等平台，深化校企合作，推行“双元育人”模式，培养既懂职业健康专业知识，又掌握智能系统运维技能的复合型人才，从根本上解决“建而不用”的问题。

四、对策建议：推进体系落地的保障措施

为确保上述智能监测与应急管理体系的顺利建设与高效运行，特提出以下政策建议：

第一，加强顶层设计，完善法规标准体系。建议省政府出台《江苏省职业健康智能监测与应急管理体系建设指导意见》，明确建设目标、重点任务与责任分工，将职业健康数字化治理纳入地方政府绩效考核体系。加快制定职业健康数据安全管理办法及智能监测系统运维规范，为体系建设提供坚实的制度保障。

第二，加大财政投入，推广低成本解决方案。设立省级专项资金，采取以奖代补的形式，支持重点行业企业开展智能监测系统升级改造。针对江苏规模以上工业企业中中小企业占比高达 98.5%的省情[9]，鼓励科研机构与专精特新企业联合攻关，开发模块化、低成本、易部署的智能监测设备与 SaaS 服务平台，显著降低中小企业的技术应用门槛。

第三，深化产教融合，健全人才激励机制。支持职业院校与行业龙头企业共建职业健康产业学院，将智能监测相关内容纳入“1+X”职业技能等级证书体系。建立多元化的人才激励机制，对在职业健康智能化建设中表现突出的企业与个人给予表彰奖励，激发各方参与的内生动力。

第四，开展试点示范，逐步复制推广。采取“点—线—面”的推进策略，优先选择南京、苏州、无锡等地的电子、新能源、化工等重点行业开展试点示范，形成一批可复制、可推广的典型案例。依托江苏省疾病预防控制中心（国家职业卫生标准研制基地）的技术力量，为试点企业提供全过程的技术指导与第三方效果评估，待模式成熟后逐步在全省范围内推广应用，并依托长三角一体化发展战略，推动区域间职业健康监测数据互认与应急资源协同。

五、结语

总之，新质生产力的蓬勃发展为江苏省职业健康治理现代化带来了前所未有的战略机遇。构建适应新形势的职业健康智能监测与应急管理体系，不仅是落实“健康江苏”建设的具体举措，更是推动制造业高质量发展、发展新质生产力的必然要求。本研究提出的基于数据贯通、技术赋能、机制创新与人才支撑的“四位一体”建设路径，深度融合了项目组多年的理论研究与实践积累，具有较强的针对性与可操作性。需要指出的是，本研究以定性分析与政策推演为主，所提出的体系架构尚缺乏大样本实证检验，预警模型的识别精度与应急响应的实际效能亦有待在试点中进一步验证。未来研究将依托试点建设持续积累监测数据，迭代优化预警模型，并探索生成式人工智能与大模型技术在职业健康风险研判与应急辅助决策中的应用前景。随着该体系的不断完善与推广，必将为保障广大劳动者健康权益、提升政府治理效能、构筑江苏制造业竞争新优势作出重要贡献。

参考文献：

［1］ 中共中央，国务院. “健康中国 2030”规划纲要［Z］. 2016.

［2］ 国家卫生健康委，中共中央宣传部，国家发展改革委，等. 国家职业病防治规划（2021—2025 年）

［Z］. 2021.

［3］ 全国爱国卫生运动委员会办公室，国家卫生健康委，工业和信息化部，等. 关于推进健康企业建设的通知［Z］. 2019.

［4］ World Health Organization, International Labour Organization. WHO/ILO joint estimates of the work-related burden of disease and injury, 2000-2016：global monitoring report［R］. Geneva：World Health Organization, 2021.

［5］ International Labour Organization. Global strategy on occupational safety and health and plan of action（2024-2030）［R］. Geneva：International Labour Organization, 2023.

［6］ 习近平. 发展新质生产力是推动高质量发展的内在要求和重要着力点［J］. 求是, 2024（11）：4-8.

［7］ 周文，许凌云. 论新质生产力：内涵特征与重要着力点［J］. 改革, 2023（10）：1-13.

［8］ 国家卫生健康委. 全国职业病危害现状统计调查概况［R］. 2022.

［9］ 江苏省工业和信息化厅. 2024 年 1—7 月全省规模以上中小工业经济运行简析［EB/OL］.（2024-08-30）［2026-07-18］. https://gxt.jiangsu.gov.cn/art/2024/8/30/art_80181_11425258.html.

［10］ 陈允菊，季晓庆，汤玉华，等. 南京市职业健康检查机构质量考核情况分析［J］. 职业卫生与应急救援, 2023, 41（4）：467-471.

［11］ 国家卫生健康委. 2023 年我国卫生健康事业发展统计公报［R］. 2024.

［12］ 江苏省疾病预防控制局. 2024 年疾病预防控制工作概况和 2025 年主要任务［EB/OL］.（2025-01-02）［2026-07-18］. https://www.jscdc.cn/xxgk_1641/zwxx/zjgh/202509/t20250902_95942.html.

［13］ Shah I A, Mishra S. Artificial intelligence in advancing occupational health and safety：an encapsulation of developments［J］. Journal of Occupational Health, 2024, 66（1）：uiad017.

［14］ 阮燕梅，荣幸，兰丽琴，等. 职业健康大数据的应用现状与发展前景［J］. 职业卫生与应急救援, 2022, 40（3）：370-374.

［15］ 国家数据局，中央网络安全和信息化委员会办公室，科学技术部，等. “数据要素×”三年行动计划（2024—2026 年）［Z］. 2023.

［16］ 江苏省市场监督管理局. 企业职业病危害在线监测系统设置规范：DB32/T 4270—2022［S］. 2022.

［17］ 国家发展改革委，教育部，工业和信息化部，等. 职业教育产教融合赋能提升行动实施方案（2023—2025 年）［Z］. 2023.

［18］ 许曙青，汤表倩，冯昌道，等. 应急管理人才培养需求及其工作现状的调查分析［J］. 伤害医学（电子版）, 2021, 10（3）：38-44.

粤港澳大湾区有限空间智能感知与风险防控研究
——以横琴冷冻水管网为例

杨　哲
珠海横琴能源发展有限公司

摘　要：针对有限空间作业存在的“人、物、环、管”四类安全管理痛点，结合近年来典型有限空间事故暴露出的培训实效不足、气体检测技术短板、响应滞后等问题，珠海横琴能源发展有限公司（以下简称横琴能源）构建了“数智赋能+体系管控”的综合解决方案。一方面联合科研机构搭建智能感知系统，通过多参数传感器、井盖位移监测及 GIS/BIM 平台实现气体、积水、结构的全维度动态感知与多级预警，配套车载放电装置、定制化力矩扳手、长管式呼吸器等专用装备破解井下作业适配难题；另一方面建立“培训+审批”双体系，以“理论+实操+应急”模式强化人员能力，通过“线上方案审批+线下三人小组+AI 布控”实现全流程闭环管控。有效解决了传统人工管理风险响应滞后的问题，实现了从单点检测到持续监测、从人工巡检到智能预警的跨越，为同行业有限空间安全管理提供了可复制的实践参考。未来可进一步融合人工智能、大数据技术深化差异化风险管控，推动管理向智能化、精细化升级。

关键词：粤港澳大湾区；有限空间；智能感知；风险防控；

引言：近年来，有限空间作业事故时有发生，多是一人遇险、多人遇难，容易造成较大事故。根据应急管理部发布的数据分析来看，2013 年至 2022 年的十年间，中毒和窒息事故起数和死亡人数占事故总量的 96.8%和 96.9%。从危险因素看，主要是硫化氢、一氧化碳、氮气、二氧化碳等有毒有害气体。从发生部位看，污水处理系统和窑炉、槽罐等设备设施相关事故起数和死亡人数占事故总量的 71.5%和 73.7%；从伤亡扩大原因看，未落实安全防护措施，盲目施救相关事故起数和死亡人数占事故总量的 87.4%和 86.8%。在此背景下，应急管理部组织修订了《工贸企业有限空间作业安全规定》并于 2024 年 1 月 1 日正式施行。国家市场监督总局与国家标准化管理委员会也在 2025 年 10 月发布《有限空间作业安全技术规范》（GB 46768–2025）并于 2026 年 5 月 1 日起正式实施，这也是我国首部覆盖全行业的有限空间作业强制性国家标准，足见，国家对有限空间作业安全的治理已从单一的工贸行业部门规章，升级为覆盖全行业的强制性国家标准。

横琴粤澳深度合作区位于珠海市横琴岛，与澳门特别行政区仅一水之隔，具有独特的地理位置。这种特殊的地理位置使得横琴在经济发展、人员流动、基础设施建设等方面具有显著的优势，同时也带来了诸多安全管理方面的挑战。作为粤港澳大湾区的重要合作平台，横琴粤澳深度合作区的安全形象对于吸引国内外投资、促进区域合作具有重要影响。

冷冻水管网是合作区基础设施的重要组成

部分，用于满足区域内的供冷需求，保障各类建筑设施的正常用冷。阀门井作为管网系统的关键节点，其安全状况直接关系到整个冷冻水管网的稳定性和可靠性。在横琴粤澳深度合作区，基础设施的稳定运行对于吸引投资、促进产业发展至关重要。

横琴能源作为横琴区域内唯一供冷供热运营商，运营超 48.5 公里能源管网（蒸汽 7.5km/冷冻水 41km）及 229 座阀门井，管网深埋地下，需频繁开展井下巡检，但阀门井密闭空间存在有毒易燃气体积聚、缺氧等风险，叠加管井地理信息与安全数据长期依赖人工记录管理，缺乏数字化系统支撑，导致风险预警滞后、标准化管理困难，长期面临地下管网有限空间作业安全管控与信息化治理的双重挑战。本文剖析其管理痛点并提出标准化解决方案，为同行业优化高风险密闭空间作业安全管理体系提供实践参考。

壹、管网有限空间安全管理存在问题及面临的挑战：

管网有限空间安全管理的主要内容包括建立安全管理组织机构、明确职责、建立管理体系、开展安全教育培训、建立双重预防机制、安全设施和设备可靠性管理、安全监督检查、安全文化建设和应急管理等方面。

一、管网有限空间安全管理存在问题。

（一）管理现状根据管理要素类别可分为“人、物、环、管”四方面。（王新、王红汉、吴晓煜、李辉，2019）

基于“人、物、环、管”四要素分析：人员层面，作业人员资质培训覆盖但实操违规频现，安全素养与应急能力参差；设备层面，传统正压式呼吸器（5L 气瓶理论 40 分钟续航）受劳动强度影响实际时效不足，安全性能待优化；环境层面，管网阀门井（8–15m³）通风仅依赖井盖启闭，潮湿积水隐患突出；管理层面，安全责任制度落实粗放，风险分级管控与隐患排查执行流于形式，应急预案修订滞后且实操性不足。

（二）有限空间事故原因分析

近年来我国有限空间事故持续高发，呈类型集中、盲目施救扩大伤亡等特征。据应急管理部统计，2013—2022 年工贸行业共发生有限空间作业较大事故 95 起、死亡 357 人；其中中毒和窒息事故 92 起、死亡 346 人，起数和死亡人数分别占事故总量的 96.8%和 96.9%；硫化氢和一氧化碳中毒造成的事故 76 起、死亡 294 人，分别占事故总量的 80%和 82.4%；盲目施救相关事故 83 起、死亡 310 人，起数和死亡人数分别占事故总量的 87.4%和 86.8%，因盲目施救导致的死亡人数约占死亡总数的近一半。（刘宁等，2026）

从作业环节看，清理清淤环节发生事故 35 起、死亡 129 人，分别占事故总量的 36.8%和 36.1%；检维修作业环节发生事故 26 起、死亡 98 人，分别占事故总量的 27.4%和 27.4%；两者合计占事故总量的 64.2%和 63.5%。从发生部位看，污水处理系统和窑炉、槽罐等设备设施相关事故起数和死亡人数占事故总量的 71.5%和 73.7%，是有限空间事故的高发区。（时宁，2014）

二、有限空间安全管理面临的挑战

（一）有限空间管控缺乏系统性培训。

由于管网介质多样且分布广泛，一线职工对有限空间的管控能力至关重要。然而，目前的培训主要集中在理论知识上，缺乏针对性的实操演练和应急处置训练。在有限空间作业事故中，作业人员对有毒有害气体的识别和防范能力不足是导致事故的原因之一。培训效果不佳导致作业人员在实际操作中无法准确识别风险，无法熟练使用检测设备和防护用品，增加了事故发生的概率。

（二）有限空间气体检测技术存在显著

短板。

主要体现为检测参数、时效性及环境适应性不足。现有四合一气体检测仪仅覆盖氧气、硫化氢、一氧化碳和可燃气体四类指标，且检测时段多集中于作业前单次采样，缺乏作业过程的持续监测数据支撑，易产生检测误差。管网阀门井因低频使用、地质沉降及露天环境导致积水风险加剧，常规作业面临两难困境：全面预检成本过高，而抢修时抽水–通风–检测流程耗时过长，严重影响应急处置效率。技术缺陷集中表现在检测指标覆盖不全、监测持续性不足、复杂工况适应性薄弱三大方面，可能导致风险预警延迟、抢修延误及安全事故。亟需研发多参数实时监测装备，优化检测流程并建立动态监测体系，以提升有限空间作业安全保障能力。

貳、数智化技术赋能有限空间安全管理的策略

一、有限空间数智化安全管理平台搭建。

横琴能源联合中国科学院合肥物质科学研究院，针对地下管网有限空间安全监测难题，搭建智能化在线监测系统。该系统基于红外光学与无线通讯技术，实时采集地下阀门井环境参数：部署硫化氢、一氧化碳、氧气、甲烷浓度及温度、液位传感器，同步通过位移传感器监测井盖状态，实现气体、积水和结构安全的全维度感知。创新设计十字支架结构，将传感器组牢固安装于井壁，承重达 150 公斤，并加装防坠网兜，有效防范井盖缺失引发的人员坠落风险。配套开发的 GIS/BIM 智能管理平台，集成所有监测数据于三维地图，动态展示各阀门井实时参数、风险等级及历史趋势曲线。系统设置多级报警机制，触发报警时自动启动管网气体扩散模拟和爆炸风险分析，联动应急响应模块。平台还具备完整的数据存储与分析功能，支持气体环境评估及管网安全优化决策。突破了传统检测的时空局限，实现从单点检测到持续监测、从人工巡检到智能预警的跨越式升级，显著提升地下管网安全管控效能。

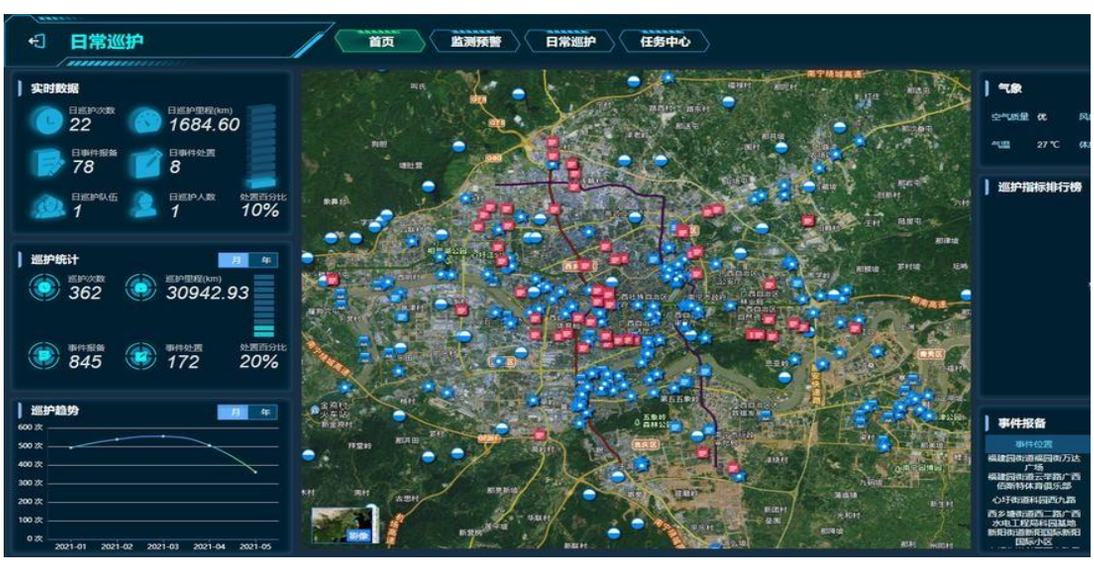


图 1　横琴能源管网全景综合数据

二、有限空间管控流程完善。

针对有限空间作业安全管理，构建“培训+审批”双体系，强化人员能力与流程管控。作业人员培训覆盖全员，采用“理论+实操+应急+案例”模式，将应急处置纳入年度技术比武，通过实战演练提升应急能力，并将规范要求嵌

入岗位安全规程，确保操作标准化。同步推行“线上+线下”双重审批机制：线上严格执行“一作业一方案”，通过办公系统标准化模板填报作业时间、风险辨识、气体检测等数据，按流程逐级审批；线下实施“三人小组”作业制（作业、监护、应急角色分明），部署移动 AI 布控球远程监控，现场确认安全条件并拍照留痕后方可开工，实现风险防控闭环。双重审批将方案制定、数据填报、过程监督、应急保障等环节数字化串联，确保气体检测、人员配置、设备监控等核心措施精准落地，有效破解传统作业监管脱节难题，提升有限空间作业本质安全水平。

三、应急响应与有限空间作业的智能化。

有限空间数智化安全管理平台通过深度分析气体监测数据，构建设备故障预测及环境风险评估模型。系统实时监测气体浓度、设备状态等参数，当数据异常或逼近阈值时，自动触发设备故障、空间开放、环境风险等多级预警，并联动声光提示及三维地图定位。异常事件发生时，平台实时推送报警详情、监控画面及历史处置记录，辅助人员快速研判风险点与关键设施位置。支持在线填报处置方案并同步归档，形成应急响应闭环管理，提升有限空间作业风险处置效率与安全性。（任宗祥、徐武强、贾鹏、王雪妍，2026）

图 2　横琴能源管网安全检测系统

四、车载放电装置的应用

在新能源车日益普及的今天利用车载放电装置可以更便捷解决有限空间作业多场景应用。例如紧急救援时快速部署为通风设备供电，加速排出有害气体；日常维护中替代长距离电缆，直接驱动防爆风机；临时作业中联动调节风量，实时降低有害气体浓度。（Tian、Razeghi、Samuelsen，2024）

该方案具备四大核心优势：一是移动性强，依托新能源工程车灵活响应偏远区域需求，较传统柴油发电机节省运输及燃料补给时间；二是零排放安全供电，杜绝 CO 等二次污染；三是效能提升，智能通风系统使作业准备时间显著缩短；四是环保降噪，纯电驱动避免发电机噪音与尾气排放。实现有限空间作业安全性与效率双提升，推动应急响应体系绿色化升级。

五、自制工器具的应用

聚焦有限空间作业环境受限于阀门井内狭窄空间、照明通风条件差及高精度作业要求。

传统扳手存在体积大、操作受限等问题，应用自制力矩扳手，通过定制化设计有效应对有限空间内设备安装维护及供冷系统启停操作。其核心优势体现在四方面：一是紧凑结构设计突破空间限制，提升狭小环境操作性；二是支持扭矩范围、手柄角度等参数定制，精准匹配作业需求；三是优化人机工程学设计，降低操作疲劳并提升效率；四是模块化结构降低维护成本，材料与设计的灵活性支持快速改进迭代。通过针对性技术创新，在确保安全精度的同时，显著改善井下作业经济性与可实施性。

六、自制长管式呼吸器的应用

针对有限空间作业面临阀门井内氧气不足、有害气体积聚、空间狭小及通风受限等难题，传统供氧设备因体积与时效限制难以适配。为此自制长管式呼吸器，通过软管将地面新鲜空气输送至井下作业面，有效保障呼吸安全。其应用场景覆盖四大类：一是供冷系统启停、清淤等常规作业；二是有限空间事故救援；三是甲烷/硫化氢等有毒气体环境；四是分集水器清洗等密闭设备检修。核心优势包括：持续稳定供氧，隔绝井下气体风险；轻量化设计摆脱氧气瓶束缚，提升狭窄空间机动性；模块化结构（输气管、面罩、背带）维护便捷成本低；支持超长作业时间，突破压缩气瓶容量限制；低负重特性显著降低人员疲劳。该方案通过软管供气模式创新，兼顾安全性、适应性及经济性，成为井下高危环境作业的重要保障。

结语：本文针对管网有限空间安全管理的现状，分析了存在的问题，并提出了强化培训、完善制度和科技赋能等对策。通过实践应用，这些措施显著提升了有限空间作业的安全性和效率，为同行业企业提供了有益的参考。然而，本研究仍存在不足之处，例如对不同行业有限空间作业的差异化风险分析不够深入。未来研究可进一步探索如何结合新兴技术（如人工智能、大数据）优化有限空间安全管理，同时加强跨行业安全管理经验的交流与应用，推动有限空间安全管理向智能化、精细化方向发展。（杨能川，2022）

参考文献：

［1］王新，王红汉，吴晓煜，李辉. 工贸企业有限空间作业安全管理存在的问题及对策［J］. 工业安全与环保, 2019, 45（10）：11–13.

［2］时宁. 有限空间安全管理存在的问题及对策［J］. 冶金动力, 2014（09）：87–89.

［3］杨能川. 浅析泉州市轻工重点企业有限空间作业安全管理存在的问题及对策［J］. 安全与健康, 2022（10）：48–51.

［4］任宗祥，徐武强，贾鹏，等. 地下管廊有限空间有害气体智能监测系统与管理策略［J］. 地下空间与工程学报, 2026.

［5］刘宁，等. 我国有限空间较大事故特点及对策研究［J］. 中国职业医学, 2026, 53（5）.

［6］Tian S, Razeghi G, Samuelsen S. Assessment of vehicle–to–load in support of home appliances［J］. Journal of Energy Storage, 2024, 104（Pt. 1）：1. 1–1. 10.

基于 GraphRAG 的工业安全隐患排查法规匹配研究——以 DeepSeek 为例

王昕怡
中钢集团武汉安全环保研究院

摘　要：工业安全隐患排查要求安全专家在记录现场问题的同时，准确给出法规标准条款和整改依据。传统人工检索依赖专家经验，面对标准数量大、更新快等情况，易出现检索耗时、引用不精确和溯源困难等问题。本文提出基于图检索增强生成（GraphRAG）的工业安全隐患排查法规匹配方法，采用本地部署的 DeepSeek-R1-Distill-Qwen-32B 作为生成模型，以安全行业法规标准库和历史隐患案例库为双知识源，通过知识图谱构建隐患、设备、场所、条款与案例之间的语义关联，设计“法规库优先、案例库补充、联网检索兜底”的三级递进检索策略，输出结果按“可信”“专家检查案例”“不完全可信”三级标注并支持原文溯源。基于实际隐患排查记录的 20 条样本测试，本文方法准确命中率 70%、综合得分 47/60，均高于对照模型 DeepSeek-V3（45%、35/60）和 Doubao Reasoning（50%、39/60）。结果表明，该方法可有效提升法规匹配的准确性与可追溯性，为安全生产现场合规检查提供智能辅助方案。

关键词：大语言模型；DeepSeek；GraphRAG；工业安全；隐患排查

壹、引　言

工业安全隐患排查需要把现场发现的设备缺陷、作业环境问题和管理缺项转化为具有法规依据的检查结论。排查人员在记录隐患现象后，还需确定适用的法规标准、定位具体条款并提出整改建议。冶金企业生产系统复杂，隐患涉及电气、消防、起重运输、有限空间、机械防护和工艺安全等多个专业，法规依据分散在法律法规、国家标准、行业标准和企业既有检查资料中。标准修订替代、同类条款交叉以及现场描述不规范，进一步增加了法规匹配难度。

人工检索能够依靠专业经验判断隐患与条款的适用关系，但面对数量较多且持续更新的标准资料时，检索效率和结果一致性容易受到个人知识范围影响。通用搜索可以返回包含相似词语的文档，却难以稳定识别设备、场所、风险因素和法规条款之间的关联。大语言模型具备较强的文本理解与生成能力，已经用于安全风险文本分析和工业职业安全研究（杨艺等，2025；Huber et al.，2025），但模型参数中保存的知识难以及时更新，生成结果还可能出现条款编号、标准名称或原文内容不准确等问题。

检索增强生成（retrieval-augmented generation，RAG）通过从外部知识库检索相关资料，为大语言模型提供可更新的上下文和来源信息（Lewis et al.，2020；Gao et al.，2023）。在法规匹配任务中，单纯依赖文本相似度仍可能忽

略隐患对象间的多跳关系。例如，“配电室窗户未设置防小动物网罩”同时涉及场所、电气设备、外界开口、防护设施和相关设计标准，仅依靠局部关键词可能返回内容相近但适用对象不同的条款。图检索增强生成（graph retrieval-augmented generation，GraphRAG）利用实体和关系组织分散信息，可结合局部实体关联与更大范围的知识背景形成检索上下文（Edge et al.，2024）。已有研究已将 GraphRAG 用于知识学习、设备故障维保和科技文献组织，并显示出多源信息关联与知识推理方面的应用潜力（王晓燕等，2025；何焱等，2026；马玮璐等，2026）。

现有研究主要关注知识问答、故障诊断和文档摘要，面向工业安全现场隐患描述的法规条款匹配仍需解决三个问题：一是隐患短文本与法规正式表述之间存在语义差异；二是法规标准库与历史案例库的来源性质不同，需要明确检索顺序；三是模型生成的条款需要保留来源、版本和原文位置，便于排查人员复核。为此，本文构建基于 GraphRAG 的工业安全隐患排查法规匹配方法，以法规标准和历史隐患案例为双知识源，建立隐患对象与条款之间的语义关系，采用三级递进检索和来源分级输出，并在隐患排查辅助系统中实现法规匹配与原文溯源功能，通过 20 条实际隐患记录验证方法效果。

贰、GraphRAG 法规匹配方法及应用实现

一、法规匹配任务与总体框架

法规匹配任务的输入为排查人员记录的隐患描述，输出包括适用的法规标准名称、条款编号、条款原文、来源类别和整改建议。系统首先识别描述中的设备、场所、缺失设施、异常状态和风险因素，再检索与这些实体相关的法规条款和历史案例。检索结果经过来源与版本核验后，由本地部署的 DeepSeek-R1-Distill-Qwen-32B（以下简称 DeepSeek-R1-32B）（DeepSeek-AI et al.，2025）综合生成结构化结果。

本文以 GraphRAG 作为知识组织与检索框架，将隐患、设备、场所、风险因素、法规标准、具体条款、历史案例和整改措施表示为不同类型的实体，并通过“发生于”“涉及设备”“对应风险”“适用条款”“引用标准”和“采用措施”等关系连接。图谱关系使检索能够从现场描述中的局部实体出发，沿设备、场所和风险语义扩展候选条款，同时保留条款所属标准及其来源。GraphRAG 工业安全法规匹配框架如图 1 所示。

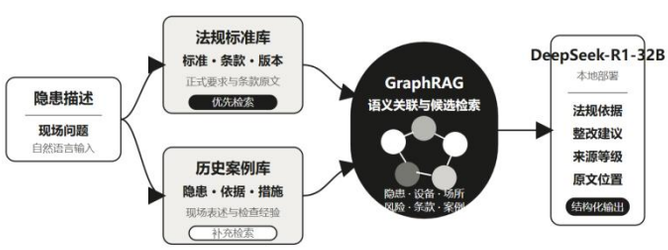


图 1　GraphRAG 工业安全法规匹配框架

法规资料入库时保留标准名称、编号、层级标题、条款编号、正文和版本状态。文本按照章节层级和完整语义单元组织，避免将适用条件与具体要求分离。历史隐患案例则保留原始隐患描述、经确认的法规依据、整改建议及项目类型。两类知识在图谱中通过设备、场所和风险概念建立关联，使同一隐患能够同时获得正式条款和既有检查经验。

二、双知识源与三级递进检索

法规标准库和历史隐患案例库承担不同功能。法规标准库保存正式发布的法律法规、国家标准和行业标准，是法规匹配的首选知识源；历史案例库保存既有安全检查中的隐患描述、法规引用和整改措施，用于补充现场表述、设备俗称和行业经验。知识图谱增强的检索已被用于合规文档分析，表明实体关系有助于将用户问题与规范要求建立可解释联系（Jovanovski et al.，2026）。

系统按照“法规库优先、案例库补充、联网检索兜底”的顺序执行检索。第一层根据隐患实体和关系从法规标准库召回候选条款，综合设备对象、场所、风险因素、条款适用范围和语义相关性排序。若法规库未形成充分匹配，则在第二层检索历史案例，利用相似隐患及其既有依据补充候选。前两层仍缺少适用内容时，第三层再进行外部检索，为标准补充和人工复核提供线索。递进顺序保证正式法规来源优先进入生成上下文，并防止历史案例中重复、简写或过时的条款覆盖法规库原文。

候选内容进入大语言模型前进行标准名称、条款编号和版本状态检查。若法规库与案例库返回同一条款，以法规库保存的正式文本为准；案例内容用于补充现场表达和整改经验。联网检索结果记录检索来源和访问位置，在未进入受控法规库前不提升其来源等级。DeepSeek 根据隐患描述、实体关系、候选条款和来源元数据生成法规匹配结果，并将法规依据与整改建议分别对应到具体来源。

三、来源分级、原文溯源与应用实现

为便于使用者判断结果依据，系统设置“可信”“专家检查案例”和“不完全可信”三级来源标注。“可信”表示内容直接来自法规标准库，且可定位到标准名称、版本和具体条款；“专家检查案例”表示内容来自既有隐患排查案例，可作为同类场景的实践参照；“不完全可信”表示内容主要来自外部检索或模型补充，需要依据给出的来源线索进一步核验。分级标注反映法规依据的来源状态，隐患严重程度另由安全专业判断。

每条输出保留来源类型、标准编号、条款位置及对应文本。法规依据与整改建议采用关联标识连接，标准版本检查重点识别废止、替代和名称变更。大语言模型生成结果中常见的事实偏差和表述性幻觉，使来源核验成为安全专业应用的重要环节（Huang et al.，2024）。

上述方法在隐患排查辅助系统中完成应用实现。系统接收隐患描述后，后台依次执行实体解析、GraphRAG 检索、候选核验和本地模型生成，并以结构化形式输出法规依据、来源等级和整改建议。法规原文定位与回溯功能依据输出携带的来源标识关联法规库条款或历史案例，使方法形成的证据链能够用于结果复核。系统实现承载方法流程与结果呈现，并保持后台法规匹配逻辑和证据关系一致。其处理过程如图 2 所示。

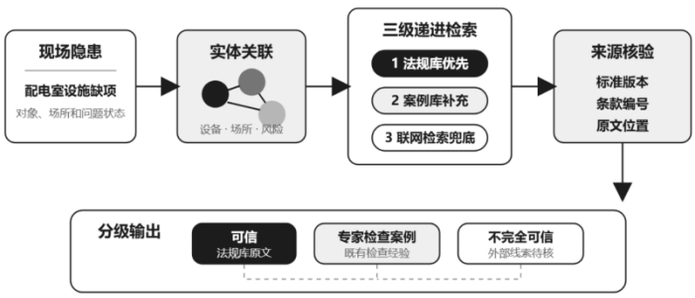


图 2　代表性隐患的法规匹配证据链

叁、代表性案例验证

一、案例与评价方法

案例来自既有冶金企业安全检查记录。选取 20 条具有明确隐患描述和参考法规依据的有效记录，内容覆盖电气设施、高处作业、起重设备、机械防护和燃气管道等常见问题。测试统一使用经过明确化处理的隐患描述。对照组直接使用 DeepSeek-V3 在线服务和豆包深度思考模式（Doubao Reasoning），均未接入本文法规知识库及 GraphRAG 检索链路；本文方法采用本地部署的 DeepSeek-R1-32B，并接入法规标准库、历史隐患案例库和 GraphRAG 检索链路。

依据返回法规与参考依据的符合程度，将结果分为准确命中、部分命中和未命中。准确命中要求法规标准及关键条款与隐患对象和整改要求相符；部分命中表示返回内容与隐患相关，但条款适用范围、完整性或精确程度仍有不足；未命中包括法规依据与隐患无关、关键条款错误或未形成有效匹配。三类结果分别赋 3、1 和 0 分，综合得分用于反映准确命中与部分命中的总体表现，准确命中率为准确命中数量占 20 条案例的比例。

二、法规匹配结果

三种方法的法规匹配结果见表 1。DeepSeek-V3 准确命中 9 条、部分命中 8 条、未命中 3 条，综合得分 35 分，准确命中率 45%；Doubao Reasoning 准确命中 10 条、部分命中 9 条、未命中 1 条，综合得分 39 分，准确命中率 50%；本文方法准确命中 14 条、部分命中 5 条、未命中 1 条，综合得分 47 分，准确命中率 70%。

表 1　三种方法的法规匹配结果

方法	准确命中/条	部分命中/条	未命中/条	综合得分	准确命中率/%
DeepSeek-V3	9	8	3	35/60	45
Doubao Reasoning	10	9	1	39/60	50
本文方法	14	5	1	47/60	70

本文方法的准确命中率较 DeepSeek-V3 和 Doubao Reasoning 分别提高 25 和 20 个百分点，综合得分分别增加 12 分和 8 分。三种方法都能识别部分常见安全要求，差异主要体现在能否将现场描述对应到适用对象一致、条款位置明确的法规依据。通用模型有时返回主题相关但适用场景不同的条款，因而较多结果被归为部分命中；本文方法利用设备、场所和风险实体之间的关系缩小候选范围，并通过法规库优先策略补充正式条款原文，使部分相关结果进一步转化为准确匹配。

三、溯源结果与补充案例复核

补充案例复核用于观察来源分级和原文溯源在实际使用中的表现，不与表 1 合并计算准确率。复核发现，法规匹配错误主要集中在四类情况：引用已被替代的旧版标准；条款编号存在但返回内容并非对应原文；案例库中的简写内容覆盖法规库完整条款；外部检索返回主题相关但适用对象不同的依据。这些问题均可能在文字表面保持较高相关性，因此需要结合标准版本、条款位置和知识源类别判断。

以有限空间辨识类隐患为例，历史案例能够提供“辨识、建立台账、设置警示标志”等接近现场语言的描述，但部分案例仍引用旧版管理规定。系统先利用案例关系定位相关要求，再以法规标准库的版本状态和正式条款进行校正，最终保留现行依据及原文位置。对于配电室应急照明类隐患，补充复核中曾出现标

准名称正确而条款编号与原文不一致的候选，来源核验将该内容降级，并保留需要进一步核对的检索线索。上述过程使“检索到相关内容”和“形成可引用依据”成为两个连续但有区别的环节。

来源分级还能反映不同知识的使用位置。法规标准库提供正式要求和条款原文，历史案例补充设备称谓、现场情境与整改经验，联网检索用于发现库外候选。三类来源共同进入 GraphRAG 关联网络，但在最终输出中保留各自等级和定位信息。在工业过程安全场景中，RAG 能够帮助基础模型调用专业规范和事故知识，为安全分析提供可更新的知识入口（Yang et al.，2026）。

案例结果表明，GraphRAG 的作用不仅体现在召回更多文本，还体现在组织隐患对象、法规要求和历史经验之间的关系。通过法规库优先、案例库补充和联网检索兜底，系统能够在保持正式来源优先级的同时利用案例语义扩展检索范围；三级来源标注和原文溯源则把最终结果与具体知识来源连接起来，为隐患记录、法规依据和整改建议之间的连续核查提供支持。

肆、结　语

本文面向工业安全隐患排查中的法规检索需求，构建了基于 DeepSeek 和 GraphRAG 的法规匹配方法，并在隐患排查辅助系统中完成应用实现。该方法以法规标准库和历史隐患案例库为双知识源，通过图谱关系组织隐患、设备、场所、风险、条款和案例信息，采用“法规库优先、案例库补充、联网检索兜底”的三级递进检索策略，并通过来源分级、版本检查和原文定位形成可追溯的法规匹配结果。

20 条实际隐患记录的案例验证中，本文方法准确命中 14 条，准确命中率为 70%，综合得分为 47/60，均高于两种对照模型。补充案例复核进一步显示，标准版本、条款原文和知识源优先级是影响法规匹配质量的重要因素。所构建方法能够将正式法规依据、既有检查经验和外部检索线索分层组织，为冶金企业现场隐患排查中的法规查询和整改依据编制提供智能辅助。后续可结合标准动态更新机制和更多专业隐患类型，扩展法规知识覆盖范围及跨场景匹配能力。

参考文献

［1］ 杨艺、王东麟、陈振颂（2025），基于大语言模型智能体的汽车安全风险判别：以投诉文本为驱动，《中国安全科学学报》，第 35 卷，第 12 期。

［2］ Huber, J., Anzengruber-Tanase, B., Schobesberger, M., et al.（2025）, Evaluating user safety aspects of AI-based systems in industrial occupational safety：a critical review of research literature, International Journal of Environmental Research and Public Health, Vol. 22, No. 5, pp. 705.

［3］ Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., et al.（2020）, Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks, Advances in Neural Information Processing Systems, Vol. 33, pp. 9459-9474.

［4］ Gao, Y., Xiong, Y., Gao, X., et al.（2023）, Retrieval-augmented generation for large language models：a survey, arXiv：2312. 10997.

［5］ Edge, D., Trinh, H., Cheng, N., et al.（2024）, From local to global：a GraphRAG approach to query-focused summarization, arXiv：2404. 16130.

［6］ 王晓燕、黄岚、王岩（2025），基于 GraphRAG 的大数据知识学习系统，《吉林大学学报（理学版）》，第 63 卷，第 6 期，1629-1636 页。

［7］ 何焱、雷思凡、郭梁柱等（2026），基于 LLM 和 GraphRAG 的柴油发电机故障维保知识推理方法，《重庆科技大学学报（自然科学版）》，第 28 卷，第 1 期，90-99 页。

［8］ 马玮璐、孙坦、赵瑞雪等（2026），基于大语言模

型和 GraphRAG 的科技文献图谱式摘要生成研究,《数据分析与知识发现》, 第 10 卷, 第 3 期, 113–128 页。

[9] Jovanovski, D., Stojcheva, M., Dodevska, M., et al. (2026), An empirical study of knowledge graph-enhanced RAG for information security compliance, Information, Vol. 17, No. 4, pp. 389.

[10] DeepSeek-AI, Guo, D., Yang, D., et al. (2025), DeepSeek-R1: Incentivizing reasoning capability in LLMs via reinforcement learning, arXiv: 2501. 12948.

[11] Huang, L., Yu, W., Ma, W., et al. (2024), A survey on hallucination in large language models: principles, taxonomy, challenges, and open questions, ACM Transactions on Information Systems, DOI: 10. 1145/3703155.

[12] Yang, H., Kareck, T. L., Wang, Q. (2026), New era of AI in chemical process safety: foundation models, ACS Chemical Health & Safety, Vol. 33, pp. 171–179.

数智化技术在冶金安全风险管控中的应用

邬姗姗，张　蒙，牛恩阳，李克梅
中钢集团武汉安全环保研究院　武汉　430081

摘　要：冶金工业作为国民经济的基础性产业，安全风险管控难度极大。随着物联网、大数据、人工智能技术发展，冶金安全风险管控正往数智化方向更新迭代。本文阐明了冶金安全风险管控面临的痛点，分析了依托数智化技术开发创新出的钢铁企业人员安全风险画像、钢铁企业安全生产监测预警系统、冶金企业智能风险管控平台的具体应用，针对当前应用中的瓶颈问题提出了未来发展对策。

关键词：数智化；安全风险管控；冶金安全

1　引　言

冶金行业作为国民经济发展中重要的基础原材料产业，具有投资拉动作用大、吸纳就业能力强、产业关联度高的特点，是实现制造强国的重要支撑。但其生产过程具有“高温、高压、易燃、易爆、有毒、有害”等典型特征，涉及高温熔融金属、煤气、粉尘等大量危险源，作业环境复杂多变，恶性事故时有发生，安全生产形势严峻。据统计，冶金行业重特大事故主要集中在高温熔融金属（如钢水、铁水）、煤气系统、起重机械及有限空间等环节[1]。面对日益严峻的安全生产形势，传统以人工为主的安全管理模式逐渐陷入“风险看不见、隐患管不全、响应不及时”的困境。随着智能化技术发展，以物联网、大数据、人工智能为代表的数智化技术为冶金安全风险管控提供了全新的解决方案。在此背景下，系统研究数智化技术在冶金安全风险管控中的应用路径与实践成效，对于推动行业安全管理模式转型升级、提升本质安全水平具有重要意义[2]。

2　冶金安全风险的特征与传统管控局限

2.1　冶金安全风险的典型特征

见表 1：

表 1　冶金安全风险的典型特征

特征	具体表现
多灾种耦合	火灾、爆炸、中毒、窒息、机械伤害等多类型风险并存且相互诱发
能量物质密集	高温熔融金属（最高达 1600℃以上）、煤气（CO、H_2等）等危险源能量巨大
时空动态性强	风险状态随生产工艺、设备状态、人员行为动态变化
环境复杂恶劣	高温、粉尘、强电磁干扰、空间受限等，传统监测手段易失效

2.2　传统安全管控的局限性

（1）感知滞后：依赖人工巡检和定期检测，难以实现实时监测。

（2）数据孤岛：各系统（如消防、安防、生产控制）相互独立，缺乏融合分析。

（3）决策依赖经验：缺乏数据支撑的定量风险评估与科学决策。

（4）响应被动：多为事后处置，缺乏事前预警和主动防控能力。

3 数智化冶金安全风险管控的研究进展

3.1 钢铁企业人员安全风险画像

不安全行为是事故发生的直接诱因，也是人员安全风险画像的核心关注对象。不安全行为的识别与量化在传统风险管控中难以统计和实现，而数智化的人员画像技术，涵盖人员安全意识、安全行为、健康状况、履职情况、事故记录等方面对人员安全的影响，通过多维度评估人员各项状况获取相关数据，经过统计计算，实现可有效评估人员安全状态。钢铁企业人员安全风险画像，基于知识–态度–行为理论、三元态度模型等拆解风险，注入培训记录、生理体征监测、事故记录等多源因素，设计权重分配及动态计算公式，生成四色风险等级，驱动分级管控。该模型为钢铁行业提供从“群体泛化”到“个体精准”的风险治理新路径[3]。具体见图 1。

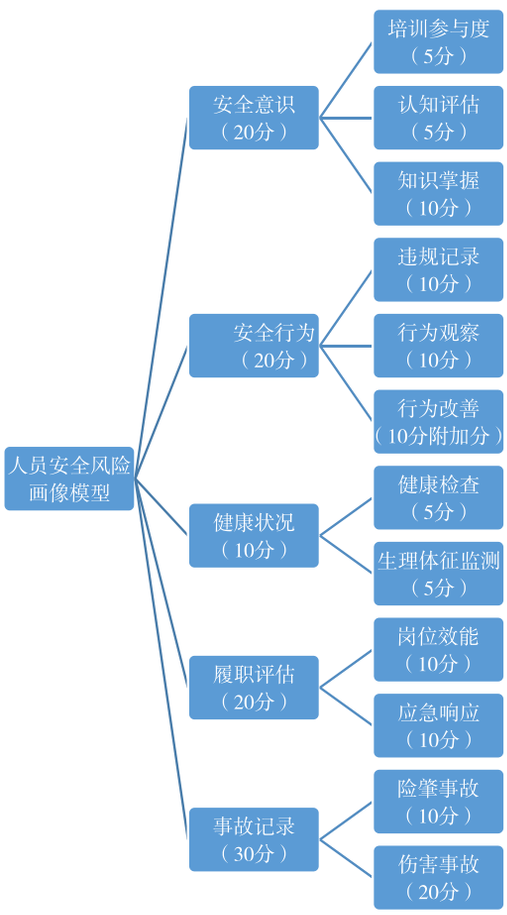


图 1　钢铁企业人员安全风险画像模型

3.2 钢铁企业安全生产监测预警系统

风险监测预警模块是系统的核心。该模块以“动态感知、智能预警、闭环处置”为核心，构建了覆盖全生产流程的风险防控体系，引入物联网、大数据和人工智能等前沿技术，实现对生产工艺重点设备设施全过程温度、压力、煤气等关键因素的实时、动态监测，并建立起多级阈值预警规则，设置低报、高报等四级预警，做到隐患及时发现、及时处理。系统不仅能及时发现隐患，还能通过重大风险排查任务派发、排查记录生成、登记隐患台账、完成隐患整改等安全数据实时跟踪工作闭环，从海量信息里揪出潜在风险。安全生产监测预警系统有三个级。第一级，通过在生产现场部署各类传感器实时采集温度、压力、气体浓度、粉尘浓度等数据。第二级，物联网技术将数据传输至数据处理中心[4-6]。第三级，运用大数据分析、人工智能等算法对数据进行深度挖掘与分析，建立安全风险评估模型[7-10]。见图 2。

图 2　钢铁企业安全生产监测预警系统

3.3 冶金企业智能风险管控平台

结合安全生产实际需求，建立一体化管控平台，在此平台上提供统一的用户管理、权限管理、数据采集、数据处理、数据储存以及数

据应用等功能[11]。整合钢铁企业各系统资源，实现“人、机、料、法、环”的动态安全管控，为钢铁企业安全生产保驾护航。具体功能架构包括：总体目标（安全生产目标管理、安全实施计划管理、计划跟踪管理）、职业危害因素检测及协作单位管理（职业危害因素检测、协作单位问题考核、协作单位履职评价、协作单位 5 类人员履职评价）、重大危险源的实时监控预警（数据采集与监控、监测信息传输、监测预警记录）、风险管控和隐患排查的双重机制（风险辨识评估、风险四色图、隐患排查治理、安全检查、风险变更管理、安全改善提案、煤气报警、消防报警）、生产设备设施安全管理（安全评价、设备检测文件、危险作业审批、检修施工方案、高风险作业日报）、智慧地图管理、智慧交通管理。功能架构如图 3.

将此安全风险管控七大模块嵌入整合进办公自动化（OA）系统中，有以下优势：

（1）安全风险管控更便捷：各类设备、人员、作业情况即时可查，报警预警可即时发送到手机提醒。

（2）数据统计更精准：通过各类传感器，实时采集数据，实现动态风险监测，提供决策支持和应急响应。

（3）危险作业审批落到实处：审批时不仅更及时简便，而且能查看实时数据及动态趋势，实现动态审批；如在动火作业审批时可查看作业区域周边可燃气体液体和易燃作业。

4 挑战与应对策略

4.1 技术层面

4.1.1 对于复杂环境下的感知可靠性不足——高温、粉尘、强电磁干扰导致传感器漂移、信号衰减，影响监测准确性等问题，建议加大政策支持，鼓励创新及技术迭代升级。

4.1.2 对于数智化系统的部署成本较高，中小型冶金企业往往难以承受的问题，建议先在大型国有企业部署，在此经验积累中，形成固定统一模块，逐步推开扩大范围，引入多家竞争，再以政府化的“带量采购”谈判，降低价格。

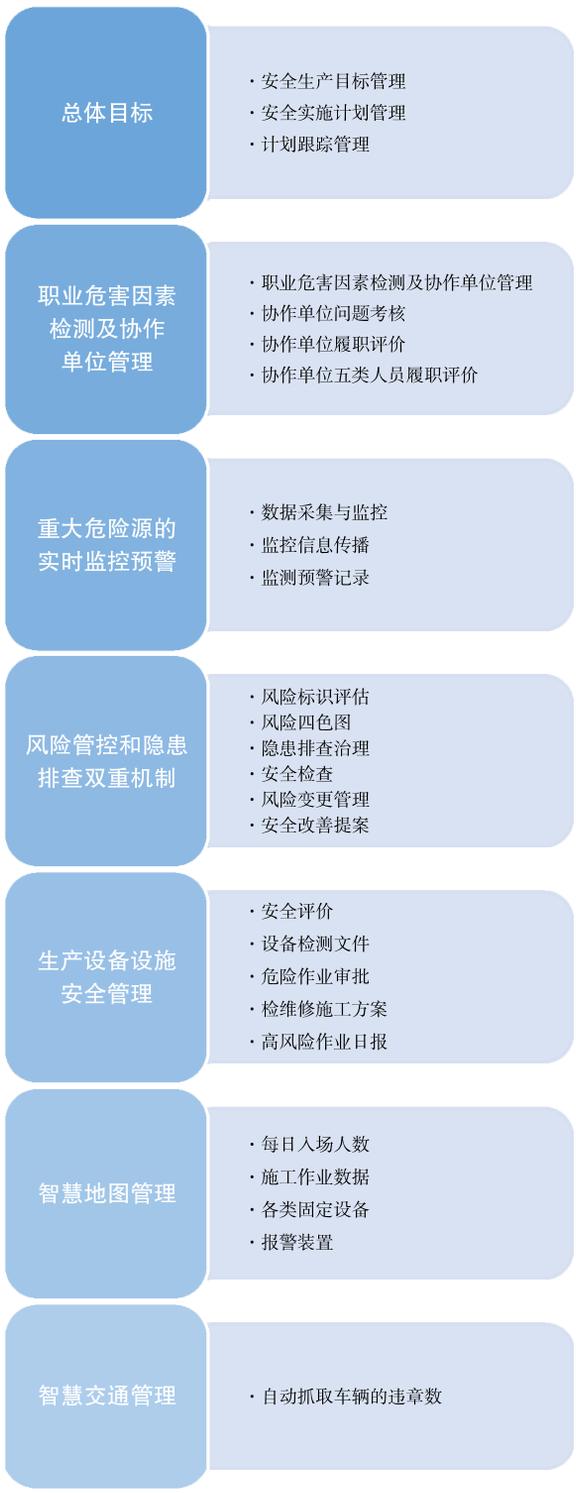


图 3 平台功能架构

4.2 管理层面

4.2.1 对于组织与制度滞后问题，建议加快制定完善冶金行业安全数智化相关技术标准与规范，辅以减税等优惠政策促进数智化升级。

4.2.2 对于人才储备不足，既懂冶金工艺又懂数字技术的复合型人才稀缺的问题，建议加大复合型人才培养力度，推动企业与高校、科研院所合作开展定向培养。

4.3 数据层面

4.3.1 对于数据积累和质量不足问题，建议推动数据治理体系建设，建立统一的数据采集标准和质量管控机制。

4.3.2 对于多源异构数据融合不充分的问题，加大研发投入，做不同场景下数据相关性研究，通过数字孪生技术，打造更多元的动态模型。

参考文献：

［1］ 王彪, 徐厚友, 刘见, 等. 金属冶炼企业重大风险辨识评估与分级管控［M］. 化学工业出版社：202210：232.

［2］ 王先华. 智慧安全产业+冶金安全风险管控［J］. 劳动保护, 2023（3）：13–16.

［3］ 李辉, 陈红军, 张天胜, 等. 基于多源数据融合的钢铁企业人员安全风险画像研究［C］//中国金属学会, 中冶京诚工程技术有限公司. 第十五届中国钢铁年会论文集—29. 冶金安全，2025：45–50. DOI:10. 26914/c. cnkihy. 2025. 111640.

［4］ 张红荣, 张峰. 物联网数据架构设计：理论框架与实践应用研究［J］. 物联网技术. 2025, 11：111–118. 王秋芳, 范惠洁, 张冬梅.

［5］ 张震. 基于物联网的重大危险源远程监测方法［J］. 上海电机学院学报, 2022, 25（01）：52–56.

［6］ 张震. 基于物联网的重大危险源远程监测方法［J］. 上海电机学院学报, 2022, 25（01）：52–56.

［7］ 易平涛. 智慧冶金赋能产业数字化转型升级［J］. 冶金经济与管理, 2022,（06）：1.

［8］ 关注冶金行业智慧安全发展［J］. 劳动保护, 2023,（03）：8–9.

［9］ 孙护义. 人工智能在冶金自动化中的应用研究［J］. 信息与电脑, 2025, 37（10）：19–21.

［10］ 吕慧超. 人工智能在工业自动化中的应用［J］. 信息记录材料, 2023, 24（8）：83–85.

［11］ 朱涛, 张涛, 张非凡, 等. 数据驱动的钢铁企业安全生产工业互联网平台应用研究［J］. 冶金经济与管理, 2025,（04）：42–45.

垂直领域 AI Agent 在职业安全健康教学中的构建逻辑与效能验证

——基于《防火与防爆技术》课程的实证研究

姚　森

江苏省南京工程高等职业学校应急管理系，江苏　南京　211135

摘　　要：职业安全健康教育面临高危场景难以复现、行业标准繁杂等困境。本研究以《防火与防爆技术》课程为例，探索垂直领域 AI Agent 在职业安全健康教学中的构建逻辑与教学效用。通过对比课程专用 AI Agent 与通用大语言模型，采集 24 名学生和 5 名教师的评价数据，对基于“认知降维—过程显性—反馈即时”架构的智能体开展实证研究。结果表明：垂直领域 AI Agent 综合评分达 4.42—4.48 分，较通用模型提升超过 40%，效应量达 1.3 以上；在知识准确性、教学适配性、交互体验等维度优势显著。质性分析揭示，专用智能体的结构化引导可降低学生提问焦虑，教师可借助智能体实现教学经验的数字化沉淀。研究表明，垂直领域 AI Agent 能够回应职业安全健康教育中标准理解困难、高危场景缺失等现实问题，为职业安全健康教育数字化转型提供了可行路径。

关 键 词：人工智能体；职业安全健康；安全职业教育；垂直领域模型；教学效能

基金项目：江苏职业教育研究重点课题“GAI 技术嵌入高职安全类专业教学的实践研究”（XHZDB2025021）；应急管理理论政策及产教融合科教融汇重点课题“安全类专业教学中生成式人工智能的应用研究”（AHKJRH2025009）

1　引　言

职业安全健康教育承担着为高危行业输送一线安全管理与技术人才的任务。安全类课程的教学对象，是未来进入化工、建筑、消防等高风险岗位的学生，其知识结构的可靠性直接关系生产现场的人身安全。这类课程的教学长期受到三重约束。一是场景约束：液化气罐泄漏、粉尘爆炸等高危工况无法在课堂真实复现，学生对事故风险的理解容易停留在文字层面。二是标准约束：防火防爆知识高度依赖《建筑设计防火规范》（GB 50016—2014，2018 年版）等强制性条文[1]，条文繁杂且持续修订，传统教材难以同步跟进。三是认知约束：职校学生普遍对抽象理论接受度较低、对动手实践兴趣较高，纯讲授式教学的效果有限。已有研究也指出，安全实训设备投入大、高危操作风险高，学生实操素养的形成难以完全依托真实场景训练[2]。

教育数字化转型为破解上述约束提供了契机[3]。2025 年 4 月，教育部等九部门印发《关于加快推进教育数字化的意见》，提出促进人工智能与教育教学深度融合[4]。在职业教育领域，以大语言模型（Large Language Model，LLM）为认知核心的智能体被视为人工智能赋能职教的新形态[5]。但通用 LLM 直接进入专业课

堂也暴露出明显问题：模型输出的技术方案可能存在术语规范性缺陷，内容泛化、脱离学科语境[6]。陈向东等将此类现象概括为大模型教育应用中的“知识冲突”[7]，王冬青等则称之为“负能效应”——技术本欲赋能教学，却因输出脱离学科语境而加剧师生的认知负荷[8]。对职业安全健康教育而言，标准条文引用的准确性是教学底线，通用模型的泛化输出在这类场景中风险更高。教育智能体的应用风险及其规制已引起学界关注[9]，联合国教科文组织亦建议以受控、审慎的方式将生成式人工智能引入教学[10]。

基于上述背景，本研究以《防火与防爆技术》课程为切入点，提出“认知降维—过程显性—反馈即时”三层次构建框架并开发课程专用 AI Agent，通过与通用 LLM 的对照实证回答两个问题：面向安全类课程的垂直领域 AI Agent 应遵循怎样的构建逻辑？其教学辅助效能相较于通用 LLM 是否显著提升，又体现在哪些维度？

2 垂直领域 AI Agent 的构建逻辑

2.1 从大语言模型到课程智能体

LLM 以 Transformer 为核心架构[11]，通过对海量文本的训练获得语言理解与生成能力，其本质是对下一词元概率分布的预测。这一类模型长于开放式对话，但被动响应输入，既不管理任务过程，也无法保证输出与特定领域的规则体系一致。智能体（Agent）的概念源于分布式人工智能研究，Wooldridge 和 Jennings 将其界定为具有自治性、反应性、主动性与社会性的计算实体[12]。在 LLM 的驱动下，智能体获得了自然语言层面的推理与规划能力，可以感知环境、调用工具并执行动作序列[13]。教育研究者相继提出了教学智能体、教育大模型智能体的构建框架[14-15]，多智能体协作重塑学习技术系统的趋势也已显现[16]。不过，已有框架多面向一般教育场景；安全类职业课程的知识高度规则化、错误代价不可承受，面向这类课程的垂直构建逻辑仍缺乏系统讨论，这正是本研究的出发点。

2.2 “认知降维—过程显性—反馈即时”三层次框架

安全类课程的教学难点，归结起来是“规范难懂、过程难见、后果难感”。据此，本研究提出三层次构建框架（图 1），三个层次分别对应一种教学难点的化解路径，并有各自的学习科学依据与技术支撑。

第一层次是认知降维。认知负荷理论指出，人的工作记忆容量有限，复杂材料的内在负荷过高会直接挤占学习资源[17]。防火规范类条文对初学者正是典型的高负荷材料。认知降维的做法是将规范条文与事故案例结构化，拆解为可逐步推理的思维链。思维链提示已被证明能显著提升大模型在复杂推理任务上的表现[18]，这一机制迁移到教学场景同样成立：面对“某车间存放乙醇约 200L”的情境，智能体把防火间距判断拆成四步——识别物质危险特性（闪点 12.8℃、爆炸极限 3.3%—19%），匹配标准条款，计算防火间距要求，展示违规存放的热辐射影响范围。技术上，这一层次依托课程知识库（规范条文、事故调查报告、课程讲义）与规则引擎（将强制性条文转化为决策逻辑树），从源头约束输出不与行业规范冲突。

第二层次是过程显性。行业专家辨识风险、作出处置决策的过程属于隐性知识，传统课堂往往只给出结论，学生看不到“怎么想”。智能体将推理路径以思维导图、分步问答等形式呈现，使从风险辨识到决策处置的全过程可见。多模态大模型的教育应用研究表明，多通道表征有助于抽象知识的具象化[19]，过程显性正是这一原理在安全课程中的落实。

第三层次是反馈即时。安全教育的特殊性在于，真实世界里的错误代价是生命，不允许试错学习。智能体以多模态方式提供即时反

馈：学生上传实训场所照片，系统标注出灭火器摆放违规区域并推送《建筑灭火器配置设计规范》的相关条款；学生在虚拟仿真中错误地用水基灭火剂扑救电气火灾，系统反馈触电事故的三维动画。错误代价以模拟方式呈现，既保留了试错的学习价值，又消除了真实风险。

三个层次构成递进关系：结构化知识是前提，过程显性是核心，即时反馈是保障。反馈环节沉淀的典型案例又回流至知识库，驱动智能体迭代优化。这一框架顺应职校学生从具体到抽象的认知规律，也与开发层面的知识库建设、插件调用、交互设计存在明确的技术对应关系。

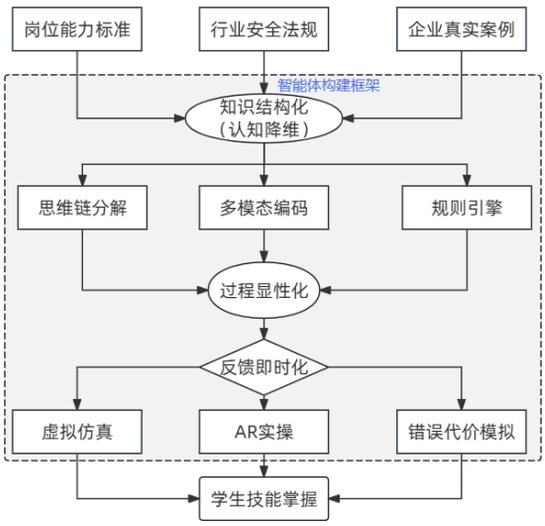


图 1　“认知降维—过程显性—反馈即时”三层次构建框架

2.3　课程 AI Agent 的开发与功能实现

课程智能体基于扣子（Coze）平台开发，教师无需编程基础，通过可视化界面即可完成知识库更新、插件配置与对话流程设计。开发内容主要包括三方面。其一，建设课程知识库，导入《建筑设计防火规范》（GB 50016—2014，2018 年版）等标准条文、典型事故调查报告与课程讲义，并可持续纳入地方性监管文件。其二，配置多模态插件，支持学生上传实训场图片、视频，由智能体识别并标注隐患点，例如发现灭火器放置位置不符合规范时，在图片上标注违规区域并推送对应条款。其三，设计引导式对话流程。智能体模拟行业专业人士的思维模式，不直接给出答案模板，而是通过渐进式提问引发自主思考：在应急处置方案设计任务中，依次追问“该场景可能出现的火灾类型是什么”“依据物质安全数据表应选择哪种灭火剂、为什么”“通风系统关闭是否影响灭火效果”，帮助学生建立系统安全的分析决策链条。教育智能体赋能学科教学的已有实践[20–21]表明，这类低门槛开发方式使“教师即开发者”成为可行路径，教研室可依据教学反馈随时增补案例、调整话术。

3　实证研究设计

3.1　研究对象与实验过程

研究以笔者所在学校 23 级消防救援技术班 2025 年春季学期《防火与防爆技术》课程为对象，选取 24 名学生与 5 名具有该课程授课经验的非本学期授课教师组成评估小组。实验周期 8 周，覆盖“燃烧与爆炸基本原理”“防火防爆技术措施”“危险化学品的防火防爆”“典型场所的防火防爆”四个教学模块。参与者在周期内同时使用通用大语言模型“豆包”（2025 年 1 月版本）与基于扣子平台开发的课程专用 AI Agent，完成相同的学习任务并分别作出评价。

3.2　评估工具与数据分析

研究采用量化评估与质性访谈相结合的混合方法。量化部分采用 Likert 5 点量表，从知识准确性、教学适配性、交互体验、教育价值、易用性五个维度评分，各维度的具体指标与权重如表 1 所示，综合评分为按权重加权的总分。参与者均先后使用两种工具，构成自身对照；统计分析采用配对样本 t 检验，并报告 Cohen's d 效应量。质性部分对参与者开展半结构化访谈，围绕结构化学习引导、教学知识迭代、认知负荷控制三个主题进行编码归纳。

表 1　智能体评估指标体系及权重

评估维度	具体指标	学生权重	教师权重
知识准确性	行业标准引用正确率	25%	30%
教学适配性	与职教认知特点的匹配度	20%	25%
交互体验	多模态反馈的直观性	20%	15%
教育价值	对操作规范内化的促进效果	15%	20%
易用性	界面友好程度和使用难度	20%	10%

4　结果与分析

4.1　量化评估结果

学生组与教师组的评估结果分别见表 2、表 3。

表 2　学生组评估结果（N=24）

维度	课程智能体（均值 ± 标准差）	豆包（均值 ± 标准差）	t 检验（p 值）	Cohen's d
知识准确性	4.52 ± 0.61	3.23 ± 0.89	0.001**	1.67
教学适配性	4.33 ± 0.72	2.87 ± 1.05	0.003**	1.58
交互体验	4.68 ± 0.55	3.45 ± 0.78	0.002**	1.83
教育价值	4.17 ± 0.83	3.02 ± 0.91	0.008**	1.32
易用性	4.25 ± 0.64	4.08 ± 0.71	0.312	0.25
总分	4.42	3.12	—	—

注：*表示 p<0.05，**表示 p<0.01；总分为按表 1 权重计算的综合评分。表 3 同。

表 3　教师组评估结果（N=5）

维度	课程智能体（均值 ± 标准差）	豆包（均值 ± 标准差）	t 检验（p 值）	Cohen's d
知识准确性	4.80 ± 0.45	3.40 ± 0.89	0.004**	1.92
教学适配性	4.60 ± 0.55	2.60 ± 1.14	0.006**	2.17
交互体验	4.20 ± 0.84	3.00 ± 0.71	0.018*	1.54
教育价值	4.40 ± 0.55	2.80 ± 0.84	0.009**	2.22
易用性	3.80 ± 0.84	3.60 ± 0.55	0.412	0.28
总分	4.48	2.91	—	—

注：*表示 p<0.05，**表示 p<0.01。

总体效能上，学生组对课程智能体的综合评分为 4.42 分，较豆包（3.12 分）提升 41.7%，差异显著（p<0.01），效应量 d=1.71；教师组的差异更大，智能体得分 4.48 分，为豆包（2.91 分）的 1.54 倍（d=2.03，p<0.01）。按通行标准，d>0.8 即属大效应，两组结果均远超该阈值。

分维度看，知识准确性的差距最能说明问题：学生组 d=1.67，教师组 d=1.92。智能体引用的标准条文来自经审核的课程知识库，输出受规则引擎约束，与教学内容的匹配度明显高于通用模型。教学适配性维度，学生组评分 4.33 分，较豆包（2.87 分）高 51%，“爆炸极限—灭火剂选择—操作步骤”一类思维链式引导更贴合职校学生的认知路径。交互体验维度学生组达 4.68 分，为各维度中最高：豆包只能

提供文本建议，而智能体可对上传的实验室照片直接标注违规位置（如通风柜物品堆放过密），图文并茂的反馈明显更直观。

值得注意的是易用性维度：学生组（d=0.25，p=0.312）与教师组（d=0.28，p=0.412）均未表现出显著差异。这说明智能体的效能优势并非来自“更容易上手”，而是来自内容与引导设计的专业性；同时也提示智能体的界面与交互工程仍有改进余地。

4.2 质性研究发现

（1）结构化引导降低了学生的提问焦虑。多名学生反映，面对豆包的空白对话框“完全不知道问什么，就像面对一本没有目录的教科书”，容易直接关闭退出。课程智能体则按教学进度动态推送分层问题：学完“爆炸极限”单元后，界面依次给出基础层问题（“什么是乙醇的爆炸上限”，直接知识提取）、进阶层问题（“为什么粉尘爆炸比气体爆炸破坏力更大”，概念对比）与应用层问题（“分析该化工厂爆炸案例中的关键参数”，真实场景迁移）。即使没有想好自己的问题，学生也能顺着推送问题开展自学，注意力更容易维持。

（2）智能体支持教学知识的持续迭代。教师受访者看重其知识累积价值：本学期学生在“防爆设备选型”作业中的典型错误，经标注后可转化为下一学年的预警案例，这是纵向沉淀；教研室教师持续标注，使标准库从最初的 GB 50016 等核心规范扩展到《南京市危险化学品建设项目安全监督管理实施细则》等地方文件，这是横向扩展。教学经验由此获得数字化沉淀，形成持续优化的闭环。

（3）三阶认知适配控制了信息过载。访谈显示，通用模型的大段输出常令学生“看不下去”。智能体的做法是分阶适配：入门阶段以拟人化角色描述替代术语，辅以图片、视频等直观解释；进阶阶段将标准条款与实际案例并置对比；强化阶段依据学习记录推送个性化考核练习。一名学生提到，课堂上误选水扑救电气火灾后，智能体反馈的三维触电动画“印象很深”，此类具象反馈的警示效果是纯文字难以达到的。

5 讨 论

量化与质性结果相互印证，指向同一个判断：通用模型在专业课堂的短板不在交互形式，而在学科语境的缺失。垂直智能体把标准条文与案例嵌入推理链，等于将“知识冲突”[7]消解在构建阶段，这从机制上解释了知识准确性维度效应量最大的原因。教师组的效应量（2.03）大于学生组（1.71）也佐证了这一点——专业判断能力越强的使用者，越能识别通用模型输出中的规范性缺陷。换言之，“负能效应”[8]并非大模型技术的固有属性，而是通用模型未经领域化改造直接进入专业教学的结果；垂直构建正是对症的改造路径。

本研究存在若干局限。其一，样本规模较小（学生 24 人、教师 5 人），教师组的统计推断尤其需要谨慎看待。其二，实验限于单一课程、单一学期，结论向其他安全类课程的迁移有待验证。其三，效果证据以主观评分与访谈为主，尚未纳入学业成绩、操作考核等客观指标，也缺乏长期追踪。此外，智能体的输出仍受知识库覆盖范围限制，引用条文可能出现滞后或错配，教学中应由教师复核把关；教育智能体的风险规制[9]与“人在回路”的国际共识[10]，在安全类课程这种容错率极低的场景中更须严格落实。

对职业安全健康教育实践而言，本研究有两点启示。一是低代码平台显著降低了垂直智能体的构建门槛，一线教师完全可以主导开发，这在一定程度上缓解了“懂技术的不懂安全、懂安全的不懂技术”的现实矛盾。二是智能体的价值不在于替代讲授，而在于把行业规范的执行逻辑转化为可交互、可观察、可反馈

的学习过程，恰好回应了安全类课程“规范难懂、过程难见、后果难感”的三个老问题。

6 结 论

本研究面向职业安全健康教育的现实困境，提出“认知降维—过程显性—反馈即时”三层次构建框架，开发了《防火与防爆技术》课程专用 AI Agent，并通过对照实证检验其教学效能。结果表明，垂直领域智能体在知识准确性、教学适配性、交互体验等核心维度上显著优于通用大语言模型，综合评分提升超过 40%，效应量达 1.3 以上；结构化引导降低了学生的提问焦虑，知识迭代机制支持教学经验的数字化沉淀。垂直构建是化解通用模型“负能效应”、推动职业安全健康教育数字化转型的一条可行路径。

后续研究将从三个方向展开：将框架推广至更多安全类专业课程，检验其跨课程适用性；探索智能体与 VR/AR 虚拟仿真实训的深度融合，构建更具沉浸感的高危场景训练环境；引入学习行为数据与客观考核指标，开展长周期的追踪评估。

参考文献

［1］ 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑设计防火规范：GB 50016—2014（2018 年版）［S］. 北京：中国计划出版社, 2018.

［2］ 魏巍, 韩鸿华, 刘威. 职业安全类虚拟仿真教学资源的校企协同开发路径研究与实践［J］. 北京劳动保障职业学院学报, 2024, 18（3）：51–56.

［3］ 祝智庭, 胡姣. 教育数字化转型的实践逻辑与发展机遇［J］. 电化教育研究, 2022, 43（1）：5–15.

［4］ 教育部等九部门. 关于加快推进教育数字化的意见［EB/OL］.（2025–04–11）［2026–06–13］. https://www. gov. cn/zhengce/zhengceku/202504/content_7019045. htm.

［5］ 毕树沙, 张琳琳. 职业教育智能体：AI 赋能职业教育新图景［J］. 中国职业技术教育, 2025（20）：5–11+20.

［6］ KASNECI E, SESSLER K, KÜCHEMANN S, et al. ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education［J］. Learning and Individual Differences, 2023, 103：102274.

［7］ 陈向东, 周春红, 刘泽民, 等. 知识冲突：大语言模型教育应用的挑战与应对［J］. 中国电化教育, 2025（3）：1–10.

［8］ 王冬青, 陈自力, 邵文豪, 等. 从“负能”到“赋能”：基于 LLMs 的思维链提示设计与教研 AI 智能体构建——以课堂教学智能分析为例［J］. 中国电化教育, 2025（3）：111–117.

［9］ 宋晔, 孙红. 教育智能体应用的风险及其规制［J］. 湖南师范大学教育科学学报, 2025, 24（3）：62–70.

［10］ UNESCO. Guidance for generative AI in education and research［R］. Paris：UNESCO, 2023.

［11］ VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need［C］//Advances in Neural Information Processing Systems 30. Red Hook：Curran Associates, 2017.

［12］ WOOLDRIDGE M, JENNINGS N R. Intelligent agents：theory and practice［J］. The Knowledge Engineering Review, 1995, 10（2）：115–152.

［13］ 吴永和, 姜元昊, 陈圆圆, 等. 大语言模型支持的多智能体：技术路径、教育应用与未来展望［J］. 开放教育研究, 2024（5）：63–75.

［14］ 卢宇, 余京蕾, 陈鹏鹤. 基于大模型的教学智能体构建与应用研究［J］. 中国电化教育, 2024（7）：99–108.

［15］ 刘明, 杨闽, 吴忠明, 等. 教育大模型智能体的开发、应用现状与未来展望［J］. 现代教育技术, 2024, 34（11）：5–14.

［16］ 顾小清, 郝祥军. 悟空的毫毛：正在重塑学习技术系统的多智能体［J］. 华东师范大学学报（教育科学版）, 2025, 43（5）：16–29.

[17] SWELLER J. Cognitive load during problem solving：effects on learning [J]. Cognitive Science, 1988, 12（2）：257–285.

[18] WEI J, WANG X, SCHUURMANS D, et al. Chain-of-thought prompting elicits reasoning in large language models [C] //Advances in Neural Information Processing Systems 35. Red Hook：Curran Associates, 2022.

[19] 卢宇, 余京蕾, 陈鹏鹤, 等. 多模态大模型的教育应用研究与展望 [J]. 电化教育研究, 2023, 44（6）：38–44.

[20] 徐振国, 刘志, 党同桐, 等. 教育智能体的发展历程、应用现状与未来展望 [J]. 电化教育研究, 2021, 42（11）：20–26.

[21] 郑娅峰, 黄璟玥, 包昊罡. 教育智能体赋能科学教育：概念特征、应用价值与实施策略 [J]. 远程教育杂志, 2025, 43（3）：24–32.

AI 赋能《职业健康与安全》课程建设的研究

袁　媛，许曙青
江苏省南京工程高等职业学校，江苏　南京　211135

摘　要：职业教育数字化转型背景下，人工智能技术为课程建设提供了全新的方法论与技术支撑。本文聚焦《职业健康与安全》课程在传统教学中面临的教学资源碎片化、教学模式单一化、实践教学高风险化等现实困境，以建构主义情境学习理论、智慧教育理论和多元智能理论为指导，以超星泛雅平台为核心技术载体，构建了“资源建设—智能教学—虚拟实训—动态评价”四位一体的闭环赋能体系。推动教学结构从“师—生”二元对立向“师—机—生”三元协同范式转型。实践表明，AI 的深度嵌入显著提升了教学内容的前沿性与适配度，增强了学习沉浸感与目标达成度，为职业教育安全类课程的数字化改革提供了可复制、可推广的理论框架与实践范式。

关键词：人工智能；职业健康与安全；课程建设

引　言

新一轮科技革命和产业变革正深刻重塑职业教育的形态与格局。2022 年，教育部发布《关于深化现代职业教育体系建设改革的意见》，明确提出要“推动现代信息技术与教育教学深度融合，加快推进职业教育数字化转型”。在此政策导向下，人工智能作为引领未来的战略性技术，正在从辅助工具向教育变革的核心驱动力演进，为破解职业教育课程建设中的深层次矛盾提供了新的可能。《职业健康与安全》课程是职业教育中的重要组成部分，旨在培养学生具备安全意识、风险评估和应急处理能力。然而，该课程在传统教学模式下长期面临三重困境：其一，教学资源建设滞后于行业安全规范的快速迭代，知识更新的碎片化问题突出；其二，以教师讲授为主的单向灌输式教学难以兼顾学生的个体差异，个性化学习支持严重不足；其三，事故现场模拟、安全隐患排查等高价值实践教学环节因安全风险和场地设备限制而难以有效开展。这些困境的叠加，使得课程教学效果与行业对高素质安全人才的需求之间存在显著落差。以 AI 技术为辅助探索课程建设创新路径，在坚守育人本质中实现智慧化转型，已成为教育数字化背景下亟待回应的现实课题。

一、职业健康与安全课程教学的现实困境

（一）教学资源碎片化，知识更新滞后

《职业健康与安全》课程内容涉及安全法律法规、危险源辨识、职业危害防护、应急救援等多个知识模块，且与行业安全生产标准、技术规范紧密关联。当前，课程教学资源主要以教材、课件、试题库等静态形式存在，更新周期长、维护成本高，难以跟随行业安全规范的动态演进进行实时调整。与此同时，各类教学资源分散在不同的平台和媒介中，缺乏系统化的组织与关联，知识点之间的内在逻辑关系未能得到有效呈现，导致学生在学习过程中难以建立完整的知识结构，呈现“知其然不知其所以然”的浅层学习状态。这种资源建设的碎

片化和滞后性，已成为制约课程教学质量提升的基础性障碍。

（二）教学模式单一化，个性化支持缺失

在传统教学模式下，《职业健康与安全》课程主要采用“教师讲授+课后练习”的单向知识传递方式。这种“满堂灌”式的教学虽然能够在有限时间内传递大量信息，但忽视了学生在认知水平、学习风格、知识基础等方面的个体差异。具体而言，学习能力较强的学生缺乏拓展深化的空间，学习困难的学生得不到有针对性的辅导支持；对安全情境感知能力不同的学生，面对统一的教学案例和任务设置，难以获得与其认知发展阶段相匹配的学习体验。在缺乏学习数据分析与智能诊断手段的条件下，教师也难以精准把握每位学生的学习状态和薄弱环节，导致“因材施教”的教育理念在实践层面难以落地。

（三）实践教学高风险化，沉浸式体验匮乏

《职业健康与安全》教育的核心，是培养学生在面对真实或模拟危险情境时的隐患识别能力、风险判断能力和应急处置能力。但传统实践教学始终存在“高风险、难还原、缺沉浸”的明显问题。在实际教学中，高危作业场景、突发事故处置这类核心技能的训练，往往受限于场地、设备与经费条件，学生很难在贴近真实的场景中获得沉浸式学习体验，安全意识内化与操作技能养成的效果因此受到制约。学生缺少在拟真情境中主动探索、独立决策操作的机会，也使得风险感知与应急反应能力的培养效果大幅下降。

二、AI 赋能职业健康与安全课程建设的内在要求

（一）坚持价值引领

职业健康与安全课程肩负着生命安全教育特殊使命，其建设要把价值塑造摆在首要位置，人工智能技术嵌入并非单纯的工具叠加，而是涉及生命安全观、技术伦理观与职业责任感的深层培育。课程目标设定要超越知识技能传授单一维度，将尊重生命、敬畏规章、担当责任的核心价值理念贯穿全程，在内容组织方面，安全法规解读需凸显法治精神与规则意识，事故案例分析要渗透人文关怀与责任意识[2]，应急演练设计需要着重强化团队协作意识与救死扶伤的道德情操。人工智能融入课程的应用，同样需要符合价值规约的要求，如算法决策透明度、数据采集合规性、虚拟仿真对生命个体的尊重等议题，都可以转化为课程思政的鲜活教学素材，通过价值引领让技术赋能始终锚定育人的初心，避免工具理性消解生命安全教育的内核，保障课程建设在智能化发展进程中不偏离立德树人的根本方向。

（二）对接职业场景

职业健康与安全课程的生命力，始终和真实工作场景紧密相连，脱离岗位实际开展课程建设，很容易陷入内容空泛的困境。不同行业领域面临的风险特征存在明显差异：化工行业重点关注有毒有害物质泄漏与爆炸防控，建筑行业聚焦高空坠落与机械伤害的防范，制造行业侧重粉尘、噪声等职业危害的治理，服务业则需要应对人机交互过程中的新型安全挑战。

课程建设应当以岗位安全能力需求作为逻辑起点，深入行业一线提取典型工作任务、梳理核心风险因素、归纳标准处置流程，以此搭建对接产业实际的内容框架。人工智能技术的融入，也需要紧密贴合职业场景的具体需求：针对高危不可达场景搭建虚拟体验环境，围绕复杂决策任务开发智能辅助系统，面向动态风险因素搭建预警认知模块。对接真实场景要求课程建设者具备行业视野与岗位认知，避免技术应用和职业实际出现“两张皮”的问题，保障课程内容能够经受住真实工作情境的检验。

（三）注重技术适配

将人工智能技术应用于课程建设，需要遵

循适配性原则：既要反对因循守旧、拒绝技术赋能的保守态度，也要警惕盲目追逐技术前沿、脱离实际条件的冒进行为。

职业健康与安全课程对技术的需求有着鲜明的差异化特征：高危场景的可视化呈现需要虚拟现实技术提供支持，安全知识的结构化组织依赖知识图谱技术实现，学习过程的精准诊断依托学习分析技术完成，智能答疑与反馈借助大语言模型即可落地。在工具选择层面，要充分考量高校现有信息化基础设施、师生数字素养水平以及课程建设经费预算，优先选用成熟稳定、成本可控且操作便捷的技术方案，避免因技术门槛过高导致课程资源闲置浪费。技术嵌入的广度和深度要与课程目标精准匹配，服务于安全知识传授、风险认知建构与应急技能训练的核心任务，防止炫技式的技术应用冲淡课程的专业属性，确保每一项技术应用都能在课程建设的具体环节产生实质性增益。

（四）坚持协同共建

职业健康与安全课程的智慧化建设属于系统工程，单靠学校教师团队自己难以应对产业技术快速迭代和安全管理持续更新双重挑战，必须构建多元主体深度参与的协同共建格局，学校作为课程建设的主导方，承担着教育目标确立、教学设计实施和教学过程管理的核心职责，行业企业提供真实安全案例、岗位能力标准和实习实训场景，确保课程内容与职业实际能够紧密衔接[3]。人工智能技术团队负责工具开发、平台维护和数据治理工作，为课程智能化运行提供必要的技术支撑；安全监管部门可以提供政策法规解读与行业规范指引，进一步提升课程内容的权威性与时效性。协同共建的核心，在于建立常态化的沟通协调机制与资源共享机制，以此形成包含需求分析、内容开发、技术嵌入、教学应用、效果反馈、持续迭代的闭环运行模式，让课程建设在多方力量的汇聚融合中，始终保持旺盛生命力和持续进化能力。

三、AI 赋能职业健康与安全课程建设的实践路径

（一）课程目标的智能校准

课程目标肩负着方向指引的重要功能，其精准程度直接决定人才培养的适切状况。传统职业健康与安全课程大多采用统一目标设定模式，很难回应不同专业学生未来岗位面临的风险差异和能力需求分化。人工智能技术的介入为课程目标校准提供了智能化路径，促使课程目标从标准化向精准化实现转型。

课程开发团队依靠人工智能工具系统来分析不同产业领域安全事故报告、岗位能力标准和职业健康法规，从其中提取各专业方向的核心安全能力要素。依照这些要素构建基础层、进阶层和拓展层相互衔接的分层目标体系。在课程思政方面，应在传授知识技能的同时，深入挖掘课程中蕴含的思政元素，如职业道德、安全责任、敬业精神、工匠精神等，将其有机融入教学目标，引导学生树立正确的世界观、人生观、价值观，培养学生的职业素养和社会责任感。

在此基础上，人工智能系统会依据学生前置知识测试结果以及学习行为画像，智能化地推荐适合学生的个性化目标路径，让每位学生在达成共性要求的同时能够获得差异化的发展方向。同时，利用 AI 技术进行教学目标的精准设定，通过对学生学习数据的分析，了解学生的学习基础、兴趣和能力，制定个性化的教学目标，满足不同学生的学习需求。课程目标的设定也因此实现了从经验判断到数据驱动的根本性转变。

（二）课程内容的知识图谱重构

课程内容是让教学目标得以落实的实质性依托，其组织形态会直接影响知识传递的效率与效果。如表 1 所示，当前职业健康与安全课程的内容编排大多以线性章节结构呈现，知识点之间缺乏关联，安全法规、防护技术、事故案例等素材

更新滞后于产业实际情况，学生难以形成系统化的安全认知框架。知识图谱技术为课程内容的结构化重组提供了可行方案，能够把离散的安全知识点编织成相互关联的认知网络。

课程建设者围绕职业危害因素识别、个人防护技术、职业安全法规以及事故应急处置这四大核心领域，仔细提炼关键概念并将其作为知识节点，运用语义关联技术来建立节点之间的因果、并列和递进关系，最终形成网状化的知识架构。基于这个知识架构，人工智能系统会自动抓取国家职业卫生标准、行业安全规范和典型事故调查报告，把最新政策条文、技术规范与真实案例动态嵌入到对应节点，有效破解内容更新不及时的传统难题。

表 1　职业健康与安全课程知识图谱结构表

核心领域	知识节点	关联内容	智能服务
职业危害因素识别	化学性危害、物理性危害、生物性危害、人机工效危害	危害因素来源、接触途径、健康损害机制、行业分布特征	智能案例推送、风险因素关联图谱、行业对比分析
个人防护技术	呼吸防护、躯体防护、听力防护、眼部防护	防护用品分类、适用标准、正确使用方法、维护与更换周期	虚拟穿戴演示、操作规范性 AI 检测、防护方案智能推荐
职业安全法规	职业病防治法、安全生产法、工伤保险条例、行业安全规程	法律责任条款、最新修订内容、企业合规要求、劳动者权益保障	法规更新自动提醒、条款智能检索、案例法规关联
事故应急处置	事故报告流程、现场急救技术、应急疏散预案、事故调查分析	急救操作步骤、应急设备使用、心理疏导方法、典型事故复盘	应急场景模拟演练、处置流程智能评估、急救操作即时反馈

（三）个性学习资源的精准推送

学习资源的供给方式对学生学习效果有着直接影响，传统职业健康与安全课程大多采用统一化及标准化的资源投放模式，难以回应不同学生的差异化需求。人工智能技术依托学习分析和智能推荐算法为个性化资源供给提供了技术路径。

人工智能系统会依据学生前置测试结果、线上学习行为以及知识图谱反馈，自动绘制出个体知识掌握图谱和能力薄弱点分布情况，然后据此智能匹配差异化的学习资源[5]。在模拟实训过程中，设置职业健康相关教学情境，教会学生如何针对不同的职业危害因素进行识别和防护，学会正确使用防尘防毒面罩、防护手套、防护服、耳塞等职业防护用品，避免职业危害因素对人体造成不良影响，从而阻止职业病的发生[6]。对于安全法规理解不足的学生，系统会推送图文解读与案例解析资源；对于防护操作技能薄弱的学生，系统会调用虚拟仿真与操作演示视频；对于事故分析能力欠缺的学生，系统会呈现典型事故复盘与决策训练模块。随着学习过程不断持续推进，系统会动态追踪学生知识掌握变化轨迹，并且实时调整资源推送类型、难度和呈现顺序。

同时，应充分应用各类 AI 工具赋能教学。利用 AI 辅助备课生成教案与课件；利用 AI 助教实现智能答疑，为学生提供全天候的自然语言问答服务；利用人工智能创建真实且复杂的虚拟情境，如模拟事故现场、安全风险场景等，引导学生在这些虚拟情境中进行探究式学习，培养解决

实际问题的能力。这些 AI 工具的引入，使教师从大量重复性的劳动中解放出来，将更多精力投入到教学创新和对学生的深度指导中。

（四）能力评价的过程性改革

能力评价作为检验课程建设成效和引导教学持续改进的关键环节，其科学性与全面性会直接影响人才培养质量。传统职业健康与安全课程的评价方式过于偏重终结性笔试，对于学生在学习过程中安全态度转变、风险判断能力提升以及应急决策思维发展缺乏有效捕捉。人工智能技术支持下的过程性评价改革，为建立多维度、动态化的评价体系创造了条件。

智慧教学平台会全程记录学生线上学习行为，涵盖知识点停留时长、视频回放频次、测试答题轨迹等数据，结合虚拟实训里操作正确率、反应速度与决策路径，形成立体化的学生学习表现画像[7]。构建基于 AI 的多元化教学评价体系，利用 AI 技术对学生的学习过程和学习成果进行全面、客观的评价。

评价维度应包含安全知识理解深度、风险识别敏锐度、防护操作规范性以及应急处置合理性这四个层面，每个层面都设有可观察且可量化的表现性指标。同时，基于深度学习算法构建学业预警模型，当系统检测到学生出现异常信号时，自动向教师和学生推送预警提示和干预建议，实现从“事后补救”到“事前预防”的评价范式转变。评价结果以可视化报告形式予以呈现，既能够反映学生个体的学习进展，又可以汇聚成班级整体的学情分析结果，为教师调整教学重点、优化情境设计提供循证依据，推动课程建设在评价反馈与教学调整的循环过程中不断精进。

结　语

AI 赋能《职业健康与安全》课程建设，是以课程育人为核心、智能技术为支撑、安全能力生成为目标的系统性重构。课程目标的智能校准、知识图谱驱动的内容重组、个性学习资源的精准推送、过程导向的能力评价，构成了课程智慧化转型的完整图景。该路径对同类职业安全通识课程建设具有参照价值，可为高校培养具备数字素养与安全胜任力的应用型人才提供支撑。技术应用边界、校企协同配置及智能评价效度等问题，仍需在理论与实践的持续互构中深化探索。

参考文献

［1］ 王浩, 陈海燕. 高职《职业健康与安全》课程教学改革与实践［J］. 能源技术与管理, 2023, 48（6）：217–219.

［2］ 朱金佗, 刘晓斐, 杨永良, 等. 思政铸魂・学科塑身・双创赋能——职业安全健康复合型人才培养体系重构［J］. 大学教育, 2026,（1）：73–76.

［3］ 隆丽林, 刘海妹, 周逞丽. 新质生产力赋能职业健康安全技术专业核心课程“岗课赛证”融通教学改革［J］. 现代职业教育, 2025,（16）：137–140.

［4］ 吴兰, 毛炫懿. 人工智能技术赋能高校课程案例库建设的应用场景、痛点及优化路径［J］. 中国高校科技, 2025,（12）：91–96.

［5］ 蔡向阳. AI 赋能高职网络安全课程思政建设研究［J］. 黄冈职业技术学院学报, 2025, 27（3）：31–35.

［6］ 严斌斌, 齐瑰芬, 柯洋溢. “健康中国”背景下高职院校学生职业健康与安全教育研究［J］. 广东职业技术教育与研究, 2023,（8）：81–84.

［7］ 宋水利, 周向军. 中国职业安全健康协会：抓好党日活动为强基固本赋能［J］. 学会, 2024,（6）：4–7.

粵澳深合區協同發展下澳門水運工程安全管控體系優化研究

何金城，付大雪，張帆富，歐維士，趙崇傑
中國港灣工程有限責任公司

摘　要：隨著橫琴粵澳深度合作區（下稱「深合區」）的設立，粵澳協同發展邁入制度型開放的新階段，對澳門區內基礎設施建設的安全管控體系優化升級提出了迫切要求。本文以澳門新城填海區 D 區填土及堤堰建造工程為例，剖析在粵澳深合區協同發展背景下，澳門水運工程安全管控所面臨的現實挑戰。研究指出，跨境雙證分離管控導致水運安全底層風險、從業人員安全認知分層割裂放大現場管控偏差，以及專項適配培訓體系缺失引發人為事故高發等問題。在此基礎上，本文進一步探討法規標準體系的制度性割裂、船艙密閉空間與消防安全意識在跨境環境下的普遍薄弱，以及粵澳海事航行管控規則的顯著差異等深層問題。針對上述痛點，本文提出構建琴澳人員進入一體化安全管控機制，落實橫琴職安卡互認互通制度；建立水陸一體化實操實訓機制，依託橫琴建設規模化職業安全實訓基地；並推行密閉空間專項聯合演練與海事通航常態化宣教的雙重協同機制，以形成跨境動態協同管控閉環。研究成果可為粵澳跨境工程安全管理提供實務參考。

關鍵詞：填土及堤堰建造工程；澳門建築施工；粵澳深合區；安全制度；澳門安全管理

壹、引　言

隨著粵港澳大灣區協同發展的持續深化，區內城市群呈現高密度發展態勢，跨珠江口要素流動需求激增。基礎設施建設已由傳統的各自為政模式，轉向系統性、網路化及智慧化的協同共建新階段。特別是橫琴粵澳深度合作區的設立，標誌著粵澳協同發展進入制度型開放的新紀元。透過構建共商、共建、共管、共用的新體制，兩地正積極推動規則銜接與機制對接。截至 2026 年，深合區已推出 350 項規則銜接措施，涵蓋經貿、民生服務等多個範疇。然而，在工程建設領域，尤其是涉及水域作業、岸線利用及海上施工的水運工程，澳門與內地於設計規範、施工驗收、監理流程及應急回應等方面仍存在結構性差異。加上澳門本身土地資源緊缺、施工介面狹窄及颱風季水文條件複雜等客觀限制，安全管控面臨雙重標準及多責任主體的雙重困境。在此背景下，優化升級澳門區內基礎設施建設的安全管控體系，既是粵澳協同發展的內在要求，亦是保障工程安全的關鍵一環。基於此，本文以澳門新城填海區 D 區填土及堤堰建造工程（下稱「D 區項目」）為例，剖析粵澳深合區協同發展背景下澳門水運工程安全管控的現實挑戰，構建新型安全管控體系，並提出相關建議，以期為粵澳跨境水運工程安全管理提供借鑒。

貳、工程概況

新城填海區 D 區填土及堤堰建造工程乃澳

門特別行政區重大基礎設施項目，填土面積約 57 萬平方米，造價 15.38 億澳門元，施工期為 1,350 個工作天。工程位元於澳門海島市東北馬路對出海域，介乎友誼大橋及嘉樂庇總督大橋之間，東西全長約 1,550 米，南北長約 650 米，總體呈不規則形狀。新建海堤總長度 4,066 米，圍區總面積 57.1 萬平方米，採用斜坡式堤堰結構方案。

該工程主要內容包括：圍堰基槽開挖（共 82.5 萬立方米）、臨時圍堤回填（共 77.1 萬立方米）、臨時橋樑及島內區域回填（海泥回填約 169.5 萬立方米、回填砂約 184.2 萬立方米），以及永久圍堤、構件預製、航道疏浚、地基檢測、排水系統及其他防腐設施工程。

工程回填分區按空間位置劃分為堤堰回填區、堤後區及島內回填區三大區域。其中，堤後區細分為 S1 至 S12 共 12 個區塊，採用雙工作面流水作業；島內回填區則劃分為 8 個區塊。現場回填施工遵循「先圍後填」的總體原則，分兩階段實施：第一階段完成臨時航道、基槽開挖與回填、臨時圍堰等，將堤堰回填至 +3.5mMSL；第二階段進行島內物料回填、地基處理、永久圍堰及附屬工程。施工期間，堤後 20 米回填砂與島內海泥回填分層交錯進行，堤後回填砂標高始終維持高於吹填海泥標高 1 米以上，以確保地基穩定。新城填海區 D 區填土及堤堰建造工程回填分區如圖 1 所示。

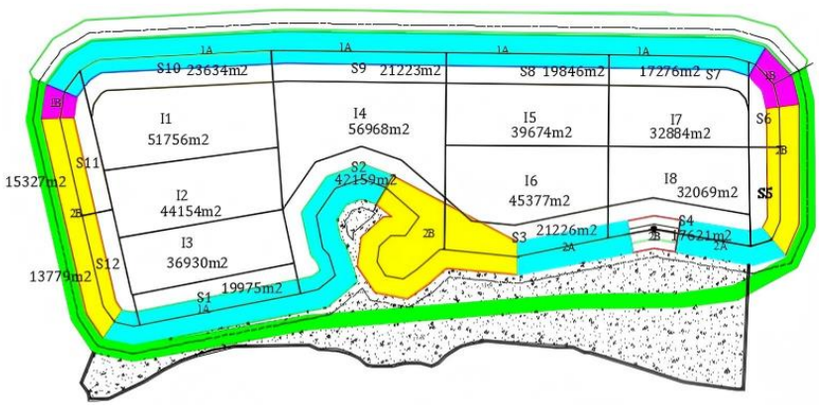


圖 1　新城填海區 D 區填土及堤堰建造工程回填分區

叁、安全管控難點分析

一、跨境雙證分離管控，船員准入流程割裂形成水運安全底層風險

在 D 區水運工程場景下，內地進場施工船員只要不登上陸地，單純在海面上工作，不需持有「外地僱員身份認別證」，只需持有「內河/海上船員適任證」，令現場施工安全管理與一般工程項目有異。兩套證件分屬澳門勞工事務局及內地海事部門兩套監管體系，其審批標準、辦理週期及有效期管理互不相容，成為水運工程人員進場管理的核心難點。

從資質屬性來看，「外地僱員身份認別證」是依據澳門第 21/2009 號《聘用外地僱員法》發出的法定憑證，嚴格限定聘用崗位、工作區域及合約期限，且僅能在獲批項目範圍內作業；

而船員證由內地海事部門核發，區分內河、近海等不同航區，對應挖泥船、泥駁、泵船、交通船等各類施工船舶的操作資質。二者分屬勞工准入與船舶航行操作兩類監管維度，導致人員准入管理出現多重漏洞。

以新城填海區 D 區填土堤堰工程為例，項目大量水手、機工及挖泥船操作船員均為內地船員。由於兩套證件監管主體分離，珠海海

事、澳門海事及澳門勞工事務局三方未建立人員資訊即時共用機制，日常巡查僅能單獨核查單一證件，無法同步核驗人員務工合法性與船舶操作資質，存在大量無證上崗的灰色空間。

二、從業人員安全認知分層割裂，跨境多元環境放大現場管控偏差

澳門填海及堤堰類大型水運工程的施工團隊由內地外派船員、澳門本地工人構成。人員來源地域、從業年資及經歷差異巨大，對項目風險、粵澳兩地雙重安全法規及水上作業管控要求的認知參差不齊。此類認知差距疊加跨境地域、法規及文化差異，大幅提升現場安全統一管控的難度。

首先，法規認知存在顯著斷層。內地船員長期參與國內沿海及內河疏浚項目，僅熟悉內地《疏浚與吹填工程施工規範》《水上水下活動管理規定》等國標規範，但對澳門本地《建築業職業安全健康法》（第 2/2023 號法律）、《預防和控制環境噪音》法律及澳門海事施工船舶通航管理細則完全陌生；澳門本地員工雖熟悉本地管制要求，但不熟悉內地船舶設備安全操作及水上施工危險源辨識標準。項目同時執行內地水運行業規範與澳門本地勞工、環保及通航法規，兩套標準存在大量差異，全員難以形成統一的安全認知。

其次，從業經歷帶來認知差距。從業十年以上的資深船員雖熟悉常規疏浚作業，但對本項目臨近友誼大橋、嘉樂庇總督大橋的限航、限載及振動控制等專項風險認知不足；新入職年輕船員僅掌握基礎船舶操作，對軟基圍堰潰堤、吹填污染、水下管線碰撞及離岸應急救援等項目特有重大風險毫無概念，未系統學習水上危險源清單，對辨識出的遇溺、機械傷害、溢油及船舶碰撞風險缺乏基本預判能力。

三、專項適配培訓體系缺失，項目定制化安全培訓供給嚴重不足

當前澳門水運工程船員普遍存在絕大多數員工，未接受針對性及項目專屬安全培訓的突出問題。過往常用安全培訓無法匹配澳門跨境水上施工的複雜工程，培訓缺位直接造成人為安全事故高發，是安全管控的核心短板。

現有船員培訓分為內地海事標準化船員證基礎培訓及企業通用安全交底兩類，均未結合澳門填海水運項目定制專項培訓內容。內地海事培訓僅覆蓋船舶基礎操作及通用水上安全，缺乏澳門本地法律、大橋防護管控、珠澳交界複雜水文潮汐、安裝防污簾、海洋傾廢管控、跨境應急救援及澳門颱風應對等項目特有安全內容。項目進場簡單交底多為一次性紙面宣讀，無實操演練、無分層教學及無複訓考核，屬於形式化培訓，無法形成有效安全能力。

此外，內地船員多為階段性外派，工期內分多批次輪換進場，新船員進場僅完成簡易簽字交底，幾乎未開展任何水上安全專項培訓，不清楚落水救援、溢油處置、颱風撤離及圍堰潰堤應急處置流程。同時，培訓資源存在跨境壁壘：內地培訓機構無法完整覆蓋澳門本地法律法規培訓，澳門本地培訓則缺乏大型疏浚及填海工程船舶實操教學設備，難以開展船機實操及水上應急實景訓練，導致項目難以組織全覆蓋、高質量的定制化培訓。

肆、粵澳深合區協同發展下水運工程安全管控現存問題

一、法規標準體系存在制度性割裂

廣東分屬內地海事及住建監管體系，澳門則遵循本地勞工及建築專屬法例。兩套法規標準獨立運行，不存在統一互通機制，導致法規標準體系存在制度性割裂。根據澳門《建築業職安卡制度》（第 3/2014 號法律）規定，所有在建築工地或工程地點參與施工的人士均須持有有效建築業職安卡。職安卡培訓由澳門勞工事務局統一組織，課程涵蓋澳門本地《建築業職業安全健康法》（第 2/2023 號法律）、噪

音、環保及工地應急等專屬法規，有效期為 5 年，到期需完成重溫課程方可續期，未持有有效建築業職安卡禁止進場施工，違規企業將面臨高額罰款。

然而，內地赴澳施工船員及疏浚作業人員多僅持有內地海事核發的船員證，未系統學習澳門本地職安法規；船員因單純在海面上工作，未持有「外地僱員身份認別證」，從而未有資格考取職安卡，未能確保在工程地點參與施工的船員具備建築業安全施工的基礎安全知識，形成「船舶資質合規、工地准入違規」的矛盾。與之相對，內地船員證及水上特種作業證依據國內《疏浚與吹填工程施工規範》《船舶封閉空間作業規程》核發，僅認可國內水域操作標準；澳門本地法規未與內地船員資質接軌，同時澳門本地船舶操作人員培訓體系亦缺失大型疏浚及吹填船專業課程。

二、船艙密閉空間與消防安全意識跨境普遍薄弱

D 區工程大量使用挖泥船、泵船、泥駁及臨時鋼便橋配套作業船舶，其燃油艙、壓載艙、機艙、管線艙及泥艙均屬於密閉/有限空間。同時，船舶機艙、物料間、工地臨時板房及油料堆場存在高頻火災風險。但內地外派船員及臨時務工人員普遍缺乏適配澳門水域的密閉空間及消防專項安全認知，疊加兩地作業規範差異，安全隱患突出。

從密閉空間作業來看，澳門《建築安全特定訓練計劃》為持有建築業職安卡人士提供針對密閉空間工作安全的升級安全訓練，務求讓建築業人員能掌握在進行相關工序時的安全要點和知識，預防工作意外發生。內地雖標準明確「先通風、再檢測、後作業」，強制檢測氧氣、可燃氣體及有毒氣體三項指標，但沒有單一針對密閉空間的獨立特種證件，未能保證船員對密閉空間工作的安全風險有充分認識。絕大多數內地船員僅熟悉內河密閉作業流程，不熟悉近海高濕度及淤泥揮發硫化氫等特殊情況，作業前省略氣體檢測、不持續通風及無外部監護等違規操作常態化。消防安全層面，兩地船舶防火及工地消防要求存在明顯差異：內地側重船舶機艙明火管控及消防器材定期試壓；澳門對施工船舶油污存放、工地油漆化學品倉儲、海上動火審批及生活區用電管控要求更嚴苛，且規定水上動火作業必須同步配備防油污及防引燃雙重防護，現場從業人員普遍存在認知盲區。

三、粵澳海事航行管控規則差異顯著

珠江口粵澳交界航道及跨海大橋周邊施工水域分屬珠海海事及澳門海事兩套獨立管控體系。船舶航行、施工報備、避風、通航管制及拋泥等規則標準不統一，跨區域疏浚、運砂及吹填船舶執行標準混亂，大幅提升水上碰撞、擱淺及違規傾倒等安全風險。

首先，施工報備與通訊規則不同。澳門海事規定所有工程船舶進出施工水域及跨航道作業，必須提前申報，全程 VHF10/16 頻道值守，即時向 VTS 報送船位及作業狀態；而廣東海事側重施工許可事前審批，對航行途中動態即時報備要求相對寬鬆。其次，通航與大橋管控標準不一致。友誼大橋及嘉樂庇總督大橋兩側分設粵澳兩級警戒管控區，廣東劃定大橋 1,000 米一級禁入區，澳門施工船舶限速及限操作要求更嚴格，禁止橋區掉頭、過駁及拋泥；內地船員長期在內河及內地沿海施工，不熟悉澳門橋區限航及振動管控要求，船舶近距離穿越大橋時高速航行或隨意變道，存在撞擊橋墩風險。最後，防颱及拋泥處置規則存在顯著分歧。內地劃定珠江口多處避風錨地，颱風預警後統一調度船舶撤離；澳門則指定神灣、小虎島等跨區錨地，撤離時限、船舶綁紮及人員上岸標準與廣東不同，兩地調度指令不同步時易出現船舶滯留施工區。

伍、深合區協同發展下新型安全管控體系構建

一、構建一體化實操實訓機制

基於上述安全管控難點，從管理角度來看，對每一位施工工作人員有必要在入職培訓時最少親自接觸一位項目管理人員，務求遇到問題時能夠更有效溝通，為日後的培訓、教育、宣傳等管理措施更有效落實，從而塑造一個良好的安全氛圍，因為安全氛圍是需要雙方持續性參與，才能有效提升。

D 區項目針對內地船員階段性外派，工期內分多批次輪換進場特點，背靠深合區建築安全職業技能培訓學校現場，重新對所有進場施工船員，進行一天封閉式安全培訓，確保現場所有施工人員，對項目管理有充分瞭解及重新安全教育，並針對消防及密閉空間作實際操作。

一天的封閉式安全培訓，分為上午理論課，先深入講解 D 區施工項目現場實際情況，同時進行入職培訓，講解安全知識、海上作業風險、密閉空間注意事項以及澳門航行規則。安全培訓及項目講解學習如圖 2 所示。

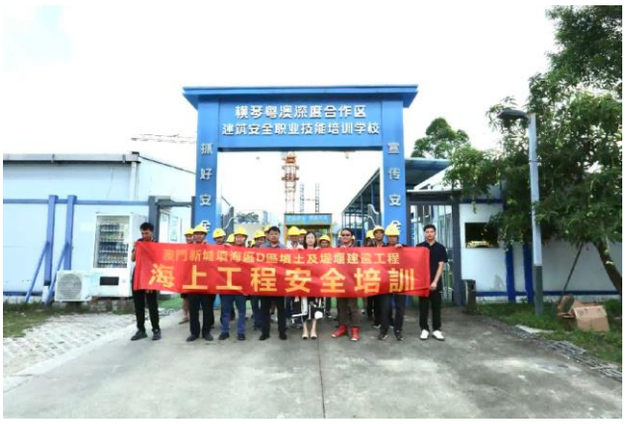


圖 2　安全培訓及項目講解學習

下午實操課，涵蓋 VR 高處作業、用電安全、吊運風險識別等不同的安全體驗；其後聯同「珠海市橫琴粵澳深度合作區消防救援支隊」要求各船員分班組學習使用海上滅火帶、滅火筒使用及佩戴過濾式消防面罩，最後進行煙霧逃生演習，模擬船艙等密閉空間發生火災，船員如何於充滿煙霧及漆黑一片的環境下逃生。聯同消防救援支隊實操演習如圖 3 所示。

圖 3　聯同消防救援支隊實操演習

二、聯合演練形成跨境動態協同管控閉環

D 區項目與其航區內的海上搜救中心有定期通訊聯絡測試並聯合演習，保證遇險時 D 區項目能有高效率的應變行動；並借機熟習粵港澳三地協作搜救的協調能力及應急機制的運作，尤其是海上搜尋和快速救援的能力和運作，補齊粵澳交界水域應急處置及規則認知兩大短板，形成全過程、常態化的新型現場安全管控體系。

項目於 2026 年 6 月派遣項目長達 60 米，排水量逾二千噸之自航卸沙船參與 2026 年粵港澳三地海上搜救聯合演習。演習模擬一艘高速客船與 D 區項目提供的工程船相撞，客船機艙破損入水有下沉危險，工程船船身破損且失去動力，船頭起火，船員嘗試自行撲救，同時一名人員墮海。澳門海事及水務局接報後立即啟動澳門海上搜救協調中心，廣東、澳門方迅速派遣配備消防能力的拯救船向工程船射水，成功撲滅明火；澳門海關、深圳海事局船隻同步開展海面搜救，深圳海事局智慧船鎖定墮海人員位置後，澳門海事及水務局協調香港政府飛行服務隊直升機實施海空聯合救援，將人員吊運至外港客運碼頭直升機停機坪後送醫救治。整個演習，D 區項目完成了海上應急搜救、協力滅火、海空聯合救援、船岸傷患轉移及緊急拖帶等多個實戰演練科目，演練場景貼合澳門填海水運工程真實風險，有效檢驗了項目粵港澳三地協作搜救的協調能力與應急機制運轉效能，透過聯合演練形成跨境動態協同管控閉環，完善粵澳協同水運工程新型安全管控體系。海上搜救演習如圖 4 所示。

圖 4　粵港澳三地海上搜救聯合演習

陸、結束語

以澳門新城鎮海區 D 區填土及堤堰建造工程為例，分析了粵澳深合區協同發展背景下澳門水運工程安全管理面臨的現實挑戰與現存問題，構建了協同深合區發展下的新型安全管控體系。

面對項目高安全風險的海上挑戰，安全管控難點及既有管控差異性分析，項目背靠深合區，依託橫琴建築安全職業技能培訓學校，大幅降低澳門企業培訓場地及設備採購成本，解決兩地實操培訓斷層問題，破解兩地職業安全法規割裂及資質雙軌運行的底層矛盾，實現項目水運從業人員統一培訓，以深合區空間資源互補及實訓資源分享完善新型安全管控體系的培訓支撐鏈條，解決兩地實操培訓斷層及安全實操能力不足的突出問題。

新形的安全管控體系的實踐成效，展現出的安全生產管理水平，獲澳門勞工局及業界的肯定。在 2025 年澳門勞工局組織的建築業安全

施工獎勵計劃中，項目獲得最佳職安健地盤–銅獎；以及 2025 澳門項目管理大獎中，項目獲得優秀項目管理獎。獲獎相片如圖 5 所示。

圖 5　最佳職安健地盤及澳門項目管理大獎

參考文獻

［1］ 陳江實浩（2018），圍填海區域演變及其對土地資源利用影響評價：以惠州市為例［D］，廣州：廣州大學。

［2］ 沈程、刁殿永、張成、張玉成、安梓良、王乾屾（2023），淺談澳門地區大型工程項目施工總承包安全管理［J］，建築安全，第 28 卷，第 7 期，96–104 頁。

［3］ 高金柱、張洪芬、崔曉菁、楊瀟、趙銳、張坤珵（2025），海岸線兩側陸海權屬問題與對策研究—陸域內圍填海區域和海域內土地證區域管理問題［J］，海洋湖沼通報（中英文），第 47 卷，第 5 期，248–253 頁。

［4］ 駱增毅（2023），淺淡港珠澳大橋澳門口岸項目 HSE 管理中的“檢查與糾正”措施［C］，第 28 屆海峽兩岸及香港、澳門地區職業安全健康學術研討會摘要集，16 頁。

［5］ 楊駿然（2020），澳門住宅及商業項目工程施工管理與技術難點研究［D］，廈門：華僑大學。

［6］ 廖文劍、潘波、劉濤（2016），淺談港澳工程安全管理［J］，施工技術，第 45 卷，第 S2 期，679–682 頁。

［7］ 胡小穎、周興華、劉峰、彭琳、辛海英、楊鳳麗（2009），關於圍填海造地引發環境問題的研究及其管理對策的探討［J］，海洋開發與管理，第 26 卷，第 10 期，80–86 頁。

［8］ 米格爾・利馬、孫淩波（2009），遺失山海之間的聯繫—澳門外港新填海區規劃回顧［J］，世界建築，第 12 期，35–37 頁。

［9］ 羅富敬（2022），水利工程設計檔案保障粵港澳大灣區水安全實踐［J］，水利水電工程設計，第 41 卷，第 3 期，53–55 頁。

跨境水運工程視野下澳門與大陸安全管理人員職責差異及最佳化措施淺析

何金城
中國港灣工程有限責任公司

摘　要：本文以澳門新城填海區 D 區填土及堤堰建造工程為例，對比分析了對比分析兩地安全管理人員的職責定位、法規適用及工作方法的異同。澳門以《建築業職業安全健康法》為核心，實行承造商主導下的安全主任與安全督導員制度，強調日常高頻巡查與即時整改；內地則以《中華人民共和國安全生產法》為依據，構建企業主要負責人全面負責、安全管理人員協助執行的責任體系，注重系統性隱患排查與台賬化管理。並針對兩地法規適用性衝突、管理理念差異及應急聯動機制差異等問題，從建立安全管理人員協同管理機制、推進資格互認、促進大灣區安全管理標準一體化三個維度提出優化措施，為跨境水運工程的安全管理實踐及區域安全生產標準銜接提供參考。

關鍵字：跨境水運工程；安全管理人員；職責差異；粵港澳大灣區；安全管理一體化

壹、引　言

隨著大陸地區施工單位參與度的增加，並與澳門企業組建聯合體，共同參與澳門的城市建設。本文以澳門新城填海區 D 區填土及堤堰建造工程（下稱「D 區項目」）為例淺析合作經營項目涉及內地與澳門的施工主體、船舶和人員在同一環境中協同作業，安全生產管理面臨雙重法律體系交叉適用、雙重監管標準並存執行的現實挑戰，而作為施工安全關鍵執行的安全管理人員，其職責定位直接決定安全管理制度的落實。然而，內地與澳門在安全管理人員制度設計上存在顯著差異，從法律淵源、職責範圍均有不同側重點，理解兩地安全管理的差異化並尋求優化路徑。

貳、安全管理人員制度分析

一、澳門安全管理人員制度

澳門建築業安全管理法制化始於 1991 年，《建築安全與衛生章程》第 44/91/M 號法令於 1991 年 7 月 19 日頒佈，較系統地規定了建築活動的安全生產要求，是澳門回歸前建築安全領域的基礎性規範，確立了承造商對施工安全負首要責任的原則。然而，隨著建築行業的技術進步和工程規模擴大，原法令已難以滿足大型工程複雜安全管理需求。在此背景下，澳門特別行政區政府制定了《建築業職業安全健康法》（第 2/2023 號法律），標誌著澳門建築業安全管理進入了新的法治階段。

根據《建築業職業安全健康法》（第 2/2023 號法律），澳門安全管理人員制度設立了兩級安全管理崗位，分別為安全主任及安全督導員。在配置標準方面，當建築工地和工程地點的每日工作人員總數達到二十名時，承造商須至少設置一名安全督導員；當工作人員總數達到一百名或以上時，尚須至少設置一名安全主任，且安全主任的人數須按工作人員數的增加而相應遞增；在進入條件方面，安全督導

員須完成建築業安全督導員培訓課程並考試合格；安全主任須持有由勞工事務局發出的有效准照，且須具備專職性，不可兼任其他管理職務；在職責定位方面，安全主任和安全督導員的核心職責是協助承造商做好安全管理的工作，即在承造商的領導和管理下履行安全監督與管理職能，而非獨立於承造商體系的協力廠商監控角色。

二、內地安全管理人員制度

內地安全生產法制體系以《中華人民共和國安全生產法》為基礎，明確確立了“管行業必須管安全、管業務必須管安全、管生產經營必須管安全”的基本原則，並強化和落實生產經營單位主體責任與政府監管責任，建立生產經營單位負責、職工參與、政府監管、行業自律和社會監督的機制。安全生產管理人員被定位為生產經營單位內部的專業力量，其主要負責人對本單位安全生產工作全面負責，其他負責人對職責範圍內的安全生產工作負責，安全管理人員則承擔協助執行的職能。

《中華人民共和國安全生產法》第二十五條明確規定了安全生產管理機構及安全生產管理人員的七項主要職責，構成了內地安全管理人員履職的完整鏈條，覆蓋了從制度建設、教育培訓到隱患排查、應急演練和現場監督的全過程。其中，《中華人民共和國安全生產法》將組織開展危險源辨識和評估列入了主要職責中，體現了內地安全管理從被動應對向主動預防的轉變。

三、差異化分析

從准入資質、崗位職責、核心權責、監管模式等維度對澳門安全管理人員與內地專職安全員進行對比，如表 1 所示。

表 1　差異化對比

對比	澳門安全管理人員	內地專職安全員
進入資質	需持澳門勞工事務局安全管理准照，學歷、培訓、考核屬地化；	持交通運輸部門安全生產考核合格證書（C 證），全國通用；
崗位職責	絕對專職，安全主任不得兼任施工、技術、商務等任何崗位；	可兼顧部分資料、協調工作，允許安全 、品質 、資料等複合履職；
核心權責	①法定監察施工環境、設備、工序風險，直接向承造商提交書面報告；②組織承造商與分判商安全溝通，開工前必須召開安全會議；③監督職業健康體檢、防護用品配發與使用；	①現場巡查、隱患排查、督促整改；②安全技術交底、教育培訓、方案執行監督；③應急管理、事故上報與協助處置；④安全資料整理、台賬歸檔；
監管模式	垂直法定監管，直接對澳門勞工事務局負責；	企業內部監管+政府行業監管，對項目負責人負責，行業主管部門抽查監督；

叁、工程案例分析

一、項目概況

澳門新城填海區 D 區填土及堤堰建造工程位於澳門海島市東北馬路對出海域，東西長約 1550m，南北長約 650m，海堤總長 4066m，圍區面積約 57.1 萬 m2，本工程主要建設內容包括圍堤基槽開挖、臨時航道疏浚、堤堰建造、島內區域回填、排水系統工程及其它附屬設施工程。本項目施工總承包由中國港灣工程有限責任公司與中國建築工程（澳門）有限公司共同合作經營，合同總額達到 15.38 億澳門元。

企業內部管理同時適用內地與澳門雙重法律體系，大量施工船舶、機械設備及專業人員從內地調遣或租賃進入澳門施工水域，因此需要同時滿足內地的安全管理要求和澳門的准入條件。同時，本項目位於澳門主航道附近的敏感水域，周邊有友誼大橋和嘉樂庇總督大橋，

施工環境較為敏感，對現場安全管控的要求較高。

二、組織架構

根據本工程的工程規模，安全管理部門設 1 位元安全總監，且根據《建築業職業安全健康法》（第 2/2023 號法律）安全主任及督導員需要在澳門當地招聘。安全管理部主要工作職責包含：常態化開展施工現場日常安全巡查、專項安全核查與隨機性抽檢工作，參與各類涉安全類施工方案審核研判；對現場排查發現的安全隱患問題，及時通報責任施工班組與項目部專業管理部門，並全程督促隱患閉環整改落實；統籌組織項目 HSE 安全教育培訓，同步落實分包單位安全監督管控任務，同時協同配合各部門開展相關業務工作。項目組織架構圖如圖 1 所示。

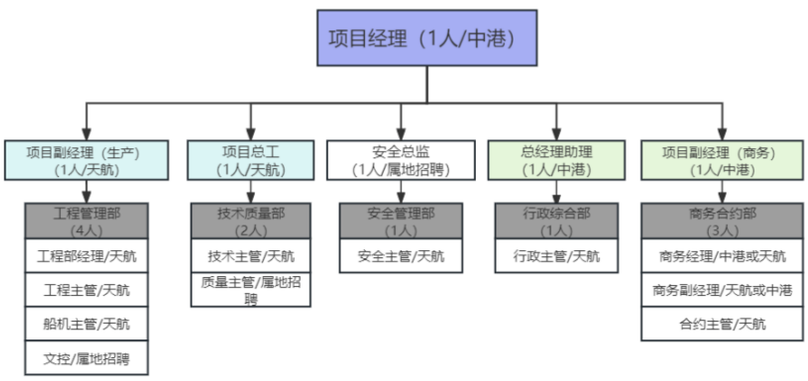


圖 1　項目組織架構圖

肆、內地與澳門安全管理人員職責的差異分析

一、法規適用的衝突

D 區項目作為內地與澳門合作經營項目，其安全管理架構在制度設計上必須兼顧兩地的法規要求與管理傳統。本項目位於澳門主航道敏感區域，需同時遵守澳門特別行政區的建築安全與衛生法令、澳門海事及水務局水上水下工程許可制度，並兼顧內地項目總部的安全管理制度體系。當兩地法規要求存在差異時，適用何種標準成為現場安全管理的主要難點。

以 D 區項目設備管理和人員管理為例，設備管理方面：澳門依據第 14/2022 號法律《升降設備安全法律制度》、《建築業職業安全健康法》配套技術規範，所有塔吊、施工電梯、起重設備進場，必須由澳門土地工務局註冊工程師到場驗機，出具官方檢驗表格（驗機紙），無註冊工程師簽字核驗的設備嚴禁投入施工，屬地監管具備一票否決權。內地依據《建設工程安全生產管理條例》《特種設備安全法》，無“註冊機電工程師驗機”法定強制要求，機械設備進場驗收由總承包單位牽頭，聯合機管員、安全員、設備租賃方共同完成，留存合格證、出廠檢測報告、企業內部驗收台賬即可。

人員管理方面：澳門執行第 3/2014 號法律《建築業職安卡制度》，所有進入工地的管理人員無論工種，必須提前完成勞工事務局統一培訓並取得建築業職安卡，職安卡有效期 5 年，無卡人員禁止踏入施工區域，勞工局巡查發現無證人員將對承建商高額處罰，屬於法定前置准入條件。內地無統一政府發放的建築通用入場安全卡制度，人員入場安全培訓、考核、建檔全部由施工企業自主落實，僅塔吊、電工、焊工等特種作業人員需持有全國通用特種作業操作證；普通土方、回填、後勤人員僅完成企業內部三級安全教育即可上崗，無政府統一發證強制要求。

貳、管理理念的差異

兩地安全管理人員在管理中展現出不同的工作風格和方法，內地安全管理人員傾向於依據《安全生產督查辦法》制定詳細的檢查計畫、巡查台賬和整改清單，並通過每月安全大檢查和專項檢查等措施系統性地排查隱患；而澳門安全主任和安全督導員則更注重日常的高頻巡查和合規性監督，與施工班組的互動緊密，對施工過程中發現的小問題、小隱患的即時整改尤為重視。

管理理念的差異化更體現在平時工作過程中對安全問題的識別標準和處理方式，內地管理人員習慣於先記錄、再整改的書面流程，在現場發現安全問題後，對問題進行記錄，隨之提交書面的整改流程，而澳門的現場安全管理人員更傾向於發現問題後進行即可處置，通過在現場即時干預的方式，降低安全風險發生概率。這兩類安全管理理念各具優勢，內地施工企業的系統性管理有利於形成可追溯的安全管理檔案，為後續的安全分析提供依據；澳門施工企業即時處理的方式能夠快速的消除現場安全隱患，防止小問題演變成大事故，但在兩者並行的情況下，極易出現安全管理工作被重複執行、部分工作因標準不一致而發生衝突的情況。

叁、應急回應聯動機制的差異

D 區項目需要進行大量的海上作業，防颱風、防風暴潮、防碰撞等應急回應機制是項目安全管理的重點內容，但兩地管理人員在應急回應機制方面仍存在較大差異。澳門海事及稅務局要求現場施工船舶配置和開啟船舶的自動識別系統，進出施工範圍前須事先向船舶交通管理中心報告，並提供在颱風期間的應急避風地點，而內地施工單位需要按照《防抗風災專項應急預案》制定應急處置流程。因此在項目實施過程中，當颱風預警發佈時，項目安全管理團隊需要同時向內地項目總部報告並執行內地的避風預案，又需要根據澳門的工程活動許可要求提交船舶的避風資訊與人員緊急撤離方案，在兩套應急機制並行過程中，對安全管理人員的資訊傳遞與協同能力提出了極高的要求，也對項目團隊中兩地不同管理人員溝通帶來了巨大的挑戰。

伍、安全管理優化措施建議

一、安全管理人員協同管理機制

基於 D 區項目的管理實踐，在組織架構層面可通過建立雙軌並行、聯席決策的管理模式，項目經理部統一領導下分設澳門側與內地側安全管理組，澳門側由持有勞工事務局准照的安全主任及安全督導員組成，負責日常高頻巡查、法規合規性保障及配合政府檢查；內地側由持有安全生產考核合格證書的專職安全管理人員組成，主導體系建設、危險源辨識、隱患排查治理及應急預案編制。兩組人員由安全總監統籌協調，每週召開聯席會議，共同研判安全形勢、協調檢查計畫，形成分工明確、資訊互通的協同格局。

在標準統一層面，通過梳理內地與澳門安全法規、規範及技術標準中的不一致條款，逐項評估差異性質；對於要求不同但不相互排斥的條款，可以標準較高的一方作為統一執行依據，而對於無法直接比較優劣的條款，則可根據項目管理實際情況，由項目安全生產領導小組組織專題評估並作出書面決策。

在應急指揮層面，為應對兩地不同的應急管理要求，建立雙重回應機制，針對颱風、風暴潮等水運工程特定風險，由安全總監擔任應急總指揮，統一接收氣象預警並發佈指令。內地安全管理人員可根據既定防控預案製作避險，澳門管理人員可配合海事及水務局要求提交船舶資料與避風方案，最終實現一種方案，

兩地共用。

二、建立粵澳雙向安全培訓機制

兩地安全管理標準、法定管控要求存在顯著差異，內地安全管理人員、施工班組普遍不熟悉澳門《建築業職業安全健康法》《建築業職安卡制度》、設備法定驗機、密閉空間持證作業等強制性規則，澳門本地安全管理人員對內地安全生產台賬體系、危險源辨識、企業內部安全管控流程缺乏系統認知，極易造成雙方管理動作脫節、標準執行矛盾。要從源頭消解兩地安全管理執行偏差，需在粵港澳大灣區協同發展框架下，搭建覆蓋管理人員、設備操作人員、一線作業班組的粵澳雙向聯合安全培訓長效機制。

在雙向培訓體系搭建層面，可借鑒橫琴粵澳深度合作區“橫琴職安卡”聯合培訓試點經驗，推動澳門勞工事務局、土地工務局與廣東省應急管理、住建主管部門共建水運工程專項聯合培訓平臺，面向赴澳施工的內地安全管理人員、船機管理員、分包班組長，以及駐場澳門安全主任、安全督導員開展雙向專項教學。針對內地從業人員開設澳門屬地法規專項課程，重點講解澳門註冊工程師設備驗機流程、建築業職安卡申領管理、有限空間作業專項取證要求，結合本填海、航道疏浚水運工程實景案例拆解違規處罰標準；面向澳門安全管理人員開設內地安全生產法規課程，系統講解《安全生產法》、特種設備企業驗收、三級安全教育、有限空間內部作業票管理等內地標準化管控體系。通過雙向同步授課，讓兩地安全管理人員完整掌握兩套安全管理規則，消除資訊壁壘。依託聯合培訓平臺形成統一考核標準，持續縮小兩地安全管理認知與實操差異。

三、大灣區安全管理標準一體化

粵港澳大灣區作為國家重大發展戰略區域，兩岸三地的經貿合作及工程工作將逐步增加，雙方資格互認將逐步成為經濟發展的必然要求。在安全管理標準方面，澳門建築安全協會與內地同行已圍繞安全標準對接、專業人員培訓互認、新技術應用推廣、跨境工程協同監管等議題展開深入討論，且隨著更多內地企業參與澳門城市建設與基礎設施開發，在安全管理經濟及兩地協同方面累計了大量的工程經驗，這為後續制度的優化及政策的制定提供了大量的原始資料。

大灣區安全管理標準一體化的目標是各自為政逐步轉向協同治理，而協同治理機制的建立需從組織、流程及資源 3 個方面同步推進。在組織維度，通過建立聯合指揮中心，實施統一接警、分類處置、協同回應的指揮模式，打破屬地管理邊界；在制度維度，聯合制定應急管理預案，明確應急風險的全鏈條標準化處理流程，使得兩岸的施工安全管理人員有統一的安全管理綱領，避免重複執行，規避因執行標準不同而導致管理矛盾；在資源維度方面，可以通過建立大灣區應急資來源資料庫，以水運工程為例，統籌澳門海關巡邏船、廣東海事局海巡船、南海救助局專業救助船及直升機等裝備力量，按照就近就快原則實施跨境救援調度，並通過聯合演練持續優化協同效能。

陸、結束語

以 D 區項目為例，分析了跨境水運工程視野下澳門與大陸安全管理人員職責差異及最佳化措施淺析，構建了在組織架構層面，通過建立雙軌並行、聯席決策的管理模式的新型安全管控體系。

兩地管理人員職責及文化差異，但從安全管理角度出發，提前做好安全準備與規劃，過程中再不斷提醒整個項目仝人，安全必須優先於工程進度，確保安全生產能為每位工作的人，每人每日可以安全下班回家，都一定是所有安全人員的目標。

新形的安全管控體系的實踐成效，展現出

的安全生產管理水平，獲澳門勞工局及業界的肯定。在 2025 年澳門勞工局組織的建築業安全施工獎勵計劃中，項目獲得最佳職安健地盤–銅獎；以及 2025 澳門項目管理大獎中，項目獲得優秀項目管理獎。獲獎相片如圖 2 所示。

圖 2　最佳職安健地盤及澳門項目管理大獎

參考文獻

［1］ 沈程、刁殿永、張成、張玉成、安梓良、王乾屾（2023），淺談澳門地區大型工程項目施工總承包安全管理［J］，建築安全，第 28 卷，第 7 期，96–104 頁。

［2］ 楊駿然（2020），澳門住宅及商業項目工程施工管理與技術難點研究［D］，廈門：華僑大學。

［3］ 廖文劍、潘波、劉濤（2016），淺談港澳工程安全管理［J］，施工技術，第 45 卷，第 S2 期，679–682 頁。

［4］ 劉偉、刁殿永、劉繼凱、郝寧、叶駿逸、張輝（2025），城市更新視角下澳門地區狹小深層地下室施工安全管理［J］，建築安全，第 40 卷，第 6 期，55–58 頁。

［5］ 邱駿華（2013），澳門地區工程實施階段諮詢項目管理方法分析［J］，水運工程，第 10 期，24–27 頁。

［6］ 崔家盛（2006），澳門建造業的安全管理展望［C］，第十四屆海峽兩岸及香港、澳門地區職業安全健康學術研討會暨中國職業安全健康協會 2006 年學術年會論文集，55–58 頁。

［7］ 許澤文、麥戈源（2025），水運工程建設單位對工程項目安全管理的要點［J］，珠江水運，第 23 期，39–43 頁。

［8］ 徐海峰，孫海龍（2026），全過程水運工程監理安全品質管制標準與施工管理協同機制［J］，大眾標準化，第 5 期，61–63 頁。

淺談建築安全管理工作中存在的不利因素及相關對策

張濠龍[1]，雷永康[2]，莊俊龍[3]
1. 中國建築工程（澳門）有限公司
2. 明信建築置業有限公司
3. 泰科防火保安（澳門）股份有限公司

摘　要：建築業屬於能夠推動國民經濟實現品質提升以及規模擴大的核心支柱類產業，這和城鎮化處於全速建設階段的剛性需求是相契合的。然而呢，這個行業存在著露天高危作業、人員流動性比較大、工期跨度比較久等一些固有的施工特質，再加上有規模化提速建設這樣的情況，安全生產一直都是行業實現高質量發展以及提升效益的核心關鍵卡點。在本文當中，是立足於建築施工的現場全流程實際操作場景的，首先要弄清楚建築行業所具有的高危屬性、安全對於維繫企業生存發展的重要性、安全對於保障社會穩定的基礎性作用等多層核心管控價值。然後要深入挖掘現場管控制度存在缺位情況、一線作業人員安全履職的意識比較薄弱、前沿施工實際操作技術的適配性不夠充足、全域現場監督管控只是流於形式等實際操作當中不利的核心誘發因素。要貼合現場施工的實際狀況，有針對性地採取措施來搭建全閉環的管控路徑，要壓實分級全域的監督機制，常態化地開展分層的安全專項賦能培訓工作，對綠色安全施工的配套技術進行迭代升級，健全全流程權責綁定的安全管理體系，從全方位來補齊建築現場安全管控存在的短板，築牢工程施工全域的安全防線，從而助力建築業從規模化發展朝著高質量安全化平穩轉型。

關鍵詞：建築工程；施工現場；安全管理；問題措施

引　言

建築業是國民經濟關鍵支柱，建築業的發展直接和城市化以及民生的改善存在關聯，然而在建築業這個行業快速發展的過程之中，安全生產問題一直都是對建築業向高質量發展起到制約作用的主要瓶頸。最近這些年，我國通過開展修訂相關法規的工作、推出專項整治行動這樣的舉措，使得建築領域事故的總量以及傷亡的人數整體呈現下降的態勢，但是重大以及更高級別的事故仍然沒有得到杜絕，像高處墜落、物體打擊這類事故的發生概率一直都是比較高的，這表明當前安全管理的體系仍然存在著制度缺陷以及操作偏差。如今社會對於建築安全的重視程度在不斷地提高，隨著公眾安全意識的覺醒以及媒體監督力度的強化，工程的品質以及施工的安全已經成為了衡量企業社會責任的核心指標當中的一個，一旦發生了事故，不但會造成人員的傷亡以及經濟損失，而且還可能引發具有連鎖性質的社會信任危機[1]。在此背景下，在這樣的背景之下，對建築安全管理當中存在的不利因素進行系統的梳理，探索具有針對性的對策，這既是落實「人民至上、生命至上」理念的具體實踐活動，也是推動建築業從“規模擴張”朝著“品質效益”進行轉型的關鍵支撐要素。

1 建築安全管理工作開展的重要性

1.1 建築行業是安全事故高發行業

建築工程專案所具有的施工特性，這就決定了它的生產活動是具有高度的流動性的，整個的建造流程是比較繁雜的，並且大量的作業需要在戶外去進行。除此之外，施工的週期是比較長的，參與到建設當中的各類人員的專業水準是參差不齊的。因為在施工的過程當中必須要使用各類複雜的機械裝備，這就非常容易引發多種安全風險以及隱患。正是因為這樣，建築領域已經成為了事故頻繁發生的行業，迫切需要加強安全管控措施的實施。

1.2 建築施工單位的生命線是安全

當代企業的顯著標誌是高效的管理，建築行業尤其是這樣，它的管理重點既包含內部制度的建立，也涉及對人員以及設備的管控。在各類工程實施的過程中，健全應急的預案體系，不僅能夠在安全事故發生的時候迅速地做出回應，還能夠有效地減少損失。所以，在現今的工程建設當中，提升施工單位的管控水準並且強化細節的管理，是有效遏制安全事故的關鍵所在。必須要對安全事故有全新的認知，才能夠促進內部管理能力的增強，從而推動建築企業的可持續發展[2]。

1.3 安全問題關係到社會穩定情況

在推進社會主義經濟建設的進程裏，保障民眾的財產安全一直是國家首要考慮的事情。人民群眾的生活品質、平安的狀況以及福祉的水準，都是黨密切關注的焦點。面對建築工程領域存在的安全生產隱患，必須要穩步提升及充分認識到強化安全管理的必要性。通過剖析當前施工環節當中的風險因素，並且實施有效的管控策略，才能夠切實維護社會大眾的生命以及財產權益，確保整體的穩定。

2 建築安全管理工作中存在的不利因素

2.1 現場施工制度不夠完善

當前，建築工程的實施的進展是比較順利的狀態，但是有一部分的公司對於工地作業這一事情的理解程度仍然是顯得不夠充足的，並且還缺少那種具有標準化特點的現場管控的方案，這就導致了在建設的進程當中經常是依靠經驗來對工程的進度進行判斷，這些因素就成為了制約專案管理效能的關鍵所在。除此之外，施工活動是需要多個單位一起進行協同作業的，只有通過非常密切的協作才能夠切實地讓工程效率得到優化。

有一部分的施工單位錯誤地認為管理工作和自己是沒有關係的，應該由專門的人員來承擔，這就導致了部門之間協作不順暢、分工不恰當的問題頻繁出現，職責的界定是模糊不清楚的。一旦施工環節出現了紕漏，就經常會陷入到沒有人來承擔責任的困境之中。此外，建築工程管理這個領域也是缺少健全的監管機制的，相互推諉的情況是經常可以見到的。

2.2 施工人員缺少安全意識

作業人員所具備的專業素養以及技術水準是直接和工程的整體品質存在關聯的，但是大多數的從業者是缺少系統的培訓以及專業的教育的，這就制約了工作效能以及專業技能的提升。這類從業者雖然能夠完成常規的作業，卻往往是難以識別潛在的隱患的，所以人才選拔必須要實施嚴格的考核。另外，有一部分的企業為了趕工期，經常會忽視施工人員的培訓以及安全教育，這就使得員工的素質難以得到提升。在實際的操作過程中，因為人員普遍是缺乏安全意識的，違規的行為是十分常見的，這既降低了施工的效率，也大幅度地增加了安全事故發生的風險，再加上現場缺少自救以及防護的手段，不僅會對施工人員的安全造成危及，還會對財物造成損壞，嚴重地影響工程的

進度[3]。

2.3 施工技術存在缺陷

隨著建築標準日益提高，在當代施工中應善用科技發展成果，通過持續創新與應用，選用先進設備作業，並合理規劃施工器械的擺放位置，以防範安全隱患。實際操作中，設備需由工人操控，故其技術水準直接影響機械的耐久性，並波及整體工程進度。目前工地仍存在不規範作業現象，這會引發安全風險，而違規操作正是建築工程最為禁忌的事項。

2.4 現場施工安全監督管理存在缺陷

在建築工程開展實施的過程中，現場開展的任何作業活動都屬於核心的環節內容。然而，有一部分的監管工作人員沒有能夠嚴格地去遵循相關的規章制度來履行監督的職責義務，因為他們的責任心存在匱乏的情況，在進行現場檢查的時候沒有按照既定的流程來開展操作，從而使得監管的行為僅僅流於表面、只是應付一下了事。再加上他們的安全觀念與知識比較薄弱，常常會因疏忽釀成安全事故。除此之外，如果現場的監管工作沒有能夠得到有效的執行落實，還將會嚴重地拖累工程的進度以及施工的效能。當監管人員只是進行形式化的監督，缺少對工程實際狀況的掌握瞭解，施工就會潛藏著重大的安全風險，並且很難依據施工出現的問題來實施預防的措施。一旦事故發生了，不但會造成巨額的經濟損失[4]。還將會破壞社會的穩定以及和諧。此外，這也會對建築企業造成嚴重的負面性質的影響，損害企業的聲譽以及社會地位。

3 建築工程施工現場安全管理的有效措施

3.1 不斷完善現場施工監督管理

為了確保建築專案能夠順利地向前推進，需要以現場的安全監管體系當作基礎，通過對人員的意識進行優化、對風險的源頭進行優化以及對制度的驅動進行優化，來提升安全監管所取得的成效。為了保障建築企業能夠穩健地運營，相關的部門需要高度地重視起來，通過對施工的標準進行界定、制定出科學的規範，從而對風險源進行辨識，這樣做既強化了現場監管所具備的效能，也為行業能夠可持續地發展打下了基礎。為了從根源上遏制安全事故的發生，需要強化源頭的管控，可以通過定期地提交安全報告來加強監管，同時組織施工的人員去參加定期的培訓，設立危險源認知的學習區域，引入自動的預警機制，用這樣的方式來構建全面的工程監管體系，提升現場管理所具備的效能。

3.2 加強工組人員的安全意識

加強施工組織人員的安全意識，為了切實地實現施工合理化這樣一個目的，企業需要立足實際的情況，持續地以審慎的態度去強化監管，借助定期的宣傳來增強人員的安全觀念，並且引導他們熟悉相關的法規。只有在嚴格的規範之下落實操作，才可以確保自身的安全，促使施工人員勇於對危險的舉動說“不”。除此之外，應該委派專家到實地開展安全的評審，結合現場的狀況剖析當前作業當中存在的隱患，並且根據這些情況確保安保措施能夠切實地執行，設立安全的展示區域以強化監管，持續地警示員工保持警覺，嚴格禁止違規的行為以維護工地的安全。同時，需要強化技能培訓工作[5]。

鑒於建設工程存在複雜性，施工人員所具備的技術水準對於安全管理所取得的成效具有關鍵影響。為了能夠促進技術革新，企業需要積極主動地引入先進類型的培訓方法，推動施工工藝實現持續不斷的優化。企業可以採納專業的科技人員所採用的實訓培訓這樣的方式，憑藉這種方式增強員工所擁有的技術素養。與此同時，應該為員工設立科技實訓室，方便他們在空餘的時間進行練習操作。在重視科技的引進以及創新這樣的基礎之上，對傳統的技術

進行優化和升級，從而能夠緊跟時代發展的潮流趨勢，全面地提高科技水準。

3.3 完善現場安全檢查監督制度

建築工程專案一般具有高度的複雜性，它涵蓋著多個環節並且各個環節的施工標準存在不同，因為施工方在關注方面存在不足，從而導致各項工作的推進比較遲緩。面對這樣的情況，公司必須要提高關注的程度，強化管控以及監察的力度，安排專門的人員在各個部門及時地排查風險，通過定向的引導及細心的風險評估來清除隱患，選擇最為合適的方式來管理施工現場。為了預防安全事故的發生，需要從監督考核、檔案建立以及人員培訓等多個維度著手，持續不斷地優化現場安全監管的體系；可以採用資訊化的管理手段，實現資訊的及時追蹤以及整合，拓展安全管理的覆蓋範圍，提升管控的效能，為施工以及管理人員提供決策參考。此外，在建築工程實施的過程當中，加強現場安全監督的力度，也是落實事故防範的關鍵舉措，要細緻地排查施工場所各種各樣的不安全因素，發現問題馬上進行處理，對於無法規避的難題，要上報給上級一起商議應對的策略，及時地糾正和處置現場的違規操作，保證各項安全管控的舉措能夠有效落實。

3.4 完善建築安全管理體系

為了達成確保建築專案整體處於安全狀態這樣的目的，一定要把安全管理制度進行健全。這個制度屬於安全管理關鍵所在，它的完善程度會直接對安全管理的水準產生影響，和建築工程的整體安全是有關系的。當前這個階段，建築行業的管理者需要按照現行的法律規範，並且結合企業運營的實際情況，去構建出相適配的安全管控機制，通過把施工責任進行明確，來確保各項任務能夠得到有效落實，進而提升整體的執行效率。這樣做既能夠提高建築專案整體的安全管控水準，就算是發生了意外情況，也能夠迅速地把責任人找出來。同時，企業管理者應該結合工程的實際狀況，去構建起對應的預警體系，以便在出現突發狀況的時候能夠及時進行應對，從而減少安全事故所造成的損害。

結　語

隨著建築工程的重要性日益突出，它所存在的安全風險也受到了廣泛的關注。然而，目前施工現場所進行的安全管理仍然存在著不足之處，主管部門需要對這一情況給予充分的重視。應該對施工流程進行系統化的梳理，積極地把先進技術引入進來，並且加強對施工人員開展技術培訓。通過引入數位化的技術模式，能夠及時系統地把安全隱患消除掉，有效地對現場的危險源進行規避或有效的控制措施，從而保障建築工程可以持續穩健長遠發展，為建築企業創造出更大的安全文化價值。

參考文獻

［1］王惠芬。建築安全管理工作中存在的不利因素及相關建議［J］. 房地產世界, 2022（16）：97–99.

［2］陳亮。建築安全管理工作的問題及策略［J］. 現代行銷（上旬刊）, 2022（7）：148–150.

［3］王莉華。建築安全管理工作中存在的不利因素及對策［J］. 工程技術研究, 2021, 6（3）：143–144.

［4］徐福順。淺談建築安全管理存在的問題及對策［J］. 城市建設理論研究（電子版）, 2020（14）：20.

［5］張有玉。建築安全管理存在的問題及策略［J］. 建材與裝飾, 2019（8）：182–183.

论风险分级管控在建筑施工项目安全生产管控的重要性

陈　伟
珠海市建筑安全协会

摘　要：建筑施工工序交错繁杂、露天及高空作业占比高、作业环境动态多变，施工现场危险源具备隐蔽性、突发性与叠加性特征，始终是工程领域安全生产监管的重点与难点。风险分级管控作为建筑施工双重预防机制的核心内核，是推动施工现场安全治理从“事后补救、被动整改”向“事前预判、源头防控”转型升级的关键抓手。本文依托笔者长期担任建筑企业高层安全管理、统筹湾区多个在建项目的实操经验，结合多次参与珠海市建筑施工生产安全事故调查、执笔事故技术报告的一线研判经历，总结海量事故调查核心规律：绝大多数建筑施工安全事故的直接诱因为作业人员违章作业，深层根源为组织架构配置缺陷、安全管理制度缺位、管控流程覆盖不全等管理体系风险，人的不安全行为与体系管理失效是事故高发的核心症结。本文以广东南粤建筑工程有限公司香山云道山林钢结构动火高风险管控项目为实证载体，系统探究风险量化辨识、标准化分级定级、差异化闭环管控的实操价值与落地路径，重点补齐传统管控中人员不安全行为、组织、制度、流程四大管理类风险的管控短板，创新引入作业人员违章性格辨识、前置化人为风险干预的科学管控方法。研究严格对标国家、省、市三级安全生产法律法规及住建行业专项规范，全程采用广东省住建厅主推的风险矩阵法（L×S）作为唯一评估工具；同时以 2026 年 7 月 1 日即将正式实施的 GB 6441–2025《生产安全事故分类与编码》（27 项事故分类）为全新辨识标尺，对项目及典型事故开展全域风险回溯、盲区补判与体系优化，全面细化房屋市政工程常规工序、大型设备、临时用电、六大类危大工程的物态、环境、人员、管理全维度风险辨识标准、定级规则与靶向管控策略。通过“正面成功管控+反面事故教训”的双向对比论证，验证标准化风险分级管控体系在源头化解物态隐患、整治人为违章、补齐管理漏洞、压降施工安全事故中的核心作用。同时结合行业数字化发展趋势，补充人工智能技术与风险分级管控体系融合应用的发展方向，可为粤港澳大湾区建筑施工安全生产的精细化、标准化、智能化、合规化管控提供可复用的理论参考与实操范式。

关键词：建筑施工；风险分级管控；风险矩阵法；安全生产；危大工程；事前预防；人为不安全风险；管理体系风险；违章行为管控；GB 6441–2025

一、引　言

现阶段，粤港澳大湾区城市更新、市政配套、文旅基建工程建设持续提速，区域建筑施工呈现多项目并行、多专业交叉、作业场景复杂、季节性风险叠加的管控特征。其中，山林

步道、高空钢结构、临水临坡等特殊工况项目受地形地貌、气候变化影响显著，传统依赖个人经验、侧重物态与环境隐患排查的粗放式安全管理模式，已难以适配复杂场景下的高精度安全管控需求。长期以来，建筑施工安全事故高发频发的核心症结，集中体现为双重维度管控缺失：一是传统管控聚焦设备、环境、工序等显性物态风险，忽视人员不安全行为、组织架构缺陷、管理制度漏洞、管控流程缺失等隐性管理风险；二是风险辨识精度不足、分级管控标准不统一、管控措施同质化严重、高危点位专项管控缺位，最终导致源头防控体系失效、人为隐患与管理漏洞持续累积并演变为安全事故。

结合笔者长期统筹湾区在建项目安全管理、深度参与珠海市绝大多数建筑施工安全事故调查的一线实操经验可明确：建筑施工领域90%以上的可控生产安全事故，直接诱因均为作业人员习惯性违章、侥幸作业等不安全行为，深层根源为企业安全管理体系失效。具体表现为安全管理岗位配置不足、专业人员能力缺失的组织风险，全员安全生产责任制不健全、考核奖惩不严、制度无针对性的管理风险，以及安全管控流程碎片化、未实现“纵向到底、横向到边”全覆盖的流程风险。物的缺陷、环境的隐患仅为事故发生的次要条件，人的违章行为与管理体系漏洞，才是触发安全事故的核心根源。

风险分级管控的核心要义，是依托标准化、量化型风险评估工具，打破传统“重物轻人、重现场轻管理”的管控误区，实现物态风险、环境风险、人员风险、管理风险全域危险源精准辨识、风险等级科学划分、管控层级精准匹配，构建全流程、前置化、闭环式的安全预防体系。笔者长期任职广东南粤建筑工程有限公司常务副总，全面负责企业安全生产统筹管理工作，深耕湾区建筑施工安全高层管控与技术研判一线，常年统筹管理数十个在建项目的安全体系搭建与落地工作。同时，笔者多次受邀参与珠海市建筑施工领域生产安全事故调查、技术研判及事故技术报告编制，亲历多起典型事故复盘，全程参与横琴台商总部大厦“3·25”较大坍塌事故的技术调查与成因剖析。结合多年一线管控实操与官方事故调查经验可得出结论：建筑施工领域绝大多数可控生产安全事故并非偶然施工失误导致，其本质是风险分级管控体系虚化、人为风险辨识缺失、管理类风险未纳入分级管控、差异化管控缺位，造成安全生产源头防线失守。风险分级管控的标准化、全维度落地质量，直接决定建筑工程项目的安全生产底线。

值得重点强调的是，国内建筑施工风险辨识与事故管控即将迎来统一强制性国标规范。GB 6441-2025《生产安全事故分类与编码》已于2025年12月31日发布，定于2026年7月1日正式强制实施，将替代沿用数十年的GB/T 6441-1986旧标准。该新标准核心革新为将生产安全事故类型由传统20类扩充至27类，新增跌落、水害、滑坡、泄漏、各类爆炸细分类型及人为操作失误、管理缺陷关联事故分类，全面覆盖山林施工、临水基坑、高空作业、有限空间等特殊场景隐性风险及人为违章衍生风险，填补了传统事故分类重物态、轻人为、弱管理的管控盲区。本文在事故复盘、案例剖析、体系重构环节，严格对标该最新国标27项事故分类框架，结合广东省住建厅风险矩阵法（L×S）开展双向标准化研判，重点补齐人员不安全行为、组织、制度、流程四大管理类风险的辨识与管控短板，查摆传统管控模式的短板、补齐旧版事故分类的管控盲区，实现危险源识别、事故类型判定、风险等级定级、靶向管控的全流程合规统一，契合行业标准化、规范化发展新要求。

随着数字技术迭代升级，人工智能逐步融

入建筑施工全流程安全管理，为传统风险分级管控模式提质增效、转型升级提供了全新技术路径。基于此，本文结合官方典型事故教训、正反对照实操案例、三级法定规范体系，以广东省住建厅标准化风险矩阵法为核心工具、GB 6441–2025 新国标 27 类事故分类为辨识基准，系统阐释风险分级管控的治理逻辑、失效机理与标准化落地路径，重点破解人为违章风险前置识别、违章性格科学研判、管理体系风险分级管控难题，并进一步探索人工智能与人为风险、管理风险管控深度融合的应用场景、实施价值与未来发展方向，构建“人–机–环–管”四位一体的全维度风险分级管控体系。

二、建筑施工风险管控缺失引发的安全事故诱因分析

梳理近年全国建筑施工领域安全事故统计数据与笔者参与研判的珠海本地全部典型事故案例可知，绝大多数施工安全事故均非突发偶然事件，而是长期依赖经验化风险判定、分级管控机制流于形式、安全管控体系不完善，尤其忽视人为不安全行为与管理体系隐性风险，导致隐患持续叠加、最终集中爆发的必然结果。结合行业共性问题与一线实操经验，当前建筑施工风险管控失效主要存在六大核心短板，新增四大管理类风险短板，彻底补齐传统管控盲区，同时在适配即将实施的 GB 6441–2025 新版国标分类要求方面存在明显滞后。

一是风险辨识存在重大盲区，重物态环境、轻人为管理。多数施工单位仅聚焦设备、工序、场地等常规工序的显性物态、环境风险，长期沿用 GB/T 6441–1986 旧版 20 类事故类型开展辨识，未对照 GB 6441–2025 国标新增的 27 项事故分类要求查漏补缺，完全忽视作业人员违章行为、管理人员能力缺失、制度流程漏洞等核心隐性风险。结合海量事故调查数据佐证：人为违章、管理失效是事故发生的首要直接原因，远高于设备故障、环境变化等客观因素，传统风险辨识体系本末倒置，存在致命管控漏洞。同时忽视山林、临水、高空、干燥季节等特殊场景衍生的隐性风险，对新增的滑坡、水害、泄漏、跌落等新型事故风险辨识缺位。尤其秋冬干燥时段，山林植被含水率低、易燃性强，动火作业极易诱发山林火灾，此类季节性、环境性隐性风险常被常规排查遗漏，与新国标精细化辨识要求严重脱节。

二是分级标准不统一，管控缺乏差异化。多数项目未采用官方标准化评估工具，仅凭管理人员从业经验主观判定风险等级，未结合国标事故分类精准匹配风险类型，对物态风险、人为风险、管理风险无差异化定级标准，对高、中、低等级风险点位采取同质化管控模式，高危点位、高风险人员、漏洞化制度无专项方案、无专人管控、无精准整改机制，极易造成重点风险失控。

三是管控闭环不完善，事前预防能力薄弱。日常安全巡查流于形式，侧重事后隐患整改，缺失人为违章前置预判、管理风险提前排查的动态化、靶向化督查举措，微小违章行为、制度漏洞、流程缺陷逐步升级为重大风险，最终诱发安全事故，无法实现新国标要求的“一类风险、一套管控、全程闭环”的标准化管控逻辑。

四是危大工程管控虚化，关键环节漏洞频发。深基坑、高支模、起重吊装、有限空间等高危工序未落实量化分级管控，未对照 27 类事故分类全面排查坍塌、坠落、中毒窒息、涌水滑坡等专项风险，同时忽视高危作业人员违章操作、现场管理缺位等人为风险，组织管理、技术管控、过程监督衔接不畅，是坍塌、火灾、触电、机械伤害等事故的主要诱发因素。

五是组织架构风险突出，管理岗位履职失效。当前建筑施工项目普遍存在安全管理组织架构配置不规范、岗位人员履职虚化的系统性

问题，这一行业乱象与住建部2025年9月26日发布、2026年3月26日正式实施的建质规〔2025〕3号文《建筑施工企业、工程项目安全生产管理机构设置及安全生产管理人员配备办法》法定管控要求严重相悖，该文件同时废止建质〔2008〕91号、建质〔2011〕111号两项旧规，是当前建筑施工安全组织管控、人员配置的唯一刚性法定依据。新规共计四章四十二条，从机构独立设置、岗位层级配置、人员资质门槛、专职人员量化配比、履职行为红线、动态监管追责六大维度，彻底统一了行业组织安全管控标准，明确严禁安全管理机构与工程、技术、质量等部门合并混岗，严禁安全管理人员兼职履职、跨岗履职，杜绝“一人多职、一岗多责”的虚化管控问题。在人员量化配备层面，新规明确分级硬性标准：企业端按资质等级划定专职安全员最低配额，特级总承包企业不少于6人、一级不少于4人、二级及以下不少于3人；项目端按建筑面积、合同价款、施工人数精准配比，1万㎡以下房建项目至少配备1名持证专职安全员，超规模危大工程、多工序交叉高危项目需额外增配专职安全人员。同时明确高危项目强制增设安全总监岗位的硬性条件，要求建筑面积超10万㎡房建项目、合同价款超4亿元市政项目、现场施工人员峰值超500人的项目，必须独立设置安全总监岗位，且岗位人员需具备建筑施工安全类注册安全工程师资质、B类考核合格证书及2年以上行业安全管理经验。反观行业现状，多数施工项目未对标新规量化标准优化组织架构，普遍存在安全管理机构不独立、专职人员配比不足、岗位资质不达标、安全总监缺位、管理人员兼职履职等违规问题，现场安全管理人员年轻化、非专业化、履职形式化现象突出，不具备高危工况风险辨识、违章行为管控、危大工程全程监管的专业能力，无法适配山林动火、高空钢结构、深基坑等高危项目的精细化管控需求，直接导致现场违章无人制止、隐患无人排查、责任无人落实，形成贯穿项目全周期的组织层面系统性风险。

六是制度流程体系不完善，管控覆盖存在盲区。一方面，全员安全生产责任制流于形式，制度无针对性、考核无刚性、奖惩无力度，对管理人员、作业人员的安全履职行为无约束，违章成本极低；另一方面，安全管控流程碎片化，未构建“纵向到底、横向到边”的全覆盖体系，管理层、作业层、分包层管控脱节，岗位衔接存在漏洞，流程管控空白区域成为事故高发隐患点。

依托笔者参与珠海市建筑施工事故调查、执笔事故技术报告的一线专家工作经历，以横琴台商总部大厦“3·25”较大坍塌事故为典型反面样本，结合珠海市政府官方事故调查报告结论，可精准印证人为风险、管理风险管控缺失及风险分级管控“源头第一道防线”失守的致命危害。该事故造成3人死亡、5人受伤，直接经济损失471万元，被官方定性为可控性生产安全责任事故。结合官方调查结论与现场技术研判，本次事故不存在不可抗力因素与技术瓶颈，核心成因在于项目人为违章管控失效、组织管理虚化、制度流程缺位，叠加物态风险分级管控体系完全失效、前置预防机制彻底缺位，具体体现在四个维度。

其一，风险辨识非标准化、无量化支撑，人为与管理风险完全漏判。项目未严格执行广东省住建厅风险矩阵法开展全域危险源排查，全程采用经验化粗放管理模式，同时未依据标准化事故分类体系全面辨识风险，遗漏核心筒23层高空钢筋周转平台钢梁承载力不足、荷载超限、偏心堆载等重大隐性危险源，更未识别作业人员违规堆载、管理人员默许违章、现场管控缺位等核心人为与管理风险，未完成风险量化定级，无标准化风险台账，形成长期管控盲区。结合事后复盘，对照即将实施的GB

6441–2025 新国标回溯判定，该事故可精准归类为坍塌、高处坠落复合型风险事故，同时包含人为操作失误、管理缺陷两类核心诱因，属于新版国标重点管控的核心事故类型，充分暴露传统经验辨识模式只重物态、忽视人因的局限性。

其二，管控模式同质化、无差异化施策，人因高危风险无专项管控。项目未区分高空临时承重结构、高空重载作业的特级风险属性，未结合对应事故风险等级匹配专项管控机制，对极高风险作业与常规作业实行“一刀切”管控，未针对高危作业人员、高风险违章行为搭建前置管控机制，未升级公司级管控层级，未配套专项防护方案、荷载管控标准与重点监护机制。

其三，管控流程无闭环、督查工作形式化，制度考核无刚性约束。参建各方安全责任悬空，高危点位动态巡查、隐患排查、全过程作业管控落实不到位，对钢筋隔夜集中堆载、偏心放置等重复性违规隐患放任不管，未完成隐患闭环整改。全员安全生产责任制考核流于形式，管理人员履职不到位无追责、作业人员习惯性违章无处罚，制度约束失效、流程管控断层，多重管控缺失叠加，最终引发工字钢梁屈曲失稳、操作平台整体垮塌。

其四，组织架构配置不合理，专业管控能力缺失。该坍塌事故项目未严格遵循建质规〔2025〕3 号文的强制性管控要求，存在多项组织架构合规性缺陷，是事故发生的核心管理根源。一是未独立设置安全生产管理机构，安全管理职能与施工技术部门混岗运行，违背新规“安全管理机构为独立职能部门”的核心要求；二是专职安全管理人员配备未达新规量化标准，现场持证 C 类安全员缺位、在岗人员不足额，高危作业无专属专职监管人员；三是高危超大工况未依规增设安全总监岗位，缺失高层级专业安全管控岗位；四是管理人员履职严重缺位，未落实新规要求的“项目经理、安全总监每月现场带班时长不低于当月施工时长 80%”的履职红线，现场巡查频次严重不足、专业管控形同虚设。整体来看，项目存在新规明令禁止的机构混设、人员缺位、岗位虚化、履职不足等多重违规问题，在岗管理人员专业能力无法匹配高空重载特级风险工况的管控需求，无法精准识别隐性安全隐患、制止重复性违章行为，无有效干预、督查与追责机制，组织层面系统性管控彻底失效，大幅放大人为违章与管理漏洞风险，最终诱发重大安全事故。

综上，结合该起官方定性事故与笔者研判的近百起珠海本地建筑施工事故复盘规律可总结：90%以上施工安全事故的直接原因为作业人员违章作业，根本原因为组织架构、管理制度、管控流程等管理体系失效，辅以物态、环境风险管控缺位。标准化风险辨识缺失、分级管控体系缺位、差异化施策失效、闭环管理流于形式，且未对标国标事故分类开展人因、管理风险精准研判，是当前建筑施工安全事故频发的四大核心根源。风险分级管控作为安全生产前置核心防线，一旦出现人为风险漏判、管理风险失管、物态风险失控、管控降级、责任悬空，原本可通过源头治理化解的管理类、人员类、工艺类隐患将持续累积、逐级放大，最终演变为人员伤亡、财产损失的重特大安全事故。反之，严格依托官方标准化风险矩阵法，对标 GB 6441–2025 国标 27 类事故分类标准，开展人–机–环–管全域、精准、动态的前置风险辨识，科学划分人员、组织、制度、设备、环境各类风险等级，匹配层级化管控资源与靶向措施，刚性落实全流程闭环管理，可从源头切断人为违章、管理失效的隐患滋生链条，有效规避绝大多数人为、管理类可控安全事故，充分彰显全维度风险分级管控的源头治理价

值。

三、实操案例：基于风险矩阵法的香山云道项目山林动火高风险管控实践

笔者任职广东南粤建筑工程有限公司常务副总期间，统筹负责企业全域在建项目的安全生产管理工作，同期在岗项目共 58 个，覆盖房建、市政、文旅基建等多元业态，具备项目布局分散、施工类型多样、安全管控覆盖面广、管控压力集中的特点。其中，香山云道项目为珠海市特色山林文旅钢结构步道工程，主体结构依托山林山体搭建，作业区域被原生植被全覆盖，施工环境特殊、季节性火灾风险突出，区别于常规房建与市政项目，属于高难度、高风险管控工程。本次项目管控除传统物态、环境风险管控外，重点新增人员违章风险前置辨识、组织专项管控、制度刚性考核、全流程闭环监管，补齐人因与管理风险管控短板。

3.1 基于风险矩阵法与国标分类的项目核心风险辨识与定级（新增人因+管理风险）

该项目施工周期覆盖秋冬干燥季节，作业面下方山体留存大量干枯树枝、杂草等易燃物资，植被含水率低、燃点极小，钢结构焊接动火作业的火灾防控风险极为突出。同时结合事故调查规律，山林动火高危作业的最大隐患并非设备、环境本身，而是作业人员无证上岗、侥幸作业、违章操作、监护缺位等人为不安全行为，以及现场管理组织松散、制度执行不严、流程管控缺失等管理风险。为实现精准合规、靶向高效的安全管控，项目施工实施阶段，现场风险辨识严格遵循 GB/T 6441-1986（20 类事故分类）开展工作；本文在事后总结、风险复盘与体系升级环节，同步对照即将实施的 GB 6441-2025《生产安全事故分类与编码》（27 项事故分类）进行全维度校核，全面排查旧标准下的辨识盲区，重点新增人为操作失误、管理体系缺陷两类核心风险辨识维度。本次作业优先依据现行标准判定核心事故类型为火灾事故，同时叠加高空作业坠落、山体滑坡、设备伤害等衍生物态风险，重点新增人员违章作业、岗位履职缺位、制度管控失效等人因与管理风险，全面覆盖项目潜在安全隐患。在此基础上，公司安全管理团队严格遵循广东省住建厅风险矩阵法（L×S）标准化评估体系，对项目人员、组织、制度、设备、环境全工序、全点位、全作业流程开展全域危险源量化辨识与双维度打分评级工作。

从风险发生可能性（L）分析：秋冬山林长期干燥无雨，焊渣坠落引燃枯草属于常态化极易发生工况，同时高危动火作业人员易出现侥幸违章、无证操作、脱离监护等行为，管理岗位易出现履职松懈问题，综合赋值 L=5 分；从风险后果严重性（S）分析：一旦引发山林大火，叠加人为违章失控、管理缺位，将造成工程设备损毁、重大财产损失，同时引发生态破坏、负面舆情及公共安全责任事故，后果不可逆、影响极其恶劣，赋值 S=5 分；按照官方公式 R=L×S 计算，风险值 R=25，对照分级标准判定该项目物态风险、人因风险、管理风险叠加后为红色特级重大风险，纳入公司级专项管控范畴，为同期 58 个在建项目中风险等级最高的管控点位。

项目核心安全隐患集中于双重维度：一是物态与环境隐患，钢结构高空焊接作业产生的高温焊渣坠落随机性强、辐射范围广，极易引燃作业面下方山林干枯植被，引发火情并快速扩散蔓延；二是人为与管理隐患，特种作业人员无证上岗、习惯性违章、监护缺位，管理人员履职不到位、制度执行宽松、考核追责不严，是火情隐患出现的核心诱因。依据 GB/T 6441-1986，该工况精准对应火灾事故核心类别；结合 GB 6441-2025 新国标回溯研判，该场景还覆盖高空坠落、山体滑坡、人为操作失误、管理缺陷等多项新增细分风险，进一步印

证传统分类标准重物态、轻人因、弱管理的管控短板。相较于常规在建工程，该项目山林动火风险具备突发性、隐蔽性、毁灭性特征，传统同质化管控模式与旧版事故分类标准无法适配高危作业人因与管理风险管控需求，必须突破经验化管理模式，落实覆盖人、机、环、管的最高等级专项分级管控举措。

3.2 针对矩阵法定级的特级风险专项管控措施（新增人因+管理管控）

依据广东省住建厅“风险等级与管控层级、管控力度精准匹配”的核心原则，结合火灾类事故专项管控要求，针对本次矩阵法评定的红色特级重大风险，公司在保障其余 57 个在建项目常态化安全管控全覆盖、无空档的基础上，专项抽调骨干专职安全管理人员组建驻场巡查督查小组，全权负责香山云道项目动火作业全流程、全时段专项管控，落实差异化、最高等级的靶向管控机制，重点补齐组织架构、管理制度、管控流程、人员行为四大短板。

组织管控层面：搭建独立的公司级专项管控架构，脱离项目部常规管控体系，实行专人专岗、全程驻场值守，补足现场专业管控力量，杜绝管理人员兼职、能力不足、履职虚化问题，独立开展风险督查、隐患排查、人员行为监管与作业全程监护，压实层级管控责任，彻底解决组织架构配置不合格、不专业的系统性风险。

制度管控层面：针对性完善项目全员安全生产责任制，细化管理人员、作业人员、分包班组的安全履职清单，建立高危作业违章专项考核奖惩制度，打破原有制度宽泛、无针对性、考核不严的弊端，明确无证作业、脱离监护、违规动火等行为的刚性处罚标准，实现“岗位有责任、履职有考核、违章有追责”，从制度层面约束人为不安全行为。

流程管控层面：构建“纵向到底、横向到边”的全覆盖管控流程，纵向落实公司–项目部–班组–岗位四级管控链条，横向打通安全、技术、施工、设备、监理全岗位协同管控机制，杜绝流程空白、管控脱节；严格执行特级风险作业专项审批制度，刚性落实“无审批不作业、无监护不施工、无防护不开工”的安全红线，实现作业前预判、作业中监管、作业后复盘的全流程闭环。

技术管控层面：前置源头防控举措，动火作业前彻底清理作业半径内干枯植被，全覆盖铺设防火隔离毯，足额配置灭火器、消防水源等应急物资，从硬件层面阻断火灾引燃条件，精准对标新国标火灾事故防控技术要求。

巡查管控层面：针对高空焊渣隐蔽坠落、局部火情隐蔽性强，以及作业人员习惯性违章的特点，实行不间断巡回检查，重点排查山林隐蔽区域隐患与人员违规操作行为，实现风险动态监测、人为隐患实时处置、管理漏洞即时补齐。

3.3 管控成效与实践启示（强化人因与管理风险结论）

项目依托“国标事故分类精准辨识+风险矩阵法量化定级+差异化闭环管控”搭建了科学完善的标准化安全管控体系，但施工阶段仍出现两次山林初始火情隐患。经现场核查与溯源研判，两次火情隐患均非设备、环境等物态风险导致，100%为分包作业班组习惯性违章的人为不安全行为、末端管理履职不到位引发，具体表现为钢结构焊接特种作业人员未持证上岗，特级风险动火作业未严格落实专人现场监护制度，属于典型的作业层违章、管理层失管的双重问题，完全契合笔者多年事故调查总结的“人为违章是事故核心诱因”的行业规律。对照 GB 6441–2025 新国标复盘，此类组织管理缺位、制度执行不严、人员违规作业的行为，正是诱发火灾事故的典型人为与管理类管控漏洞。

两次火情均由高空焊接焊渣引燃局部山林

枯草所致，得益于项目搭建的公司级动态巡查、全天候监测的分级管控闭环机制，以及针对性的人因风险管控举措，公司安全部专职管理人员第一时间发现人员违章行为、处置初始火情，火情未发生扩散蔓延，未造成人员伤亡、财产损失及生态环境破坏。为严肃安全管控纪律、压实分包主体安全责任、根治习惯性违章陋习，笔者依据《中华人民共和国安全生产法》相关处罚规定，对两起违规作业的分包班组实施专项经济处罚，分别处以 12 万元、10 万元的安全违规处罚，同时对现场履职不到位的管理人员开展约谈问责、绩效考核扣分。通过刚性追责、从严问责的管控手段，彻底纠治了作业班组的习惯性违章陋习，倒逼管理人员履职尽责、作业人员严格落实特级风险作业持证上岗、专人监护、前置防火防护等标准化管控要求。经专项整治后，涉事班组全面规范作业行为，项目后续施工全过程未再出现火情及各类安全隐患，实现了风险管控从体系标准化搭建、管理漏洞补齐、人为隐患根治到现场刚性落地的全维度闭环。

本项目形成的“标准化体系搭建—管理漏洞排查—人为违章整治—刚性追责整改—长效平稳管控”完整实践链条，与笔者亲历调查的横琴台商大厦“3·25”坍塌事故形成高度契合的正反对照论证，精准印证人因风险、管理风险是建筑施工安全管控的核心重点。反面事故案例中，项目不仅物态风险管控失效，更存在组织架构虚化、制度流程缺位、人为违章放任不管的核心问题，多重漏洞叠加导致重大亡人事故。而香山云道项目通过补齐管理体系短板、前置管控人为违章行为，实现隐患清零、长治久安。由此可见，标准化风险分级管控体系是筑牢建筑施工安全底线的核心基础，对标最新国标开展人–机–环–管全维度风险分类辨识是管控精准化的前提，整治人员不安全行为、补齐管理体系漏洞是管控落地的核心，而健全的追责闭环机制是保障管控措施落地见效的关键抓手，唯有实现“国标分类+科学体系+刚性执行+人因管控+管理赋能”五位一体协同发力，才能从根本上防范人为违章、管理失效、物态失控的多重风险，守住建筑施工安全生产红线。

四、建筑施工风险分级管控的法定合规依据

风险分级管控并非施工企业自主选择的管理手段，而是国家、地方政府、行业主管部门多层级法律法规明确界定的强制性法定责任。当前已形成“国家上位法引领、地方条例细化标准、行业文件规范实操、国标体系统一辨识”的完整合规体系，且明确要求依托标准化量化工具、统一事故分类标准，落实人员行为、管理体系、设备环境全维度精准化、差异化的风险分级管控工作。

4.1 国家上位法规依据

《中华人民共和国安全生产法》（2021 修正）第二十一条明确界定生产经营单位主要负责人的法定安全生产职责，其中明确要求：“组织建立并落实安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防工作机制，督促、检查本单位的安全生产工作，及时消除生产安全事故隐患。”同时，法规第四条明确规定，生产经营单位需构建安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制，健全风险防范化解体系，通过推进安全生产标准化建设，全面提升安全生产管控水平。条文明确涵盖人员不安全行为管控、管理体系完善、隐患闭环治理等核心要求，从国家法律层面确立了全维度风险分级管控的法定强制性，明确企业主要负责人为第一责任人，为建筑施工全域人、机、环、管量化风险管控提供根本法律支撑。

《建设工程安全生产管理条例》第二十六条结合工程建设行业特性细化风险管控要求，规定施工单位需在施工组织设计中编制安全技

术措施与临时用电方案，对危大工程编制专项施工方案并附验算结果，经审批后由专职安全员全程现场监督。该条例实质要求施工单位前置开展全维度风险辨识，依托标准化事故分类排查物态、环境、人为、管理全方位隐患，针对高危工序、危大工程、高风险作业人员落实专项管控与现场监护，为建筑施工差异化分级管控、高危工程重点管控、人因风险前置管控提供行政法规支撑。

4.2 国家强制性国标依据（GB 6441–2025）

GB 6441–2025《生产安全事故分类与编码》为建筑施工风险辨识、隐患排查、事故研判的最新国家级强制标准，定于 2026 年 7 月 1 日正式实施，未来将成为行业风险分类管控的核心合规依据。该标准摒弃沿用数十年的 20 类事故分类模式，优化扩充为 27 类标准化事故类型，新增人为操作失误、安全管理缺陷两类核心事故诱因分类，全面覆盖建筑施工火灾、坍塌、高处坠落、物体打击、机械伤害、触电、中毒窒息、滑坡、水害、泄漏及人因违章、管理失效等全场景风险，填补了传统管控重物态、轻人因、弱管理的空白。标准正式实施后，将明确要求各施工单位开展风险辨识必须以 27 类事故类型为唯一分类基准，实现人员风险、管理风险、物态风险、环境风险与事故隐患、管控措施的一一对应，彻底解决行业风险辨识分类混乱、漏项缺项、重客观轻主观的乱象，为建筑施工全维度风险分级管控的标准化、规范化、统一化提供权威技术支撑。现阶段企业可提前对标新标准开展体系改造、人因风险预辨识与台账升级，实现新旧标准平稳过渡。

4.3 地方专项法规与行业文件依据

《广东省安全生产条例》（2023 修订）第三十一条细化省级管控标准，明确要求生产经营单位落实安全风险分级管控制度，开展人员、设备、环境、管理全方位风险识别、分析与评价，依据风险等级匹配对应管控措施，编制动态更新的风险分级管控清单，明确风险类别、位置、责任主体及管控举措，重大安全风险需按时上报属地监管部门。该条文规范了省内建筑施工企业全维度风险辨识、量化评价、分级施策、台账更新、重大风险上报的标准化合规流程，且可完美对接 GB 6441–2025 国标分类体系。

《珠海经济特区安全生产条例》立足珠海山林文旅项目多、滨海施工环境复杂的地域特征，细化特殊场景管控要求，明确生产经营单位需建立风险分级管控机制，对生产经营风险开展全员、全流程、全场景辨识、评估、分级，落实分类分级管控举措，对人为违章、管理缺位等隐性风险实施重点管控、动态监测与预警，精准适配香山云道这类特殊工况项目的人员、管理、环境叠加风险管控需求，与新国标全维度风险管控要求高度契合。

广东省住建厅专项文件进一步统一全省建筑行业实操标准，明确要求建筑施工企业全覆盖开展施工全过程风险辨识，将作业人员行为风险、项目管理体系风险纳入核心辨识范畴，依托风险矩阵法划分风险等级，对标国家事故分类标准完善风险台账，对特级、一级高风险点位、高风险作业人员、高漏洞管理环节落实专项方案、专人监护、动态巡查、闭环整改的差异化管控措施，建立动态风险台账，实现分级管控标准化、常态化落地。同时，严格衔接建质规〔2025〕3 号文组织管控新规，将文件明确的安全管理机构独立设置、专职人员量化配备、岗位资质合规、安全总监专项配置、管理人员履职留痕、带班时长达标等硬性法定要求，纳入项目风险分级管控前置核心核查内容，将组织合规性作为风险管控落地的首要前提，从组织源头筑牢安全生产管控防线。该系列文件正式确立风险矩阵法（L×S）为广东省房屋市政、文旅基建项目风险分级管控的唯一

合规评估工具，结合 GB 6441-2025 国标分类体系、建质规〔2025〕3 号文组织管控规范，形成“全维度分类辨识+量化定级+分级管控+组织合规保障”的完整合规闭环，为本文全域统一应用该体系提供权威官方依据。

4.4 建质规〔2025〕3 号文专项政策解读与学术支撑

建质规〔2025〕3 号文《建筑施工企业、工程项目安全生产管理机构设置及安全生产管理人员配备办法》是住房和城乡建设部出台的行业强制性部门规章，文件于 2025 年 9 月 26 日正式发布，2026 年 3 月 26 日起全面施行，同时废止建质〔2008〕91 号《建筑施工企业安全生产管理机构设置及专职安全生产管理人员配备办法》、建质〔2011〕111 号《房屋市政工程项目安全生产负责人和专职安全生产管理人员配备办法》两项旧版规范，是当前及今后一段时期，全国建筑施工企业、房屋市政工程项目安全管理机构设置、岗位配置、人员资质、在岗履职、高危管控的唯一法定强制性标准。该文件的出台，针对性解决了沿用十余年旧规范标准滞后、配比宽松、履职模糊、高危管控缺位、处罚依据不足的行业痛点，从立法层面将建筑施工组织安全管理由“企业自律管理”升级为“法定合规管理”，大幅抬高了建筑行业组织架构安全管控准入门槛。本文聚焦建筑施工组织风险、岗位风险、履职风险等管理类隐性风险开展研究，该新规为论文组织风险辨识、合规漏洞查摆、层级管控体系搭建、岗位标准化配置、履职刚性约束提供了权威、最新的行业政策依据与法定技术支撑。

相较于旧版规范，建质规〔2025〕3 号文在立法逻辑与管控体系上实现全方位迭代升级，核心革新亮点集中体现为机构法定独立、人员量化标配、高危专项设岗、履职刚性留痕、违规可溯追责五大维度，彻底根治行业长期存在的安全部门附属性办公、安全员兼职混岗、岗位配置凭经验、高危项目无高层管控、履职考核无标准的系统性乱象。第一，明确安全管理机构独立设置的法定底线。新规严格界定安全生产管理机构为企业、项目部独立职能部门，明令禁止与施工管理、技术质量、设备物资、经营生产等业务部门合并、挂靠、合署办公，严禁安全管理职能依附于生产职能，从组织架构顶层设计上破除“重生产、轻安全”的结构性缺陷，为风险分级管控体系独立运行、隐患排查专职督查、人因风险专项管控提供坚实的组织架构保障，从根源规避组织体系虚化风险。第二，统一企业、项目双层级专职安全管理人员量化配备标准，实现岗位配置有据可依、违规可判、监管可查。企业层面按施工资质等级划定最低专职安全员配额红线：特级施工总承包企业不少于 6 人、一级施工总承包企业不少于 4 人、二级及以下施工总承包企业不少于 3 人，各类专业承包企业依据施工类别、作业风险规模足额匹配专职安全管理人员，高风险专项施工领域需增设专项安全员。项目层面构建“建筑面积、合同造价、现场峰值施工人数、工程风险等级”四维联动配比机制，细化量化配置标准：1 万㎡及以下房建项目、1 亿元以内市政常规项目最低配备 1 名持证 C 类专职安全员；建筑面积 1 万㎡～5 万㎡房建项目、造价 1 亿～4 亿元市政项目配备不少于 2 名专职安全员；超规模项目、多工序交叉作业项目、危大工程集中施工时段，按每增加 5 万㎡建筑面积或每增加 4 亿元造价增量逐级增配专职安全人员，且高危作业全过程必须实现专职安全员在岗监护、全程旁站。

第三，首创高危项目安全总监强制配置制度，补齐超大超高风险项目高层级管控空白，实现重大风险专项管控、专人专责。新规明确划定安全总监强制设立清单：建筑面积超 10 万㎡大型房建项目、合同价款超 4 亿元市政基础设施项目、现场施工峰值人数超 500 人的集群

化施工项目，以及山林临水作业、高空钢结构施工、深基坑超危大工程、高边坡动火等高风险特殊工况项目，必须单独设置安全总监专职岗位，实行企业垂直委派制，人事管理、绩效考核、履职督查归企业安全部门统筹，脱离项目部属地管理，彻底规避项目部为赶工期、控成本弱化安全管控的利益性履职漏洞。同时，新规严格划定安全总监任职资质与从业门槛，要求在岗人员必须具备建筑施工领域注册安全工程师执业资格、安全生产 B 类考核合格证书，且具备 2 年及以上大型建筑项目全域安全管控从业经验，具备独立处置特级风险、排查系统性管理漏洞、统筹危大工程管控的专业能力，从岗位资质层面保障高危项目管控专业性。第四，固化核心岗位履职红线与全过程留痕考核机制，实现履职行为标准化、考核刚性化、失职追责法治化。新规明确项目经理、安全总监、专职安全员三大核心岗位履职量化指标，要求核心安全岗位人员月度现场带班、巡查履职时长不得低于当月施工总时长的 80%；超危大工程、特级风险作业施工期间，严禁安全管理人员脱岗、空岗、离岗，必须全程在岗监护。同时强制要求安全履职台账、巡查记录、隐患整改台账、安全教育台账全过程电子化、纸质化双留痕，作为主管部门督查、事故溯源、责任认定的核心依据，彻底整治传统管理中岗位虚设、履职敷衍、督查缺位、追责无据的行业顽疾。第五，增设明确违规罚则配套机制，将组织架构不合规、人员配比不足、岗位资质不达标、安全总监缺位、履职时长不达标、台账留痕缺失等行为，纳入住建部门常态化监督执法与信用扣分范畴，实现“违规即查处、失职即追责”，大幅提升组织管控合规约束力。

从本文学术研究与工程应用视角分析，建质规〔2025〕3 号文的落地实施，有效补齐了传统建筑安全风险管控的学术短板与实操漏洞，具备极强的理论价值与工程落地价值。其一，实现风险管控体系闭环互补，新规聚焦组织架构风险、岗位配置风险、人员履职风险三大管理类核心风险，将以往模糊的管理缺陷、岗位漏洞、履职失范问题转化为可量化、可判定、可管控、可追责的法定合规问题，与 GB 6441–2025 新国标新增的“安全管理缺陷、人为操作失误”事故分类形成上下呼应、双向赋能的完整管控闭环，构建起“国标定风险类型、新规定组织保障”的双重标准化体系。其二，破解传统管控“重物轻人、重现场轻管理”的学术弊端，为本文重点研究的人因风险、管理风险、组织风险分级管控提供法定依据，让论文提出的层级化组织架构优化、高危岗位专项配置、差异化履职考核、人因风险前置管控等创新举措，完全契合国家最新行业规范，具备充分的合规性、权威性与创新性。其三，为建筑施工风险分级管控的落地实效提供组织保障，风险辨识、定级、施策、闭环的全过程落地，均依托合规的安全管理组织架构、足额的专业管控人员、刚性的履职制度实现，新规从组织源头筑牢双重预防机制运行根基，解决了以往风险分级管控体系“纸上搭建、落地虚化”的行业难题。综上，建质规〔2025〕3 号文不仅是建筑施工企业组织架构合规建设的法定准则，更是本文构建全维度、标准化、可落地风险分级管控体系的核心政策支撑，对提升建筑施工管理类隐性风险管控水平、压降人为违章与管理失效诱发的安全事故具备重要的理论与现实意义。

综上，风险分级管控是建筑施工企业必须严格履行的安全生产法定义务，依托 GB 6441–2025 新国标完成人、机、环、管全维度风险分类辨识、采用广东省住建厅标准风险矩阵法开展量化定级、落实差异化分级施策，是广东省、珠海市住建领域统一明确的合规标准与实操准则，具备极强的合法性、规范性与工程实

用性。

五、建筑施工项目风险分级管控系统化落地实施体系（新增人因+管理风险体系）

结合现行法律法规规范、最新国标要求与多年一线安全管控实操经验，结合海量事故调查核心规律，建筑施工风险分级管控需搭建“人因风险管控为核心、管理体系风险为基础、物态环境风险为重点”的五位一体系统化落地体系，涵盖国标分类辨识、组织架构优化、制度体系完善、全流程闭环管控、量化技术支撑五大维度。本文以即将实施的 GB 6441–2025 国标 27 类事故类型为升级改造、风险复盘、新标准落地的核心辨识基准，重点强化人为违章、管理缺陷两类新增风险辨识管控；现阶段兼顾现行 GB/T 6441–1986 开展现场管控，实现新旧标准有序衔接；同时全程以广东省住建厅标准风险矩阵法（L×S）为核心唯一技术工具，覆盖人员行为、组织管理、制度流程、设备工序、作业环境全维度量化管控与精准施策，从根源上规避传统经验化管控、分类不规范、重物轻人的各类弊端。

5.1 组织措施：搭建适配全维度风险的层级化管控架构（新增组织风险管控）

针对传统项目安全管理岗位配置不足、人员不专业、履职虚化、机构不独立的组织风险，本文严格对标建质规〔2025〕3 号文最新行业法定规范，搭建标准化、合规化、层级化的全维度管控架构，从根源上杜绝机构混设、人员兼职、配置缺位、履职失范的系统性问题。结合新规核心条款要求，构建企业–项目双层级合规管控体系：企业层面，严格按资质等级足额配备专职安全管理人员，特级、一级总承包企业配齐专职安全团队，高风险施工领域额外配置机械类专项安全员，同时鼓励优质企业设立安全总监岗位，要求在岗人员具备中级及以上注册安全工程师资质、A 类考核证书及 3 年以上行业安全管理经验，统筹全域项目人因风险、管理风险、物态风险的国标分类辨识、矩阵法量化评估与分级管控工作，常态化核查各项目机构设置、人员配置、岗位资质、履职台账的合规性，全面杜绝无证上岗、兼职履职、能力不匹配等违规问题。项目层面，严格落实新规独立机构设置要求，所有在建项目单独设立安全生产管理职能部门，杜绝与其他部门合并办公；依据项目规模、施工风险等级足额配备持证专职安全员，严格执行 1 万㎡以下房建项目不少于 1 人、规模化项目按标增配的量化标准，针对超规模危大工程、山林动火、高空钢结构等高风险项目，依规增设项目安全总监岗位，严格把控任职资质与从业年限门槛，落实企业委派制管理，直接对接企业安全管理体系，规避项目部自主管理的履职漏洞。同时刚性落实新规履职考核制度，明确项目经理、安全总监每月现场带班时长不低于施工总时长 80%，超危大工程施工期间严禁管理人员擅自离岗，全程落实履职留痕、台账归档、动态督查机制。管控层级上严格遵循“风险等级匹配管控资源”原则，红色特级风险实行公司级专项管控、橙色一级风险实行项目重点管控、黄色一般风险实行班组常规管控、蓝色低风险实行岗位自主管控，完全契合新规组织管控标准，实现建筑施工安全组织架构的合规化、专业化、精细化落地，彻底补齐传统组织管控的短板漏洞。

5.2 制度措施：完善国标+矩阵法双标准化管控制度体系（新增制度风险管控）

针对传统全员安全生产责任制流于形式、无针对性、考核不严、奖惩缺失的制度风险，建立适配 GB 6441–2025 新国标与广东省住建标准的全套管控制度体系。一是细化全员安全生产责任制，分层明确企业负责人、项目管理人员、技术人员、安全员、班组负责人、一线作业人员的专属安全职责，杜绝职责重叠、责

任空白；二是建立作业人员违章行为分级考核制度、管理人员履职追责制度，针对不同等级的人为违章、管理失职设置对应处罚标准，实现“违章必罚、失职必究”；三是完善 27 类事故风险分类辨识、矩阵法风险量化打分评级、分级施策、动态更新、隐患闭环整改等核心制度，明确所有项目开工前必须完成全维度风险排查+矩阵法量化评估，施工全过程动态更新风险台账，高危风险点位、高风险作业人员专项建档、重点管控，实现风险辨识分类标准化、定级量化规范化、管控落地可追溯。

5.3 流程措施：构建全覆盖全周期闭环管控流程（新增流程风险管控）

针对传统管控流程碎片化、覆盖不全、纵向不通、横向不达的流程风险，固化“国标 27 类事故全域辨识—矩阵双维度打分—风险等级判定—分级差异化施策—动态巡查—人为违章前置干预—闭环整改—复盘更新”的全周期管控流程。构建“纵向到底、横向到边”的全覆盖管控体系：纵向打通公司–项目部–班组–岗位四级管控链条，层层压实责任；横向覆盖施工、安全、技术、设备、监理、分包全协同管控环节，杜绝流程空白。以 GB 6441–2025 完成人、机、环、管全维度风险类型精准划分，以矩阵法评估结果为唯一定级依据，划分四级风险等级并匹配对应管控举措，施工过程中根据工况、季节、工序、人员状态变化及时开展复评，动态调整管控力度，实现全流程闭环可控。

5.4 技术措施：双标准融合赋能全维度精准合规管控

摒弃传统主观经验化风险判定、旧版事故分类滞后、重物轻人的弊端，全域统一以 GB 6441–2025 为人、机、环、管全维度风险分类依据、广东省住建厅风险矩阵法（L×S）为核心技术评估工具，从风险发生可能性、事故后果严重性双维度量化打分，精准划分人员违章、管理缺陷、设备隐患、环境风险四级等级并匹配差异化管控方案，以“国标分类标准化+矩阵定级精准化”双重技术手段补齐主观管控漏洞，全面提升施工现场全维度安全管控的精准度与合规性。

5.5 主流风险识别工具对比与矩阵法标准化实操应用（新增人因风险定级规则）

当前建筑施工行业主流风险评估工具包含 LEC 评价法与风险矩阵法两类。结合 GB 6441–2025 新版国标要求、广东省住建厅官方规范、大湾区项目监管要求及事故调查核心规律，风险矩阵法是省内建筑施工领域唯一主推、合规通用的标准化评估工具，可完美对接新国标 27 类事故分类体系，适配人员不安全行为、管理体系风险的量化定级，实现全省风险台账、分级标准、监管评判口径统一，高度适配区域施工全维度管控需求。

5.5.1 主流风险评估工具优劣对比

LEC 评价法通过风险发生可能性（L）、人员暴露频率（E）、事故后果严重程度（C）三者乘积判定风险等级，操作流程简便，但评价维度主观性较强，人员暴露频率无统一量化标准，无法精准量化人员违章性格、习惯性违章风险，缺乏官方标准化分级体系，无法对接 GB 6441–2025 国标分类要求与广东省住建厅风险上报、公示、督查台账要求，区域适配性不足，不适用于房屋市政工程标准化合规管控。

风险矩阵法严格对标广东省住建厅官方管控规范与 GB 6441–2025 国家强制标准，依托 27 类事故类型完成人、机、环、管全维度精准分类，仅通过风险发生可能性（L）、事故后果严重性（S）双维度开展标准化量化评分，依托 R=L×S 公式计算风险值，配套红、橙、黄、蓝四级标准化色标分级体系。该方法评分标准统一、定级结果固定、台账模板规范，可精准量化人为违章、管理漏洞风险，完全适配粤港澳大湾区建筑项目安全监管与合规管控要求，是

现阶段行业内权威性、实用性、合规性最优的风险评估工具。

5.5.2 广东省住建厅标准矩阵法五步标准化实操流程（融合人因+管理风险）

结合广东省住建厅官方规范、新版国标要求、施工现场实操痛点及笔者事故调查经验，本文梳理出一套可直接落地、全域通用的五步标准化矩阵法操作流程，重点新增人员风险辨识、违章性格研判、管理风险排查模块。现阶段现场作业可先依据 GB/T 6441-1986 开展基础分类，同步提前对照 GB 6441-2025 27 类生产安全事故类型逐一补全人因、管理风险类别，建立过渡阶段双标准对照清单，全面适配房建、市政、文旅基建项目及六大类危大工程的全维度风险辨识与管控工作。

第一步：全域危险源清单摸排与国标分类。以分部分项工程为单元，全覆盖梳理人员行为、组织管理、制度流程、设备设施、作业环境、管理制度六类危险源，严格对照 GB 6441-2025 27 类生产安全事故类型逐一匹配风险类别，重点新增人为操作失误、安全管理缺陷两类核心风险，建立初始清单。重点聚焦高危作业人员习惯性违章、无证作业、侥幸作业等人因风险，管理人员履职缺位、岗位配置不足等组织风险，制度考核不严、流程缺失等管理风险，以及山林动火、深基坑、高支模等物态环境风险，杜绝辨识盲区。

第二步：双维度标准化量化赋值。严格执行广东住建统一评分标准，设置 L（1－5 分）、S（1－5 分）两个量化维度，分值越高风险程度越高，新增人因、管理风险专属赋值规则：经常性违章、高风险性格作业人员、重大管理漏洞直接赋值 L=5 分；人为违章引发群死群伤、管理失效导致系统性隐患赋值 S=5 分。

可能性 L 评分标准：1 分（极低：几乎不会发生）、2 分（较低：偶尔发生）、3 分（中等：可能发生）、4 分（较高：容易发生）、5 分（极高：常态化违章、管理漏洞长期存在）。

严重性 S 评分标准：1 分（轻微：无损失、轻微隐患）、2 分（一般：小额财产损失、轻微损伤）、3 分（较大：一般安全事故、局部损失）、4 分（重大：较大安全事故、严重财产损失）、5 分（特大：重特大事故、人员伤亡、生态舆情、群体性影响，含人为违章、管理失效引发的恶性后果）。

第三步：风险值计算与等级判定。采用官方固定公式 R=L×S，对照矩阵标准划分四级风险，色标与管控等级一一对应，明确人因、管理风险分级标准：经常性高危违章、重大管理缺陷判定为红色特级重大风险；间歇性违章、一般管理漏洞判定为橙色高风险；偶尔轻微违章、流程不完善判定为黄色一般风险；常规合规履职、轻微制度瑕疵判定为蓝色低风险。

第四步：分级差异化精准施策。严格落实“色标定级、层级匹配、力度适配”原则，重点强化人因与管理风险差异化管控：红色特级人因风险人员实行岗前筛查、专项培训、专人紧盯、岗位调离前置管控；重大管理风险实行公司级专项整改、组织架构优化、制度流程重构；橙色高风险落实专项交底、动态监管、考核问责；黄、蓝风险纳入常态化台账管控，实现人、机、环、管管控不同质、力度有差异。

第五步：动态更新合规闭环归档。按照《广东省安全生产条例》及 GB 6441-2025 国标要求，工况、人员、管理体系变更后立即复评更新风险台账，同步更新对应事故风险分类，重大人因、管理风险三日内上报主管部门，实现全维度风险评估、管控、整改、复盘全流程留痕闭环。

5.5.6 创新模块：作业人员违章性格科学识别与前置管控方法（原创实操经验）

结合笔者参与珠海近百起建筑施工事故调查的核心经验，可控安全事故的直接诱因 90%

以上为固定性格特征人员的习惯性违章。部分作业人员存在天生侥幸、鲁莽、懈怠、漠视规则的职业性格缺陷，属于高频违章高危人群，传统管控仅能事后整改，无法前置预判。基于多年实操研判，本文总结出一套违章型人员性格辨识、分级分类、前置干预的标准化实操方法，填补行业人因风险前置管控空白。

一是违章型人员性格精准识别（四维研判法）。通过从业履历、日常行为、违章记录、心理特征四个维度，精准判定高危违章人员：1.履历维度：短期频繁更换施工班组、多次因违章被辞退、从业年限短但违章记录多；2.行为维度：作业习惯性简化工序、漠视安全交底、拒绝佩戴防护用品、擅自改动施工工艺、心存侥幸冒险作业；3.心理维度：性格鲁莽、急躁、自负，对安全隐患无敬畏心，认为“以往没事、现在不会出事”；4.记录维度：项目日常巡查多次出现轻微违章、屡教不改、重复性违规。符合 2 项及以上特征即可判定为高危违章性格人员，纳入重点管控名单。

二是高危人员分级分类管控。结合风险矩阵法对违章人员定级：经常性高危违章、屡教不改者 L=5、S=4，R=20（红色特级人因风险）；间歇性违章、整改后反复反弹者 L=4、S=3，R=12（橙色一级人因风险）；偶尔轻微违章、可快速整改者 L=3、S=2，R=6（黄色一般人因风险）。针对不同等级人员落实差异化管控：红色特级人员严禁参与危大工程、高空、动火等高危作业，开展专项安全教育考核，考核不合格禁止上岗；橙色人员实行专人一对一监护、班前重点交底、作业全程紧盯；黄色人员纳入常态化教育考核，定期复盘警示。

三是前置化干预管控落地机制。建立“人员准入筛查+日常动态研判+违章闭环整改+长效警示教育”的全流程前置管控体系：新进场人员必须完成性格预判、履历核查、安全测试，高危人员直接禁止高危作业；日常施工中动态更新人员风险台账，对反复违章人员刚性处罚、约谈班组；定期开展事故案例警示教育，用本地真实事故案例破除作业人员侥幸心理，从根源上减少人为违章隐患。

六、房屋市政工程全工序矩阵法风险识别与分级管控细化要点（全覆盖人因+管理风险）

本节全工序风险梳理、危大工程专项管控细则，均结合 GB 6441-2025 新国标要求编制，同步纳入人员不安全行为、组织架构、管理制度、流程设计四大管理类风险，实现人、机、环、管全覆盖管控，作为企业提前对标新规、升级管控体系的指导依据；现场现阶段可结合现行标准落地，待 2026 年 7 月 1 日新规正式实施后全面切换。本文全域统一采用 GB 6441-2025 国标 27 类事故分类为辨识基准、广东省住建厅风险矩阵法（L×S）为定级工具，对房屋市政工程全施工周期、全工序、全人员、全管理环节开展量化风险辨识与分级管控，彻底杜绝经验化判定、分类不规范、重物轻人的问题，实现风险定级标准化、管控措施差异化、风险类型合规化。

6.1 前期方案阶段风险管控（新增管理流程风险）

施工方案编制前，技术、安全部门联合对照 GB 6441-2025 27 类事故清单，采用矩阵法对施工工艺、作业流程、防护措施开展前置风险评估，精准识别方案对应的各类事故风险。同时开展管理体系前置排查，核查项目安全管理组织架构配置、岗位职责划分、制度流程完整性、考核机制有效性，提前补齐管理漏洞；针对高危工序提前筛查作业人员资质、性格特征、违章履历，前置规避人为违章风险，从源头规避方案性、设计性、管理性、人为性安全隐患，确保施工方案兼具可行性与安全合规性。

6.2 基础与主体工序核心风险矩阵法管控（新

增对应人因管理风险）

基坑工程：依据国标分类，核心对应坍塌、水害、滑坡、高处坠落事故风险，叠加作业人员违规开挖、临边靠近、擅自离岗等人因风险，及基坑管控流程缺失、巡查制度不严、管理人员履职缺位等管理风险。采用矩阵法辨识边坡滑移、土体坍塌、支护失稳、积水淹槽、临边坠落及人为违章、管理失效等复合风险。开挖深度≥5m、地质复杂、临近建构筑物基坑，赋值 L=4、S=5，R=20，判定为红色特级重大风险；开挖 3－5m 常规基坑，赋值 L=3、S=4，R=12，判定为橙色一级高风险。特级风险落实 24h 智能监测、双岗值守、雨后停工复核，同时严控作业人员违规操作、落实管理人员定岗履职；一级风险落实常态化巡查、边坡防护、荷载严控及人员行为监管。

模板支撑工程：国标分类对应坍塌、高处坠落、物体打击事故风险，叠加作业人员违规搭设、擅自拆除杆件、超载浇筑等人因风险，及高支模专项管控制度缺失、验收流程不完善、考核不严等管理风险。矩阵法辨识支架失稳、杆件断裂、整体坍塌、浇筑倾覆及人因、管理复合风险。搭设高度≥8m 超规模高支模，赋值 L=4、S=5，R=20，为红色特级重大风险；常规高大模板赋值 L=3、S=4，R=12，为橙色一级高风险。特级风险落实专家论证、分阶段验收、全程旁站监测，同步筛查高危作业人员、压实管理人员责任；一级风险落实标准化搭设、常态化巡查管控及人员行为约束。

脚手架工程：国标分类对应高处坠落、架体坍塌、物体打击事故风险，叠加作业人员不系安全带、违规攀爬、随意丢弃物料等人因风险，及日常巡查制度流于形式、管控流程空白等管理风险。矩阵法辨识架体倾覆、杆件脱落、高空坠落、风荷载失稳及人因管理风险。高空悬挑、山林临水露天脚手架，赋值 L=4、S=4，R=16，为红色特级重大风险；常规落地式高层脚手架，赋值 L=3、S=3，R=9，为黄色一般风险。特级风险强化全过程验收与防风加固、人员全程监管；一般风险落实班组自查、月度复评及常态化人员安全教育。

6.3 大型设备与临时用电矩阵法风险管控（新增对应人因管理风险）

大型机械设备：国标分类对应机械伤害、起重伤害、物体打击、设备倾覆事故风险，叠加操作人员无证上岗、违规操作、超载吊装、视线盲区作业等人因风险，及设备维保制度不全、安拆管控流程不严、管理人员监管缺位等管理风险。矩阵法辨识设备倾覆、吊物坠落、机械伤害、设备故障及人因管理复合风险。高空重载吊装、设备安拆作业，赋值 L=4、S=5，R=20，为红色特级重大风险；设备常规运行作业，赋值 L=2、S=3，R=6，为黄色一般风险。特级风险落实专项方案、持证上岗、大风停工、专人监护；一般风险落实定期维保、日常巡检及作业人员行为管控、管理制度落地督查。

临时用电：国标分类对应触电、电气火灾

中空長跨度工作平臺架

梁杏笑
澳門建造商會

摘　要：隨著建築工程日趨綜合化，傳統施工支撐平臺存在佔用空間大、搭設效率低、承載能力有限、場景適配性弱等問題，無法滿足車流人流密集區域的施工要求。本文研究應用中空長跨度工作平臺架，透過架空結構、模組化構件、優質鋼材選型與可調式模組設計進行技術優化。該平臺架可釋放通行空間、簡化施工流程、提升結構承載力與靈活性，有效保障現場通行安全與施工效率，適配複雜施工環境。

關鍵詞：中空長跨度工作平臺架；棚架；模組化結構；施工平臺；承載性能

引　言

現代城市建築逐步向多功能綜合形態發展，大量施工作業佈設於城市道路、商業出

入口、地下車庫等人流車流高度密集的區域。此類場地具備通行需求高、施工週期長、安全管控要求嚴格等特點，傳統毛竹棚架與密集支撐式作業平臺，已難以兼顧施工開展與公共區域正常運轉的雙重需求。行業內陸續推廣金屬材質棚架體系，中空長跨度工作平臺架成為應對復雜工況的重要技術方向。本文結合工程實踐與構件性能檢測數據，圍繞該類新型平臺架的結構特徵、技術優勢與實際應用展開分析，探究其解決現場痛點的技術路徑，為同類臨時施工設備的研發與工程運用提供參考。

壹、中空長跨度工作平臺架概述

中空長跨度工作平臺架以金屬構件為核心載體，整體採用兩端支撐、中部中空的架空佈局形式，整套設備劃分為下部獨立支撐系統與上部平臺架主體兩大單元，兩個單元之間採用可拆卸連接方式組裝成型。平臺架主體由兩組平行佈置的固定架構成，每一組固定架搭配上下兩道平行橫桿，橫桿之間沿構件長度方向等距佈設豎向支撐桿，相鄰豎向構件之間增設斜桿形成穩定受力體系，兩組固定架之間再搭配可拆卸橫向支撐桿完成整體拉結，表面鋪裝承載鋼板形成連續作業面。該設備主力規格選用六米桁樑體系，主材選用 Q235 結構鋼，依據受力需求精算鋼管直徑與壁厚參數，在滿足結構強度標準的前提下實現構件輕量化處理，同時所有模組構件按照多次拆裝重複使用的標準進行研發設計。此類新型棚架設備突破傳統密集底座支撐模式，其結構設計思路與構件優化方式，可為城市核心區域臨時施工平臺的研發、結構受力體系設計以及模組化臨時設備研製提供紮實的技術參考與學術借鑒。

貳、傳統施工支撐平臺存在的主要問題

一、支撐結構佔用空間大影響通行與物資運輸

傳統施工支撐平臺普遍採用密集式底座支撐體系，大量支撐構件沿施工區域地面密

集排布，佔據施工區域內絕大部分地面空

間。此類佈局方式直接封閉施工區核心範圍的地面通道，城市道路主幹道、商業綜合體出入口、地下車庫通道等車流、人往集中的區域無法維持正常通行功能，大型旅遊巴士、消防車、救護車以及工程專用車輛均難以順利穿行。建築施工所需的各類建材、機械設備也無法直接運送至作業區域近旁，場內物資轉運路線被迫大幅拉長。受限於地面空間被支撐構件全面佔用，現場只能依託吊機從施工區外圍向高空作業點調運重型物料與設備，長距離高空吊運作業不僅改變了現場物料輸送的基本模式，也讓臨時支撐結構與場地規劃的設計思路受到諸多制約[1]。對該類空間佔用問題展開梳理與分析，能夠為臨時支撐結構的空間佈局優化、城市密集區施工場地規劃設計提供真實的現場依據，也可為同類臨時工程構架的空間利用研究累積實踐數據。

二、搭設工序繁瑣施工耗時較長

傳統施工支撐平臺依賴大量零散構件組裝成型，整套架體的搭建作業需要逐根安裝底座、立桿、橫桿與連接配件，整個組裝流程環節繁雜且環環相扣。密集佈置的支撐單元需要逐一定位、對接與加固，構件數量龐大的特點進一步拉長整體搭建週期，現場施工作業的有效時長被大量壓縮。後續拆除作業同樣需要按照反向工序逐步拆解各類構件，拆解過程同樣耗費大量工時。在施工週期與公共區域運營高度重疊的場地環境中，架體搭設與拆除佔用的時間會持續影響區域正常運轉，也會造成人工與機具資源的持續消耗[2]。針對該類搭建工藝與工時問題開展深挖剖析，可推動臨時支撐設備組裝工藝的改良，為模組化架體施工工法的研發與落地提供現場參考，同時也能豐富建築臨時設施施工效率優化領域的研究內容，具備相當的工程應用與學術參考價值。

三、整體承載能力不足安全風險偏高

傳統施工支撐平臺整體構架的承載上限較低，結構受力模式較為單一，僅能依靠單一區域的密集支撐分攤上部施工荷載，難以承接多工種同步作業帶來的動態荷載變化。當平臺上方堆積各類施工物料、多名作業人員同時開展施工作業時，架體局部容易出現受力不均的狀況，構件變形、連接節點鬆動等安全隱患的發生概率大幅提升。現場受限於空間條件被迫採用吊機遠距離輸送重物的作業形式，吊運過程中物料產生的擺動會對支撐平臺形成額外衝擊荷載，進一步加劇整體架體的受力負擔。此類問題與隱患貫穿架體搭建至拆除的整個使用週期，使得傳統支撐平臺的安全管控難度持續加大。圍繞其承載體系與受力缺陷開展系統化研究，可清晰明確臨時作業平臺受力設計中的各項薄弱環節，為新型棚架結構的承載體系設計、荷載核算標準完善提供紮實的實證支撐，同時也能進一步補充建築臨時構架安全性能領域的研究內容與理論數據。

四、結構靈活性差難以適配多變施工場景

傳統施工支撐平臺整體為一體化拼接結構，各構件之間多採用剛性固定連接方式，整體架體組裝成型之後難以開展局部拆解與靈活調整。現場若出現下方通行路線臨時變更、施工區域局部臨時封閉、施工作業工序階段性調整等突發狀況，原有架體佈局便無法及時匹配變化後的現場條件。想要順利適配全新的施工需求，只能對整個支撐平臺進行全面拆解後重新搭設，反覆拆搭不僅顯著增加現場作業量與人工投入，也會反覆改變架體原有受力狀態，影響結構穩定性。在環境條件時常發生變動的公共區域施工場景中，該類結構特性直接導致設備適用範圍被嚴重侷限。對傳統架體結構適配性不足的問題進行深度探究，能夠清晰指明臨時施工平臺結構靈活性改良的核心方向，為可調式模組臨時架體的設計研發、場景化結構優化提供成熟借鑒思路，同時為建築臨時設施多場景適配領域的理論與實踐研究補充真實工

程案例。

三、中空長跨度工作平臺架對應優化技術方案

一、採用架空式結構釋放通行與物料轉運空間

中空長跨度工作平臺架採用兩端落地、中部懸空的架空構造，整體分為地面支撐單元與上部平臺主體兩大模塊，透過標準可拆卸構件拼接，拼接部位傳力穩定。架體依靠兩側獨立支撐承擔全部荷載，摒棄傳統滿布式底座，從根源解決支架佔用地面空間的問題，架下形成連續完整淨空。道路、停車場、建築出入口等人車密集區可維持正常通行，客運車、消防車、救護車及工程車輛均可順利通行；建材、機具可直接運至作業區底部，不用依靠吊機遠距離高空調運，縮短物料轉運路徑，實現作業與通行空間立體分區佈局[3]。該架空結構的佈置與受力傳遞形式，可作為市區臨時施工架體空間規劃參考，為大淨空臨時棚架設計、立體空間利用研究提供技術參數與實例，完善臨時設施空間規劃相關理論。本平臺架核心承重件為 6m 標準中空桁樑，僅憑樑體兩端支座承載上部荷載，中段完全架空以釋放通行空間，兼顧車輛通行與物料就近轉運，桁樑具體結構詳見圖 1。

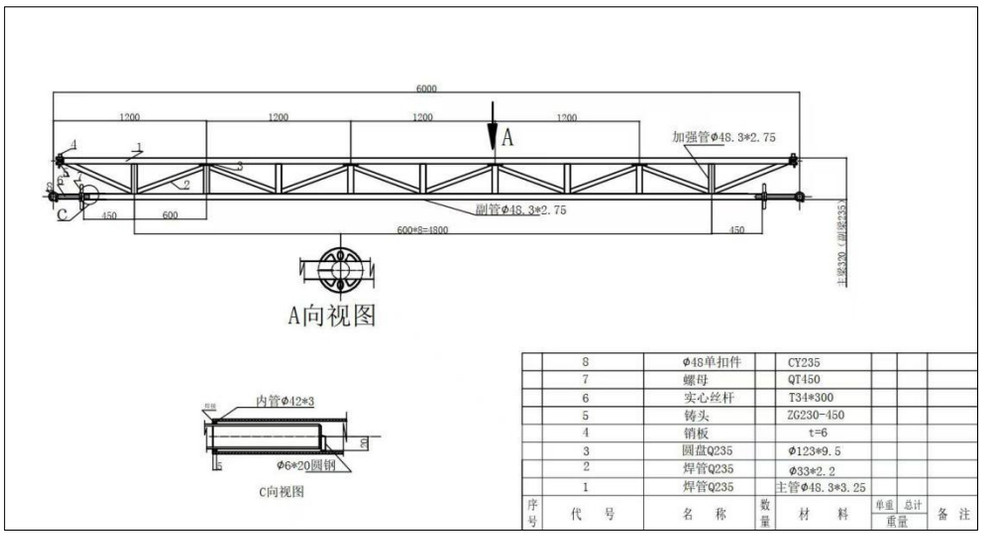


圖 1　中空長跨度工作平臺結構圖

二、運用模組化構件簡化搭設作業流程

整套中空長跨度工作平臺架以標準化模組構件作為基礎單元進行組合搭建，各類受力構件、連接配件、防護構件均按照統一規格在工廠預製生產，單一構件經工藝優化後具備獨立受力與快速拼接的特性，構件之間相容性良好。現場組裝階段全面運用專用升降設備輔助開展高空作業，長跨度橫樑由兩台升降車於架體兩側同步抬升並精準就位安裝，現場作業單元以兩人為配合單元開展對向施工作業，一側人員負責構件對位連接，另一側人員實時管控構件穩定性，全程規避構件墜落隱患。所有模組之間採用制式連接結構實現拼裝，省去零散配件逐件定位、反覆校正的多道工序，架體拼裝與後續拆解均嚴格遵循模組化拆分邏輯，作業流程規範統一。該類標準化構件的生產工藝、現場拼裝工法與機具配合模式，能夠為建築臨時支撐設備模組化體系研發、高效施工工法編製提供紮實的實踐依據，也可為行業內臨時架體標準化建設補充完整的技術資料，在工程落地推廣與學術理論研究層面均具備較高參考價值。見圖 2。

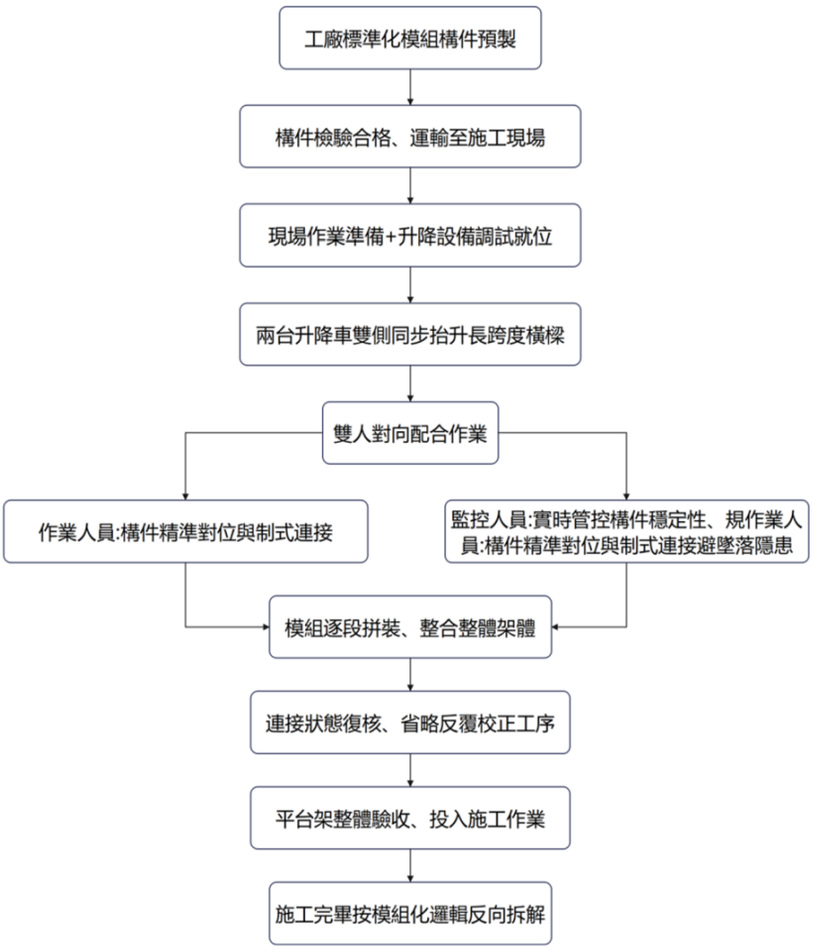


圖 2　中空長跨度工作平臺架模組化搭設施工流程圖

三、選用優質鋼材結合結構設計提升承載性能

中空長跨度工作平臺架主力六米桁樑體系選用 Q235 結構鋼作為核心原材料，該類鋼材具備穩定的屈服強度、良好的塑性變形能力與優異的焊接工藝性能，材質綜合指標能夠適配複雜工況，可長時間持續承受施工狀態下的靜載與動載作用。構件設計階段針對鋼管外徑、管壁厚度開展多組搭配演算與受力模擬，在滿足結構強度、剛度與穩定性各項設計指標的前提下，對整體構件進行輕量化處理，有效降低單體構件自重，讓構件的場內轉運、機具吊裝與人工拼裝作業難度得到合理控制[4]。所有桁樑構件在設計之初便充分考量重複拆裝使用的運行工況，保證構件經過多次拼拆之後，材料力學性能與整體受力形態不會發生衰減。實驗室採用分級加載的檢測方式，對主樑、副樑分別施加荷載並全程監測變形數據，主樑承受 45kN 荷載、副樑承受 37kN 荷載時僅產生彈性變形，卸載後可完全恢復初始狀態。該種材料選型思路、結構參數優化方式與載荷試驗方法，可為金屬臨時施工平臺的材質選用、構件優化及性能檢測體系搭建提供科學參考與實驗範例。

四、打造可調式模組結構增強場景適配能力

中空長跨度工作平臺架採用可調式模組組合形式，平臺架內部的固定架、豎向支撐桿、斜向加勁桿以及兩組固定架之間的橫向連接桿，全部採用標準化可拆卸連接形式進行組裝，組裝與拆分操作簡便高效。當現場出現下

方通行線路臨時調整、局部區域需要短時封閉、整體施工工序發生更迭等多類突發狀況時，工作人員可針對局部模組單元進行拆解、移位與重新拼裝，無需對整座平臺架實施全面拆除重建。平臺板面的鋪設區域同樣能夠依據實際作業範圍變化靈活調整，在不改變整體受力體系與原有安全儲備的基礎上，順利實現局部結構形態的靈活轉換[5]。模組之間的連接節點均經過專門的受力強化設計，局部調整前後架體的受力傳遞路徑始終保持穩定，不會因局部構件改動而出現節點鬆動、受力失衡等安全隱患。此種可變形模組體系的設計邏輯、節點構造形式與現場調整工藝，能夠為多場景適配型臨時建築構架的研發提供成熟設計思路，持續推動臨時施工設備適配性相關理論的完善，也為複雜工況下臨時架體結構優化研究累積寶貴的工程技術成果。

肆、中空長跨度工作平臺架應用成效

中空長跨度工作平臺架投入實際工程場域後，立體分區的構造形式可讓施工區域與城市通行區域保持獨立運行狀態，道路、停車場及建築出入口的原有功能不受施工作業幹擾，多類車輛可維持全天候正常通行。六米桁樑構件經分級加載試驗驗證，在 3kPa、4kPa 不同均布荷載工況下，整體架體維持穩定受力狀態，彈性變形指標處於安全區間，可承接多工種同步作業帶來的動態荷載。標準化模組構件搭配專用升降設備開展組裝作業，構件拆裝循環使用過程中力學性能依舊穩定，現場機具與構件的配合模式大幅壓縮作業週期。模組化可調整的結構特性，可順應施工現場通行條件、作業區域與施工工序的動態改變，無需開展大範圍拆搭作業。該類設備在複合場景下的實際運行數據、荷載響應規律與結構調控方式，可為同類大跨度臨時作業平臺的工程應用積累實測依據，也能完善臨時金屬棚架體系的工程應用理論，為行業相關技術規範編製與結構優化研究提供可參考的實踐範例。見圖 3。

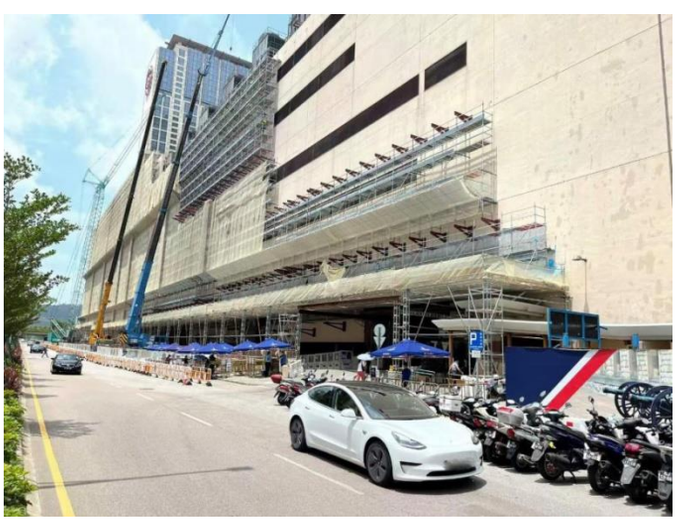


圖 3　中空區域搭建長跨度工作平臺

結　論

中空長跨度工作平臺架憑藉架空構造與模組化設計，破解了傳統支撐平臺在空間利用、施工效率與場景適配等方面的諸多侷限。依託 Q235 鋼材與科學的構件參數優化，搭配完備的載荷試驗驗證，整體結構具備充足的安全儲備與結構韌性。該類設施可實現施工與公共通行

並行開展，有效降低現場作業風險，契合當下城市綜合建築的施工需求。其結構設計思路、構件選型標準與現場應用模式，也為臨時棚架技術反覆運算、模組化臨時設施研製積累了實踐經驗，對行業技術升級具備持續的借鑒作用。

參考文獻

［1］ 張淩博, 劉京紅, 李兵兵, 等. 盤扣式鋼管腳手架節點轉動剛度及穩定承載力研究［J］. 北京理工大學學報, 2023, 43（12）：1224–1231.

［2］ 沙小琳, 劉秀麗, 王燕, 等. 模組化鋼結構體系發展現狀及趨勢［J］. 工業建築, 2025, 55（3）：109–123.

［3］ 謝健曦. 斜拉桿式懸挑型鋼承載力性能試驗分析［J］. 廣州建築, 2025, 53（4）：49–52.

［4］ 魏偲. 基於性能的傳統與新型盤扣式鋼管支架模擬對比分析［J］. 廣州建築, 2025, 53（1）：33–38.

［5］ 李闖, 王瑞芳. 魚腹梁鋼支撐體系的基坑變形控制研究與分析［J］. 巖土工程技術, 2025, 39（1）：97–104.

建築業創新科技監督與安全作業最新發展

譚銘康先生
澳門建築工程師學會（顧問）　澳門建築安全協會（顧問）
香港建業建築集團（高級安全及環保經理）

近年來，隨著科技快速發展以及對工地安全要求的提升，建築業正迎來一場深刻的數位與智慧化轉型。在監督與安全作業方面，最新發展主要集中在「智慧工地 4S」的建構，透過物聯網、人工智慧及自動化技術等，將傳統的「被動監督」轉化為「主動預防」。

香港乃至全球地方的建築業正在經歷一場深刻的數位化與智能化變革。傳統的「以人管人」地盤監管模式由於環境複雜、盲點多，正加速向「科技輔助、智慧監控」的模式轉型。

結合目前的行業趨勢與政策發展，建築業創新科技在監督與安全作業上的最新發展主要集中在以下幾大核心領域：

1. 智慧工地 4S 管理系統；

「4S」在香港建造業及智慧工地領域中，是指安全智慧工地系統（Smart Site Safety System，簡稱 4S）。這是由香港政府發展局和建造業議會（CIC）大力推動的智能化安全管理體系，旨在將傳統地盤的「事後追責」轉變為「事前預防」，全面提升工地安全與營運效率。

4S 系統的四大核心組成架構

一個完整的 4S 安全智慧工地管理系統通常由以下四個核心板塊（或稱技術支柱）組成：

1.1 **中央管理平台（Central Management Platform，CMP）**

• 大腦中樞：收集工地內所有物聯網（IoT）設備、AI 鏡頭和傳感器的數據。

• 實時監察：以可視化三維圖表或儀表板展示地盤實時狀況、警告訊號和人員分佈。

• 數據分析：記錄並分析歷史安全表現數據，查找潛在安全隱患以優化管理決策。

1.2 **人工智能安全監察系統（AI Camera/Vision）**

• 電子圍欄：透過智能 AI 鏡頭監控吊運區、限制區及高危地帶，一旦有未經授權人員進入即時發出警報。

• 行為與防護裝備偵測：自動識別人員是否正確佩戴安全帽、安全帶，並能偵測工人跌倒或車輛碰撞風險。

1.3 **移動機械及危險區監控系統（Mobile Plant Safety）**

• 360 度防撞：於挖掘機、起重機等重型流動機械安裝感應器與鏡頭，保障操作員視線死角。

• 實時警報：當有工人過於接近機械危險範圍時，系統會同步向操作員與該工人發出聲光或震動警示。

1.4 **前線人員及設備智能監控（Smart Wearables & Tracking）**

• 穿戴式裝置：提供智能安全帽、智能手環，具備定位、熱衰竭健康監測及一鍵求救（SOS）功能。

• 工具數碼追蹤：透過物聯網或二維碼編碼，線上追蹤工地機械、梯具的檢驗與維修保

養狀態。

4S 系統的政策背景與資助

- 強制推行：

o 自 2023 年起，香港政府已要求所有造價達 3，000 萬港元或以上的工務工程合約必須全面採用 4S 系統。

o 自 2025 年 7 月起，此項要求將進一步擴展至私人建築項目。

- 政府資助支持：

o 承建商可申請建造業創新及科技基金（CITF）的資助，每位申請者最高可獲 750 萬港元，以降低部署 4S 系統的資金門檻。

o 滿足特定安全要求的工地，可獲頒發「安全智慧工地標籤」。

4S 系統為工地帶來的核心價值

傳統地盤管理	4S 智慧工地管理
被動應對：發生意外後才進行調查與懲處。	主動預防：透過 AI 與傳感器在危險發生前 1 秒發出警報。
紙本審批：現場安全許可證依賴紙張簽署，耗時且易出錯。	電子許可（e-Permit）：線上提交、審批及記錄，流程全面數碼化。
資訊孤島：管理層難以即時掌握偏遠或密閉空間的狀況。	一網協同：透過 5G 網絡將地盤所有角落的數據匯總至中央平台。

2. 建築業人工智慧與電腦視覺

以下為您梳理 AI 與電腦視覺在建築業的核心應用場景、優勢與未來挑戰：

2.1 工地安全管理（職業安全與健康）

這是目前電腦視覺在建築業最普及、最快看到成效的領域。

智慧個人防護裝備（PPE）偵測：AI 演算法能實時分析監視器畫面，自動辨識現場工人是否正確配戴安全帽、反光背心、安全帶。一旦發現違規，系統會立刻發出警報並通知管理人員。

危險區域闖入警戒（電子圍籬）：在吊掛作業區、高空邊緣、深開挖區或重型機械（如挖土機、吊車）迴轉半徑內設置虛擬邊界。若有工作人員誤入，系統會發出語音警告或連動機械減速。

不安全行為與疲勞偵測：辨識工人是否有高空嬉戲、不當操作機械，或透過精神狀態分析（如長時間低頭、步履蹣跚）預防疲勞作業帶來的風險。

2.2 工程進度與物料管理

傳統進度回報多靠人工巡檢與拍照，耗時且主觀。

4D BIM 與 3D 點雲對比：利用無人機或定點相機定期拍攝工地，AI 會將收集到的影像與建築資訊模型（BIM）進行自動比對。系統能精確辨識「今天牆面灌漿進度是否達標」、「鋼筋綁紮數量是否正確」，並在儀表板上自動更新進度百分比。

物料自動盤點：當預拌混凝土車、鋼筋或磚料運抵工地時，電腦視覺可自動辨識車牌、估算車內載重或現場建材堆置的體積，實現數位化庫存管理，防止材料失竊或浪費。

2.3 品質控制與瑕疵檢測

利用高解析度影像與 AI 的精準判讀，大幅提升工程品管效率。

混凝土與牆面裂縫分析：利用無人機巡檢大樓外牆或橋樑結構，AI 能在幾秒鐘內判讀出肉眼難以察覺的微小裂縫，並精確計算出裂縫的長度、寬度與走向，評估結構安全。

施工錯位與漏水偵測：結合紅外線熱顯像技術與電腦視覺，可以在完工前偵測出管道滲漏、隔熱層缺陷，或辨識管線、開關盒是否未依設計圖裝設在正確位置。

2.4 智慧機械與自動化工地

電腦視覺是營建機器人（Construction Ro-

botics）的「眼睛」。

無人駕駛工程車：挖土機、推土機或壓路機配備電腦視覺系統後，能自主感測周遭地形與障礙物，在無人駕駛的情況下進行精準的整地或挖掘作業。

施工機器人：例如牆面噴漆機器人、砌磚機器人或外牆清洗機器人，透過電腦視覺即時定位並調整作業軌跡，確保施工均勻與精準。

3. 建築業物聯網與智慧穿戴式裝置；

如果說電腦視覺是工地的「眼睛」，那麼物聯網（IoT）與智慧穿戴式裝置就是工地的「神經系統」與「微血管」。

在營建業中，物聯網技術透過將感測器嵌入設備、建材與工人穿戴的裝備中，將原本碎片化、高風險的工地環境轉化為即時互聯的數位生態系。這不僅打破了傳統管理的資訊滯後，更是解決全球營建業「勞工短缺」與「工安落實」的核心科技。

以下為您拆解物聯網與智慧穿戴式裝置在建築業的關鍵應用與價值：

3.1 智慧穿戴式裝置：全方位守護工安與健康

工人是工地最重要的資產，智慧穿戴裝置直接與人體接觸，能即時傳回生理與定位數據。

智慧安全帽（Smart Helmet）：

定位與生命徵象監測：內建 GPS、藍牙信標（Beacon）或 LoRa 模組，管理後台能即時掌握人員所處樓層與位置；同時監測體溫、心率，預防高溫中暑。

跌倒與撞擊警報：整合三軸加速度計，當工人不幸發生高空墜落或遭物體撞擊倒地時，安全帽會立刻發出 SOS 訊號與精確座標，把握黃金救援時間。

智慧反光背心與手環：

環境危險預警：當工人接近高壓電路、有害氣體殘留區或重型機械作業半徑時，背心或手環會透過震動或蜂鳴聲警告工人止步。

疲勞與生理壓力追蹤：監測長時間勞動下的生理負荷，若指數超標，系統會提示安排輪班休息。

外骨骼設備（Exoskeletons）：

雖然不完全是微型感測器，但這種穿戴裝置能透過機械結構減輕搬運重物、持續彎腰或高舉雙臂時的肌肉負擔，大幅減少職業肌肉骨骼損傷，並提升高齡工人的作業能力。

3.2 工地物聯網（IoT）：資產追蹤與環境感測

除了人，工地裡成千上萬的機具、建材與多變的環境，也都透過物聯網串聯。

機具與資產定位管理（Asset Tracking）：

在昂貴的電動工具、發電機或大型怪手、吊車上黏貼 RFID 標籤或物聯網感測器。管理人員能在手機上秒懂機具在哪個工區、是否閒置，有效降低工具失竊率並提升機具調度率。

預測性維護：感測器能監測大型機械的震動、溫度與油壓，在機具真正壞掉停工前，提早發出保養通知。

微環境與微氣候監測：

工地各處佈署環境感測器，即時監測 PM2.5 粉塵濃度、噪音、有毒氣體（如硫化氫、一氧化碳）。

對於混凝土澆置後的養護，將熱電偶感測器直接埋入混凝土中，透過物聯網即時回傳內部的溫度與濕度變化，不需人員現場取樣，就能精確知道混凝土強度是否達到拆模標準。

4. 創新施工技術：「組裝合成」及「機電裝備合成法」與建築信息模擬的結合；

在現代建築業的數位轉型中，「組裝合成」建築法（Modular Integrated Construction，MiC）與「機電裝備合成法」（Multi-trade Integrated Mechanical，Electrical，and Plumbing，MiMEP）是推動「建築工業化」的兩大核心支柱。

當這兩項創新施工技術與建築信息模擬（Building Information Modeling，BIM）深度結合時，營建業便從傳統的「現場手工建造」升級為精準的「工廠製造與現場組裝」，實現了前所未有的高效率與高精度。

4.1 核心技術定義與優勢

在探討與 BIM 的結合前，先了解這兩項技術的本質：

組裝合成建築法（MiC）：

將傳統現場施工的工序（如結構、裝修、潔具、管線）轉移至工廠。在工廠內將獨立的立體組件（如一個完整的住宅單位、浴室或病房）製造並裝修完成，再運送至工地進行組裝與接駁。

機電裝備合成法（MiMEP）：

將複雜的機電管線、水務、暖通空調（HVAC）及電氣部件，在工廠內預先組裝成多模組的機電組件（如走廊頂部的複合管線架、水泵房模組），再運至現場整體吊裝。

4.2 MiC/MiMEP 與 BIM 的深度結合場景

MiC 與 MiMEP 最大的挑戰在於「容錯率極低」。工廠做好的三維組件運到現場，如果尺寸差了幾公分，或是管線接口對不上，整個組件就無法安裝。因此，BIM 成為了不可或缺的數位大腦：

情況一：面向製造與裝配的設計（DfMA）

傳統設計只考慮「外觀與結構」，而 BIM 與 MiC/MiMEP 的結合引入了 DfMA（Design for Manufacture and Assembly）理念。

模組化拆分：設計初期，工程師在 BIM 軟體中直接將建築物拆解成一個個可運輸、可吊裝的 MiC 箱體或 MiMEP 管架。

精準接口設計：透過 BIM 的高精度建模，預先設計好模組與模組之間的連接結構、防水介面以及機電管線的「快接插頭」（Plug-and-Play），確保工廠生產出來的物理實體能完美拼接。

情況二：全方位碰撞檢查與空間優化（Clash Detection）

MiMEP 管線極度密集。在工廠組裝前，BIM 可以發揮其核心優勢：

零衝突製造：在虛擬空間中進行結構、建築、機電的「硬碰撞」與「軟碰撞（維修空間不足）」檢查。在電腦裡解決所有管線打架的問題，確保工廠開模生產時零出錯，避免到現場才發現管線穿牆失敗而必須敲鑿修改。

情況三：4D 施工模擬與物流排程（Logistics & Digital Twin）

MiC 工藝對工地的物流與吊裝節奏要求極高（工地通常沒有空間存放巨大的箱體模組，通常是「車到即吊裝」）。

虛擬彩排：將 BIM 模型導入時間軸（4D BIM），模擬吊車的迴轉半徑、吊裝順序以及運輸車輛的進出場路線。

供應鏈聯動：結合物聯網（RFID/條碼），每一個在工廠生產的 MiC 箱體在 BIM 模型中都有專屬的「數位身份證」。管理層可以從 BIM 系統中即時看到：模組 A 在工廠製造中➔模組 B 正在高速公路上運輸➔模組 C 已在現場完成吊裝。

情況四：配合電腦視覺與機器人自動化生產

數據直接驅動製造（CAM）：BIM 模型中的精確幾何數據可以直接匯出至工廠的自動化設備（如 CNC 鋼筋裁剪機、MiMEP 焊接機器人），減少人為看圖組裝的誤差。

三維掃描品管：工廠完成 MiC/MiMEP 組件後，利用 3D 雷射掃描捕捉實體點雲數據，並與原始 BIM 模型進行自動比對。如果發現尺寸偏差超出容許範圍（如 ± 3mm），在出廠前就能立刻修正。

5. 建築業機器人與無人機巡查

在現代建築工程中，機器人與無人機巡查

已成為提升工地安全、監控工程進度及強化合規管理的重要技術手段。以下為此專題的核心應用與優勢分析：

5.1 無人機巡查的主要應用

高空與外牆安全檢查：代替人工進行高空作業檢查（如竹棚、懸空結構），識別外牆裂縫、結構缺陷或不安全的人員行為，大幅降低攀爬風險。

地形與進度測繪：透過正射影像（Orthophoto）與 3D 建模技術，快速計算土方量、比對建築資訊模型（BIM），並實時追蹤現場進度。

環境與合規監測：定期巡視工地周邊，協助監控如積水、垃圾堆積、非法吸煙、違規施工或堆放物料等違反環境與安全法規的情況。

5.2 建築機器人（Robotics）的現場巡檢

地面自動巡邏機器人（如四足狗形機器人）：部署於複雜或危險的施工室內環境，配備光學雷達（LiDAR）及紅外線熱像儀，進行夜間安全巡邏或有害氣體偵測。

AI 影像識別監控：結合機器人上的攝像頭，自動識別現場人員是否正確佩戴個人防護裝備（如安全帽、安全帶），並針對高空孔洞未圍封等安全隱患實時報警。

5.3 技術導入的核心優勢

降低職業安全風險：將管理人員從高危、狹窄、缺氧或高污染的環境中抽離。

提升巡查效率與覆蓋率：數小時內即可完成傳統人工需數天才能涵蓋的巡視範圍，且不留死角。

數據數字化與可追溯性：巡查數據自動雲端備份，生成可視化的缺陷清單（Defect List）與安全報告，便於追蹤整改進度。

行業趨勢提示：隨著法規對工地安全（如防墜落、智慧工地系統智能化）的要求日益嚴格，無人機與機器人的「自動化定時巡航」與「AI 即時辨識」正逐步成為大型承建商的標準配備。

總　結

當前的建築業正朝著年輕化、數碼化、專業化邁進。利用創新科技將傳統的建築營造升級轉型，不僅是推動「新質生產力」的體現，更將工地從「高危場所」轉變為「可預測、可控制的智慧安全空間」。

在可預見的未來，建築業創新科技「不會」全面取代人手監察工地，而是會演變成「科技輔助、人機協同」的全新管理模式。

雖然無人機、AI 鏡頭和安全智慧工地系統（4S）等科技非常強大，但它們與人類管理員（如安全主任、項目經理）在工地監察中扮演著不同且互補的角色：

1. 為什麼科技無法完全取代人手？

缺乏主觀臨床判斷與決策力：

AI 雖然能透過鏡頭辨識出「工友沒戴安全帽」或「高空孔洞未圍封」，但它無法理解背後的脈絡（例如：工友是否因為中暑不適而暫時脫下安全帽？圍封是否因剛才吊運物料而需要臨時拆除？）。如何妥善處理、勸喻或調整施工順序，仍極度依賴管理人員的溝通技巧與經驗判斷。

無法執行即時執法與危機應變：

科技系統（如 IoT 傳感器）在發現危害時只能發出警報。然而，真正去阻止違規行為、疏散人員、進行急救或現場緊急修正的，依然必須是人類。例如，面對最新實施的工地全面禁煙條例，AI 可以抓拍到工友吸煙，但最終仍需要現場的管理人員或勞工處執法人員前來開出定額罰款通知書。

盲區與科技局限：

建築工地環境瞬息萬變，訊號干擾、遮擋物、沙塵暴雨等惡劣天氣都可能影響傳感器和相機的準確度。人眼的適應力與移動巡查的彈性，是固定式或軌道式科技設備無法比擬的。

參考文獻

［1］ 香港發展局；

［2］ 香港建造業議會；

［3］ 香港建築科技研究院；

［4］ 香港勞工處；

［5］ 香港職業安全健康局；

澳門輕軌大型基建建設安全生產風險管控與應急管理

李華超
澳門公共建設局

摘　要：澳門輕軌東線全長 7.7km，設 6 座地下車站，工程涉及 30m 級超深基坑、直徑 7.0m 土壓平衡盾構及直徑 12.52m 泥水平衡盾構長距離（3010m）海域掘進等關鍵工法。項目地處濱海填海區，地層分佈厚層淤泥、富水砂層、孤石及拋石體，且需下穿友誼橋大馬路、海堤、高壓電纜、在建深基坑等敏感環境，安全風險等級高、管控難度大。本文系統梳理項目重大安全風險，構建「風險辨識—設計預控—過程監管—應急響應」全鏈條安全生產風險管控體系。設計階段透過加密補勘、孤石避讓、線路優化、端頭全方位加固及盾構機專項選型實現源頭消險；施工階段實施掘進參數精細化控制、高填充同步注漿、自動化即時監測等動態管控措施，成功攻克未封頂基坑大盾構始發、孤石地層掘進、側穿同期在建深基坑等極高風險技術難題。應急管理層面，在澳門公共建設局統籌下，聯合澳門消防局、治安警察局、勞工事務局等部門建立政企聯動應急機制，並於 2025 年 7 月在北段盾構隧道開展火警搜救實戰演練，參演人員近 70 人，有效驗證跨部門協同處置與緊急應變能力。項目實施期間，全線監測數據均控制在預警閾值內，未發生安全生產事故，實踐表明體系化風險管控與政企聯動應急模式可有效保障複雜濱海填海區大型軌道交通工程建設安全，可為同類工程提供直接參考與技術借鑑。

關鍵字：澳門輕軌；大型基建；風險管控；應急管理；盾構隧道；深基坑

1　引　言

澳門輕軌東線是銜接澳門半島與氹仔的重要跨境民生通道，北起關閘附近 ES1 站，南至氹仔碼頭站，全線以地下形式穿越新城 A 區及外港航道。工程面臨填海地層不確定性高、口岸核心道路下穿、相鄰基坑同期交叉施工等多重挑戰，集成明挖超深基坑、頂管、7.0m 級土壓平衡盾構、12.0m 級泥水平衡盾構海域長距離掘進等高風險工法，一旦發生失穩、滲漏、湧水湧砂等事故，極易引發交通中斷、海水倒灌、結構坍塌等災難性後果。為此，項目構建以「風險一張圖」為核心的安全生產管控與應急體系，將源頭預控、過程精細化監管與政企聯動快速響應融為一體。本文結合項目風險辨識成果與關鍵工點實踐，系統闡述安全管控邏輯、技術措施與實施經驗，為複雜環境下大型跨海軌道交通基建工程安全管理提供實踐依據。

2　工程概況與風險特徵

2.1　工程概況

輕軌東線分為南北兩段實施：北段長約 2.74km（ES1 ~ ES4 站），設 3 座地下車站，區間採用雙洞單線土壓平衡盾構（直徑 7.0m），車站採用明挖法施工；南段長約 4.96km（ES4 ~

氹仔碼頭站），設 3 座地下車站，跨海區間採用單洞雙線泥水平衡盾構（開挖直徑 12.52m），銜接氹仔段設 0.5km 高架段。全線共 6 座地下車站，最大站間距達 3.19km。截至 2026 年，北段土建工程累計完成約 52.82%，南段累計完成約 55%，項目已進入多工點並行施工高峰期，安全管控壓力顯著增大。

2.2 地質水文特徵

項目地處濱海填海區，地層自上而下依次為：填砂、填石、流塑狀淤泥及淤泥質黏土、粉質黏土、中粗砂、殘積土及風化花崗岩。淤泥層含水量高、壓縮性大、具顯著觸變性；砂層滲透係數達 3.5～4.3m/d，與海水水力聯繫密切，地下水位受潮汐影響波動明顯。隧道穿越範圍內廣泛分佈球狀風化孤石（單軸抗壓強度 83～136MPa）、拋石及廢棄排水板，海域段淺部發育強透水砂層，大幅增加盾構掘進與地層控制的不確定性。

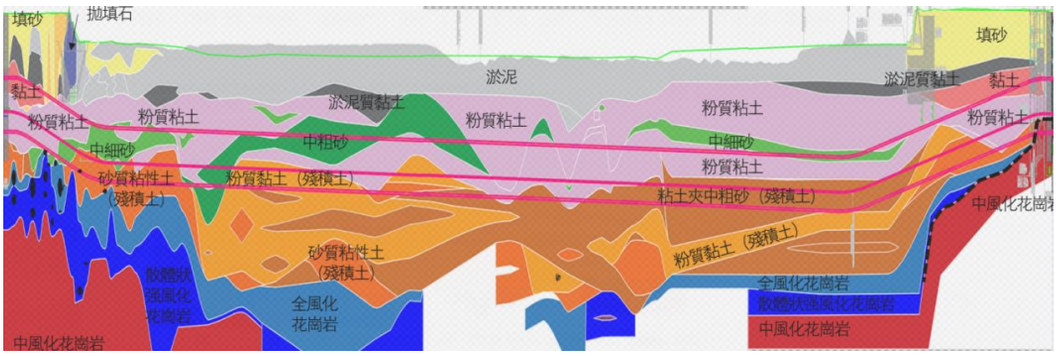


圖 1　ES5～6 區間地質斷面圖

2.3 重大風險辨識

項目採用動態風險辨識方法，2026 年初確認Ⅰ級重大風險 7 項，主要包括：北段出入口頂管淺覆土下穿友誼橋大馬路及馬場北大馬路（覆土厚度 3.5～6m）；ES2～ES1 站、ES3～ES2 站盾構在淤泥層始發與到達；ES1～ES2 及 ES2～ES3 區間盾構下穿/側穿海堤、地下停車場樁基、綜合管道等敏感構築物；南段 ES5～ES6 區間 12.52m 泥水平衡盾構長距離海域掘進及接收作業。風險類型覆蓋地質加固失效、掘進參數失控、設備長時間故障停機、颱風暴雨災害及組織管理缺失等六個核心維度。

圖 2　ES2～ES3 區間與周邊建構築物平面關係風險圖

3 安全生產風險管控體系構建

3.1 風險分級與全鏈條管控機制

項目實行「公司—項目部—班組」三級風險動態台賬管理，對 7 項Ⅰ級風險逐一編製專項施工方案與風險防控清單，經專家論證通過後方可實施，並嚴格執行關鍵節點條件驗收制度。現場落實「領導帶班值守+24h 地面不間斷巡視」機制，確保異常情況快速發現、即時決策、高效處置。

3.2 設計階段風險預控與盾構選型

堅持源頭消險理念，透過設計優化主動降低風險。對 ES6 站大盾構始發段實施加密地質補勘，探明 5 處孤石群後，將車站底板標高抬升 1m、隧道坡度由 55‰調整為 50‰，主動避讓多數孤石與廢棄排水板。洞門端頭採用三軸攪拌樁+高壓旋噴樁形成長度 15m 的高強度加固區，並配套降水井降水；大盾構洞門採用玻璃纖維筋連續牆結合短套筒設計，規避傳統洞門鑿除引發的湧水、坍塌風險。

盾構機針對本工程地質與環境條件專項定制：南段 12.52m 氣墊式泥水平衡盾構具備 8bar 承壓能力，適應最小轉彎半徑 450m，可滿足 R520m 曲線疊加 50‰大下坡掘進需求；刀盤開口率 39%，配置耐磨檢測系統與伸縮式主驅動。北段 7.28m 土壓平衡盾構配備防湧門螺旋輸送機與雙出渣門，採用 3 道盾尾刷+1 道止漿板的高承壓盾尾密封系統，有效防控富水砂層噴湧風險。

表 1：北段盾構機針對性設計優化

序號	盾構機部件名稱	針對性設計
1	刀盤	考慮部分隧道為填海、回填區域，可能存在建築遺留樁基、拋石擬採用複合刀盤，刀盤面板及外周佈置耐磨層，同時配置磨損檢測裝置，開挖直徑 7280mm，開口率 41%。
2	刀具配置及佈局	配備正面雙聯中心齒刀 4 把（刀高 180mm），正面齒刀 30 把（刀高 180mm，（含 7 把切砼先行刀，刀高 207mm）），邊緣齒刀 4 把，邊緣 19 寸單刃滾刀 5 把，正面切刀 36 把（刀高 130mm），邊緣刮刀 12 對，超挖齒刀 1 把。
3	主/被動鉸接	採用 14 個油缸，最大收縮力 36983/11545KN（350bar），鉸接角度 1.79°/1.28°，經計算得出盾構機最小轉彎半徑為 250m，滿足區間最小轉彎半徑 600m 的要求 2 道（橡膠密封+緊急氣囊）組合密封。
4	主驅動	主驅動採用 3.61m 大直徑主軸承，承載力更強，壽命更長；額定扭矩 8620KNm，脫困扭矩 9820kNm，應對軟土地層和磨地連牆的設計有足夠的餘量。同時主驅動設置有 2 道聚氨酯密封，最大的工作壓力為 10bar，滿足至少埋深 30m 的工作環境，同時雙密封也保證了下穿海域的時的安全。
5	螺旋機	針對海域及強透水砂層，螺旋機前端配防湧門，尾部配雙出渣門，噴湧時，可交替打開進行掘進，或者減小閘門開口，利用“迷宮密封”的原理，降低噴湧程度；螺旋機預留有保壓泵渣介面，在掘進到具有噴湧風險的地層時，將保壓泵裝置連接螺旋機，保住壓力降低噴湧風險。
6	盾尾密封	盾尾密封採用 3 道盾尾刷+1 道止漿板，最大承壓能力 6bar。

3.3 施工過程精細化管控

建立掘進參數指令管控與試掘進總結制度，按地層類型實施差異化參數控制：全斷面黏土层總推力≤42000kN、扭矩≤2000kN・m、貫入度 15～25mm/r；含砂地層貫入度降至 7～15mm/r。出土量嚴格控制在理論值±2%範圍內，同步注漿填充係數 1.18～1.3，及時跟進二次注漿與盾尾油脂壓注（150～180kg/環），並透過注入克泥效填充盾體間隙，阻斷水砂後竄通道。現場佈設自動化監測系統，覆蓋地表沉降、基坑測斜、支撐軸力、地下水位等關鍵指標，數據即時上傳、分級預警，確保趨勢異常立即停機糾偏。

4 高風險作業安全管控實踐

4.1 直徑 12.52m 泥水平衡盾構未封頂基坑始發

ES6 站始發階段頂板未封閉，僅完成底板及部分側牆澆築，基坑採用型鋼支撐+八字斜撐體系，側牆與連續牆間隙存在漏漿、失壓風險。採取針對性控制措施：洞門側牆預埋注漿管預先填充封堵；始發階段氣泡艙壓力嚴格控制在 0.6bar，掘進至正 2 環後立即實施盾尾注漿封堵洞門，透過盾體徑向孔注入克泥效阻斷泥水後竄；盾構底部持續注入膨潤土預防栽頭。穿越孤石段採用低轉速（1rpm）、低貫入度（5～10mm/r），將泥水黏度提升至 18～20s、排泥流量調至 2300m³/h，並循環啟用碎石機，避免積渣滯排。始發完成 80 環後，地表最大沉降–5.6mm，基坑測斜累計僅 1.2mm，姿態與上浮控制在毫米級，實現未封頂工況下大盾構安全始發。

4.2 超深基坑（30m 級）開挖與吊腳牆支護

ES5 站長度 364m，開挖深度 25～30m，含吊腳牆區段，地下連續牆未全斷面嵌入坑底，且需開挖強度 80～160MPa 的中風化花崗岩約 1.5 萬 m³。項目嚴控成槽品質，採用三軸攪拌樁進行槽壁預加固，地下連續牆實施 100%超音波檢測及 5%取芯驗證；牆體採用 CWS 柔性接頭並深入微風化層，有效隔斷承壓水。基坑支撐體系採用 1 道混凝土支撐+5～6 道鋼支撐及換撐，遵循「分層分段、先撐後挖、對稱平衡」原則，每段鋼支撐 24h 內完成架設並施加預軸力。淤泥土層按 1:2 放坡並鋪設鋼板防止陷機，現場佈設 18 口降水井持續降水。第三方監測表明，牆體變形及支撐軸力均在控制限值內，未發生滲漏、突湧等險情。

4.3 盾構淺覆土下穿建構築物及長距離海域掘進

北段 ES1～ES2 區間土壓平衡盾構側穿海堤（淨距 12m）、下穿地下停車場樁基（最小淨距 1.17m），地層以淤泥質黏土與砂層為主，易發生噴湧、結泥餅。透過控制土倉壓力 1.0～1.7bar、出土量 72～75m³/環，同步注漿量 6.5～8m³，並添加泡沫劑與膨潤土進行渣土改良，穿越期間建築物最大沉降 12mm，深層水平位移僅 5.42mm。南段泥水平衡盾構完成 3010m 海域掘進，下穿 E 區與 A 區海堤（最小淨距 2.8m），面臨盾尾密封失效及上軟下硬地層換刀風險，透過穩定泥水艙壓力、嚴格盾尾油脂注入、超前地質預報及潛水員定期檢查等措施，保障跨海段連續安全推進。

表 2：北段 ES1～ES2 區間土壓平衡盾構掘進參數控制總結

土倉壓力 bar	刀盤扭矩 KNM	總推力 t	推進速度 mm/min	刀盤轉速 rpm	出土量 M³	同步注漿量 M³	注漿壓力 Bar
1.0～1.7	1000～2400	900～1800	30～60	1.1～1.5	72～75	6～8	2.1～2.8

4.4 矩形頂管淺覆土下穿繁忙交通要道

ES1、ES2 站出入口採用 4.9m×4.9m 土壓平衡矩形頂管，覆土厚度僅 3.5～6m，下穿關閘方向友誼橋大馬路及馬場北大馬路，鄰近 110kV 高壓電纜（淨距 3m）。設計採用三軸攪拌樁+水平 MJS 全通道 180° 擺噴加固地層；頂進階段以土壓平衡保壓推進，嚴格控制出土量，接收端實施預加固並設置水平探孔檢驗，配合路面即時監測，有效控制地層損失，確保道路交通不中斷及電纜、橋樑結構安全。

5 應急管理與險情聯動處置

5.1 跨部門聯合演練與政企聯動機制

為提升突發事故應急處置與跨部門協同能

力，2025 年 7 月 28 日，在澳門公共建設局領導、項目管理單位組織下，澳門消防局聯合勞工事務局、治安警察局、承建單位及監理單位，在北段 ES3 站與 ES4 站之間盾構隧道內開展聯合消防實戰演習。演習模擬隧道內燒焊作業引燃可燃物場景，安全監督員立即啟動內部應急程序並向消防局報警。消防局接報後派遣 10 輛應急救援車輛及 39 名救援人員到場，按預案開展搜救、滅火、排煙作業，並對 1 名模擬煙霧中毒昏迷人員實施緊急救護與轉送。演習歷時約 1 小時，各單位共派出近 70 名人員，過程順暢高效，達到預期目標。演習後召開復盤檢討會，進一步完善隧道應急處置流程與跨部門協調機制。

圖 3：消防局參與演練新聞

5.2 應急預案與資源保障

針對 7 項Ⅰ級初始風險，分別編製專項應急預案，覆蓋火災、泥水擊穿、基坑突湧、盾構停機、颱風海水倒灌等典型情景。現場儲備快乾水泥、聚氨酯、注漿設備、滅火器材、急救裝備、鋼板、沙袋等應急物資，並定期開展無腳本實戰演練，確保人員熟練響應。盾構隧道內配置 LED 應急照明、510kVA 應急發電機、氣體檢測儀等設備，保障斷電或災變條件下生命通道安全暢通。

5.3 多方監測聯動與資訊共用

盾構側穿 B7、B8、B11 等在建深基坑期間，項目與相鄰工地建立監測數據每日郵件共用及應急聯動機制，要求對方在穿越窗口期暫緩開挖，備足回填水土與臨時支撐，共同監測圍護結構變形，有效避免交叉施工疊加擾動導致失穩。

5.4 典型險情處置——盾構長時間停機保壓

ES3 ~ ES4 區間土壓平衡盾構左線因渣土外運限制需停機 15 天，停機位置選在脫離高透水砂層的 252 環處。處置措施：維持土倉頂部壓力 1.5 ~ 1.7bar，每 4h 轉動刀盤 1 ~ 2 分鐘，每日向前保壓掘進 10 ~ 20cm 並注入膨潤土，防止掌子面結泥餅與刀盤抱死；盾尾補充注入油脂並微推 2 ~ 3cm 後再注入膨潤土，避免密封系統固結；監測頻率加密至每日 2 次。最終周邊地表最大沉降僅 10mm，盾構無裹附、無栽頭，恢復掘進後姿態穩定，為盾構長時間停機保壓提供了工程範例。

6 結論與建議

澳門輕軌東線在填海區複雜地質、超深基坑、大直徑盾構跨海掘進、近距離下穿敏感建築物等高風險疊加工況下，透過構建「一張圖」統領的三級風險管控與政企聯動應急體系，實現全過程安全可控，監測指標均滿足規範限值要求。項目核心經驗如下：詳細補充勘探與設計優化避讓是風險源頭控制的基礎；地層適配性盾構選型與全方位端頭預加固是盾構安全始發接收的前提；掘進參數精細化管控、高填充注漿與自動化監測構成施工動態調控的關鍵；政府多部門聯合演練與「物資預置+應急保障」機制是突發險情快速處置的保障。後續應持續總結工程實踐經驗，進一步提升大型跨海軌道交通基建工程安全管控韌性與應急處置能力。

參考文獻

［1］ 中華人民共和國國家標準。盾構法隧道施工與驗收規範（GB 50446–2018）［S］. 北京：中國計劃出版社, 2018.

［2］ 洪開榮, 陳饋, 馮歡歡。中國盾構工程技術發展與創新［J］. 隧道建設, 2020, 40（1）：1–18.

［3］ 朱偉。盾構隧道施工風險與控制對策 ［J］. 岩土工程學報, 2011, 33（S1）：146–151.

［4］ 張頂立。城市地下工程施工安全風險控制理論與實踐［M］. 北京：科學出版社, 2017.

［5］ 李興高。海域盾構隧道施工關鍵技術與風險控制［J］. 鐵道工程學報, 2019, 36（7）：56–61.

香港創科時代的職安健發展前瞻

林喜財博士
力勁安全顧問有限公司

一、引　言

回想於 1987 年 3 月有幸參與在廣州舉辦的「港穗工業安全研討會」。該次會議為期 3 日，由各界代表出席，參加代表包括澳門勞工事務局，香港勞工處、香港大學、香港理工學院、建築公司、安全教育訓練機構等等。研討會包括專題演講，小組討論及實地考察。這些研究、討論和交流見證着中港澳的安全發展。

香港建造業長久以來被視為本港其中一個高風險行業，工地上高處作業及機械操作及吊運工序頻繁進行，稍一疏忽即可能釀成嚴重傷亡。根據香港特別行政區勞工處，本港每年仍錄得約二十宗工地傷亡事故。總結職安警示 2026 六月在過去 10 年，自 2016 年 7 月至 2026 年 6 月期間，香港建造業共有 285 宗死亡意外發生，其中關於高空工作和重型機械及吊運佔據 128 宗（45%）及 87 宗（29%）。因此高空工作和重型機械及吊運的操作作業風險非常高。

反映傳統從 1955 開始以人手監察、事後檢討為主的職業安全健康（下稱「職安健」）模式，已難以完全應付現代建造業複雜多變的風險環境。事實上，隨著香港基建工程量持續上升，加上人口老化令勞動力供應日趨緊張，工地安全管理所承受的壓力較以往任何時候都更為沉重，單靠增聘人手巡查已非長遠可持續的解決方案。

近年，隨著人工智能（AI）、物聯網（IoT）、機械人技術及建築信息模擬（BIM）等創新科技逐漸成熟並趨向普及化、平民化，香港政府與業界正積極將這些技術引入工地安全管理，冀望透過科技手段彌補傳統監管方式的不足，並將安全管理由「事後檢討」逐步轉向「事前預防」。這不單止是技術層面的革新，更牽涉整個行業的思維文化轉變——由過往依賴個別安全主任的經驗判斷，逐步轉向以數據及即時監測為基礎的系統化管理模式。

值得強調的是，職安健議題從來不單純是技術問題，更牽涉法例監管、企業文化、人力資源及成本效益等多重層面的互動。香港作為國際金融及商業中心，其建造業表現往往被視為衡量整體社會治理水平及科技應用能力的一項指標，若工地安全事故頻生，不單損害個別家庭及企業，亦可能影響香港作為宜居、宜業城市的整體形象。有見及此，探討創科如何介入並改善工地安全管理，實有其現實意義及研究價值。

本文旨在從發展背景、主要挑戰、科技應用、正面影響、推行困難、未來方向及區域比較七個角度，全面探討香港在創科時代下職安健的發展狀況，並以建造業工地安全作為具體例子，分析科技如何重塑這個傳統行業的安全文化，同時亦會客觀指出現時科技應用尚未能完全解決的結構性問題，以期為讀者提供一個較為全面而持平的觀察角度，避免陷入「科技萬能」的迷思，亦不致低估創新科技對行業帶來的實質變革。

在研究方法上，本文主要採用文獻整理及次

級資料分析的方式，梳理香港政府部門公開文件、立法會資料文件、財政預算案內容，以及業界公開報導所披露的創新科技應用個案，藉此建構一個較為全面的分析框架。同時，本文亦嘗試引入職業安全健康學科中經典的「危害控制層級」（Hierarchy of Hazard Control）理論作為分析工具，該理論將控制風險的手段由高至低分為消除（Elimination）、替代（Substitution）、工程控制（Engineering Control）、行政管理（Administrative Control）及個人防護裝備（Personal Protective Equipment）五個層次，理論上層次愈高，控制成效愈根本、愈可靠。以此框架檢視，本文其後討論的機械人技術可視為「消除」層次的應用（直接移除工人暴露於危害的機會），而 AI 視像監控及物聯網感測器則較接近「工程控制」及「行政管理」層次（透過系統設計及監察流程降低風險），這種理論映射有助讀者更系統地理解不同創科應用在風險管理架構中的相對位置及局限，而非將各項科技視為同質、可互相取代的措施。

二、香港職安健在創科時代的發展背景

香港勞工處近年積極推動職安健與創新科技結合，最具代表性的例子是與職業安全健康局合辦的「職安健創新及科技博覽」。此博覽已踏入第二屆，於二零二六年六月二日至三日舉行，為各行各業提供一個交流平台，展示最新的職安健創新方案、產品與技術，同場並頒發「職安健創科大獎」，藉此鼓勵企業與初創投入資源研發相關產品。此類博覽的意義，不單在於展示成果，更在於促成不同行業、不同規模企業之間的技術交流，讓中小企亦有機會接觸及了解適合自身規模採用的創新方案，而非只有大型承建商才能負擔或接觸相關資訊。

與此同時，政府亦鼓勵建造業善用創新科技與人工智能，勞工處職業安全主任在巡查地盤期間，會實地了解相關系統的實際應用情況，確保科技真正落地而非流於形式，甚至淪為應付檢查的門面工程。在具體政策工具上，「建造業安全獎勵計劃」新增「吊運安全創新大獎」，專門表揚在吊運（即起重）作業中採用創新技術以改善安全的地盤，反映政府有意透過獎勵機制，引導業界將資源投放在高風險工序的科技化改善之上，而非平均分配於所有範疇。

此外，勞工處亦推出「職安健流動應用程式」，內含多元化的職安健資訊，以及網上「職安健知多少」問答遊戲，透過數碼化、互動化的方式，將職安健知識普及至前線工友，這亦是政府推動全民職安健意識的重要一環。值得留意的是，這種由下而上的公眾教育策略，與傳統由上而下的行政指令式監管形成互補，兩者相輔相成，方能真正提升整體行業的安全文化水平。整體而言，香港職安健在創科時代的發展，並非單純由上而下的行政指令，而是結合獎勵機制、公眾教育及業界交流平台，多管齊下地推動科技融入日常安全管理，形成一個較為立體及可持續的發展模式。

三、工地安全的主要挑戰

儘管政府與業界積極推動創新，香港工地安全仍然面對多項根深蒂固的結構性挑戰，這些挑戰往往並非單靠科技即可徹底解決。首先，高處墮落和重型機械及吊運多年來一直是本港致命工傷的首要成因 128 宗（45%）及 87 宗（29%）。根據本人在香港大學建築學院的博士論文研究安全管理系統及進行安全稽核所得，有 13 個因素影響建造業安全的因素，包括：

1. 承建業內細規模企業眾多；
2. 合約以競投方式批出；
3. 多重承建商制度；
4. 分包制度；
5. 施工時間緊迫；
6. 工人教育水平較低；

7．工人流動率高、更換頻繁；

8．外地或非法勞工；

9．工種繁多，地盤流動性大；

10．需長期在露天環境工作，受天氣影響；

11．聯營工程項目；

12．安全管理系統；及

13．政府在執法方面所擔當嘅角色。

其次，進行安全稽核相關的 14 元素安全管理系統，亦發現比較差的 3 個元素分別是：

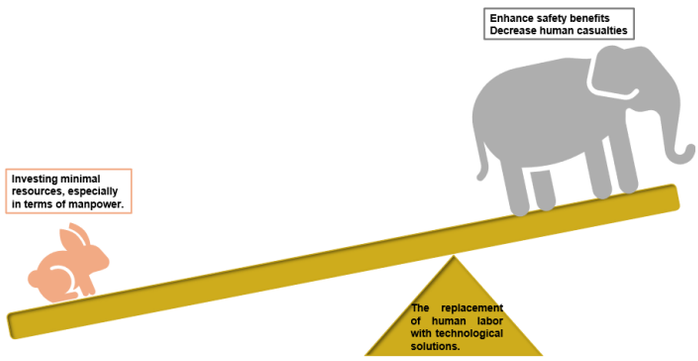
1．安全訓練–並非所有經理及主管均已參加正式安全培訓課程；

2．工作危害識別–需要現場安全人員及前線管理層不斷努力，跟上不斷轉變的工地環境及相關危害；

3．高處作業–設置及維持高空工作安全措施需要龐大財政開支。

四、創新科技在工地安全的應用

面對上述挑戰，業界近年積極把創新科技人工智能（AI）引入日常安全管理。以本地初創學士學位論文為例 Raglan & Helen–安全槓桿效應理論 2026：（i）以最少人力投入，達致最大安全成效（ii）人的行為：變化多端→難以達致一致的安全標準（iii）以科技方案取代人力（例如：4S & AI）（見下圖）。



以下 4S & AI 輔助 14 元素的安全管理系統：

安全管理系統 14 元素	4S & AI
1. 安全政策	
2. 安全組織	
3. 安全培訓	AI 訓練影片 / 虛擬實境訓練
4. 內部安全規則	電子工作許可證 / 電子鎖
5. 安全視察	危險區域警示（移動機械 / 塔式起重機 / 勞工處無人機）
6. 個人防護裝備計劃	工人定位
7. 意外或事故調查	AI 監察
8. 緊急情況的應變	密閉空間監察
9. 評核、挑選及管控次承建商	
10. 安全委員會	
11. 工作危害識別	進行危害分析/參與風險評估及施工方案
12.安全推廣	
13.意外控制及消除危害計劃	中央管理平台
14.職業健康保障計劃	對應多項 AI 健康功能監控

Roger Lee 分享：AI 是一種可以提升整體安全表現的工具。可視為工程控制的一種手段（例如用 AI 控制機械人代替人在密閉空間工作—消除風險），可與第 13 項「意外控制及消除危害計劃」扣連。AI 技術還可以用於：安全訓練（製作影片、AI 角色講解安全事項）、監察安全規則遵守情況（AI 鏡頭）、安全巡查（著名的勞工處無人機）、協助於事故調查中查找根本原因、模擬緊急情況及應變、以及在事故成因分析及風險識別方面的大數據管理。

當中 AI 視像監控系統的應用尤其廣泛，能夠自動辨識工友是否穿戴齊全安全裝備，例如安全帶及頭盔，並直接生成可供數據分析的報告，目前已應用於本港超過二十個地盤項目，大幅減輕人手巡查的負擔，亦令監察不再受限於安全主任的巡查時間表，而是全天候持續運作。

智能穿戴裝置方面，「智能地盤」系統為每位工人配發智慧手錶，透過手機應用程式連結中央數據中心，並配合智慧鎖及追蹤標籤等硬件設施，實現地盤人員位置與狀態的即時掌握，一旦工人進入未經授權的高危區域，系統亦可即時發出警示。物聯網感測器的應用亦日益普及，隨著二零二六年新規定生效，中大型地盤須強制引入「安全智慧工地系統」（俗稱 4S 系統），系統結合 AI 視頻監控、物聯網感測器及人員定位技術，實時監測吊運及高空工作等高風險工序，一旦偵測到異常情況即時發出警報，讓管理層及時介入處理。

在機械人技術方面，本港建築公司亦積極引入自動化設備，例如寶嘉建築有限公司採用的自動鑽孔與錨栓機械人，能夠取代工人執行高危工序，並配合數位孿生（Digital Twin）管理平台，將地盤實況以虛擬三維模型呈現，方便管理層遠距離掌握工地狀況，甚至可以在事故發生前，透過模擬預測潛在風險點。此外，透過 4G 及 5G 網絡進行的遠端監控，亦令管理人員毋須親身在場，即可實時了解現場情況，大幅提升管理效率與應變速度，對於同時管理多個地盤項目的機構而言，這種遠端管理能力尤其重要，能有效節省往返各地盤所耗費的時間及人力成本。

但是，AI 仍在學習中。AI 模型並不知道事實，它們只是在高維表徵空間中導航概率。當你問大型語言模型：蘋果公司的 CEO 是誰時，它並沒有去查資料庫，也沒有檢索知識圖譜，它沒有人類意義上的記憶。

五、創科帶來的正面影響

創新科技的引入為香港工地安全帶來多方面的正面影響。首先，透過 AI 煙霧及火災偵測、溫濕度監測及危險警報系統，管理層能夠在意外發生時即時獲得預警，實現真正的「防患於未然」，而非傳統上只能事後檢討的被動模式，這種思維轉變對於降低重大事故發生率具有關鍵意義。其次，機械人技術代替工人執行高危工序，例如鑽孔、錨栓等高風險作業，有效降低工友暴露於高空及密閉空間等危險環境的機會，同時亦可避免因長期重複性動作而引致的勞損傷害，長遠有助改善工人的職業健康狀況。

在設計層面，政府推動業界運用建築信息模擬（BIM）技術，將「建築安全設計」概念融入規劃階段，即在項目動工前已於圖紙及模型中預先識別及消除潛在安全隱患，而非待工程進行中才發現問題並臨時補救，這種「安全前置」的思維轉變意義重大，某程度上亦能減省日後因設計缺陷而須臨時修改工序所帶來的額外風險及成本。此外，AI 鏡頭及物聯網感測器所產生的大量數據，亦令管理層能夠進行更深入的分析與追溯，準確找出風險最高的工序及地點，從而對症下藥地調配資源與加強監管，而非憑經驗或直覺作出決策。相較於純粹依靠人手巡查，AI 監控系統能夠二十四小時不間斷

運作，不會因疲勞、分心或人情關係而出現疏漏或包庇，監察覆蓋範圍及公正性亦因而更為全面及客觀。

然而，值得留意的是，現時公開資料中，尚未見有官方統計數字清楚量化科技應用前後工傷意外的減幅，換言之，上述正面影響主要建基於系統本身的功能設計及政府政策方向的邏輯推論，而非已獲實證數據充分驗證的成果，此點在評估創科成效時應予以審慎看待，避免過度樂觀地誇大科技的即時成效。

六、實際推行的困難

儘管創科為工地安全帶來明顯優勢，其實際推行過程仍面對不少結構性困難，這些困難往往比技術本身的成熟度更影響推行進度。首先，新技術及新建材往往面臨「首例難求」的困局——由於率先採用新技術一旦出現問題須承擔相應責任，業界普遍抱持觀望態度，寧願等待他人率先試用並累積成功案例，形成技術推廣的惡性循環，令不少優質方案雖然技術上已經成熟，卻遲遲未能大規模應用。其次，新科技及新建材的審批程序繁複，往往需時甚長，無形中拖慢了業界採用創新方案的意欲及速度，部分中小企甚至因而卻步。

與此同時，不同工程項目及政府部門對同一項科技的要求標準未必一致，令承建商在不同項目間須重複進行認證及調整，增添不必要的行政負擔及成本。現時「安全智慧工地」系統等創新方案，主要於個別工務工程項目中試行，私人市場的採用比例仍然明顯落後，業界普遍期望政府能將相關試點計劃進一步擴展至私人發展項目，讓創科成效能夠惠及更廣泛的建造業界，而非僅局限於政府主導的工程。

成本方面，雖然政府設有「建造業創新及科技基金」提供資助，但對於資金及人手皆相對有限的中小型承建商而言，添置感測器、AI 鏡頭及機械人等設備的初期投資仍屬沉重負擔，加上部分系統仍需持續繳付軟件訂閱及維護費用，長遠營運成本亦不容忽視。人力資源方面，地盤資深技工普遍年紀較大，對操作新系統及應用程式的適應速度較慢，需要額外投放時間進行培訓，方能確保科技真正被有效運用而非閒置生塵。最後，香港建造業慣用的多層分判制度，亦為科技推行帶來執行上的挑戰——即使總承建商引入先進系統，亦難以確保每一層分判商均切實遵循及配合，執行成效容易因層層外判而打折扣，形成「總部有系統、地盤各自為政」的落差。

七、未來發展方向

展望未來，香港政府與業界已就創科在職安健領域的發展方向訂立較為明確的藍圖。資金投放方面，《二零二六至二七年度財政預算案》宣布向「建造業創新及科技基金」注資十億元，連同建造業議會原有的四億元資源，合共十四億元，將繼續用於支持業界採購及應用建造機械人、人工智能及數碼科技，反映政府對科技轉型的支持並非一次性措施，而是持續性的長期投入。在整體發展策略上，業界提出「建造業 2.0」的轉型方向，配合國家「十五五」規劃為建築業描繪的智慧化、綠色化、國際化藍圖，致力提升香港建造業於全球市場的競爭力，擺脫單純依賴傳統人力密集模式的局限，並期望藉此吸引更多年輕人才投身這個逐漸「科技化」的行業。

人才培養方面，二零二六年政府新增智慧建造、綠色建築及 BIM 相關學額合共一萬二千個，並推出「模組化綜合建築技術認證」及「綠色建築工程師」等專項培訓課程，從教育及人才供應源頭著手，確保業界具備足夠具備科技應用能力的新一代人才，藉此紓緩前述人才斷層及工人老化的結構性問題。在執法層面，政府亦明確表示將透過「加強巡查、善用科技、提高罰則」三方面著手，改善整體職業

安全環境，意味科技的角色將不再局限於企業內部管理，亦會延伸至政府執法及監管工作之中，形成企業自我監察與官方執法雙軌並行的格局。此外，政府預留一億元支持香港建築科技研究院開展多項研究，包括檢視現行建築標準及探討人工智能的應用可能性，反映未來建築安全標準本身亦將因應科技發展而持續演進調整，而非一成不變。

綜合而言，香港職安健未來的發展方向，並非單純在地盤增添更多科技設備，而是透過資金支持、人才培訓、標準檢視及執法強化四方面同步配合，冀望將香港建造業由傳統模式，全面轉型為智慧化、數據化及以預防為本的現代安全管理體系，這亦與國際上主要建造業發達地區的發展趨勢大致吻合。

八、區域及國際比較

若將香港的發展放諸區域及國際脈絡中檢視，不難發現「智慧工地」已成為多個先進經濟體共同推動的方向，而香港在當中並非孤例，反而在部分範疇具有一定的先行優勢。事實上，香港政府自二零二三年二月起，已強制規定價值超過三千萬元的基本工務工程合約須採用「安全智慧工地系統」（4S），系統由中央管理平台、智能設備及用作數據傳輸的通訊網絡三部分組成，能夠及早識別潛在的安全隱患，此項要求在時間上早於不少鄰近地區的類似規管措施，反映香港在政策層面的推動力度並不落後。

九、研究局限

本文在論述過程中，亦意識到本身存在若干局限，值得在此坦誠交代，以符合學術論文應有的嚴謹態度。首先，本文採用的資料主要來自政府公開文件及媒體報導，屬次級資料分析性質，未有進行第一手的地盤實地考察、工人問卷調查或企業訪談，因此在反映前線工人對創科應用的實際觀感及接受程度方面，仍有一定局限，未來研究可考慮加強大學學位論文質性訪談或量化問卷，以補足由上而下的政策文件視角所未能涵蓋的基層聲音。例如，無人機研究自香港大學 2019 年起應用在建築地盤。其他包含以下類別：

1. 海因里希骨牌理論（1931）意外成因模型
2. Raglan & Daisy 2023 Theory 孔夫子人本安康發展理論
3. Raglan & Nam Model 2025 「職安健」修身論
4. Raglan & Vincent–S.A.F.E.T.Y.安全模型 2026
5. Raglan & Nico–安全英雄理論 2026
6. Raglan & Derrick–三角安全模型 2026
7. Raglan & Hong–交通燈安全理論 2026
8. Raglan & Brian–星星之火安全理論 2026

十、結　論

香港建造業工地安全正處於傳統人手監管模式與創新科技應用並存的過渡階段。一方面，高處墮落、機械意外、氣候威脅、分判制度及人手老化等結構性挑戰依然存在，短期內難以完全消除，這些問題根植於行業的組織結構及人口結構，並非單靠技術投入即可一蹴而就；另一方面，AI 視像監控、物聯網感測、機械人技術及數位孿生等創新科技，正逐步為工地安全管理帶來預警能力提升、風險暴露減少及數據化決策等實質效益，為行業注入新的可能性。

然而，首例難求、審批繁複、標準不一及中小企成本負擔等推行障礙，仍然是科技普及路上不可忽視的絆腳石，若未能妥善處理，即使技術本身再先進，亦難以真正惠及整個行業，尤其是佔業界大多數的中小型承建商。展望未來，隨著政府資金持續投入、人才培訓體系逐步完善，以及執法與科技應用進一步結

合，香港建造業有望在「建造業 2.0」的框架下，逐步建立一套更為智慧、更具前瞻性的職業安全健康管理體系，為前線工友締造更安全的工作環境，同時提升整個行業在國際市場上的競爭力與可持續發展能力。歸根究底，科技終究只是工具，如何有效落實、如何確保每一層分判商及每一位前線工友都能真正受惠，才是決定香港職安健創科轉型能否成功的關鍵所在。

與此同時，研究揭示成功的安全管理需要具有 5 個主要點：

➢ 政府、發展商、培訓機構、承建商、安全專業人員同工作隊伍之間建立夥伴關係；

➢ 參與及承擔；

➢ 清晰的職責與問責；

➢ 為安全健康分配足夠資源；以及

➢ 僱員及工會的諮詢要有成效及效率。

（《香港建築承建商實施安全管理系統之調查研究》–講者林喜財博士，由 APOSHO–20 與中國職業安全健康協會（China Occupational Safety & Health Association）聯合主辦，地點：中國北京，日期：2004 年 8 月 31 日至 9 月 1 日）。

其次，成功的 14 元素的安全管理系統必須全面全面執行，欠缺一個元素都會導致整個安全管理系統失效（見下圖）。

（《香港大型/舉世知名公共工程項目安全審核制度之實施》—講者林喜財博士，由 CIB W99「全球建築安全與健康團結國際會議」與北京清華大學聯合主辦，地點：中國北京，日期：2006 年 6 月 27 日至 30 日）。

再者，五個步驟的安全工作系統（5–step of Safety Systems of Work）應該納入施工方案（Method Statement）之內。針對高風險作業嘅控制，為避免發生任何意外，建議喺制訂施工方案、風險評估同安全工作程序之後，採用「工作啟動會議」（Task Launching Meeting）、提供「工作方法培訓」（Methodology Training），並實施「工作安全分析」（Job Safety Analysis）。

最後，隨著香港及國家發展，香港需要積極對接國家「十五五」規劃，落實「規劃先行、基建帶動」的發展方針。正因如此，香港未來重大基建「北部都會區」會作為香港未來發展的新引擎，以基建先行帶動創科與產業導入。但如何能令基建發展順利，按著規劃時間表的進行？這正正有賴於香港一直堅持的建築安全文化和創新的建築安全監察系統引入，建造一個安全的工作環境，推進更安全，更有效率的基建發展，從而貫徹「規劃先行、基建帶動」的發展方針。

澳門建築業職安健最新發展——安全文化與安全領導的新趨勢

袁詠琪
澳門職業安全健康管理專業協會

摘　要：隨着澳門大型綜合旅遊休閒項目及基建工程持續發展，建築業已成為本澳重要經濟產業之一，職業安全健康管理日益受到重視。本文以澳門建築業為研究背景，探討其職安健管理的發展歷程、現況及未來趨勢，並分析安全領導、安全氣候與安全行為之間的關係。

研究指出，澳門建築業的職安健管理由早期以法規監管及技術控制為主，逐步發展至制度化管理，並進一步轉向重視安全文化及行為安全管理的現代模式。近年隨着科技發展，業界開始引入智慧工地概念，透過智能化技術提升工地安全管理水平。同時，ISO45001 職業安全健康管理系統、安全文化本地化，以及職業健康與心理健康管理，亦成為重要發展方向。

本文主要透過文獻分析，並結合筆者參與澳門大型綜合旅遊休閒建築工程項目的實務經驗進行探討。研究認為，未來澳門建築業職安健發展將朝向制度化、智能化、人本化及可持續方向推進。除持續完善法規及安全管理制度外，亦需加強安全文化建設、提升管理層安全領導能力、推動智慧工地發展、強化安全培訓，以及關注工友職業心理健康。透過政府、企業及工友共同參與，方能建立更安全、健康及可持續的工作環境，進一步提升澳門建築業整體職安健水平。

關鍵詞：職業安全健康、安全文化、安全領導、安全氣候

一、引　言

過去二十年，澳門經濟及城市建設快速發展。自博彩經營權開放及大型綜合旅遊休閒項目興起後，大型酒店度假村、娛樂設施、公共房屋、交通設施及其他公共基建工程相繼展開，帶動建築業迅速擴張。建築業不但提供大量就業機會，亦成為推動城市現代化及經濟適度多元發展的重要力量。根據澳門勞工事務局資料，2024 年建築業平均僱用約 26,000 名從業員，約佔本澳總就業人口 7%，反映建築業在本澳經濟與社會發展中的重要性（澳門勞工事務局，2024）。

然而，建築業同時屬於高風險行業。施工現場經常涉及高空工作、吊運、重型機械操作、密閉空間、電力工作及多工種交叉作業等工序；若規劃、協調、監察或溝通不足，容易引致人體下墮、物件打擊、機械夾傷及觸電等事故。澳門建築業亦面對工期緊迫、多層分判、勞動力來源多元化、安全培訓水平不一，以及大型複雜工程增加等挑戰。這些因素不但提高工序本身的風險，亦增加總承建商、分判商及前線工友之間的安全協調難度（Lingard & Rowlinson，1994；Mohamed，2002）。

過往建築安全管理較依賴法規、工地巡查、個人防護裝備及工程技術控制。這些措施對建立最低安全標準具有不可取代的作用，但國際職安健研究亦指出，事故往往與組織決策、管理方式、安全氣候及前線行為互相影響，不能單純歸因於個別工友的不安全行為（Reason，1997；Cooper，2000）。因此，近年澳門建築業逐步由「被動遵守」轉向更重視預防、參與及持續改善的主動式管理模式。

本文旨在整理澳門建築業職安健管理的主要發展脈絡，並討論安全文化、安全領導、安全氣候與工友安全行為之間的關係。同時，本文結合筆者參與數個澳門大型建築工程項目的實務觀察，以及與業界同儕在安全管理上的交流經驗，分析智慧工地、ISO45001、安全文化本地化及職業健康等新趨勢。本文屬敘述性文獻綜述及實務反思，不以個別地盤為正式研究個案，亦不對全澳建築業作統計推論。

二、澳門建築業職安健發展歷程

澳門建築業職安健管理並非一次性由傳統模式轉變為現代模式，而是在法規、工程需求、企業管理及國際標準共同影響下逐步演變。為便於討論，本文將其概括為三個互相重疊的階段（表 1）。

表 1　澳門建築業職安健管理的概括發展階段

概括時期	主要管理取向	代表措施	主要限制
1990 年代至 2000 年代初	法規及技術控制	工地規範、個人防護裝備、巡查及執法	偏重合規及事故後處理
2000 年代中後期至 2010 年代	制度化安全管理	安全管理系統、風險評估、施工方案、培訓、審核	文件與前線執行可能脫節
2010 年代中後期至今	安全文化及主動參與	安全領導、行為安全管理、安全氣候、數碼化管理	成熟程度受企業資源及管理文化影響

2.1　傳統法規管理模式

澳門早期建築業的職業安全健康管理，尤其在 1990 年代至 2000 年代初期，主要以政府法規監管及施工技術控制為核心。第 44/91/M 號法令《建築安全與衛生章程》為當時建築工地的安全及衛生管理建立基本法律框架，規範範圍包括工地一般預防措施、起重機械操作、挖掘工程、地下及上蓋工程、拆卸工程、高空工作、於電線、管道及電氣設備附近施工，以及個人防護、集體防護、工地衛生和急救等要求（澳門特別行政區政府，1991）。

在此階段，政府主要透過安全宣傳、培訓、巡查及執法，促使承建商及工友遵守最低安全標準。這類規管對改善明顯的物理危害及違規操作十分重要，但其管理邏輯較偏向由外而內的合規控制，即依靠規則、監察及處罰確保安全。若管理層只在巡查或事故發生後才加強安全，工友便可能形成「有人監察才遵守」的應付心態。

隨着 2000 年代初大型綜合旅遊休閒項目快速發展，工程規模、施工密度、分判層級及勞動力數量顯著增加。根據筆者對早期大型工程的實務回顧，部分工地雖已具備安全人員、基本程序及個人防護要求，但安全管理仍較集中於巡查、糾正及事故處理，工友參與及安全文化建設相對有限。這亦促使業界其後逐步引入更完整的安全管理系統。

2.2　安全管理制度化發展

2000 年代中後期起，澳門大型酒店、綜合旅遊休閒及公共工程持續增加，施工管理需要由單一工序控制，提升至跨工種、跨分判層級及跨企業的系統協調。受國際承建商及鄰近地

區安全管理實務影響，部分大型項目開始引入安全管理系統（Safety Management System，SMS），並建立較有系統的政策、組織、培訓、風險評估、事故調查、緊急應變、巡查、審核、分判商管理及安全推廣機制（Tam，Zeng，& Deng，2004）。

風險評估及施工方案審批逐漸成為高風險工序的重要前置要求。承建商通常在工序開始前識別危害、分析風險、確定控制措施，並透過施工方案、工作許可、安全交底及班前會議，把控制要求傳達至前線。這種做法把管理重點由事故後糾正，前移至施工前規劃及施工中的持續監察（Mohamed，2002）。

進入 2010 年代後，部分大型企業由 OHSAS18001 過渡至 ISO45001 職業安全健康管理系統。ISO45001 強調領導層承擔、員工參與、風險與機遇、績效評估及持續改善，促使職安健不再只是安全部門的責任，而是企業管治及營運管理的一部分（International Organization for Standardization，2018）。第 2/2023 號法律《建築業職業安全健康法》的實施，亦進一步明確建築工程各持份者的安全責任及專業人員配置要求（澳門特別行政區政府，2023）。

然而，制度化並不必然等同安全成效。筆者在不同工程項目觀察到，部分工地的文件、表格及審批程序十分完整，但前線執行仍會受工期、生產壓力、分判商能力及主管態度影響。若制度只用於審核或認證，而未能轉化為一致的管理行動，便可能出現「重文件、輕現場」的情況。

2.3 安全文化與行為安全管理

自 2010 年代中後期起，隨着安全制度日漸成熟，業界逐步把注意力由「有沒有制度」轉向「制度如何被理解及實行」。安全文化涉及企業對安全的共同價值、信念及行為模式；安全氣候則反映工友在某一時間對管理層安全承諾、資源、溝通及規則執行情況的共同感受（Zohar，1980；Cooper，2000）。

行為安全管理（Behavior-Based Safety，BBS）通常透過現場觀察、即時回饋、正面強化及工友參與，識別和改善與風險相關的行為。常見措施包括安全觀察、開工前安全分享、安全獎勵、工友互相提醒、安全建議及安全推廣活動（Geller，2002）。其優點是把抽象制度轉化為可觀察及可討論的工作行為，但若把事故責任完全歸咎於工友，忽略設計、工期、資源及管理決策，則會偏離系統安全的原意（Reason，1997）。

因此，澳門建築業推行行為安全管理時，應把前線行為與組織因素一併考慮。安全觀察不應只是尋找違規，而應同時識別工序設計、工具設備、環境、資訊及工作安排是否合理。這種由責備轉向學習的取向，較能建立工友願意報告問題及參與改善的安全文化。

三、安全領導的重要性

安全領導是連接制度與前線行為的重要環節。管理層如何分配資源、設定工程優先次序、處理趕工壓力及回應安全問題，會向工友傳遞企業真正重視甚麼。研究顯示，安全領導與安全氣候、安全遵從及安全參與行為具有密切關係（Flin & Yule，2004；Clarke，2013）。

在建築工程環境中，安全領導不只屬於公司高層或安全部門。項目經理、地盤總管、工程師、管工、分判商主管及安全人員，均會透過日常決定和溝通影響前線安全。當管理層在進度受壓時仍堅持合理控制措施，工友較容易相信安全承諾是真實和一致的；相反，若口頭強調安全，但實際上默許違規趕工，便會削弱整體安全氣候。

3.1 關懷型安全領導

關懷型安全領導着重關係建立、支持、溝通及信任。管理層主動了解工友的工作困難、

提供足夠資源、聆聽安全建議，以及在工友提出風險時作出正面回應，能提高工友的心理安全感和參與意願（Cooper，2015）。

澳門建築業的勞動力來源多元，不同工友在語言、文化、教育及工作經驗上可能存在差異。關懷型領導並非降低要求，而是確保安全要求能被理解和實行。例如以工友熟悉的語言進行交底、使用圖像或示範補充文字指引、安排足夠休息及飲水，以及讓工友在施工前提出實際困難，均可改善安全溝通。

根據筆者的實務觀察，當主管願意走到現場與工友討論工序，而非只在發現問題時作出責備，工友通常更願意主動報告險失事故、設備缺陷及程序不合理之處。這類互信有助企業更早發現風險，亦能把工友由被管理者轉化為安全改善的參與者。

3.2 控制型安全領導

控制型安全領導着重規則、監督、紀律及責任。建築工程涉及高空、吊運、密閉空間及大型機械等重大風險，清晰的程序、許可制度、現場監察及即時停工權限仍然不可缺少。適當的控制有助工友理解不可逾越的安全底線，亦能避免個別不安全行為演變成嚴重事故（Clarke，2013）。

有效控制應具備一致、公平及可解釋的特點。若不同分判商或不同職級受到不同標準對待，工友會質疑制度公平性；若處罰只集中於前線，而管理決策及資源不足不被檢討，亦會削弱安全信任。故此，紀律管理應與事故學習、程序改善及管理責任並行。

3.3 建立平衡式安全領導模式

關懷與控制並非互相排斥。建築安全需要明確底線，也需要讓工友敢於提出問題。平衡式安全領導的重點，是在嚴格控制重大風險的同時，以尊重、溝通和支持促進工友參與。管理層既要在必要時停止危險工作，也要了解違規背後是否涉及工具、工序、培訓或進度安排等問題。

對澳門建築業而言，平衡式領導特別適合多層分判及多元勞動力環境。總承建商需訂立一致的安全底線，分判商主管則需把要求轉化為具體工作安排；安全人員除監察外，亦應協助工程團隊改善施工方法。當各層管理人員以一致方式處理安全，安全文化才不會停留在口號或文件層面。

四、安全氣候與工友安全行為

安全氣候是工友對企業安全政策、管理承諾、資源、溝通及日常執行情況的共同感受。它反映的不是企業文件寫了甚麼，而是工友實際感受到甚麼。例如，管理層是否在趕工時仍把安全放在優先位置、報告危險是否會受到責備、設備不足是否獲迅速處理，均會影響安全氣候（Zohar，1980）。

良好的安全氣候通常包括管理層重視安全、資源充足、培訓有效、規則清晰、溝通開放及工友願意報告風險。當工友相信企業會認真處理安全問題時，較願意遵守程序、正確使用個人防護裝備、參與安全活動、提出改善建議及提醒同事注意危險（Mohamed，2002）。

安全行為一般可分為安全遵從（Safety Compliance）及安全參與（Safety Participation）。安全遵從是完成核心安全要求，例如按程序工作及使用防護裝備；安全參與則是超越最低要求的主動行為，例如參與安全會議、提出建議、協助同事及推廣安全活動（Griffin & Neal，2000；Neal et al.，2000）。

筆者在不同大型工程項目的觀察顯示，即使各地盤採用相近的安全程序，前線安全行為仍可能不同。管理層主動到場、主管願意解釋要求、工友報告問題後得到回應的地盤，通常較容易形成互相提醒及主動參與的氣氛；若安全只由安全部門負責，或工程團隊把安全視為阻礙進度的行政要求，工友則較容易採取最低

限度的應付方式。

因此，改善安全氣候不能只依靠宣傳口號。企業應定期收集工友意見、檢討未遂事故、追蹤整改成效，並把安全表現納入工程管理及分判商評核。安全氣候問卷可作為輔助工具，但更重要的是把調查結果轉化為具體行動，讓工友看見管理層願意回應問題。

五、澳門建築業職安健新趨勢

5.1 智慧工地與科技安全管理

近年大型工程逐步引入智慧工地概念，利用數碼平台、感測器及資料分析提升風險預警與安全監察效率。常見應用包括人工智能影像分析、電子安全巡查、工地實時監控、BIM 建築資訊模型、電子工作許可、工友定位、穿戴式裝置及無人機巡查。

人工智能影像系統可協助識別未佩戴防護裝備、進入限制區域或其他可見的不安全狀況；電子巡查平台則可記錄問題、分派整改責任及追蹤完成情況。BIM 可在施工前模擬工序、空間及臨時工程安排，協助團隊在設計及規劃階段識別風險。

科技的價值在於支援決策，而非取代專業判斷。影像系統可能出現誤判，定位及監控亦涉及私隱、資料管治及工友接受程度。企業推行智慧工地時，應清楚界定資料用途、權限、保存期限及回應程序，並確保科技不會只用作懲罰前線，而是用於改善環境、工序及資源配置。

5.2 ISO 45001 普及化

ISO 45001 把職安健納入組織管治和持續改善框架，要求企業了解內外部環境、識別風險與機遇、加強領導層承擔及員工參與。對澳門大型承建商及國際企業而言，認證有助建立一致程序、配合客戶要求及管理跨項目風險。

然而，認證本身並不保證安全文化成熟。企業需要避免「為認證而認證」，並把文件要求轉化為現場可行的工作方法。審核除了檢查紀錄，亦應關注工友是否理解程序、主管是否提供資源，以及管理層如何處理進度與安全之間的衝突。

5.3 安全文化本地化

澳門建築業具有本地及非本地勞動力共同參與的特點。安全文化本地化並不是降低標準，而是以工友能夠理解、接受及實行的方式傳遞一致要求。企業可採用多語言培訓、圖像化指引、短片示範、現場模擬、開工前分享及同儕交流等方法，提高安全資訊的可及性。

本地化亦包括理解不同工種的實際工作情況。安全培訓若只重複一般規則，未能回應工友每日面對的工具、空間及工序問題，成效便會有限。管理層應讓工友參與施工方案及風險評估討論，利用其實務知識改善控制措施。

5.4 職業健康與心理健康關注增加

現代職安健已由事故預防擴展至整體身心健康。澳門夏季高溫潮濕，戶外及半戶外工友可能面對熱壓力、脫水及疲勞；重複搬運、長時間站立及不良姿勢亦可能引致肌肉骨骼負荷。大型工程的工期壓力、輪班及長工時，則可能影響睡眠、專注力和心理狀態。

企業應把高溫、疲勞及心理健康納入風險評估，合理安排工作與休息、提供飲水和遮蔭、調整高風險時段、改善人力配置，並建立保密及容易使用的支援渠道。關懷工友健康亦是安全領導的一部分，因為疲勞和壓力會影響判斷及安全行為（Kim & Jung，2019）。

六、未來發展方向與建議

6.1 加強安全文化建設

企業應把「安全優先」轉化為可觀察的管理行動，包括在工程計劃中預留安全資源、建立不責備的危險報告機制、定期分享未遂事故及改善結果，以及讓工友參與風險評估和施工方案討論。安全獎勵應避免只以「零事故」為

目標，以免造成隱瞞；較理想的做法是鼓勵主動報告、改善建議及良好控制措施。

6.2 提升安全領導能力

管理層及前線主管的培訓不應只集中於法例及程序，亦應包括安全溝通、衝突處理、風險決策、事故學習及人員關懷等管理技考。企業可把安全領導行為納入主管績效評核，例如是否主動巡查、回應工友意見、按時完成整改及在進度受壓時維持安全底線。

6.3 推動智慧工地發展

政府及業界可透過試點項目、技術指引、人才培訓及適度資助，降低中小型承建商採用智慧工地工具的門檻。科技投資應以重大風險和實際管理需要為導向，先解決高空、吊運、機械碰撞及人車分流等問題，再逐步整合數據平台，避免為科技而科技。

6.4 完善多元勞動力安全培訓

安全培訓應按語言、工種、經驗及風險程度設計。除入職課程外，企業應提供工序前專項交底、實物示範及理解確認，並訓練前線主管以簡明方式說明危害和控制措施。對識字程度較低或新入行工友，圖像、影片及實操演練通常較單純文字更有效。

6.5 關注職業健康與心理健康

未來職安健管理應建立涵蓋熱壓力、疲勞、肌肉骨骼風險及心理健康的綜合方案。企業可設定高溫工作安排、休息及補水標準，檢討長工時及輪班，並提供保密的員工支援服務。主管亦應接受識別疲勞及心理壓力徵兆的基本培訓，及早轉介有需要的工友。

七、研究限制與未來研究方向

本文主要採用文獻分析及筆者實務反思，未有進行系統性問卷、訪談或事故數據統計分析。筆者的觀察來自數個大型工程項目，較能反映大型承建商及綜合旅遊休閒項目的管理實務，但未必代表中小型承建商、短期工程或所有工種的情況。因此，文中對澳門行業發展的判斷應視為趨勢性討論，而非全行業的實證結論。

未來研究可透過安全氣候問卷、半結構訪談、焦點小組及現場觀察，比較不同規模承建商、不同分判層級及不同工種的安全管理經驗；亦可研究第 2/2023 號法律實施後的制度成效，以及智慧工地技術對事故、未遂事故、整改時間和工友接受程度的影響。若能建立澳門本地化的安全氣候量表及長期數據庫，將有助政府及業界制定更具針對性的政策和措施。

八、結　論

澳門建築業職安健管理正由以法規、巡查及事故後處理為主的傳統模式，逐步發展為制度、文化、領導、行為及科技並重的綜合模式。法規和技術控制仍然是安全底線，但現代大型工程的複雜風險，要求企業把職安健融入項目策劃、分判管理、日常領導及前線參與。

本文的核心觀點是，安全制度能否發揮作用，取決於管理層是否持續以資源、決策和行動表達安全承諾。關懷型領導有助建立信任及開放溝通，控制型領導則確保重大風險受到嚴格管理；兩者取得平衡，較能形成正面的安全氣候，推動工友由最低限度的安全遵從，進一步走向主動安全參與。

智慧工地、ISO 45001 及數碼化工具為澳門建築業提供新的風險管理能力，但科技及認證不能取代現場領導和工友經驗。未來政策與企業實務應更重視技術與人本管理的結合，同時處理多元勞動力溝通、職業健康、疲勞及心理健康等議題。

總括而言，澳門建築業要建立更安全、健康及可持續的工作環境，需要政府、發展商、承建商、分判商、專業人員及工友共同承擔責任。當安全由外在規定轉化為共同價值，並透過制度、領導及日常行為持續實踐，職安健管

理才能真正由被動合規邁向主動預防及持續改善。

參考文獻

[1] Clarke, S. (2013). Safety leadership: A meta-analytic review of transformational and transactional leadership styles as antecedents of safety behaviours. Journal of Occupational and Organizational Psychology, 86(1), 22-49.

[2] Cooper, D. (2000). Towards a model of safety culture. Safety Science, 36(2), 111-136.

[3] Cooper, D. (2015). Effective safety leadership: Understanding types and styles that improve safety performance. Professional Safety, 60(2), 49-53.

[4] Flin, R., & Yule, S. (2004). Leadership for safety: Industrial experience. Quality and Safety in Health Care, 13(Suppl. 2), ii45-ii51.

[5] Geller, E. S. (2002). Social influence principles: Fueling participation in occupational safety. Professional Safety, 47(10), 25-31.

[6] Griffin, M. A., & Neal, A. (2000). Perceptions of safety at work: A framework for linking safety climate to safety performance, knowledge, and motivation. Journal of Occupational Health Psychology, 5(3), 347-358.

[7] International Organization for Standardization. (2018). ISO 45001: 2018 occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use.

[8] Kim, B. J., & Jung, S. Y. (2019). The mediating role of job strain in the transformational leadership-safety behavior link: The buffering effect of self-efficacy on safety. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(8), 1425.

[9] Lingard, H., & Rowlinson, S. (1994). Construction site safety in Hong Kong. Construction Management and Economics, 12(6), 501-510.

[10] Mohamed, S. (2002). Safety climate in construction site environments. Journal of ConstructionEngineering and Management, 128(5), 375-384.

[11] Neal, A., Griffin, M. A., & Hart, P. M. (2000). The impact of organizational climate on safety climate and individual behavior. Safety Science, 34(1-3), 99-109.

[12] Reason, J. (1997). Managing the risks of organizational accidents. Ashgate.

[13] Tam, C. M., Zeng, S. X., & Deng, Z. M. (2004). Identifying elements of poor construction safety management in China. Safety Science, 42(7), 569-586.

[14] Zohar, D. (1980). Safety climate in industrial organizations: Theoretical and applied implications. Journal of Applied Psychology, 65(1), 96-102.

[15] 澳門特別行政區政府。(1991)。第 44/91/M 號法令:《建築安全與衛生章程》。

[16] 澳門特別行政區政府。(2023)。第 2/2023 號法律:《建築業職業安全健康法》。

[17] 澳門勞工事務局。(2024)。《工傷統計分析報告》。https://www.dsal.gov.mo/download/pdf/publicity_information/injury_statistics/accreport_c2024.pdf

基於 BIM 的建築安全管理協同模式

莊俊龍
泰科消火保安（澳門）股份有限公司

摘　要：所涉內容以 BIM 數位化三維技術為基本出發點，對 BIM 的視覺化、協調性及類比性三者作系統分析，結合建築工程各類實際安全管控場景，選取 Revit、Navisworks 一類目前主流的 BIM 軟件配套方案。從設計、施工、監理、運維諸方協同角度出發，將全域聯動理念用於 BIM 安全管控架构設計，相應地展開對動態場地配置、全域智能監管、沉浸式訓練等三大安全功能模块的討論，給出每項功能數位化實現方法和現實操作的合理邏輯。文中所提協同思路能貫通建築工程全生命周期的安全數據流，促成風險事前辨識、過程分析、閉環處理三位一體的管控機制，對人、機、物、法、環各項要素在工地的管控有明顯優化價值，有利於避免常見隱患、提高跨崗協作效率，亦是建築工程數位化、標准化、精细化管理的技術支點，對同類基建項目具有可借鑒、可复制的參考意義。

關鍵字：BIM；建築安全管理；協同模式

引　言

建築業是高危險性的行業，其安全管理至今要處理動態風險不易控制、信息彼此孤立、協作效率低三个基本難題。按傳統思路做管理（即靠人工巡檢或用紙面方式）無法很好適應工地所遇的各種工序、環境及人員組合，結果往往有隱患識別慢、責任查證難、資源利用差的現象。對於大中型項目来說，設計、施工乃至監理諸環節若缺乏數據整合或溝通機制，有關安全的信息就容易斷裂，這種斷裂正是事故發生前最應解決的障碍。

有關建築資訊模型（BIM）的科技發展是解決所提難題的一種新思路。BIM 所依據的是三維可視化信息，能將全生命周期的資料作统一處理、對多維內容做碰撞分析、按需要發出類比預警，因而可從設計開始就整合安全相關的各項因素，對施工要素（人、機、物、法、環）作數字對應。但目前以 BIM 技術作安全管理時多只利用其中一環（例如碰撞檢測或進度類比），没有很好利用它作為協同工具的價值--設計與施工乃至監管怎樣配合、如何借助 BIM 建立“識別-評估-處置”一體化的風險管理流程，是業界要加以突破的問題。

1　BIM 技術分析

1.1　定義

所謂 BIM 科技（Building Information Modeling）是把模擬、控制一類手段用於工程項目所涉三維空關的實時管理。按此思路来看，建築業可以借其力量来安排施工流程，使設計得到落實。有關維度可參見圖 1 的說明。從總體上說，BIM 技術是將工程各專業在實際中遇到的數據做統一處理後所獲的信息集合，又以參數化形式建立有助于施工優化的數字建築模型。所建模型按數字邏輯表達物體本身及其用途，因此也叫作建築信息建模技術。

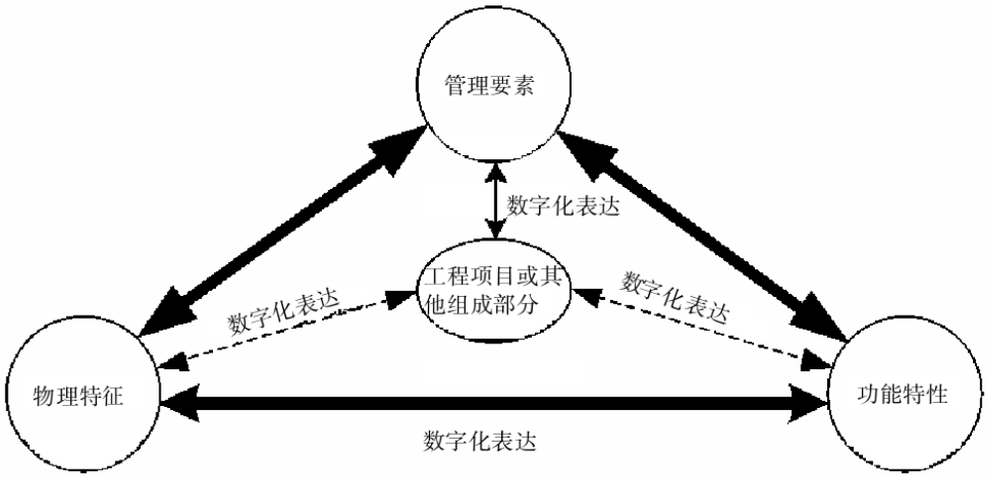


圖 1　BIM 定義維度示意

1.2　特點

有關 BIM 的技術有 3 大特點。

（1）視覺化：有關視覺化技術的內容是用計算機圖形、影像方法来處理數據的體現。BIM 是高度可視化的工具，對交互式操作已有相應設計。按建築項目各專業的多源信息作歸納後，BIM 即可給出三維幾何、物性或功能的可視化模型。所建模型把工程細節完整地表達出来，對施工者及管理人員来說是發現、規避隱患的提前提示或輔助手段。

（2）協調性：建築工程所涉的設計、用户及施工三者之間如不能很好溝通，項目就不易成功。如果設計上没有考慮施工實際、施工方又不把設計問題迅速反饋给設計單位，那麼施工時會遇到很多麻煩。對這類麻煩已有認識的今天，BIM 技術正好可以作溝通、協調的工具，能以較有效的方式處理信息不全或相隔較遠所造成的一系列安全顧慮。

（3）類比性：从規劃的角度說，BIM 技術可以運用模擬試驗来考察有關能耗、傳熱、日照或疏散的各種現實情況，用這種辦法使設計圖更具體、更完整，又有利於建築各階段的流程化及自動化[1]。到了招標和施工時期，所用的模擬可依實際情况做動態分析，對安全問題予以較早提示或說明。

2　構建建築安全管理協同模式

為解决前述難題，本研究將 BIM 科技與建築項目相融合，旨在創建一種新型協同管理模式。該模式不僅能優化施工流程、節約建設開支，還可顯著增强施工安全管理的整體效能。

2.1　BIM 相關軟體的選擇

BIM 軟件的選用是建立基于 BIM 建築安全管理協同模式的關鍵點，對所用技術的可行性有直接影響。目前我國建築領域采用較多的 BIM 主流軟件為 Revit、Navisworks、Fuzor、Lumion 以及 3DMAX 等，各項軟件按功能、學習難度或使用場合有較大差異。Revit 是以參數化方法為主導的建模工具，在建築、結構及機電諸項設計中能很好協同，允許把概念、方案乃至施工細節都納入统一模型，但其軟件授權的費用偏高；Navisworks 對施工期的碰撞分析及 4D 類進度模擬有專門考慮，可清楚地指出管線或施工邏輯的衡突點，硬件需求不極端，只是渲染能力有限；Fuzor 提供實時交互和低負載漫游方式，可以同 Revit 模型作雙向更新，對隱患的現場定位很有幫助，但較高級的功能模块價格高；Lumion 和 3DMAX 多用於視覺性說明，前

者的渲染及環境設定有利於安全交底，後者的動畫制作較复雜，两者都對計算機性能有要求，又没有原生的安全管理邏輯[2]。我國現行的 BIM 主流軟件及其特點列於表 1。

表 1　BIM 主流軟件及其特點

软件名称	功能	学习难度	优势	劣势
Revit	参数化建模 渲染、算量、出图 文档编制	中等	功能齐全	价格高
Navisworks	碰撞检测 4D 控制 施工演示	中等	电脑要求低、功能齐全	渲染效果差
Fuzor	轻量级演示 渲染漫游 动画创建	低等	操作方便、与 Revit 同步交互	渲染效果差，价格较高
Lumion	渲染漫游 场景创建	中等	渲染动画效果好	对电脑要求高
3DMAXS	动画、渲染、建模	高等	动画功能强大，效果好	操作麻烦，对电脑要求高

從表 1 的資料對比出發可以判斷，Revit 比其他工具更有效率，在模型制作及對复雜問題的處理上都有較明顯優势，適合用来建立建築安全管理的協同框架。若要以軟件實現安全管理的協同，所選工具應同時滿足三个條件：第一是數據可在各階段之間流通，即設計中發現的風險點要能傳達到施工時的相應環節；第二是接口要足够開放，有利於同物聯網、同項目管理系統配合使用；第三是專業深度与使用難度要適當，避免基層人員操作困難。按此思路分析可知，Revit 所采用的完整参數化方法和大量 API 是協同模式的關鍵性資源。它有“族”庫来統一安排標准類防護物，以坐標系統確定危險區的準確位置，又借由工作集將設計、施工乃至監理各方的權限合理地納入模型。再配合 Navisworks 對施工衡突做早期預判、利用 Fuzor 制定情境式培訓方案，便能以“設計-施工-監控-培訓”四段式方式整合軟件資源，促成安全管理的高效率運作。

2.2　應用 BIM 科技的建築工程安全管理協同模式框架

所提框架是圍繞建築資訊模型来組織數據的，對設計、施工乃至監理諸項工作加以整合，把有關風險的辨識、實時判斷及協同處理都納入數位化管理流程之中，用 BIM 方法做建築工程安全的協同調控。按建築項目本身為基本單位考慮問題，利用 BIM 技術的視覺、協調及類比三種特性對安全予以規範、動態或聯合的處理。其主體結構由動態場地安排、監控手段及培訓內容三个模块一并構成，所涉資料有統一格式可依循，各部分配合形成不斷完善的管理型態（安全生態）。

有關動態場地布置的模块所采用的 BIM 技術是用三維参數法對傳統二維平面加以突破性運用。以 Revit 系列軟件為工具来構造臨時建築、施工機械、材料堆放諸項內容的場地模型後，把施工時序納入 4D 分析，就可按階段考察各部分空間關系及潜在的安全隱患。此時施工者可以借助模型判斷塔吊作業半徑是否接近高壓線路、邊坡支護是否會對邻近建築造成干擾，亦即用虛擬方法先做安排，將不合理的空間配置所涉的碰撞、坍塌予以預先排除。所設計的模块對暴雨或其他特殊情形已有應對思路（如排水路線調整），能明顯改善現場被動處

置的狀態。

所稱的安全監控模块是根據 BIM 模型能即時調用相關數據的特點来設計“模型+數據”網絡。把 BIM 模型同各類傳感器（塔吊狀態、基坑形變、視頻畫面）結合后，可對人員是否戴帽、有無違規接近危險區做自動判斷，在三維形式中給出相應位置的預警。有關技術路線是：以 P5D 格式插件為媒介，把 Revit 所繪模型带入廣聯達 BIM5D 的使用環境，使施工進度系與安全要項彼此對應，做到對施工進展及隱患的可視化追蹤。例如可借高空作業流程作類比，由系統自動識别護欄缺位或荷載異常的狀況，按職責分派整改提示，促成“監測–預警–處置–迴響”一類的閉環管理[3]。

所稱的安全培訓模块是運用 BIM 技術来達到沉浸式教學目的的一種方式，對安全知識作高還原展示。新工人用 Fuzor 或 Lumion 構造三維漫游動畫後，能清楚地看到腳手架、消防通道諸項實際的安全要求與設計细節。有關高處墮落或觸電這類常見事故，應以 3D 形式說明其發生流程（即事故鏈），并把危險成因及應對方法（逃生路徑）一并標出。另外此模块允許引入 VR 工具，借由虛擬場景做應急訓練（例如模擬火災撤離），對各種風險、對處理辦法都予以較充分的提示。

3 模塊功能

關於建築結構的完整 BIM 模型應當將建築本身、設備、裝修及景觀都納入其中，所指的設備又按覆蓋内容細分為三类（給排水、通風、電氣）。Revit 是目前 BIM 應用中被采用最多的一種工具，可以把不同施工期的信息統一起来，用来建立有關空間及尺度的建築模型、說明構造或荷載狀況的模型，或者給出各類設備安裝的示意圖。由上述三種數據驅動的模型恰好是數字孪生的基本要素，最后又滙成對工程實際形態和功能的 BIM 總體表達。BIM 建模結束之后要逐項分析各組件的要點。

3.1 動態場地佈置

建築類項目要受到很多外部條件的限制，一般所用的平面設計只以圖紙為準、只顧目前需要，不能滿足現代要求。BIM 技術正好是傳統二維設計方法的补充，以三維形式完整呈現施工現場的樣態。它對實際工程做具体分析（如對臨時設施的定位加以判斷）而無須空想；又可用模型来模擬各个施工步驟或時段，把可能危害安全的因素提前予以說明。按此思路找到危險點後，有關單位便可集中力量改進安全措施，使工地本身及之後的運行都較為安全，事故率因而有較大下降。

3.2 安全監控

動態布置的場地本身就可以用来判某些風險的存在，而安全監控亦可分析危險源。按 BIM 的思路看，所涉時間及狀況皆有其局限，對常見事故應作動態式跟蹤管理。要將可能的時間點、有關工種都納入考慮範圍，對高處作業、起重行為、中毒窒息或火災爆炸諸項危險做完整統計，由此提出改進工地安全、避免傷亡的辦法。

有關施工動態類比的 BIM 實施步驟是：先利用 Revit 来裝入 P5D 撞件，把所得到的初始建築信息以 P5D 方式整理後導入廣聯達 BIM5D 平台。所用平台以設定的 Project 類進度作模型匹配基礎，在變換時間切片（即時序視圖）之後，可就某一時段做相應工程的動態施工類比分析。

按設計藍圖来考察施工各階段是時間上有條理的銜接。利用廣聯達 BIM5D 平台可以取得任意時段有關施工的動態類比。對類比中涉及的各種風險作較完整歸維後，所見情形基本接近實際工地狀態，施工全過程及其技術要點亦較清楚，由此能準確判斷危險的所在位置、種類并作出合理的預警說明[4]。

3.3 安全培訓

按 BIM 方法所做模擬的施工環境是現實情

況的較完整再現，對新員工来說是良好的視覺教材。用清楚方式說明各項可能危險點後，可讓未有現場經驗的人較快了解狀況、安排安全對策。

若用 BIM 所得的影像不能清楚地將危險區或風險源傳達給現場工人，就應以三維沉浸方式把事故多發點找出来，在所作的動畫里對施工中要特別注意的地方予以明確標示。

結束語

在建築領域，機械化生產雖提升了效率，但陳舊的管理管道常引發事故。為此，本研究借助 BIM 科技構建了協同安全管理系統，顯著增强了工程安全水準。

參考文獻

［1］ 李久林, 周予啟, 劉占省。BIM 科技在超高層建築安全管理中的應用［J］. 土木工程學報, 2018, 51（6）：108–116.

［2］ 張建平, 餘芳强, 趙文忠。BIM 協同管理理論與關鍵技術［J］. 清華大學學報（自然科學版）, 2014, 54（10）：1337–1343.

［3］ Eastman, C. , Teicholz, P. , Sacks, R. , & Liston, K.（2011）。BIM Handbook：A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors（2nd ed. ）。Wiley.

［4］ 王要武, 吳宇迪, 李洪雪。基於 BIM 的建築工程安全協同管理平臺構建［J］. 工程管理學報, 2019, 33（3）：1–6.

淺談澳門共同管道附屬系統建造的安全管理

劉　藕，梁英倫
中國港灣工程有限責任公司

摘　要：澳門作為高密度發展的海濱旅遊城市，地窄人稠，加上以往本澳公共事業的發展，如電力、電信、自來水等之維生管線均以傳統挖掘道路方式，將管線埋設於道路下方，在敷設新管線或維修時，使得道路挖掘頻繁，嚴重影響交通順暢、破壞市容、及影響民生出行等；開挖過程更衍生出空氣污染、噪音、停電或斷水等問題；為徹底解決上述之問題，應從有效整合地下管線，以減少或避免重複挖掘道路著手，而興建共同管道是唯一改善方法，即在城市道路下方，設置可容納管線之管道，統合各類管線之敷設管理，既可避免挖掘道路，維持道路順暢平整，亦可提升城市的運作效率；共同管道是現代城市基礎設施的核心組成部分，通常建於地下，用作敷設電力、供水、再生水、通訊及天然氣等管線；本文以澳門共同管道附屬系統建造安裝，的施工安全為主要核心，首先梳理全球及中國共同管道的發展歷程與建設現況，再聚焦澳門地區，剖析共同管道附屬系統在建設安裝階段的安全管理實踐經驗，闡述日常施工安全管控體系與應急處置的措施，為同類高密度城市的共同管道附屬系統安全建設提供參考。

關鍵字：澳門共同管道；附屬系統建造安裝；安全管理

一、全球共同管道的發展歷史及由來

（一）共同管道的起源背景

共同管道（又稱綜合管廊、共同溝，以下簡稱『共管』）是城市化進程中基礎設施建設多種問題積累、發酵之後的直接產物，其雛形可以十分清楚的追溯到 19 世紀中葉全球霍亂疫情的大規模爆發，1832 年巴黎的疫情最嚴重，大量市民感染霍亂而死亡，當時巴黎的供水全部取自塞納河，而生活污水、工業廢水都直接排入河流，故河流成為霍亂傳播最明確、最危險的媒介。更根本的問題是，自來水管、污水管、煤氣管、早期電信電纜諸種管線在地下雜亂敷設，沒有統一規劃，因此極易造成水源污染，也使疫情暴發之後隔離、管控、污染治理多種措施極難實施，城市衛生系統、管線運作系統都陷入全面癱瘓，由此自然、妥帖地引出當時城市基礎設施的重大缺陷，也成為共管正式誕生的最直接原因。

面對嚴峻的公共衛生危機，當時法國政府深刻意識到落後的地下管線系統已無法支撐當代城市的正常運作，需通過基礎設施革新，才能切斷疫情傳播途徑。

1833 年，巴黎在重建下水道系統的基礎上，首次提出“綜合利用地下空間”的理念，將自來水供給管、污水排放管及早期電信、電纜等各類市政管線統一收納至大型地下共管內，建成了世界上第一條綜合共同管道；從根源上阻斷疫情的傳播鏈，同時也奠定了現代共同管道成為城市公共衛生與安全領域的一次革命性突破。

（二）現代共同管道的發展階段與區域特色

由於進入 20 世紀以後日本成為全球共同管

道發展最有代表性的國家，而 1923 年關東大地震給日本帶來了極其慘痛的教訓，因此日本十分清楚地認識到集中式管線佈局對於防災減災的重大意義，遂於 1926 年在東京地區建成試驗性共同溝，之後又系統、有計劃地加以發展，到 1995 年阪神大地震時，共管已充分顯現其抗震、快速城市修復的突出優勢，故此日本此後大大加速了重要路段共同管道的建設，其他各國也順勢而為推進自己的建設共管的計劃。包括：由於俄羅斯莫斯科建成 130 公里幹線共管，又處在嚴寒氣候地區，因此其管線防護技術有十分鮮明、成熟的特色，而新加坡、韓國新城區也都建設了共同管道。

（三）中國共同管道的發展歷程與建設近況

中國共同管道的發展史及建設現狀可以十分清楚、有層次地概括：中國建設共同管道比歐美、日本諸國要晚，1958 年北京天安門廣場地下建成了一條 1000 多米長的地下管線廊道，這是中國第一條真正有共同管道雛形的設施，用來集合廣場周圍各種電力、通信管線，因此也可視為我國共同管道建設的起點。但毋庸諱言，由於當時經濟、技術諸種條件所限，此後相當長時期內共同管道建設沒有形成規模，唯有少數重點城市的核心區域有零星試驗。

直至 1994 年，上海浦東張楊路建成約 11 公里的現代化綜合共同管道，這是中國首條符合國際標準的現代化共同管道，系統整合了給水、排水、燃氣、電力、通信等多種管線，標誌著我國共同管道建設進入標準化、現代化的新階段。期後廣州、深圳、杭州等經濟發達城市也陸續開展局部試點。

2015 年是中國共同管道發展史上的十分重要、清晰可辨的轉捩點，當年國務院印發《關於推進城市地下綜合管廊建設的指導意見》，把共同管道建設正式、系統地升格為國家戰略，明確提出“到 2020 年，建成一批具有國際先進水準的地下綜合管廊並投入運營，反復開挖地面的“馬路拉鏈”現象明顯改善；明顯提升管線安全水準和實現防災抗災能力”的具體目標。因此政策密集出臺對共同管道建設形成了極好的推動作用，共同管道建設由此自然、有序地進入規模化階段。全國共同管道建設規模迅速擴張，技術水準持續提高，到 2025 年，我國共同管道總里程已過萬公里，覆蓋全國大多數省、自治區、直轄市，建設地域從城市核心區逐步擴展到新城新區、產業園區、交通樞紐諸種重點區域，我國也因而成為世界上共同管道延展長度最長的國家。

二、澳門共同管道附屬系統建造安裝安全管理經驗

（一）澳門共同管道建設的背景與附屬系統核心構成

澳門共同管道建設的背景，是典型的高密度濱海城市，土地資源極其緊張，城市空間擁擠，故市政管線敷設空間十分寶貴，又兼每年颱風、暴雨災害頻發，因此共管建設乃是提高本澳基礎設施抗風險能力的必然選擇；共同管道有利於今後各管線的維護、維修、擴容作業，也自然地減少了明挖路面、重複開挖路面對交通、市容、民生諸種不利影響。

以下是對共管的結構設計、附屬系統的設施和功能進行簡述：澳門的共管位於新城 A 區，總長為 6.6 公里，圍繞著新城填海 A 區的主要幹道，形成環形平面佈局，將公用設施（包括供電、自來水管、再生水管及通訊網絡等）敷設於地下共管內，共管分為：北區、中區和南區三大分區；每個大分區配有 1 個控制室，合共 3 個控制室，管道類型分為單艙（綜合艙）和雙艙（綜合艙和電力艙）兩種結構，處於地下約 10–15m 深度區域；綜合艙內部空間寬 3.7m 高 4.0m，電力艙內部空間寬 2.6m 高 4.0m，共管每隔約 800 米有一處永久的人員出入口，作為日常進出共管的通道，管道內每隔 200 米設置一個防火分區，以防火門及防火牆分

隔，每段防火分區設計有 2 個人員逃生口，設有背環的垂直梯可直達地面，有 2 個通風井（鮮風和抽排風系統）作為管道內氣體置換和流通結構，且有一個 1.5x10 米的投料口，投料口是用作施工期間及日後運營期間的材料進出通道；附屬系統項目的建設在管道內工作包括：電纜電線支架託盤系統、弱電系統、供排水系統、通風系統、消防系統、照明系統、電力配電系統、標識系統以及防火分區隔斷等，控制室內的工作包括所有機電系統以及部分裝修工作。

（二）建造安裝階段的日常安全管理體系

由於新城 A 區共同管道附屬系統項目，建造安裝階段被認定為密閉空間的工作場地，因此該項目從一開始，便嚴格按本澳密閉空間工作的標準及有關法規來組織管理，故此，以下從安全教育、准入要求、應急管理、智慧應用等諸種要素，對項目日常安全管理予以系統闡述。

基礎安全教育

每一位共管的施工人員，必須報考澳門建築業職安卡課程，課程由澳門勞工事務局舉辦，共 6 個小時，學習本澳建築業安全方面的法律法規、集體防護措施、個人防護裝備的使用等，給工友們認識建築安全的重要基本知識，課程必須考試合格才能通過及取得職安卡。

針對共管內施工的特殊性環境（密閉空間），項目要求施工人員在取得職安卡後，需要再參加同樣由澳門勞工事務局舉辦的建築安全特定訓練計劃（密閉空間工作安全），課程共 12 小時，使施工人員深入瞭解本澳法律對密閉空間作業的要求、安全措施、案例分析及相關專用安全裝備和專業用具的應用實習等（本項目規定，非法律強制）此外，所有的管理人員，均需報讀密閉空間危險評估及安全管理進階課程，針對密閉空間工作前進行危險評估的技巧、工作許可簽發要求及如何採取有效的安全控制措施等，以加深對密閉空間實務操作的體驗和瞭解，課程為 9 小時，完成後经項目委任有经驗的人员作为指定人员，可以為共管進行施工前的氣體檢測、危險評估和簽發工作許可證；

施工人員在取得以上的有效的職安卡和安特卡後，在進入共管前，需有管道施工的相關工作經驗，接受由項目安排的安全引導課程及特殊工序的安全培訓、以及密閉空間工作的特定訓練，讓施工人員熟悉、瞭解共管內部的管理制度、施工安全標準及掌握應急處置技能，由僱主書面委任，方可安排進入共管施工。

智慧工地的應用

由於共管的環境特殊，為了更科學和有效地協助施工安全管理，引入了多功能的智慧工地安全監察系統，包括：

人臉識別系統：設備安裝在人員進出口位置，符合入場條件的人員訊息已錄入系統內，經過同步處理，施工人員可以在共管的指定人員進出口，掃臉進入，對比傳統進入管道或密閉空間的登記方式，更準確和快捷，系統資訊能實時傳送到後臺，便於實時撐握施工現場人員訊息、人數等。

視頻監控系統：由於共管線長面廣，且存在較高的隱瞞性，為了更全面地協助施工和安全管理監察，在投料口、人員出入口、部份共管內位置，安裝攝像機，透過網橋及數據線實時把影像傳送到智慧工地安全監察系統；管理人員可在共管外，實時查看共管內部施工情況和環境狀況。

氣體監測系統：如採用傳統方式，使用手提式氣體檢測儀，將會非常耗時和難以持續性的監測，所以，在結構階段施工時，共管內同步佈置了六合一檢測儀（六合一氣體檢測儀是專門用於共管等，封閉/半封閉空間，同時檢測 O_2、可燃氣體、CO、H_2S 四種氣體及溫度、濕

度的監測設備）；設備分佈在共管內，大約每相隔 100 米設置一套氣體監測儀，同樣是透過網橋及數據線，把氣體數據傳遞到安裝在各出入口位置的顯示屏上，也同步顯示於智慧工地系統螢幕上，若氣體數據出現異常，檢測儀會發出警報，並顯示不正常的數據氣體成份；能全天候不間斷對共管施工區域的氣體進行實時、科學、有效的監測。

每天施工前，指定人員根據所檢測氣體的數據值，以及檢查密閉空間工作相關的安全措施，以確定是否簽發當天的工作許可證。

共管內應急管理及安全措施

共管內施工的主要安全風險包括：自由流動的液體進入、在共管內發生火警及有害氣體的積聚等；以下將針對相關風險的應急管理及安全措施作介紹：

由於共管位於地下 10 多米，在結構未完成封頂時，或與外界相連的管線預留孔等，均會因惡劣天氣或海水倒灌導致雨水、海水湧入共管內，可能會導致人員受到傷害或財產的損失；因此，我們採用了以下五個主要的預防措施和管理方法：

一.在所有結構未封頂的位置設置大約 1.5 米高的擋水牆，以防洪水湧入；二.

在共管內的每一個防火分區，設置一套抽排水設備；三.管線預留孔位置採用了物理性的阻隔封堵；四.當本澳氣象部門發出紅色暴雨警告訊號或以上級別，八號風球或以上級別時，將會安排人員撤離；五.設立了涉水線的應急機制，在共管多處位置，標示了 5cm 的涉水線，一旦發現不明的水浸情況，水位達到涉水線高度時，將立即啟動撤離機制。

共管內的主要防火措施：

由於共管的結構特殊且相對封閉，一旦出現火警，滅火和救援工作對比其他類的建築項目較為困難，因此，防火是共管項目的最重要的安全防範工作之一，而在共管內可能產生的火警原因，與一般其他類型的建築項目基本相同，包括：不安全的動火作業、吸煙、不安全用電等，以下介紹主要的防火安全措施和管理方法：

一.項目運用了建築設計安全，把支架託盤系統安裝和水管接駁方式，採用了螺栓緊固工藝，大大減少了在現場焊接的工作，在本質上降低了火警發生的風險和焊煙的積聚，而必要的焊接工作，則嚴格執行動火作業的工作許可證制度；二.共管內實施全範圍禁煙，有吸煙習慣的人員，進入共管之前，須把香煙及打火機臨時存放於出入口指定的暫存箱內；三.共管內以滅火器作為主要的滅火設施，每隔約 50 米一個臨時配電箱，而每一個配電箱旁均配置有 2 瓶滅火器，並在配電箱的上方懸掛一個自動滅火球，作為應對配電箱突然起火時的主動火滅設施，此外，每名在場的管理人員，均會隨身攜帶一瓶約 0.7KG 的滅火器，便於應對場內突發火警事件；四.現場電動工具和設備的管理，首先，在共管生產過程中是嚴禁使用燃料推動的機械設備和工具，以避免在現場內生產廢氣和燃料起火的發生，手電工具和電力設備作為主要的施工機具，項目建立了電動工具的季度標籤制度（藍、黃、綠、橙），每季度由註冊電工進行全面檢查，符合安全使用條件的，將在工具貼上該季度的顏色電力標籤，對於施工現場的臨時電箱、電纜、臨時照明、燈帶等設施；除了日常的檢查外，還採購了紅外熱成像儀，配給施工、安全管理人員及電工每日巡查時對電力設施進行溫度檢測，加強了對電力設備使用安全的保障。

共管內的基本安全設施及應急物資配置：

在共管的施工過程中現場通風換氣，參照《GB50838 城市綜合管廊工程技術規範的標準》，每小時換氣不少於 6 次；風機設定了時控開關，每天在施工前一小時自動啟風機，在風機數量的配置方面，按每一防火分區（200 米

長度），分別有設有送風及抽風系統，以風管連接至結構風井或投料口處，形成外循環，在共管內設 2 臺風機送風，加強換氣及空氣流動，達到換氣量滿足標準要求；因應共管的施工環境，使用 LED 燈帶作為施工照明，因其便於安裝、電壓低、亮度均勻等優點，在每一人員出入口處及臨時電箱位置，設置應急照明，在突發停電情況時，可以提供應急照明作緊急撤離。

應急資源佈置及緊急救援：在每一人員出入口處，設置一個小型的應急物資站，主要的應急物資包括：自供氣式呼吸保護器、防毒面罩、復甦器、擔架床及急救箱等等，以便快速處置突發事件所需；由於共管項目為澳門首例，結構環境空間特殊，為了在應急救援時有更迅速和有效的行動；項目團隊曾與澳門消防局合作，模擬有人員在共管內受傷並無法行走，在附近的投料口位置，運用繩索、吊機、擔架床（吊運式）等，組織人員拯救演習；另外，我們亦曾組織應急小組，模擬有人員在分支井位置昏迷，運用救援三腳架、安全帶、擔架床等裝備，將人員從垂直背環梯位置救出，提升團隊人員應急救援能力和強化應急救援設備的使用技能。

（三）總結

本文對所論述的施工安全管理體系及現場各項安全措施做了十分清楚、有層次的總結，即其符合澳門現行法規要求，因而很好地保證了密閉空間施工的安全，也為此項澳門首條共同管道工程提供了切實可靠的安全保障，更難得的是由此填補了澳門共同管道施工安全管理的實踐空白，對粵港澳大灣區及其它高密度濱海城市，的共同管道附屬系統建造安裝都具有極好的示範意義，因此也是城市地下空間開發利用，及基礎設施高質量發展極佳的參考。

參考文獻：

［1］我國城市綜合管廊建設發展現狀與未來發展趨勢–數字城市工程研究中心

［2］城市地下綜合管廊發展及應用探討–施衛紅

［3］日本共同溝的發展概況及對我國的借鑒

［4］東京如何修建城市地下管廊–樂紹延經濟參考報

［5］GB 50838–2015 城市綜合管廊工程技術規範

［6］地下綜合管廊：城市新動脈

［7］第 32/2023 號行政法規–建築業職業安全及健康技術規範

气候变化背景下户外作业人员热应激风险防控策略研究——以建筑施工行业为例

刘亚龙[1]，郭　昆[2]，王梦婷[2]，乔淑君[2]，周　艳[2]，鲁祖凤[3]
1. 中钢武汉安全环保研究院股份有限公司
2. 中钢集团武汉安全环保研究院，武汉，430081
3. 马钢（集团）控股有限公司，马鞍山，243003

摘　要：全球气温变暖导致极端高温事件频发，显著增加了户外作业人员热应激风险。以建筑施工行业为例，从业人员长期暴露在高温环境，热应激风险激增，导致心血管疾病风险等健康风险显著增加。当前作业人员的自我防护意识薄弱，针对热应激的防控措施多为“被动应对”，且缺乏量化评估标准和智能干预手段。本研究基于 Haddon 矩阵框架，对现有热应激防控体系进行了全周期、多维度的系统诊断，识别出热应激防控体系“重前端形式、轻过程干预、弱后端保障”的结构性缺陷，并在此基础上，提出 EHI-WBGT 融合模型，以获取更适用于不同户外场景的热应激量化表征。基于该模型，本研究进一步构建了针对建筑施工人员热应激风险的精准防控策略与系统化干预机制。研究成果为气候变化背景下完善职业健康治理体系提供了量化工具与实践路径，具有重要的理论与应用价值。

关键词：气候变化；热应激；户外作业；EHI-WBGT；Haddon 矩阵风险防控；职业健康

0　引　言

全球气温变化导致极端高温出现频次增多，IPCC 第六次评估报告显示全球地表温度较工业化前升高约 1.1℃，未来极端高温将进一步加剧。我国南方地区是气候敏感区，夏季高温高湿度叠加导致城市热岛效应更为明显，容易超出人体体温调节极限，导致户外作业群体的热应激风险激增。[1-3]

热应激会诱发头晕乏力、热衰竭、重症热射病等一系列健康损害[4][6-7]，在全球气候变暖的背景下已成为职业安全健康领域需重点管控的风险。热应激量化评估的理论基础源于 Belding&Hatch 于 1955 年提出的环境热负荷—人体生理应变框架，目前常用评价指标包含 WBGT、UTCI、EHI 等，其中 WBGT 为我国职业卫生标准法定指标[5]。

本文系统分析气候变化背景下建筑施工人员的热应激风险，并构建相应的热应激防控策略体系。首先系统梳理建筑施工行业热暴露特点与核心风险因素，通过 Haddon 矩阵评估现有防控措施完整性和有效性，然后提出适用于建筑施工行业的 EHI-WBGT 融合模型实现热应激风险量化评估，最后形成“技术—管理—培训—政策”热应激防控策略，为建筑施工人员热应激预防和行业职业健康治理提供理论与实践支撑。

1　建筑施工行业热应激风险特征分析

1.1　热应激风险影响因素

热应激的发生是自然环境、作业特征、个

体因素等多种因素共同作用的结果。

（1）自然环境因素

环境热负荷是热应激发生的基础条件，我国南方地区多属亚热带季风气候，温度与湿度的耦合效应放大了热应激风险，我国现行 WBGT 指标在高湿环境下存在局限性，未考虑高湿环境下人体汗液蒸发效率骤降的影响，测算得出的 WBGT 值与实际热环境偏差较大[3]。

（2）作业特征因素

建筑施工作业涉及大量高强度的重体力劳动，如钢筋绑扎、混凝土浇筑等，作业中需频繁攀爬、弯腰长时间站立，在这些状态下代谢产热高。在高强度劳动的同时，作业时间普遍较长，连续的高温环境下持续作业会导致体温调节超出人体极限，同时建筑施工作业需要穿戴安全帽、工作服等劳动保护装备，进一步阻碍散热[8]。

（3）个体因素

个体生理特征是热应激耐受能力的主要影响因素之一，在相同环境下不同个体的热应激风险也存在差异。

建筑施工人员以三十岁以上人群为主，随着年龄增大，耐热能力下降，患有高血压、心脏病等基础疾病的工人，耐热能力明显下降。工人需长期暴露在户外高温环境下进行作业，连续多日进行高温作业会导致热适应能力下降，造成慢性热应激和一系列慢性系统损伤。工人在高温下工作时未主动穿着遮阳帽，透气衣物等，以及不及时补水和未及时休整，也是出现热应激的主要原因。

多因素共同叠加最终导致工人的高热应激风险，也决定了热应激防控必须采取全链条、多维度的综合措施[9]。

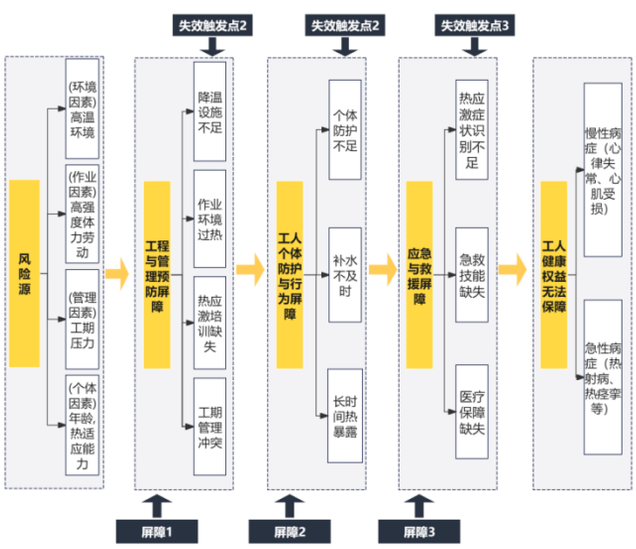


图 1　热应激风险–屏障系统模型

1.2　建筑施工人员热应激风险屏障模型

热应激风险屏障模型是基于 James Reason 提出的瑞士奶酪模型理论框架，将热应激风险防控视为多层防御屏障抵御风险源的动态过程。针对建筑施工行业的热应激风险特征，构建出“风险源→失效触发点→多层屏障→伤害后果”的传导模型，如图 1 所示。

第一层屏障为工程与管理预防屏障。作为热应激风险防控体系的前端，依赖于项目管理预防，通过有效的防暑降温措施和管理调控制度能够有效降低工人热应激风险。在实际生产中，“降温设施不足、作业环境过热、热应激

培训缺失、工期管理冲突”等原因均可导致第一层屏障失效。

第二层屏障为个体防护与行为屏障主要依赖个体防护和自主安全行为。在第一层防护屏障失效时，若工人作业中穿着不透气的劳保衣服，长时间不补水或长时间连续作业，将会引发体温调节系统异常。

第三层屏障为应急与救援屏障，用于对已发生的热应激事件进行紧急处理，主要包括症状识别、急救技巧、医疗保障等。在工人已经出现热应激症状后，若现场人员未能准确识别症状，或未配备急救物资，将导致救治延误[6]。

风险源在突破各层屏障后会导致工人出现各种由热应激导致的不可逆性器官损伤，甚至死亡。目前建筑施工人员多为非正规就业或劳务派遣，其在劳动关系认定、工伤保险覆盖与职业病诊断等方面的制度可及性较低。热应激所致健康损害往往难以被纳入职业病认定范畴，使得工人在遭受健康损失后，面临医疗费用负担和权益救济渠道受限等困境。

2 现有防控措施分析

本节引入 William Haddon 提出的 Haddon 矩阵，通过“时间阶段”（事前—事中—事后）与“因素维度”（宿主、媒介、物理环境、社会经济环境）的交叉诊断，以实现对于现有建筑施工行业热应激风险防控体系全周期、多维度的系统性评估。本研究据此构建建筑施工行业热应激防控 Haddon 矩阵，如表 1 所示[11]。

表 1 建筑施工行业热应激防控 Haddon 矩阵

时间阶段	事前	事中	事后
宿主	1. 风险认知培训形式化。 2. 个体防护装备依赖个人自觉。	自我监测与调节能力弱。	1. 急救知识与技能匮乏。 2. 健康追踪机制空白。
媒介	1. 管理系统无热风险前置评估模块。 2. 缺乏个性化健康筛查。	1. 无实时气象—作业联动调控能力。 2. 事件数据未结构化归档。	事件数据未结构化归档
物理环境	1. 气象数据宏观且静态。 2. 降温休息场所供给不足且不均。	动态热暴露风险无法感知。	1. 环境数据记录中断。 2. 缺乏区域性风险地图绘制。
社会经济环境	1. 相关职业病认定范围滞后。 2. 行业标准与强制休息制度缺失。	商业保险覆盖不足，相关标准不明确。	1. 工伤认定存在困难。 2. 职业健康监护体系未覆盖。

结合 Haddon 矩阵分析，目前热应激事前预防措施较多但多为形式化手段，事中干预稀疏且缺乏技术支撑，事后处置在制度保障层面存在系统性缺口。目前建筑施工行业热应激防控主要存在以下问题：

（1）时序失衡—“重前端形式、轻过程干预”，在“事前”可采取防控措施密集却只流于形式，作业过程中动态监测与调控相关措施严重缺失[11]；

（2）层次失衡—国内现对于热应激相关伤病在职业病目录收录尚不全面，工伤理赔障碍较多，相关行业标准不完善[19]。

3 基于 EHI-WBGT 融合的热应激评估模型

针对上述诊断所揭示的评估手段单一、过程监测缺失等短板，本章在剖析主流评估指标局限的基础上，构建 EHI-WBGT 融合评估模型，为热应激风险的量化评估与动态干预提供技术基础。

3.1 主流热应激评估标准的局限性

当前主流热应激评估指标主要包括国内标准使用的 WBGT（湿球黑球温度）和 EHI（有效热指数），WBGT 作为国际标准（ISO7243）及我国国标（如 GB/T4200）采纳的核心指标，其

优势在于能综合反映环境温度、湿度、风速和辐射热等客观热负荷，普适性强，适用于快速筛查。但缺乏对于高湿地区的地域差异影响考量，低估南方地区夏季时高温高湿的环境下的实际热风险。

EHI 是基于人体热平衡原理，综合考虑到劳动强度、代谢产热及个体生理响应（如核心体温、心率）等，能够更动态、精准地反映个体实际的热应激水平。但 EHI 作为热应激指标的缺点显而易见，缺少对室外环境对热应激风险的影响考量，如太阳辐射、风速波动等[12]。

3.2 融合模型的构建

本研究提出了 EHI-WBGT 融合评估模型。该模型的核心在于综合环境热负荷指标与个体生理响应指标，通过加权融合的方式，实现对热应激风险更全面的量化评估。

融合评估模型的核心计算公式如下：

$$R=\alpha\cdot(WBGT/WBGT_{lim})+\beta\cdot(EHI/EHI_{lim})$$

其中 α 为 WBGT 指标的权重系数，β 为 EHI 指标的权重系数，WBGT 为实测湿球黑球温度，$WBGT_{lim}$ 为重劳动强度下的 WBGT 阈值（27℃），EHI 为实测有效热指数，EHI_{lim} 为重劳动强度下的 EHI 阈值（35℃）。其中 α =0.4、β =0.6，根据层次分析法确定。

根据综合风险指数 R 的取值，结合 WBGT，EHI 指标分级将热应激风险划分为四级。

（1）R<0.6，低风险，可正常作业；

（2）0.6≤R<0.8，中等风险，缩短连续作业时间，增加补水频率；

（3）0.8≤R<1.0，高风险，强制休息，作业轮换；

（4）R≥1.0，极高风险，立即停止户外作业。

3.3 融合模型风险评估实证分析

选取深圳某日气候数据，分别采用 WBGT 模型、EHI 模型及 EHI-WBGT 融合模型进行独立计算，并依据各自标准完成热应激风险分级[8]。

表 2 深圳某日热应激评估数据与风险分级

时间	气温（℃）	湿度（%）	辐射（W/m²）	风速（m/s）	WBGT（℃）	EHI（℃）	融合 R	WBGT 等级	EHI 等级	融合等级
0:00	26.0	78	0	1.1	24.1	27.5	0.73	低	低	中
2:00	26.0	80	0	0.9	23.9	27.9	0.74	低	低	中
4:00	26.0	82	0	0.7	23.7	28.3	0.74	低	低	中
6:00	26.5	79	52	0.9	24.8	28.8	0.76	低	低	中
8:00	28.7	75	266	1.2	28.5	37.0	1.06	中	高	极高
10:00	31.0	72	658	1.4	33.1	38.9	1.10	高	高	极高
12:00	32.2	70	856	1.4	36.2	41.2	1.19	极高	极高	极高
14:00	32.0	72	765	1.2	35.1	40.4	1.16	极高	极高	极高
16:00	31.2	74	435	1.0	32.0	38.1	1.07	高	高	极高
18:00	30.1	72	195	0.6	30.2	38.0	1.10	中	高	极高
20:00	28.0	78	0	1.1	25.6	32.2	0.86	低	中	高
22:00	27.0	82	0	0.9	24.2	30.4	0.81	低	中	高

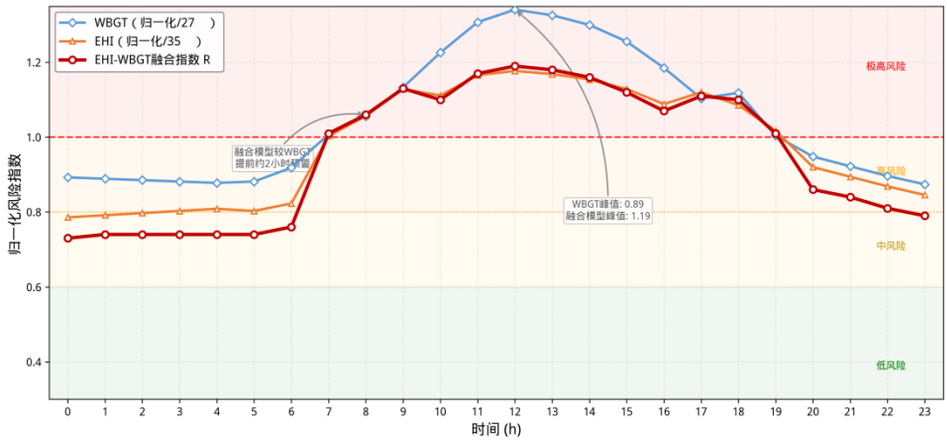


图 2　WBGT、EHI 与 EHI–WBGT 融合模型归一化风险指数日变化对比

由表 2 可见，三个指标在夜间对热应激评估结论一致，在午间高温时段（10:00–14:00），WBGT 指标判定为“高风险”而融合指标判定为“极高风险”。图 2 展示了三个指标模型归一化风险指数的日变化对比，融合模型指标相比于 WBGT 提前约 2h 进入高风险区域，其峰值（R=1.19）高于 WBGT 归一化峰值（0.89），表明融合模型能够有效避免对高温高湿环境下的热应激风险低估。

通过引入“风险识别灵敏度”和“误报控制率”两个评价指标，对三个热应激风险评估指标进行比对。“风险识别灵敏度”该在高热应激风险实际发生时段（以核心体温≥38℃为标准）正确判定为高风险的比例；“误报控制率”是模型在非高风险时段正确排除的比例。表 3 为指标各方面能力对比。融合模型的灵敏度（94.1%）显著高于 WBGT（58.8%），略优于 EHI（88.2%），同时误报控制率（71.4%）优于 EHI（42.9%），表明融合模型在“不漏报”与“不误报”之间取得了更优的平衡，兼具 WBGT 的规范性与 EHI 的敏感性。

表 3　三模型热应激风险识别性能对比

评价指标	WBGT	EHI	EHI–WBGT
风险识别灵敏度（%）	58.8	88.2	94.1
误报控制率（%）	85.7	42.9	71.4
F1–score	0.69	0.65	0.83
高风险预警提前量（h）	0	1.5	1.5
判定高风险时长（h）	10	17	17
判定极高风险时长（h）	3	5	9

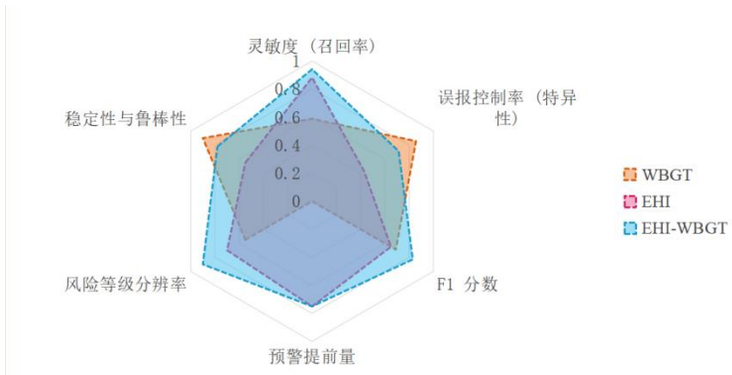


图 3　多维度性能指标雷达图

4 优化防控策略建议

Haddon 矩阵诊断揭示了现有热应激防控体系中“时序失衡、层次失衡”两项结构性缺陷，本研究提出的融合模型为解决“时序失衡”提供了更加精准量化的技术基础。在此基础上，本章以融合模型为核心技术支撑，构建出“技术、管理、培训、政策”四个维度的建筑施工热应激风险防控体系，以形成“事前精准预警、事中动态干预、事后有效保障”的全周期治理框架[16]。

4.1 技术维度：基于融合指标的智能监测预警系统

施工现场应当布置气象传感网络实时监测并计算 WBGT，并为高热应激风险工种配发可穿戴监测设备，连续监测心率以及体感温度计算 EHI 值。通过 WBGT 和 EHI 数据得出风险值 R，根据四级阈值生成热应激风险等级预警。预警模块嵌入智慧工地平台并与调度系统互通。在 R≥0.8 时，系统提示轮岗、强制休息等建议[13-15]。

4.2 管理维度：分级响应与动态调控

将融合模型 R 值分级分别对应为相应的可执行现场制度，加强缺失的“事中干预”环节。表 4 为对应的分级响应方案，可以替代传统凭检验调整作息的情况，将现场管理从经验驱动转向数据驱动。

表 4 基于 R 指标的分级响应制度

风险等级	R 指数	预警色	作业安排	休息与补水
低风险	R<0.6	绿色	正常作业	常规补水
中风险	0.6≤R<0.8	黄色	单次作业≤45min	每 30min 强制补水
高风险	0.8≤R<1.0	橙色	作业 30min/休息 15min	强制降温补水，电解质饮品
极高风险	R≥1.0	红色	立即停止户外作业	全员转移至空调休息区

4.3 培训维度：针对性培训体系

对 Haddon 矩阵中“宿主维度”短板设计三级培训体系：第一级为全体员工参与学习了解热应激病理、预警信号释义、个体防护与补水策略，可结合线上短视频辅助学习。第二级班组长和主要安全管理人员，学习监测设备操作、热应激风险判定以及现场处置。第三级为相应的演练，能够进行“识别—转移—降温—呼救”四步处置，配合终端一键报警实操。

4.4 政策维度：填补职业病目录与工伤认定证据链的核心缺口

政策层面补齐“社会经济环境维度”短板。首先推动将长期职业性热暴露所导致的慢性损害纳入《职业病分类和目录》，其次建议人社部门明确符合技术标准的连续监测数据可作为热相关疾病工伤认定的辅助证据，破解“举证难、认定难”。

5 结 论

本研究以气候变化背景下的极端高温环境户外作业为出发点，针对建筑施工行业，系统开展了热应激风险特征分析、防控体系诊断、量化评估模型构建以及防控策略提出，主要得出以下结论：

通过 Haddon 矩阵对现有防控体系诊断发现现有防控体系结构性失衡突出：事前预防多以迎合合规审查，缺乏实质性风险防护，事中干预手段匮乏并且缺少动态监测能力，事后保障在职业病认定、工伤赔偿与健康追踪等方面均存在制度性短板。

为解决单一指标在高温高湿度环境下对热应激风险表征局限，本研究构建出新的热应激风险融合评估模型。并以深圳市某日对模型评估结果进行验证，结果显示该模型在风险识别灵敏度和准确性上都优于单一指标，可作为建

筑施工行业热应激风险量化评估工具。

以评估模型为基础，进一步构建“技术—管理—培训—政策”四维防控体系：技术层负责实时感知与预警，管理层依托 R 指数建立分级响应制度，培训层按逐级递进方式组织能力建设，政策层从职业病目录、工伤认定证据与行业标准三方面完善制度供给。

参考文献

[1] Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Climate change 2021 : the physical science basis [J]. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2021, 2 (1) : 2391.

[2] Xu X, Kong Y, Zhang J, et al. Increasing meridional disparity of population exposure to heat stress [J]. Geography and Sustainability, 2025: 100391.

[3] Li X, Hang J, Mo Z, et al. Impact of adjacent city development on the urban heat island intensity and thermal stress: A WRF-BEP/BEM and LCZ-integrated assessment [J]. Building and Environment, 2025: 114024.

[4] 刘雨轩, 朱能, 朱晗玉. 高温高湿盐雾环境对人体生理及劳动安全影响的实验研究 [J]. 暖通空调, 2026, 56 (3) : 79-85. DOI:10. 19991/j. hvac1971. 2026. 03. 13.

[5] Jaswal P, Rana D, Chaudhary R, et al. Heat waves and health crises: The unseen threat of heat stress on multiple organ systems [J]. Journal of Thermal Biology, 2026, 136: 104375.

[6] 苏奉仪. 热射病急性肾损伤的临床特征及预警指标分析 [D]. 新疆医科大学, 2023. DOI:10. 27433/d. cnki. gxyku. 2023. 000292.

[7] 伊文. 高温下建筑施工健康安全管理与成熟度评价 [D]. 重庆大学, 2010.

[8] 温佳鑫. 基于综合生理指标的高热湿环境分区研究 [D]. 天津大学, 2020. DOI:10. 27356/d. cnki. gtjdu. 2020. 004220.

[9] Abidin A U, Munawaroh A L, Rosinta A, et al. Heat stress in landfill environments: Evaluating worker exposure and occupational risks [J]. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 2025, 11: 101097.

[10] 宋思雨, 徐克, 尚迪, 等. 基于 Haddon 矩阵和 ISM 的人员密集场所踩踏事故风险分析 [J]. 安全与环境工程, 2019, 26 (5) : 150-155. DOI:10. 13578/j. cnki. issn. 1671-1556. 2019. 05. 022.

[11] 焦峙炜. 绿色建筑工人职业安全健康评价研究 [D]. 长安大学, 2012.

[12] Abbasi M, Golbabaei F, Yazdanirad S, et al. Validity of eighteen empirical heat stress indices in predicting the physiological parameters of workers under various occupational and climatic conditions [J]. Urban Climate, 2023, 52: 101708.

[13] Cannady R, Warner C, Yoder A, et al. The implications of real-time and wearable technology use for occupational heat stress : A scoping review [J]. Safety Science, 2024, 177: 106600.

[14] Zhao Y, Bergmann J H M. Real-time estimation of core body temperature for heat stress monitoring in hot environments using wearable heart rate sensors [J]. Building and Environment, 2026: 114368.

[15] Kacker K, Srivastava P, Mukherjee M. Personalized heat stress early warning system for an urban area [J]. Environment International, 2025, 199: 109507.

[16] Khorshid S, Song S. Exploring Intervention Strategies to Prevent Occupational Heat Stress. A Scoping Review [J]. Safety and Health at Work, 2025, 16 (2) : 134-144.

[17] Werner L, Carrion D, Huguet N. Risk for renal injury from heat-related stress among outdoor workers and the imperative for climate-responsive health policies [J]. The Journal of Climate Change and Health, 2025, 26: 100600.

异地职业卫生技术服务流程优化的探讨

熊佳琪，张　丽，陈　强，王立娟
中钢集团武汉安全环保研究院　武汉 430081

摘　要：异地职业卫生技术服务在实施过程中常面临跨区域协调困难、标准执行差异、现场调查与检测周期延长等多重挑战。本文以某异地铝合金冶炼企业职业病危害现状评价项目及某异地企业职业健康排查项目为研究对象，对异地职业卫生技术服务开展全流程进行分析，确认实际工作中因地域性差距及长距离带来的技术制约，并提出相应的解决方案。对异地职业卫生技术服务优化进行探讨，提供合理、可行的对策和建议。重点探讨了因地域性差异、长距离运输、地方监管要求不一等因素对技术服务质量与效率造成的制约，识别出在人员调度、设备运输、样品保存与时效性、地方标准衔接等方面的技术瓶颈。结合质量控制要求与实践经验，提出包括前期充分沟通、标准化作业流程制定、远程技术支持、本地化协作机制建立等优化对策。旨在为提升异地职业卫生技术服务的规范性、科学性与可操作性提供参考，推动跨区域技术服务能力的整体提升。

关键词：职业卫生技术服务流程；职业卫生服务机构；异地技术工作开展；冶金企业

壹、引　言

职业卫生技术服务机构，即为用人单位提供职业病危害因素检测、职业病危害现状评价、职业病防护设备设施与防护用品的效果评价等技术服务的机构（中华人民共和国国家卫生健康委员会，2024）。随着机构业务规模扩大及跨区域经营需求增加，异地职业卫生技术服务已普遍存在于各机构的日常业务中。

然而，有关异地服务存在复杂性：我国职业卫生监管有地方性法规差异，不同地区对技术服务的侧重点、引用标准及备案要求亦有差别；职业卫生检测分析具有严格的时效性要求，长距离运输对样品完整性和检测准确性产生不确定影响。

此外，异地项目在现场调查、人员调度、质量控制、报告评审等环节均存在效率损耗。异地职业健康专项排查等特殊项目，存在作业环境复杂、交通可达性差，进一步加剧了异地服务的实施难度。

本文以某异地铝合金冶炼企业职业病危害现状评价工作流程及某异地企业职业病危害因素抽查监测项目为实例，结合《职业病防治法》《工作场所职业卫生管理规定》等相关标准规范要求，针对实际工作中出现的问题及解决方案，对异地职业卫生技术服务流程优化进行系统探讨，以期为行业提供可借鉴的实践经验。

贰、异地技术服务面临的挑战分析

一、行业发展现状及问题分析

我国职业卫生技术服务能力存在发展较不均衡，职业卫生技术服务能力与广大劳动者的职业健康需求之间仍有差距的特点（黄伟乐，黄河海，许姝丽，何剑锋，赵鼎甲，2024）。

因此，职业卫生技术能力较薄弱地区的企业纷纷向外发展，寻求能满足劳动者职业健康需求的职业卫生技术服务机构。

近年来，职业卫生技术服务机构正以发展眼光、竞争意识来考虑异地服务的引入与开展。然而，当前异地服务多依赖机构原有属地化服务模式的简单延伸，对异地各要素缺少整体性、有计划的设计，结果常是效率不优、质量不易保证、费用偏高，这类问题已构成阻碍行业取得实质性进步的瓶颈性困难。

二、研究对象与案例背景

（一）某铝合金冶炼企业职业病危害现状评价

该企业距服务机构约 700 公里，主营铝板带箔及铝合金深加工，涉及熔铸、热轧、冷轧、精整、表面处理等单元，厂区布局分散。识别的危害因素包括铝合金粉尘、氧化铝粉尘、电焊烟尘等粉尘，一氧化碳、氨、硫化氢、氯气、氟化氢等化学因素，以及高温、噪声、工频电场、X 射线等。

该项目具有典型的异地大型制造业职业卫生技术服务特征：服务距离远、危害因素种类繁杂、现场作业面广、部分化学样品检测时效性要求严格（如吸收液需 24 小时内测定）。法规适应及跨区运输又使异地服务出现一般性困难，这类情况可作为职业卫生技术服务异地流程改进研究中较具代表性的实践参照。

（二）某大型公司职业健康排查

受某公司委托，对其分布于多省份的多家子企业开展职业健康排查，主要内容为职业病危害因素抽查监测。服务范围涵盖金属冶炼企业及矿山企业，涉及粉尘、游离二氧化硅、多种重金属、一氧化碳、二硫化碳、噪声等危害。

该项目具有显著的异地服务复杂性与实施难度。项目时间紧、跨度长，缺少外部专家现场支撑、仪器内置电池无法空运、部分样品仅保存 7 天、高海拔作业（3600m 以上）及停产检修等多重困难，异地服务复杂性显著。

三、异地服务面临的主要问题

制度层面：异地服务涉及两地法规引用、技术服务侧重点、报告格式及评审标准存在差异，合规难度加大。职业健康排查项目覆盖多个省区，各地方对监管、对督查、对整改的要求有别，若不能很好地配合当地做法，易导致结论认可度低。

流程层面：异地项目在调查、调度、转运、评审等环节可能存在效率损失。铝合金企业厂区大、工艺复杂，需多组协同；排查项目须按跨省区路线连续作业，路线调度难度大，且停产致计划延期，反映对生产计划变动的适应性不够；缺少外部专家支撑，影响现场决策进度。

技术层面：职业病危害因素检测样品具有时效性。铝合金项目涉及的部分样品吸收液需要当天测定（中华人民共和国卫生部，2004），当地无实验分析条件，样品需运回机构本地进行分析，高铁进站与汽车长途均存在困难。职业健康排查项目中抽查监测的部分样品保存期仅 7 天，跨省长途物流挑战严峻；仪器内置电池无法空运；高海拔地区气压低、温差大时仪器不易校正、影响采样规范性，且人员面临高原反应风险。

管理层面：异地环境下总部难以作实时的直接指导，信息处理及质量控制有困难。铝合金项目需分区调查，数据易遗漏；排查项目团队多家企业连续作战，高海拔体能消耗大，质量稳定性受考验。

叁、流程优化的总体思路与原则

一、优化目标

效率目标：压缩服务周期，减少地域损耗，提升调查、转运、评审效率，实现计划变更快速响应。

质量目标：应使所用样品完整、所得数据正确，所下结论要科学，满足多地监管要求。

成本目标：将差旅及运输、人力所费的成本加以控制，借流程及属地配合来增益效率。

合规目标：确保全过程符合用人单位所在地及机构注册地法规标准，实现多轨合规

二、基本原则

标准化：对异地技术服务所涉的各环节作标准化处理，制定专用质控清单与模板，以减少地域、经验两方面的干扰。

数字化：引入信息化手段来统筹各项目进展，安排实时数据的录入、协调不同地点的工作，以弥补长距离管理盲区。

属地化：主动适配当地法规与监管要求，将同属地疾控、监管的配合落到实处。

可追溯：设立全过程的记录制度，包括运输轨迹、调查记录、问题清单、审核痕迹等，确保各环节可核查。

肆、异地服务流程优化具体措施

一、服务前阶段：需求对接、远程预评估、方案标准化

先作沟通、再做策划。就所涉委托的管理内容、督查事项及时间做详细分析。查清有关企业各自所在地区、工艺类型和监管习惯，设计“一企一策”排查法。

项目预演与风险预判。采用“桌面推演+实地预演”双轨思路。以桌面方式对全部流程加以分析，有关法规、样品状态、运输工具等当作重点风险来考虑；实地预演针对高海拔、偏远地区进行路线勘察。具体包括：提前联系高铁部门确认吸收液样品进站许可并出具机构证明；制定内置电池设备陆运或属地租赁方案；建立 7 天保存期样品的实验室协作通道；设计高海拔“分组轮换、高原缓冲”作业形式；针对停产检修等不确定因素，在总行程中预留 10%～15%弹性缓冲时间。

属地政策同法规作一对应。系统性收集、归纳服务地国家及地方职业卫生法规、标准，整理属地差异。主动与当地疾控、职防机构及监管部门开展技术交流，明确各地督查重点、报告格式及整改要求，弥补外部专家无法现场支撑的能力缺口。

按标准化思路来编制方案。编制《异地职业卫生技术服务作业指导书》，将流程拆解为可复制的 SOP。统一使用检查表、监测布点图及问题分级标准；对现状分析做区域划分处理，规定样本运送层次、本地资料格式及报告样稿，降低对个人经验的依赖。

二、服务中阶段：智能调度、移动采样、实时质控

可采取智能调度与分区协作的方式。按工艺将区域划开，分组同时调查。优化企业调查顺序，依海拔、物流及生产需要来安排行程动态；采取“分组轮换、高原缓冲”办法处理劳力负荷，防止因连日高海拔工作而疲劳。

将标准化现场作业同并行检测结合。推行“检查+监测”并行模式，资料审查与现场采样同步开展。严格执行标准化流程：启动会明确范围与节点；现场调查按统一检查表逐项核查；监测布点遵循“危害因素最高浓度、最高时段、最高接触”原则（中华人民共和国卫生部，2004）；每日收工后进行问题清单组内核对与交叉复核。

应将时效管理与样品物流分开考虑。可建立样品时效性分级制度，对 24h 内测定的吸收液，采用高铁运输，以离心管分装、封口膜密封、专人携带交接；对 7 天保存期样品，采用“属地预冷+冷链+航空/专车”联运，全程记录温度与时效；对一氧化碳等气体因素，优先采用便携式直读仪器现场测定，减少实验室分析依赖。对于内置电池不能空运的设备，可作提前陆运或属地租借，人器同步。

运用实时质控和日清日结的做法，建立“三同步”日清机制：当日数据同步上传、当日问题同步整理、当日进度同步反馈。铝合金

项目按组复核并作组间交流，动态调整次日安排；排查项目建立“日清日结+跨省区日报”机制，每日向总部回传检查表、原始记录及问题初稿，实现远程实时质控。高海拔地区严格执行安全确认、单次连续作业不超过 4 小时、血氧监测等控制点。

以培训为形式的问题反馈，将抽查监测结果与职业健康知识培训相结合。通过图文并茂的PPT、现场照片及整改建议进行可视化讲解，既指出问题又传授方法，提升整改配合度与甲方满意度，实现技术服务与知识传递的双重价值。

三、服务后阶段：云端审核、电子交付、跟踪回访

报告属地化，并引入云端审核机制。所涉报告编制遵循“国标为纲、地标为用”原则，列出属地法规的核查。现状评价项目经内审、技审、质审三级审核；排查项目针对各子企业分别编制报告与问题清单，用云方式组织多点专家共同审阅，使最终结论不违背国家规定且能适应各地区实际需要。

整改闭环同知识积累结合，建立“反馈—整改—复核”闭环管理方法。规定有关责任人、处理期限以及验收的要点，整改期满后开展远程或现场复核。同时将项目形成的法规差异数据库、典型问题案例库、高海拔作业经验等纳入机构知识管理系统，为后续异地服务提供数据支撑。

按回访制度做跟踪分析及持续改进。异地服务所涉企业列入回访，项目结束后 3～6 个月内开展回访，收集企业对服务流程、报告质量、整改效果的评价。对优质客户建立长期关系，回访中发现的问题同流程设计挂钩，形成“服务—反馈—改进”的 PDCA 持续改进循环。

伍　质量保障与风险控制

一、异地服务质量特殊控制点

样品运输：建立“采集—转移—运输—交接—分析”五节点质控体系：采集环节严格执行采样规范；转移阶段按标准分装（用离心管及封口膜）并当场核对；运输要根据时间要求定级、按需控温；交接由两方共同签字予以确认；分析前先安排时效性高的样品，同时记清各阶段的温湿度等数据。

现场作业：实行分区负责人制或“一企一专员”制，明确调查内容与完成时限。高海拔地区增设入血氧监测及“双人同行”制度，配备便携式氧气与急救药品，建立紧急撤离预案。

报告编制：应将各地有关法规的差异点列明，对所用法规做属地符合性检查。严格执行三级审核，对异地项目实行专项技审，重点核查属地法规引用准确性、问题判定依据充分性及整改建议可操作性。

二、风险识别与应对机制

建立“风险识别—评估分级—预案制定—动态监控—应急响应”全周期管控体系。

运输物流风险：液体样品高铁准入被拒→提前出具证明、标准化分装；仪器电池无法空运→提前陆运或属地租赁；冷链中断→备用冷藏箱、专人跟踪、实时温度监控。

时效风险：周期紧张、样品失效→预演排期、时效短样品优先、直读仪器优先。

计划变更风险：停产检修致延期→建立弹性行程，总周期预留 10%～15%缓冲，补充协议对变更作规定。

环境安全风险：高海拔高原反应、低温、缺氧→作业前健康筛查、携带氧气与急救药品、控制作业时长、建立紧急撤离预案。

能力经验风险：团队缺乏经验、缺少外部专家支撑→前期标准化培训、编制详细作业指导书、远程咨询或属地配合。

陆　实施路径与保障措施

（一）组织保障

成立异地服务专项工作组，实行项目总负

责人制。对“项目总监—区域组长—企业专员”做三级划分，统筹跨省区多家企业。将前期策划当作取得能力的基本点，以细致方案促成客户认同。针对经验不足，实施“内部专家培养+远程技术支持”，减少外部专家依赖。组建高原适应性作业小组，配备有高原经验人员。

（二）制度保障

制定《异地服务管理办法》《样品运输管理制度》《日清日结制度》《多企业连续排查管理制度》等。针对职业健康排查项目及特殊地域监测项目，补充编制《专项排查作业指导书》《高海拔检测安全操作规程》《行程变更应急响应制度》，纳入质量管理体系并定期内审。

（三）技术保障

配备便携式直读设备、移动冷藏箱、信息化终端及应急通讯设备。针对多地区多企业职业健康技术服务项目：建立“空运+陆运+属地租赁”多渠道设备保障体系；配备经气压校准的高海拔仪器及防护装备；建立属地实验室协作网络，对时效敏感样品优先委托属地分析；建立远程专家会诊系统，弥补现场专家不足。

柒 结 语

有关异地职业卫生技术服务的实施有法规、时间、环境及多项目交织诸项困难。结合对铝合金冶炼企业所做现状调查与职业健康分析的实例来看，改进应以标准化流程、属地配合、数字手段、行业分层这四个方面为着眼点，在整体上加以协调和推动。

从实际角度出发，应强化前期精细化策划与属地政策对接，将差异识别前置；推行中期标准化排查、智能调度、时效分级与弹性行程，破解长距离多点位难题；完善后期培训式反馈、云端审核与双轨合规，提升服务附加值。“问题反馈+知识传递”模式不仅能高质量完成技术服务，更能赢得长期合作意愿，实现技术价值与商业价值统一。

建议由主管部门着手研究异地服务所涉标准的统一及互认问题；服务机构持续完善 SOP，加强信息化与复合型人才培养，建立适应高海拔、偏远地区的作业能力，提升跨区域服务质量，切实保障劳动者职业健康权益。

参考文献

［1］ 中华人民共和国国家卫生健康委员会（2024），职业卫生技术服务工作规范，GBZ 331–2024（S）。

［2］ 黄伟乐，黄河海，许姝丽，何剑锋，赵鼎甲（2024），新时代中国职业卫生工作现状及应对策略［J］，职业卫生与应急救援，第 42 卷，第 3 期，407–412 页。

［3］ 中华人民共和国卫生部（2004），工作场所空气中有害物质监测的采样规范，GBZ159–2004（S）。

［4］ 中华人民共和国卫生部（2004），工作场所空气有毒物质测定无机含氮化合物，GBZ/T 160.29–2004（S）。

［5］ 中华人民共和国卫生部（2004），工作场所空气有毒物质测定氯化物，GBZ/T 160.37–2004（S）。

職業衛生檢查員專業知能提升方案：知能整合與技術支援之實務綜述

施昆岑
中華安全衛生協會

摘　要：目的：因應產業環境複雜化，第一線職業衛生檢查員需面對化學、物理及人因等多重危害挑戰。職業安全衛生相關部門推動計劃整合外部專家資源，建立系統性技術支援與經驗傳承機制，強化檢查員危害辨識、風險評估與監督能力，同時引導事業單位落實職業衛生管理並提升整體防護水準。

方法：方案採多元化培訓，運用產官學專家組成之專家資料庫，提供在地化即時指導，並推動三類專業服務：由專家隨同檢查之職業衛生技術顧問服務、實地指導採樣與分析之作業環境監測技術顧問服務，以及以工作坊形式辦理之檢查實務諮詢與交流。同時定期舉辦專業實務與新興職業衛生議題課程，系統性強化檢查員實務能力與法規應用。

結果：各項方案參與踴躍，職業衛生檢查員涵蓋率逾 70%，滿意度近 100%。檢查員普遍反映專家指導有助於將法規轉化為實務操作，解決檢查過程中之法令解讀疑義。計劃劃每年辦理至少 40 場次專業技術服務，顯著提升第一線對複雜過程及多元職業危害之判斷與應對能力。

結論：結合理論與實務之訓練機制，有效提升檢查員專業素養與執法信心。建議未來參考國際職業安全衛生訓練制度，規劃完整職涯發展路徑與專業認證制度，並建立經驗共享與數位學習平台，以促進知識傳承並持續精進勞動檢查品質。

關鍵詞：職業衛生、檢查輔導

壹、前言與目的

隨著工業時代的發展與科技進步，職業安全衛生的議題已成為勞工保護的重要核心。相較於具有立即性影響的職業安全議題，化學性、物理性、人因性及社會心理性等職業衛生危害往往具有長期的潛伏性，且其影響層面更為廣泛。對於身處監督最前線的職業衛生檢查員而言，面對日新月異且複雜多變的作業環境，職業衛生檢查工作面臨嚴峻挑戰。職業衛生檢查員不僅需要深入了解各類危害因子的特性，更需因應不同業別、不同製程所產生之迥異危害特性。特別是對於新進檢查員，實有必要透過系統性的資源投入，強化其本職學能並導入專家經驗，以建立專業的監督檢查量能。

因應產業環境複雜化，第一線職業衛生檢查員需面對化學、物理及人因等多重危害挑戰。為了給予職業衛生檢查員更多的支持，職業安全衛生相關部門近年投入大量資源，透過計劃委託整合外部專家資源，建立系統性技術支援與經驗傳承機制，強化職業衛生檢查員危害辨識、風險評估與監督能力。本文旨在綜述

台灣地區如何透過知能整合與技術支援方案，逐步強化職業衛生檢查員的本職學能。

貳、職業衛生專家資源整合機制

為了讓勞動檢查機構（以下簡稱勞檢機構）在實施職業衛生檢查時能有堅強的技術後盾，職業安全衛生相關部門委託中華安全衛生協會成立計劃團隊，自 2021 年起陸續集結各領域專家，建構「職業衛生專家資料庫」。

一、職業衛生專家資料庫之組成與分類

資料庫來源區分為學術研究機構（如職安衛相關校系）、專業團體（如中華安全衛生協會、職業衛生學會）及產官界專家（包含退休之資深勞動檢查員及業界專家）。截至目前，該資料庫已匯集超過百位專家，涵蓋化學性、物理性、人因性、生物性及職業健康等多元領域。資料庫依化學性、物理性、人因性、生物性及職業健康等危害類別羅列專家名單，並詳列專長與所在地域（北、中、南、東），以利「就地運用在地資源」，提供最即時的支援。

二、需求評估與媒合機制

計劃團隊建立一套「勞動檢查機構職業衛生專業需求評估機制」。首先由職業安全衛生相關部門通知各勞檢機構相關服務資訊，各勞檢機構再根據轄區產業特性、人員組成（如新進檢查員比例）回報所需三類專業服務類別與場次。計劃團隊再依據專業性、地域性，自職業衛生專家資料庫中媒合適合的專家學者，安排實地指導或工作坊交流。運作流程如圖 1 所示。

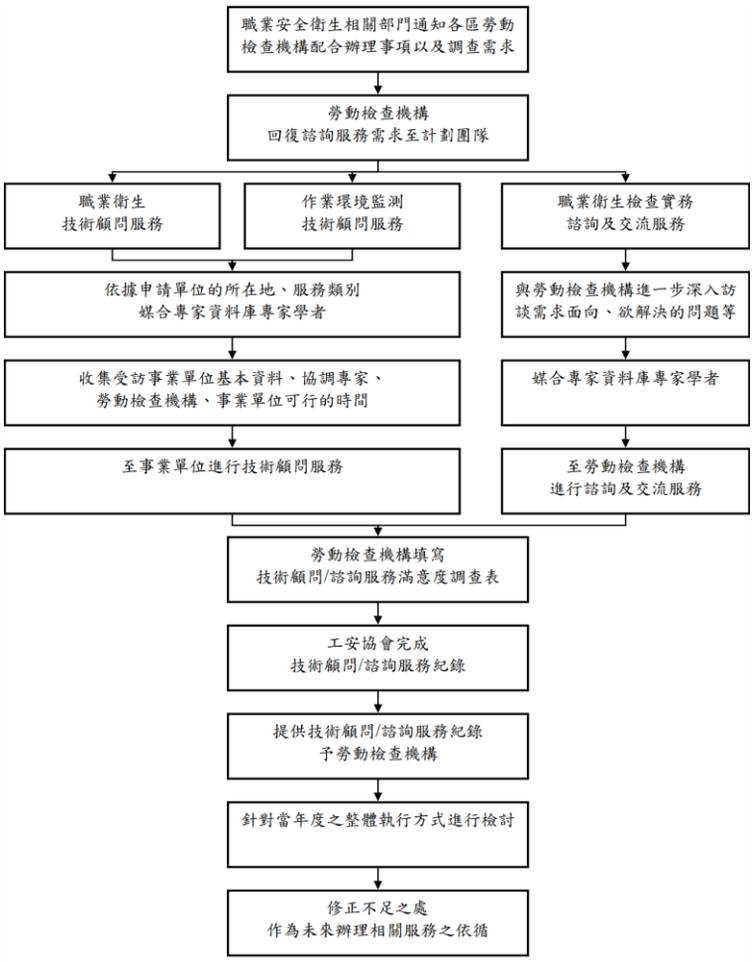


圖 1　需求評估與媒合機制運作流程圖

參、提升專業知能之核心策略與方法

計劃團隊規劃三類客製化的專業服務，旨在將理論法規轉化為第一線的檢查戰力。另外計劃團隊還透過定期舉辦專業實務與新興議題課程，精進職業衛生檢查員的專業深度。以下針對三類專業服務與相關訓練課程進行說明。

一、三類專業服務

（一）職業衛生技術顧問服務

本項職業衛生技術顧問服務的重點，在於媒合具備勞動檢查實務經驗的專家，隨同職業衛生檢查員至指定的事業單位進行實地監督檢查或輔導。監督檢查或輔導議題涵蓋有機溶劑、特定化學物質、粉塵、噪音、局限空間作業及勞工身心健康保護等。專家引導職業衛生檢查員注意檢查重點，例如在電子零件製造業中，專家現場示範如何透過修改局部排氣裝置的設計來強化排氣效果；又或傳承職業衛生相關法規的解讀與實務應用，並協助職業衛生檢查員判斷事業單位的作業是否可以符合特定法令條文依據等。

計劃團隊同步推廣職業衛生檢查員於執行職業衛生檢查時，可以攜帶水霧機、發煙管、噪音計等工具，透過量化或可視化證據，增進職業衛生檢查成效並使事業單位信服。

（二）作業環境監測技術顧問服務

作業環境監測技術是暴露評估與執法的關鍵依據，但技術門檻相對較高，對於非相關系所畢業的職業衛生檢查員更是巨大挑戰。本項服務由專家實地指導職業衛生檢查員進行採樣泵組裝、流量校正器使用、採樣點選擇、個人採樣設備正確佩戴方法，以及樣本包裝及運送等作業環境監測重點，讓職業衛生檢查員能夠掌握正確的採樣技術，以確保執法的公信力與有效性。

（三）檢查實務諮詢及交流服務

在台灣地區共有 13 個勞檢機構，而各個勞檢機構會因轄區特性不同（如科學園區、傳統製造業、石化業、化工業等），在職業衛生檢查上會遇到的問題也會有所差異。本項檢查實務諮詢及交流服務，透過邀請專家親臨勞檢機構辦理工作坊，針對特定行業別或複雜法規（如傳統法規解釋令、特定化學物質管理）進行深入探討；亦會藉由與職業衛生檢查員討論該轄區內的特殊個案或職災案例，解決職業衛生檢查員在法規解讀上的疑義。這種模式能讓同單位同仁共同交流，建立一致性的執法標準。

由於不同轄區的勞檢機構所面臨的問題與困境各有差異，考量他山之石可以攻錯，計劃團隊另外將個勞檢機構的問題，依據有機溶劑、特定化學物質、粉塵、噪音等職業衛生議題分門別類整理為問答集，未來將可與所有勞檢機構分享。

二、專業實務與新興議題課程

計劃團隊不僅提供三類技術服務，更透過系統化的教育訓練，彌補新進職業衛生檢查員在完成基礎訓練後，面對複雜法令與多元製程時的專業缺口，藉此穩定檢查人力並促進經驗傳承。

（一）特殊有害作業環境訓練

特殊有害作業環境訓練係為期 60 小時的進階專業訓練，此訓練的目標為培養具備全面性職業衛生專業之檢查員。此訓練邀請各職業衛生領域專家學者擔任講師，課程內容除了基本的有機溶劑、特定化學物質、粉塵、鉛、噪音、高溫、工業通風、異常氣壓、暴露評估、作業環境監測等內容，更是涵蓋異常負荷、母性健康保護、人因性危害、不法侵害等職業健康議題。除此之外，此課程為了強化訓練的實質成效，還透過安排至鋼鐵廠等實際有害作業場所進行參訪，讓參訓檢查員實地練習操作直讀式綜合溫度熱指數設備、噪音劑量計、檢知管等常用職業衛生檢查設備。

（二）職業衛生檢查實務工作坊

職業衛生檢查實務工作坊以開放式討論並分享新興議題為主，邀請職安機關與各區勞檢機構參與。其核心價值在於「跨機構經驗分享」，由不同單位的職業衛生檢查員分享其於執行職業衛生檢查時遇到的問題及解決方式，如結晶游離二氧化矽矽肺症、局限空間缺氧或中毒等特定個案進行研討，並確保對疑義規定有共同的理解與一致的標準。除此之外，計劃團隊亦於此工作坊分享新興職業衛生議題，或是分享如噪音可視化設備又或是智慧化噪音量測設備等可以用來強化執行職業衛生檢查的工具，輔助職業衛生檢查，使執法數據更具說服力。

（三）專業實務講習

隨著社會環境與產業結構的變遷，不同年度職業衛生檢查員所需強化的職業衛生議題亦有所差異。因此，專業實務講習的定位在於回應職業衛生檢查員當前最迫切的需求，並提供相應的能力強化。其議題發展歷程，從早期著重於特定職業衛生議題的深化，到近年轉以勞工身心健康保護專業為核心，而最新階段則再次回歸至「勞工作業環境監測」技術的強化，展現出隨需求調整之動態發展趨勢。

肆、執行成效分析

近年來，職業衛生檢查員對於專業提升表現出高度熱忱。在 2024 年度，13 家勞檢機構合計有 219 人次參與三類專業服務，職業衛生檢查員的涵蓋率達 70.9%（圖 2）。在 2025 年度，三類專業服務涵蓋率進一步提升至 73.4%（圖 3）。部分勞檢機構如台北市、台中市、台南市及產業園區管理部門，其職業衛生檢查員的參與涵蓋率更高達 100%。根據滿意度問卷統計，職業衛生檢查員對於三類專業服務的「滿意」與「非常滿意」比例非常高，以 2025 年度的「職業衛生技術顧問服務」為例，滿意度高達 95%（圖 4）。多數職業衛生檢查員認為專家指導有助於提升對法規立法緣由與實務檢查手段的理解，並能在面對多變的職場風險時提供寶貴的實務引導。

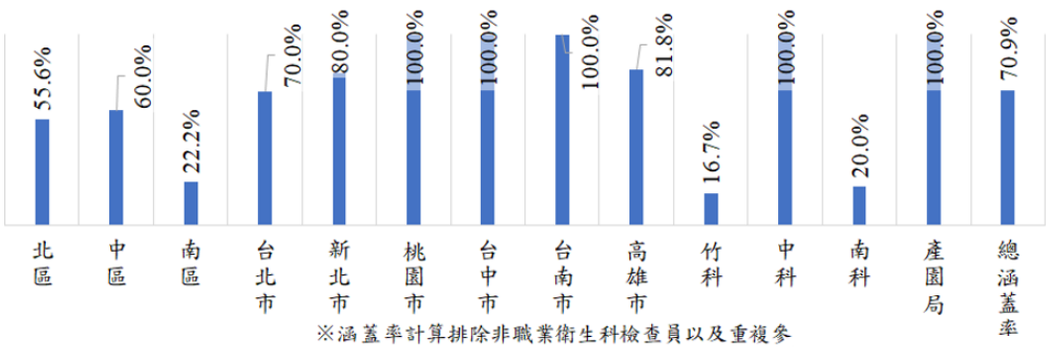


圖 2　2024 年度參與三類專業服務之職業衛生檢查員涵蓋率

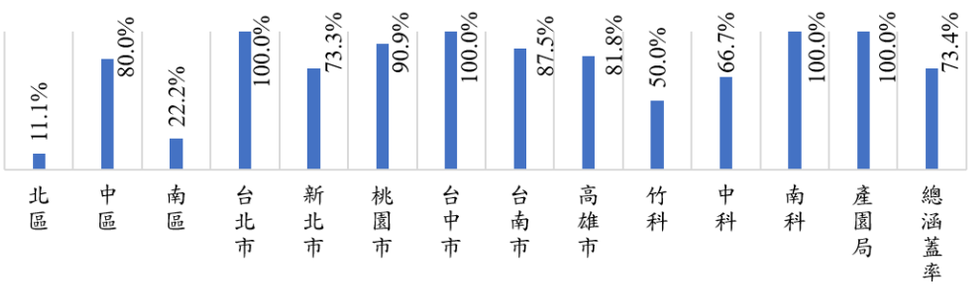


圖 3　2025 年度參與三類專業服務之職業衛生檢查員涵蓋率

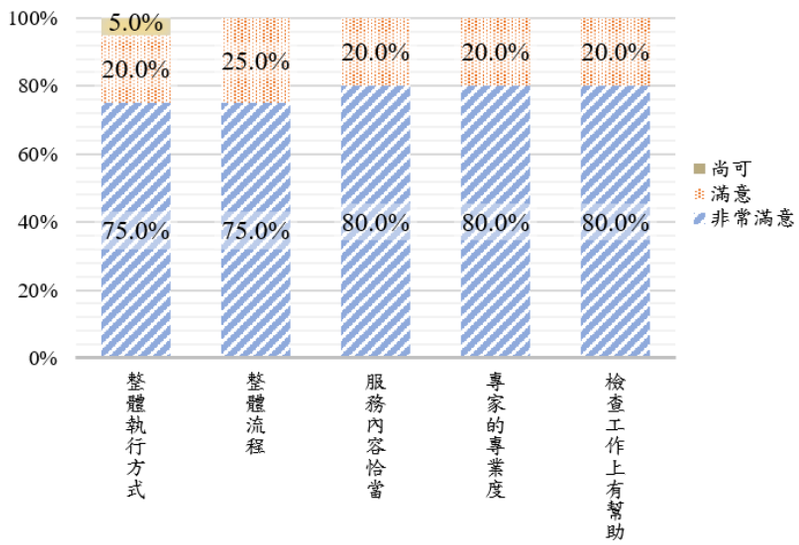


圖 4　2025 年度職業衛生技術顧問服務滿意度調查結果

在專業實務與新興議題課程部分，無論是特殊有害作業環境訓練、職業衛生檢查實務工作坊、專業實務講習等訓練課程，職業衛生檢查員的「滿意」與「非常滿意」比例非常高，以 2025 年度的職業衛生檢查實務工作坊為例，滿意度超過 95%（圖 5）。與會檢查員回饋，「實際案例分享」與「改善建議做法」對第一線執行檢查最具實質幫助，而新興的職業衛生議題分享有助其面對檢查挑戰，並建議未來能夠持續辦理此類結合檢查實務的課程，以強化應對複雜職業衛生與健康問題的知能。

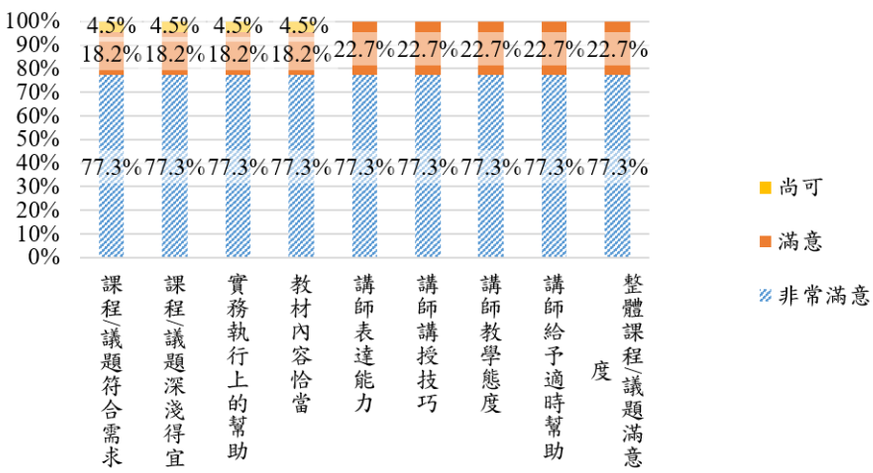


圖 5　2025 年度職業衛生檢查實務工作坊滿意度調查結果

伍、結論與建議

一、結論

在職業安全衛生相關部門推動，由計劃團隊執行的「職業衛生檢查員專業知能提升方案」計劃，在台灣地區已建立一套結合產官學外部專家的技術支援體系。該體系不僅有效解決了第一線職業衛生檢查員在日益複雜作業環境下的執法疑義，更透過「師徒制」般的專家帶領入廠指導，有效傳承寶貴的實務經驗。

二、建議

雖然目前職業衛生檢查員的滿意度與參與度皆有亮眼表現，但面對未來持續變動的職業衛生議題，如人造石業結晶型游離二氧化矽矽肺症、高氣溫戶外熱危害、職場霸凌防治等新興議題，提升職業衛生檢查員專業知能的工作仍需長期且持續地投入。建議可透過借鏡國際先進制度、導入智慧監測科技，並且強化數位化知識傳承，將能打造更專業、更具自信的職業衛生監督量能，最終達成保障勞工衛生與健康的終極目標。

參考文獻

［1］ 闕妙如（2021），提升職業衛生危害暴露監視與管理制度推動計劃。

［2］ 闕妙如（2022），提升職業衛生危害暴露監視與管理制度推動計劃。

［3］ 闕妙如（2023），職業衛生知能整合暨特定產業危害暴露評估與管理技術提升計劃。

［4］ 闕妙如（2024），職業衛生知能整合暨特定產業危害暴露評估與管理技術提升計劃。

［5］ 闕妙如（2025），職業衛生知能整合暨產業危害暴露評估與管理技術提升計劃。

以永續健康勞動力為目標之勞工健康服務跨領域合作模式建構

闕妙如，黃德琪，李芝涵
中華安全衛生協會健康與衛生技術服務處

摘　要：目的：因應企業永續發展趨勢，勞工健康服務已由法令遵循逐步轉型為支持組織韌性與永續經營的重要策略，惟其涉及勞工健康服務、職業安全衛生及人力資源等跨領域合作。本研究旨在建構具實務操作性之跨領域合作模式，強化組織協作機制。

方法：採教育訓練介入方式，規劃跨領域勞工健康服務工作坊，由勞工健康服務、職業安全衛生及人力資源管理專家共同授課，結合不同產業案例，透過專家講授、案例研討及分組討論，引導學員運用 PDCA 管理，探討健康風險辨識、勞工健康服務辦理事項及跨部門分工合作機制。

結果：學員透過案例研討完成勞工健康服務推動流程、跨部門角色分工、績效指標及檢討改善機制規劃，逐步建構跨領域合作模式。課後調查顯示，課程有助於提升學員對各專業角色定位、跨部門合作及勞工健康服務與企業永續發展關聯之理解，並掌握規劃、執行、檢討及改善流程。

結論：跨領域交流與案例導向學習有助於建立共同認知與合作基礎，提升勞工健康服務推動效能，可作為未來推動健康勞動力管理及相關教育訓練之參考。

關鍵字：勞工健康服務、跨領域合作、永續健康勞動力

壹、前言與研究背景

在當前全球產業經濟轉型與 ESG（環境、社會、公司治理）永續浪潮推動下，企業對於人力資本與勞工福祉的重視程度提升至前所未有的戰略高度。在國際永續評比中，「社會（S）」構面已由過往被動的公益捐贈，大幅轉向關注企業內部「工作者健康、安全與尊嚴勞動」之領先績效。台灣地區勞動主管機關發布修訂之《職場永續健康與安全 SDGs 揭露實務建議指南》（台灣地區勞動主管機關，2024），即引導事業單位依循全球永續報告倡議組織（Global Reporting Initiative，2018）之 GRI 403（職業健康與安全）標準，將包含 403–1（職安衛管理系統）、403–3（職業健康服務）、403–6（工作者健康促進）及 403–10（工作相關疾病預防）等指標揭露於企業永續報告書中，正式將勞工健康服務轉化為企業治理與永續發展的核心指標。

然而，檢視過去事業單位之推動實務，多偏重於因應《職業安全衛生法》及《勞工健康保護規則》之最低消極法遵要求，採取被動應付之做法。隨著人口老齡化、少子化以及高強度輪班與資訊化壓力，現代勞工面臨之健康危害已由傳統單一物理或化學因子，大幅轉變為人因性傷病、異常工作負荷促發心血管疾病（過勞）、職場不

法侵害等新型態風險。ISO 45001 與 ISO 45003（職場心理健康與安全指南）明確揭示，管控新型態心理社會風險與優化工作組織設計，絕非單一安衛或醫護人員所能獨力完成，必須建立跨部門之橫向協同機制。

從健康經濟學觀點，勞工健康服務不應被視為純費用支出，而應被定義為「維持組織韌性之戰略投資」。Baicker et al.（2010）的後設分析研究指出，企業推動系統性職場健康促進與預防計畫，平均每投入 1 美元，可節省 3.27 美元的醫療開支，並降低 2.73 美元的缺勤成本。反之，若健康服務斷裂，企業將面臨高缺勤率、假性出勤（帶病上班導致生產力下降）及人才流失之高昂代價。

而現行在勞工健康服務跨領域合作方面常因缺乏共通溝通語言、橫向管道與量化成效評價工具，導致健康服務難以嵌入企業核心管理機制。基於此，本研究旨在建構一套具高實務操作性之「跨領域合作模式」。藉由舉辦跨部門實踐訓練工作坊，引導跨專業人員運用 PDCA 循環，連結 GRI 403 永續指標，並導入財務投資報酬率（ROI）評估工具，以破除部門藩籬，推動永續健康勞動力成為企業長期競爭力之核心驅力。

貳、研究方法與實施流程

本研究採教育訓練介入之研究設計，整體推動流程分為三大階段：

一、跨領域實務訓練工作坊規劃與架構

工作坊創新結合企業內人力資源管理、勞工健康服務及職業安全衛生相關部門人員，以「永續健康勞動力」為主題，強調建構永續健康勞動力是支持企業永續經營之重要策略。課程議程規劃如下：

（一）永續健康勞動力推動與管理策略

由專家系統性講授如何將勞工健康服務由「法遵成本」轉化為「企業關鍵投資」，並引導學員運用 PDCA 循環與 GRI 403 準則，將健康服務與企業永續經營（ESG）連結，以爭取高階決策者之資源支持。

（二）案例分組研討

每場次學員分為 4 組（每組約 7–8 人），組內成員混編職護、職安衛及人資等不同部門人員，並將不同行業別學員分散各組。每組分配 1 個模擬職場情境案例（涵蓋營造業、第一類高風險製造業、第二類服務業等），由 2 位不同領域專家及助教全程指導腦力激盪。

（三）成果分享與專家講評

各組依「永續價值展現」、「辦理事項確立」及「執行與檢討」三大重點將研討成果繪製於海報上台發表，每項討論重點由台下學員提問、台上回答及專家交叉講評。

參、研究結果與分析

一、學員滿意度與訓練成效說明

工作坊辦理後進行學員滿意度調查，以評估課程內容、講師授課、分組討論與整體安排。調查結果顯示，學員對整體活動表現給予高度評價，整體活動滿意度合計達 97.2%（其中 73.3%為非常滿意、23.9%為滿意）。

在教學效益與實務應用層面，高達 96.1%的學員認同「課程內容在實務執行上有幫助」，且同有 96.1%的學員表示「透過分組有助於課程吸收」，證實跨專業編組與案例探討能有效促進學習成效。在教材與內容設計上，「教材內容清楚、精確」獲 96.6%的正面評價，「課程內容符合需求」與「深淺得宜」亦分別達到 95.5%與 95.4%的滿意度。在講師授課品質方面，「講師給予適時幫助」達 97.8%、「教學態度」達 97.7%、「表達能力」達 96.0%、「講授技巧」達 95.4%，顯示雙專家交叉講評與助教輔導機制備受認同。總體而言，多數學員認同課程顯著提升跨部門協作認知，並建立起運用 PDCA 流程進行健康服務規劃與檢討的管理能力。

二、跨領域合作模式與部門角色分工架構

綜合實務案例與分組研討結果，確立跨領域合作機制需明確界定四大權責主體之資源挹注與分工合作：

• 勞工健康服務人員（職護/職醫）：提供員工健康風險辨識與評估（健檢分級管理、過負荷/人因問卷分析、母性保護評估）、理學檢查、醫師面談與適性配工建議、職災個案關懷與復工評估及健康教育，以達職業病預防之目的。

• 職業安全衛生人員（職安衛）：提供工作場所環境危害辨識與評估（作業環境監測、化學品清冊與 SDS、機械安全防護、危害風險評估）、規劃工程控制措施、防護具選用與密合度管理、承攬商安衛管理及職災事故原因分析。

• 人力資源管理人員（人資）：提供組織與人力結構資料（人員名冊、性別/年齡/職務、出勤/加班/輪班數據、請假與離職趨勢）、主導工時控管、調工與復工制度訂定、教育訓練排程及承攬商進場資料管理。

• 其他相關部門（單位主管等）：單位主管提供實際作業流程與設備資訊、監督現場防護具佩戴與作息調整；採購與工程部門協助設備改善與防護具採購；保全與醫事機構提供現場應變與緊急救護支援。

肆、產業實務案例推動

經工作坊分組討論結果，針對營造業、第一類事業（製造業）及第二類事業（服務業與醫療業）精進推動案例。以下就代表性案例之 PDCA 合作流程、KPI 評估與財務投資報酬率（ROI）進行分析：

一、案例一：第一類事業單位（金屬製品製造業）—聽力保護與人因危害預防

（一）情境概述

僱用男 255 人、女 85 人（共 340 人），含沖壓噪音作業（55 人）、酸洗溴丙烷作業（10 人）、包裝重複性作業（100 人）及曾發生夾傷職災等。

（二）PDCA 合作流程與績效指標（KPI）

• 分析與辨識（P）：職安人員辨識高風險作業並執行噪音監測與人因姿勢評估；職護進行聽力特檢與肌肉骨骼問卷分析；人資提供出勤與輪班型態；單位主管提供作業流程資料。KPI：噪音監測完成率 100%、肌肉骨骼問卷回收率 85%以上。

• 執行與控制（D）：職安協助制定改善計畫與防護具選用；職護辦理衛教指導；人資執行工作再設計與調動；單位主管配合工作調動。KPI：防護具配發 100%、改善設計項目達 2 項以上。

• 評估與改善（CA）：職護進行改善前後症狀比較；職安製作成效報告；人資追蹤請假與離職率變化。KPI：員工主觀不適率下降 20%以上、肌肉骨骼高風險崗位轉中/低風險比例提高 10%。

二、案例二：營造業（大樓建設工程）—高氣溫熱危害預防

（一）情境概述

規模 300 人以上，含土方開挖、鋼筋綁扎、模板組立、混凝土澆築等，具高氣溫戶外作業、高架作業及承攬商交叉作業特性。

（二）PDCA 合作流程與績效指標（KPI）

• 分析與辨識（P）：職安人員盤點各作業熱危害風險並監測綜合溫度熱指數（WBGT）；職護協助辨識心血管疾病或高血壓等高風險勞工；人資提供人員名冊、排班與工時資料；工地主管確認實際作業內容。KPI：熱危害作業盤點完成率 100%、高風險人員納管率達 95%。

• 執行與控制（D）：職安人員設置休息區、飲水設備、通風降溫與遮蔭設施；職護實施個案健康評估、衛教與熱疾病症狀辨識宣導；人資協助調整作業時間與人力配置；工地主管督導現場落實補水與休息。KPI：熱危害預

防措施完成率 100%、教育訓練完成率 100%。

• 評估與改善（CA）：定期檢討作業時間、降溫措施與通報時效；高風險勞工追蹤未降者納入下一期 PDCA，並於管理審查會議中滾動修正。KPI：年度改善措施完成率達 90%、熱傷害復工後再發生率控制於 0%。

三、案例三：第二類事業單位（綜合商品零售業）—異常工作負荷促發疾病預防

（一）情境概述

門市及補貨人員共 3,274 人（含 522 名異常工作負荷勞工、388 名中高齡勞工及 322 名輪班夜間工作者）。

（二）PDCA 合作流程與績效指標（KPI）

• 分析與辨識（P）：人資提供加班時數、輪班頻率、出勤異常與請假資料；職安盤點長工時與輪班風險職務；職護協助篩選中高風險勞工；單位主管確認實際工作量與人力配置。KPI：高風險群辨識完成率 100%、異常工作負荷風險評估完成率 100%。

• 執行與控制（D）：職護安排醫師面談、健康指導與個案追蹤；人資控管加班上限、協助輪班與工時調整；職安評估作業流程改善建議；單位主管配合工作調整與人力支援。KPI：醫師面談及健康指導完成率 100%、工作調整措施完成率 90%以上。

• 評估與改善（CA）：職護彙整高風險個案追蹤與健檢異常結果；人資分析加班、缺勤、離職率與人力穩定度；職安與單位主管檢討工作負荷改善情形。未結案或風險持續者納入管理審查與下一期 PDCA。KPI：中高風險人員健康追蹤完成率 100%、高風險個案缺勤天數降低 10%、高風險人員留任率達 90%、重大過勞相關健康事件 0 件。

伍、未來精進建議

綜合專家會議產出之寶貴意見，現行合作模式與課程設計在未來實務推廣上應針對以下四大層面持續滾動式精進：

一、提升人力資源（HR）單位之參訓度

現行參訓人員仍以職護及職安衛人員為主力，人資參與度相對偏低。惟健康服務涉及復工排班、職務調整及人力配置，人資若未深度參與將影響職場後續合作。建議未來課程可透過「跨部門團體報名優先」或將人資權責法令（如勞基法與職安法交集）、人才留任與 ESG 績效納入文宣，提高人資部門參訓意願。

二、導入角色扮演與換位思考互動機制

現行課程主要採案例說明與討論，學員容易受限於自身職務立場。專家建議後續可規劃情境演練或換位思考（Role-Play）單元（例如讓職護扮演雇主、人資扮演現場主管、職安扮演勞工），使其充分體認不同角色在資源配置、工期壓力及溝通上之實際困境。

三、深化績效指標與 ESG/GRI 403 永續報告之連結

學員對於如何將健康服務成果轉化為量化指標及永續語言仍顯不足。未來課程應深化績效指標設定（KPI）與投資報酬率（ROI）之操作練習，並提供連結 GRI 403 準則（如 403-2、403-3、403-6、403-10）之對照工具，協助企業直接將健康服務成果納入永續報告書揭露。

四、維持 PDCA 架構並發展檢核評估工具

確認 PDCA 管理循環能有效幫助學員建立系統化邏輯，後續應持續作為核心架構。建議結合「勞工健康服務實務檢核手冊」，發展簡易數位化評估工具或試算表，方便事業單位在職場中進行自主檢視與跨部門任務追蹤。

陸、結論

本研究建構具實務操作性之「跨領域勞工健康服務合作模式」。研究結果證實，透過跨專業之案例導向學習、PDCA 循環導入與專家會議精進，能有效破除職業安全衛生、人力資源與勞工健康服務間之本位主義，建立共通之溝

通語言與合作流程。將勞工健康服務由單純的被動「法令遵循」提升至主動的「永續健康勞動力管理」，不僅能顯著改善勞工健康結果與降低職災風險，更可在企業營運面展現具體之經濟效益（ROI 達 50%至 320%）與 ESG 永續價值，為未來推動健康勞動力管理及教育訓練提供極具參考價值之實務指引。

柒、參考文獻

［1］台灣地區勞動主管機關（2024）。《職場永續健康與安全 SDGs 揭露實務建議指南（2024 修訂版）》。

［2］Baicker, K., Cutler, D., & Song, Z.（2010）. Workplace Wellness Programs Can Generate Savings. Health Affairs, 29（2）, 304–311.

［3］Global Reporting Initiative.（2018）. GRI 403：Occupational Health and Safety 2018. Global Sustainability Standards Board.

［4］International Organization for Standardization.（2021）. ISO 45003：2021 Occupational health and safety management — Psychological health and safety at work — Guidelines for managing psychosocial risks.

高風險職場自主健康管理系統建構

謝明宏[1]，吳家汶[2]，林心妮[2]，張正杰[2]，董湘羚[3]，陳琬玲[3]
1. 中台科技大學環境與安全衛生工程系　副教授
2. 中台科技大學環境與安全衛生工程系　助　理
3. 中台科技大學環境與安全衛生工程系　學　生

摘　要：高風險職場涵蓋教師、警察、消防、護理及社會工作等領域，其工作特性普遍具有高工作負荷、高心理壓力及多元職業危害暴露等風險。長期暴露可能增加過勞、心理健康異常、職業傷病等，故建構系統化之自主健康管理機制，已成為職業安全衛生與健康促進領域的重要課題。

本研究建構高風險職場自主健康管理系統，透過蒐集各領域之職業災害案例、作業特性及勤務特性，規劃適用之健康自主管理項目，並參考台灣地區衛生福利部門、勞動部門職業安全衛生機關及教學醫院等相關健康檢測標準進行系統設計，內容包含心情溫度計、肌肉骨骼人因性危害、異常工作過負荷、全民健康保險健康存摺及聽力檢測等，為提升使用便利性，本系統提供 App、Python 及 Google 表單等多元操作介面供選擇。

然而，當偵測到異常健康數據時，系統可即時通報並提供個人化健康建議，並結合職業醫學、心理諮商等跨專業資源，強化早期介入與追蹤管理。經實際推動獲一致好評，除提升健康意識與自主健康管理能力外，亦能落實定期監測與早期預防，促進職場健康與安全。

關鍵詞：高風險職場，自主健康管理，促進職場健康

壹、前　言

隨著現代社會分工日益精細與勞動型態的轉變，教師、警察、消防、護理以及社會工作等領域，屬於「高風險職場」，其工作特性普遍具備高工作負荷、高心理壓力、多元職業危害暴露等特徵。

如警消人員因肩負災害應變與緊急救援任務，除須適應不規律輪班外，常於勤務中面臨高風險情境、接觸重大傷亡事故及目睹衝擊性畫面；護理與社工人員長年處於高情緒勞務與高時效壓力的照護環境；教師則面對多元化的教學與行政要求。長期暴露於上述高風險環境中，若缺乏適當的預警與管理方法，將顯著增加從業人員之過勞風險，甚至引發心理健康異常、職業傷病等嚴重後果。

而目前職場健康促進措施，多仰賴靜態健康檢查，缺乏動態、即時且能讓員工自主參與的預警機制。因此，如何針對高風險職場建構一個系統化之自主健康管理機制，已成為當前職業安全衛生與健康促進領域的重要課題。

貳、研究方法

一、健康資訊蒐集

針對不同職業工作特性與健康風險，蒐集相關職業暴露、工作負荷、生理狀況及心理健

康等資訊，分析各職類可能面臨之健康危害因素，包含心理壓力、人因危害、過勞風險、噪音暴露及其他職業相關危害，作為後續健康自主管理項目設計、風險評估及預防介入措施建立之依據。

二、健康自主管理項目選擇

提供使用者依據自身工作特性與健康需求，自主選擇適合之健康管理項目，包含心理因素、人因危害、工作負荷、健康檢查狀況及聽力傷害等面向。透過多面向健康風險評估，可協助使用者了解自身健康狀態與潛在危害因素，並進行持續監測與追蹤，以提升健康風險辨識能力，及早發現異常狀況並採取適當預防措施，建立個人化自主健康管理模式。

三、健康自主檢測項目標準

健康自主檢測項目標準係參考台灣地區相關單位（如：衛生福利部門、職業安全衛生機關、教學醫院等）及健康衛教資訊等多元專業來源，整合生理健康、心理健康及職業危害相關評估指標，建立具科學依據且符合實務需求之健康檢測標準，以提供使用者進行自主健康評估與風險辨識，提升健康管理之準確性與應用效益。

四、異常通報機制開發

建置智慧化異常通報功能，當系統偵測使用者生理或心理健康數據超出預設警戒值時，可自動產生異常警示，並透過行動 App、電子郵件或管理平台即時通知相關人員，以利及早掌握健康風險並採取適當介入措施。透過此機制，可由傳統被動式健康管理轉變為主動預警管理模式。

五、多元操作介面設計

本系統特別採取「多管道輸入、集中式管理」的彈性架構，提供三種多元操作介面：

（一）Google 表單

Google 表單除了可以管理活動報名資料、快速製作意見調查、建立測驗外，還有更多功能待您發掘。您可以使用 Google 表單直接在行動或網路瀏覽器中建立問卷調查或測驗，不必額外安裝特殊軟體。您可以在系統收到回應後立即查看結果，並透過圖表彙整出一目瞭然的結果摘要。

（二）行動 App

使用者可透過智慧型手機隨時隨地進行生理量測、心理檢測、健康紀錄查詢及異常警示接收，不受時間與地點限制。相較於紙本管理方式，行動 App 具備即時性、便利性及持續追蹤等優勢，可提升使用意願與健康管理。

（三）Python 運算與管理後台

Python 運算與管理後台系統是指利用 Python 編寫的程式碼來進行運算和管理後台業務。Python 的強大功能使得開發者能夠輕鬆實現各種系統管理任務。Python 的簡潔語法和強大的功能使得它成為開發後台系統的理想語言。

參、結果與討論

文獻指出，過勞與心理健康異常已成為當前工作者重要的職業健康議題，高風險職場工作者因長期處於高壓工作環境，更容易產生身心耗竭。雖然台灣地區已訂有《職業安全衛生法》及《職業安全衛生設施規則》等相關法規，推動過勞預防及心理健康管理措施，但基層單位仍普遍缺乏簡便、客觀且可持續追蹤的評估工具。

因此，本研究擬透過數位化工具輔助生理與心理健康監測，使工作者能快速完成自我檢測，即時掌握身心健康狀態及心理照護需求，並依評估結果提供適當之心理衛生資源與後續轉介服務，以利及早發現心理預警訊號，降低長期壓力累積造成之情緒崩潰、身心耗竭及憂鬱、焦慮等心理健康問題。

為兼顧不同人員的需求與隱私考量，檢測系統提供兩種模式可選擇：1.直接顯示分數與心理狀況，受測者在完成檢測後可立即得知自身

評分及狀態分析，方便立刻採取自我調適或尋求專業協助；2.隱私保護模式：為避免受測者擔心個資外洩，系統會將檢測結果加密後直接寄送至指定 E-mail，由個人自行開啟檢視，確保測驗過程與結果的高度隱密性。

透過「即時監控＋數位心理檢測」雙軌模式，可建立早期偵測、即時介入及長期追蹤之心理健康管理機制，協助工作者持續監測心理健康狀態，提升抗壓能力與情緒調適能力，並降低心理健康問題對工作安全與健康之影響。

一、心情溫度計（李明濱，2024）

是一種簡式健康量表（Brief Symptom Rating Scale，以下簡稱 BSRS-5）的俗稱，主要用途為快速評估個人可能出現的精神/心理症狀，藉此掌握其心理健康需求，並進一步提供適切的心理衛生協助。以淺顯易懂之 6 道題目（如表 1），具有簡潔、使用便利的優勢。

在關懷他人的過程中，或許能夠察覺對方有情緒上的困擾，卻難以掌握其嚴重程度。心情溫度計能提供具體的方式，協助我們了解對方的心理狀態，也幫助當事人釐清自己的情緒問題，並依據評分結果採取適當的關懷與轉介（如表 2）。

表 1　簡式健康量表

等級 / 題目	完全沒有	輕微	中等程度	厲害	非常厲害
1.睡眠困難，譬如難以入睡、易醒或早醒	0	1	2	3	4
2.感覺緊張不安	0	1	2	3	4
3.覺得容易動怒	0	1	2	3	4
4.覺得憂鬱、心情低落	0	1	2	3	4
5.覺得比不上別人	0	1	2	3	4
有自殺的想法	0	1	2	3	4

表 2　簡式健康量表分數對照

得分		說明
前五題總分	0–5 分	一般正常範圍
	6–9 分	輕度情緒困擾：建議找親友談談，抒發情緒
	10–14 分	中度情緒困擾：建議尋求心理衛生或精神醫療專業諮詢
	15 分以上	重度情緒困擾：建議尋求精神醫療專業諮詢
有自殺想法評分為 2 分以上（中等程度）時：建議尋求精神醫療專業諮詢		

二、肌肉骨骼人因性危害（台灣地區勞動部門職業安全衛生機關，2014）

肌肉骨骼人因性危害預防計畫是為了預防因重複性作業、不良姿勢、過度施力或作業頻率過高等原因引起的肌肉骨骼疾病。可應用「肌肉骨骼症狀調查表」（引用 Nordic Musculoskeletal Questionnaire，NMQ，如圖 1），主動對於工作者實施自覺症狀的調查，主要分為三個部分，A：填寫說明、B：基本資料、C：症狀調查，說明如下：

A.填寫說明：說明酸痛不適與影響關節活動能力（以肩關節為例以及身體活

動容忍尺度，以 0–5 尺度表示：

0：不痛，關節可以自由活動；

1：微痛，關節活動到極限會酸痛，可以忽略；

2：中等疼痛，關節活動超過一半會酸痛，但是可以完成全部活動範圍，可能影響工作；

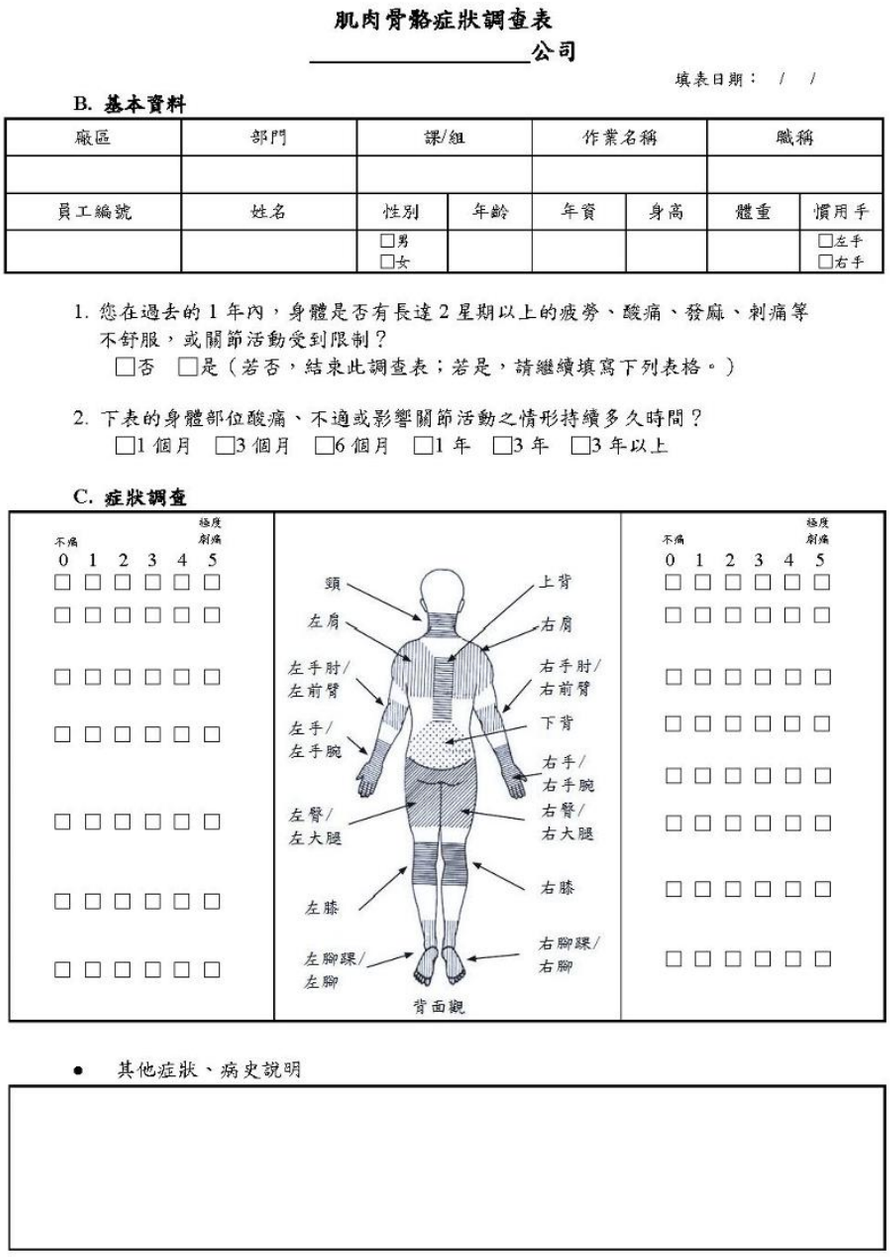
3：劇痛，關節活動只有正常人的一半，會影響工作；

4：非常劇痛，關節活動只有正常人的1/4，影響自主活動能力；

5：極度劇痛，身體完全無法自主活動。

B.基本資料：包含公司廠（場）區、部門、課/組、作業名稱、職稱、員工編號、姓名、性別、年齡、年資、身高、體重及慣用手等。

C.症狀調查：包含上背、下背、頸、肩、手肘/前臂、手/手腕、臀/大腿、膝及腳踝/腳等左右共 15 個部位的評分，以及其他症狀、病史說明。



肌肉骨骼症狀調查表

_____公司

填表日期： / /

B. 基本資料

廠區	部門	課/組		作業名稱		職稱	
員工編號	姓名	性別	年齡	年資	身高	體重	慣用手
		□男 □女					□左手 □右手

1. 您在過去的 1 年內，身體是否有長達 2 星期以上的疲勞、酸痛、發麻、刺痛等不舒服，或關節活動受到限制？
   □否 □是（若否，結束此調查表；若是，請繼續填寫下列表格。）

2. 下表的身體部位酸痛、不適或影響關節活動之情形持續多久時間？
   □1 個月 □3 個月 □6 個月 □1 年 □3 年 □3 年以上

C. 症狀調查

不痛 0	1	2	3	4	極度劇痛 5		不痛 0	1	2	3	4	極度劇痛 5
□	□	□	□	□	□	頸	□	□	□	□	□	□
□	□	□	□	□	□	左肩	□	□	□	□	□	□
□	□	□	□	□	□	左手肘/左前臂	□	□	□	□	□	□
□	□	□	□	□	□	左手/左手腕	□	□	□	□	□	□
□	□	□	□	□	□	左臀/左大腿	□	□	□	□	□	□
□	□	□	□	□	□	左膝	□	□	□	□	□	□
□	□	□	□	□	□	左腳踝/左腳	□	□	□	□	□	□

- 其他症狀、病史說明

圖 1　勞工自覺「肌肉骨骼症狀調查表」樣張

三、異常工作過負荷評估（台灣地區勞動部門職業安全衛生機關，2019）

預防輪班、夜間工作、長時間工作等異常工作負荷促發疾病，應妥為規劃之內容包含：

高風險群之辨識及評估、醫師面談及健康指導、工作時間調整或縮短及工作內容更換之措施、健康檢查、管理及促進、成效評估及改善與其他有關安全衛生事項等。

利用過負荷評估問卷或依勞工工作型態（如表 4）評估勞工之每月加班時數、作業環境或工作性質是否兼具有異常溫度環境、噪音、時差、不規律的工作、經常出差的工作及伴隨緊張的工作型態，評估勞工工作負荷程度（表 3）。

表 3　工作負荷程度表

	個人相關過勞分數	工作相關過勞分數	月加班時數	工作型態
低負荷	<50 分：輕微	<45 分：輕微	<45 小時	表三具 0–1 項
中負荷	50–70 分：中等	45–60 分：中等	45–80 小時	表三具 2–3 項
高負荷	>70 分：嚴重	>60 分：嚴重	>80 小時	表三≥4 項

表 4　工作型態評估表

工作型態		說　明
不規律的工作		對預定之工作排程或工作內容經常性變更或無法預估、常屬於事前臨時通知狀況等。例如：工作時間安排，常為前一天或當天才被告知之情況。
經常出差的工作		經常性出差，其具有時差、無法休憩、休息或適當住宿、長距離自行開車或往返兩地而無法恢復疲勞狀況等。
作業環境	異常溫度環境	於低溫、高溫、高溫與低溫間交替、有明顯溫差之環境或場 所間出入等。
	噪　音	於超過 80 分貝的噪音環境暴露。
	時　差	超過 5 小時以上的時差、於不同時差環境變更頻率頻繁等。
伴隨精神緊張的工作		日常工作處於高壓力狀態，如經常負責會威脅自己或他人生命、財產的危險性工作、處理高危險物質、需在一定期間內完成困難工作或處理客戶重大衝突或複雜的勞資紛爭等工作。

四、全民健康保險健康存摺（台灣地區衛生福利部門中央健康保險機關，2018）

「健康存摺」是由台灣地區中央健康保險機關建置的線上系統，主要功能是讓健保保險對象可以查詢個人的就醫資料，包括門診、住院、檢查、復健及醫師處方藥品等資訊，民眾可以了解自己的就醫歷程、過敏史及用藥紀錄，進而提升健康自主性與自我照護能力。

五、聽力檢測

警察、消防、教師及護理等高風險職業，因工作性質可能會暴露於高噪音環境，若長期暴露可能造成聽力損失、心理壓力、睡眠障礙、疲勞及心血管疾病等健康危害。本研究擬運用開發者 Yuichi Sakashita 所設計之「聽力測試&耳齡測試」軟體進行聽力量測，以評估受測者之聽力狀況及耳齡變化，作為噪音暴露健康風險評估與早期異常篩檢之參考依據。

肆、結果與討論

本研究建構之自主健康管理系統實際導入高風險職場後，獲得使用者及管理單位一致肯定，展現良好的實用性與推廣價值。系統可作為高風險職場推動健康促進與職業安全衛生管理的重要工具，有助於提升人員健康、安全及工作效能，其主要特色與應用效益如下：

一、操作便利且容易推廣：

透過 App、Python 與 Google 表單等多元介面，使用者僅需以手機或電腦即可隨時完成健

康量測與心理評估，無需紙本作業，有效提升使用便利性。

二、即時監測與智慧分析：

系統可即時統計、分析及彙整健康資料，協助管理單位掌握整體健康趨勢，並於發現異常時提供預警，作為健康管理與評估之依據。

三、建立長期健康追蹤機制：

完整保存歷史健康檢測紀錄，便於持續追蹤個人及群體健康狀況，及早發現過勞、心理健康及人因不適等潛在風險。

四、強化隱私保護與填答意願：

採用安全的資料蒐集平台，確保個人資料保密性。

五、整合跨專業健康管理資源：

結合健康監測、異常預警、職業醫學及心理諮商等跨專業資源，落實早期發現、早期介入與持續追蹤，提升自主健康管理成效。

伍、參考文獻

［1］李明濱（2024），心情溫度計簡式健康量表（BSRS-5），衛生福利部門，台北市。

［2］台灣地區勞動部門職業安全衛生機關（2014），人因性危害預防計畫指引，初版，職業衛生健康組。

［3］台灣地區勞動部門職業安全衛生機關（2019），異常工作負荷促發疾病預防指引，第二版，勞動部門職業安全衛生機關。

［4］台灣地區衛生福利部門中央健康保險機關（2018），全民健康保險民眾權益手冊，第一版，衛生福利部門中央健康保險機關，台北市。

有機過氧化物常見安全防護盲點與探討

謝明宏[1]，吳家汶[2]，林心妮[2]，李芳均[3]
1. 中台科技大學環境與安全衛生工程系　副教授
2. 中台科技大學環境與安全衛生工程系　助　理
3. 中台科技大學環境與安全衛生工程系　學　生

摘　要：有鑑於台灣地區曾發生多起有機過氧化物爆炸事故，其中以 2023 年有機過氧化物 C40-P 架橋劑爆炸及起火燃燒事件最為嚴重，造成 10 人死亡、111 人受傷。此案不但震驚國際，也凸顯有機過氧化物安全管理之重要性，促使台灣地區更加重視相關作業風險管控與預防措施。

有機過氧化物具有不穩定之特性，且受熱後容易斷鍵分解成自由基產生反應。綜整多起事故案例分析結果，常見安全管理缺失包括：1. 普遍業者皆無法提出有機過氧化物失控反應特性。2. 安全資料表（SDS）未提供足夠之火災爆炸安全資訊。3. 缺乏明確且制度化之檢查與管理機制。4. 作業人員教育訓練不足。5. 未進行失控反應情境與其可能引發之爆炸危害特性進行模擬分析。6. 緊急應變機制並沒有專人審視其合宜性與準確性。

期許本研究能建立有機過氧化物之完整危害辨識與風險評估架構，強化其製造及使用過程之安全管理機制與防護，以提升業者對高風險物質之管控能力，降低非預期反應與重大災害發生之可能性，進而降低有機過氧化物相關災害風險，提升整體安全管理成效。

關鍵詞：有機過氧化物，安全防護，危害辨識

壹、前　言

有機過氧化物具有高度熱不穩定性，其分子結構中特有的過氧鍵（-0-0-）極易在受熱後斷鍵分解釋放自由基，進而引發劇烈的自催化放熱連鎖反應。若缺乏嚴格的環境控管，易造成不可逆的熱失控，釀成毀滅性的大規模災害。

而有機過氧化物（Organic peroxide），簡易結構為 R1OOR2（R1 與 R2 為相異或相同之有機官能基），其分類包括過氧化二烷基類（Dialkyl peroxides）、過氧化氫類（Hydroperoxides）、過氧化二碳酸類（Peroxydicarbonates）、過氧化酯類（Peroxesters）、過氧化酮類（Ketone Peroxides）、過氧化縮酮類（Peroxyketals）、過氧化烷基碳酸類（AlkylperoxyCarbonates）等，不同之分類決定其熱安定性之不同。而有機過氧化物之所以能廣泛應用即因其受熱後易斷鍵分解成自由基以進行起始聚合作用。

一般造成製程反應失控的原因種類相當多，可以將其概分為人為因素、設備因素、環境因素，以及其他等，根據事故統計資料及有關研究顯示，其中人為因素所佔比例最高。各因素發生原因分述如下（吳鴻鈞、張日誠：2011）

（一）人為因素：多屬於不安全的動作或行為。

（二）設備因素：發生化學災害比例最高者為管線及附屬設備，其次為儲槽。

（三）環境因素：包括外界氣候、溫度、

溼度等影響所造成之災害，以及不充分或不適當的照明、通風、以及機器設備佈置不當等不安全的環境因素。

（四）原物料因素：基本的危害物質特性與過氧化物所引發的意外，如化合物進行放熱分解反應時產生了氧氣、水引發溫度上升、氧氣釋放時引起壓力上升、有機物質混合產生爆炸混合物及還原劑所引發的自發性失控反應、具大量氧氣的環境等物料儲存問題。

然有機過氧化物若引發強烈的非預期反應，如熱分解與不相容性物質污染等，導致大量放熱或產生氣體而使壓力增加，造成反應器或儲槽可能產生火災或爆炸等失控反應現象，一旦發生便會造成嚴重之人員傷亡之潛在危害，下列為蒐集之台灣地區及國外過氧化物之火災爆炸案例。

表 1　台灣地區及國外過氧化物之火災爆炸案例

時間	地點	涉及化學品	傷亡	事故主因
1996/10	桃園縣	過氧化丁酮	10 死、20 重傷、上百輕傷	過氧化酮反應器失控，灌水降溫時引發二次爆炸
2007/08	桃園縣	過氧化物	6 輕傷	堆積過氧化物化學原料起火爆炸，波及 1 公里外
2009/06	彰化縣	二–叔丁基過氧化異丙苯（無味架橋劑 BIBP，有機過氧化物）	無人傷亡	滴酸合成反應失控，溫度異常上升引發爆炸
2015/08	高雄市	過氧化物	1 人重傷	烘乾過程出錯導致起火，囤積 45 噸成品付之一炬
2023/09	屏東縣	1，1–二–叔丁基過氧化環己烷	10 死、111 傷	高爾夫球生產線堆放過氧化物架橋劑、粉塵等引燃
2024/05	印度	過氧化甲基乙基酮	至少 10 死、68 傷	鍋爐爆炸炸毀郊區廠房
2024/07	台南市	有機過氧化物	無人傷亡	燒毀 1343 公噸易燃液體及有機過氧化物
2025/09	桃園市	三過氧化三丙酮（TATP/撒旦之母）	1 死	異丙醇長期存放自氧化生成 TATP，清理結晶時遭觸發爆炸

若不知引發有機過氧化物熱危害之特性，如何採取實際有效之防範措施呢?又如何避免製造、儲存及使用過程中可能因溫度控制不當、污染、混入異物或操作管理缺失等因素，引發火災爆炸事故。

基此建立完善之有機過氧化物安全防護措施至關重要，透過掌握其熱分解特性及危害條件，落實適當之儲存管理、溫度監控、降溫措施及消防設備等，方能有效降低熱失控及災害發生風險，確保作業人員安全並提升整體製程安全管理效能。

貳、研究方法

一、蒐集台灣地區與其他國家有機過氧化物之相關資料

為提升有機過氧化物製程安全管理，多方面蒐集與分析台灣地區與其他國家相關作業資訊、火災爆炸案例、危害預防文獻、法規及製程安全規範（如 NFPA 400 等），以作為危害評估與安全防護措施建立之參考。

二、有機過氧化物作業現場訪視與輔導

選定合作廠商之時，除合作業者之意願外，亦將請業者提供製程中化學品之安全資料表、作業流程圖、工廠配置圖、安全管理系統、以往之事故紀錄與調查、有機過氧化物失控數據，以充分瞭解其製程安全資訊。

三、有機過氧化物作業場所防護之現況與探究

針對台灣地區目前有機過氧化物作業場所之安全防範設置及現況（包括儲存及處理、通風換氣、溫度監控機制、降溫機制及其他火災爆炸防制方法等）進行分析，來探討目前業者

現有防止火災爆炸設施之適當性。

四、有機過氧化物常見安全防護改善對策

本研究將針對有機過氧化物之安全防護措施進行系統性分析，透過蒐集台灣地區與其他國家相關法規、標準規範、火災爆炸事故案例及危害預防文獻，掌握有機過氧化物之熱分解特性、危害因子及事故發生原因。並依據其製程、儲存及使用特性，分析常見安全管理缺失盲點，並針對不足處給予改善對策，以降低熱失控、火災及爆炸事故發生風險。

參、結果與討論

一、現場防護之現況與探究–情境一

（一）現況說明

該冷凍櫃為正壓設置，設置有 2 台冷凍機（一台啟動，另一台為備用），且各儲櫃設有多個溫度監控（現場 TG 兩個，TI 兩個且訊號直接回饋至中央監控系統，最後一個 TI 直接插入過氧化物中），冷凍庫溫度連線至 DCS 監控（異常時會警報），冷凍櫃四周無東西且設有防爆牆，每月定期測試與保養。

（二）問題探究

1．雖然現場設置多個溫度監控，看似有好幾道防護，但卻未探討在塞滿冷凍櫃情況下，現有溫度監測之有效性，一旦發生為熱爆炸現有防阻措施之有效性以及其可能波及之範圍。

2．另若在冷凍環境正常之條件下，發生有機過氧化物自加速分解情境（如雜質或其他因素誘發之 SADT），此時僅剩 TI 直接插入過氧化物中為有效溫度監控防護（其他四個環境溫度監控在此情境下則為無效之防護，然若沒插對過氧化物儲瓶，此為無效之防護）。

二、現場防護之現況與探究–情境二

（一）現況說明

1．溫控倉庫製冷機組均以一備一載規畫設置，藉由主機與備機輪替或互為備援，降低單一設備故障所造成之溫度異常風險。

2．本系統設有三重溫度監控機制，分別配置於現場操作區、警衛室監控端及遠端監測平台，以強化溫度異常之即時偵測與多點監控能力。

3．守衛室及辦公區域之溫度異常警報系統與冷凍機組控制系統同步整合，當溫度超出設定範圍時，可即時觸發異常警示，並聯動冷凍設備啟動或調節，以確保儲存環境之溫度穩定與安全。

4．配置備用燃油儲存槽，可提供全廠區正常用電 24 小時。系統整合 ATS（自動轉換開關）模組，當偵測到用電異常或斷電訊號時，能於 10 秒內自動啟動發電。

5．倉儲設施採分離設計原則，與鄰近倉庫保持安全間距，倉庫內部電氣設備全面採用防爆型規格。

（二）問題探究

1．該業者現場已設置防爆牆、防爆電氣、安全距離、溫度監控系統（3 道）及製冷機組（一備一載），但該系統僅針對環境溫度進行監測，若遇有雜質或其他因素干擾使過氧化物異常時，環境溫度無法偵測出異常。

2．另，儲存之有機過氧化物種類及性質會不定期變更，惟安全防護措施未能配合其危害特性進行檢討與調整。

三、現場防護之現況與探究–情境三

（一）現況說明

現場有機過氧化物冷凍儲存設施及室內儲存區直接規劃於製程作業區內，儲存區僅配置一台數位溫度計及一組環境溫度感測器，並將監測訊號傳輸至警衛室進行監控。儲存物料採堆疊方式放置，但未限制堆疊高度，而現場設置集液溝導引洩漏液體。另僅設置單一冷凍機作為冷卻設備，未具備冷凍設備備援機制，且未設有備用電源或發電機。

（二）問題探究

1．將儲存有機過氧化物之冷凍櫃及儲存室

直接設置於製程操作區域內，未依規定設置安全防護設計。

2．儲區內物料若堆疊過高，不僅可能因倒塌造成物料間的摩擦或撞擊而引發火花，亦可能阻礙人員通行及緊急避難動線。

3．該系統僅針對環境溫度進行監測，若遇有雜質或其他因素干擾使過氧化物異常時，環境溫度無法偵測出異常。

4．現場安全防護措施不足，僅採單一道防護設計，缺乏多重保護層及備援機制，致整體系統可靠性及作業安全性不足。

肆、結論與建議

一、結論

（一）現場對有機過氧化物之物理化學特性、敏感性與可能引發之危害（如熱失控、爆炸、劇烈分解特性）認知不足。

（二）部份現場已設置溫度監控系統，然該系統僅針對環境溫度進行監測，並未對有機過氧化物之溫度進行監控。

（三）現場部分化學品之危害標示不完整，導致無法正確辨識各化學品的危害特性及分類，可能造成化學品危害風險被高估或低估。

（四）有機過氧化物冷凍櫃溫度僅顯示於警衛室，缺乏現場監控與紀錄將導致無法建立溫度異常趨勢分析、預警通知或自動通報機制，無法提早維修與防範。

（五）訪視過程發現，有業者將 TI 溫度計直接插入物料內部，如溫度計未插對過氧化物之儲瓶，則無法發揮預警功能，屬無效防護。

（六）部分有機過氧化物危險物品倉庫業者存放之危險物品儲存量超出設計容量儲存，導致原有防火、防爆、洩壓或冷卻系統失效，加劇災害後果。

（七）部分廠商將儲存有機過氧化物之冷凍櫃及儲存室直接設置於製程操作區域內，未依照 NFPA400 規定，設置獨立且專門規劃的儲存區及設置防爆牆或防火分隔設施。

（八）儲區內物料若堆疊過高，不僅可能因倒塌造成物料間的摩擦或撞擊而引發火花，進而導致火災或爆炸，亦可能阻礙人員通行及緊急避難動線，並干擾自動灑水系統覆蓋範圍，使其滅火效能下降，對整體儲存安全構成重大風險。

二、建議

（一）建議強化同仁教育訓練，如化學品危害特性、儲存與操作要求、不相容物管理，並透過案例演練提升人員風險意識與情境判斷能力，以確保作業安全。

（二）在容器、包件或儲放設備上安裝可直接量測物質本體溫度的溫度感測器，以避免僅依賴環境溫度造成偵測盲區，並建議配置至少兩組獨立感測器，相互比對訊號，以提高可靠度。

（三）現場雖設置集液溝導引洩漏液體，惟其可能造成危害範圍擴大，建議將儲存化學品改置於具防漏功能之棧板上，以有效限制洩漏範圍。

（四）有機過氧化物熱失控反應的關鍵機制為溫度控制，為了避免異常或停電，現場應設置備用電源或發電機。

（五）建置異常偵測與警報機制感測系統應具備異常溫度警報功能，包含視覺與聲響警示，並可連動通知監控中心或負責人員，當物質溫度接近控制溫度時，自動啟動警戒程序。

（六）應設置獨立且專用的儲存區，將冷凍櫃及儲存室移至與製程操作區域分隔的安全空間，且儲存區規劃應符合 NFPA 400 規定，確保明確的動線與足夠的安全距離。

（七）儲區內物料堆疊應符合安全高度限制，並依據相關規範或設備承載能力，合理配置堆放高度與防震措施。

（八）現場製程除應進行初步危害分析及

危害與可操作性分析外，亦須進一步進行保護層分析（LOPA）；其相關防護系統之失誤率（PFD）應控制在 10^{-5} 到 10^{-6} 等級以下，以全面提升系統可靠性與作業安全。

（九）未來建議業者應建置動態風險評估（DRA）機制，如時間序列監測、動態模擬或即時風險預警機制，提升製程安全評估之完整性與前瞻性。

伍　參考文獻

［1］ 吳鴻鈞、張日誠, 過氧化物類架橋劑批式反應製程失控危害預防研究, 2011, 勞動部門勞動及職業安全衛生研究所

算法管理下劳动者心理压力研究

牛恩阳，张　蒙，邬姗姗，李克梅
中钢集团武汉安全环保研究院　武汉　430081

摘　要：数字经济时代，算法管理凭借高效的数据处理与精准的流程管控能力，已成为平台经济及各类企业核心管理范式，广泛应用于任务分配、绩效考评、劳动监控等关键环节。然而，算法“效率至上”的刚性逻辑与无间断的全景式监控，打破了传统劳动关系平衡，催生劳动者新型心理压力问题。本文以平台骑手、快递员、外卖配送员等典型群体为研究对象，基于工作要求-资源模型、相对剥夺感理论，剖析算法管理下劳动者心理压力的核心表现、生成机制及负面影响，从平台治理、政府监管、个体赋能三个维度，构建系统性干预策略。研究旨在平衡算法效率与劳动者心理健康权益，推动算法管理向“技术向善”转型，为新业态下劳动关系和谐发展提供理论参考与实践路径。

关键词：算法管理；劳动者；心理压力；情绪耗竭

一、引言

大数据与人工智能技术向各行业渗透，算法管理重构了传统劳动组织模式，成为数字经济时代劳动管控的核心工具，互联网平台企业依靠算法对劳动过程实现全流程管控，通过追求极致运行效率帮企业压缩成本、提升收益，目前我国平台灵活就业人员已超 8400 万，算法管理覆盖超九成平台用工场景，是新就业形态劳动者身边的“隐形管理者”[1]。算法管理在提升劳动效率、降低企业管理成本的同时，技术异化问题也逐渐凸显，它把劳动者简化为数据节点，用刚性量化指标替代人性化管理，通过不间断监控压缩劳动者自主空间，让劳动者长期处于高压焦虑、缺乏掌控感的负面状态，近年来各类相关极端事件和劳动者心理问题频繁引发社会关注，凸显出问题的严峻性，在此背景下，研究算法管理下劳动者心理压力的形成机理、构建干预疏导体系，是保障劳动者权益、推动平台经济健康发展的迫切需求。

本文选取平台骑手、快递员等平台灵活就业群体为研究对象，依托工作要求-资源模型、相对剥夺感理论展开研究。工作要求-资源模型认为工作环境分为工作要求与工作资源两类，工作要求会消耗个体身心资源，比如高强度任务、严苛考核、不间断监控，工作资源可以缓解损耗、推动工作，比如工作自主性、社会支持、合理报酬，算法管理模式下，工作要求被过度强化，工作资源被不断削弱，二者失衡会过度消耗心理资源，引发心理压力累积[2]。相对剥夺感是个体和参照群体对比后，感知自身利益受损、遭遇不公产生的负面感受[3]。在算法管理中，劳动者会将自身情况和平台、用户对比，平台获得大部分收益还规避用工责任，用户握有评价权却不用为不实差评负责，只有劳动者承担高强度劳动和各类风险，这种落差会催生强烈的相对剥夺感，进一步加重心理压力与负面情绪[4]。

二、算法管理下劳动者心理压力的核心表现

（一）焦虑与抑郁情绪常态化

算法压缩时效并即时惩罚，让劳动者长期

陷入“超时恐慌”。外卖骑手需在算法规定的极短时间完成配送，遇到特殊情况超时风险大幅提升，超时会直接扣减收入；快递员日均派送量大，单票收入低，出现投诉丢件还要承担赔偿或罚款，收入极不稳定。长期的不确定性和经济压力，让劳动者普遍持续焦虑，严重的还会产生抑郁情绪，对工作生活失去信心[5]。

（二）失控感与无意义感强烈

算法管理剥夺了劳动者的自主权，劳动者只能被动执行算法指令，工作安排全由算法决定，自身没有决策权。算法将劳动者简化为数据节点，把劳动拆解为量化指标，完全忽视劳动者的经验、技能与情感，将劳动价值工具化、物化。长期处于这种状态，会让劳动者产生强烈的失控感与无意义感，降低工作积极性，加剧心理内耗[6]。

（三）情绪耗竭与职业倦怠高发

算法管理下，劳动者需要应对双重情绪劳动：一方面要满足算法的效率要求，维持高强度工作；另一方面要应对用户的评价压力，压抑自身负面情绪，保持礼貌态度。长期的情绪压抑、负面反馈加上高强度劳动，会过度消耗情绪资源，引发情绪耗竭，具体表现为情绪麻木、身心疲惫、不愿社交，对工作失去热情甚至产生厌恶，最终出现职业倦怠[7]。

（四）孤独感与社会隔离突出

算法管理带有去人际化特征，会让劳动者陷入孤立状态。传统职场的协作沟通、情感交流都被算法替代，劳动者独自对接系统和用户，缺乏同伴支持和倾诉渠道；同时平台通过算法分散劳动者，避免他们聚集形成利益共同体，使得劳动者间竞争多于合作，难以建立互助关系。长期孤立工作会让劳动者孤独感加剧，社交圈狭窄，负面情绪无处排解，进一步加重心理压力。

三、算法管理下劳动者心理压力的生成机制

（一）算法刚性管控

全景式监控，相关算法通过 GPS 定位、行程追踪、订单记录、语音监听等技术，实现对劳动者 24 小时不间断监控，让劳动过程完全透明化，劳动者没有任何隐私空间[8]。

严苛化考核，算法考核呈现出单一化、极致化、非人性化的特征，核心指标仅围绕效率展开，包括准时率、接单量、好评率，完全忽视劳动者的生理极限与现实场景的复杂性。

黑箱化运作，算法规则存在高度不透明性，也就是所谓的“算法黑箱”：劳动者无法知晓订单分配、时效设定、奖惩计算背后的核心逻辑，只能被动接受最终结果[9]。

（二）平台责任缺失

责任转嫁，平台通过算法设计与用工协议，将经营风险、管理责任、法律义务全部转嫁给劳动者[10]。平台将劳动者包装为“个体工商户”或“合作方”，规避劳动关系认定，无需承担社保、医保、工伤保险等法定责任，也无需提供劳动保护、休息保障、心理支持等福利。

情感漠视，平台秉持效率至上、技术中立的理念，将劳动者视为数据工具，完全忽视其心理需求与情感感受。算法设计仅关注效率提升，未设置任何心理关怀、情绪疏导、压力缓解机制[11]。

（三）个体资源匮乏

心理韧性不足，平台劳动者多为新生代农民工、灵活就业人员，教育水平偏低、心理韧性不足，缺乏专业的情绪管理与压力调节能力。面对算法高压、差评投诉、收入波动时，难以有效调节负面情绪，容易陷入焦虑、抑郁、失控感中，心理压力感知更强烈。同时，劳动者普遍缺乏心理健康知识，无法识别自身心理问题，也不知道如何寻求帮助，导致小压力演变为大问题。

社会支持薄弱，算法管理的去人际化特征，导致劳动者社会支持网络薄弱：同事关系

疏离、上下级沟通缺失、家庭支持不足。劳动者工作时间长、强度大，陪伴家人时间少，家庭情感支撑弱化；工作中缺乏同伴互助，遇到困难只能独自面对；遇到心理困扰时，无专业心理咨询渠道，也无信任的人倾诉，负面情绪不断积压，心理压力持续加重。

四、算法管理下劳动者心理压力的负面影响

（一）个体层面

长期心理压力直接损害劳动者身心健康：生理上，引发失眠、头痛、高血压、心血管疾病等躯体问题，高强度工作叠加心理压力，导致过劳肥、免疫力下降，甚至引发猝死；心理上，焦虑、抑郁、情绪耗竭、职业倦怠等问题频发，严重者产生自杀念头，威胁生命安全。同时，心理压力导致劳动者工作效率下降、注意力不集中，易引发交通事故、配送失误等安全事故；负面情绪还会影响家庭关系，导致夫妻矛盾、亲子隔阂，生活质量大幅下降。

（二）组织层面

心理压力过大会显著降低劳动者工作积极性与效率：情绪耗竭导致工作动力不足、服务态度变差，差评率上升；焦虑、分心导致订单出错、配送超时，工作质量下降。同时，长期心理压力导致离职率居高不下，高离职率增加平台招聘、培训成本，影响服务稳定性与品牌形象，制约平台长期发展。

（三）社会层面

算法管理下劳动者心理压力的蔓延，加剧了劳动关系失衡：平台资本强势、劳动者弱势，剥削与被剥削的对立关系凸显，劳资矛盾频发。近年来，外卖骑手罢工、快递员维权、平台劳动纠纷等事件逐年增多，核心导火索均是算法高压、权益受损、心理压力过大。同时，劳动者心理问题频发，增加社会医疗负担；极端事件（如自杀、暴力维权）引发社会恐慌，破坏社会和谐稳定，影响数字经济健康发展。

五、算法管理下劳动者心理压力的干预策略

（一）平台层面

1．算法伦理重构

平台要摒弃“效率至上”单一逻辑，构建多元算法目标函数，首先要在保护商业机密的前提下公开核心算法规则，建立解释机制提升透明度，其次要优化考核指标，引入多维度指标避免“唯数据论”，此外要设置弹性机制，特殊情况自动延长时效并豁免超时罚款，最后要内置休息机制，自动监测工作时长并推送休息提示，保障休息权。

2．完善心理支持

平台要将心理健康纳入管理体系，构建全链条心理支持体系，首先要在线上嵌入心理关怀模块，设置多种心理服务相关工具通道，其次要在线下设立心灵关爱站点，提供休憩和心理辅导相关服务，此外要引入 EAP 员工援助计划，联合专业机构提供一对一心理相关服务，提升心理韧性，最后要加强人文沟通，建立劳动者参与机制，邀请一线代表参与相关设计优化，倾听诉求。

3．规范用工管理

平台要摒弃“责任转嫁”模式，依法规范用工，从根源减少压力诱因，首先要明确劳动关系，区分全职和兼职，分别依法签订合同协议，保障对应权益，其次要优化薪酬体系，提高基础单价降低罚款比例，增设奖项提升收入稳定性，同时建立罚款申诉机制，可撤销不合理处罚，最后要改善工作条件，提供必要劳动保护用品，优化 APP 设计简化操作，减少认知负担。

（二）政府层面

1．完善法律法规

政府需要加快新业态劳动立法，填补算法管理、灵活用工领域的监管空白。首先出台算法管理专项法规，明确算法相关标准与禁止规则，禁止违规算法行为；其次修订劳动保障相

关法律，将平台灵活就业人员纳入保障范围，明确平台相关法定责任；最后建立算法伦理审查机制，由多部门组成审查委员会评估平台算法的心理健康影响，责令不合规算法整改，从源头遏制“算法暴政”。

2．健全监管机制

政府需要构建常态化多维度监管体系，加强对平台算法管理和用工行为的监督检查。首先建立劳动强度监测机制，监测劳动者相关工作数据，将多项指标纳入监管并定期公示，对违规平台责令整改并罚款；其次畅通维权渠道，设立新业态劳动纠纷一站式调解中心，简化仲裁流程，降低维权成本；最后加强联合执法，多部门联合开展专项整治，严厉打击平台各类违法行为，形成监管震慑。

3．完善公共服务

政府需要将平台劳动者心理健康纳入公共服务体系，加大资源投入，提升帮扶能力。首先构建基层心理健康服务网络，在多地设立心理咨询站点，配备专业人员，为平台劳动者提供免费相关心理服务；其次加强心理健康宣传教育，通过多种形式普及知识，提升劳动者调节能力，引导劳动者关注自身状态主动求助；最后加大社会保障支持，针对灵活就业人员推出弹性社保缴纳方案，降低缴费门槛，扩大相关保险覆盖范围，减轻劳动者顾虑。

（三）个体层面

1．强化心理健康认知，提升情绪管理能力

劳动者要主动学习心理健康知识，增强心理调适能力，积极应对算法高压，一是学习正念冥想、深呼吸等压力调节技巧；二是学会识别自身情绪，及时疏导负面情绪，提升情绪管理能力；三是树立正确工作认知，理性看待算法考核与收入波动，不将工作结果等同于个人价值，避免自我否定，保持积极心态。

2．增强权益保护意识，主动维护合法权益

劳动者要主动学习劳动法律法规，增强维权意识，学会用法律保护自身权益，一是认真阅读用工协议和算法规则，明确自身权利义务，了解相关法律，知晓社保、休假、薪酬等法定权益；二是注意留存工作相关证据，权益受损时先和平台沟通申诉，无果后可向相关部门投诉申请仲裁，或寻求其他帮助，依法理性维权；三是积极加入劳动者相关互助组织，互帮互助，共享信息经验，增强话语权与抗风险能力。

六、结论与展望

本文以算法管理下的劳动者心理压力为研究对象，基于工作要求–资源模型、相对剥夺感理论研究劳动者心理压力。算法管理下劳动者心理压力呈现焦虑抑郁常态化、失控无意义感强烈、情绪耗竭职业倦怠高发、孤独感社会隔离突出四大核心表现。算法刚性管控是心理压力的直接源头，平台责任缺失是重要推手，个体资源匮乏是内在诱因，三者相互作用，形成“算法压迫—资源损耗—压力加剧”的恶性循环。

心理压力的负面影响覆盖个体、组织、社会三个层面：个体身心健康受损、生活质量下降；组织工作效率降低、离职率攀升；社会劳动关系失衡、矛盾加剧，制约平台经济健康发展与社会和谐稳定。缓解劳动者心理压力需构建平台、政府、个体三维协同干预体系：平台优化算法设计、履行人文责任；政府强化监管约束、健全保障体系；个体提升心理韧性、增强自我保护能力，多维度发力平衡算法效率与劳动者权益，推动算法向善。

本文虽对算法管理下劳动者心理压力问题进行了系统性研究，但仍存在一定局限性：一是研究对象以平台骑手、快递员为主，对传统企业算法转型、远程办公、AI 训练师等群体的心理压力问题关注不足；二是研究方法以文献研究与案例分析为主，缺乏大样本实证数据支撑，后续可开展问卷调查、深度访谈、定量分

析，进一步验证研究结论；三是干预策略的落地效果有待长期实践检验，后续可跟踪平台算法优化、政府监管政策实施后的劳动者心理压力变化，持续完善干预体系。

未来，随着算法技术的不断迭代与平台经济的持续发展，劳动者心理压力问题将更趋复杂，需学界、业界、政府持续关注，深入探究算法伦理、劳动关系、心理健康的协同发展路径，真正实现算法为人类服务、技术有温度、劳动有尊严的美好愿景。

参考文献

［1］ DUPUIS M. Algorithmic management and control at work in a manufacturing sector：workplace regime , union power and shopfloor conflict over digitalisation ［J］. New Technology, Work and Employment, 2025, 40（1）：81–101.

［2］ 林彦梅, 刘洪, 王三银. 算法控制对平台工作者服务偏差行为的影响机理—基于工作要求–资源模型的解释［J］. 经济管理, 2024（8）：173–185.

［3］ 熊猛, 叶一舵. 相对剥夺感：概念、测量、影响因素及作用. . 心理科学进展, 2016, 24（3）：438–453.

［4］ 苏晓艳, 詹小慧. 在线劳动平台算法管理对劳动者工作绩效的影响研究—基于工作要求–资源模型［J］. 企业经济, 2024（5）：57–64.

［5］ 冯向楠, 詹婧. 人工智能时代互联网平台劳动过程研究––以平台外卖骑手为例［J］. 社会发展研究, 2019,（3）：61–83.

［6］ 陈龙. “数字控制”下的劳动秩序：外卖骑手的劳动控制研究, 社会学研究, 2020, 35（6）：113–135.

［7］ 沈锦浩 . 双重不确定性与外卖骑手的情感劳动—基于上海市的田野调查［J］. 北京：青年研究, 2022（2）：14–25.

［8］ GRIESBACH K, REICH A, ELLIOTT–NEGRI L, et al. Aleorith–mic control in platform food delivery work, Socius, 2019（5）：1–15.

［9］ 罗瑾琏, 张超, 赵陈芳, 等. 感知算法控制对零工工作者工作投入的“双刃剑”效应研究［J］. 管理评论, 2025, 37（2）：175–186.

［10］ 田野. 平台外包经营中的用工责任分配—基于“算法管理”的“相应责任”厘定［J］. 政治与法律, 2022（8）：16–32.

［11］ 罗映宇, 朱国玮, 钱无忌, 等. 人工智能时代的算法厌恶：研究框架与未来展望. 管理世界, 2023, 39（10）：205–233.

湖北省非煤矿山企业职业健康管理现状调研

朱灿松，张志勇，华超　，陈　强，张　丽，郭　旭，林坤峰
中钢集团武汉安全环保研究院　武汉　430081

摘　要：目的　了解湖北省非煤矿山及相关企业职业健康管理现状，分析优势环节和薄弱环节，提出改进建议。**方法**　2025 年 9—10 月在湖北省非煤矿山企业人员职业健康培训中开展匿名问卷调查，共获得有效问卷 382 份。问卷按领导承诺、风险管理、运行控制、员工参与和持续改进 5 个方面设置，每题按 1～4 分赋值，采用描述性统计分析总体、各方面和条目得分。**结果**　平均条目分为（3.16±0.51）分，5 个方面得分由高到低为运行控制（3.24±0.55）、员工参与（3.22±0.58）、持续改进（3.15±0.58）、领导承诺（3.10±0.54）和风险管理（3.09±0.62）。**结论**　样本企业已具备一定的职业健康管理基础，现场控制和员工参与相对较好，但风险识别、责任考核、个体防护用品精细化管理和健康文化建设仍需加强。建议企业完善全过程危害识别，压实管理责任，规范防护用品选配使用，并把健康促进和持续改进纳入日常管理。

关键词：非煤矿山；职业健康管理；问卷调查；风险管理；健康企业

1　引　言

非煤矿山开采、破碎、运输和辅助作业中常见粉尘、噪声、高温等职业病危害，作业条件、设备状态和人员流动又使危害更具动态性。职业健康管理除职业病危害检测、职业健康检查和个体防护外，还涉及管理层履责、危害识别、现场控制、员工参与和整改改进等环节。任何一处衔接不足，都可能影响防护措施的针对性和持续性。

近年来，健康企业建设和职业健康保护行动对用人单位提出了更系统的要求［1–3］。了解企业不同管理环节的实际表现，有助于确定培训指导和企业整改的重点。本研究利用 2025 年湖北省非煤矿山企业人员职业健康培训期间的问卷资料，从领导承诺、风险管理、运行控制、员工参与和持续改进 5 个方面分析职业健康管理现状，并针对得分较低的环节提出改进建议。

2　对象与方法

2.1　调查对象

2025 年 9—10 月，在湖北省非煤矿山企业人员职业健康培训中开展匿名线上问卷调查。调查对象包括矿山及相关企业主要负责人、职业健康分管负责人、部门管理人员、职业健康专兼职管理人员和一线员工。剔除关键题项缺失或明显无效答卷后，共获得有效问卷 382 份。

2.2　调查内容

问卷包括填表人职位、企业规模、企业性质、矿产类型和职业健康相关工作年限等 5 项背景信息，以及 20 个职业健康管理条目。条目结合非煤矿山职业健康管理工作设置具体情景，每题设 A～D 四个选项，按管理措施由基础到较为完整分别赋 1～4 分，得分越高表示受访者所评价的管理措施越完善。20 个条目分为领导承诺、风险管理、运行控制、员工参与和持

续改进 5 个方面，每个方面包含 4 个条目。

2.3 统计分析

采用描述性统计方法分析问卷资料。分类资料以人数和构成比表示，条目得分、各方面得分和总分以均数 ± 标准差表示。

3 结果

3.1 样本基本情况

382 名受访者中，职业健康专兼职管理员或其他管理岗 182 人（47.6%），职业健康分管负责人或部门经理 110 人（28.8%），企业主要负责人或高层管理者 70 人（18.3%），一线员工 20 人（5.2%）。受访者所在企业规模以 51 ~ 200 人和 50 人以下为主，分别占 33.8%和 30.6%；所在企业中民营企业占 56.8%，国有或国有控股企业占 32.7%；59.2%的受访者来自非金属矿山。

3.2 各管理方面得分

20 个条目总分为（63.19 ± 10.26）分，平均条目分为（3.16 ± 0.51）分。5 个方面的均数均在 3 分以上，其中运行控制得分最高，员工参与次之；风险管理得分最低，领导承诺次低。最高与最低方面相差 0.15 分，表明总体差距不大，但具体条目之间仍存在较明显的不均衡。

表 1　职业健康管理 5 个方面的内容与得分

管理方面	主要内容	均数 ± 标准差
运行控制	危害控制、个体防护、健康检查、承包商管理	3.24 ± 0.55
员工参与	培训、危害告知、建议渠道、反馈处理	3.22 ± 0.58
持续改进	绩效跟踪、异常整改、定期评审、健康促进	3.15 ± 0.58
领导承诺	方针目标、冲突决策、高层参与、绩效考核	3.10 ± 0.54
风险管理	制度职责、危害识别、防范措施	3.09 ± 0.62

3.3 得分较高的管理条目

员工提出改进建议的渠道和氛围得分最高，为（3.34 ± 0.73）分。已识别危害因素防范措施的清晰性、危害控制优先做法和职业病危害信息告知得分同为 3.34 分左右，职业健康检查安排为（3.33 ± 0.58）分。结果表明，样本企业在已知危害的措施落实、法定告知与健康监护以及员工表达渠道等方面基础相对较好。

3.4 得分较低的管理条目

职业病危害因素识别覆盖范围得分最低，为（2.84 ± 0.78）分；健康企业创建或健康达人评选、职业健康绩效纳入考核和个人防护用品管理得分依次为（2.96 ± 0.81）、（2.98 ± 0.76）和（3.01 ± 0.80）分。职业健康方针和目标、制度完整性得分也均为 3.05 分左右。与得分较高条目相比，薄弱环节更多集中在管理前端和长效机制，包括识别是否全面、责任是否进入考核、防护用品管理是否细致以及健康促进是否融入日常工作。

4 讨论与改进建议

4.1 职业健康管理具备一定基础，各环节存在不均衡

从受访者评价看，5 个方面的均数均超过 3 分，说明多数企业已开展职业健康制度建设和日常管理。运行控制、员工参与得分相对较高，职业病危害信息告知、职业健康检查和异常整改等法定要求执行较为稳定。风险管理和领导承诺得分相对较低，提示部分企业的工作重心仍偏向已识别问题的处置，对危害源头识别、目标责任和绩效约束的重视不够。

4.2 完善危害因素识别范围，建立动态管控清单

危害识别是确定检测项目、职业健康检查、个体防护和工程控制的基础［4–6］。企业

应在常规生产岗位之外，将检维修、外包作业等纳入识别范围；按岗位和作业任务建立危害因素清单，记录危害来源、接触人员、接触方式和现有措施。当工艺、设备、原辅材料和作业组织发生变化时及时更新，并将识别结果与检测、告知、防护用品和健康监护相互核对，减少管理盲区。

4.3 强化责任考核机制，细化个体防护用品管理

职业健康绩效纳入考核得分偏低，表明目标、责任和考核之间仍需加强衔接。企业可把危害识别更新率、隐患整改闭环率、职业健康培训完成率、防护用品规范佩戴率等过程指标纳入部门和岗位考核。个人防护用品管理应根据危害因素种类和接触水平进行选配，明确采购验收、发放登记、适合性检查、现场佩戴、维护保管和报废更换要求，避免只发放、不检查佩戴效果。

4.4 积极鼓励员工参与，推动健康促进常态化

员工建议渠道得分较高，但员工反馈落实和健康企业创建活动的得分相对靠后。企业应建立建议受理、分析、处理和反馈的闭环，及时向员工说明采纳情况及改进结果。健康企业建设不宜停留在集中活动或评选，可结合企业主要危害和职工健康需求，将健康知识传播、重点人群健康支持和工作环境改善纳入年度计划，并利用职业健康检查、检测和员工反馈结果持续调整措施［2，7–8］。

4.5 研究局限

本研究样本来自湖北省职业健康培训场景，属于便利抽样，管理人员占比较高，且可能存在同一企业多名人员参加调查的情况。问卷结果为个人评价，尚未与现场审核、职业病危害检测和职业健康监护资料逐项核对。因此，本研究结果主要反映受访者对所在企业管理状况的判断，不宜代表全省所有非煤矿山企业。后续可按企业抽样，并结合现场资料对主要薄弱环节进行验证。

5 结 论

受调查的非煤矿山及相关企业职业健康管理已具备一定基础，运行控制和员工参与相对较好，风险管理和领导承诺相对薄弱。职业病危害因素识别覆盖不足、职业健康绩效考核不充分、个人防护用品管理不细和健康文化建设不深入，是当前需要优先改进的环节。企业应以全面识别危害为起点，完善目标责任和考核，细化现场防护管理，并通过员工反馈和健康促进形成持续改进。

参考文献

［1］ 中共中央，国务院．“健康中国 2030”规划纲要［EB/OL］．2016.

［2］ 全国爱国卫生运动委员会办公室，国家卫生健康委员会，工业和信息化部，等．关于推进健康企业建设的通知：全爱卫办发〔2019〕3 号［EB/OL］．2019.

［3］ 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会．GB/T 45001—2020 职业健康安全管理体系要求及使用指南［S］．北京：中国标准出版社，2020.

［4］ International Council on Mining and Metals. Good practice guidance on occupational health risk assessment［M］. 2nd ed. London：ICMM, 2017.

［5］ 刘磊，李鹏飞．职业健康风险评估方法联合应用研究进展［J］．职业卫生与应急救援，2024，42（4）：551–556.

［6］ 邱奕冰，边寰锋，林佰敏，等．ICMM 评估模型在某金属表面处理企业职业健康风险评估中的应用［J］．职业与健康，2021，37（1）：20–23.

［7］ 李文迪，张鑫，丁新淼，等．模糊层次分析法在健康企业建设效果评估中的探索应用［J］．劳动保护，2025（9）：63–65.

［8］ 虞芷绮，祝连波，王婷婷，等．安全管理成熟度研究现状及发展趋势分析［J］．工程建设，2024，56（4）：1–6.

被重构的焦虑——AI 职场替代焦虑与职业心理健康问题研究进展

张　丽，陈　强，张志勇，朱灿松，冯　柯
中钢集团武汉安全环保研究院　武汉　430081

摘　要：随着人工智能技术在组织中的广泛应用，员工对“被替代”的焦虑日益凸显，成为影响职业心理健康的重要风险因素。本文基于现有实证研究，探讨 AI 职场替代焦虑的概念内涵、形成机制及其对员工心理健康的双刃剑效应。研究发现，替代焦虑主要通过工作不安全感这一认知路径影响员工的主观幸福感与心理幸福感，而个体的 AI 使用焦虑水平在其中起关键的调节作用。值得注意的是，替代焦虑也可能激发员工的工作重塑与主动性行为，呈现出积极应对的可能性。技术替代意识可通过绩效压力引发工作重塑，人工智能应用对员工职场行为呈现双刃剑效应，一方面通过人工智能焦虑引发工作退缩行为，另一方面通过人工智能重塑促进适应性绩效。所以，AI 替代焦虑并非纯粹的消极心理反应，而是可以被重构和转化的职场动力。组织应通过认知干预、技能培训与主管支持，帮助员工建立积极的技术认知框架，将替代焦虑转化为适应性成长的契机。

关键词：AI 替代焦虑；工作不安全感；职业心理健康；工作重塑

一、引　言

人工智能技术的快速发展正在深刻改变职场生态。从智能制造到智能客服，从算法管理到生成式内容创作，AI 的应用边界不断扩展。在这一技术变革浪潮中，员工对“被替代”的焦虑日益凸显，成为影响职业心理健康的重要风险因素。学者们对工作焦虑的界定存在不同视角，部分研究者基于特质论观点，将其视为与员工个性特征相关、对特定工作内容产生担忧或抵触的心理倾向。另有学者从适应功能角度出发，认为这是员工面对工作环境变革或职业发展不确定性时产生的正常反应。值得注意的是，适度的焦虑水平可能具有激励作用，但当焦虑水平超过一定阈值时，员工往往会采取逃避策略，产生一系列负面行为。

本文聚焦于 AI 职场替代焦虑这一核心议题，系统梳理其概念内涵、形成机制及其对员工心理健康的双刃剑效应，以期为组织管理实践提供理论参考。

二、AI 替代焦虑的概念内涵与形成机制

2.1　替代焦虑的概念界定

AI 职场替代焦虑是一个多维度的概念。研究将工作焦虑设定在引入人工智能技术后的情境下，主要指个体考虑自身能力和意愿情况下使用技术时的心理状态，主要包括职业替代焦虑和技术学习焦虑两个方面。职业替代焦虑是员工担心被人工智能替代而引发焦虑，技术学习焦虑指的是个体在接触或尝试掌握人工智能技术过程中，因感知到学习难度而产生的紧张和担忧情绪。

从更广泛的视角来看，技术替代意识是员工对智能技术、人工智能、机器人和算法替代潜力的感知。AI 使用焦虑则被定义为员工对在工作中实际使用 AI 所产生的紧张和恐惧情绪，反映了个体对技术创新的普遍倾向。

2.2 形成机制：从替代风险到工作不安全感

AI 替代焦虑的形成并非简单的环境刺激反应，而是一个涉及认知评价的复杂过程。职业替代风险对员工的离职意愿具有显著正向影响，且工作不安全感在其中起中介作用[1]。组织 AI 采纳通过工作不安全感间接影响员工的主观幸福感和心理幸福感[2]。

个体的 AI 使用焦虑水平在这一过程中起关键的调节作用。组织 AI 采纳对工作不安全感的作用取决于 AI 使用焦虑的调节作用。对于 AI 使用焦虑水平较高的员工，组织 AI 采纳显著增加工作不安全感；而对于 AI 使用焦虑水平较低的员工，组织 AI 采纳反而降低工作不安全感[2]。这一调节效应的发现解释了为何同样的技术变革对不同的员工会产生截然不同的心理后果。

从社会认知理论的视角来看，外部环境对个体的影响高度依赖于个体的认知评价。面对组织 AI 的引入，员工可能发展出替代恐惧或增强期望，这取决于他们对技术的认知评价。员工在初级评估中对 AI 威胁工作稳定性的评估是一种阻碍性评价，因此与消极结果有更多联系；而对 AI 是否有助于工作成功的评估是一种挑战性评价，因此与积极结果相关。

2.3 技术焦虑的多重表征

在具体职业群体中，AI 技术焦虑呈现出多样化的表征形式。对于高校教师而言，ChatGPT 类智能技术带来的技术焦虑表现为对技术取代的担忧、对技术学习的无助感以及对新的技术环境下人机关系产生的困惑等多重表征[3]。这种焦虑不仅源于技术本身的复杂性，也源于技术对传统职业角色的冲击。

三、替代焦虑对心理健康的双刃剑效应

3.1 消极路径：焦虑与幸福感损害

替代焦虑对员工心理健康的消极影响主要通过工作不安全感这一认知路径传递。研究发现，工作焦虑对职场偏差行为具有显著正向影响，即随着工作焦虑增高，职场偏差行为增多[4]。工作焦虑在人工智能引入与职场偏差行为之间起完全中介作用。

组织 AI 采纳通过增加工作不安全感进而损害员工的主观幸福感和心理幸福感。对于高 AI 使用焦虑的员工，组织 AI 采纳会通过增加工作不安全感来降低幸福感[2]。相关工作焦虑的研究也表明，过度焦虑会使员工表现出情绪困扰，导致注意力被分散，影响其职业满意度和组织承诺，产生请假、早退等工作回避行为。

在行为层面，人工智能应用可能通过人工智能焦虑引发员工的工作退缩行为[5]。工作焦虑作为一种负面心理状态，会显著消耗个体的自我调节资源，削弱其行为控制能力。当员工感到受威胁时，他们的专业知识被不断发展的技术进步所侵蚀，从而经历高度焦虑、悲伤和沮丧，进而引发严重的工作焦虑。

3.2 积极路径：焦虑与工作重塑

值得注意的是，替代焦虑也可能激发员工的积极应对行为。技术替代意识可通过绩效压力引发工作重塑。人工智能应用对员工职场行为呈现双刃剑效应，一方面通过人工智能焦虑引发工作退缩行为，另一方面通过人工智能重塑促进适应性绩效[5]。

当员工面临失业焦虑时，会主动培养个人的竞争优势，对自主学习行为有显著正面效应。人工智能引入对工作重塑具有显著正向影响，随着人工智能引入程度增高，工作重塑呈上升趋势。工作重塑能够显著正向预测主动性行为，即随着工作重塑增多，主动性行为增多。

人工智能的广泛应用改变了员工的工作任

务、流程、方式和环境，这些变革促使员工通过工作重塑来适应企业智能化转型。员工可以通过与 AI 的互动以及与同事的技术交流，建立新型高质量人际关系网络，拓宽现有的工作关系边界。认知重塑帮助员工深化对人工智能技术的理解，从根本上转变对 AI 满足自身偏好和工作要求的价值判断。

3.3 双刃剑效应的整合框架

综合以上分析，AI 替代焦虑对员工心理健康的影响呈现双刃剑效应。积极的方面，人工智能应用通过工作重塑提升适应性绩效；消极的方面，通过工作焦虑引发职场偏差行为和工作退缩行为[4][5]。员工的未来工作自我清晰度在这一整合框架中起到重要的调节作用，作为一种动机性资源，能够帮助员工更好地适应人工智能带来的挑战。

资源保存理论为理解这一双刃剑效应提供了理论基础。资源存在于环境之中，环境既可培育个体资源，也可能成为其发展的障碍。人工智能的引入必然会对员工的工作环境及其资源产生影响。资源损失比资源获得的影响更为显著，资源缺失往往引发更快速、更持久的负面反应。然而，如果员工能够通过工作重塑获取新的资源，就可能实现资源增益螺旋，形成积极循环。

四、调节因素与管理启示

4.1 主管支持与组织支持体系

主管支持是影响职业替代风险心理后果的重要组织层面变量。研究表明，感知到的主管支持负向调节职业替代风险与离职意愿之间的关系，高感知主管支持条件下，职业替代风险对离职意愿的影响显著弱化；低感知主管支持条件下，这一影响则显著增强[1]。

主管支持作为一种重要的工作资源，可以帮助员工更好地应对工作要求带来的压力。在 AI 变革背景下，支持性的主管能够通过沟通和培训，帮助员工更积极地看待技术替代，从而降低职业替代焦虑。组织应构建多层次的支持体系，让员工感知到企业对员工身心健康的关注。

4.2 AI 使用焦虑的干预

AI 使用焦虑是调节 AI 影响效应最关键的个体变量。组织应通过系统性的培训降低员工的 AI 使用焦虑。研究建议，组织应开发焦虑消解干预措施，如 AI 素养培训应涵盖 AI 意识、AI 知识和 AI 技能等多个维度[2]。

更重要的是，管理者应主动对 AI 采用的意义进行建构。当 AI 采用被重新定义为绩效增益而非损失时，员工会表现出更高的 AI 欣赏度和更低的 AI 焦虑。这意味着，组织可以通过认知框架的调整来改变员工对 AI 的心理表征。企业应该帮助员工更积极地看待 AI 对人类劳动的替代，鼓励员工将焦虑转化为学习动力和工作重塑行为。

从工作特征层面来看，实施人性化的员工培训体系、建立参与式决策机制等措施能够激发员工的主动性行为。当员工参与 AI 实施决策时，其控制感和组织公平感会提升，从而缓解替代焦虑。

4.3 认知框架与正向引导

真实践行对员工的主动行为有着积极的影响，同样的逻辑适用于 AI 变革管理：管理者应主动与员工沟通 AI 采用的收益框架，帮助员工建立积极的技术认知。当组织能够为员工提供清晰的职业发展路径和技术适应支持时，员工更可能将 AI 引入视为职业发展的机遇而非威胁。

企业应当在引进人工智能设备的同时，拓展员工自身能力，增强工作保障。通过增益与损耗双路径的协同管理，组织可以最大限度地发挥 AI 应用的积极效应，同时将消极效应控制在可接受范围内。

五、结论与研究展望

本文系统梳理了 AI 职场替代焦虑的概念内

涵、形成机制及其对员工心理健康的双刃剑效应。AI 职场替代焦虑主要包括职业替代焦虑和技术学习焦虑两个方面：职业替代焦虑是员工担心被人工智能替代而引发焦虑，技术学习焦虑指的是个体在接触或尝试掌握人工智能技术过程中，因感知到学习难度而产生的紧张和担忧情绪。研究揭示了核心发现：AI 替代焦虑并非纯粹的消极心理反应，而是可以被重构和转化的职场动力。从形成机制来看，职业替代风险对离职意愿具有显著正向影响，且工作不安全感在其中起中介作用。进一步地，组织 AI 采纳通过工作不安全感间接影响员工的主观幸福感和心理幸福感，而个体的 AI 使用焦虑水平在其中起关键的调节作用：对于 AI 使用焦虑水平高的员工，组织 AI 采纳显著增加工作不安全感；对于 AI 使用焦虑水平低的员工，组织 AI 采纳反而降低工作不安全感。同时，感知到的主管支持负向调节职业替代风险与离职意愿之间的关系，高感知主管支持条件下，职业替代风险对离职意愿的影响显著弱化。值得注意的是，替代焦虑也可能激发员工的积极应对行为，技术替代意识可通过绩效压力引发工作重塑，人工智能应用对员工职场行为呈现双刃剑效应，一方面通过人工智能焦虑引发工作退缩行为，另一方面通过人工智能重塑促进适应性绩效。

未来研究可在以下方向深入探索：其一，可以采用纵向追踪设计，考察替代焦虑随时间动态变化的轨迹及其长期心理健康影响；其二，可以引入文化变量，探讨不同文化背景下员工对 AI 替代焦虑的反应差异；其三，可以开展干预实验，验证不同管理策略对降低 AI 使用焦虑和提升员工适应性的实际效果。通过持续深入的研究，我们可以更好地理解并善用这种焦虑，使其转化为推动职场心理健康与组织发展的积极力量。

参考文献

［1］ Zhou X, Zhan M, Wang M, et al. The influence of occupational substitution risk on employees‘ turnover intention：the mediating role of job insecurity and the moderating role of perceived supervisor support［J］. Current Psychology, 2025.

［2］ Pan Y. How and When Organizational Artificial Intelligence Adoption Impacts Employees’ Well-Being［J］. International Journal of Mental Health Promotion, 2025.

［3］ 张羽琦等. ChatGPT 类智能技术下高校教师的技术焦虑：现实表征、形成机理与矫治之策［J］.

［4］ 李易轩羽. 人工智能引入对员工工作行为的双刃剑效应研究［D］. 北京交通大学, 2025.

［5］ 袁情. 退缩还是适应：人工智能应用对员工职场行为的双刃剑效应研究［D］. 广州大学, 2025.

基于 Massflow 模型的干堆尾矿库溃坝数值模拟研究

万　飞，尹里刚，林坤峰，刘　豪，俞熊志，胡浩川，刘帅军
中钢集团武汉安全环保研究院　武汉　430081

摘　要：以某新建干堆尾矿库为研究对象，依托研究区等高线地形数据，构建尾矿库及周边地形三维模型，采用 Massflow 模型对全库瞬时溃坝工况下的尾矿砂运移过程开展数值模拟。研究结果表明，将 Massflow 模型与三维重建地形深度结合，可精准模拟溃坝后尾矿砂的流深、流速及运移规律，清晰揭示尾矿砂的时空演化过程，有效验证了该模型在干堆尾矿库溃坝模拟中的适用性与可靠性。同时证实，该干堆尾矿库溃坝后，尾矿流受地形约束局限于下游沟谷内堆积，不会对下游铁路形成直接冲击，研究成果可为同类干堆尾矿库的安全防控工作提供可靠技术参考。

关键词：Massflow 模型；溃坝；干堆尾矿库；数值模拟

引　言

尾矿库作为矿业生产的核心配套设施，是储存尾矿的高势能重大危险源，其溃坝事故具有突发性强、破坏力大、影响范围广的特点，一旦发生，将对下游居民生命财产、生态环境造成毁灭性打击，严重制约矿业行业安全绿色发展。因此，开展尾矿库溃坝模拟研究，揭示溃坝演化机制、预测灾害影响范围，是提升尾矿库安全防控水平、防范重特大灾害的关键举措[1-3]。

近年来，国内学者围绕尾矿库溃坝模拟的数值方法、物理试验、风险防控等方面展开深入研究，取得了一系列具有实践价值的成果。赖国望等采用 Flow-3D 数值模拟手段，建立尾矿库与周边地形模型，模拟漫顶工况下尾砂流演进过程及影响范围，并划分下游风险等级[4]；衡家然等利用 MIKE 21 水动力模型，分析各工况下尾砂淹没范围及特征时间点，为防护措施制定提供依据[5]；罗昌泰等采用 RAMMS 碎屑流软件构建三维数值模型，结合物理模型试验验证了数值模拟的可靠性，实现对溃坝尾砂流演变规律的精准预测[6]。吴帅峰等采用现场大型物理模型试验方法，揭示管涌溃坝演化规律，提出溃坝七阶段过程及三参数冲击力模型[7-8]。闫崭等设计拱型多级拦截坝，通过三维数值模型分析其防护效果，证实该结构可显著降低尾砂流流速、减少下游淹没深度[9]；付搏涛等基于 GDEM-PDyna 开展尾矿库溃坝三维数值模拟，结合模拟结果提出针对性应急防控建议[10]。综合来看，现有研究虽覆盖多维度，但在复杂地形和周边环境下干堆尾矿库溃坝模拟则鲜有报道。

Massflow 软件以深度积分原理为核心支撑，具备揭示滑坡、泥石流、尾矿库溃坝等各类灾害时空演化过程的能力。在尾矿库及类似灾害模拟研究中，丁邦政依托 Massflow 软件开展尾矿库溃决数值模拟，重点测算溃决过程中溃体的最大冲击高度、冲击力、流速等关键参数，明确了这些参数对桥墩等周边构筑物的作用影响[11]；林小莉等采用无人机航空摄影技术获取地形数据并生成 DEM，将其与 Massflow 软件相

结合，精准模拟了某尾矿库溃坝后尾砂的运动轨迹及淹没范围，为尾矿库溃决风险防控工作提供了重要的技术参考与实践价值[12]；孟宪森等基于 Massflow 模型，针对某弃渣场开展溃决模拟研究，系统分析了弃渣场溃决后的运动特征，并完成了相应的危险性评估工作[13]。

基于此，本文以湖北某新建干堆尾矿库为研究对象，依据现场实测参数，采用 Massflow 软件对该干堆尾矿库极端条件下的失稳溃决运动特征开展数值模拟，系统分析溃坝尾矿流的运动路径、淹没范围及运动速度等动力学参数，重点论证溃坝灾害对下游焦柳铁路的安全影响，以期为该尾矿库安全设施设计、灾害预警及防控工作提供科学依据与技术参考[14-15]。

1 干堆尾矿库工程概况分析

1.1 尾矿库库容设计概况

新建干堆尾矿库为山谷型尾矿库，项目三面环山，南西向为沟谷出口，库长 795.4m，最终堆积标高 140.0m，总坝高 51.0m，总库容为 $2088\times10^4m^3$，有效库容 $2039\times10^4m^3$，属于三等库。

1.2 尾矿库坝体设计概况

1.2.1 初期坝

初期坝位于库区南侧，采用碾压土石坝。坝顶高程 110.0m，坝底高程 89.0m，坝高 21.0m，764.25m，上游坡面 100.0m 标高设置一 5.0m 宽顶宽 8.0m，坝顶可过车，坝轴线长度约为马道，下游坡面 100.0m 设置一 8.0m 宽马道，上游马道兼做锚固平台。坝顶和马道之间，上游坡比为 1:2.5，下游坡比为 1:2.5。

1.2.2 副坝

副坝位于库区西北侧，采用碾压土石坝。坝顶高程 110.0m，坝底高程 102.0m，坝高 8.0m，顶宽 8.0m，坝轴线长长度约为 1370.62m。库内坡比为 1：2.5，库外坡比为 1：2.0。

1.2.3 堆积坝

采用干堆工艺，首先采用自卸汽车运至至堆存作业区，然后采用铲车摊平，最后采用压路机进行压实，必要的时候采用挖掘机对边坡进行削坡。要求入场尾矿的含水量不大于 25%。

总体堆存顺序为：先在初期坝顶 110.0m 标高以下堆存，当库内调洪区域底部标高达到 107.5m 标高，坝前大部分区域尾矿滩面达到 110.0m 后，采用从库尾向初期坝前分层堆排的干法堆存工艺，尾矿从场底往上逐层堆存，每层 2.5m，最多两层，最大高差不大于 5m，滩面以不小于 1% 坡度坡向初期坝处。必须保证初期坝和副坝前以及周边 70m 范围内的压实度不小于 0.92，中间区域的压实度不小于 0.85，并保证正常运行时库内无水。压实前摊铺厚度一般不超过 1.0m。

干堆尾矿滩面标高为 110.0m 时开始四周往中间堆，磷石膏库东侧平均堆积坡比 1：5，其余平均堆积坡比 1：4；堆积时在 115.0m、120.0m、125.0m、130.0m、135.0m 标高留 7.5m 宽平台，东侧平台间堆积坡比 1：3.5，下南侧、西侧、北侧平台间堆积坡比 1：2.5，最终堆积标高 140.0m。

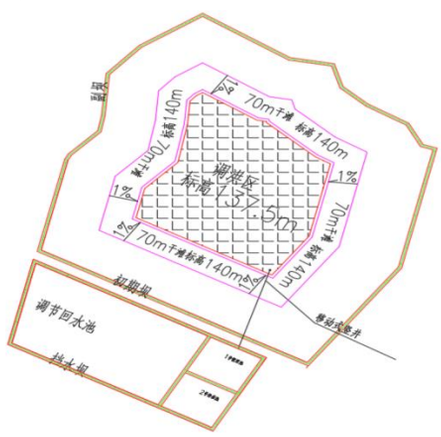


图 1 终期堆存平面示意图

Fig. 1 Schematic plan of the final storage stage

1.3 周边环境

该项目位于湖北宜昌市高新区东郊。该干堆尾矿库初期坝下游约 1.3km 处为焦柳铁路，库周距离长江最短约 4.2km，东侧距某化工企业酰胺项目约 1800m，东侧与某磷石膏资源库隔一个山脊。

2 溃坝数值模拟计算

2.1 模型介绍

Massflow 模型从流体力学的 Navier-Stokes 方程出发，基于深度积分的连续介质力学方程，利用改进的 MacCormack-TVD 有限差分方法，并结合 MPICH 和 OpenMP 并行处理技术，能适用于复杂地形地貌和沟床侵蚀等特征，具有二阶精度和自适应求解功能。基于 Navier-Stokes 方程的质量和动量守恒基本物理方程如下。[11-12]

2.1.1 质量守恒方程的深度积分

$$\int_{z_b}^{z_s}\left[\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}u)}{\partial x}+\frac{\partial(\bar{\rho}v)}{\partial y}+\frac{\partial(\bar{\rho}w)}{\partial z}\right]dz$$

$$=h\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial t}+h\bar{u}\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial x}+h\bar{v}\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial y}+\bar{\rho}\left[w(z_s)-w(z_b)\right]+\bar{\rho}\left[\frac{\partial}{\partial x}\int_{z_b}^{z_s}udz-u(z_s)\frac{\partial z_s}{\partial x}+u(z_b)\frac{\partial z_b}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}\int_{z_b}^{z_s}vdz-v(z_s)\frac{\partial z_s}{\partial y}+v(z_b)\frac{\partial z_b}{\partial y}\right] \quad (1)$$

$$=h\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}h\bar{u})}{\partial x}+\frac{\partial(\bar{\rho}h\bar{v})}{\partial y}-\bar{\rho}\left[u(z_s)\frac{\partial z_s}{\partial x}+v(z_s)\frac{\partial z_s}{\partial y}-w(z_s)\right]+\bar{\rho}\left[u(z_b)\frac{\partial z_b}{\partial x}+v(z_b)\frac{\partial z_b}{\partial y}-w(z_b)\right]$$

2.1.2 动量守恒方程的深度积分

x 方向上的动量守恒方程的深度积分

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t}+\frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x}+\frac{\partial(h\bar{u}^2+k_{ap}g_z h^2/2)}{\partial y}=g_y h-k_{ap}g_y h\frac{\partial z_b}{\partial y}-\frac{(\tau_{zy})_b}{\bar{\rho}} \quad (2)$$

y 方向上的动量守恒方程的深度积分

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t}+\frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x}+\frac{\partial(h\bar{u}^2+k_{ap}g_z h^2/2)}{\partial y}=g_y h-k_{ap}g_y h\frac{\partial z_b}{\partial y}-\frac{(\tau_{zy})_b}{\bar{\rho}} \quad (3)$$

Massflow 软件可有效用于尾矿库（尤其干堆型尾矿库）的溃坝过程模拟，其模拟流程如下：首先，依托研究区 1：1000 比例尺等高线地形数据，在地理信息系统中通过空间分析功能构建数字高程模型（DEM），并将该 DEM 数据转换为 Massflow 软件可识别读取的文件格式；随后，构建包含干堆尾矿库本体及周边地形的三维模型并导入软件，在 VisualStudio 环境中完成计算模型参数设置与边界条件界定，进而数值模拟干堆尾矿库主坝溃决后，尾矿流在库下游沟谷内的演进全过程，最终全面剖析尾矿流对下游重点区域的灾害影响特征。

2.2 尾砂参数设定

基于 Massflow 深度积分的连续介质力学方法的基底摩擦模型主要有库伦（Coulomb）模型、Voellmy 模型、宾汉姆（Bingham）模型、曼宁（Manning）模型。[13]本研究通过对已有文献的分析总结以及考虑干堆尾矿库力学特性等情况，选择适用于滑坡、人工堆积渣土场等泥石流灾害，并且基于实验模型的 Coulomb 摩擦模型，其表达式如下：

$$\tau=c+\rho gh(1-\lambda)\tan(\varphi) \quad (4)$$

其中 τ 表示基底摩阻力；ρ 表示物体密度；g 表示重力加速度；λ 为孔隙水压力系数；h 表示流体厚度；φ 表示物体基底摩擦角；c 表示粘聚力。

该尾矿的湿容重：取尾矿砂的平均密度为 1600kg/m^3。在极端条件下尾矿砂处于极度饱和的状态，黏聚力接近于 0。根据相关参考文献记录，极细粒尾砂的内摩擦角大致在 20° ~32° 之间，同时类比相关历史事件尾矿砂内摩擦角大致在 20° ~32° 之间，本研究考虑阻力下限情况，故内摩擦角设置为 20° 。对于超孔隙水压力系数，根据已有参考文献记录，超孔隙水压力系数一般范围在 0.60~0.80，本文综合考虑研究区实际情况，设为 0.80。

2.3 计算结果

考虑干堆尾矿库全库瞬时溃坝，此时形成的尾矿流量也最大，溃坝尾矿流体积为全库容。

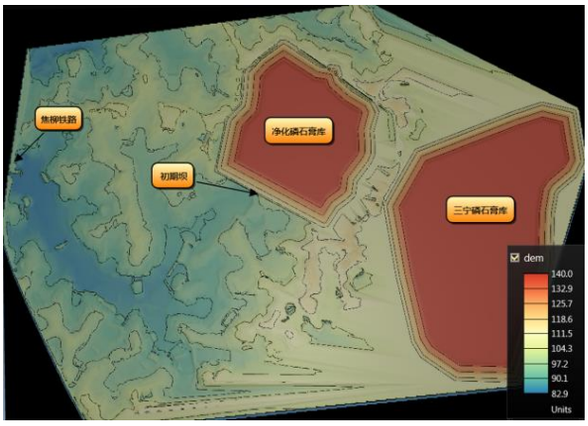


图 2　溃坝影响区数值分析模型地形 DEM 图

Fig. 2　Terrain DEM for the Numerical Analysis Model of the Dam Break Impact Zone

该工况假定堆积坝尾砂凝聚力为 0，自然休止角以上部分坝体瞬时溃决下泄，以下部分坝体受冲刷溃决下泄，终止条件是尾矿坝内堆积坝尾砂全部下泄完。

结合类似工程经验及本工程实际情况，确定本工况模拟分析时长为 1500s，本工况溃坝下泄尾矿方量为 $2088\times10^4 m^3$，研究该时段尾矿库溃坝泄沙的演进情况。Massflow 模型能够通过命令输出 DEM 格式的不同时刻堆积厚度文件，图 4 至图 9 为不同时刻下尾矿砂的堆积情况图。

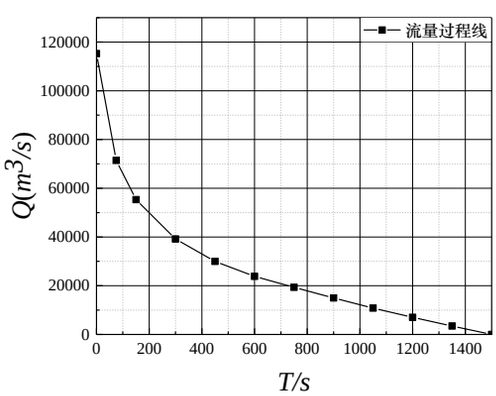


图 3　全库瞬时溃坝下泄流量过程线

Fig. 3　Discharge Hydrograph of Instantaneous Full-Reservoir Dam Break

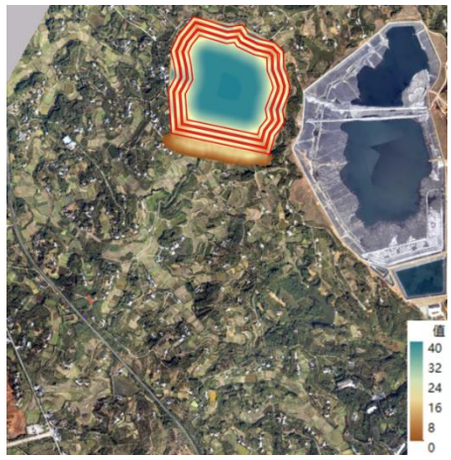


图 4　全库瞬时溃坝淹没范围图（5s）

Fig. 4　Inundation Extent Map under Instantaneous Full-Reservoir Dam Break（5s）

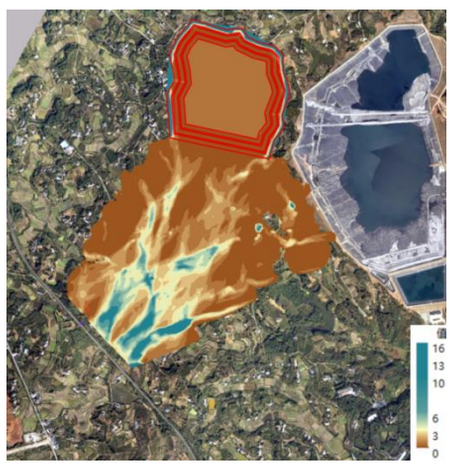


图 5　全库瞬时溃坝淹没范围图（100s）

Fig. 5　Inundation Extent Map under Instantaneous Full-Reservoir Dam Break（100s）

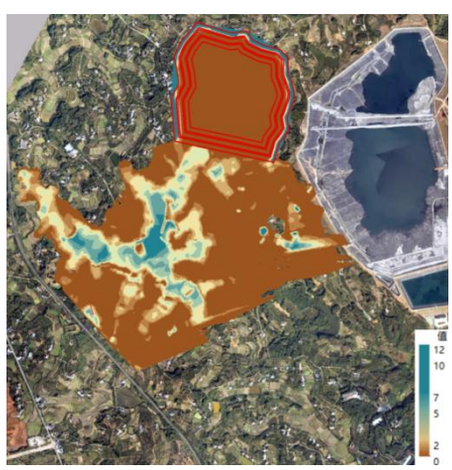


图 6　全库瞬时溃坝淹没范围图（200s）

Fig. 6　Inundation Extent Map under Instantaneous Full-Reservoir Dam Break（200s）

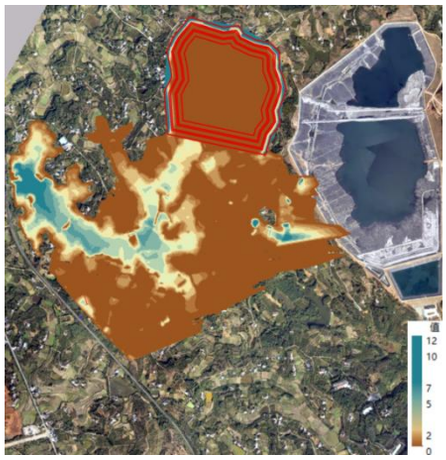


图 7　全库瞬时溃坝淹没范围图（500s）

Fig. 7　Inundation Extent Map under Instantaneous Full-Reservoir Dam Break（500s）

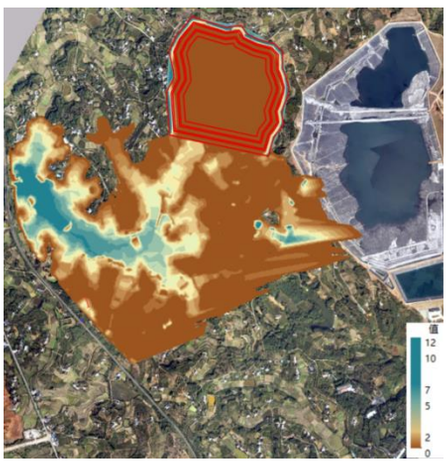


图 8　全库瞬时溃坝淹没范围图（1000s）

Fig. 8　Inundation Extent Map under Instantaneous Full-Reservoir Dam Break（1000s）

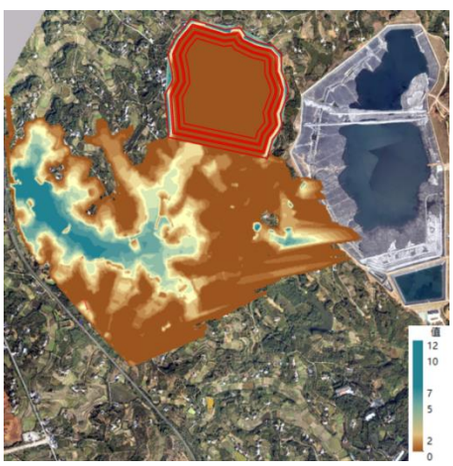


图 9　全库瞬时溃坝淹没范围图（1500s）

Fig. 9　Inundation Extent Map under Instantaneous Full-Reservoir Dam Break（1500s）

为直观表明不同时长溃坝路径、淹没范围、淹没深度、堆积体高度等技术指标，在溃坝模型中沿砂流运动路径中设置 1-1～1-9 共计 9 个监测点（监测点布置见图 10）。其中监测点 1-1 位于坝体下方调节回水池内，1-2 位于挡水坝下游，1-3 位于下游沟谷内，1-4 位于最危险滑面以上堆积体最远淹没范围附近，1-5 位于初期坝下方至铁路堤脚沟谷内，1-6～1-8 位于沿程沟谷内，1-9 位于于全库溃坝堆积体最远淹没范围附近沟谷内，每个监测点均监测尾矿砂体的堆积高度和运动速度 2 个变量随时间的变化情况。

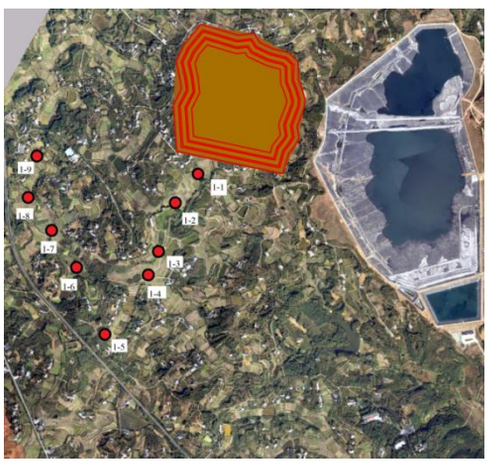


图 10　溃坝影响监测点布置图

Fig. 10　Layout of Monitoring Points in the Dam Break Impact Zone

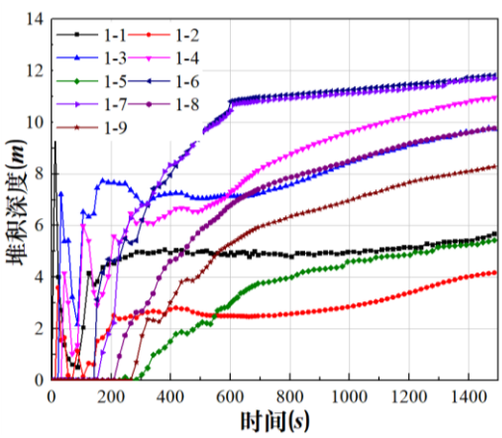


图 11　尾矿砂堆积厚度随时间变化图

Fig. 11　Variation of Tailings Sand Accumulation Thickness with Time

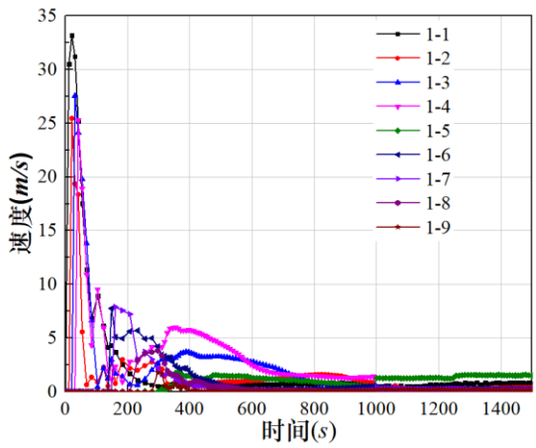


图 12　尾矿砂流速随时间变化图

Fig. 12　Variation of Tailings Sand Flow Velocity with Time

综合上图分析可以得出，尾矿坝溃坝后内部积蓄的重力势能转换为动能，砂体向下游以一定速度沿沟谷向下游冲击。

1）该工况下干堆库中的尾砂会在溃坝发生后的极短时间内迅速冲向下游，并沿着库区主体朝向溃决漫流，溃坝尾矿砂体堆积于初期坝下方调节回水池、澄清池内及下游沿途沟谷内。监测点的堆积厚度都呈逐步增加的态势，这主要是溃坝后库区内的尾矿砂开始迅速往下运动，库区外围的监测点的堆积厚度在增加。

2）溃坝初期尾矿流速快，冲击强度大，最大瞬时流速可达 33.20m/s，溃坝尾矿在前 0–400s 内演进速度快，后期趋于平缓。尾矿流在 284s 后到达监测点 1–9，1088s 后尾矿运移趋于静止，流动速度低于 0.1m/s，表明在此工况下计算模型可在 1500s 内计算收敛。

3）各个监测点的运动速度也基本上符合先突然增加后缓慢减小最后趋于平缓的规律，主要是因为尾矿库溃坝后尾矿砂拥有一定程度的动能，这种能量促使其以一定速度向下游冲击，随着时间的增加，其运动过程中因受到地面的摩擦，能量逐渐开始消散，从而其运动速度也逐渐减小。

4）监测点 1–5 位于初期坝正下方至铁路堤脚沟谷内，该处铁路坝顶标高约 99.15m，监测点附近高约 91.24m，高差 7.91m；根据监测数据，该点累计淹没深度 5.43m<7.91m，故坝体溃坝后在初期坝正下游方向上不会直接冲击焦柳铁路。

5）监测点 1–6 ~ 1–9 位于坝体溃坝尾砂演进的沟谷深处，该处焦柳铁路沿线坝顶标高约 94.2m，坝底标高约 82.2m，高差 12.0m。沿途监测点附近铁路堤坝标高依次为 97.56m、94.88m、94.71m、94.78m，沿途监测点标高依次为 83.86m、82.09m、82.33m、83.75m，沿途监测点累计尾矿淹没深度依次为 11.82m、11.71m、9.77m、8.28m，故坝体溃坝后尾矿流不会直接冲击焦柳铁路。

3　结　论

本文采用 Massflow 模型，对某干堆尾矿库全库瞬时溃坝工况下的尾矿砂运移过程进行数值模拟，通过分析溃坝后不同时刻尾矿砂的堆积厚度与运动速度，明确了溃坝事件引发的下游河道堆积特征及对下游焦柳铁路沿线的安全影响，得出如下结论：

（1）本文基于三维重建地形数据，将 Massflow 模型与研究区地形地貌特征深度结合，可有效模拟溃坝后尾矿砂的流深、流速及运移规律，清晰揭示复杂地形条件下溃坝尾矿砂的时空演化过程，验证了该模型在干堆尾矿库溃坝模拟中的适用性与可靠性。

（2）模拟结果表明，即便在全库瞬时溃坝这一最不利情景下，尾矿砂体仍主要沿下游地势低洼的沟谷堆积、演进；溃坝发生后，尾矿砂会在极短时间内迅速向下游冲刷，沿库区主坝方向溃决漫流，最终主要堆积于初期坝下方的调节回水池、澄清池及下游沿途沟谷区域。通过对下游焦柳铁路沿线关键监测点的数据分析可知，各监测点的最大尾矿淹没深度均小于该处铁路路基与沟谷底部的实际高差。综上，该干堆尾矿库溃坝后，尾矿流将受地形约束局

限于沟谷内堆积，不会对下游焦柳铁路形成直接冲击。

参考文献：

［1］ 王昆, 张峥, KAREN A. HUDSON-EDWARDS, 等. 尾矿的特性、灾害及其资源潜力［J］. 金属矿山, 2024,（08）：216-227.

［2］ 王昆, 杨修志, 王迪, 等. 尾矿坝溃坝分析模拟方法研究动态与发展趋势［J］. 有色金属（中英文）, 2025, 15（08）：1396-1407.

［3］ 陈颖霞. 强降雨作用下尾矿库溃坝过程模拟及风险定量评估研究［D］. 南昌大学, 2025.

［4］ 赖国望, 温景林, 翁松花, 等. 尾矿库溃坝模拟分析及风险防控对策［J］. 中国安全科学学报, 2025, 35（S2）：136-142.

［5］ 衡家然, 冯煜彪. 基于 MIKE21 的尾矿库溃坝数值模拟研究［J］. 现代矿业, 2024, 40（09）：117-121+127.

［6］ 罗昌泰, 李栋伟, 余国平, 等. 模型试验及数值模拟下尾矿库溃坝尾砂流演变预测［J］. 振动与冲击, 2022, 41（3）：307-315.

［7］ 吴帅峰, 严俊, 蔡红, 等. 尾矿管涌溃坝模式及下泄冲击特性试验研究［J］. 岩土工程学报, 2025, 47（10）：1892-1899.

［8］ 刘勇锋, 张超. 基于多源传感监测的大型尾矿库溃坝物理模拟及冲击影响研究［J］. 河南理工大学学报（自然科学版）, 2025, 44（6）：89-96.

［9］ 闫崭, 宋英华, 李墨潇, 等. 尾矿库溃坝泥石流多级拦截坝防护效果研究［J］. 中国安全生产科学技术, 2024, 20（1）：11-17.

［10］ 付搏涛, 李钢, 张红, 等. 基于 GDEM-PDyna 的尾矿库溃坝三维数值模拟分析研究［J］. 中国安全生产科学技术, 2023, 19（2）：71-77.

［11］ 丁邦政. 基于 GIS 和 Massflow 仿真的尾矿库溃坝危害下的桥梁风险评估［D］. 华中科技大学, 2019.

［12］ 林小莉. 无人机 DEM 结合 Massflow 的尾矿库溃坝模拟及风险评估［J］. 矿业安全与环保, 2023, 50（5）：87-92.

［13］ 孟宪森, 李丽, 张凯. 基于 Massflow 模型的弃渣场溃决运动特征及危险性评估［J］. 岩土力学, 2025, 46（3）：789-796.

［14］ 苗天雨. 尾矿库溃坝泥石流对铁路隧道影响研究［J］. 山西交通科技, 2025,（06）：97-101.

［15］ 刘明生, 刘子茜, 蓝蓉, 等. 混合式筑坝尾矿库漫顶溃坝演化过程与灾变规律研究［J］. 金属矿山, 2025,（12）：208-215.

［16］ 陈逸菲. 尾矿库侵蚀溃决数值模型及其溃决对下游高压电线塔的冲击作用研究［D］. 北方工业大学, 2025.

TC4 增材制造原料气雾化制备工艺粉尘爆炸风险分析与本质安全研究

乐有邦，吴晓煜，胡维西，高一峰，徐　松
中钢集团武汉安全环保研究院　武汉　430081

摘　要：TC4 钛合金因其优异的力学性能，并与增材制造工艺有高度的适配性，成为增材制造领域的核心金属材料，其粉末原料的制备也成为了刚性需求。然而，在其主流制备工艺——电极感应气雾化（EIGA）工艺流程中，涉及高温熔炼、高压雾化、旋风收集及筛分真空包装等多道工序。因 TC4 粉尘具有高活性、易燃爆的本质危险性，传统的安全防护手段难以应对多工序耦合引发的系统性风险。本文针对 TC4 金属粉尘制备过程，提出了一种基于多属性决策的工艺风险防控与本质安全改进方案。首先，采用危险与可操作性分析（HAZOP）与蝶形图（Bow-Tie）模型，系统辨识了从母材熔炼到成品包装的 4 个核心工段的潜在风险演化路径。其次，引入层次分析法（AHP）与模糊综合评价模型构建了工艺风险评估矩阵，基于本质安全化，针对高风险节点提出了“氧含量实时监测与联锁停机”、“旋风除尘器内部结构异质材料涂层去静电改型”两项协同改进措施。研究表明，优化后工艺系统的综合风险明显降低，为工业级金属 3D 打印原材料生产线的升级改造提供了系统性的工程指导。

关键词：增材制造；TC4 钛合金；气雾化工艺；风险辨识；本质安全

0　引　言

随着金属增材制造（3D 打印）技术的飞速发展，高性能钛合金零件在航空航天、医疗植入物及高端装备领域的应用日益广泛。TC4 钛合金（Ti-6Al-4V）因其优异的比强度、耐腐蚀性及良好的增材制造工艺适配性，已成为金属增材制造领域消耗量最大的核心原料之一。电极感应气雾化[1-2]（Electrode Induction Melting Inert Gas Atomization，EIGA）工艺凭借无坩埚污染、球形度高、卫星粉少及空心粉率低等显著优势，成为目前工业级超细 TC4 钛合金粉末的主流制备技术。

然而，TC4 钛合金作为典型的活泼金属，其粉末在微米级粒径下展现出极高的化学活性与极低的点火能量[3]。在 EIGA 制备全流程中，从母材熔炼、高压气体雾化、旋风级分收集，到筛分混料与真空包装，形成了高度紧密的工艺链条。一旦某一环节发生粉尘泄漏或点火源暴露，微小的局部火花极易引发链式爆炸反应，导致毁灭性的灾难。传统的安全防护手段（如单纯依靠末端泄爆或事后清扫）难以应对多工序、多因素深度耦合引致的系统性风险。

因此，本文以某工业级全自动无人化钛合金制粉线为研究对象，系统结合危险与可操作性分析（HAZOP[4]）与蝶形图（Bow-Tie[5]）模型，深层次演化 TC4 粉尘爆炸的潜在路径；并引入层次分析法（AHP）与模糊综合评价（FCE）建立多属性决策评估矩阵，针对高风险节点提出“氧含量实时监测与联锁停机”及

“旋风除尘器内部结构异质材料涂层去静电改型”两项本质安全改进方案，旨在为工业级金属 3D 打印原材料生产线的安全升级与本质安全设计提供系统性的工程技术指导。

1 TC4 钛合金粉尘爆炸特性与工艺风险辨识

为精准量化 TC4 金属粉尘的爆炸危险性，需首先对其物理化学特性及爆炸参数进行实测，并结合工艺流程开展全链条风险演化路径辨识。

1.1 TC4 粉尘爆炸特性参数测试与分析

根据国家标准 GB/T 16425-2025《可燃性粉尘爆炸风险评估及特性参数测定方法》[6]，采用 20L 球形爆炸测试装置，针对增材制造 TC4 钛合金原料常用的两种典型粒径分布，如 0-20μm 的 TC4 钛合金粉和 10-30μmTC4 钛合金粉，分别进行了爆炸特性参数测试。测试环境及样品预处理均严格符合 GB/T 16425-2025、ASTM E1226、ASTM E1491 及 ASTM E2021 标准。实测数据如表 1 所示：

表 1 TC4 钛合金粉尘爆炸特性参数测试结果

测试粉尘	爆炸性筛查（Y/N）	最大爆炸压力（P_{max}）/MPa	最大爆炸压力上升速率（dp/dt）$_{max}$/MPa.s^{-1}	爆炸指数（K_{st}）/MPa.m.s^{-1}	粉尘云最低着火温度 MITC/℃	粉尘层最低着火温度 MITL/℃
TC4（0-20um）钛合金粉	Y	0.771	71.8	19.5	440	＞450
TC4（10-30um）钛合金粉	Y	0.738	73.6	19.95	450	＞450

实验数据表明，TC4 钛合金原料粉尘爆炸猛烈度较高，两种粒径下的 TC4 粉尘最大爆炸压力分别达到 0.771MPa 和 0.738MPa，爆炸指数 Kst 均接近于 20MPa.m.s-1，属于爆炸压力较高的可燃金属粉尘。TC4 粉尘的热敏感性也比较强，粉尘云最低着火温度低于 450℃，这意味着在受热设备表面或机械摩擦产生的高温热源作用下，极易引发悬浮粉尘云的自燃与爆炸。

1.2 EIGA 工艺流程与 HAZOP 风险辨识

EIGA 制备 TC4 粉末的核心工艺包含四个主要阶段：

1．熔炼与雾化段：高纯钛棒作为电极在感应圈内无坩埚熔化，熔融液体通过喷嘴被高压惰性气体（氩气）雾化为超细液滴。

2．冷却与旋风收集段：雾化后的粉尘在冷却塔内固化，并通过旋风除尘器进行气固高效分离与粗收集。

3．气流分级与筛分段：超细粉末进入超音速气流分级机与振动筛，进行精准粒度切割（如 10-30μm 及 15-53μm）。

4．混料与真空包装段：多批次粉末在双锥混料机中均化，并在手套箱保护下进行真空密封封装。

采用 HAZOP 方法，引导词（如“偏离”、“无”、“过大”等）对上述 4 个主要核心工序的工艺参数进行节点偏差辨识。辨识结果如表 2 所示：

表 2 TC4 气雾化制备工艺 HAZOP 节点分析

工序节点	工艺偏差	潜在原因	后果
主要工序 1：熔炼雾化	雾化塔内氧含量过高	氩气惰化系统气体纯度不足、气密性失效泄露	极高活性钛粉与氧气发生剧烈氧化，诱发爆炸
主要工序 2：旋风分离	旋风收集器内部局部积粉与高静电累积	气固高速摩擦、器壁材质导电性差、搭接接地不良	发生静电放电（ESD），点燃高浓度悬浮粉尘云

工序节点	工艺偏差	潜在原因	后果
主要工序 3：筛分级分	设备负压破坏与粉尘逸散	密封件老化、过压超载、清扫不彻底导致积尘	形成车间层面的二次爆炸隐患与空间粉尘云
主要工序 4：封装混料	机械摩擦火花或极疲劳	轴承润滑不良、物料卡死、自动卡盘结构碰撞	产生机械高温热表面，引发包装箱/混料仓内爆炸

1.3 基于 Bow-Tie 模型的不良演化路径分析

将 HAZOP 辨识出的核心事故隐患——“TC4 气雾化系统粉尘爆炸”作为顶上事件（Top Event），构建 Bow-Tie 蝶形图模型，如图 1 所示。

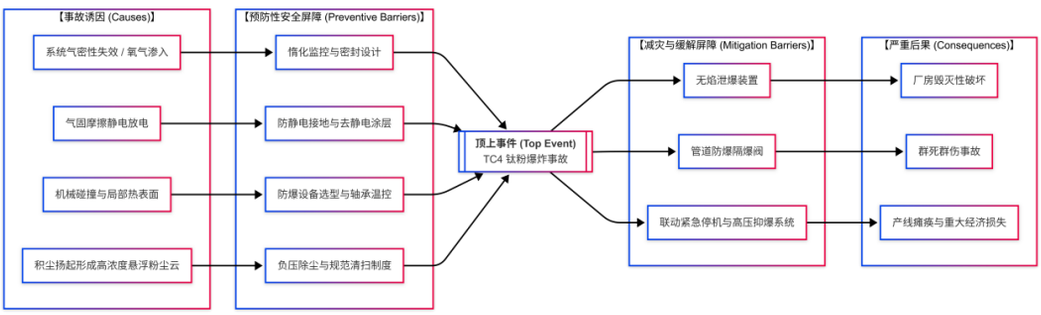


图 1　Bow-Tie 蝶形图模型

左侧威胁（Causes）及预防屏障（Preventive Barriers）：氧气渗入，若系统气密性下降，氩气惰化保护被破坏，通过高精度氧含量监测与紧急联锁实现屏障拦截。静电放电，旋风除尘器与管道内粉尘高速冲刷产生静电，通过可靠接地与去静电涂层消除火花。机械火花，卡盘及机械臂上料碰撞，通过防爆化改造与运动轨迹限制进行预防。

右侧后果（Consequences）及缓解屏障（Mitigation Barriers）：顶上事件发生后，通过管道防爆隔爆阀切断爆炸传播链条；利用无焰泄爆装置向无危险区域泄放超压；启动高压惰性气体抑爆系统，降低人员伤亡与设备损毁程度。

2 基于多属性决策（AHP-FCE）的工艺风险综合评估模型

为量化安全改进前后的风险等级，建立基于层次分析法（AHP）与模糊综合评价（FCE）的风险矩阵模型。

2.1 评价指标体系构建

参考 GB/T 16425-2025 风险评估框架，将粉尘爆炸风险分解为可能性指标（P）与后果严重度指标（C）。系统评估指标体系如图 2 所示：

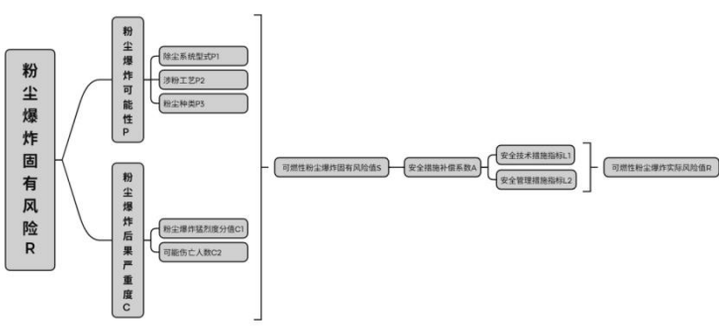


图 2　粉尘爆炸风险评估指标体系与框架

其中安全补偿得分（L）＝60%×安全技术措施（L1）＋40%×安全管理措施（L2）；现实风险值（R）＝固有风险值（S）×安全措施补偿系数（A），依据评估规范，固有风险值公式为：

$$S = P \times C = （P_1 + P_2 + P_3）\times（C_1 \times C_2）$$

其中，结合现场评估数据：

除尘系统类型为干式除尘系统，分值（P1）取 P1=3；涉粉工艺为存在气力输送、筛分、混合及气雾化反应放热等高危工艺，分值（P2）取 P_2=5；粉尘种类为 TC4 钛合金属于活性金属粉尘，结合 MITC 等参数，分值（P_3）取 P_3 =3。故粉尘爆炸发生可能性总分为：

$$P = 3 + 5 + 3 = 11$$

爆炸猛烈度分值（C1）：Pmax=0.771MPa，$10 \leqslant K_{st} < 20MPa.s^{-1}$，爆炸危险级别为“较高”，取 C_1=3。

可能伤亡人数分值（C2）：车间涉粉及毗邻区域作业人员按 30–40 人计算，取 C2=4。故后果严重度总分

$$C = C_1 \times C_2 = 3 \times 4 = 12。$$

计算得到 TC4 钛合金制粉线的固有风险值：

$$S = 11 \times 12 = 132$$

2.2 基于 AHP 确定权重与安全补偿得分计算

安全措施有效水平指标 L 由安全技术措施（L1）与安全管理措施（L2）共同决定：

$$L = 0.6 \times L_1 + 0.4 \times L_2$$

依据评分对应关系，安全措施补偿系数 A 的映射规则如下表 3 所示：

表 3　安全措施补偿系数 A 判定标准

安全措施有效水平	高	较高	一般	低
安全补偿措施得分	≥90	80 ~ 89	70 ~ 79	<70
补偿系数，L	0.6	0.8	0.9	1.0

实际风险值计算公式为：

$$R = S \times A$$

根据评估准则，R ≥ 156 为重大风险，117<R<156 为较大风险，44<R<117 为一般风险，R<44 为低风险。

原始评估中，该产线安全技术得分 L1=77，安全管理得分 L2=68，计算得出：

$$L_{原始} = 0.6 \times 77 + 0.4 \times 68 = 73.4$$

对应补偿系数 A=0.9。

$$R_{原始} = 132 \times 0.9 = 118.8 \Rightarrow 较大风险$$

3 本质安全改进方案设计与工程实施

针对 AHP–FCE 评估中扣分项显著的“氧含量控制可靠性不足”与“旋风除尘器静电积聚和锁气卸灰密封缺陷”两大核心风险节点，提出针对性的本质安全（Inherent Safety）协同改进方案。

3.1 措施一：氧含量实时监测与预警联锁系统

钛粉爆炸必须具备氧气等助燃气体，而传统的定时人工抽检无法应对设备微漏气引发的突发氧浓度升高，可以采取如下措施：

在 EIGA 雾化塔顶、旋风除尘器出口、气流分级循环风机进气口及混料手套箱 4 处核心位置，安装高精度三级冗余氧浓度传感器，电化学与激光吸收光谱 DLAS 结合。还可以设置双重安全临界阈值进行逻辑联锁控制。其中一级预警阈值为 O_2浓度达 1.0%，触发声光报警，系统自动加大高纯氩气补充流量进行补气冲刷。二级联锁停机阈值为 O_2浓度达 1.5%，PLC 系统在 <200ms 内切断感应加热电源、关闭高压气体喷嘴阀门、停止进料，并启动管道紧急隔爆切断阀。

3.2 措施二：旋风除尘器内部结构异质材料涂层去静电改型

TC4 钛粉在旋风除尘器内部以超音速旋转撞击器壁，静电电压可高达数万伏，极易引发火花放电。可以采取如下措施：

首先可以通过结构改型和选择其他材料，对旋风除尘器内壁及导流叶片进行表面改性，

涂覆层采用聚四氟乙烯（PTFE）或导电纳米 TiO_2等异质复合去静电涂层。异质涂层会在设备内壁形成三维微纳导电网络，将涂层表面电阻率从普通高分子材料的 1012Ωcm 降低至 105–106Ωcm。最后搭配双重锁气的气动膨胀蝶阀，既能消除高速冲刷产生的静电火花积聚，又可以解决卸灰过程中的密封泄漏问题。

4 改进后评价与工程验证

在实施上述本质安全改进措施，并对现场防爆软管包覆、去静电跨接及管理制度进行全面整改后，再次使用 AHP–FCE 模型对产线进行评估。

4.1 改进后安全得分计算与对比

表 4 整改前后安全措施评价及风险等级对比

评估阶段	安全技术得分 L1	安全管理得分 L2	综合安全得分 L	补偿系数 A	固有风险 S	实际风险值 R	风险等级
整改前	77	68	73.4	0.9	132	118.8	较大风险
整改后	94	68	83.6	0.8	132	105.6	一般风险

通过以上措施改进后，安全技术措施得分 L1 由 77 分大幅提升至 94 分，综合安全补偿得分 L 达到 83.6 分，进入“较高”有效水平区间；补偿系数 A 由 0.9 降至 0.8；系统实际风险值 R 从 118.8 降低至 105.6，成功将产线的粉尘爆炸风险等级从较大风险降至一般风险。

4.2 持续改进工程建议

为确保产线长期处于低风险稳定运行状态，结合现场情况提出以下持续改进建议：

对生产区域的防爆区域进行精细化的划分，缩小粉尘爆炸危险区域范围，将非防爆电控柜整体迁移至危险区域外安装；对无焰泄爆装置进行升级，超过 3m 的室内泄压导管，全面改用无焰泄爆装置，防止爆炸泄压的火焰对车间作业人员造成二次伤害；全面进行自动化上料升级改造，在六轴机械臂棒材上料口增设除尘与高纯气体封堵结构装置，避免开仓时外界空气倒灌破坏惰化环境。

5 结论

1．通过对增材制造专用 TC4 钛合金粉末（0–20μm 与 10–30μm）进行实测，确定其最大爆炸压力达到 0.771MPa，粉尘云最低着火温度为 440–450° C，属于高爆炸猛烈度与高热敏感性的典型活泼金属粉尘。

2．采用 HAZOP 与 Bow–Tie 联合模型，系统解耦了 EIGA 气雾化工艺从熔炼到包装主要核心的 4 个工序潜在风险演化路径，辨识出氧气渗入与气固摩擦静电放电是诱发全链条粉尘爆炸事故的主要风险。

3．针对高风险节点，提出了“氧含量实时监测与阈值联锁停机”和“旋风除尘器异质导电涂层去静电改型”两项本质安全改进方案。

4．改进方案评价结果表明，整改后系统安全补偿得分由 73.4 提升至 83.6，实际风险值由 118.8 降至 105.6，成功将风险等级降为一般风险，为工业级金属增材制造钛合金原材料生产线的安全设计与升级改造提供了系统性的工程指导。

参考文献

［1］ 刘畅, 李欣, 舒适, 等. 气体雾化制粉工艺中金属熔体在导流管内流动过程的数值研究［J］. 中国有色金属学报（英文版）. 2021, （10）. DOI:10.1016/S1003–6326（21）65725–4.

［2］ 郭快快, 刘常升, 陈岁元, 等. 高压 EIGA 法制备 Ti–6Al–4V 合金粉末及其 3D 可打印性［J］. 中国有色金属学报（英文版）. 2020, （1）. DOI:10.

1016/S1003-6326（19）65187-3.

［3］李刚, 冉运来, 胥科含, 等. 3D 打印 TC4 合金粉尘燃爆特性及惰化实验研究［J］. 东北大学学报（自然科学版）. 2026DOI:10. 12068/j. issn. 1005-3026. 2026. 20240226

［4］常青, 金亮, 孙志浩, 等. 典型废旧轮胎裂解炭黑粉尘火灾爆炸危险分析与事故预防［J］. 北京化工大学学报（自然科学版）, 2026, 53（3）: 40-48. DOI:10. 13543/j. bhxbzr. 2026. 03. 004.

［5］张倩倩, 王蕾, 乐有邦, 等. 基于蝴蝶结模型的粉尘爆炸分析［J］. 工业安全与环保, 2026, 52（2）: 41-46. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-425X. 2026. 02. 008.

［6］GB/T 16425-2025 可燃性粉尘爆炸风险评估及特性参数测定方法［S］.

铝镁粉尘湿式除尘器重大风险管控及防爆评估研究

吴晓煜，周奥辉，乐有邦，胡维西，张倩倩，游　毅，陈　晨，高一峰
中钢集团武汉安全环保研究院　武汉　430081

摘　要：针对铝镁粉尘湿式除尘系统在运行过程中存在的氢气积聚、管道积尘、湿法干用及半湿粉尘自燃等重大安全风险问题，开展风险演化机理分析、管控技术路线构建及防爆安全评估方法研究。首先，结合铝镁粉尘爆炸特性与湿式除尘运行工况，分析粉尘粒径、水体环境、温度条件及供水状态等因素对爆炸风险和析氢行为的影响规律，揭示湿式除尘系统重大风险的形成机制及演化特征。其次，针对氢气积聚、管道积尘、湿法干用和半湿粉尘自燃等典型风险，构建涵盖主动预防、过程控制和联锁保护的全链条重大风险管控技术路线，实现对事故链关键节点的系统管控。在此基础上，建立由粉尘危险特性、设备结构配置、运行状态及安全管理等要素组成的湿式除尘系统防爆安全综合评估体系，并提出风险量化评价方法。研究结果表明：所构建的重大风险管控技术路线和防爆安全评估体系能够有效提升湿式除尘系统本质安全水平，可为铝镁粉尘企业风险治理、防爆改造及安全监管提供技术参考。

关键词：铝镁粉尘；湿式除尘器；风险管控；防爆评估

1　引　言

1.1　铝镁粉尘治理背景及湿式除尘器应用现状

铝镁粉尘广泛产生于汽车零部件抛光、航空航天部件打磨以及 3C 产品铝合金加工等表面处理工艺环节，粒径普遍小于 50μm，具有极高的燃爆敏感度：其爆炸下限可低至 40g/m³，最小点火能仅为 19.3mJ。一旦含尘气流形成粉尘云并遭遇点火源，极易引发破坏性极强的爆炸事故[1]。

在此背景下，如图 1 所示的湿式除尘器凭借“水介质捕集+防爆”的双重优势，成为行业首选的粉尘治理设备[2]。该系统通过水滴与粉尘的惯性碰撞、拦截及凝并作用，可高效捕集粒径小至 10μm 以下的铝镁粉尘，实际除尘效率普遍达 99%以上，能将车间粉尘浓度从处理前的 80～100mg/m³ 降至 5mg/m³ 以下，远低于《大气污染物综合排放标准》（GB 16297–1996）规定的 30mg/m³ 限值。此外，水介质具备天然熄灭火花与抑制静电积聚的物理防爆特性，《粉尘防爆安全规程》（GB 15577–2018）明确推荐铝镁粉尘优先采用湿式除尘工艺[3]。

（a）湿式除尘塔体系统

（b）湿式除尘一体机

图 1　常见湿式除尘器

近年来，中国湿式除尘器市场规模稳步扩大，2023 年达 30 亿元且年增长率超 10%，在铝镁加工等高爆风险行业的渗透率超 70%。目前，行业内主要应用喷淋塔式、自激式（冲激式）、水幕式以及抛光打磨除尘一体机等设备[4]。图 2 所示的调研数据显示，喷淋塔式系统占据了当前作业场所的主要比例，而自激式系统因过滤效率高、耗水量低，在中大型企业中的应用占比正显著提升[5]。

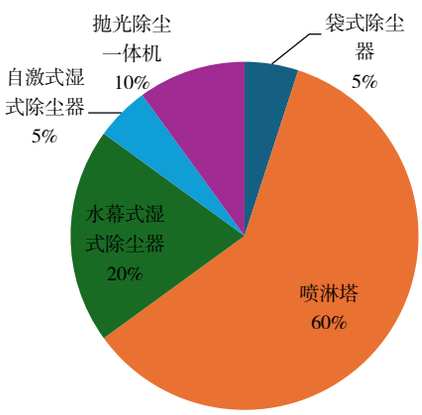


图 2　抛光打磨作业场所各类型除尘系统使用比例

1.2　重大风险剖析与典型事故启示

尽管湿式除尘系统在粉尘初始捕集阶段表现优异，但并非绝对安全。其核心在于“水–尘–气”的持续交互，若脱离严密管控，极易诱发以下四类典型高危衍生风险：

（1）氢气积聚爆炸风险：铝镁粉尘与循环水发生氧化还原反应持续生成氢气，若通风不足导致氢气浓度达到 4%～75%的爆炸极限，遇静电或电气火花即可引爆。2023 年上海汉邦科技“9·14”事故中，因收尘桶密闭且违规喷水致氢气积聚，引发连环爆炸，造成 3 人死亡。

（2）管道积尘爆炸风险：风管内未被水膜捕获的粉尘易在弯头处积聚，形成厚度超 5mm 的沉积层，被气流扬起后极易形成粉尘云。2024 年常州燊荣金属“1·20”事故中，因水泵供水不足致管道积尘，加之普通塑料风管未接地产生静电放电，最终引发多点连续爆炸，导致 8 人死亡。

（3）湿法干用爆炸风险：因供水中断或喷淋失效，系统内部形成“干式运行”区域，实际水量低于设计值 50%，完全丧失水的防爆降温作用。在常州燊荣事故中，设备供水中断超过 48 小时，大量干燥粉尘积聚，成为初期爆燃余烬扩大为设备本体爆炸的核心介质。

（4）半湿粉尘自燃风险：除尘产生的半湿泥渣，含水率 30%～60%，因铝镁氧化持续放热，若堆积过厚散热不良，温度升至 550℃以上时易引发自燃。2022 年广东清远某企业事故中，长期堆积的半湿粉尘加剧了反应速率，成

为事故扩大的次生助燃物。

1.3 行业监管现状与本文研究目标

我国现已构建起涵盖《铝镁制品机械加工粉尘防爆安全技术规范》（AQ 4272–2016）与《粉尘爆炸危险场所用除尘系统安全技术规范》（AQ 4273–2016）等多层次的标准体系。但在执行层面，标准落地呈现分化特征。据2024 年应急管理部专项整治通报，全国抽查的327 家涉铝镁粉尘企业中，完全符合湿式除尘相关标准的企业仅占 58.4%。设备配置合规性不足尤为突出：38.2%的企业未安装强制要求的氢气浓度传感器，29.7%的企业违规使用非防爆型水位计；在运维管理上，超三成企业管道及循环水池清理周期严重超标。

综上所述，本文旨在系统剖析铝镁粉尘爆炸及析氢的机理，在此基础上构建一套具备高度适用性与科学性的湿式除尘器重大风险管控技术路线与防爆安全评估方法，为相关企业全面提升本质安全水平、防范重特大事故提供理论依据与实操方案。

2 铝镁粉尘重大风险演化机理

2.1 爆炸特性与湿式除尘工况的耦合规律

铝镁粉尘在湿式除尘系统中的爆炸危险性并非仅由粉尘自身性质决定，还会受到设备结构、运行状态及水力环境等多种工况因素的共同影响，详见表 1。

表 1 铝镁粉尘爆炸特性与湿式除尘工况耦合关系分析表

爆炸特性指标	参数测试结果	湿式除尘工况影响	耦合后风险表现
爆炸下限浓度	250μm 粉尘爆炸下限为 95g/m³；125μm 粉尘降至 55g/m³；80μm 粉尘进一步降至 45g/m³，粒径越小，爆炸下限越低	在喷淋塔等湿式除尘设备中，若循环水混浊度较高，小粒径粉尘易受流体粘性作用附着于风管及塔壁内侧，形成二次积尘	当积尘层厚度超过 5mm，在气流扰动作用下容易形成局部高浓度粉尘云，浓度可能突破爆炸下限，提高爆炸发生概率
最低着火温度	48μm 粉尘最低着火温度为 615℃；133μm 为 672℃，细粒径粉更易被点燃	风机摩擦、水泵运行等会持续产生机械热；当循环水量不足时，设备内出现 15℃～30℃温升	局部热环境会降低粉尘最低着火温度，例如 80μm 粉尘最低着火温度可由 615℃降至 580℃，显著增加热源点火风险
最小点火能	15μm 粉尘最小点火能仅 19.3mJ；120μm 则达到 324mJ，细粉尘点火敏感性更强	自激式除尘器中的涡旋水团可均匀包裹粉尘，抑制粉尘云形成；但若循环水混入抛光膏等杂质，会促使粉尘团聚	含 5%抛光膏的 80μm 粉尘，其最小点火能可由 25mJ 降至 18mJ，使粉尘更易在敏感浓度被点燃
最大爆炸压力	80μm 铝镁粉尘最大初始爆炸压力可达 1.1MPa	喷淋塔内部填充层对爆炸传播形成阻隔，压力衰减约 15%～20%；而结构紧凑且未设泄爆装置的自激式设备空间封闭	不利工况下，设备内部压力可能迅速升高至 1.3MPa，引发壳体破裂、破片飞溅等严重事故

2.2 析氢机理及耦合影响因素

铝镁合金粉尘在湿式除尘系统中遇水后会持续发生析氢反应，这是湿法工艺区别于干式除尘的风险来源之一[6]。粉尘颗粒与水接触后，水分子会沿颗粒表面缺陷及晶界逐渐渗入内部，并发生氧化还原反应，生成氢气，反应过程如下[7]：

$$2Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^{-}$$

$$Al - 3e^{-} \rightarrow Al^{3-}$$

$$2H_2O + 2e^{-} \rightarrow 2OH^{-} + H_2 \uparrow$$

$$Mg + 2H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + H_2 \uparrow$$

$$2Al + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3H_2 \uparrow$$

氢气具有较低的爆炸下限，其在受限空间内的积聚会形成新的爆炸性环境，极大地增加了系统的潜在危险复杂性[8]。因此，析氢速率

及氢气积聚过程成为湿式除尘系统风险分析中的关键问题。在湿式除尘工况下，铝镁粉尘的析氢行为受到粒径、合金成分、水体环境及反应时间等多因素共同影响，不同因素之间相互耦合作用会改变氢气生成速率及积聚程度，主要影响规律如表 2 所示。

表 2　铝镁粉尘析氢行为与湿式除尘运行工况耦合关系表

影响因素	关键参数与实验结果	湿式除尘工况作用	耦合后风险与控制要求
粉尘粒径与比表面积	20μm 铝镁粉尘的初期产氢速率约为 40μm 粉尘的 2 倍，粒径越小，反应活性越强	水幕式除尘器若缺乏自动清淤功能，细颗粒粉尘易在池底长期沉积并持续与水反应	沉积的 20μm 粉尘在 8 小时后的产氢量占总产氢量的 85%，局部氢气浓度可升至 12%，远超 4%的爆炸下限，因此需强化清淤效率与排渣能力
合金镁含量与钝化效应	镁含量为 20%的合金粉尘，其产氢速率反而比 10%镁含量粉尘低 30%	镁参与反应后会生成氢化镁阻隔层，循环水吸收金属离子后呈弱碱性，pH 值常维持在 8～9 之间	弱碱性环境会使阻隔层厚度增加 20%～30%，进一步抑制析氢；因此可加入适量柠檬酸将 pH 值调至 6～7，可部分溶解钝化层，避免粉尘长期沉积后出现迟滞性析氢风险
水体温度与热力学反应	系统温度每升高 10℃，产氢速率提高 15%～20%；45℃条件下，80μm 粉尘产氢速率由 0.4mL/（g·min）升至 0.6mL/（g·min）	风机、水泵及设备摩擦散热会导致循环水持续升温	高温环境会显著增强铝镁粉尘与水反应速率，加剧氢气积聚风险，因此需加强循环水冷却与温度监测
析氢反应时间演化特征	前 8 小时为产氢极速期，约贡献 70%的氢气产量；8 小时后反应逐渐停滞	随着反应进行，颗粒表面逐渐形成氢氧化铝、氢氧化镁等包覆层	若循环水长期不更新、底泥长期不清理，仍可能在前期形成危险氢气峰值，因此需科学设定循环水更新周期与清淤频次

3　铝镁粉尘重大风险管控技术路线

3.1　氢气积聚与爆炸风险的主被动协同管控

铝镁粉尘湿式除尘系统中同时存在粉尘爆炸和析氢爆炸风险，因此应从抑制爆炸传播和降低氢气生成两个方面进行协同控制。对于爆炸风险，可采用 $Al(OH)_3$惰性粉体、MCA 与 CO_2协同抑爆等技术降低爆炸压力和火焰传播能力；对于析氢风险，依据《铝镁制品机械加工粉尘防爆安全技术规范》（AQ 4272-2016）[9]，需同时建立主动抑制与被动防控相结合的安全控制机制：

（1）在主动抑制方面，可采用 D-葡萄糖酸钠作为缓蚀剂，在金属颗粒表面形成钝化层，以降低析氢反应速率；同时将循环水 pH 值控制在 6.5～8.5 范围内，避免氧化膜稳定性下降。针对温度对析氢速率的促进作用，系统引入“冷却塔+板式换热器”二级控温方式，将循环水温稳定在 28～30℃。

（2）在被动防控方面，可配置 Ex dⅡBT4 等级防爆风机，维持设备内部持续通风，降低氢气积聚风险。同时建立三级浓度联锁机制：氢气浓度达到 10%LEL 时启动声光报警，达到 20%LEL 时联动备用排风系统，达到 30%LEL 时执行紧急停机程序。此外，所有金属管道及池壁均采用等电位连接并可靠接地，降低静电放电引发点火的可能性。

3.2　管道积尘的防沉积与清灰联动机制

管道流体力学优化与水膜强制保护是防沉积的核心。管道弯头曲率半径需≥3 倍管径，变径区过渡角≤30°，水平管段设置 1～3° 倾斜坡度，可削减局部气流涡流强度并将底部积尘量减少 50%以上。风管内部采用 304 不锈钢环形布水器建立全覆盖连续水膜。

在监测与清灰联动方面，系统应实时监控水压与液位，一旦水压低于 0.2MPa 或水池液位降至 1/3 池深以下，将于 10 秒内触发全系统停机联锁。确立 3mm 积尘厚度安全阈值，采用吸力≥20kPa，过滤等级 H13 的防爆真空吸尘器开

展每周局部清理；每半年通过 0.3 ~ 0.5MPa，50L/min 的高压水旋转冲洗全管网；每年停产期使用硬度 HRC30 的铜制专用工具深度刮除顽固积尘，确保管网内壁高位安全。

3.3 湿法干用风险的冗余供水与联锁保障

为防止供水链条断裂导致防爆功能失效，物理硬件上应强制要求主干线采用并联敷设双路耐腐钢管，配套互备冗余水泵组。喷淋系统应选用防腐蚀螺旋型喷头并交错阵列布局，确保对含尘气流 100%覆盖。

电气联锁逻辑是末端保障的核心，集水槽内的投入式液位计时刻监控液面深度，若识别失水风险将联动开启常闭的消防应急补水阀，确保持续的 30 分钟缓冲时间。同时固化硬件联锁，杜绝“水泵未建立水压强行启动风机与产尘设备”的无水干跑行为。

3.4 半湿粉尘氧化自燃的抑制与密闭处置

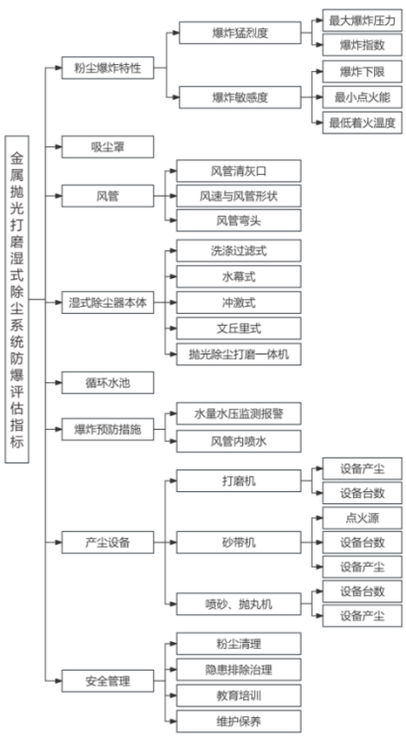
在储存环节，可采用水封浸泡方式，将泥渣完全浸没于防腐水池中，通过隔绝空气降低氧化反应速率。对于短期周转物料，则采用防静电托盘摊薄存放，并配合温湿度监测装置进行预警。预处理过程中，应及时筛除大块结团物，并保持物料含水率均匀，避免局部过热。

在转运与处置环节，应落实“日产日清”要求，运输过程采用密闭、防静电车辆，减少粉尘外泄与二次扬散。由于铝镁粉尘遇水可能加剧危险，存储及转运区域严禁采用水灭火，应配置干沙和 ABC 干粉灭火器。发生初期火情时，应优先采用干沙覆盖窒息灭火，避免翻动高温物料导致复燃或爆燃。

4 湿式除尘系统防爆安全综合评估体系构建

4.1 构建评估指标体系与赋权

为精准量化铝镁粉尘湿式除尘系统的整体安全水平，建立一套科学严谨的安全评估指标体系。图 3 展示了湿式除尘系统防爆安全评估指标体系层级与多位行业内专家打分计算而来的权重分布结果。



（a）指标体系

指标	权重
水量水压监测报警	0.1987
爆炸下限	0.1248
循环水池	0.1209
最大爆炸压力	0.0894
最低着火温度	0.0663
风管内喷水	0.0662
维护保养	0.0367
粉尘清理	0.0367
吸尘罩	0.0322
风速和风管形状	0.0272
冲激式	0.0243
洗涤过滤式	0.0243
最小点火能	0.0235
砂带机点火源	0.0213
爆炸指数	0.0179
教育培训	0.0122
隐患排查与治理	0.0122
风管弯头	0.011
喷砂抛丸机设备台数	0.0093
抛光打磨除尘一体机	0.0084
文丘里式	0.0084
砂带机设备产尘	0.0081
水幕式	0.0045
风管清灰口	0.0045
打磨机设备台数	0.0036
喷砂抛丸机设备产尘	0.0031
砂带机设备台数	0.0031
打磨机设备产尘	0.0012

（b）指标权重分布图

图 3 湿式除尘系统防爆安全评估指标体系层级与权重分布

4.2 评估模型分级赋值标准确立

为实现系统安全状态的数学量化，需对子指标制定分级与赋值标准。指标赋值采用风险等级对应法，数值越低代表安全度越高；数值越高则表征危险程度越大。分级与赋值如表 3 所示。

表 3 指标体系分级与赋值表

指标	安全：赋值 1	一般：赋值 2	较危险：赋值 3	危险：赋值 4
最大爆炸压力 MPa	P_{max}<0.3	0.3≤P_{max}<0.6	0.6≤P_{max}<1.0	P_{max}≥1.0
爆炸指数 MPa.m.s^{-1}	K_{st}<10	10≤K_{st}<20	20≤K_{st}<30	K_{st}≥30
爆炸下限 g/m^3	MEC≥100	60≤MEC<100	30≤MEC<60	MEC<30
最小点火能 mJ	500≤E	100≤E<500	10≤E<100	E<10
最低着火温度℃	450≤T	300≤T<450	135≤T<300	T<135
吸尘罩（依据 GB/T 16758）	密闭罩	上吸罩	侧吸罩	下吸罩
风速与风管形状（依据 AQ4273）	风速符合要求、圆形风管	风速符合要求、方形风管	风速不符合要求、圆形风管	风速不符合要求、方形风管
风管弯头	1 个	2 个	3 个	4 个及以上
湿式除尘器本体（分为 5 类）	布水满足要求	/	/	布水出现不均或局部断流
循环水池	水质清洁	/	/	水质混浊
水量水压监测报警	设置有水量水压监测报警且正常运行	/	/	未设置水量水压监测报警或未正常运行
风管内喷水	设置有管道喷水措施	/	/	未设置管道喷水措施
打磨机设备产尘	2 级释放源	1 级释放源	弱连续级释放源	强连续级释放源
打磨机设备台数	<3	≥3，<10	≥10，<30	≥30
砂带机点火源	砂带宽度<0.6	0.6≤砂带宽度<0.8	0.8≤砂带宽度<1.0	砂带宽度≥1.0
砂带机设备台数	<2	≥2，<5	≥5，<8	≥8
砂带机设备产尘（依据 GB12476.3）	2 级释放源	1 级释放源	弱连续级释放源	强连续级释放源
喷砂抛丸机设备台数	<3	≥3，<10	≥10，＜30	≥30
喷砂抛丸机设备产尘（依据 GB12476.3）	2 级释放源	1 级释放源	弱连续级释放源	强连续级释放源
粉尘清理	有制度、除尘系统定期清理	无粉尘清扫制度，除尘系统定期清理	仅有粉尘清扫制度	未定期清理
隐患排除治理	有隐患排查制度、有粉爆相关隐患排查计划并且有验收记录	有隐患排查制度和有粉爆相关隐患排查计划	有隐患排查制度	未进行粉爆隐患排查治理
教育培训	有粉爆相关教育培训制度、制定有培训计划和培训记录	有粉爆相关教育培训制度并制定有培训计划	有粉爆相关教育培训制度	无粉爆相关教育培训
维护保养	按照厂家说明书进行维护保养	/	未按照厂家说明书进行维护保养	未保养

4.3 典型企业防爆评估应用验证

为检验上述指标体系与量化模型，选取两家典型铝镁抛光企业开展应用验证，工况如表 4 所示。

表 4　典型铝镁粉尘打磨企业基础工况与防爆配置对照表

对比项目	方案一	方案二
粉尘爆炸特性	P_{max}=1.1MPa；K_{st}=62；爆炸下限浓度 55g/m³；最低着火温度 470℃；最小点火能 29mJ	
吸风方式	上吸罩	
风管形式	圆形风管	
管道风速	25m/s	
风管弯头数量	2 个	
清灰口设置	水平管及夹角大于 45° 处均按规范设置	
湿式除尘器本体	洗涤过滤式除尘器，布水不满足要求	洗涤过滤式除尘器，布水满足要求
循环水池状态	水质混浊	水质清洁
水量、水压监测报警	无	有
管道内喷水措施	无	有
主要产尘设备	电动打磨机	
设备产尘特征	产尘量较大	
设备数量	35 台	
砂带机、喷砂及抛丸设备	无	
安全管理制度	有粉尘清理、隐患排查、教育培训、维护保养制度，但未执行	有粉尘清理、隐患排查、教育培训、维护保养制度，并严格执行

将各指标的赋值乘以各指标的权重并相加，得出两套方案的最终防爆风险量化指数，结果见表 5。

表 5　综合防爆评估量化结果与风险评级对照

评估对象	综合评估得分
方案一（高危粉尘+管控缺失）	3.1020
方案二（高危粉尘+严密管控）	1.6329

结果表明：方案 1 与 2 均为爆炸压力较高、危险性较强的铝镁粉尘，但在增加规范布水设计、水量水压联锁以及严格落实清灰制度后，系统综合风险得分下降约 47%。结果说明，对于高危粉尘，仅依赖粉尘本身危险特性进行风险判断并不全面，完善的工程防护与管理措施能够有效削弱事故链条的连续演化过程，显著降低系统整体风险水平。

5　结　论

（1）湿式除尘系统虽然能够有效降低铝镁粉尘初始爆炸风险，但“水–尘–气”持续耦合作用也会诱发氢气积聚、管道积尘、湿法干用及半湿粉尘自燃等衍生风险。其中，粉尘粒径、水体温度、供水状态及运行工况等因素会显著影响系统危险程度，说明湿式除尘器的安全性高度依赖工程设计与运行管控水平。

（2）本文分析了铝镁粉尘湿式除尘系统中爆炸与析氢风险的形成机理，构建了覆盖缓蚀抑氢、防沉积清灰、水量水压联锁及半湿粉尘密闭处置等环节的全链条重大风险管控技术路线。相关措施能够削弱事故链条连续演化过程，提升系统整体防爆安全水平。

（3）本文建立了湿式除尘系统防爆安全综

合评估体系，通过对粉尘危险特性、设备结构配置以及运行管理情况进行量化分析，实现了系统风险的综合评价。案例计算结果表明，该评估体系能够较好地区分不同系统的风险水平，可为企业隐患排查、防爆改造以及安全监管提供参考依据。

参考文献

［1］ Eckhoff R K, Li G. Industrial dust explosions. A brief review ［J］. Applied Sciences, 2021, 11（4）: 1669.

［2］ 李会芳, 白鹏立, 吴志江. 金属粉尘的燃爆特性及防治措施研究 ［J］. 山西冶金, 2024, 47（10）: 68-70.

［3］ 中华人民共和国应急管理部. 粉尘防爆安全规程: GB 15577-2018［S］. 中国标准出版社, 2018.

［4］ 胡维西, 杨永勋, 张晖, 等. 冶金工业抛光打磨作业场所除尘系统适配性研究［C］//中国金属学会, 中冶京诚工程技术有限公司. 第十五届中国钢铁年会论文集—29. 冶金安全. 冶金工业出版社（Metallurgical Industry Press）, 2025: 196-201.

［5］ 董兵天. 金属表面处理的除尘设备选型要点［J］. 河南科技, 2019,（01）: 44-5.

［6］ 苏明清, 魏利军, 陈思凝, et al. 铝/镁粉尘湿式除尘产氢与抑氢研究进展 ［J］. 化工进展, 1-20.

［7］ 裴新月, 许开立, 张毓媛, et al. 废弃铝镁合金粉尘与水产氢反应的机理及影响因素 ［J］. 材料与冶金学报, 2023, 22（02）: 198-204.

［8］ 李翔翔. 铝镁金属粉尘防爆场景下湿式除尘系统工艺与安全控制研究 ［J］. 化工安全与环境, 2026, 39（04）: 80-83.

［9］ 铝镁制品机械加工粉尘防爆安全技术规范: AQ 4272-2016［S］. 2016.

金属粉尘湿式除尘的爆炸风险分析及防控

王　蕾，张倩倩，陈　晨，徐　松，霍文超
中钢集团武汉安全环保研究院　武汉　430081

摘　要：近年来，多起湿式除尘系统爆炸事故的发生，警醒世人“湿式”不等于“绝对安全”，本文，主要结合近些年发生的典型案例，从湿式除尘器的爆炸风险机理出发，结合典型事故案例和最新标准规范，系统分析其粉尘爆炸防控策略。

关键词：湿式除尘；铝镁粉尘；粉尘爆炸；干湿混合运行

01　引　言

湿式除尘器是使含尘气体与水等液体密切接触，利用水滴与颗粒的惯性碰撞或气液充分混合作用实现粉尘颗粒捕集的除尘装置[1-2]。因其以水作为净化介质，能有效降低气体温度、消除火花，避免粉尘爆炸发生的必要条件，因此在铝镁制品机械加工等高风险粉尘场所，相关安全技术规范明确要求强制采用湿式除尘工艺，以从源头抑制粉尘云的形成[3]，目前使用较为广泛的是湿式除尘器与湿式一体机。

然而，“湿式”不等于“绝对安全”。一方面由于部分金属粉尘特性，活泼金属其粉尘易与水发生释氢反应，另一方面，由于湿式系统除尘不到位、安全意识淡薄等原因，近年来，湿式除尘系统相关的爆炸事故时有发生，揭示出湿式除尘同样面临复杂多样的爆炸风险。目前针对湿式除尘粉尘爆炸风险管控研究主要集中于标准修订以及抑氢技术研究。郑欣[4]等人选取木质素磺酸钙作为抑制剂，实验表明其能较好地抑制铝粉与水反应产生氢气，可通过在循环水中添加抑制剂的方式从本质上降低氢气爆炸可能性。另有研究表明，L-苹果酸浓度达到 0.15g/L 时，铝废料粉尘与水的产氢反应几乎被完全抑制，其作用机理是 L-苹果酸在铝粉颗粒表面形成化学吸附膜，阻止颗粒与水接触。这些研究成果为湿式除尘器的本质安全设计提供了新的技术路径。2026 年 11 月 1 日即将实施的 GB 17919-2025《可燃性粉尘除尘系统防爆安全规范》[5]，首次系统性地增加了湿式除尘器、湿式除尘一体机的粉尘防爆安全要求，意味着湿式除尘器的安全管控迈入新阶段。

本文主要从湿式除尘器的爆炸风险机理出发，结合典型事故案例和最新标准规范，系统分析其粉尘爆炸防控策略。

02　湿式除尘器的爆炸风险机理

2.1　粉尘爆炸的基本条件

粉尘爆炸须同时具备五个要素：可燃性粉尘、助燃物（氧气）、粉尘云达到爆炸浓度、点火源，以及相对密闭的空间。湿式除尘器以水作为捕集介质，理论上可以有效降低粉尘浓度、消除点火源，从而抑制粉尘爆炸条件的形成。但在实际运行中，因设计缺陷、操作不当、维护缺失以及人员安全意识薄弱等多方面原因，湿式除尘系统仍可能陷入爆炸风险。

2.2　湿式除尘器的特有风险

干式除尘系统的爆炸风险主要来源于粉尘云的形成与点火源的触发，爆炸一旦发生，传播速度快、破坏范围广。湿式除尘系统以水为

介质，在供水正常、水量充足的条件下能有效抑制粉尘爆炸条件的形成。但湿式除尘引入了新的风险变量–水与活性金属粉尘的化学反应，以及水量管理失效带来的“干湿转换”风险。因此，湿式除尘器的安全防控不应止步于“有水即可”，而应围绕水量保障、氢气管控、点火源消除三大核心要素展开。

（1）干湿混合运行风险

湿式除尘器在正常运行状态下，含尘气流与水充分接触，粉尘被有效润湿，难以形成粉尘云。然而，一旦供水不足、喷淋中断或水量不足，含尘气流在湿式风道和除尘器内部会形成“半干半湿”状态，粉尘既未完全沉降又未被充分润湿，极易达到爆炸浓度。2025 年秦皇岛“3・8”粉尘爆炸事故中，湿式风道内每 10–15 分钟仅喷水一次、每次持续 2–3 分钟，喷水量严重不足，为粉尘云形成提供了条件。

（2）铝镁粉尘与水反应产生的氢气爆炸风险

铝镁这一类活泼金属与水反应的机理研究已经十分深入，根据以往的研究[3, 6–7]，总结出铝镁粉尘与水反应产氢方程式如式（1–1）至式（1–4）所示：

$$Al_2O_3 + 3H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 \quad \text{式 1–1}$$

$$2Al(OH)_3 + 2Al \rightarrow 2Al_2O_3 + 3H_2\uparrow \quad \text{式 1–2}$$

$$2Al + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3H_2\uparrow \quad \text{式 1–3}$$

$$Mg + 2H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + H_2\uparrow \quad \text{式 1–4}$$

然而氢气爆炸极限范围宽（4%–75%），最小点火能极低（约 0.02mJ），一旦在通风不良的密闭空间内积聚，极易引发氢气爆炸事故。

（3）粉尘自燃风险

一方面，粉尘自燃风险来源于热量积聚。活泼金属粉尘与水反应释放氢气还伴随着热量的产生。当水量足够时，热量能够及时耗散；但在半干半湿状态下，因导热性能差，反应放出的热量容易在铝粉堆中累积，导致温度升高，进而加速反应速率，形成恶性循环，最终引发粉尘自燃。另一方面，粉尘自燃风险来源于粉尘推挤。湿式除尘系统内壁、风道角落及水槽底部不可避免地会有粉尘沉积。在长期运行过程中，沉积的金属粉尘可能因氧化放热而自燃，成为点火源。此外，干式布袋除尘器排风再进入湿式除尘器的组合工艺（如秦皇岛“3・8”事故），也使得干式段积累的点火源（如静电、高温颗粒）可能被带入湿式除尘器，形成交叉风险。由此可见针对铝镁粉尘进行湿式除尘需要全周期的合规处理，否则，容易造成连锁反应，加剧粉尘爆炸风险。

03 典型事故案例分析与教训

3.1 2025 年秦皇岛“3・8”粉尘爆炸事故

2025 年 3 月 8 日，河北省秦皇岛经济技术开发区华川机械加工有限公司发生粉尘爆炸事故，造成 20 人受伤。事故企业主要从事铝合金轮毂打磨抛光业务，打磨产生的粉尘从下方吸风口经湿式风道进入湿式除尘器。

事故暴露出多重问题：一是湿式风道设计不合理，喷水量严重不足，未能有效润湿粉尘；二是干式除尘器未采用正规泄爆装置，泄爆面积不足且朝向室内泄爆；三是除尘系统进风管道未采取爆炸隔离措施，导致爆炸波和火焰反向传播至车间内部，引发二次爆炸。

3.2 2024 年常州“1・20”粉尘爆炸事故

2024 年 1 月 20 日，江苏省常州市燊荣金属科技有限公司发生粉尘爆炸事故，造成 8 人死亡、8 人轻伤，直接经济损失 1483 万余元。事故直接原因是违规采用五轴打磨机干式作业，铝合金粉尘积聚引发真空管静电爆燃，未熄灭的余烬进入无水运行的湿法除尘器，触发多点爆炸。

该事故的典型警示在于：湿法除尘器在“无水运行”状态下，非但丧失了安全保护功能，反而成为粉尘积聚和爆炸传播的通道。相较于干式除尘的铝粉爆炸风险，设计良好的湿

式除尘的氢气爆炸风险低得多，但前提是“设计良好”与“正常运行”必须同时满足。

3.3 事故共性问题总结

从上述事故中可以归纳出湿式除尘系统爆炸事故的共性规律：

一是水量保障失效是直接诱因。无论是喷淋频次不足还是无水运行，水量问题始终是事故发生的首要因素，金属磨制企业，尤其针对单一化生产的小微企业，其作业场所空间密集，工序单一，部分企业只涉及打磨工序，但其设备管理可能存在不规范问题，企业安全监测装置与联锁保护不完善。缺少液位、监测与流量报警装置，或出现“有监测无联锁设置”的情况，即未设置与监测装置配套的保护联锁装置，无法实现当液位或流速异常时，保护联锁装置应同时启动，触发声光报警同时自动停止相关生产设备。二是爆炸隔离措施缺位导致事故扩大。除尘器与作业场所之间未设置有效的隔爆装置，致使爆炸波反向传播，造成人员伤亡。结合实践调研的多家铝合金打磨企业，多数存在工位密集情况。实际生产中，湿式打磨一体机使用较为广泛，其除尘系统与作业场所的有效隔爆往往无法实现，这就对除尘器自身防爆提出要求。三是安全管理的系统性问题。首先是人员与制度管理方面不到位。一方面，由于湿法运行的优势，让一部分安全管理人员认为：“湿式”等于“绝对安全”。从而降低了安全管理意识，对日常的清理工作有所松懈。尤其针对一些单一化生产的小微企业，往往对看重其生产效益，湿式运行产生的淤泥堆积问题存在无专人处理问题。另一方面，企业针对粉尘专项制度落实不到位，存在无制度或有制度未落地情况，根据对同类涉粉企业的总体调研来看，制度缺失是多数企业存在的共性问题，包括：安全主体责任未明确，粉尘专项制度缺失，粉尘防爆专项演练缺失等问题。

04 湿式除尘器爆炸防控措施

4.1 设备设计与安装防爆要求

（1）湿式除尘器本体设计要求

GB 17919–2025《可燃性粉尘除尘系统防爆安全规范》[5]明确要求，湿式除尘器的水量、流速应能满足进入除尘器粉尘的要求。除尘器宜布置在厂房建筑物外部，如确需安装在厂房内，应采取有效的防火隔离和泄爆措施。对于铝镁制品加工等高风险场所，应优先选用湿式除尘器，并采用水洗或水幕除尘工艺。

（2）水量保障与循环系统设计

湿式除尘器循环用水池应满足以下要求：水池不密闭、通风良好，以杜绝氢气积聚风险；容量足够，确保回用水量和流速满足要求；设置低水位自动补水功能，保证回用水质洁净；水泵配置一备一用，具备故障报警联锁功能；水池和水管有防冻措施。补水系统响应时间应小于 10 秒，确保水量异常时能及时补充。

4.2 监测预警与联锁保护

（1）液位与流速连续监测

作为湿式除尘器安全运行的最基本保障，GB 15577–2018《粉尘防爆安全规程》[8]第 8.4.10 条规定，湿式除尘系统应设置液位、流速的连续监测报警装置[9]。实践中企业及有关部分应对其进行核查，其湿式除尘器运行系统是否满足该要求，对不合条件的设备进行更换或者淘汰或联系相关厂商进行合规化改造。

（2）氢气浓度监测

对于铝镁粉尘湿式除尘系统，应设置氢气浓度监测装置。相关标准建议将氢气浓度报警阈值设定在可燃下限（LEL）的 1%以内，当浓度超限时自动启动强制通风或停机保护。湿式除尘应保持通风连续开启，通过气流带出氢气；同时应在除尘器或排风管道的高处设置通

气停运时能自动开启的氢气排空阀，防止氢气聚集。

4.3 操作维护与安全管理

（1）泥浆清理与水质管理

应及时清除沉淀的淤泥，防止淤泥堆积影响水循环效率和水质。循环用水应每 72 小时更换一次，pH 值控制在 6–8 之间；铝镁粉尘湿法收集，相关企业宜设置专人进行清理打扫，从而将生产与管理进行小范围切割，保证淤泥的有效清理。

（2）通风保障

应保证水槽（箱）及水质过滤池无论除尘器处于开启还是停止状态，都有良好的通风，防止氢气积聚和热量堆积。打磨现场也应保持良好通风，避免车间内氢气积聚。

4.4 应急响应与联锁控制逻辑

湿式除尘系统应建立完善的联锁控制逻辑：启动时，除尘系统应先于生产设备启动，延迟时间不少于 30 秒；停机时，生产设备应先于除尘系统停机，延迟时间不少于 10 分钟，确保管道和灰斗内粉尘排空。当监测装置发出声光报警信号或隔爆、抑爆装置启动时，保护联锁装置应同时启动，自动停止相关设备运行。

4.5 安全培训与应急演练

针对员工安全意识定期组织培训，讲解粉尘爆炸防范要点，避免人员误操作造成的严重后果，提高员工素质。定期开展粉尘爆炸应急演练，以应对突发状况。通过对逃生路径、灭火器、消防沙使用等进行多次模拟演练，以期实现事故危害最小化。

05 结 语

湿式除尘器以水为介质，在抑制粉尘爆炸条件形成方面具有天然优势，但其安全运行依赖于完善的设计、可靠的监测联锁和规范的操作维护。水量保障是基础，针对铝镁粉尘氢气管控是关键，爆炸隔离是最后屏障。未来，应将标准落实、技术创新与安全文化培育有机结合，推动湿式除尘器从“形式安全”走向“本质安全”，切实防范粉尘爆炸事故的发生。

参考文献：

［1］ 张强, 李明, 王磊. 湿式电除尘器在燃煤电厂超低排放中的关键技术［J］. 中国电机工程学报, 2022, 42（18）：6783–6792.

［2］ MÜLLER T, SCHMIDT F, WAGNER G. Advanced wet scrubbing systems for metallurgical off–gas treatment［J］. Journal of Hazardous Materials, 2021, 415：125634.

［3］ 苏明清, 魏利军, 陈思凝, 等. 铝/镁粉尘湿式除尘产氢与抑氢研究进展［J/OL］. 化工进展, 1–20.

［4］ 郑欣, 王延瞳, 许开立, 等. 基于木质素磺酸钙的湿式除尘系统氢气爆炸事故控制措施研究［J］. 中国安全生产科学技术, 2019, 15（06）：139–143.

［5］ GB 17919–2025《可燃性粉尘除尘系统防爆安全规范》

［6］ Deng Z Y. Effect of different modification agents on hydrogen–generation by the reaction of Al with water［J］. Hydrogen Energy, 2010, 35（18）：9561–9568.

［7］ Gai W Z. Effect of initial gas pressure on the reaction of Al with water［J］. Hydrogen Energy, 2014, 39（25）：13491–13497.

［8］ GB 15577–2018《粉尘防爆安全规程》［S］. 北京：中国标准出版社, 2018.

铁路工程施工中的职业危害识别与防护对策研究

——以某钢铁企业铁水线新建复线工程为例

秦梓航
中钢集团武汉安全环保研究院　武汉　430081

摘　要：目的　识别和分析铁路工程施工过程中存在的职业危害因素，提出有针对性的防护对策，为同类工程职业卫生管理提供参考。**方法**　以某钢铁企业铁水线新建复线工程可行性研究为案例，运用职业卫生工程分析方法，识别施工过程中的主要职业危害因素。**结果**　识别出粉尘、噪声、振动、高温热辐射、有毒有害气体（煤气、氮气等）、工频电磁场六大类职业危害因素，其中管线迁改作业涉及高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气等多种有毒有害介质的拆除与还建，是本工程的特有职业卫生风险。**结论**　铁路施工职业危害具有多因素叠加、作业空间受限、与既有生产系统交叉干扰等特点，应加强源头控制、工程防护与个体防护相结合的综合治理。

关键词：铁路工程；职业卫生；职业危害；防护对策；铁水运输

1　引　言

铁路工程施工涉及路基土石方、轨道铺设、信号安装、管线迁改、电力照明等多个专业工种，是典型的资源密集型产业。与新建铁路工程不同，既有厂区内的铁路改造工程往往面临作业空间受限、与既有生产系统交叉干扰、地下管线复杂等特殊问题，其职业卫生风险管理较一般工程更为复杂[1-3]。

某钢铁企业东干线铁水线新建复线工程位于企业厂区内，新建及改建线路总长约 0.74～1.09km，需在维持既有铁水运输生产的情况下组织施工，涉及转炉煤气、高炉煤气、焦炉煤气、氮气、蒸汽等十余种工业管线的拆除与还建，职业卫生风险类型多样、危害程度高。

目前，国内关于铁路工程职业危害的研究多集中于干线铁路施工阶段[4-5]，对钢铁企业厂区内铁路改造工程的职业危害特征研究较少，尤其缺乏针对管线迁改环节煤气类有毒有害物质暴露的系统分析。本研究以该工程为案例，系统识别和分析厂区铁路施工中主要职业危害因素的分布特征，提出针对性防护对策，为同类工程的职业卫生管理提供参考。

2　工程概况

2.1　工程基本情况

某钢铁企业东干线铁水线新建复线工程位于企业厂区内。项目建设内容包括铁水运输复线的新建与既有线改造，主要涉及路基土石方、轨道铺设、信号系统改造、电力照明安装以及大量的管线迁改工程。

表 1　工程方案对比

项目	方案一（热力道口后出岔）	方案二（铁水小站接轨）
新建长度	380m	700m
改建长度	360m	390m
线路总长	740m	1090m
推荐方案	方案一（投资省、效率高）	

根据方案比选（表 1），推荐采用方案一（热力道口后出岔方案）。该方案新建线路与既有线路间距约 5m，占用厂区面积较小，运输效率较高，新增投资有限。

2.2　施工组织安排

工程计划总工期 6 个月，主要阶段划分如下：施工准备 1 个月，管线迁改 2.5 个月，新建部分施工 1.5 个月，改扩建施工 2 个月，站后配套工程 1 个月，联调联试 0.5 个月（部分工序平行推进）。

2.3　施工特点与职业卫生挑战

本工程具有以下显著特点：（1）作业空间受限——施工区域位于既有厂区内，新建线路与既有线路间距仅约 5m，大型机械作业空间有限；（2）交叉作业频繁——管线迁改与新建铁路施工同步进行，涉及多种有毒有害介质的拆除与还建；（3）既有生产维持——施工期间铁水运输不能中断，需在不影响正常生产的情况下组织施工；（4）地下管线复杂——炼钢区域两侧共有 10 余种工业管道，部分管道介质有毒有害，部分已废弃但介质残留不明。

3　研究方法

本研究采用文献调研与工程案例分析相结合的方法。资料主要来源于该工程《可行性研究报告》（2020 年 4 月）中施工组织、管线迁改、安全措施等章节内容，以及现行职业卫生相关标准规范（GBZ 2.1—2019、GBZ 188—2014 等）。职业危害识别遵循“工程分析—危害识别—危害分析”的框架，按照作业类型分类梳理各工序中可能存在的职业病危害因素，并参考同类工程文献[4-6]进行比对验证。

4　结果与分析

4.1　粉尘危害

来源识别。路基工程施工涉及大量土石方开挖与回填。本工程路基土石方工程量为：挖方 18645m³（III 类土），填方 13845m³。轨道工程需铺设面碴 3171m³、底碴 1686m³，拆除既有线路扒碴弃渣外运量达 1715 ~ 1950m³。根据作业类型，粉尘可分为矽尘、水泥粉尘和焊接烟尘。

危害分析。可吸入粉尘（PM_{10}）和可入肺粉尘（$PM_{2.5}$）是主要健康危害。长期暴露可导致尘肺病、慢性支气管炎等呼吸系统疾病。根据 GBZ/T 229.1—2011，此类作业的粉尘危害等级可达到中度至重度危害级别。

4.2　噪声与振动危害

来源识别。噪声来源包括土石方机械（85 ~ 105dB（A））、轨道施工机械（90 ~ 110dB（A））、破碎拆除作业（95 ~ 115dB（A））、运输车辆（80 ~ 90dB（A））和管线切割作业（90 ~ 100dB（A））。振动主要来源于捣固作业、风镐破碎和压实作业。

危害分析。长期接触高强度噪声可导致听力损伤。根据 GBZ 2.2—2007，工作场所噪声接触限值为 85dB（A），本工程多个工序噪声强度超过该限值[2]。

4.3　高温与热辐射危害

来源识别。本工程位于钢铁企业厂区内，

转炉车间散热使周围环境温度可达 40～60℃，铁水罐车经过时产生强烈热辐射，蒸汽管道表面温度可达 100℃以上。项目所在地区夏季高温时段室外气温常超过 35℃。

危害分析。高温作业环境下，工人可出现热射病、热痉挛、热衰竭等急性中暑症状。根据 GBZ 2.2—2007，高温作业分级需综合考虑 WBGT 指数和劳动强度[2]。

4.4 有毒有害气体危害

来源识别。管线迁改是本工程特有的高风险作业。需拆除和还建的工业管线涉及多种有毒有害介质，详见表 2。

表 2 主要管线迁改工程中有毒有害介质一览

介质类型	管径（mm）	数量	安全特征
转炉煤气	DN830/1 000	约 140 m	含大量 CO，剧毒、易燃易爆
高炉煤气	DN1 000/1 800	约 140m	含 CO20%～30%，剧毒
焦炉煤气	DN200/500/600/630	约 140×2+3	含 CO、H_2、H_2S，有毒易燃
氮气	DN100/200	约 140×2	无色无味，缺氧窒息
蒸汽	DN425/250/100/50	约 140×4	高温烫伤，部分已废弃
压缩空气	DN250	约 140×3	高压物理伤害

此外，部分管线标注为“已废弃”或“用途不明”，介质残留存在不确定性。

危害分析。煤气类危害是最危险的职业危害因素。转炉煤气中含 CO 浓度高达 60%～70%。CO 与血红蛋白的亲和力比氧气大 240 倍，吸入高浓度 CO 可在数分钟内导致意识丧失甚至死亡。赵明等[7]统计了近年国内 CO 中毒事故，建筑施工领域 CO 中毒致死率高达 42.3%。

4.5 工频电磁场危害

来源识别。本工程涉及电力及照明系统的安装与改造，包括新增低压配电柜（供电负荷 30kW）、照明线路敷设（ZR-YJV-3×10+1×6 电缆）、道口栏木机及信号设备用电安装，以及既有信号电缆迁改。

危害分析。工频电磁场是主要职业病危害因素，长期暴露于高强度工频电磁场可对人体神经系统、心血管系统产生不良影响。根据 GBZ 2.2—2007，工作场所工频电场职业接触限值为 5kV/m[2]。

4.6 机械伤害与高处坠落

来源识别。机械伤害涉及大型施工机械、重件吊装和切割作业。高处坠落风险涉及信号机安装（3～5m）、灯塔照明安装（10～15m）和管道支架拆除与还建（3～8m）。

危害分析。张鹏等[8]的研究指出，有限空间高处坠落叠加有毒气体中毒是厂区施工作业的主要致死原因。

5 讨 论

5.1 职业危害特征分析

本工程职业危害因素呈现以下特征：（1）多样性——涵盖化学性、物理性及人机工程学三大类危害因素；（2）叠加性——同一作业区域多种危害因素同时存在；（3）交叉性——施工区域与既有生产区域交叉，受铁水运输、转炉冶炼等既有生产系统的影响。

5.2 与同类工程比较

与新建干线铁路工程相比[4-5]，厂区内铁路改造工程的显著区别在于管线迁改环节的特殊风险。干线铁路施工职业危害以粉尘、噪声为主，而本工程煤气中毒和缺氧窒息风险尤为突出。

5.3 防护对策建议

（1）粉尘防护。路基土石方采用湿式作业，配备洒水降尘装置；道碴运输车辆加盖篷布；作业人员佩戴 N95/KN95 级以上防尘口罩。

（2）噪声与振动防护。选用低噪声设备，设置隔声屏障；建立听力保护计划，振动工具连续作业不超过 2h。

（3）高温热辐射防护。转炉车间和铁水线附近设置隔热屏蔽，采用间歇性作业制度，配备防热服和含盐饮料。

（4）有毒有害气体防护（重点）。施工前对影响范围内的所有管线进行清查和介质残留检测。煤气管道动火前必须用氮气彻底置换，持续监测 CO、H_2S、CH_4、O_2浓度。作业人员佩戴空气呼吸器。严格执行动火作业许可证和受限空间作业许可证制度。

（5）电击防护。严格执行停电、验电、挂接地线制度；施工用电采用 TN–S 三相五线制，设置漏电保护器。

（6）职业卫生管理综合措施。建立建设单位牵头、施工和监理单位共同参与的职业卫生管理体系。接触危害因素人员实行上岗前、在岗期间和离岗时健康检查，建立一人一档。

6 结 论

（1）识别出本工程主要职业病危害因素包括粉尘、噪声、振动、高温热辐射、有毒有害气体、工频电磁场共六类。

（2）管线迁改作业涉及转炉煤气、高炉煤气、焦炉煤气等有毒有害介质的拆除与还建，是本工程区别于一般铁路工程的特有职业卫生风险。

（3）建议采取“源头控制—工程防护—个体防护—管理措施”四位一体的综合治理策略。

（4）本研究可为钢铁企业厂区内铁路改造工程的职业卫生评价和职业病危害预评价提供参考数据和思路。

固态储氢合金生产过程中涉爆粉尘风险识别与防爆对策研究

游　毅[1]，李梦超[1]，刘敏娜[2]，王　岩[2]，田　磊[3]，汪　强[3]，解远智[3]
1. 中钢集团武汉安全环保研究院　武汉　430081
2. 内蒙古自治区安全生产技术中心　呼和浩特　010000
3. 鄂尔多斯西金矿冶有限责任公司　鄂尔多斯　017000

摘　要：随着“氢能+稀土”战略的深入推进，固态储氢材料在新能源领域展现出广阔应用前景。然而，在贮氢合金的生产过程中，涉及熔炼、破碎、研磨、分级、筛分等多道工序，产生大量具有爆炸危险性的金属粉尘。本文以某某贮氢合金有限公司为研究对象，结合现场隐患排查与标准对照分析，系统识别固态储氢合金生产过程中的粉尘爆炸风险，并提出针对性的防爆对策。研究发现，该企业存在以下典型涉爆粉尘隐患：不同防火分区共用湿式除尘系统；正压吹送除尘方式缺乏点燃源防范措施；破碎、研磨等工艺设备前未设置铁、石等杂物去除装置；粉尘防爆区域内电气设备不满足防爆要求；除尘系统缺乏流速、氧浓度等连续监测报警装置；静电接地与跨接措施不完善；粉尘防爆管理制度、培训、应急预案等安全管理体系缺失或不健全。针对上述问题，本文提出以下对策：按防火分区独立设置除尘系统；改造正压吹送除尘为负压方式或增设火花探测消除装置；在粉碎、研磨设备前加装除杂装置；开展粉尘爆炸特性测试，依据粉尘防爆分区进行电气设备选型；完善氧浓度、液位、流速等在线监测与报警系统；规范静电跨接与等电位接地；建立健全粉尘防爆安全管理制度、培训与应急演练机制。本研究可为固态储氢及类似金属粉尘涉爆企业的隐患治理与安全管理提供技术参考，助力实现氢能产业的高水平安全发展。

关键词：固态储氢　涉爆粉尘　隐患排查　防爆对策

0　引　言

氢能作为清洁高效的二次能源，在全球能源结构转型中扮演着日益重要的角色。固态储氢技术凭借其高体积储氢密度、低操作压力和优异的安全性，成为氢能储运领域的研究热点。贮氢合金作为固态储氢的核心材料，其生产过程中的安全风险不容忽视。贮氢合金粉体在生产过程中需经历熔炼、破碎、研磨、筛分等多道工序，会产生大量微细金属粉尘。这类粉尘不仅具有金属粉尘的一般爆炸特性，还可能因储氢材料自身析出氢气而显著增加爆炸危险性。研究表明，部分储氢材料粉尘在空气中的最小点火能量极低，如铝氢化物（AlH_3）粉尘的最小点火能量仅 1mJ；当颗粒从 50μm 降至 10μm 时，最大爆炸压力可骤升 40%。

近年来，随着固态储氢材料产业化进程加速，相关粉尘爆炸事故风险日益凸显。2025 年 2 月山东青岛某食品配料企业发生粉尘爆炸事故，造成 5 人死亡；2025 年 3 月河北某机械加

工企业发生铝合金粉尘爆炸事故，造成 20 人受伤。这些事故暴露出涉爆粉尘企业在除尘系统设计、防爆措施落实、安全管理等方面存在的突出问题。然而，针对固态储氢合金生产这一特定场景的粉尘防爆系统研究尚不充分，亟须开展专项风险识别与防爆对策研究。

本文以某贮氢合金有限公司为研究对象，通过对研磨作业区、气流磨作业区、混料作业区等涉粉工艺环节的系统排查，结合《工贸企业重大事故隐患判定标准》（应急管理部令第 10 号）、《粉尘防爆安全规程》（GB 15577–2018）、《可燃性粉尘除尘系统防爆安全规范》（GB 17919–2025）、《可燃粉尘工艺系统防爆技术规范》（GB 46031–2025）等现行标准规范，系统识别粉尘爆炸风险，并提出针对性防爆对策，以期为固态储氢及类似金属粉尘涉爆企业的安全生产提供技术参考。

1 固态储氢合金生产工艺与涉粉环节

1.1 生产工艺流程

贮氢合金生产通常以稀土、镍、钴、锰、铝等金属为原料，经精准配比后在真空氩气保护下高温熔炼，经快速冷却制成合金锭，再进行真空退火处理以优化性能、消除内应力，最后将合金锭破碎、筛分分级，经检验合格后包装入库。

1.2 涉粉工艺环节

在上述生产流程中，从合金锭破碎、研磨、气流磨、筛分、混料到真空装袋的全流程均会产生贮氢合金粉尘。具体涉粉区域包括研磨作业区、气流磨作业区和混料作业区。

研磨作业区：合金锭经粗碎后进入研磨工序，在研磨过程中产生大量微细金属粉尘。该区域配置有湿式除尘系统对产尘点进行捕集。

气流磨作业区：研磨后的粉料进入气流磨进行精细粉碎，利用高速气流带动颗粒相互碰撞实现粉碎。该区域投料部位设置有两级除尘装置，其中二级湿式除尘采用正压吹送方式。此外，该区域还涉及氮气惰化保护，存在惰化介质泄漏风险。

混料作业区：经筛分后的粉料在混料机内进行充分搅拌混合，此过程同样产生粉尘。该区域目前未设置除尘装置。

上述三个涉粉区域位于同一多层厂房内，各区域产尘点通过管道汇集至一套湿式除尘系统进行集中处理。

1.3 粉尘爆炸特性

通过对除尘器灰斗下方选取的代表性粉尘样品进行测试，依据“ASTME1226–12a”测试标准，采用 20L 爆炸测试装置进行粉尘爆炸性筛选测试。试验结果表明，在试验条件下贮氢合金粉的粉尘云状态达到粉尘爆炸性判定标准，判定为“爆炸性”粉尘。这意味着该企业涉粉工艺环节具有明确的粉尘爆炸风险，必须按照粉尘涉爆企业的要求落实各项防爆措施。

2 粉尘爆炸风险识别

2.1 除尘系统方面的隐患

（1）不同防火分区共用除尘系统

该企业研磨区域一套提升系统、一套三级破碎系统、三个研磨车间共计占用三层厂房。存在同一建（构）筑物不同防火分区的产尘点共用一套湿式除尘系统的情形，不同工艺分片（分区域）未相对独立设置除尘系统。

根据《工贸企业重大事故隐患判定标准》第十一条第（二）项，不同建（构）筑物、不同防火分区共用一套除尘系统、除尘系统互联互通的，应当判定为重大事故隐患。《粉尘防爆安全规程》（GB 15577–2018）第 8.1.3 条明确规定“应按工艺分片（分区域）设置相对独立的除尘系统”，第 8.1.4 条规定“不同防火分区的除尘系统不应连通”。《可燃性粉尘除尘系统防爆安全规范》（GB 17919–2025）第 4.2 条进一步明确，同一建（构）筑物不同防火分

区的产尘点不应共用一套除尘系统。

一旦除尘系统发生爆炸，爆炸火焰和冲击波将通过除尘管道传播至所有相连的防火分区，导致事故影响范围扩大，可能造成重大人员伤亡。

（2）正压吹送除尘方式缺乏点火源防范措施

气流磨作业区投料部位设置的两级除尘装置中，二级湿式除尘属于正压吹送方式。铝镁等金属粉尘采用正压除尘方式，构成重大事故隐患。

《工贸企业重大事故隐患判定标准》第十一条第（四）项规定，铝镁等金属粉尘除尘系统采用正压除尘方式的，应判定为重大事故隐患。《可燃性粉尘除尘系统防爆安全规范》（GB 17919–2025）第 4.13 条规定“可燃性金属粉尘除尘系统应采用负压除尘方式”，第 4.14 条规定“可燃性金属粉尘除尘系统采用多级除尘器串联时，除尘器之间不应设置除尘风机”。正压除尘方式中，风机处于除尘器上游，含尘气流经过风机时，粉尘可能与风机叶轮摩擦产生火花，一旦火花进入除尘器箱体，可能引燃积聚的金属粉尘，导致爆炸事故。

（3）除尘系统监测报警装置缺失

研磨区域湿式除尘系统未设置流速连续监测报警装置；湿式除尘系统设计文件中未标明水量及流量要求，除尘器本体也未在显著位置标明相关参数；除尘系统不具有接入粉尘涉爆企业安全生产风险监测预警系统的功能。

《粉尘防爆安全规程》（GB 15577–2018）第 8.4.10 条规定，湿式除尘系统应设置液位、流速的连续监测报警装置。《可燃性粉尘除尘系统防爆安全规范》（GB 17919–2025）第 5.2.2 条规定“水量、流量应能满足去除进入除尘器粉尘的要求，湿式除尘系统设计文件中应标明水量及流量，并应在湿式除尘器显著位置标明”，第 7.8 条规定“除尘系统应具有接入粉尘涉爆企业安全生产风险监测预警系统的功能”。

2.2 工艺设备方面的隐患

（1）缺少杂物去除装置

气流磨区域、研磨区域的破碎入口处未设置铁、石等杂物去除装置。在原料破碎过程中，原料中可能混入的铁块、石块等硬质杂物，在破碎、研磨设备中可能因摩擦、撞击产生机械火花，成为粉尘爆炸的点火源。

《工贸企业重大事故隐患判定标准》第十一条第（八）项规定，粉碎、研磨、造粒等易产生机械点燃源的工艺设备前未设置铁、石等杂物去除装置的，应判定为重大事故隐患。《可燃粉尘工艺系统防爆技术规范》（GB 46031–2025）第 5.1.5 条同样规定“粉碎、研磨、造粒等易产生机械点燃源的工艺设备前，应设置铁、石等杂物去除装置”。

（2）氧浓度监测与报警不完善

气流磨区域、研磨区域、混料区域未设置环境氧浓度监测报警装置；氮气储罐区域未设置气体泄漏监测装置；部分氧含量监测仪器数值存在零点偏移，影响监测准确性；研磨区域环境氧气监测仅有数值显示，无现场声光报警功能。

《可燃性粉尘除尘系统防爆安全规范》（GB 17919–2025）第 6.5.2 条规定“采取气氛惰化措施时，应在车间内可能发生惰化介质泄漏的位置，设置氧浓度监测报警装置”。《可燃粉尘工艺系统防爆技术规范》（GB 46031–2025）第 5.1.4 条规定“采取气氛惰化时，应在工艺系统中氧含量最高部位设置氧含量测点，并对阀门、管道连接处等可能发生惰化介质泄漏的位置进行风险分析，设置氧浓度或惰性气体浓度监测报警装置”。

2.3 电气设备与静电防控方面的隐患

（1）电气设备不满足防爆要求

现场粉尘防爆区域内存在多处电气设备不满足粉尘防爆要求的情况，包括：气流磨区域设置的普通插线板、初级颚破氧含量监测装

置、斗提机区域电缆穿线管、动力电机；研磨区域的照明、控制开关、换气风机、研磨机控制配电箱等。此外，制粉作业区三层粉尘涉爆场所内设置有砂轮机，存在产生火花的风险。

《粉尘防爆安全规程》（GB 15577–2018）第 6.3.3 条规定“粉尘爆炸危险场所用电气设备应符合 GB 12476.1、GB 12476.2 的相关规定；应防止由电气设备或线路产生的过热及火花，防止可燃性粉尘进入产生电火花或高温部件的外壳内”。《可燃性粉尘除尘系统防爆安全规范》（GB 17919–2025）第 4.16 条规定“除尘系统电气设计、选型和安装应符合 GB 50058、GB 3836.15 的相关要求”。

（2）静电接地与跨接措施不完善

气流磨区域分离出的细粉装袋金属筒、研磨装置、筛分装置等均未设置导静电装置；筛分设备与进料管道和出料管道之间的软连接两端未采取防静电跨接措施；气流磨作业区静电接地未设置为等电位连接；制粉作业区多处接地线排未设置为等电位连接；金属管道法兰连接处、软连接两端、阀门两端等可能出现导静电不连续的部位部分未设置防静电跨接。

《粉尘防爆安全规程》（GB 15577–2018）第 6.3.2 条规定，所有金属设备、装置外壳、金属管道、支架、构件、部件等应采用防静电直接接地措施；第 8.1.5 条规定“除尘系统的导电部件应进行等电位连接，并可靠接地，接地电阻应小于 100Ω；管道连接法兰应采用跨接线”。

（3）人体静电消除措施缺失

气流磨区域、研磨区域、混料区域等涉爆场所入口未设置人体静电消除装置。作业人员进入涉爆区域时如未有效释放人体静电，可能成为点火源。

2.4 粉尘控制与清理方面的隐患

研磨区域湿式除尘系统循环水池泥浆较多，未规范定期清理清淤，无法保证良好的通风；气流磨作业区设备设施部位存在积尘未及时全面规范清扫。

《粉尘防爆安全规程》（GB 15577–2018）第 9.4 条规定“所有可能沉积粉尘的区域及设备设施的所有部位应进行及时全面规范清扫”；第 8.4.10 条规定“应及时清除沉淀的泥浆，并保证水槽（箱）及水质过滤池（箱）无论除尘器处于开启或者停止状态，都要有良好的通风”。

2.5 安全管理方面的隐患

（1）安全管理制度不健全

企业未明确主要负责人作为粉尘防爆安全工作的第一责任人职责；粉尘防爆安全管理制度缺失多项关键内容，包括粉尘爆炸风险辨识评估和管控、粉尘爆炸事故隐患排查治理、粉尘防爆专项安全生产教育和培训、除尘系统和相关安全设施设备运行维护及检修维修管理等。

（2）培训与应急管理不到位

未对粉尘防爆的生产、设备、安全管理等有关负责人进行专项安全生产教育和培训；培训内容缺失粉尘爆炸事故防范内容；考试试卷基本未涵盖培训内容；2026 年培训计划未涵盖粉尘爆炸事故应急救援预案及组织演练。

（3）检修与档案管理缺失

未建立除尘系统使用、维护及检修档案；未提供粉尘爆炸危险场所设备设施或除尘系统的检修维修作业审批单。

3 防爆对策

3.1 除尘系统改造对策

（1）按防火分区独立设置除尘系统

查找消防验收资料，确认各区域是否属于不同防火分区。如确属不同防火分区，应按照同一防火分区独立设置一套除尘系统的原则进行配置改造。不同工艺分片（分区域）应设置相对独立的除尘系统，杜绝不同防火分区除尘系统互联互通。

（2）改造正压除尘方式

气流磨作业区投料部位的正压吹送除尘方

式应进行改造。由于金属粉尘严禁采用正压除尘方式，建议取消现有收尘方式，增设湿法除尘装置，将正压方式改造为负压方式。若短期内无法完成改造，应在风机与除尘器箱体之间增设火花探测及消除等防范点燃源措施。

（3）完善监测报警装置

湿式除尘系统应增设流速连续监测报警装置；在湿式除尘器显著位置标明设计水量及流量要求；除尘系统应增设接入粉尘涉爆企业安全生产风险监测预警系统的功能，上传数据应包括但不限于除尘系统启停信号、水箱水位信号等。

（4）规范除尘系统运行管理

除尘系统的启动应先于生产加工系统启动，生产加工系统停机时除尘系统应至少延时停机 10min；循环水池应建立定期清理制度，及时清除沉淀的泥浆，保证良好通风。

3.2 工艺设备防爆对策

（1）加装杂物去除装置

在气流磨区域、研磨区域的破碎入口处增设铁、石等杂物去除装置，如永磁铁、永磁筒、电磁铁、筛网、气动分离器等。定期检查清理除杂装置，确保其有效性。

（2）完善氧浓度监测与报警体系

在气流磨区域、研磨区域、混料区域等惰化介质容易泄漏的位置、人员频繁操作的区域增设环境氧浓度监测报警装置；氮气储罐区域应设置气体泄漏监测装置；对现有氧含量监测仪器进行校准，消除零点偏移；研磨区域环境氧气监测应增设现场声光报警功能；选取工艺系统中氧含量最高部位设置氧含量测点。

3.3 电气设备与静电防控对策

（1）更换防爆电气设备

依据粉尘防爆分区结果，严格按照 GB 50058、GB 3836.15 等标准要求进行电气设计、选型和安装。将涉爆区域内的普通插线板、非防爆开关、非防爆电机等全部更换为适用的粉尘防爆型电气设备；将设置在粉尘涉爆场所内的砂轮机移出，防止产生火花。

（2）完善静电接地与跨接

对所有金属设备、装置外壳、金属管道、支架、构件、部件等增设防静电直接接地措施；对金属管道法兰连接处、软连接两端、阀门两端等可能出现导静电不连续的部位进行防静电跨接；除尘系统的导电部件应进行等电位连接并可靠接地，接地电阻应小于 100Ω；筛分设备与进料管道和出料管道之间的软连接两端应采取防静电跨接措施。

（3）增设人体静电消除装置

在涉及粉尘爆炸的区域入口处增设人体静电消除装置，并严格执行进入此类区域的人员进行静电消除工作。

3.4 粉尘控制与清理对策

制定粉尘清理制度，明确清理范围、清理周期、清理方式和责任人员。至少每班清理吸尘罩、干式除尘器卸灰收集容器等部位；至少每周清理除尘风机、干式除尘器灰斗等部位；至少每月清理主风管和支风管、防爆装置、除尘器箱体内部等部位。清理作业时应采用不产生扬尘的清扫方式和不产生火花的清扫工具。循环水池应定期规范清理清淤，确保良好的通风。清理记录应如实填写并存档。

3.5 安全管理体系完善对策

（1）健全安全管理制度

在安全生产责任制中明确主要负责人是粉尘防爆安全工作的第一责任人，明确相关部门负责人、生产车间负责人及粉尘作业岗位人员的粉尘防爆安全职责。完善粉尘防爆安全管理制度，补充粉尘爆炸风险辨识评估和管控、粉尘爆炸事故隐患排查治理、粉尘防爆专项安全生产教育和培训、除尘系统和相关安全设施设备运行维护及检修维修管理、粉尘爆炸事故应急处置和救援等内容。

（2）加强培训与应急管理

按规范要求组织涉及粉尘防爆的相关人员

进行专项培训；培训内容应涵盖粉尘爆炸事故防范和应急措施；考试试卷应涵盖培训内容，错题应订正；制定粉尘爆炸事故应急救援预案并定期组织演练。

（3）规范检修与档案管理

建立除尘系统使用、维护及检修档案；粉尘爆炸危险场所设备设施检修作业应实行审批制度；干式除尘系统应至少每季度进行全面维护检修，湿式除尘系统应至少每月进行全面维护检修。

（4）完善风险辨识与隐患排查

定期辨识粉尘云、点燃源等粉尘爆炸危险因素；建立安全风险清单，涵盖除尘器、除尘管道等相关设备；依据《生产安全事故分类与编码》（GB6441-2025）规范事故类型分类；建立事故隐患排查清单，明确排查事项、具体内容、排查周期及责任人员。

4 结 论

本文以某贮氢合金有限公司为研究对象，通过对研磨作业区、气流磨作业区、混料作业区等涉粉工艺环节的系统隐患排查与标准对照分析，全面识别了固态储氢合金生产过程中的粉尘爆炸风险。研究表明，贮氢合金粉尘具有爆炸性，其生产过程中的粉尘爆炸风险不容忽视。主要隐患集中在除尘系统设计缺陷（不同防火分区共用除尘系统、正压除尘方式）、监测报警装置缺失、防爆电气不达标、静电防控不到位、粉尘清理不规范以及安全管理制度不健全等方面。

针对上述问题，本文提出了系统的防爆对策，涵盖除尘系统改造、工艺设备防爆、电气设备与静电防控、粉尘控制与清理以及安全管理体系完善等五个方面。这些对策以《工贸企业重大事故隐患判定标准》（应急管理部令第10号）、《粉尘防爆安全规程》（GB 15577-2018）、《可燃性粉尘除尘系统防爆安全规范》（GB 17919-2025）、《可燃粉尘工艺系统防爆技术规范》（GB 46031-2025）等现行标准规范为依据，具有较强的针对性和可操作性。

随着固态储氢材料产业化进程的加速，相关企业的粉尘防爆工作面临新的挑战。建议企业：（1）高度重视贮氢合金粉尘的爆炸危险性，将其纳入粉尘涉爆企业管理体系；（2）对照最新标准规范，系统开展隐患排查与整改；（3）重点加强除尘系统的本质安全设计，杜绝不同防火分区共用除尘系统等重大隐患；（4）完善监测预警体系，将除尘系统接入安全生产风险监测预警平台；（5）建立健全粉尘防爆安全管理长效机制，从制度、培训、应急、检修等各环节全面提升安全管理水平。

本研究可为固态储氢及类似金属粉尘涉爆企业的隐患治理与安全管理提供技术参考，助力实现氢能产业的高水平安全发展。

参考文献

［1］中华人民共和国应急管理部。工贸企业重大事故隐患判定标准：应急管理部令第 10 号（2023-05-15）.

［2］中华人民共和国应急管理部。工贸企业粉尘防爆安全规定：应急管理部令第 6 号（2021-07-25）.

［3］国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会。粉尘防爆安全规程：GB 15577-2018. 北京：中国标准出版社, 2018.

［4］国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会。可燃性粉尘除尘系统防爆安全规范：GB 17919-2025. 北京：中国标准出版社, 2025.

［5］国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会。可燃粉尘工艺系统防爆技术规范：GB 46031-2025. 北京：中国标准出版社, 2025.

［6］α-AlH_3粉尘爆炸机理研究［J］.

［7］氢化钛储氢合金粉尘爆炸特性研究［J］.

［8］金属氢化物储氢风险评估研究进展［J］.

苏州市安全生产“六化”建设要求及运行情况调研与分析

——基于 81 家会员企业的实证研究

胡　敏，汤建荣，卜延超，王　欢
苏州应急与安全生产协会

摘　要：2025 年 6 月 1 日，《苏州市安全生产条例》正式施行，明确提出了“数字化、网格化、专业化、全员化、手册化、实体化”（简称“六化”）的安全生产管理要求。为准确掌握会员企业“六化”运行情况，苏州市应急与安全生产协会于 2025 年 9 月至 11 月对 81 家会员企业开展了专题调研。本文基于调研数据，分析了企业在“六化”建设方面的现状、成效与不足，并结合 2026 年苏州市安全生产“六化”建设工作要点和市安委会工作部署，提出了深化“六化”建设的对策建议。研究发现，企业在全员化、手册化、实体化方面基础较好，但在数字化深度应用、网格化考核激励、专业化工具运用等方面仍存在明显短板，中小微企业尤为突出。建议从政策引导、能力建设、资源对接、分类施策等方面协同发力，推动“六化”建设从“全面推开”走向“深度赋能”。

关键词：苏州市安全生产条例；六化建设；企业调研；安全治理

一、引言

安全生产是经济社会高质量发展的重要基石。苏州作为全国第一大工业城市，产业集聚效应明显，产业密集带来的安全风险也相对集中。2025 年 6 月 1 日施行的《苏州市安全生产条例》，立足苏州实际，创新提出了“数字化、网格化、专业化、全员化、手册化、实体化”的“六化”建设要求，为提升全市安全生产治理能力提供了制度保障。

然而，“六化”要求从政策文本到企业实践的转化，并非一蹴而就。不同行业、不同规模的企业在理解深度、资源投入、执行能力上存在显著差异。为准确掌握会员企业“六化”运行的真实状况，摸清痛点、了解需求，苏州市应急与安全生产协会于 2025 年 9 月至 11 月开展了专题调研。本文基于调研数据，系统分析企业“六化”建设现状，并结合 2026 年全市安全生产工作部署，提出深化“六化”建设的对策建议，以期为政策完善和企业实践提供参考。

二、调研设计与样本概况

（一）调研方法

本次调研采用在线问卷形式，通过协会微信公众号、会员群发放，调研时间为 2025 年 9 月 4 日至 11 月 24 日。问卷围绕“六化”六个维度，设置了 29 个核心问题，涵盖制度建设、人员配备、工具应用、数据管理、考核激励等方面。

（二）样本结构

共回收有效问卷 81 份，有效回收率 100%。样本分布如下：

行业分布：机械制造占比（约 15%），建筑施工（约 16%）、化工（约 16%）、商贸服务（约 4%）、轻工纺织（约 4%），其他行业约 45%。

企业规模：大型企业占比 28%，中型企业

30%，小型企业约 36%，微型企业约 6%。

填表人职位：企业负责人占比约 4%，安全总监/安全主管约 30%，安全管理员约 50%，其他约 16%。

样本具有一定的行业和规模代表性，能够反映会员企业“六化”建设的基本面貌。

三、“六化”建设运行情况分析

（一）数字化：平台建设初具规模，深度应用不足

1．主要发现

调研显示，55.56%的企业已接入或部分接入“苏应急”等政府监管平台；76.54%的企业使用移动端 APP/小程序进行日常安全巡检；但仅有 37.04%的企业能够对安全数据进行多维度统计分析并用于管理决策。30.86%的企业仍以纸质记录和人工检查为主。

2．突出问题

一是成本压力大，60.49%的企业将“成本投入过高”列为主要困难；二是人才短缺，27.16%的企业反映缺乏专业技术人员；三是数据孤岛现象普遍，系统集成度低，数据仅用于记录存储，未能有效支撑决策。

3．差异分析

大型企业数字化程度显著高于中小微企业。大型企业普遍建立了较为完善的 EHS 管理系统，而中小微企业多停留在单点应用或纸质记录阶段。

（二）网格化：体系覆盖较广，考核激励待加强

1．主要发现

87.65%的企业已建立网格化管理体系，其中“安全巡查”（93.83%）和“隐患上报”（91.36%）是网格员的核心职责。77.78%的企业建立了明确的考核标准并与绩效挂钩。

2．突出问题

一是考核机制缺失或激励不足，8.64%的企业未建立考核机制，部分企业虽有考核但无有效激励；二是网格员专业能力不足，尤其在应急处置方面存在短板；三是存在“定而不责、网而不动”的现象，网格化管理流于形式。

3．差异分析

大型企业在网格划分精细度、职责清晰度、考核激励方面均优于中小微企业。

（三）专业化：人员配备较规范，工具方法应用不均衡

1．主要发现

71.61%的企业配备了专职安全管理人员，62.96%的企业配备了注册安全工程师。61.73%的企业聘请安全专家进行专项指导，50.62%的企业聘请技术服务机构定期“体检”。54.32%的企业全面采用 LEC、JSA 等专业工具进行风险辨识，76.54%的企业对高风险作业制定了专项安全技术方案。

2．突出问题

一是工具方法应用不普及，仍有 6.36%的企业采用经验判断等非正式方法进行风险评估；二是安全管理人员配备存在缺口，1.23%的企业无明确安全管理人员，14.81%的企业由其他岗位人员兼职；三是外部服务利用不足，部分企业不知道从哪里寻找可靠的技术服务商。

3．差异分析

大型企业在注安师配备、专业工具应用、外部服务采购方面明显优于中小微企业。

（四）全员化：培训覆盖较广，参与深度有待提升

1．主要发现

91.36%的企业定期组织全员安全培训，93.83%的企业实现新员工“三级安全教育”100%覆盖。69.14%的企业建立了隐患举报奖励制度且员工积极参与。85.19%的企业实现了全员知晓自身安全职责。

2．突出问题

一是隐患举报奖励制度缺失，7.41%的企业未建立相关制度；二是“一岗一责”落实不到

位，9.88%的企业员工认知度和履行情况一般；三是员工参与机制不畅通，20.99%的企业安全规程主要由管理层制定，普通员工参与有限。

3．差异分析

大型企业在制度完善性、员工参与度方面优于中小微企业。

（五）手册化：规程编制较完善，验证考核存短板

1．主要发现

83.95%的企业为关键岗位编制了图文并茂、易理解的操作规程。82.72%的企业建立了手册定期评审更新机制。55.56%的企业有常态化考核机制验证员工掌握情况。

2．突出问题

一是操作规程缺失，2.47%的企业没有成文操作规程；二是更新机制不健全，1.23%的企业手册自发布后从未更新，7.41%的企业更新不及时；三是效果验证不足，6.17%的企业仅发放培训，未验证员工掌握程度。

3．差异分析

大型企业在手册质量、更新机制、考核验证方面均优于中小微企业。

（六）实体化：机构设置较规范，安全投入需保障

1．主要发现

90.12%的企业设置了安全管理机构并配备人员。69.14%的企业专职安全管理人员配备比例符合法规要求。53.09%的企业设置了安全总监，35.81%设置了其他专职安全分管负责人。81.48%的企业将安全投入单独列支、专款专用。92.59%的企业主要负责人定期主持召开安全会议并带队检查。

2．突出问题

一是安全总监制度落实不均衡，仍有约11%的企业未设置安全总监或专职分管负责人；二是安全投入保障不足，6.17%的企业未单独列支安全预算；三是主要负责人履职存在盲区，1.23%的企业主要负责人很少参与安全工作。

3．差异分析

大型企业在机构设置、人员配备、投入保障方面明显优于中小微企业。

四、核心发现与问题聚焦

（一）成绩与亮点

基础工作较为扎实：多数企业在全员化（培训、责任制）、手册化（规程制定）、实体化（机构设置、人员配备、安全投入）方面基础较好，各项指标均达到80%以上。

规上企业示范作用明显：大型企业在“六化”各维度的建设水平均显著高于中小微企业，发挥了较好的示范引领作用。

（二）共性挑战与痛点

“数字化”转型困境：中小微企业面临“不想转、不敢转、不会转”的难题，成本高、人才缺、系统集成度低是主要障碍。

“网格化”管理形似神不似：部分企业虽已划分网格，但存在“定而不责、网而不动”的现象，考核激励不足，网格员专业能力欠缺。

“专业化”支撑不均：外部服务利用不足，专业工具方法应用不普及，部分企业仍依赖经验判断。

“全员化”参与深度不足：隐患举报奖励制度覆盖率不高，员工参与规程制定的渠道不畅通。

“手册化”效果验证缺失：部分企业重编制、轻验证，员工是否真正掌握缺乏有效考核。

“实体化”落实差异大：中小微企业安全投入保障不足，安全总监制度落实不均衡，主要负责人履职存在盲区。

五、对策建议

（一）强化政策引导，加大扶持力度

出台差异化实施细则：针对不同行业、不同规模企业，制定更细致的“六化”实施指南，避免“一刀切”。

设立专项补贴：对中小微企业数字化改

造、专业化服务采购、注安师考培等提供财政补贴或税费减免，降低企业合规成本。

优化监管方式：将“六化”要求融入日常检查标准，重点考察运行实效而非纸面材料，避免“形式主义”。

（二）加强能力建设，补齐专业短板

推进注安师培育：落实 2026 年全市通过考试人数不低于 3000 人的目标，对中小企业从业人员参加注安师考试给予费用补助。

推广“安全管家”模式：鼓励小微企业组团引进专业安全服务，弥补自身专业能力不足。

强化网格员队伍建设：落实巡查员学历提升和直接聘用要求，建立分级分类考核激励机制。

（三）深化数字赋能，推动智能防控

推广轻量化解决方案：针对中小微企业开发低成本、易上手的数字化安全工具，降低数字化转型门槛。

推动人工智能应用：围绕风险研判、作业行为监管、应急调度等场景，打造实操化智能应用。

完善数据互联互通：推动企业安全数据与“苏应急”等政府平台对接，实现风险动态监测和预警。

（四）发挥协会作用，构建共治格局

开展专项培训：围绕“六化”建设，针对企业负责人、安全管理人员、网格员等不同群体开展分层分类培训。

建立资源对接平台：建立“安全生产技术服务商推荐名录”，组织技术供需对接会，解决企业“找服务难”的问题。

树立标杆示范：评选“六化”建设示范企业，组织观摩交流，推广典型经验。

提供精准咨询：组建专家团队，为中小微企业提供“一对一”合规诊断和技术指导。

（五）分类精准施策，缩小企业差距

大型企业：重点推动“人工智能+”深度应用，打造行业标杆，发挥“链主领安”作用，带动供应链企业提升安全水平。

中小微企业：聚焦基础能力建设，通过“安全管家”、组团服务、政策补贴等方式，帮助其补齐短板。

高危行业：紧盯化工、建筑施工、粉尘涉爆等重点领域，强化专业监管和技术支撑，推动老旧设备更新改造。

六、结语

《苏州市安全生产条例》“六化”要求的提出，是苏州市推进安全生产治理模式向事前预防转型的重要制度创新。本次调研表明，会员企业在“六化”建设方面取得了积极进展，但仍存在数字化深度不足、网格化考核缺失、专业化支撑不均、全员化参与不深、手册化验证不足、实体化落实不均等问题，中小微企业尤为突出。

2026 年是安全生产治本攻坚三年行动的收官之年，也是“十五五”规划的开局之年。苏州市明确提出，要以安全生产“六化”建设为统领，打造安全生产“135”防控体系，推动安全治理模式向事前预防转型。协会将以此次调研为契机，继续发挥桥梁纽带作用，推动调研成果转化为培训课程、技术标准和实操指南，为会员企业提供更加精准、专业的服务，为苏州建设更高水平的安全发展示范城市贡献力量。

参考文献：

［1］苏州市人民代表大会常务委员会.《苏州市安全生产条例》

［2］苏州市安全生产委员会. 2026 年苏州市安委会工作要点

［3］苏州市安全生产委员会. 2026 年安全生产“六化”建设工作要点

［4］苏州市应急与安全生产协会.《苏州市安全生产条例》“六化”要求运行情况调研报告

［5］江苏省安全生产委员会. 关于推进安全生产“六化”建设的实施方案（试行）

澳門中小企職業安全健康發展策略：挑戰、機遇與路徑

高俊雄
澳門職業安全健康協會

摘　要：澳門中小企業佔全澳企業總數九成以上，是推動經濟適度多元發展的重要基石。然而，中小企在職業安全健康（職安健）管理上，普遍面臨資源缺乏、專業知識不足及執行能力有限等結構性困境，從業人員安全意識薄弱，導致工作意外時有發生，衍生沉重社會成本。因此，如何有效提升中小企的職安健水平，已成為澳門可持續發展進程中需要關注的課題。

本文旨在系統分析澳門中小企推行職安健的現實制約，並探討切實可行的發展路徑。研究發現，相關挑戰主要體現於成本與人力壓力沉重，難以設立專責職安健崗位；管理層與僱員安全意識普遍不足，缺乏基本應急預案；以及資訊與技術不對稱，對新型設備與行業標準了解渠道有限，且缺乏外部資源篩選能力。

針對上述制約，文章指出，當前智慧科技與供應鏈機制為中小企提供了突破資源瓶頸的雙重契機。幫助無專職安全員的中小企降低管理成本；另一方面，各大綜合休閒企業在 ESG 規範下，透過「以大帶小」模式，將 ISO 45001 等認證納入採購門檻並進行技術輸出，形成了強大的商業驅動力和轉型誘因。

在實踐層面，企業應導入 PDCA（Plan-Do-Check-Act）循環管理模式，結合政府資助計劃與第三方認證，將安全標準轉化為日常檢查清單與標準作業程序（SOP），並由事故預防延伸至員工職業健康促進。本文章結論認為，特區政府、行業協會與中小企必須深化合作，透過政策扶持與資源共享降低門檻，方能在時代變遷中實現企業高質量轉型與職場安全的雙贏局面。

關鍵詞：智慧職安健/以大引小/澳門經濟適度多元化/澳門中小企

壹、引　言

自澳門特別行政區成立及博彩經營權開放以來，大型綜合休閒企業相繼落成，推動本澳經濟實現跨越式增長。然而，二十多年來的產業演變亦使經濟結構趨於單一。而單一產業存在着系統性風險，因此特區政府積極推行「經濟適度多元化」發展戰略，鼓勵青年投身多元領域，為澳門長期繁榮奠定堅實基礎。

在此轉型歷程中，中小企業發揮著不可替代的核心作用。目前，中小企佔全澳商戶總數高達九成以上，總數約 15，000 間，是本澳經濟結構的骨幹與主要支柱。根據《新華澳報》（2025 年 2 月 12 日）〈淺析澳門中小企業的突圍之路〉一文指出，截至 2025 年，中小企貢獻了全澳約 45%的就業崗位，為本地居民提供大量工作機會；在經濟貢獻方面，雖然其增加值佔本地生產總值（GDP）的比重相對較低（約 28%），但仍肩負著推動經濟適度多元化的重任。中小企的健康營運與穩健發展，直接關係

到本澳產業轉型的成敗與社會的和諧穩定。因此，關注並提升中小企的營運韌性與安全管理，已成為當前不可忽視的重要課題。

此外，人力資源短缺一直是制約澳門中小企可持續發展的重大挑戰。要在競爭激烈的市場中實現穩健營運，穩定且優質的人工資源配置不可或缺。當前，吸引與留住人才的關鍵，已不僅限於具競爭力的薪酬待遇，完善的員工福利及良好的職業安全健康環境，日益成為員工選擇與長期留任的核心考量因素。

在此背景下，職安健（OSH）扮演著舉足輕重的角色。高標準的安全保障能為員工締造安心、尊重的作業環境，從源頭降低工傷事故與職業病的發生率，從而減省企業因工傷賠償及人員輪替所帶來的隱性成本。更重要的是，優良的安全文化能顯著提升員工的歸屬感與工作滿意度，促進勞資關係的和諧發展。因此，積極投入職安健建設，不僅是中小企履行社會責任的體現，更是其緩解人手短缺、提升留才吸引力，進而實現長期可持續營運的關鍵戰略。

基於此，本文章將深入探討澳門中小企業在推動職業安全健康時所面臨的各項實質障礙；同時，立足於本澳特殊的經濟環境，為特區政府、行業協會及中小企自身，建議一套可行且具成本效益的「漸進式」職安健發展策略，以期引導企業循序漸進提升安全管理水平，實現可持續發展。

貳、澳門中小企推動職安健面臨的核心挑戰

中小企業一直是澳門經濟體系中的核心支柱，承載著本澳絕大部分的就業人口。然而，在經歷新冠疫情的衝擊後，當前澳門中小企業正處於深度的轉型陣痛期。正如甘益菲與劉丁己（2024）在《澳門中小企業：過去輝煌、現狀、挑戰與未來機遇》一文中所指出的，本澳中小企當前雖面臨「北上消費」潮的市場擠壓、數位化轉型滯後，以及人口老齡化等多重嚴峻挑戰，但同時亦迎來粵港澳大灣區加速融合、橫琴粵澳深度合作區建設，以及中葡平台深化運作等重大戰略機遇。在這種「挑戰與機遇並存」的複雜環境下，如何提升中小企的生存韌性與管理水平，成為社會各界關注的焦點。

然而，相較於本澳林立的世界級娛樂休閒綜合度假企業，中小企在推動職業安全健康（OSH）管理方面顯得尤為艱難。在多重外在衝擊與經營壓力下，中小企在職安健發展上面臨著以下四大深層次挑戰：

1. 資源配置傾斜與經營生存壓力

在高度競爭的市場環境中，中小企為了維持基本運營與生存，絕大部分的有限資金與資源均被迫優先投放在貨物採購、市場行銷及直接帶來營收的業務上。對於涉及職場安全的長期投入——例如定期更換與維護生產機械裝備、改善作業環境，乃至購置成本高昂的高規格防護設施等——企業往往無力顧及，甚至將其視為可有可無的項目排在資源分配的最後順位。這種「重營運、輕安全」的短視現象，使得許多中小企長期處於安全硬件設施老化、隱患積聚的危險狀態。

2. 博企的「擠出效應」

賭權開放以來，世界級博彩休閒產業的蓬勃發展雖然帶動了澳門經濟的飛躍，但博企憑藉強大的資金實力、優越的薪酬福利與完善的晉升機制，對本地勞動力市場產生了嚴重的「擠出效應」。這使得中小企在招募與留住人才（特別是青年專才）方面陷入極度被動的困境。在連維持基本運營人力都極度頻乏的前提下，中小企僱主極難再額外撥出資源聘用專職的安全督導員。結果，安全管理工作往往由管理層或普通員工兼任，導致「一人多職、身兼數職」的普遍現象，使職安健管理在企業日常運營中被徹底邊緣化。

3．僱主與僱員安全文化意識之缺失

從企業文化與風險意識的角度來看，中小企內部普遍缺乏預防為先的安全價值觀。在僱主層面，許多管理者仍抱持傳統觀念，將職安健視為增加營運負擔的「額外開支」，而非一項能減少工傷賠償、提升營運效率的「長期投資」。在僱員層面，從業人員普遍存在僥倖心理與習慣性違規行為。為了圖一時方便或提高工作速度，員工往往忽視既定的安全標準作業程序（SOP）；只要未即時引發嚴重的工傷事故，便對安全違規視而不見。這種由上至下的安全意識淡漠，構成了職安健落實的大障礙。

4．勞動力老齡化與職業健康風險交織

與此同時，澳門正面臨日益嚴峻的人口老齡化趨勢，這一人口結構變化也直接反映在中小企的勞動力構成上。隨著本澳在地員工年齡逐漸老化，高齡僱員在面對繁重或重複性的勞動時，健康風險顯著增加。諸如職業性骨骼肌肉傷患、慢性疲勞以及因身體機能衰退引發的跌倒、誤操作等意外事故日益突出。老齡化勞動力對職場健康防護提出了更高要求，但中小企缺乏針對高齡員工的體力處理操作改善方案與健康管理機制，致使職業健康問題進一步惡化。

叁、澳門中小企職安健發展的新機遇

儘管中小企業面臨資源有限、經營壓力大等內外部挑戰，但在澳門政府政策支持與大型休閒企業合作帶動下，仍迎來眾多發展機遇。政府透過資助、培訓及輔導計畫，協助中小企提升營運與管理能力；大型企業則透過採購、合作及資源共享，為中小企創造市場與發展空間，共同推動產業穩健發展。以下我們遂一剖釋說法。

1．特區政府的扶持政策

特區政府近年大力推行多元化的扶持政策，旨在將職安健理念深入推廣至各行各業，提升僱主與僱員的安全意識。其中，勞工事務局（DSAL）持續優化並推出多項針對中小企的「職安健設備推廣計劃」。凡僱員人數在 300 人或以下的本澳中小企均可提出申請，合資格企業不僅可免費獲贈相關職安健設備，包括：流動式臨時防墮繫穩裝置、急救箱、安全鞋、安全帶、防墮器及獨立救生繩、輕便工作台、手提水氣掣、抗熱服及防曬帽套、防割及隔熱手套。其僱員亦能獲得配套的專業培訓。目前該計劃已涵蓋高空工作、建造業及餐飲業等 8 大項針對性方案。

同時，勞工局網頁亦特別設立「職安新天地」專題介面，為業界與從業員提供集資助申請、培訓資訊、法律法規及推廣活動於一體的一站式線上資源平台。

另一方面，為鼓勵企業優化內部管理體系、提升生產力與市場競爭力，澳門生產力暨科技轉移中心（CPTTM）亦推行了國際管理系統標準認證資助計劃。該計劃涵蓋質量管理、環境管理、食品安全以及職業安全健康管理（如 ISO 45001）等多個領域，為有意引進國際標準管理體系的中小企業提供第三方認證的財政資助。這些由政府及專業機構主導的政策與資源，顯著降低了中小企推行職安健的初期門檻與財務壓力。

2．智慧職安健推廣

「智慧職安健」（Smart OSH）是指整合人工智慧（AI）、物聯網（IoT）、穿戴式裝置及大數據分析等前沿科技，以實現職場安全管理自動化與精準化的創新模式。近年來，AI 技術已廣泛應用於日常營運與生產範疇，不僅顯著提升了工作效率，更為傳統職安健管理帶來了革命性的突破。

長期以來，本澳中小企受限於人力資源短缺與市場消費模式轉型等壓力，雇主往往將職安健視為額外的經營成本，對引進新式安全設備意願較低。然而，智慧科技的快速普及與輕

量化，恰恰為中小企突破資源瓶頸提供了全新的解方。透過將傳統「事後應變」的被動管理，轉型為「事前預防」與「即時監控」的主動模式，智慧職安健正為中小企帶來三大核心機遇：

（1）政策導向與試點經驗的示範效應

特區政府近年積極推動科技與職安健的結合。自 2023 年第 2/2023 號法律《建築業職業安全健康法》生效以來，當局便在「安全管理人員持續進修計劃」中引入「AI 賦能建築安全管理」等專題研討，範疇涵蓋智能工地監測與醫療防護等領域。勞工事務局（DSAL）更於 2026 年 6 月推出「移動機械人工智能警報系統先導計劃」，透過 AI 影像辨識即時警示危險距離，建立「人機分隔」的智能安全防線。這些政策試點證明了智慧技術已從大型工程轉向具體場景應用，為中小企提供了成熟且可複製的經驗。

（2）降低監管負擔與減省成本

中小企往往缺乏足夠的人力配備專職安全督導員。而智能監測設備（如便攜式 AI 攝影機、智能安全帽及環境感測器）能充當「不休息的安全員」，進行 24 小時無間斷的隱患排查與違規警示。這不僅能大幅降低因人手不足導致的管理盲區，更能從源頭杜絕嚴重工傷，減輕後續昂貴的醫療賠償、停工損失及保險費上漲等隱性成本，實現「以小博大」的經濟效益。

（3）考察交流與技術借鑑促進發展

透過政府及行業協會組織業界赴鄰近城市參與職安健科技博覽會與學術座談會，中小企經營者能直觀體驗智慧科技在員工健康監測、高空作業防護及微型作業場景中的靈活應用。這有助於打破「高科技等於高不可攀」的刻板印象，引導中小企採取智慧方案，以極低成本實現安全管理的跨越式升級。

3．供應鏈驅動：「以大帶小」機遇

自博彩經營權開放以來，多家世界級綜合娛樂休閒度假村相繼在澳門落成，成為吸引國際旅客的核心引擎。根據澳門特別行政區政府統計暨普查局（DSEC）於 2026 年 5 月 22 日公布的最新數據顯示，2026 年 4 月入境旅客按年顯著上升 11.3%至 3,441,396 人次，且首季旅客總消費額亦錄得大幅增長。博企的強勁復甦不僅帶動了自身的營運，更為周邊的本地中小企創造了龐大的商業契機。中小企與各大博企之間已形成緊密的互利共生關係，而成功打入六大博企的採購供應鏈，更是眾多本地中小企拓展業務、實現穩健營運夢寐以求的戰略轉折點。

這種深度的商業合作，為推動中小企提升職安健水平提供了「以大帶小」的強勁驅動力。大型綜合休閒企業為了履行企業社會責任（CSR）、符合 ESG（環境、社會與公司治理）規範以及維護優質的品牌形象，對其供應鏈的安全管理提出了嚴格要求。博企往往將考取 ISO 45001 職業安全衛生管理系統或 ISO 9001 質量管理體系等國際認證，作為篩選合格供應商的硬性指標。在強烈的商業訂單誘因下，中小企雇主不再將職安健視為被動的行政負擔，而是主動調動資源進行安全改善，直至達到博企的合規門檻。

與此同時，部分博企更主動發揮技術領頭羊的角色，設立「供應商培訓學院」或專屬交流平台，利用其龐大的企業資源與專業團隊進行「技術輸出」。博企派出資深的職安健專員，深入指導中小企優化作業現場的安全管理技術與風險防控流程，手把手協助其建立符合國際標準的管理體系。這種透過供應鏈權責約束與專業技術輔導相結合的「以大帶小」模式，不僅大幅降低了中小企獨自探索職安健轉型的門檻與成本，更成功將大型企業的安全文化與技術資源有效下沉至本地中小企，實現了博企、中小企與本澳整體職場安全的「多贏」局面的形成。

肆、基於 PDCA 循環的澳門中小企職安健提升實踐路徑

澳門中小企業指員工規模 100 人以下的小型組織，具備組織結構簡單、溝通直接、管理層級少、運作彈性高的核心優勢；老闆與員工互動緊密，指令傳達效率、員工參與度均優於大型官僚化企業，為職安健管理落地提供天然優勢。

PDCA（Plan 計畫、Do 執行、Check 核查、Act 改進）是中小企業實用的系統化管理工具，透過「計畫—執行—檢核—優化」的循環運作，固化為企業專屬管理模式。當前國際最權威的職業安全衛生管理體系，包括 ISO 45001 職業安全衛生管理系統、國際勞工組織 ILO-OSH 2001 指引，及各國職安健法規與系統化管理規範，均以 PDCA 循環為核心架構建置。

對中小企業而言，如何提升自身安全管理能力是實現可持續經營的核心課題。將 PDCA 循環管理模式導入職安健策略思考框架，是引導企業由「被動應變、事後處理」轉化為「主動預防、事前管控」最為系統化且高效的途徑。（Stig Vinberg，Department of Health Sciences，Mid Sweden University，Sweden Industrial Health 2020，58，303-305，Occupational Safety and health challenges in small scale enterprises.）

1．計劃階段（PLAN）－主動政府資源對接及員工全面健康預防

特區政府每年投放大量資源有關職安健範疇，尤其是引入「國際管理系統標準認證資助計劃」，同時並針對中小企簡化申請及審查流程。透過提高認證費用資助比例、提供前期顧問診斷，降低企業引進 ISO 45001 等體系的財務與行政門檻，誘發中小企主動進行安全轉型。

另外，企業應積極托展職安健於員工健康關顧層面，因應本地勞動力老齡化趨勢，職安健管理應由傳統的「事故預防」延伸至「健康促進」。政府與企業應高度關注職業性慢性疲勞等潛在風險，導入智能科技進行健康評估與定期動態監測，並提供預防性康復指導。這能有效降低因過度疲勞引發工傷事故的機率，透過完善健康管理系統，全方位延續中高齡員工的人力資本價值。

2．執行階段（DO）－積極使用智慧科技及與產業生態圈產生協同效應

政府及協會一直著力協助本地中小企在進一步擴大推廣及引入人工智能設備及系統支援，提供不同資助方案，及擴大相關員工培訓，中小企可以多了解多明白，人工智能技不是高昂遙不可及的費用，是可以根據不同行業不同需要而制訂，適當的人工智能運用，可以協助企業更有效地執行各項事務。

鼓勵更多中小企業與大企業合作，成為大企職安健標準訓練旗下的供應商，參與培訓，積極配合及考取相關職安健證書，藉此可以有機會成為大企供應商帶來生意的同時，也同時提升中小企本身的職安健水平。

提升人力資本是中小企不可劃缺課題，行業之間可聯動一起，建立互動資淡中心，共享一些就相關行業職的職安健資訊，聯動企業互相交流，提供經驗分享及對行業有效的職安健指引，提升企業管理質素。

3．檢查階段（CHECK）－認證審核與智慧監督

當中小企決定考取國際管理系統標準認證時，系統化管理、日常作業監測及危機處理機制均會納入審核標準。第三方認證機構透過定期的稽核與審查，能將抽象的認證標準轉化為企業日常操作的定期檢查清單；藉由這種外在約束與持續運作機制，能有效促使中小企養成定期自主檢測的安全管理習慣。

與此同時，中小企可適時導入輕量化的人工智慧（AI）工具進行動態監測，充當無間斷的安全巡檢員，及時識別作業隱患並預警，從源頭大幅降低事故發生率。再配合針對性的員

工安全培訓，能讓技術監控與人為操作相互補足，實現高效率、高精準度的職場安全核查。

4．改進階段（Act）－機制優化並進行檢討

針對 Check 階段所識別的安全隱患與管理缺失，企業應及時採取矯正措施並進行深層檢討。對於最初 Plan 階段設定過於理想化或不切實際的指標，應予以務實修正；同時可主動與行業協會或同業交流經驗，汲取最佳實踐方案。最終，將優化後的作業流程轉化為標準化作業程序（SOP），並融入日常員工培訓與運作中，為開啟下一輪 PDCA 循環奠定堅實基礎，實現安全管理的持續改進。

伍、結論與展望

當前澳門中小企業正面臨市場轉型與激烈競爭的多重考驗；加上人口老齡化與勞動力供給收縮，已成為本澳及鄰近地區共同面對的嚴峻社會課題。在企業光是維持日常經營已極具挑戰的背景下，欲額外投放資源於職安健建設更是難上加難。然而，職安健不僅關乎工傷預防，更是企業實現可持續經營的基石，亦是保障並提升人力資本價值最直接高效的途徑。

展望未來，要推動職安健向更深層次發展，離不開特區政府與廣大中小企的共同努力與積極配合。我們期盼透過持續的交流合作與資源優化，凝聚起強大的社會合力。中小企更要發揮自主精神，積極落實安全管理，並藉助政府及行業協會搭建的「資源共享平台」，不斷深化職安健文化。職安健管理是一項永無止境的系統工程，唯有緊貼時代脈動、推陳出新，我們才能真正實現企業轉型升級與本澳職場安全的雙贏！

官方參考

1．澳門《職業安全健康規章》〈現行經修訂之法規，如第 37/89/M 號法令、第 44/91/M 號法令〉

2．澳門特區政府：《澳門經濟適度多元發展規劃〈2024–2028 年〉》。

3．澳門勞工事務局：第 2/2023 號法律《建築業職業安全健康法》安全管理人員持續進修計劃。

4．澳門勞工事務局：澳門特別行政區入口網站/新聞（2026 年 6 月 8 日 14:58）

5．澳門勞工事務局：澳門特別行政區入口網站/新聞（2026 年 6 月 30 日 16:19）

6．澳門統計暨普查局於 2026 年 6 月 22 日發佈了 2026 年 5 月的主要統計數據。

7．澳門生產力暨科技轉移中心於 2022 年 4 月 22 日發佈（國際管理認證資助計劃）。

參考文獻

［1］ 甘益菲、劉丁己（2025）·澳門新視角－澳門中小企業：過去輝煌、現狀挑戰與未來機遇，第 37 期，澳門青年研究協會。

［2］ 鄧敏儀、李秀儀（2025），香港工人健康中心第 31 屆周年大會特稿－企業及民間團體努力促進人力資本，香港工人健康中心。

［3］ 鄒玖勝，（2025 年 2 月 12 日）《新華澳報》〈淺析澳門中小企業的突圍之路〉。

［4］ Stig Vinberg, Department of Health Sciences, Mid Sweden University, Sweden Industrial Health 2020, 58, 303–305, Occupational Safety and health challenges in small scale enterprises.

［5］ Alves, J. C., etc（2020）. Crisis Management for Small Business during the COVID–19 Outbreak: Survival, Resilience and Renewal Strategies of Firms in Macau.

［6］ Cheng, D, Liu, K, Qian, Z. etc.（2022）. Study on Survival and Sustainable Development of Small–and Medium–Sized Tourism and Hospitality Enterprises in Macao Based on Regional Soft Environment and Competitive Advantage.（Frontiers in Psyhology）.

澳門中小型建築企業職安健管理挑戰與優化建議

李宏熙
澳門建築安全協會

摘　要：職安健的管理制度體現着一座城市的文明程度和對勞動者的關懷。隨着第 2/2023 號《建築業職業安全健康法》的實施和澳門勞工事務局持續對安全管理的推廣成功引起業界對職安健工作的重視並且減少千人意外率。但是，結合近年有關工作意外導致長期無工作能力和死亡的受害人數數據建築業仍是發生嚴重工傷的主要行業之一。中小建築企業在安全管理上長期面對工作面分散、造價低、工期短、人員職業技能及素養參差、人員流動性大等問題。為此，本文將進一步探討和分析企業在安全管理上面對的難題，並且透過文獻分析法等科學論證方式參考國內外的施工安全管理法律制度和相關安全管理理論以及行業經驗進行對比分析提出企業在安全管理上的優化和建議，籍此希望能助力提升本澳中小建築企業在安全管理上的表現，防範工作意外的發生減少因工傷事故造成的人員傷亡和財產的損失。

關鍵詞：企業社會責任；摒棄形式主義；師徒制職安健培訓

第一章　緒　論

1.1　引言

筆者曾任職於澳門某社團秘書在工作期間曾接觸因建築業工傷事件離世的家屬，這段工作經歷令筆者深刻意識到職安健工作不單只牽涉到從業人員更多是牽涉到背後家人一生的福祉，企業在制定長遠發展戰略時應以人文關懷善待每位同事並且管理層要教育前線管理人員不應單一追求品質和效率更應同時追求同事們的身心發展，澳門經濟發展的成果不應單一體現在金錢利益更要顧及僱員的身心健康。

澳門在回歸後急速發展社會經濟大有改善，但在回歸前經濟不景令部分建築業前輩們對建築業只是依靠高強度長時間的勞動和效率為先產生了固化的認知，即使口中說安全但心底內仍有抵觸認為職安健工作耗費時間和加重成本影響施工。因此，作為職安健管理人員我們需面對在一個人員複雜、工作面零散、對職安健工作認知不足的情況下開展工作具有一定挑戰性，結合筆者的過往工作經驗職安健工作是社會對基層勞動力人文關懷的體現，並非單一依靠企業便能成功實踐，這份工作需要政府、工程委託方、企業、從業員、社團、社會大眾的共同配合下形成全社會共識重視職安健工作，才能讓企業更主動推動職安健管理工作。

1.2　研究方法

文獻分析法：參考國內外有關職安健管理主題的論文、行業統計數據進行閱讀和分析作為論文的理論基礎。

案例分析法：參考重大事故案例進行分析並檢討現行職安健管理制度的不足並提出優化建議。

第二章　建築業中小企職安健管理戰略實施的挑戰和啟示

2.1　外部經濟影響中小建築企業在職安健管理的投入

澳門經濟正處於穩步復甦的階段，房地產

業界[1]吳在權先生在澳門房地產聯合商會舉辦慶祝成立 32 周年會慶酒會中表示出現“房價低於建房成本”的情況，以及建築房地產在內的中小企業生存長期面臨眾多挑戰和嚴峻困境。

建築企業為求生存必須壓縮成本渡過難關，常見控制成本的方法包括減少人力、材料和工期減輕企業的成本負擔。而且，澳門經濟環境正受外部環境的影響令到工程委託方更傾向招攬一家工程造價更低、工期更短的工程承辦商。根據以往工傷事故的案例主體賠償責任由工程承辦方負責，甚少出現工程委托方需要負上連帶的賠償責任。即使政府於近年大力推廣職安健宣導工作助力提升社會總體安全意識，但由於建築行業專業性較高，中小型工程委托方例如家居/商業裝修或維修工程的業主難以透過常理分辨工程承辦方是否在施工過程滿足現行職安健法規要求變相令有關業主難以實施有效的監管，而且業主同時明白工傷事故無需負上主體責任，在挑選工程承辦商時業主更追求承攬價格和工期而忽略工程承辦商過往在職安健管理的表現。工程承辦商亦明白職安健管理和投入並不能在私人工程中帶來顯著的投標優勢，反而更傾向於壓縮有關成本在以上原因的疊加下加劇工程承辦商的僥倖心理忽略施工安全。

2.2 建築從業員組成結構相對複雜難以確保具備同等職安健意識

為配合社會發展的需要，建築企業按照“補充本地人力資源不足”的原則依法向政府申請聘用外僱，援引[2]澳門統計暨普查局的資料顯示 2026 年首季建築業本地居民 14,400 人；根據[3]澳門勞工事務局 2026 年首季外地僱員數據建築業人數 25,687 人。

安全文化作為社會文化、職業素養、教育程度、個人道德行為標準和企業對員工行為約束的總和，它並不能依靠短時間的培訓便能瞬間提升個人在施工安全的表現。援引[4]澳門勞工事務局 2025 年工傷統計分析報告中顯示 2025 年因工作意外導致長期無工作能力的本地僱員 3 人、外地僱員 15 人；工作意外導致死亡的本地僱員 6 人、外地僱員 3 人，對於部分外地僱員由於語言、文化、原生工作環境和對安全施工標準和個人安全意識不足導致發生工傷事件，即便澳門勞工事務局提供不同語言的安全課程和宣傳資料，但外地僱員在職安健的表現亦有賴企業的重點關注適時進行培訓和加強職安健巡查力度以確保施工安全。同時，亦有部分本地從業人員職安健意識較為淡薄，因此職安健管理工作亦應結合前線人員意見在制定具體管理制度工作規定和購買裝備時優先考慮前線人員的意見才能真正落實職安健管理制度化和常規化。

2.3 安全管理人員現場監管和處理行政工作的失衡問題

施工現場安全記錄文件、安全會議記錄、各項專項巡查、培訓記錄、驗檢表格以及為預防災害或隱患的周期性文件逐漸增多並逐漸出現恆常化形式，此類工作模式於近年來大力推行令到安全管理人員減少到施工現場的時間。

香港大埔宏福苑外牆維修工程發生五級大火合共造成 168 人死亡和 79 人受傷的悲劇中，揭示出現今制度上的可優化的情況，援引[5]《香港 01》訪問兩名工程師，探討制度後導致火災成因、無法作監察的緣由。兩名工程師均強調香港工程奉行「信任制度」，目前地盤物料及檢測報告繁多，沒可能鉅細無遺逐一檢查。並且，並且在宏福苑聽證會上杜淦堃資深大律師問及如停用消防裝置多於兩個月是否不妥？助理消防處長姜世明稱不完全同意，以 2024 年消防處收到 6000 個 SDN 為例，只有 500 多個工程可在 14 日內完成（即佔 8%）。

悲劇的發生敲響了現場職安健管理的警鐘，縱然悲劇原因未有確切定論但目前反映出有部分文件上的安全絕不代表現場安全的情況。其中，[6]罹難者家屬蘇曉峯曾在聽證會上

道出「宏福苑只能示範一次」，這句話一直深刻印在筆者心中時刻提醒筆者作為安全管理人員的責任，即便在慘劇過後澳門政府快速作出反應及時與業界進行溝通並提高相關的安全標準，但這宗悲劇更讓筆者意識到安全更應依賴現場管控，不能在安全管理上流於形式，制式文件的原意是讓從業員履行監管和妥善管理現場的責任以及一旦發生事故時能有效釐清權責，但當文件不斷增多減少現場安全管理人員在施工現場履行巡查和管理職責時，便要反思制式文件的制度是否有精簡的空間，我們又可透過什麼方法平衡日常行政工作和現場監管?只有我們不停反思直面現存問題大膽改革優化各項制度方能避免悲劇的發生。

2.4 星期一效應給予的啟示

援引[7]澳洲新南威爾士大學（UNSW）土木與環境工程學院高級講師 Milad Haghani 發表「Why Monday is the most dangerous day on a building site」的文章中提及根據一項針對澳洲建築業安全表現的研究顯示有六種根本原因導致事故的發生，當中包括：1）工期設定脫離實際；2）技術勞動人力短缺；3）員工安全發言意願低迷；4）定制化工程施工難度高；5）人文風險評估機制缺失；6）安全培訓流於速成敷衍。

以上六種情況反映出建築業可持續優化進步的空間，傳統華人社會較為內斂前線同事較為不主動反映意見，但現實和數據向我們反映前線同事的意見和權益應予尊重和重視，摒棄威權管治模式，企業管理層要主動與前線同事進行友善的雙向溝通並且注重安全培訓的效能和提前做好相應的工作規劃避免經常性臨時安排才能有效減少工傷事件的發生。

第三章 初探優化中小建築企業施行職安健管理戰略

3.1 善用政府資源助力企業提升職安健管理效能

中小企業在職安健管理上其中一個重要問題是欠缺資源，現時勞工事務局有多項實物推廣計劃為符合申請條件的建築企業提供相關裝備助力企業提升安全減少工作意外的發生，並且有針對特定工作環境和季節推出的裝備提升工人舒適度和安全性，例如每年 5 月至 9 月因應澳門夏季高溫和潮濕天氣「便攜式掛腰風扇」、「抗熱服及防曬帽套」推廣計劃和針對高空工作的「流動式臨時防墮繫穩裝置」推廣計劃。在安全培訓上同樣能運用勞工事務局網站上「職安健天地」獲取各項安全指引和相關工傷案例圖文和影片資訊作為安全培訓的教材。同時，勞工事務局亦提供多款免費職安健海報作地盤安全警示和宣導職安健信息。

3.2 擁抱 AI 時代強化科技賦能企業在職安健的實務工作

企業應主動推動 AI 應用程式提升在職安健管理上的效能，市面上有多款 AI 應用程式能生成宣傳圖文和影片免去以往企業需要聘請額外人員製作用於施工職安健培訓地盤宣傳職安健資訊的圖文和影片，以及可用於企業拓展在職安健管理上的思維模式和處理文書的效率減少安全管理人員處理行政事務和制式文件的時間。AI 時代是不可逆轉的趨勢，企業要提升在職安健管理上的表現必然要借助科技軟件的協助，對建築業中小企零散和複雜多變的施工環境而言強化科技軟件的投入似乎比起科技硬件的投入來能實際和更符合成本效益，而且 AI 應用程式更可生成相應的職安健管理戰略目標和實踐方法作為參考。

3.3 重視新入職員工的安全訓練並透過師徒制強化職安健表現

傳統入職安全訓練主要透過進行書面考核評估新人對公司職安健政策和規定的認知，但缺少後續跟進新人的安全表現。援引[8]香港職業安全健康局有關剖析香港建造業四大工傷意外報告中提及近三成半人在意外地點工作不足一個月。報告反映建築業對於新人安全培訓的

重要性，企業管理層需向新人明確公司對職安健的重視並將伴隨不停的培訓和考核，筆者認為新人的安全培訓更應注重互動式交流鼓勵他們自我思考深度理解職安健工作背後的意義。並強調以下四點培訓內容：

1）鼓勵員工主動反映意見：建築業依賴高度團隊合作性，但過度威權管理反而會讓員工欠缺主動反映問題的能力，企業應構建良性互動的交流平台，並且為員工建立信心讓他們在入職培訓時學會主動表達在工作中發現的危害或對安全的疑慮並主動聯絡負責同事處理有關事宜，越早建立專屬溝通渠道可讓前線員工感受到公司良好的職安健工作文化才會更主動反映問題。

2）緊急應變程序：讓新人了解處理各類型事故時應採取的程序和應變措施並說明緊急狀況時應與誰聯繫，在過程中加插簡單的急救知識和訓練提升前線員工的應變能力，亦可根據澳門熱季炎熱的天氣提前培訓預防熱傷害及緊急處置的安全培訓。

3）個人防護裝備的正確配戴和使用方法：個人防護裝備作為最後一道安全防線，即便在勞工事務局職安卡課程中已加插部分實操訓練，但企業在新人培訓時仍有必要重新說明並讓員工實際操練統一安全標準。

4）模擬情景互動環節：在過程中介紹新入經常在工作中的違規行為，並且針對工種制定特定模擬工作情境讓他們辨別危害和風險並提出改善措施，確保新入職同事明白企業職安健政策和標準由被動式接受職安健訓練轉變成主動式通過互動和思考內化職安健標準和強化意識。

師徒制度讓工作中職安健表現較為傑出的同事負責擔任新人的師傅與新人共同工作，並且在工作中教授企業在施工過中的各項標準化施工程序讓新人從一開始時便採用合規的施工方法，通過師徒制讓師傅以身作則示範安全的施工方法強化新人的職安健意識並且協助安全管理人員監察新人在職安健的表現並及時糾正錯誤做法防止養成不良的工作習慣，新人的表現應與師傅的職效掛勾作為企業衡量其工作表現的重要指標之一，從而令師傅更有責任心傳授安全施工的經驗讓新人更快熟悉工作，師徒制不僅能有效養成新人的安全施工習慣，師傅作為榜樣更會自覺地提高自身在職安健的表現，在過程中安全管理人員應主動跟進受訓情況觀察並且鼓勵新人提出職安健改善建議檢討現行企業管理措施和制度共同提升企業在職安健管理上的效能。

3.4 工具箱會議做到預防為主的職安健管理理念

企業可針對特定施工環境和工種展開工具箱會議，在會議中減少受訓人員被動式接收資訊模式改由鼓勵前線同事主動發言分析危害和提出相應的控制措施，通過持續性的培訓和不定期的重複性訓練鞏固前線同事的職安健知識和改善不良的工作習慣。在會議中加插 5S 管理方法向同事們反覆強調「整理」、「存放」、「清潔」、「標準」及「修養」是施工現場的基本要求工具和設備在使用前應作檢查。此外，強化同事在危險源隔離措施的培訓做好圍封措施避免人員誤闖危險區域。

3.5 參加行業社團提升企業在職安健管理的表現

澳門擁有深厚的社團文化背景，對於資源有限的中小建築企業可透過參加工會、行業社團互相交流分享企業在職安健管理上的實踐經驗借鑒同行的工作模式彌補自身的不足，並且可參與所屬社團組織的對外交流活動參訪考察不同國家/地區先進的企業職安健管理制度亦可參與舉辦的專題研討會了解行業發展的趨勢和最新的安全規範。

第四章　結語和展望

職安健工作是高度重複性、要求創新、不

能掉以輕心的工作，不論是國外的周一效應或是其他著名的管理理論都不停反覆印證一個核心原則：唯有敬畏生命，重視安全，才能控制風險減少工傷事故的發生。至於何謂重視安全?就是把簡單的事情反覆做例如：5S 工作制度、安全早會等基本工作並在此之上進行不斷創新避免員工感到單調乏悶降低警覺性。

職安健工作的成功與否有賴企業東主的重視程度，企業管理層要摒棄功利化思維重視對同事們的人文關懷把他們當作是家人就自然會採取合適的方法來保障他們的權益。同時，職安健工作應有靈活性和創新性不應停留於文件上的安全更應體現在具體工作氛圍之中。澳門自回歸後更重視公民品德教育，政府在推行教育政策中為學子們播下一顆仁愛和關心社會的種子為澳門未來有更完善的僱員保障制度奠下基礎，本澳回歸祖國接近 27 周年之際政府亦成功通過立法修例提高對建築業職安健工作的規管並且成功大幅減少建築業工傷事件，作為企業要善用年青一代激發他們對職安健工作的熱情和掌握的專業知識通過多年培養的公民品德融合在日常工作中踐行職安健管理理念，企業亦應以仁愛之心主動通過構建各項標準化工序和獎勵措施以及培訓工作做到預防為主的理念。

展望未來，企業需要不停透過自我檢討和革新運用 AI 等科技賦能主動保障建築業各持分者的權益平衡安全與生產效率完善企業現行職安健管理體系，絕不能讓職安建工作流於形式減少前線同事對職安健工作的抵觸情緒。

參考文獻

［1］ 吳爾珊. 房會賀成立卅二周年　吳在權提三建議促樓市回暖［EB/OL］. https://reurl.cc/Ga729Z, 2024-11-25.

［2］ 統計暨普查局. 就業調查 2026 年第一季［R］. 澳門特別行政區：統計暨普查局, 2026. 05.

［3］ 勞工事務局. 2026 年第 1 季按行業統計非專業和專業　外地僱員人數及實體數目［R］. 澳門特別行政區：澳門特別行政區政府勞工事務局, 2026.

［4］ 勞工事務局. 表（1）按意外後果、僱員身份及性別統計工作意外受害人數（2025 年）［R］. 澳門特別行政區：澳門特別行政區政府勞工事務局, 2026. 05.

［5］ 梁祖饒. 宏福苑大火 01 追蹤丨工程師分析信文件制度崩壞　註定無法避災？［EB/OL］. https://reurl.cc/YDLKx0, 2025-12-12.

［6］ 獨立媒體.【宏福苑五級火】大火奪去雙親　遺屬：宏福苑只能示範一次　盼各界引以為戒［EB/OL］. https://reurl.cc/Q20KMM, 2026-03-30.

［7］ Milad Haghani. Why Monday is the most dangerous day on a building site［EB/OL］. https://reurl.cc/npkGa6, 2024-11-25.

［8］ 職業安全健康局. 剖析香港建造業四大工傷意外報告摘要［R］. 香港特別行政區：職業安全健康局, 2023.

酒店房務部體力處理操作之探討

吳　燕
新濠博亞娛樂有限公司

摘　要：隨著澳門休閒旅遊產業持續發展，消費者對於客房整潔度、居住舒適度以及服務品質的要求不斷提升。房務部做為酒店營運當中最重要的部門之一，肩負著客房清潔、布草整理、物資補充等工作，也是酒店內體力勞動最密集、肢體負擔最高的部門。房務人員每日必須執行大量搬運、彎腰、推拉、抬舉等體力處理操作，長時間重複單一動作、不良作業姿勢、繁重勞動負荷以及簡陋作業設備，都會造成肌肉骨骼損傷、職業疲勞、工作效率下降等一系列問題。近年來，酒店行業逐漸從過去單純重視客房服務品質，轉向同時重視房務人員體力操作規範，期望透過科學化的操作模式，從而減少房務人員流動率、降低職業傷害發生率以及控制人力成本。本文以酒店房務部體力處理操作為研究核心，系統性分析房務部常見體力作業類型，深入探討現行體力操作缺失、作業風險以及對員工與酒店造成的雙向影響，並結合人體工效學理論、職業安全管理概念，提出多層次合理化改善措施，包含標準化作業流程建立、作業工具優化升級、員工培訓體系強化以及管理制度完善創新等。研究目的在於建立安全、科學的體力處理操作模式，為酒店房務部提供務實參考。

關鍵詞：房務部；體力處理操作；人體工效學；職業安全；作業管理

一、緒　論

在酒店產業結構中，房務部屬於勞動密集型部門，不同於前台、餐飲等服務崗位，房務工作高度依賴人力體力執行。房務人員需在有限時間內完成客房清潔、更換床品、搬運布草、補充耗材、環境整理等繁瑣工作。近年來酒店為因應市場競爭，不斷提高客房硬體設備品質，床墊加厚加重、布草材質升級、客房空間擴大，相對增加房務人員體力負擔。在澳門，酒店房務人員是肌肉骨骼酸痛的高危群體。現行澳門法律已正式將肌肉骨骼疾患納入職業病覆蓋範圍（1）。依據觀光服務業職業健康專項統計數據顯示，國內酒店房務從業人員肌肉骨骼類職業病整體患病比例高達 65%，從業年限滿三年以上的一線員工幾乎均存在長期慢性腰部酸痛臨床症狀（王麗華，2021）。

據澳門統計暨普查局統計（3），截至 2026 年 3 月 31 日止，澳門旅客住宿數約 3,673,312 間房，這還未包括暫停營業以及不對公眾提供住宿服務的酒店業場所住宿需求。為提供舒適乾淨的住宿服務，房務人員成為重要的角色擔當。

表 1　資料來源：澳門統計暨普查局歷年酒店住宿統計

	客房數	客房入住人數	住用率
2023 年 1–12 月	46,553	13,567,760	81.5%
2024 年 1–12 月	43,044	14,433,006	89%
2025 年 1–12 月	45,165	14,559,875	89.9%
2026 年 1–3 月	45,129	3,673,312	92.3%

據了解旗下酒店共有 3422 間客房，每天旅客入住率 90%以上，與澳門統計暨普查局統計

住用率相吻合。目前酒店單名房務員每日平均清潔客房數量高達十二間以上，勞動強度偏高。以前員工多以經驗、土法方式作業，搬運、鋪床、清潔皆存在大量不良姿勢，長期累積下來容易造成慢性職業傷害。除此之外，房務工作環境密閉、作業空間狹小、清潔藥劑氣味濃厚，更加重人員身心負擔。為此，公司房務部對體力處理操作進行深入研究，檢視作業缺失、改善操作方式、優化作業環境。

二、理論基礎

2.1　體力處理操作定義

體力處理操作，英文譯名為 Manual Handling Operations，依照國家市場監督管理總局（2021）頒布《GB/T 39766–2021 服務業體力作業安全規範》國家標準給出明確定義：指從業人員依靠自身軀體與四肢力量，完成物品抬舉、搬運、推拉、挪動、擺放、俯身清理、高空擦拭等所有依人體體力完成的作業行為，主要劃分為單次短時高強度體力操作、長時間重複性輕體力操作、固定姿勢持續性體力操作三大類型。不同於重工業高負荷搬運，酒店房務體力操作具有單次負荷低、動作重複性高、作業空間狹窄、姿勢變化複雜等特性。常見動作包含彎腰、下蹲、抬手、扭腰、推車、搬布草、翻床墊等。如果房務人員缺乏正確用力觀念，長期累積微小傷害，將演變為慢性職業病，也是房務人員腰部、手腕、肩頸病變的主要成因。

2.2　房務部常見體力處理操作與分析

結合酒店房務人員全天完整工作流程，可將日常常見體力處理操作劃分三大核心類別，全面覆蓋客房清掃、物資整理、公共區域環境清潔所有日常工作場景。

床品更換整理是房務人員日常體力消耗最大、重複動作頻率最高的核心工作，主要包含拆除客房髒污床單、被套、枕套，鋪設全新乾淨床品、整理被芯形態、挪動調整床墊、規範擺放枕頭等一連串動作。酒店為提升顧客入住舒適體驗，普遍使用加厚高密度獨立彈簧床墊、厚重純棉加密布草，常規雙人標準間床墊整體重量達 39–53 公斤，單人徒手挪動調整床墊需要依靠腰部大力度發力；全程鋪設被套作業過程中，員工需要反覆抬舉手臂、側身扭轉軀體，長時間重複此類動作極易引發肩頸肌肉僵硬、腰部肌肉急性拉傷。據中國旅遊飯店業協會 2025 年行業專項調研數據顯示，房務人員日常鋪床類作業累計耗時佔單間客房整體清掃時長的 42%，是所有作業環節當中體力消耗佔比最高的工作環節（中國旅遊飯店業協會，2025）。

此類操作屬於酒店房務崗位中高頻次負重類體力作業，主要分為兩大工作模塊：第一，樓層髒布草收納搬運，將客房內更換完成的髒床單、洗漱毛巾、浴袍等紡織品統一收納至房務專用工作車，集中統一搬運至酒店專用布草間，之後在布草間分類布草；（圖 1）第二，全新乾淨布草、客房專用客用物資補給搬運，從酒店布草專用布草間搬運乾淨布草、一次性洗漱用品、客房瓶裝飲用水、休閒零食等各類物資，分類裝載至樓層工作車，逐間完成客房物資補充擺放工作。常規滿載狀態下的房務工作車整體重量可達 35 公斤以上，長距離往復推拉搬運極易造成手臂肌肉酸痛、手腕關節發炎、下肢肢體疲勞。

圖 1　分類布草

客房全域清潔擦拭作業涵蓋室內灰塵全面擦拭、地面清掃拖洗、衛生間深度刷洗、玻璃鏡面拋光、室內隱蔽縫隙灰塵清理等多項工作。擦拭客房高處櫃體、牆面鏡面、頂部裝飾時，從業人員需要持續抬高手臂、墊高腳尖維持固定姿勢；清理床底、沙發底部、傢具夾縫灰塵時，必須長時間保持下蹲、跪地姿勢；深度刷洗馬桶內部、衛生間地面瓷磚時，需長時間維持大角度彎腰狀態。配備長度固定的傳統清潔工具，無法依據房務人員身高靈活調節，員工只能強行扭曲身體適配工具開展工作，長期積累易引發脊椎側壓變形、手腕關節過度彎曲勞損（王麗華，2021）。

除客房專區工作之外，房務人員還需承擔酒店大廳、樓層走廊、樓梯通道、客用電梯、休閒公共區域等場所的日常清潔工作。同時完成高處牆面、室內燈具、大型落地窗等區域清潔擦拭工作。公共區域清潔作業覆蓋範圍廣闊、人員往來人流量大，必須在規定短時間內快速完成環境整理，整體勞動節奏更快，綜合體力消耗遠高於客房常規清掃工作。

日常不規範的重物搬運姿勢、濕滑地面作業疏忽、高空擦拭重心失衡等問題，極易引發人員肌肉拉傷、肢體關節扭傷、摔倒碰撞等各類工傷意外。一旦發生工傷事故，酒店經營方需要承擔員工就醫醫藥費用、工傷停工補償金、勞務糾紛協調處理成本，同時會對企業內部形象與外部社會口碑造成負面影響。與此同時，員工錯誤粗暴的作業方式極易碰撞損傷客房內部傢具、家電、裝飾設施，增加酒店日常設備維修與更換採購成本。

三、酒店房務部體力處理操作全方位改善對策

3.1 編製專屬體力操作規範執行手冊

酒店嚴格依據體力處理操作專業原理與澳門勞工局酒店業工作安全指引小冊子

，編製適合自身運營場景的《房務人員職安健安全培訓》，（圖 2）明確羅列客房鋪床、重物搬運、衛浴清潔、高空擦拭、工作車推拉等所有日常體力作業的標準執行姿勢。明確規定重物搬運必須保持軀體背部挺直、依靠膝蓋彎曲腿部發力，徹底杜絕單手搬運、扭腰發力等危險動作；標準化鋪床作業站立位置，最大限度減少身體單側扭轉頻率；清潔作業優先利用工具長度優勢，嚴格禁止墊腳懸空、貼地趴臥等高危作業姿勢。手冊搭配實體圖示對比正確與錯誤操作方式，強化全體員工作業行為約束力。

圖 2　房務訓職安健培訓

3.2 搭建分層級專業化安全教育培訓體系

建立新人入職強制培訓、在職員工季度複訓雙重培訓執行機制。房務新員工入職階段，除基礎客房清掃服務流程教學之外，必須全員參加，通過視頻教學、資深員工真人示範、一對一實地糾正、現場模擬演練多種形式開展教學，考核成績合格之後方可正式上崗獨立作業。針對全體在職房務員工，每個季度定期組織體力操作複訓，重點糾正長期養成的錯誤工作習慣，同步教授日常肌肉放鬆、肢體拉伸舒緩專業技巧，有效緩解員工肢體肌肉僵硬積累問題，全面強化全體房務人員自我保護意識。

3.3 淘汰陳舊設備，普及人因工程專業作業工具

分批逐步淘汰所有不符合人體工效學設計的老舊作業設備，優先批量採購可伸縮調節長度的專業清潔刷、高低可調節式拖把、靜音高耐磨滾輪等新型實用設備。可調節式專業清潔

工具能夠依據不同員工身高隨意調節使用角度與長度，從根源減少員工強行彎腰、高抬手臂的作業頻率；輕量化低重心工作車能夠大幅降低推拉滑行阻力，減少手臂與肩頸部位拉扯受力。相關實踐研究證實，全面更換人因工程專業作業工具，可直接降低 40%以上房務人員腰部肢體損傷整體發生率（陳明遠，2022）。

3.4 優化工作動線佈局，按需配置省力輔助設備

結合自身運營規模，適度引進（圖 3）電動式布草專用搬運車、（圖 4）床墊升降輔助器、（圖 5）利用機械人設備替代人工完成長距離物件運輸等省力化輔助設備，極大節省員工往復移動產生的多餘體力消耗。酒店優化內部布草房（圖 6）、洗滌間整體佈局，將物資儲存區域設置在樓層居中位置，最大程度縮短員工日常搬運往返距離；同時對房務工作車內部物資擺放進行統一規範（圖 7），遵循重物下置、輕物上置的擺放原則，穩定車輛整體重心，避免重心偏移引發肢體拉扯損傷。

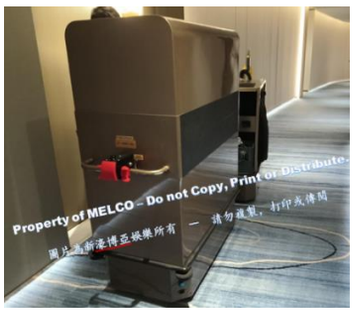


圖 3　電動式布草專用搬運車

圖 4　床墊升降輔助器

圖 5　送物件機械人

圖 6　內部布草房

圖 7 工作車內部物資擺放

3.5 建立科學輪休機制，設立固定工作放鬆時間

嚴格制定人性化崗位排班制度，杜絕員工連續六天及以上高強度連續上班，執行迴圈輪休制度，給予員工充足的肢體疲勞恢復時間。日常工作過程當中，嚴格落實員工固定休息制度，員工每連續工作兩小時，安排自由休息時間。

四、結　論

房務部是支撐酒店日常穩定運營不可或缺的核心基礎部門，房務一線從業人員日常體力處理操作的規範程度，不僅直接關係到從業人員自身身體健康狀況，更深度影響酒店內部人力隊伍穩定性、客房整體作業執行效率與酒店對外服務市場口碑。

通過本次研究分析能夠明確得出，酒店房務部日常體力處理操作並非簡單的體力勞動執行行為，而是一項需要深度結合人因工程學理論、人體生理受力原理、企業科學管理制度的專業化作

業管理工作。想要從根本上改善行業現狀，必須從四大核心維度落實優化措施：第一，正式制定全行業統一的房務體力作業標準執行手冊，全面規範重物搬運、床品整理、全域清潔等各類體力作業標準動作；第二，全面更新人性化省力作業工具與配套設備，從硬體層面降低人員整體體力勞動負荷；第三，科學合理劃分日常工作任務，優化內部人力排班調休制度，堅決杜絕員工疲勞超負荷作業；第四，健全完善員工職業安全防護體系，加大基層員工人文關懷力度，全方位降低職業傷害發生概率。由於落實優化以上的優化措施，從而房務部近 3 年來的工傷數據，逐年下降。（表 2）

表 2　房務部年度工傷宗數

	工傷宗數	涉及體力處理操作工傷宗數
2023	29	7
2024	18	0
2025	13	2

酒店企業唯有真正重視基層房務從業人員日常作業安全與職業健康，才能在有效減少企業工傷賠償、人力流動等額外經營成本的基礎之上，穩定基層服務人力團隊，持續提升客房清掃整體作業效率與對外服務品質，最終實現酒店企業長遠穩定發展與員工勞動權益保障的雙贏經營格局。

參考文獻

［1］澳門電台消息：https://www.tdm.com.mo/pt/news-detail/864480?isvideo=false&lang=zh&shortvideo=0&category=all

［2］王麗華, 觀光飯店房務人員肌肉骨骼職業危害及防護對策［J］, 旅遊產業研究, 2021, 18（2）：45-62

［3］澳門統計暨普查局統計：https://www.dsec.gov.mo/zh-MO/

［4］國家市場監督管理總局, GB/T 39766-2021 服務業體力作業安全規範［S］, 北京：中國標準出版社, 2021.

［5］中國旅遊飯店業協會, 酒店房務崗位勞動負荷白皮書［R］. 上海, 2025.

［6］陳明遠, 服務業人因工程與職業安全管理［M］. 濟南：山東科學技術出版社, 2022.

智慧賦能，以人為本——論 Safety 4.0 時代職業安全健康的科技創新與關懷實踐

許佳峰

摘　要：職業安全健康（以下簡稱「職安健」）的管理邏輯，正隨工業 4.0 而改寫。倚重事後調查與被動防護，等事故發生才追究補救；如今物聯網、人工智能、大數據與可穿戴設備接連登場，安全管理遂由「事後補救」逐步轉向「事前預測」，這便是智慧職安健（Safety 4.0）的雛形。本文以澳門為觀察對象，循「科技、創新與關懷」一線，先梳理範式演進，再考察四種科技的實際用途——感測器與可穿戴設備緊盯現場狀態，人工智能與大數據推算潛在風險，數字孿生與擴增實境撐起沉浸式培訓，協作機械人則代人涉足高危。然而本文無意把科技奉為萬能。真正關切的，在於這些工具能否守住工作者的身心，故精神健康、人因工程與疲勞管理同樣不可偏廢。澳門經濟仰賴博彩旅遊與建造業，外地僱員為數不少；勞工事務局（下稱「勞工局」）推動的「智慧工地」與建築信息模擬（BIM），正是上述理念落地的本地註腳。當然，私隱、過度監控與數碼鴻溝等隱憂亦如影隨形，仍待政策、企業與工作者三方協力拆解。本文主張，唯有讓關懷滲入科技應用的每一環，數據方能承載人性，智慧職安健亦才行之久遠。

關鍵詞：職業安全健康、Safety 4.0、智慧工地、人本關懷、澳門

一、引言

職業安全健康是社會文明、企業持續發展的根本前提，但毋庸諱言，目前工作型態正在發生迅猛變化：零工經濟興盛，人機協作普遍，作業環境日趨複雜，故而傳統管理中依賴事後調查、人手巡查、被動防護的方法已經不能很好地應對新湧現的各種風險。幸而工業 4.0 帶來了物聯網（IoT）、人工智能（AI）、大數據、雲端運算及可穿戴設備各種技術，為職安健領域注入了強大創新動力，也自然地催生了「智慧職安健」（Safety 4.0）的新典範。

此次轉變對澳門有十分直接、重大的意義：澳門以博彩旅遊及綜合度假村為經濟支柱，建造業長期繁榮，大型酒店、娛樂場、基建項目接連上馬，外地僱員對於本澳勞動市場而言，成為了不可或缺的一個重要組成部份。從現有統計數據可以十分清楚地看到，本澳總勞動力連同跨境工作者共有四十九萬人，即每五名在澳工作者中便有一人來自外地。而由於其語言、文化、技能各不相同，故安全管理必然面臨更大的難度。

由於科技本身並不是目的，故本文很自然、妥帖地提出職安健新典範的真諦乃是「科技、創新與關懷」三者融合：以科技為工具，以創新為方法，以關懷為依歸。因此本文先釐清範式演進，繼而討論核心科技，再結合澳門實踐及倫理省思，最後順理成章地給出推進策略。

二、職安健範式的演進：從被動防護到主動預測

要釐清新典範，首先要對職安健的發展歷

程做一個明確、有邏輯的梳理，即其大致可自然、妥帖地劃分為三個階段。第一階段是「事後補救」，事故發生之後企業才做調查、賠償，故而當時的安全管理處於被動防禦狀態，工作者的傷亡遂成為制度改進的直接代價。第二階段是「制度防護」，企業以法規、標準（ISO 45001 職業健康安全管理體系）及系統風險評估來建立防護體系，明確、主動地貫徹「預防勝於補救」的理念，但是也毋庸回避其仍以定期巡查為主，因而存在時間滯後、覆蓋不全、主觀片面諸種問題。

相比之下，由於目前所論的第三階段「智慧預測」是以感測器、演算法為工具把安全管理從「定期抽查」推進到「全天候監測」，從「經驗判斷」升格到「數據驅動的預測」，故其範式轉變有十分清楚、邏輯嚴密的三重性：從「管理事故」走向「管理風險」，再走向「防患未然」，最後自然地回歸到對「人」的關顧。簡言之，科技既改變了管理手段，也真正改變了人們對於安全本質的認識。

三、科技創新的核心應用領域

沿著「智慧預測」的方向，四類科技正逐漸成為職安健的核心支柱。

（一）物聯網與可穿戴設備：實時監測的眼睛

從感知層面入手論述十分清楚：物聯網用現場分布的各類傳感器對溫度、濕度、噪聲、粉塵、有害氣體諸種參數實時、可靠地採集，遇超標即報警，而可穿戴設備智能安全帽、智能手環、定位背心又對工作者的心率、體溫、姿態、疲勞狀態予以主動監測，在危險區域（吊運半徑、密閉空間）及時發出近距預警。對澳門濕熱、高溫作業極為常見的工地來說，此種設計能極早、極好地防範中暑及熱衰竭。更難得的是將人、環境兩類風險信號都即時數字化，讓隱患無處藏身。

（二）人工智能與大數據：風險預測的大腦

由於物聯網可以被很自然、妥帖地看作感官，而人工智能及大數據可被恰如其分地視為大腦，故二者能以機器學習的方法對大量歷史事故、近失事件（near-miss）及實時數據加以分析，由此自動、可靠地識別人眼難察的風險模式，再據此推算事故的時間、地點及概率，因此安全管理真正進入了「預測」的高級階段。更難得的是，電腦視覺結合閉路電視，能自動檢測工作者是否佩戴防護裝備、是否誤入危險區、是否做出不安全動作，且能即時報警。這就大大提高了監管的覆蓋性及一致性。

（三）數字孿生與擴增實境：沈浸式培訓的場域

培訓是十分重要的環節，而傳統安全培訓多采用課堂講授形式，故所學知識難直接轉化為臨場應變能力，因此虛擬實境（VR）及擴增實境（AR）為工作者提供了零風險的虛擬場景，可自然、充分地進行高空作業、火災逃生、機械操作諸種演練，切實強化肌肉記憶，潛移默化地培養危機意識。更難得的是建築信息模擬（BIM）與數字孿生（Digital Twin）能用虛擬模型完整再現工地，讓管理者在開工前就推演動線、預演吊裝、主動識別碰撞及危險點，真正把風險評估前移到設計階段，安全也由此從源頭做起。

（四）協作機械人與自動化：替代高危的雙手

最直接、最可靠的安全保障就是讓人遠離危險，故而協作機械人（Cobot）、自動導引車及無人機都可代人搬運重物、進入有毒密閉空間、巡檢高空管線及外牆，由此從根源上切斷人員與危險的接觸。因此自動化既提高了效率，也自然、妥帖地體現了「以機械之力，護人身之安」的精神，工作者因而能脫離危險而重復的勞動，去從事更有價值的監督、決策工作。

四、科技背後的人本關懷

雖然現有科技十分先進，但是絕不可僅僅

用來監控、管制，否則就會淪為冰冷的「電子監工」，故此職安健新典範的根本精神是「關懷」，而科技實質上是放大關懷的槓桿。

從關懷身體的角度來論述，即人因工程把工作者姿勢、動作的感測數據加以分析，因而能及時、合理地攔截肌肉骨骼勞損，又用疲勞監測保護輪班、駕駛、長期作業者免遭過勞之害。

從第二點即關懷心理予以系統、妥帖的闡述：世界衛生組織、國際勞工組織都十分重視職業精神健康，工作壓力、焦慮、職業耗竭已被明確列為重要危害，而澳門博彩及酒店業工作者長期輪班、從事情緒勞動，故此數字平台宜主動提供匿名情緒支援、壓力自評、輔導轉介諸種功能，真正把關懷從「身」做到「心」。

由於科技有利於實現安全管理中的關懷差異，故可很自然、妥帖地用科技手段做到「因人制宜」：系統向長者、新入職者、外地僱員分別推送多語言、個性化的風險提示及工作調適信息，因此安全保障絕非「一刀切」。

五、倫理挑戰與省思

由於科技在放大關懷的同時必然要付出某種代價，故科技應用必然帶來種種倫理張力，宜予以充分重視。

首先，從私隱與監控的張力入手十分自然地引出討論：可穿戴設備及生物識別技術都在連續、大量地收集健康、位置諸種敏感數據，故若沒有規範，「保護」就會異化為全面監控，進而損害信任、踐踏尊嚴。主動遵守最小化數據取得、用戶同意知情、基於目的而限制的原則，成為了企業的必修課。

其次，從過度信賴及責任歸屬的角度做了十分清楚、有層次的分析：決策若過多依賴算法，算法出錯或出現「演算法偏見」之後責任究竟屬於開發者、企業，還是操作者？因此很自然地得出結論：人的專業判斷不宜讓機器代為行使。

從數字鴻溝的角度可以十分自然、妥帖地予以分析：澳門中小企業極多，而多數無力承擔昂貴科技的成本，故若放任不管，安全保障就會出現「貧富懸殊」之虞，職場也會因此更加不公。更重要的是自動化本身就會衝擊就業，故要重視技能轉型及職業尊嚴。

六、澳門本地實踐與啟示

雖然前面所論比較抽象，但是毋庸諱言，勞工局近年來將科技應用逐步主動地融入、並應用於安全管理，且已有明顯成效。

用獎勵的辦法促進創新，即勞工局聯合土地工務局、公共建設局及各建築、職安健團體共同舉辦「建築業安全施工獎勵計劃」，又在二二五年的賽事中專門設立「智慧工地與科技創新應用」組別，與「最佳職安健地盤」、「最佳安全管理制度」並列，公開、正式地表揚主動採用科技改善施工的承造商，因此創新從個別行為自然地發展為行業風氣。

從第二點入手系統、有層次地考察推廣智慧工地及 BIM，即勞工局組織工地職安健考察團赴本澳應用資訊科技的工地實地觀摩，由此自然、妥帖地介紹了「智慧工地」及建築信息模擬（BIM）的運作，從第四條澳氹跨海大橋的設計建造工程透過 BIM 展現了對整個工程的極佳統籌及管理。

從第三點很自然、妥帖地討論了外地僱員及微型經濟體的特點：即澳門外地僱員比例很高，因此多語言的 VR 培訓以及圖像化的電腦視覺提示能很好地打破語言、文化二種隔閡，使安全訊息真正人人易明。更難得的是多個本地社團、協會，例如：澳門職業安全健康協會、澳門建築安全協會等機構主動作為，以「粵港澳安全知識競賽」為平台促進大灣區交流，把區域經驗引入本地。

從現有論述可以十分自然、妥帖地得出結論：澳門雖然是小經濟體，但是能以政府引

導、業界合作、區域聯動的方式走出自己的智慧職安健之路。

七、推動策略與建議

由於要把前面所述的零星實踐升格為長效機制，因此必然要靠各方面通力協作來實現。

由於政府從政策上可以有意識、有計劃地修訂法規，把新興科技及數據保障正式納入規管，因此宜以資助、獎勵、示範諸種方式降低中小企採用科技的門檻，切實縮小數字鴻溝。

由於大型綜合度假村營運商及承造商處在企業的第一線，故宜把科技明確、妥帖地定位為「賦能工具」而不是「監控手段」，同時讓工作者參與系統設計及推行過程，由此自然獲得信任。

由於培訓要從工作者層面入手，因此首先要抓好數字素養、安全技能的培養，繼而主動、充分地為外地僱員提供多語言支援，方能使其順利使用智慧系統。

從現有論述可以很自然、妥帖地推出結論：產、學、研三方及大灣區各夥伴宜長期合作，開發切合本地需要、合乎倫理規範的職安健方案。

八、結論

從現有論述可以十分自然、妥帖地看到，職業安全健康處在範式轉移的關口，物聯網、人工智能、可穿戴設備、機械人都賦予人類預見、預防、消除風險全新而強大的手段，但是必須牢記：工作者的生命、健康、尊嚴才是諸種技術的根本目的。

由於科技能開新路，創新能破框限，關懷有方向，因此「科技、創新、關懷」三者可自然、妥帖地構成三位一體。澳門把握智慧職安健的機遇實質上就是在守護建設澳門的每一雙手，而要真正建成智慧有溫度的職安健新典範，就必須讓數據承載人性，讓每一位工作者都平安歸家。

參考文獻

［1］澳門特別行政區政府勞工事務局. 職業安全健康統計及相關刊物［EB/OL］. https://www.dsal.gov.mo/.

［2］澳門特別行政區政府勞工事務局. 2025 年建築業安全施工獎勵計劃［EB/OL］. 2025. https://www.dsal.gov.mo/dsso/zh_tw/standard/construction_safety_scheme.html

［3］澳門特別行政區政府勞工事務局. 勞工局組織「智慧工地」職安健考察活動及建築信息模擬（BIM）應用相關報道［EB/OL］. 2025. https://www.gov.mo/zh-hant/news/987788/

［4］International Organization for Standardization. ISO 45001：2018 Occupational Health and Safety Management Systems — Requirements with Guidance for Use［S］. Geneva：ISO, 2018.

［5］International Labour Organization. Safety and Health at the Heart of the Future of Work［R］. Geneva：ILO, 2019.

［6］World Health Organization & International Labour Organization. WHO/ILO Joint Estimates of the Work-related Burden of Disease and Injury［R］. Geneva：WHO/ILO, 2021.

以 AI 提升職業安全健康：從心理健康正視科技關懷探索

葉頴昕[1]　杜錚豪[2]
1. 澳門科技大學醫學院公共衛生學碩士
2. 澳門理工大學人文及社會科學學院公共管理碩士研究生

摘　要：傳統職業安全健康（下稱職安健）體系長期聚焦於物理、化學及生物性危害，員工心理健康則多被視為個人問題或企業福利，未能獲得應有重視。本論文核心論點為：必須正視員工心理健康為職安健不可分割的核心組成部分，將其提升至與傳統作業安全同等重要的法定義務與系統化管理高度；同時，人工智能（AI）技術的發展，為探索職安健領域的「科技關懷」提供了前所未有的契機。本文從公共衛生視角出發，探討「心理健康檢查」模式的根本局限性，並基於世界衛生組織（WHO）2022 年《工作中的精神健康指南》[2]，提出一個以 AI 賦能的職安健心理健康管理模式。聚焦當前 AI 領域的空白——「科技如何實現對人的真切關懷」，借鑒香港建築地盤現有的 AI 安全帽識別與定位系統技術，前瞻性地探索從「行為監控」邁向「情感感知」的技術路徑，構思以非侵入式微表情識別、情感計算等技術實現對員工心理狀態的早期預警與主動關懷，並強調科技應用必須以倫理為基石、以人為本，避免科技關懷流於形式。最後，結合澳門「健康企業」計劃及現行法律基礎[3][4]，提出涵蓋三級防護體系與本土化實踐路徑的整合方案，為職安健的「科技、創新與關懷」新典範提供理論與實踐框架。

關鍵詞：職業安全健康；職業心理健康；人工智能與情感計算；科技關懷

一、引　言

1.1　研究背景

職安健長期將管理資源集中於物理、化學及生物性等看得見的危害，工作壓力、職場欺凌、職業倦怠等心理社會風險則始終被置於邊緣。世界衛生組織（WHO）與國際勞工組織（ILO）的數據顯示，全球每年因抑鬱和焦慮損失約 120 億個工作日，經濟代價近 1 萬億美元[2][5]，揭示了將心理健康排除在職安健核心之外的沉重代價。與此同時，AI 技術正逐步進入職安健領域。以香港建築地盤為例，AI 視覺識別系統已能自動偵測安全帽佩戴情況並追蹤人員位置，證明了 AI 提升安全管理效能的潛力。然而，現有技術能夠判斷員工是否配戴安全帽，卻無法感知員工是否需要幫助。科技如何從「行為監控」走向「情感感知」，以 AI 實現對員工的真切關懷，成為當前有待探索的課題，也是本研究的核心出發點。

1.2　研究目的

本文旨在探討如何以 AI 技術提升職安健水平，實現兩個關鍵目標：從學理與實證層面論證心理健康必須被正視為職安健的核心維度；並探索科技填補「關懷」這一 AI 領域空白的可能路徑。重點指出心理健康是職安健不可分割的組成部分，應與物理安全置於同等重要的地位；AI 技術的價值不應止步於行為監控，更應延伸至情感感知與主動關懷，而這一延伸必須

以倫理為基石、以組織制度變革為前提。

1.3 研究方法

本研究採用文獻綜述與政策分析相結合的方法。先梳理國際循證研究成果，特別是 Strudwick 等人（2023）有關心理健康的篩查分析[1]及 WHO《工作中的精神健康指南》[2]，為論點提供實證基礎；其次引入香港建築地盤 AI 安全監控例子，提出從「行為監控」到「情感感知」的技術延伸構想；繼而基於公共衛生三級預防模型，建構以 AI 賦能的職安健心理健康管理模式；最後結合澳門「健康企業」計劃[3]，提出整合三級防護與本土化實踐的整體方案。

二、心理健康為何必須納入職安健的核心範疇

在以 AI 提升職安健的討論中，首先必須釐清一個前提：心理健康究竟應該放在甚麼位置？長期以來，它被排除在職安健的核心議程之外，背後是幾個需要打破的認知誤區。

2.1 心理健康並非純粹的個人問題

有研究指，工作場所中的社會心理危害是導致員工心理健康出問題的直接原因。不合理的工作量、角色模糊、缺乏自主性、職場騷擾與欺凌、組織不公——這些因素在系統性地「製造」心理疾病。香港理工大學一項涵蓋 45 家酒店、756 名員工的研究發現，領導不善、工作不穩定感及需要即時回覆數碼通訊的壓力，對心理健康影響最為顯著[6]。正如長期處於噪音環境會損害聽力，長期置身於有毒的職場文化中，心理受創是必然結果。這是一個徹頭徹尾的職安健議題。

2.2 心理健康管理不只是企業福利

將照顧員工心理健康視為「福利」或「慈善」，矮化了其法律與經濟屬性。澳門第 37/89/M 號法令明確規定，工作節奏不應引致精神上之疲勞[4]。視之為福利，意味著可有可無；視之為法定義務，則意味著必須被管理。從經濟角度看，忽視心理危害導致的缺勤、低效和人才流失，是直接的商業成本。說到底，管理好心理健康，是一種人力資本風險管理與組織韌性建設。

2.3 年度心理檢查不等於心理健康管理

年度體檢式的心理健康問卷篩查，常被當作「有在管理」的證據，實際上卻是一種管理上的懶惰。這種模式的根本缺陷，將在下文詳細論證。

三、現行心理健康檢查模式的職安健誤區

3.1 篩查無效的循證批判

將篩查等同於管理，是當前職安健實踐中一個常見的陷阱。Strudwick 等人（2023）在《職業與環境醫學》上發表了一項系統綜述與 Meta 分析，為此提供了有力的循證反駁，該研究涉及 2,940 名員工，結果顯示：單純提供心理健康篩查再附上簡單建議或轉介，對改善員工的心理健康症狀並沒有效果（d=_0.07，95% CI _0.29 至 0.15），只有當篩查作為後續針對性治療的入口時，才觀察到小幅度的改善[1]。這說明了在缺乏系統性改善和有效干預的前提下，純粹的「發現問題」不僅無益，還可能因為引發標籤化焦慮而帶來傷害。

3.2 為何這種模式違背現代職安健原則

現時的職安健管理遵循「風險評估、源頭控制、系統監測」階層控制邏輯。在心理健康這方面：普遍存在的「企業心理健康體檢」，無異於我們只給員工做聽力檢查，卻對噪音源聽而不聞。它把管理的焦點從「危害源——有毒的工作環境與管理方式」轉移到了「受害者」身上。這本質上是在對個體的變相責備，而非對組織系統問責，徹底違背了職安健「源頭控制優先於個人防護」的核心原則。高婷婷等人（2024）對酒店一線員工的研究也印證了這一點：與其篩查出「誰有情緒耗竭」，更關鍵的是從組織層面給予系統性的支持[8]。

四、科技與關懷的融合：以 AI 探索職安健領域的空白

在提出具體模式之前，需要先面對一個問題：科技如何能實現「關懷」？這正是當下 AI 應用的空白，也是本屆研討會「科技、創新與關懷」這個主題最核心的提問。

4.1 從「行為監控」到「情感感知」的邏輯轉變

目前職安健領域的 AI 應用，大多仍圍繞「行為合規監控」層面。以香港建築地盤為例：攝像頭及傳感器負責識別工人有否佩戴安全帽，定位系統則追蹤他們的位置。這些技術的核心邏輯是「判斷行為是否符合規範」，它在意的是外在、可量化的指標。然而，「關懷」的對象終究是人，不是行為，這就要求科技能夠接觸到人的內在狀態——情緒起伏、壓力積累、心理困擾。從「這個人有沒有犯錯」轉向「這個人是否需要幫助」，才算觸及關懷的門檻。

這個轉向之所以至今仍是 AI 領域的空白，背後涉及三個層面的困難。技術上，情感計算尚在成長階段，微表情識別等技術的準確率及穩定性仍有待提升；倫理上，情感數據的採集涉及更深層的隱私與意願問題；應用上，學界及業界對於「把情感感知轉化為關懷行動」這一步，仍然缺少系統性的經驗。

4.2 AI 實現科技關懷的可能技術路徑

4.2.1 AI 微表情識別與情緒感知

人的面部微表情是觀察情緒狀態的一扇窗口。跟傳統問卷自評不同，後者是主觀報告，難免受社會期望偏差左右，而微表情是一種難以自主控制的生理反應。假如在工作場所出入口、休息區等位置設置高精度攝像頭，AI 算法便可以持續捕捉員工的面部微表情變化：眉頭持續緊鎖也許在透露焦慮，異常疲憊的面容則可能是壓力過大的訊號。需要強調的是，這樣的分析並非要給個體貼上標籤，而是早期預警。

4.2.2 行為模式分析

配合人員定位數據，AI 能夠發現一些偏離常態的行為模式。例如，平日活躍的工人突然與同事的互動頻率大幅下降、活動軌跡減少，這些行為上的變化，往往比自我報告能更早反映心理困擾。

4.2.3 多模態數據融合

真正有意義的「科技關懷」，不應只依賴單一來源的數據。面部表情、行為軌跡、生理信號（例如可穿戴設備記錄的心率變化）的變動等，這些信息若能融合起來，通過機器學習建立多維度的預測模型，識別的精準度將大幅提升。

4.3 以 AI 探索關懷的倫理基石

科技關懷必須以倫理為基石，否則隨時可能淪為新型監控。四條底線必須守住：1.知情同意與透明度，員工要在充分知情的前提下自願參與，清楚數據的用途、儲存方式和保護措施；2.數據最小化與隱私保護，情感數據只在邊緣設備上即時處理；3.只用於關懷，不用於評判，預警信號也不應流向有考核權力的管理者手中；4.人機協作，最終那份有溫度的關懷行動必須由人來完成。

4.4 從預警到響應：建立 AI 驅動的閉環關懷系統

光是「感知」還不夠，需要把感知到響應的鏈條接起來，形成完整的閉環：感知層通過微表情識別等技術持續觀察員工的心理狀態；分析層綜合多模態數據評估風險等級；響應層則根據風險而觸發分級行動，低風險時推送自我調適資源，中風險時交由企業內部的心理健康專責人員（而非直屬上級）進行保密跟進，高風險則啟動專業轉介；最後是反饋層，追蹤干預的實際效果，持續優化模型。

五、以 AI 提升職安健的整合方案：三級防護體系與本澳實踐

基於上文討論，本章提出整合三級防護體系與澳門本土化實踐的整體方案，將心理健康正式納入職安健核心維度，在每一級防護中體現科技與人文的協同。

然而，任何科技預警系統的有效性，都離不開健康的組織環境。當員工的壓力源於上級打壓或制度的不公時，單靠「偵測和關懷」只會治標不治本。源頭控制是整個體系的根本。

5.1 第一級防護（源頭控制）：組織層面的心理風險管理

這是三級防護的根基，目標是從源頭消除或盡量減少危害。WHO《工作中的精神健康指南》指出，組織有責任識別並改善工作場所中的心理社會風險因素[2]。包括把工作壓力、職場欺凌、不當管理行為一併納入法定的風險評估範圍；改善工作組織方式，建立對管理權力的制衡，如獨立申訴渠道、反職場欺凌調查程序；落地執行零容忍的反職場欺凌政策。澳門第 37/89/M 號法令為此提供了法理基礎[4]。

5.2 第二級防護（風險預警）：AI 驅動的科技關懷

在源頭控制的前提下，此級才能發揮應有價值。傳統次級預防依賴員工主動求助或年度篩查，存在滯後性和主觀偏差；AI 驅動的科技關懷則讓系統在員工尚未意識到問題或未敢求助時，即感知到可能的困擾信號，對「羞於啟齒」的心理健康問題尤其關鍵。傳統問卷僅能捕捉靜態斷面，科技則可持續動態監測，捕捉「漸進式惡化」的早期信號。

然而必須認識到技術的邊界：當困擾源於直屬上級的打壓時，讓同一上級執行「關懷訪談」毫無意義，甚至加劇傷害。因此，響應機制必須繞開可能存在問題的管理鏈條，改由企業內部的心理健康專責人員跟進。AI 預警信號應與管理問責機制聯動：當某部門反覆出現預警信號時，系統應自動觸發對該部門管理環境的審查，而非僅針對個體員工。管理者的「心理安全第一響應人」培訓及員工心理素養提升同樣不可或缺，研究顯示心理資本可通過培訓干預提升[9]。

5.3 第三級防護（傷害管理與復原）：分級支持、經濟保障與在職康復

對於已受較嚴重心理困擾的員工，此級目標是提供有效支持，協助穩定回歸職場。然而這面臨一個現實處境：對依靠薪資維生的勞動者而言，短暫離開職場治療意味著切斷經濟來源，經濟壓力本身就是重大心理社會風險源——致病、收入中斷、經濟焦慮加劇困擾，形成難以掙脫的循環。因此，必須在「保障經濟安全」與「提供康復空間」之間取得平衡。政策方向應是透過合理便利實現「帶薪康復」，而非讓「需要治療」與「喪失生計」劃上等號——從法律倫理與人力資本保留角度看，這遠比考慮解僱更為理性，畢竟員工的心理困擾有相當部分可能正是源於工作環境。

借鑒 WHO 指南[2]及相關實踐，本文建議採取分級策略：1.在職調整，優先採取在職支持，包括協商後調整工作內容、提供彈性工時、暫時調離高壓崗位，讓員工在維持收入和社會連結的同時獲得喘息空間。2.帶薪康復假，設立專門制度與一般病假區分，澳門可透過修改《勞動關係法》或納入「健康企業」計劃激勵機制推動，政府可設專項補助基金分擔中小企支出；操作上須經專業評估確認並設定給付上限，同事分攤壓力的問題則有賴第一級防護所建立的健康組織文化。3.過渡支持，為使用病假後重返崗位的員工設計階段性安排，如首兩週恢復部分工時、暫時免除高壓任務、定期跟進會談，降低復發風險。歸根結柢，心理健康的傷害管理應與工傷康復享有同等制度保障，當員工不必在「健康」與「生存」之間兩難

時，康復才真正可能發生。這一理念與粵港澳大灣區職業康復中心的「身心同治」模式一脈相承[10]。

5.4 澳門本土化實踐路徑

澳門具備將心理健康正視為職安健核心、並以 AI 探索科技關懷的獨特條件。特區政府自 2023 年起推動的「健康企業」計劃，已有 17 家企業參與，其五大策略與本文模式吻合[3]。

在法規完善方面，可通過制訂《工作場所心理社會風險評估與管理指引》，清晰界定企業在心理危害管理方面的法定責任。指引中應特別關注管理行為本身作為危害源的可能性，明確將不當管理行為（如職場欺凌、無理打壓、權力濫用）納入心理社會風險的識別與評估範圍。同時，將心理社會風險管理指標納入「健康企業」計劃的年度考核。

法規方面，可通過制訂《工作場所心理社會風險評估與管理指引》，明確將不當管理行為納入風險評估範圍，並將心理社會風險指標納入「健康企業」考核。科技試點方面，採取「借鑒—轉化—創新」路徑：學習鄰近地區的 AI 監控經驗，將技術邏輯從「行為監控」轉向「情感關懷」，在建築業或綜合旅遊休閒業率先試點，目標是讓澳門成為以 AI 實現科技關懷的標杆城市。區域協同方面，借助大灣區職業康復中心[10]引入「身心同治」模式，參考廣東省工會系統的企業心理團輔經驗[11]，培養本地專業人才，落腳點始終是提升本澳就業人口的心理健康服務可及性。

六、研究局限與展望

本文的探討存在若干局限，須坦誠指出。首先，AI 微表情識別與情感計算技術目前尚未在職安健領域有大規模實證應用，本文的構想仍屬前瞻性的理論探索，技術落地的可行性、準確性及成本效益有待實證檢驗。其次，科技關懷的倫理框架，特別是「僅用於關懷，不用於評判」的原則，在實務中如何制度化地防止濫用，仍需更深入的法律與治理機制研究。再者，本文以文獻綜述與政策分析為主要方法，缺乏一手實證數據（如企業訪談或問卷調查）支撐，對澳門不同行業、不同規模企業的具體適用性未作差異化討論。此外，有關「帶薪康復假」及政府補助基金的建議，涉及公共財政與勞動政策的複雜博弈，本文僅提出方向性構想，具體的融資模式與實施細則有待後續研究深化。

展望未來，建議學界與業界可從以下方向推進：開展 AI 微表情識別在真實職場環境中的試點研究，積累效能與倫理實踐的雙重數據；針對澳門不同行業進行實證調查，以制定差異化的心理社會風險管理指引；以及從勞動法與社會保障角度，深入探討心理健康納入職安健體系後的僱傭責任分擔機制。唯有在技術創新、制度建設與實證研究三線並進的基礎上，科技才能真正成為傳遞職安健關懷的可靠橋樑。

七、結　語

從 AI 監測安全帽，到 AI 感知情緒，從防止犯錯，到探索關懷，這不僅是技術升級，更是一場職安健理念的變革。以 AI 提升職業安全健康，真正的價值在於關懷有多真切。

科技並非萬能的。當傷害源於組織內部的權力濫用時，再精密的 AI 也無法替代制度正義。科技關懷必須與組織變革並行——先有健康的職場生態，科技才能成為傳遞關懷的橋樑，而非掩蓋問題的遮羞布。從正視心理健康作為職安健核心維度出發，到以科技探索對勞動者的真切關懷，這條路徑既是學術命題，也是實踐方向。澳門如能在這個方向上率先踏出一步，不僅能為兩岸四地的職安健事業貢獻創新方案，更可為「科技向善」寫下一個有溫度的註腳。

參考文獻

［1］ Strudwick J, Gayed A, Deady M, et al. Workplace mental health screening：A systematic review and meta-analysis［J］. Occupational and Environmental Medicine, 2023, 80（8）：469-476.

［2］ World Health Organization. Guidelines on mental health at work［M］. Geneva：WHO, 2022.

［3］ 澳門特別行政區政府社會文化司司長辦公室. 特區政府推動「健康企業」計劃 構建健康澳門［EB/OL］. 澳門：GSASC, 2024.

［4］ 澳門第 37/89/M 號法令. 商業場所、辦事處場所及勞務場所之工作衛生與安全總規章［S］. 1989.

［5］ World Health Organization & International Labour Organization. Mental health at work：Policy brief［R］. Geneva：WHO/ILO, 2022.

［6］ Huang J F, et al. Does hotel employees' mental health matter? Assessment of its antecedents and coping behavior［J］. International Journal of Hospitality Management, 2025.

［7］ 湯宇婷, 吳菁, 張敏, 等. WHO《工作中的精神健康指南》概述及啟示［J］. 中華勞動衛生職業病雜誌, 2024, 42（07）：543-550.

［8］ 高婷婷, 楊雨晴, 張可欣, 等. 從內耗到退縮：工作骯髒感對酒店一線員工工作退縮行為的影響機制及解決策略［J］. 旅遊論壇, 2024（12）.

［9］ Luthans F, Youssef-Morgan C M, Avolio B J. Psychological capital：Developing the human competitive edge［M］. Oxford：Oxford University Press, 2007.

［10］ 南方醫科大學. 牽頭共建大灣區職業康復中心, 創新打造「身心同治」新範式［EB/OL］. 廣州：SMU, 2025.

［11］ 廣東省總工會. 980 場基層心理團輔服務職工超 300 萬人次［N］. 南方工報, 2025-11-28.

陶瓷中小企业职业健康管理现存困境与综合治理路径

王立娟
中钢集团武汉安全环保研究院，湖北　武汉　430000

摘　要：陶瓷制造业属于职业病危害严重行业，生产全过程存在粉尘、噪声、高温、化学毒物等典型职业危害，其中粉尘危害风险最为突出。我国陶瓷产业以中小企业为主体，此类企业普遍存在职业健康管理制度不完善、防控投入不足、现场管控薄弱等问题。依托行业调研数据与已有文献成果，系统梳理陶瓷各生产工序的职业病危害分布特征，归纳中小企业职业健康管理存在的突出问题，剖析管理缺位、监护不规范、防护设施不足、培训实效不足、监管供需失衡等深层困境，从主体责任、监管机制、工程防护、教育培训、健康监护、协同治理维度提出综合治理路径，可为陶瓷行业中小企业职业病风险防控及职业健康管理提质增效提供参考。

关键词：陶瓷中小企业；职业健康管理；职业病危害；治理困境；治理路径

0　引　言

我国陶瓷总产量长期位居全球首位，占世界总产量一半以上[1]，是全球核心陶瓷生产大国。陶瓷制造属于典型传统制造业，生产工序涵盖原料加工、坯体成型、施釉装饰、高温烧成等多个环节。根据《建设项目职业病危害风险分类管理目录（2021 年版）》，陶瓷制品制造被划定为职业病危害严重行业，行业尘肺病高发、多发特征显著，职业健康防控压力较大。

国内陶瓷生产企业数量庞大，但生产工艺、设备水平与安全管理能力参差不齐，中小企业占据市场主体[1]。多数中小陶瓷企业普遍存在职业病防治资金投入不足、管理制度落地不力、职业健康管控能力薄弱等共性问题[2]。随着“健康中国 2030”战略深入推进，我国职业病防治法规、标准体系持续完善，陶瓷行业职业健康治理逐渐成为行业安全管理重点。国家卫生健康委员会针对陶瓷等 60 余个重点行业发布防尘防毒技术规范与职业病防控技术指南；2025 年更新实施《职业病分类和目录》和《工作场所粉尘危害预防控制指南》，构建“源头消除、工程控制、行为管理、健康监护”四位一体综合防控模式。但政策标准与中小企业现场落地之间仍存在明显落差，基层防控短板突出。

当前国内相关研究多针对单一区域、单个企业开展职业病危害现状调查[3]，侧重局部风险分析，针对陶瓷行业中小企业职业健康管理的系统性困境、成因及综合治理路径的深度研究较为匮乏。本文结合行业一线实践与现有文献资料，系统梳理陶瓷生产全流程职业病危害类型、分布特征与暴露风险，深入剖析中小企业职业健康管理的各类现实困境，提出针对性、可落地的综合治理突破路径，可为陶瓷行业中小企业职业健康规范化管理、职业病风险精准防控提供理论与实践支撑。

1　陶瓷行业主要职业病危害因素及工序分布

陶瓷产品分为日用陶瓷、建筑陶瓷、卫生

陶瓷、工业陶瓷四大品类，基础生产链路统一为坯料制备—成型—初烧—施釉装饰—二次烧成—成品检验包装，不同品类细分工序存在差异：建筑陶瓷核心流程为球磨制浆、喷雾造粉、压制成型、烘干、印花施釉、窑炉烧制、磨边；卫生陶瓷以泥釉料制备、注浆成型、高温烧制为主；日用陶瓷包含原料粉碎、修坯、彩绘、包装等环节。全生产链条均存在职业病危害，各工序风险类型各有侧重。

1.1 粉尘危害

粉尘是陶瓷行业覆盖面最广、危害程度最高的风险因素，原料制备、修坯、烧成、釉料调配全环节均可产生生产性粉尘。坯料原料包含高岭土、黏土等可塑性原料，石英、长石等硬质矿物原料，破碎、研磨、输送环节会释放大量矽尘、硅酸盐粉尘、氧化铝粉尘，其中矽尘游离二氧化硅含量区间为 12.9%～51.3%，均值 36.72%[3]。长期吸入可诱发矽肺、陶工尘肺，是行业最主要职业病诱因。

多地实地调研数据印证粉尘超标问题突出：佛山市 24 家陶瓷企业粉尘检测整体合格率 93.4%，但破碎、修坯、磨边等关键产尘点位超标现象频发[3]。清远市 46 家陶瓷企业接触粉尘作业人员 9246 人次，矽尘接触占比 93.43%；定点检测总粉尘超标率 38.10%，呼吸性粉尘超标率 5.65%；个体随身检测总粉尘超标率 47.78%，近半数作业岗位粉尘浓度不达标[4]。粉尘无组织排放、设备无密闭除尘、车间地面积尘清扫不及时引发二次扬尘，是中小企业粉尘超标的核心诱因。

1.2 噪声与高温物理危害

噪声为行业第二大职业危害，原料破碎机、球磨机、自动压坯机、磨边机等设备持续运行，作业区域噪声普遍超过 85dB（A）职业接触限值。佛山企业噪声检测合格率仅 80%，长期高强度噪声暴露易诱发职业性噪声聋[3]；清远市调研显示接触噪声作业人员 7328 人次，占物理危害接触总人数 82.73%[4]。

高温与热辐射集中于窑炉烧成工序，隧道窑、辊道窑持续高温运行，出窑、窑边巡检岗位人员直面强热辐射。佛山市调查显示，高温作业检测合格率 77.6%[3]；怀仁市某企业陶瓷产区车间常态温度 32℃，夏季峰值可达 40℃。持续高温作业易引发中暑，长期高温暴露会损伤人体心血管功能。

1.3 化学毒物危害

施釉、彩绘、印花工序为化学毒物集中点位，釉料、装饰油墨含有铅、镉、铬重金属化合物，配套有机溶剂包含苯、甲苯、硝基苯、氯仿等；窑炉天然气燃烧会释放一氧化碳、二氧化硫有毒气体。清远区域调研显示，化学毒物接触岗位 1500 人次，危害暴露排名前三依次为一氧化碳 19.87%、甲苯 15.07%、苯 14.87%[4]。长期重金属接触会损伤人体神经、造血、肾脏系统，有机溶剂吸入可诱发急慢性中毒。

2 陶瓷中小企业职业健康管理现实困境

2.1 企业主体责任悬空，重生产轻防护

中小企业普遍存在“效益优先、健康后置”经营思维，企业负责人职业病防治第一责任人职责流于纸面。潮州行业工作会议明确，小微企业主体责任落实缺位是行业共性突出问题。多数企业虽编制职业卫生管理制度，但未嵌入生产排班、设备运维、员工考核全流程，执行力度不足。企业将除尘、降噪、健康体检等投入视作额外经营成本，主动改造意愿薄弱。清远 46 家受访企业职业病危害项目申报率仅 60.87%[4]，近四成企业未依法完成危害申报，职业健康工作缺少组织、资金双重保障。

2.2 职业健康监护流程不规范，小微企业漏检严重

职业健康体检是实现职业病早筛早治的核心手段，但中小微企业执行漏洞突出。清远调研数据显示，受访企业整体在岗体检率

83.40%，其中大中型企业 87.98%，小微企业仅 53.29%，接近半数小微企业未按法规组织年度在岗体检[4]。现存问题包含三方面：一是体检项目与岗位实际危害不匹配，仅开展基础体检，缺失矽尘、噪声、重金属专项筛查；二是陶瓷企业检测点位多、频次高，危害定期检测成本较高，部分企业刻意缩减检测频次；三是行业人员流动性强，岗前、岗中、离岗体检衔接断层，大量短期务工人员漏检；四是职业健康档案更新滞后、资料残缺，无法完整追溯员工危害接触史，丧失职业病早期干预基础。

2.3 工程防护设施配置不足，运维管理缺失

资金约束是中小企业防护设施短板的核心成因。有研究表明，破碎机操作岗位矽尘超标，球磨机、滚压机操作岗位噪声超标[5]：产尘设备未配套密闭集气罩、布袋除尘装置，通风管道风速、罩口集尘风量不达标；高噪声设备未加装隔声罩、减振垫、消音装置；窑炉隔热层破损、降温通风设备缺失。部分企业虽配套防护设备，但无常态化运维制度，除尘管道积灰堵塞、隔声设施老化破损后长期搁置，设备无法发挥防控作用，源头工程控制措施失效。

2.4 职业健康培训形式化，员工防护意识薄弱

行业培训覆盖率看似达标，但培训质量严重不足。佛山调研显示劳动者职业卫生知识整体知晓率仅 75%[3]，清远企业整体培训覆盖率 87.23%[4]。现存短板集中体现为：培训内容同质化，缺少陶瓷岗位针对性案例；培训形式以线下宣读文件为主，无实操教学；新员工未完成岗前健康培训直接上岗；一线工人对矽尘、重金属中毒危害认知不足，未规范佩戴防尘口罩、隔音耳罩、防腐蚀手套等个体防护用品；人员高频流动进一步加大常态化培训管理难度。

2.5 职业病存量风险高，事故赔偿成本突出

多年行业累积危害未得到有效化解，职业病发病风险居高不下。清远 46 家企业 2011—2020 十年间累计确诊职业性尘肺病 49 例，年均新发 4.9 例[4]。多家陶瓷企业因长期忽视粉尘防护，批量出现尘肺病患者，企业一次性赔偿金额超百万元[6]，不仅造成员工终身健康损害，也严重制约企业持续经营，行业存量职业病风险、新增暴露风险均未得到根本性遏制。

2.6 基层监管力量不足，技术公共服务供给短缺

监管资源与行业监管需求严重不匹配，潮州职业健康专项会议指出，基层监管人员编制有限、陶瓷企业分布零散、监管覆盖面不足，常态化巡查、专项执法难以落地。同时面向中小企业的公益性职业健康技术服务体系不完善，免费危害检测、现场技术指导、定制化培训等公共服务供给缺口大，中小企业缺少低成本、专业化技术支撑渠道。

3 中小企业职业健康管理优化突破路径

3.1 压实企业法定主体责任，建立长效自我管理机制

企业作为职业病防治第一责任主体，需从制度、资金、考核三方面完善管控体系。第一，落实负责人责任制，将职业健康工作纳入企业年度经营考核，明确车间主管、设备管理员、一线班组长分级管控职责，形成自上而下管理链条，严格执行职业病危害申报、定期检测、结果公示法定制度。第二，转变成本认知，主动加大职业健康改造投入。福建某陶瓷企业五年累计投入 400 余万元开展车间防护升级，实现粉尘浓度下降 88%，噪声超标问题彻底解决，员工体检异常率连续三年递减[6]。该案例证实，前期防护投入可大幅降低后期职业病赔偿、停产整改风险，长期提升企业可持续经营能力。第三，建立常态化自查机制，按月开展防护设施运行检查、员工防护用品佩戴督查，每年度委托第三方机构开展职业病危害定期检测，每三年开展一次职业病危害现状评

价，及时公示检测结果，并根据检测结果及时完成工艺、设备整改。

3.2 完善分层分类监管体系，强化政府约束与激励

依托行政监管补齐中小企业治理短板，构建差异化、全链条监管模式。

一是充实基层职业卫生监管队伍，开展陶瓷行业专项监管业务培训，提升执法人员现场风险识别、合规判定能力；二是实施分级分类监管，依据企业危害风险等级、既往违规记录划分重点监管对象，高风险小微企业增加巡查频次；三是加大违法惩戒力度，对未申报危害、不组织体检、防护设施缺失企业依法责令停产整改并处罚款，公开典型违法案例形成震慑；四是严格落实建设项目职业卫生“三同时”制度，新建、改扩建陶瓷生产线同步配套除尘、降噪设施，从项目源头规避风险；五是搭建职业健康信用评价体系，将企业合规记录与信贷审批、行业评优、政府补贴挂钩，形成奖惩并举机制；六是推动工信、卫健、应急管理部门数据共享，精准锁定陶瓷小微企业集中区域，开展专项集中整治。

3.3 推进工艺升级与工程防护改造，实现源头控害

工程技术手段是降低危害暴露的根本措施，结合陶瓷各工序风险特点实施分类改造。粉尘防控：破碎、研磨、修坯点位加装密闭集尘罩，配套负压布袋除尘系统；原料转运、清理区域推行湿式作业，车间定期洒水抑尘，杜绝二次扬尘；噪声防控：球磨机、破碎机加装减振底座、整体隔声房，风机管道配套消音器，高噪声区域设置隔音操作值班室；高温防控：窑炉外层加厚隔热保温材料，窑边安装强制通风风机、雾化降温装置，优化车间通风布局；毒物防控：施釉、彩绘车间独立分区，配套专用废气收集净化装置，釉料密闭储存、自动化输送，减少人工直接接触；产业转型层面，依托陶瓷行业智能化、数字化升级契机，以自动化机械手、叉车、输送设备替代人工上料、修坯、搬运岗位，大幅缩减一线人员危害暴露时长，从工艺源头降低接触风险。怀仁陶瓷产区自动化生产线改造实践证明，机械化替代可显著削减粉尘、重金属接触岗位数量。

3.4 构建分层分类培训体系，提升全员防护素养

破除培训形式化问题，建立覆盖管理者、一线员工的常态化宣教机制。第一，严格落实分层培训：企业负责人、职业卫生管理员每年完成法定继续教育，一线员工开展岗前、年度复训，转岗员工重新开展岗位危害专项培训；第二，丰富培训内容与形式，结合陶瓷尘肺病、铅中毒真实案例开展以案释法教学，实操教学覆盖防尘防毒面罩正确佩戴、防护设施日常检查、急性中毒中暑应急处置等实操内容；第三，联动疾控、第三方技术机构开展行业定向公益培训，下沉厂区开展现场教学；第四，车间标准化设置危害警示标识、岗位告知卡，公告栏及时公示粉尘、噪声、毒物检测数据，持续强化员工风险认知与自我防护意识。

3.5 标准化职业健康监护，完善全周期健康档案

以健康监护实现职业病早发现、早干预，规范全流程体检管理。一是严把岗前体检关口，粉尘、重金属、噪声岗位新员工入职前完成专项体检，存在职业禁忌症人员禁止分配至对应危害岗位；二是规范在岗年度体检，根据岗位接触危害匹配对应体检项目，杜绝简化体检流程、降低筛查标准；三是优化用工排班，采用轮岗制度缩短单人每日接害时长，降低长期累积暴露风险；四是建立“企业管理档案+员工个人健康档案”双档案体系，完整留存危害检测报告、体检报告、培训记录、防护用品发放记录，档案长期留存、动态更新，保障员工职业病诊断追溯需求。

3.6 搭建多方协同治理体系，补齐中小企业技术短板

陶瓷中小企业职业健康治理无法依靠单一主体完成，构建政府、企业、行业协会、第三方机构协同治理格局。行业协会发挥自律作用：制定陶瓷行业职业健康管理行业规范，组织企业交流防护改造成功案例，开展行业自查自纠；第三方机构提供专业支撑：政府通过购买公共服务，为小微企业提供低价或免费职业病危害检测、现场整改方案编制、管理体系搭建服务，降低中小企业技术服务成本；企业落实现场基础管理：每日及时清理地面、设备积尘积浆，维持车间合理湿度减少扬尘；规范存放、定期更换个体防护用品，保障员工按需领用；劳动者主动参与监督：畅通员工危害隐患反馈渠道，鼓励一线人员上报防护设施失效、违规作业问题，形成全员参与治理氛围。

4 结 论

（1）陶瓷制造业为职业病危害严重行业，生产全流程覆盖粉尘、噪声、高温、重金属化学毒物等多重职业危害。其中矽尘危害覆盖面最广、致病风险最高，是行业陶工尘肺高发的核心诱因，持续威胁从业人员身心健康。

（2）陶瓷行业中小企业职业健康管理存在典型系统性困境，主要包括企业职业病防治主体责任落实不到位、职业健康监护流程不规范、工程防护设施配置与运维不足、职业健康教育培训流于形式、职业病存量风险偏高、基层监管力量与监管任务不匹配，多重问题叠加导致行业职业病防控压力长期居高不下。

（3）提升陶瓷中小企业职业健康管理水平，需实施系统化综合治理。通过压实企业主体责任、构建分级分类监管体系、推进工艺升级与源头工程防控、开展精准化职业健康培训、规范全周期职业健康监护、搭建多方协同治理体系，全方位补齐行业管理短板。依托产业智能化转型契机，以机械化、自动化替代高危人工岗位，可从源头削减危害暴露，推动职业健康管理由被动治理向主动预防转型。

（4）本文梳理的陶瓷中小企业职业健康治理难题，在石材加工、耐火材料、水泥等粉尘型传统制造行业具有较强代表性，研究结论可为同类中小企业职业病防控工作提供借鉴。后续可围绕智能化改造的职业健康防控效能、中小企业职业健康帮扶机制落地效果等方向开展深化研究。

参考文献

［1］ 张琪. 陶瓷生产典型企业粉尘职业危害现状调查及控制对策研究［D］. 北京：首都经济贸易大学, 2022.

［2］ 潮州市人民政府. 坚持问题导向, 聚焦重点工作——2025 年潮州市职业健康工作暨职业病防治专项小组会议召开［EB/OL］.（2025-04-24）［2025-07-25］.

［3］ 梁恒健, 陈松根. 佛山市 24 家陶瓷企业职业卫生状况调查［J］. 职业与健康, 2013, 29（4）：409-412.

［4］ 薛来俊, 张彦红, 欧胸章. 清远市陶瓷企业职业病危害现状调查［J］. 中国当代医药, 2023, 30（4）：198-201.

［5］ 王君霞, 李风琴. 某日用陶瓷企业职业病危害关键控制点分析［J］. 中国工业医学杂志, 2022, 35（3）：271.

［6］ 佚名. 陶瓷厂 5 年投入 400 万“主动突围”［N］. 福建卫生报, 2025-10-16（06）.

中小企业职业安全健康生存与发展的筑基与攀登双轨策略

张晴川
中钢集团武汉安全环保研究院

摘　要：随着社会经济不断发展，对职业安全健康的需求不断提高，在个人层面，良好的职业安全健康管理体系是对劳动者工作和生活质量的保障；在企业层面，良好的职业安全健康管理体系是减少企业风险保证企业经济效益的基础；在社会层面，职业安全健康体系是员工的权益，可以增加雇佣和谐度，减少社会不安定因素，有助于构建和谐稳定的社会环境。对于资源受限的中小企业，需要务实的“生存与发展双轨战略”职业安全健康策略发展框架，旨在帮助其实现从合规求生到卓越发展的转变。框架强调优先控制可能导致灾难性后果的工艺安全风险，如重大危险源管理与关键作业许可；同时构建以风险为核心的简化管理体系，聚焦变更管理与承包商等同管理等核心流程，并强化基于岗位的实战能力培训。在此基础上，企业可通过应用适宜的自动化监控与数字化工具深化风险管控，培育以非惩罚性报告和员工参与为特征的安全文化，最终将职业安全健康指标作为绩效融入商业决策与价值链，转化为可持续的竞争优势，帮助企业筑牢安全底线，并进一步获得市场认可与成本优化。

关键词：职业安全健康　企业发展　职业危害控制

1　引　言

1.1　职业安全健康的价值

随着社会经济的不断发展与产业结构的转型升级，职业安全健康（OSH）已超越单纯的合规要求，成为衡量经济高质量发展的重要标尺。在个人层面，良好的职业安全健康管理体系是保障劳动者生命安全与工作生活质量的基础；在企业层面，它是降低运营风险、减少事故损失并保障经济效益的核心防线；在社会层面，完善的 OSH 体系是维护员工合法权益、增加雇佣和谐度、减少社会不安定因素的关键，有助于构建和谐稳定的社会环境。因此，探索科学、普适且高效的 OSH 管理模式，具有深远的现实意义。

1.2　中小企业职安健管理的现实困境

截至 2025 年 9 月登记在册的中小企业达 6348.7 万户。中小企业作为国民经济的毛细血管，在吸纳就业与激发创新方面发挥着不可替代的作用，却也是当前职业安全健康管理的薄弱环节。相较于大型企业，中小企业普遍面临资金、人才与技术的多重资源约束。研究表明，受限于规模经济的缺失，中小企业在安全设备、合规检查等固定成本上的相对投入比例显著高于大型企业，而要达到同等安全水平所需的投资比例大幅增加。这种限制导致大而全标准化体系在中小企业中可能出现不能完全执行的现象。此外，中小企业的安全管理常依赖现场主管的经验知识，缺乏结构化的流程机制与知识传承体系，致使安全表现极不稳定从而

导致企业往往陷入重效益、轻安全的困局。

1.3 研究目的与意义

面对上述困境，中小企业需要务实的、与其资源承载能力相匹配的 OSH 发展框架。基于此，本文提出基于“生存与发展双轨战略”的职业安全健康发展体系。本文通过系统阐述该双轨战略的理论逻辑与实施路径，以期为资源受限的中小企业提供一条可操作、高回报的职业安全健康发展新路径。

2 中小企业职业安全健康管理现状与痛点分析

2.1 资源约束下的管理困境

中小企业相比大型企业面临更高的职业事故风险，受伤和死亡率显著更高。根据研究，中小企业在建立有效的安全管理体系方面经常面临挑战。这些挑战归因于有限的财政资源、管理者对职业安全健康问题兴趣有限、员工代表缺失以及安全检查不足。这一限制使中小企业缺乏正式的安全程序，且可能缺乏足够的安全培训和设备。此外，这一个限制还导致负责安全人员的设置不够完善。此外，一项研究探讨了斯里兰卡建筑工人避免使用个人防护装备的原因，发现不使用个人防护装备受知识不足、组织支持不足和环境不适感共同影响。

与大型企业不同，中小企业的安全措施是个性化的，缺乏大型企业中存在的结构化安全管理体系。寻找针对中小企业适合的个性化安全管理措施和体系方法对于保证企业的安全生产至关重要，而中小企业因资源限制而难以实施这些措施。

2.2 核心风险辨识与管控能力薄弱

中小企业可能存在重效益的偏向从而导致核心风险辨识与管控能力薄弱的短板，对自身产业中潜伏的致命风险常常处于无感或无视状态，一旦失控，事故往往直接表现为群死群伤的严重灾难，带来毁灭性的经济损失。例如，铝镁加工企业长期忽视粉尘爆炸风险，导致特大爆炸；食品加工小作坊未识别有限空间内的硫化氢危害，酿成多人中毒窒息身亡的悲剧；危险品运输单位对移动重大危险源管理缺位，引发剧烈爆炸。这些惨痛教训表明，中小企业对重大工艺风险、危险作业许可等核心环节的忽略，足以瞬间摧毁企业生存根基，并冲击整个供应链。

3 理论框架构建

3.1 核心理念

该框架旨在打破传统单一的管理模式，实现从合规渐渐达到卓越发展的提升。一方面，通过优先聚焦灾难性工艺风险，以最小成本筑牢安全底线，另一方面，通过构建简化体系、引入适宜技术与培育安全文化，最终将安全指标转化为可持续的竞争优势。

3.2 框架结构解析

底层轨道如重大危险源、作业许可等能够直接导致事故或不符合法律法规的，中层是管理基础如管理体系和员工培训，顶层是数字化、安全文化、商业结合等发展动能。

4 职安健发展的实施路径

4.1 控制灾难性的安全风险

危机企业根基的的安全问题如重大危险源失控、法律合规缺位、高危工艺与作业环节失控，三者往往互为诱因，最终触发群死群伤或企业直接关停的灾难性后果。控制逻辑的核心是先辨识分级、再匹配控制措施、最后用许可与监护机制兜底。重大危险源管理对应灾难性工艺安全风险优先控制，是保证企业的第一优先级。证照缺失意味着企业随时可能被关停，法律合规底线如三同时、安许证、特作证是生产的前提。这类安全问题共同的特征是一旦失控即可能导致群死群伤或企业直接关停，因此在资源受限的中小企业中，应将有限的安全投入优先配置到这些环节，而非平均分配到全套

体系的每一个要素上。

4.2 以风险为核心构建管理体系

安全分配资源是项目管理的重要组成部分，尤其旨在降低安全风险。中小企业管理体系的构建应该在保证控制重大危险源和法律合规的基础上抓大放小，根据企业自身重大危险源的风险程度和分布情况，聚焦核心流程，优化管理的落地机制。做到高风险环节重兵把守、低风险环节常规管控，让管控力度与风险等级动态匹配，将 ISO 31000 风险管理过程风险识别、分析、评价、应对、监测、改进与双重预防机制安全风险分级管控和隐患排查治理进行融合。

风险分级不是目的，分级后的差异化管控才是目的。国内主流采用红、橙、黄、蓝四色对应重大、较大、一般、低风险四个等级，并明确风险等级越高，管控层级越高的对应关系。绘制厂区四色风险地图，将风险等级可视化标注在平面图上，帮助管理人员快速准确锁定监管重点，实现从粗放管理向精准防控的转变。风险分级管控解决的是风险点应该怎么管，隐患排查治理解决的是管控措施是否失效。两者构成双重预防机制把风险管控挺在隐患前面，把隐患排查治理挺在事故前面。

隐患排查治理的闭环要求落实五到位，建立责任、措施、时限、资金、预案，建立隐患台账、对账销号。实现建立责任体系与制度、确定各级排查频次并开展排查、建立隐患台账、制定治理方案、组织整改验收、隐患统计分析、公示排查治理情况的完整流程。其中关键在于流程是否闭环，对于检查的隐患进行整改后须跟踪到验收销号。近年几乎所有重大事故的共同特征都是长期未整改、屡查屡现的隐，即双重预防机制流于形式。

风险是动态的，体系也必须动态。触发风险再评估的情形包括工艺变更、设备改造、新物料引入、组织结构调整、事故或未遂事件发生后、法规标准更新。中小企业应建立变更触发再评估机制。

4.3 强化岗位基础能力。

人作为安全管理中重要的组成部分，安全培训常流于传统授课、签到走人的形式主义，或过度依赖现场工作人员的的安全经验，导致安全知识传递效率低下。应当强化其在岗位的基础能力。在纸面考试的基础上，加强场景化、岗位化的实操培训。首先，将复杂的体系文件转化为一岗一清单的标准作业程序。培训应以现场实物为教具，推行手指口述法，要求员工在操作前指认设备风险并口述控制措施，由班组长进行现场实操打分，确保员工知行合一。

其次，聚焦班组级应急响应能力建设。中小企业难以组建专业救援队，第一响应人的自救互救能力至关重要。应常态化开展无脚本盲演与桌面推演，模拟受限空间中毒、初起火灾等高发场景，训练员工在黄金时间内的正确处置能力，并牢记盲目施救的禁忌。

通过实战化培训，中小企业能以极低成本将隐性经验固化为显性的岗位能力，不仅能补齐知识管理短板，更在基层一线筑牢了防范灾难性事故的最后一道防线

4.4 数字化与安全文化的建设

中小企业在筑牢安全底线后，可以借助数字化工具与安全文化的双层驱动，实现管理效能的进一步提升。可能受限于资金与人才短缺，其数字化建设必须摒弃大型企业重资产、全场景的模式，转向适宜、轻量的实用主义路径。

在数字化层面，企业应优先引入移动端巡检应用或基于微信企业生态的小程序。一方面，将传统的如动火作业、受限空间票纸质作业许可转为线上流转，同时引入强制拍照、定位打卡与电子签名，杜绝代签、补签等形式主义，实现关键作业的闭环管控；另一方面，聚

焦重大危险源与高危场景，部署低成本物联网传感器，以较低投入实现核心风险的全天自动预警，有效弥补中小企业专职安全管理人员不足的短板。

适宜的数字化工具为非惩罚性安全文化提供了落地抓手。中小企业应构建企业安全公平文化，明确区分系统缺陷导致的非恶意违章与恶意违章。通过移动端设置隐患随手拍与未遂事件一键上报通道，辅以正向激励，消除一线员工因害怕罚款而隐瞒隐患的心理障碍。数字化平台沉淀的数据，使管理层能够从系统性缺陷而非个人行为上追溯风险根源，避免了传统以罚代管带来的对立情绪。

这种技术与文化的深度融合，不仅将安全管控从人盯人的被动监管转化为数据驱动的主动预警，更通过员工的广泛参与，在组织内部构建起基于信任的安全生态，为中小企业的安全管理发展向卓越发展注入了持续的内生动力。

4.5 职业安全健康的价值融入商业决策

企业应打破安全仅是安全部门职责的思维，将核心职业安全健康相关指标纳入管理层的关键绩效指标体系。将重大隐患整改闭环率、未遂事件主动上报率、以及工艺安全事故率等指标，与生产负责人乃至企业最高管理者进行相关性联系。在制定日常商业决策时如紧凑的生产排期、低成本的设备采购、或急于投产的试车计划，必须引入安全风险评估机制，设立安全否决权。确保企业在追求经济效益与产能扩张时，绝不以牺牲安全裕度为代价，实现安全与生产的动态平衡。

职业安全健康体系的价值创造应跨越企业边界，向上下游价值链双向延伸。中小企业通常处于大型核心企业的供应链中，其安全表现直接关系到供应链的稳定性。一方面，中小企业通过提升自身职安健管理水平，能更顺畅地通过核心客户的环境、社会与公司治理审核或供应商社会责任评估，从而稳固甚至扩大市场份额。另一方面，企业在对承包商、物流承运商等下游协作方进行管理时，应推行等同化安全标准，通过共享培训资源、统一作业许可要求，带动周边中小企业共同提升风险抵御能力，构建互利共赢的供应链安全生态圈。

最终，卓越的职安健表现将转化为中小企业在红海市场中难以复制的竞争优势。在市场准入端，完善的职业安全健康体系正日益成为大型项目招投标如安全生产标准化等级要求的显性门槛，良好的安全记录是获取大客户信任的敲门砖。在成本优化端，科学的风险管控不仅能直接降低安全生产责任保险的浮动费率，更能有效规避因灾难性事故导致的巨额直接赔付与停工整顿带来的高昂间接损失。通过获取市场认可与实现成本结构优化，安全投入彻底完成了从“被动合规成本”向“主动商业投资”的属性转换，帮助中小企业筑牢底线的同时，赢得实质性的商业回报，真正实现从合规求生到卓越发展的跃升。

5 总 结

本研究重点关注中小企业中优化职业安全健康管理体系资源的关键挑战。强调了中小企业面临的独特安全挑战，强调了制定符合其具体运营和财务限制的职业安全健康策略的必要性。通过从生存与发展两方面建立完善职安健体系为中小企业提供了提升安全绩效、减少工伤事故并促进更健全安全文化方法，提供了中小企业在职安健管理策略的投资做出决策的思路，为创造更安全的工作环境铺平了道路。它有助于减轻事故带来的个人和经济后果，提升企业的竞争力。

参考文献

[1] R. Bachar, A. Urlainis, K-C. Wang, I. M. Shohet, Optimal allocation of safety resources in small and medi-

um construction enterprises, Safety Science, Volume 181, 2025, 106680, ISSN 0925-7535,

［2］ 沈鹏. 安全文化建设对精密铸造企业安全绩效的影响研究［C］ 2025 工程新技术与新方法经验交流会论文集. 2025：17-19

［3］ 沈屹豪. 企业应急管理体系韧性建设［C］长三角区域韧性安全城市建设论文集. 2025：55-60

［4］ 周胜利. 企业管理中安全与生产协同管理的效能提升路径研究［C］. 智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集（二）. 2025：1700-1702

［5］ 徐轶行. 企业安全生产管理存在的问题及对策研究［J］. 中小企业管理与科技，2023（01）：103-105

中国小微企业职业卫生与全员健康管理发展策略

——基于职业危害治理现状与 Total Worker Health 框架的中国化路径

肖　登，张　丽，陈　强，秦梓航，但成栋，杨梓涵
中钢集团武汉安全环保研究院　武汉　430081

摘　要：目的　结合中国职业卫生现状，探讨小微企业全员健康管理的本土化发展策略。方法　基于政策文件、职业健康统计资料和中小微企业实证研究，对原报告进行数据核对、格式调整和内容逻辑修订。结果　中国小微企业数量多、行业分散，专门职业卫生资源相对有限，是职业病危害治理和健康企业建设需要重点覆盖的群体。本文以职业卫生为主线，在核对中国现行法律政策、国家卫生健康统计资料以及中小微企业实证研究的基础上，对 Total Worker Health（TWH）框架的中国化应用进行修订。研究认为，小微企业全员健康管理应首先落实《职业病防治法》要求的危害识别、申报、工程控制、检测评价、职业健康检查和劳动者告知等基本措施，在此基础上再推进健康促进和组织层面的综合管理。本文提出以政府帮扶和专业技术服务补足小微企业能力短板，以员工参与和健康促进扩展管理边界，形成“合规底座、风险分级、外部赋能、员工参与、持续评价”五项机制，并提出分级服务包与评估指标。结论　中国小微企业全员健康管理应以职业病危害控制为底线，并通过外部赋能、员工参与和持续评价形成闭环。

关键词：小微企业；职业卫生；职业健康；职业病危害；全员健康管理；Total Worker Health；帮扶行动

1　研究背景与概念边界

1.1　研究背景

小微企业吸纳大量就业，并连接产业链末端环节，但其经营稳定性、专业人员配置和职业卫生服务获取能力相对不足。对于接触粉尘、噪声、化学毒物、焊接烟尘和高强度作业的岗位，上述因素会增加法定防护措施持续落实的难度。国家在最近完成的政策周期中，将中小微企业职业健康帮扶列为专项工作对象[3]，表明该群体已成为职业病防治体系需要重点覆盖的对象。

本文并非将美国 TWH 模式直接移植到中国，而是结合中国职业卫生制度和小微企业管理基础，重点回答两个问题：第一，小微企业如何达到职业卫生法定义务的基本要求；第二，在基本控制措施落实后，如何将职业伤害预防、工效学、疲劳管理与心理健康支持纳入企业日常治理。

1.2　术语边界与治理优先顺序

“职业卫生”在本文中主要指工作场所职业病危害因素的识别、评价与控制；“职业健康”覆盖健康监护、职业病防治及与工作相关的健康保护；“全员健康管理”是本文对 TWH 思路的策略性表述，用于讨论健康保护与健康促进的整合，不是中国法规中的独立合规制度。

因此，健康促进、数字平台或认证活动不能替代危害源头控制、工程防护、依法开展的职业病危害因素检测与评价、职业健康检查、告知培训、个人防护和应急管理。对存在职业病危害的企业，治理顺序应首先指向危害因素本身，再扩展至劳动者综合福祉。

2 中国小微企业职业卫生现状：政策与研究证据

2.1 法律与政策环境

《中华人民共和国职业病防治法》确立了用人单位主体责任，要求在产生职业病危害的工作场所落实防护设施、危害告知、检测评价、健康监护及档案管理等措施[1]。国家卫生健康委等部门印发的《国家职业病防治规划（2021—2025 年）》进一步提出提高重点行业和中小微企业职业健康管理能力，推动职业病危害治理与职业健康保护，并设置中小微型企业职业健康帮扶行动等任务[2]。

针对小微企业“不会管、无力管、持续难”的问题，国家卫生健康委办公厅、国家疾控局综合司于 2024 年印发《职业病防治“三项行动”工作方案》，其中包括《中小微企业职业健康帮扶行动（2024—2025 年）工作方案》，重点面向职业病危害严重或管理基础薄弱的企业，提供现场指导、培训、检测和整改支持[3]。该行动体现了对基层职业卫生薄弱环节的集中支持。相关实证研究也表明，政府帮扶对小微企业职业健康安全服务具有正向影响，外部支持是破解小微企业能力短板的重要路径[12]。进入新政策周期后，具体项目更新仍应以国家及地方正式公布文件为准。

2.2 现状证据及其策略含义

国家卫生健康委员会《2024 年我国卫生健康事业发展统计公报》显示，2024 年全国共报告各类职业病新病例 11289 例，其中职业性尘肺病及其他呼吸系统疾病 7312 例（其中职业性尘肺病 7251 例），职业性耳鼻喉口腔疾病 2227 例，职业性传染病 495 例，职业性化学中毒 436 例，物理因素所致职业病 606 例[4]。上述主要类别合计 11076 例，另有 213 例为职业性放射性疾病、职业性肿瘤等其他类别。数据表明，粉尘、噪声、化学因素和物理因素等传统职业病危害仍是我国职业卫生治理的基础性问题。对于小微企业，关键不在于笼统证明所有小企业均具有高风险，而在于识别确实存在粉尘、噪声和化学因素暴露的行业与岗位，并使其能够以可承受成本获得连续、规范的专业支持。

表 1 中国小微企业职业卫生的可核实证据与策略含义

Table 1 Verifiable evidence and strategic implications for occupational health in Chinese small and micro enterprises

证据来源	主要信息	对发展策略的含义
国家政策（2021—2025）	规划及专项行动明确强调中小微企业能力提升与帮扶。	将小微企业作为分级服务与监管支持的优先对象，而非仅依靠行政检查。
Fu 等（2013）	在中国中小企业开展参与式职业健康培训，观察到知识和现场改进行为的改善。	培训应与现场行动清单、工程整改和后续复核绑定。
Li 等（2022）	中国高风险行业小微企业的安全行为受到企业负责人认知与管理因素影响。	将主要负责人作为干预首要对象，同时保留员工参与和报告渠道。
潘海燕等（2025）	苏州市小微企业职业健康管理帮扶研究显示，外部支持可推动管理措施改善。	以园区或区域为单位配置技术服务，形成可复制的帮扶包和复核机制。

资料来源：政策文件与公开发表文献［2–3，7–9］。

2.3 原报告需要纠偏的论证方向

职业卫生现状分析应避免以未经核实的企业规模占比、事故占比或慢性病比例作为主要论据。职业病报告数据、职业病危害暴露数

据、安全生产事故数据和一般慢性病患病数据属于不同统计口径，不能直接相互替代。基于这一点，本文将“存在法定职业病危害岗位的小微企业”作为优先干预对象，并将一般健康促进置于基本防护措施落实之后进行讨论。

本文使用数据遵循“同口径比较、不同口径不混用”的原则：政策文件用于说明管理方向，统计公报用于说明职业病总体负担，实证研究用于支持小微企业干预策略。对缺乏公开、可复核来源的数据，本文不将其作为核心论据。

3 中国情境下的全员健康管理框架

3.1 框架定位：合规底座上的整合治理

Schwatka 等提出的小企业 TWH 框架强调组织变革、领导力和工作场所健康保护的整合[5]。该框架对中国小微企业职业健康管理具有借鉴意义，但在本土化应用时，应首先将其嵌入职业病防治法律责任体系：企业负责实施防护与监护；政府部门负责规范、监督和精准帮扶；职业卫生技术服务及职业健康检查机构提供专业支撑；工会或职工代表促进劳动者参与。健康企业建设规范也从健康管理、健康环境和健康文化等维度提出了整合框架，可为 TWH 本土化提供政策参照[11]。缺少上述制度基础，TWH 难以形成稳定的实践路径。

据此，本文将中国小微企业全员健康管理框架修订为五项机制：合规底座、风险分级、外部赋能、员工参与和持续评价。五项机制并非彼此孤立，而是构成从职业危害控制到综合健康管理的递进路径，即先控制暴露，再改善劳动者总体健康和组织韧性。

表 2 小微企业全员健康管理五项机制

Table 2 Five mechanisms of Total Worker Health management for small and micro enterprises

机制	最低要求或关键动作	预期结果
合规底座	危害辨识、申报/告知、检测评价、工程防护、健康检查、档案与培训依法落实。	基本职业病防治责任能够被验证。
风险分级	按危害种类、接触岗位、暴露水平和整改紧迫性配置服务强度。	有限资源优先进入高暴露岗位。
外部赋能	园区、专业机构、基层服务网络提供标准化工具、现场辅导和复核。	降低单个小企业取得服务的成本。
员工参与	岗位危害反馈、隐患报告、班前沟通、整改建议和知情权落实。	提升措施适配性与持续执行。
持续评价	将合规、暴露控制、健康监护、组织氛围和维护情况纳入评价。	避免一次性达标后失效。

资料来源：基于《职业病防治法》、国家规划、TWH 及中国小微企业研究综合形成［1–3，5–9］。

3.2 治理原则

危害控制优先。对粉尘、噪声、化学毒物等暴露，应优先采用替代、密闭、通风、隔声等源头与工程控制；个人防护和培训不能替代必要的工程控制措施。

小企业可负担。复杂制度需要转化为可执行的清单、共享服务和分级整改方案，减少重复填报和形式化认证，提高小微企业实际执行能力。

负责人和劳动者共同参与。负责人应对资源配置和整改落实负责；劳动者应能够获取危害信息、报告问题，并参与整改评价。一线劳动者的经验反馈有助于提高措施的适配性和持续性。

数据用于改进而非装饰。监测、体检和平台数据应服务于暴露控制和健康保护决策，而不应停留在报表层面。同时，应妥善保护职业健康检查及个人健康信息。

4 “健康小微企业”实施策略

4.1 服务对象与入口

实施对象应优先选择存在职业病危害因素

且管理基础薄弱的小微企业，例如涉及粉尘、噪声、焊接烟尘、有机溶剂或其他化学因素的制造、修理加工、家具、建材等场景。项目入口可由属地卫生健康部门、产业园区、小微企业服务平台、行业协会或企业自主申请共同形成，并应避免仅覆盖管理基础较好的企业，而忽视真正需要帮扶的企业。

4.2 分级服务包

表 3 分级服务包与实施顺序

Table 3 Graded service package and implementation sequence

阶段	实施重点	形成的可核验成果
第一阶段：诊断与底线合规	岗位和危害清单；法定义务缺口评估；告知培训；需要时安排检测评价及职业健康检查。	企业风险档案、整改清单、责任人和期限。
第二阶段：暴露控制	围绕高风险岗位制定工程/工艺整改，校核防护用品适配性，开展整改后复核。	整改记录、检测或现场验证结果、闭环证明。
第三阶段：整合健康管理	在底线措施稳定运行后，加入工效学、疲劳管理、心理支持、慢病风险健康教育和员工参与机制。	年度健康行动计划、参与记录和组织氛围反馈。
第四阶段：维护与扩散	年度复评；将基本要求纳入采购、承包商或园区共享服务；总结可复制实践。	复评报告、持续改进记录、供应链/园区推广结果。

资料来源：依据中国职业卫生法定义务、帮扶行动做法及 TWH 实施逻辑归纳［1–3，5，9］。

4.3 关键实施主体及职责

企业主要负责人承担职业健康主体责任，应确认危害清单、批准整改预算、审阅检查与检测发现，并建立员工反馈渠道。对于无法独立配置职业卫生专业人员的小微企业，可通过园区或行业共同购买合规技术服务；但服务外包并不改变用人单位的主体责任。

属地卫生健康部门可采用“监管提示+技术帮扶+整改复核”的方式覆盖基础薄弱企业；专业技术服务机构应提供清晰、可执行的现场建议。基层医疗卫生资源可支持健康教育和一般健康促进，但法定职业健康检查及职业病诊断仍应由具备相应资质和职责的机构承担。

数字化工具适合支持危害台账、培训提醒、整改跟踪和匿名反馈，可提高沟通和管理效率。但其不宜取代现场调查与检测，也不能替代用人单位的实际管理责任。采集个人健康信息时，应限定用途、权限和保存期限，并防止健康信息被用于不当用工决策。

5 评价框架：RE–AIM 与合规门槛结合

原报告采用 RE–AIM 模型评价覆盖、效果、采纳、执行和维护，这一思路具有延续价值。但在中国职业卫生情境中，评价应首先设置“合规门槛”。如果企业尚未完成必要的危害辨识、控制、检测评价或健康监护，则不宜因健康促进活动较多而被评定为高水平项目。

表 4 评价指标体系（建议）

Table 4 Suggested evaluation indicator system

评价维度	核心指标	数据来源与时间点
合规门槛	危害清单、告知、检测/评价、控制措施、健康检查、档案及整改闭环完成情况。	现场核查及记录；入组和年度复评。
覆盖 Reach	被覆盖企业数、行业与地区分布、高危害岗位劳动者覆盖情况。	项目台账；季度/年度。
效果 Effectiveness	高优先级隐患整改完成率、暴露控制改进、员工危害知晓与安全健康氛围变化。	现场复核、问卷；基线和随访。
采纳 Adoption	负责人参与率、企业完成行动计划比例、园区或行业机构参与比例。	签到、行动计划；实施期间。

评价维度	核心指标	数据来源与时间点
执行 Implementation	服务交付完整性、整改按期率、技术建议采纳率及数据隐私管理。	质控记录；持续监测。
维护 Maintenance	12 个月后措施运行、复评达标、制度纳入日常管理和扩散情况。	随访核查；12 个月及以后。

资料来源：RE-AIM 基础模型见 Glasgow 等［10］；合规门槛为本文结合中国法定义务的修订。

6 讨 论

6.1 相比原框架的优化价值

本次修订将论证中心由一般性的“组织健康促进”转向“职业卫生底线与综合健康的衔接”。这一调整更贴合中国小微企业的实际处境：在存在职业病危害的岗位，应先落实暴露控制、检测、健康监护和持续整改，再进一步推进领导力、员工参与及健康促进。这样既保留了 TWH 的整合价值，也避免将其误读为弱化用人单位法定义务的替代方案。

6.2 落地难点与应对

实施难点主要包括企业参与意愿不足、整改资金受限、服务质量差异以及随访流失。应对方式包括：以高风险岗位的可见改善建立企业信任；将技术服务和工程整改建议标准化并分级实施；由区域或园区组织共同采购服务；将后续复核纳入帮扶流程；在评价中区分企业未采纳和服务未到位的原因。

6.3 研究局限与后续研究

本文属于策略型研究报告，未开展新的一手调查，也不以未经核验的全国性比例推断小微企业总体风险。后续研究应在不同地区和行业开展基线调查、准实验或随机干预研究，优先测量暴露控制和法定义务执行效果，再评价综合健康和生产经营相关结果。对 2025 年后的国家规划、统计口径及帮扶安排，应随正式发布资料持续更新。

7 结 论

中国小微企业职业健康发展策略，应建立在职业病危害治理的坚实基础之上。可行路径是：以法律责任界定最低标准，以风险分级锁定优先岗位，以政府和专业服务网络降低能力门槛，以负责人承诺和员工参与保障持续执行；在上述基础上，再引入 TWH 的综合健康视角。该路径既回应中国职业卫生现实，也为小微企业提供了由合规走向可持续健康管理的实际步骤。

参考文献 References

［1］ 中华人民共和国职业病防治法（2018 年修正）。中华人民共和国主席令第二十四号。

［2］ 国家卫生健康委等. 关于印发国家职业病防治规划（2021—2025 年）的通知［Z］. 国卫职健发〔2021〕39 号, 2021.

［3］ 国家卫生健康委办公厅, 国家疾控局综合司. 关于印发职业病防治“三项行动”工作方案的通知［Z］. 国卫办职健函〔2024〕146 号, 2024.

［4］ 国家卫生健康委员会. 2024 年我国卫生健康事业发展统计公报［R］. 2025.

［5］ Schwatka N V, Tenney L, Dally M J, Scott J, Brown C E, Weitzenkamp D, Shore E, Newman L S. Small business Total Worker Health：A conceptual and methodological approach to facilitating organizational change［J］. Occupational Health Science, 2018, 2（1）：25-41. DOI:10. 1007/s41542-018-0013-9.

［6］ Sinclair R C, Cunningham T R, Schulte P A. A model for occupational safety and health intervention diffusion to small businesses［J］. American Journal of Industrial Medicine, 2013, 56（12）：1442-1451. DOI:10. 1002/ajim. 22263.

［7］ Fu C, Zhu M, Yu TSI, He Y. Effectiveness of participatory training on improving occupational health in small and medium enterprises in China［J］. International Journal of Occupational and En-

vironmental Health, 2013, 19（2）：85-90. DOI:10. 1179/2049396713Y. 0000000021.

［8］ Li W, Ni X, Zuo X, Liu S, Mei Q. Study on influencing factors of micro and small enterprises' work safety behavior in Chinese high-risk industries［J］. Frontiers in Psychology, 2022, 13:880205. DOI:10. 3389/fpsyg. 2022. 880205.

［9］ 潘海燕, 曾晓进, 张海东, 等. 苏州市小微企业职业健康管理帮扶对用人单位影响成效分析［J］. 中华劳动卫生职业病杂志, 2025, 43（3）：228-231. DOI:10. 3760/cma. j. cn121094-20231229-00037.

［10］ Glasgow R E, Vogt T M, Boles S M. Evaluating the public health impact of health promotion interventions：The RE-AIM framework［J］. American Journal of Public Health, 1999, 89（9）：1322-1327. DOI:10. 2105/AJPH. 89. 9. 1322.

［11］ 全国爱卫办, 国家卫生健康委, 工业和信息化部, 生态环境部, 全国总工会, 共青团中央, 全国妇联. 关于推进健康企业建设的通知：健康企业建设规范（试行）［Z］. 全爱卫办发〔2019〕3 号, 2019.

［12］ Zhang J J, Mei Q, Liu S X, Wang Q W. Study on the Influence of Government Intervention on the Occupational Health and Safety（OHS）Services of Small- and Medium-Sized Enterprises（SMEs）［J］. BioMed Research International, 2018, 2018:5014859. DOI:10. 1155/2018/5014859.

香港在應對氣候變化和極端天氣的職安建策略

游　雯總幹事
香港職業安全健康局

摘　要：全球暖化下，極端天氣帶來的挑戰日益嚴峻，世紀暴雨及超強颱風導致嚴重水浸、山泥傾瀉和交通癱瘓；酷熱天氣更影響眾多戶外工作員工的健康。極端天氣出現不但為員工職安健帶來嚴峻挑戰，更增加公用事業和基礎設施在緊急應變工作上的風險。

為減輕極端天氣帶來的損害並提升抗災韌性，香港特區政府多個部門和多個公用事業機構推行一套從「超前準備」、「加強預警」到「果斷應急」、「迅速復原」的綜合應對策略，包括勞工處修訂《惡劣天氣及「極端情況」下工作守則》、《預防工作時中暑指引》，協助雇主預早制定工作安排，保障雇員安全。天文台利用高性能計算及人工智慧天氣預報系統，提升天氣預測的精確度，提前發出提示，增強市民和企業的應變能力。渠務署和公用事業機構利用智慧監測系統、防洪工程、抽水及清淤機器人等技術，高效應對水浸風險。每當暴雨颱風來襲，渠務處團隊及其承建商應急隊伍需要在惡劣天氣下疏通渠道、清理積水，令市民生活盡快復常。工作期間會遇到不同的危害，對隊員的安全做成威脅。為加強前線人員保障，渠務署更於風季前為所有應急隊伍提供惡劣天氣下緊急工作的安全培訓。

綜合來說，通過整合智慧科技於監測、預警、現場管理等多方面，不但提升緊急應變效率，亦有助保障相關工作的職安健。及早應對氣候變化帶來的極端天氣挑戰，讓員工的工作安全和健康得到保障。

一、前言

全球暖化下，極端天氣帶來的挑戰日益嚴峻，世紀暴雨及超強颱風導致嚴重水浸、山泥傾瀉和交通癱瘓；酷熱天氣更影響眾多戶外工作員工的健康。極端天氣出現不但為員工職安健帶來嚴峻挑戰，更增加公用事業和基礎設施在緊急應變工作上的風險。

香港人口密集，其獨特的地理環境使其極易受到極端氣候的影響。根據香港天文台的數據及氣候預測模型顯示，香港的極端天氣模式正在發生顯著變化。過去香港平均每年受 5 至 6 個颱風吹襲，但在 2025 年，相關數字便大幅增加至 14 個，且這些颱風的破壞力更強、持續時間更長，路徑與強度也更難預測。在降雨量方面，自 1884 年至 2025 年期間，香港每年的大雨日數增加了 33%，總降雨量亦增加了 25%。破紀錄的暴雨更成為「新常態」，極端降雨（每小時超過 50 毫米或 70 毫米）的次數顯著上升，單日極端降雨的頻率亦屢創新高。

除了風暴與降雨，氣候變化亦帶來了極端高溫的問題。數據顯示，香港的「酷熱天氣日數」（即日最高氣溫達 33° C 或以上）在過去十年間激增了近一倍，從 2015 年的 28 日大幅飆升至 2025 年的 53 日。平均氣溫的持續且急劇上升，使戶外工作的人士面臨極大的中暑及健康風險。

極端天氣帶來頻繁的風暴和大雨、高濕度及氣溫，加速了城市建築物和樓宇的損耗和老化。在香港，目前已有約 5,200 幢樓齡超過 30 年的建築物被評定為「狀況欠佳或失修」，預計到 2046 年，此數字將突破 20,000 幢。極端天氣大大增加了混凝土剝落及外牆倒塌的風險，對維修人員及公眾安全構成威脅。

二、極端天氣下的應對策略

面對如此嚴峻的氣候變化趨勢，香港特區政府多個部門和多個公用事業機構推行一套從「超前準備」、「加強預警」到「果斷應急」、「迅速復原」的綜合應對策略，以減輕極端天氣帶來的損害並提升抗災韌性。然而，極端天氣影響範圍廣、變化迅速，且具高度不確定性，僅憑傳統人力巡查與監測，難以做到即時且全面的評估。引入人工智能監測系統、無人機及機械人等創新科技，不僅能突破人力監測的局限，更能顯著降低救援及前線人員暴露於危險環境的風險。因此，科技應用已成為香港提升防災減災能力、積極應對氣候變化不可或缺的核心支柱。

香港天文台利用高性能計算及人工智能天氣預報系統，提升天氣預測的精確度，提前發出提示，增強市民和企業的應變能力。當突如其來的暴雨出現時，地下車站、隧道及低窪位置容易積水，對員工構成極大風險。為了提高應變能力，港鐵公司在高風險車站出入口安裝水浸感應器，當水位上升時即時發出警報；同時增設防洪板、擋水設施及更先進的監察和警報系統，以減少暴雨洪水湧入的機會。員工亦會定期接受暴雨及水浸應急演練，熟習操作抽水裝置、封閉水浸區域、風險評估及穿戴適當個人防護裝備等程序。演練的目的，不只是防止水浸、避免情況惡化和儘快恢復鐵路運作，更重要是讓前線人員熟悉應變程序、強化協調與溝通，提升反應速度，以便能更安全、更準確、更快地應對災害。

為應對愈趨頻繁的極端天氣所引致的洪水和水浸風險，渠務署將應急模式轉為更主動、更具前瞻性及更精準的管理，加強在準備、預警、應急和復原四方面的能力，並於雨季前落實一系列預防性防洪措施，包括主動巡查設施、加強渠道和蓄洪池清淤工作，確保排水系統保持暢通。渠務署積極研發智能系統，包括人工智能水浸監測系統，水浸風險預測系統，清淤機械人以及強力排水機械人，務求在惡劣天氣下更迅速地展開防洪及處理水浸工作，並派遣 200 隊緊急應變隊伍迅速處理水浸個案，協助社會迅速復原。

使用遙距操作機械人處理高風險清淤排水工作，可減少工人進入密閉空間或水浸區域的需要，從而降低中毒、缺氧、觸電及被水淹沒等風險。為進一步保障人員在惡劣天氣下執行緊急職務時的安全，渠務署自 2025 年 12 月與職安局合辦「惡劣天氣下渠務署緊急工作安全培訓」。有關培訓內容涵蓋理論學習與模擬演練，旨在確保前線人員充分掌握在極端天氣下作業的潛在風險，並熟練運用各項相應的安全防護措施。截至 2026 年 3 月底香港風雨季節來臨前，已有超過 1,600 名人員順利完成培訓，務求在為市民服務的同時，確保每一位前線人員的安全得到最大保障。

在氣候變化時代，極端天氣加劇了山泥傾瀉、樓宇外牆老化、石材脫落或剝離等風險。僅依靠傳統人力巡查與監測，已難以在極端天氣前後及期間，實現大範圍、快速變化且充滿不確定性環境中的及時評估。因此，科技應用已成為應對氣候變化策略中不可或缺的一環。

在山泥傾瀉事故中，傳統應急車輛常因道路損毀或交通阻滯而難以即時抵達。為此，發展局及土木工程拓展署開發了無人機聯控管理平台，透過整合定點與流動無人機機庫網絡，實施遠距自動化調配。與傳統地面救援相比，無人機不受地貌與交通限制，更無需人員親臨

災害現場進行目視飛行。無人機能於極短時間內飛越障礙直達現場，即時進行數據收集與救援支援，真正實現「人未到、車未到、機先到」，大大提升救援效率，極力減低生命財產損失。

無人機與 AI 的融合應用，現已延伸至樓宇外牆老化及石屎剝落等安全監測領域。過往依賴人員前往高危位置進行檢測，不僅效率欠佳，更直接威脅前線安全。如今透過搭載 AI 影像分析技術的無人機，能在極短時間內完成大範圍的初步巡檢，並實時回傳高解析度影像與數據，供專業人士對樓宇外牆結構進行遠距分析及研判。此舉不僅大幅提升樓宇巡查效率，更有效避免前線人員暴露於高空危險環境。

三、極端酷熱與熱壓力管理

若說暴雨及颱風是香港極端氣候的「外在衝擊」，那麼酷熱天氣更是變得持久和常態化。尤其對戶外工作者而言，高溫、高濕與長時間曝曬會導致脫水、熱衰竭和中暑，嚴重時甚至危及生命。

為應對在酷熱環境工作的風險，香港勞工處推出《預防工作時中暑指引》並實施「工作暑熱警告」系統。為了讓僱主及僱員更容易評估在酷熱天氣下處於戶外或沒有設置空調系統的室內環境工作時的熱壓力水平。僱主／負責人可參考勞工處發出的工作暑熱警告，從而可較簡易便利地判斷僱員在工作時所面對的中暑風險。

「工作暑熱警告」系統是勞工處基於天文台發布的「香港暑熱指數數值」及「極端酷熱天氣」特別提示制定，分為黃色、紅色及黑色三級工作暑熱警告，顯示僱員在有關環境工作時面對顯著及遞增的熱壓力水平，並按風險等級以不同顏色警示僱主與僱員，提醒其在高溫下安排休息、調整工作量及加強工作中的防暑措施。

針對在工作中預防中暑，有本地公司與大學合作研發「AI 熱傷害預防系統」。該系統透過量度工作環境的濕球黑球溫度（WBGT）指數，結合工人的生理數據（如體溫、心率、運動加速度及定位）與雲端平台的個人健康資訊（如年齡、性別、慢性病史及生活習慣），利用 AI 進行綜合分析與風險預測。相較於傳統 WBGT 管理採用全場統一標準、無法兼顧個體差異的局限，該系統能為每位工人精準計算個人化的熱傷害風險指數。當風險超過預設閾值時，系統會自動發出語音警報，並同步傳送推播通知至管理人員手機，實現精準預警，確保資源集中於高風險人員。

職業安全健康局（職安局）每年就預防工作時中暑展開多項推廣與研究，包括發布中暑預防資訊、海報、宣傳卡、貼紙及短片，提升工友對熱傷害的認知。除教育宣傳外，局方亦引入並推廣各類降溫產品，如冰涼頸巾、冰涼背心、冷氣背心、太陽能座地風扇及便攜風扇等。這些產品看似簡單，卻能為長時間戶外工作的工友快速減輕不適，協助維持工作狀態。

職安局更進一步與香港理工大學合作，研究不同降溫產品與方法在工作時與休息期間的實際效能。透過研究方法和實際應用體驗，找出適合前線戶外員工使用的清涼用品並測試有關用品的消暑效果，為僱主僱員在選擇清涼用品時，提供科學依據和參考。

研究結果顯示，在工作時使用冰涼背心、冰涼頸巾、掛腰風扇和 PCM 冰環均具有一定的消暑效果，對舒緩實驗參加者的工作辛苦程度、增加生產力、減低體力工作對參加者的造成的生理負荷、減低皮膚溫度和呼吸速率上升，以及促進恢復體力方面均有幫助。

在休息期間使用清涼用品（如冰包背心、風扇、冰領及浸手）可有效降低生理負荷、減輕主觀疲勞並提升工作效率。其中，浸手降溫的整體效果最為顯著，而組合使用清涼用品的消暑效果亦不俗，顯示這些方法可作為酷熱工作環境下的有效降溫策略，幫助工友散熱降溫

並提升生產力。

到了暑熱季節，有遮蔭和通風的休息地方對在戶外從事體力勞動的工友十分重要。然而，在部份鄉郊和偏遠地區，要設立人性化的「避暑」休息站，要面對缺電無遮蔭等問題。職安局推出第一代「太陽能清涼休息站」，利用太陽能供電予休息站內清涼設施，解決了為偏遠地區供電的棘手問題，讓業界以此為藍本，為在偏遠地點工作的工友設立休息站。

總　結

氣候變化對職業安全健康的影響日趨深遠，極端天氣已從偶發事件轉變為必須持續應對的新常態。面對這類挑戰，僅靠加強預警或增派人手並不足夠，關鍵在於構建一套整合預警機制、科技應用、工程控制、行政措施與教育推廣的系統性策略。

從防洪防滑坡、應急機械人、智能實時監測、無人機巡檢，到暑熱警告及消暑降溫裝備，香港正在逐步建立一套更具韌性的極端天氣下職安健防護體系。這些措施不僅提升了前線工人的安全與健康保障，也體現出職安健工作必須隨氣候變化而動態演進。

展望未來，隨著極端氣候影響進一步加劇，香港仍需持續強化跨部門協作、數據驅動分析與創新科技應用，才能真正實現「以人為本、以風險為先、以創新應變」的極端天氣下職安健管理目標。

超越紙張主義：大型綜合渡假村人性化職業安全管理藍圖

楊宏豐
金殿超濠股份有限公司（MGM Grand Paradise Ltd）安全行政總監，2026

摘　要：大型博彩綜合渡假村的營運規模猶如一個自給自足的微型城市。管理超過萬名員工的職業安全健康（職安健）面臨著空前的物流與人力挑戰。這支龐大的員工隊伍橫跨前線博彩營運、大型餐飲設施、重型工程及環境服務，且其中很大一部分的前線操作員接受正規教育的程度普遍較低，這使得傳統、依賴大量文字的官僚式安全管理模式容易失效。

在過去近二十年的時間裡，澳門美高梅的營運數據持續證實了一個關鍵的營運真理：在紙面上塞滿標準作業程序對提高前線員工的安全意識很多時毫無幫助。相反，行政上的安全官僚主義只會營造出「合規的假像」，同時嚴重壓榨了安全管理人員和前線主管執行實地安全防範措施所必需的時間。

透過將「流於計算、流於紙面的官僚文化」轉變為「動態、以人為本的實踐框架」，澳門美高梅得以在澳門六家博彩承批公司中，持續保持其中一家最低的平均工傷率。本分析文章將此一經實踐檢驗的框架拆解為五個不可缺的營運支柱：

1. 針對性且易於理解的培訓
2. 動態風險識別與監控
3. 行為安全（BBS）管理
4. 透過結構化獎懲機制的問責制度
5. 安全文化發展

本文章結合了全球統計數據、安全科學範式以及跨行業案例研究，旨在為港澳地區尋求突破行政紙張主義、邁向高可靠性「零傷害」實地執行的安全從業員提供一套實用的行動藍圖。

紙張陷阱：官僚主義 vs 實地安全

在複雜的組織環境中，安全管理往往會陷入一種「官僚陷阱」。當事故發生時，傳統的行政反射動作通常是起草一份新的標準作業程序，強制員工簽名確認，然後將文件存檔。久而久之，這會演變成龐大且難以負荷的文書工作，安全科學文獻將此分類為「計算型」或「官僚型」的安全文化（Hudson，2000，2007）。

在計算型文化中，組織往往透過填寫表格的數量、簽到表的完整度以及存檔資料夾的厚度來衡量安全表現。這種做法在巨型渡假村環境中引發了三個嚴重的營運失效點：

• 低學歷前線員工的認知負擔：對於一名學歷較低管事部員工、公共區域清潔員或廚房初級廚師而言，一本長達十頁的書面標準作業程序是一道障礙，而非工具。當安全期望被埋在密密麻麻的文字中時，前線員工自然會產生排斥心理，導致主動安全意識下滑至基準線以下。

• 「合規假像」（銳端 vs 鈍端）：學術研究強調了「紙面安全」（由行政「鈍端」管理）與「實踐安全」（由前線員工在「銳端」執行）之間存在著巨大的鴻溝（Hale，2025）。資料夾裡完美的文檔，往往掩蓋了博彩渡假村現場早已被「常態化」的嚴重違章捷徑。

• 壓榨前線主管的主動監管時間：安全管理人員或班次主管每花一小時在記錄重複數據、填寫表格或審核文書上，就等於從前線巡查中偷走了一小時。真正的風險緩解來自於主動的現場能見度、即時的指導輔導以及實時的隱患糾正，而不是坐在辦公桌後面。

要打破這個惡性循環，現代安全領袖必須聚焦於一個圍繞前線員工如何真正處理風險的人性化模型。

支柱一：針對性且易於理解的培訓

面對一支受教育背景多元的萬人工作團隊，傳統的課堂講座和充滿文字的簡報投影片無法帶來持久的效果。有效的安全培訓必須具備高度的視覺化、觸覺化，並直接融入日常的工作流程中。

視覺與動覺學習範式

• 微學習與實地安全會（Tool-Box Talks）：應取消冗長、理論性的培訓課程，改為直接在現場進行 5 到 10 分鐘精簡的「實地安全會」。這些簡報每次只聚焦於一個立即可用的主題–例如正確處置某種洗碗化學品的方法，或搬運沉重行李架的正確人體工學姿勢。

• 視覺輔助工具的整合：傳統的文字標示應替換為清晰、有顏色編碼且具高度圖示化的安全海報。例如，化學品稀釋站應採用清晰的顏色匹配（如藍色代表玻璃清潔劑，紅色代表重度去油劑），並配有實物照片、分步說明圖解，及視頻影片展示所需的個人防護裝備（PPE）。

• 動覺模擬訓練：員工透過「動手做」能將資訊記憶得最深刻。針對工程部、管事部和房務部團隊的培訓應著重於實際的動手模擬–例如親自操作高壓噴洗機，或在模擬酒店客房床上練習正確的身體結構力學，從而直接將肌肉記憶融入日常工作。

全球統計數據驗證

將培訓轉向結構化、專業化所帶來的營運成效，得到了安全科學數據的有力支持：

［傳統培訓］-->行為改變微乎其微；隱患率維持不變

［專業/視覺培訓］-->事故發生頻率降低高達 50%|安全無事故間隔時間延長至 2 倍

一項針對高風險營運環境的全面性統計研究表明，專業且具針對性的培訓能使事故發生頻率降低高達 50%，並使安全無事故的持續時間幾乎翻倍；相反，泛泛或缺乏結構的培訓對行為的改善微乎極微（Oğuz，2025）。

酒店業〔渡假村〕應用案例研究

試想一個擁有龐大員工數量的渡假村管事部，在夜間深度清潔班次中，化學品濺傷及輕微割傷的事故率居高不下。

管理層沒有安排團隊去上關於化學品安全技術說明書的正式課堂講座，而是直接在中央廚房設立了一個互動式的「安全競技場」。主管們故意佈置一些錯誤的場景–例如未貼標籤的化學品瓶，或傳送帶洗碗機上未掛好的安全防護罩–並挑戰團隊找出其中的風險。

在這次互動式體驗後，員工們現場實際演練了穿戴和脫卸個人防護裝備（PPE）的正確順序。這種高度視覺化、動覺化的方法能讓化學品處理事故率立即下降，這證明現場的清晰度和實際演練的效果每次都優於書面條款。

支柱二：動態風險識別與監控

在一個全年無休、每天 24 小時營運的綜合渡假村中，潛在隱患隨時在變。一份鎖在辦公室櫃子裡的靜態年度風險評估報告，對於預防活生生的現場事故毫無幫助。風險識別必須是

動態的、持續的，並由最瞭解前線情況的員工來驅動。

風險識別民主化（賦予前線識別風險的權利）

前線員工往往比安全經理更早發現營運風險。真正的風險緩解意味著必須為這些員工提供簡單、易懂的渠道來上報隱患，而不需要填寫複雜的表格或使用技術術語。

・「看到了，說出來」系統（“See Something，Say Something”）：渡假村必須建立一個簡單、非官僚化的隱患報告流程。前線員工發現問題時–例如繁忙博彩區通道上地毯接縫磨損脫線，或是地下機房冷卻閥洩漏–應該能夠口頭向其直屬主管報告，或者透過手機應用程式「一鍵上傳」現場照片。

・簡化版現場風險工具（FLRA）：在開始非例行維修或深度清潔工作前，團隊應使用簡化、基於圖示的「現場級風險評估」（Field Level Risk Assessment，FLRA）。員工不需要填寫冗長的合規清單，而是進行簡短的三步思考與口頭確認：

1．停下（STOP）–>暫停動作，掃視周圍環境。

2．尋找（FIND）–>識別任何即時隱患（如地面濕滑、空間狹窄）。

3．解決（FIX）–>在開始工作前，消除風險或向上匯報。

前瞻性關鍵績效指標監控

為了確保萬名員工的安全，渡假村必須將追蹤焦點從「滯後指標」（事故發生後點算受傷人數）轉向「前瞻指標」（衡量為了預防事故而採取的安全行動）。

指標類型	追蹤的具體指標	組織管理目的
前瞻指標（Leading）	• 已提交並解決的隱患報告數量 • 按時完成的預防性維護工作量 • 高級管理層每月進行的安全巡查次數	驅動主動的風險消減，在工傷事故發生前將問題解決。
滯後指標（Lagging）	• 總可記錄事件率（TRIR） • 工時損失事件頻率（LTIFR） • 申報的勞工保傷索賠總額	衡量過去的安全表現，追蹤歷史失敗點。

在渡假村的營運環境中，絕對不能被動地等待受傷事故來告訴我們漏洞在哪裡。一個高效的安全管理項目必須透過追蹤和驅動前瞻性指標，在隱患釀成傷害前將其消滅。

支柱三：行為安全（BBS）管理

在工業事故中，高達 80%至 85%的不安全事件都是由不安全行為或人為錯誤直接或間接引發的而非結構性的機械故障（Rahman，2020）。因此，要實現可持續的風險下調，必須對行為管理進行系統性的聚焦。

行為改變的 ABC 模型

現代行為安全管理（Behavior Based Safety，BBS）高度依賴「前因–行為–後果」（Antecedent–Behavior–Consequence，ABC）框架來理解並改善安全習慣（Rahman，2020）：

［前因（A）：觸發點/SOPs/安全標示］–->［行為（B）：安全 vs 不安全行為］–->［後果（C）：反饋結果/即時回報或處罰］

• 前因（Antecedent–A）：引發某種行為的事件或觸發點（例如：一份 SOP、一張警告標示或一場實地安全會）。

• 行為（Behavior–B）：員工採取的實際行動（例如：在操作手提磨機時，選擇是否配戴護目鏡）。

• 後果（Consequence–C）：行為發生後隨之而來的即時結果，這會強烈影響該行為未來是否會重複出現。

在傳統的官僚安全系統中，管理層幾乎把所有精力都放在「前因」上（寫更多紙面規則）。然而，行為科學顯示，驅動行為的核心力量其實是即時的「後果」。

如果一名廚房管事工面對一條前因規則–例如「搬運重物箱時必須雙人抬舉」，但他發現自己一一個人搬可以省下十分鐘，且主管對此默許不語（不安全行為帶來了即時且正向的便利後果），那麼他將會一再選擇抄捷徑。要建立可靠的安全習慣，管理層必須透過定期的現場正面強化，來改變後果結構。

同事間的相互觀察（Peer–to–Peer Observations）

當行為安全管理是由一線員工驅動、而非自上而下強加時，效果最好。挑選出來的前線員工接受培訓後，使用一份聚焦於關鍵行為（如身體姿勢、工具使用是否正確、PPE 是否配戴齊全）的簡單清單，對同事進行簡短且尊重的觀察。觀察員會記錄下相關操作是安全還是不安全，在發現即時危險時叫停工作，並與員工進行簡短、建設性的對話。至關重要的一點是：這些觀察數據必須完全匿名，且絕不用於紀律處分。相反，收集這些數據是為了找出更深層次的安全系統問題，例如工作站設計不良或工具短缺。

統計成效驗證

• 減少事故：跨高風險行業的數據顯示，實施結構化的 BBS 項目能在單次執行週期內降低 67%至 89%的工作場所事故，這是透過系統性地用安全、可重複的行為取代不安全習慣所達到的成果（Rahman，2020）。

• 提高合規率：學術研究證實，將行為指導與主管支持相結合，能使法規安全合規率提升超過 15%，使平均合規分數從大約 80%躍升至 95%以上（Moon，2024）。

支柱四：透過獎懲機制落實問責制度

一個成功的安全文化必須在「鼓勵」與「底線」之間取得平衡。為了在萬名員工中維持高標準的安全水準，渡假村必須將對安全行為的正向強化，與對蓄意違反安全規則的清晰問責制度緊密結合。

公正文化（Just Culture）框架

現代職安健管理高度依賴「公正文化」框架（Reason，1997），該框架在誠實的人為錯誤與疏忽職守的違章行為之間劃定了一條清晰、透明的界線：

• 人為錯誤（Human Error）：由於疲勞、分心或流程混亂導致的無意間錯誤、疏忽或失誤。管理回應：對員工進行輔導、審查系統並改善工作環境，不給予懲罰。

• 風險行為（At–Risk Behavior）：員工採取了未經授權的捷徑，因為他們認為這無傷大雅，或者為了趕上工作進度而不得不為之。管理回應：給予諮詢、重新培訓，並調整現場的激勵機制以制止走捷徑的行為。

• 魯莽行為（Reckless Conduct）：明知會帶來即時危險，仍有意識地、故意決定繞過關鍵的安全規則（如未進行上鎖掛牌 Lockout–Tagout 便將手伸入運轉中的機械）。管理回應：採取迅速、一致的紀律處分，最高可至解僱。

有效的獎勵系統

• 即時同事認可：推行「同事間安全提名計劃」，員工如果捕捉到同事表現出格外安全的行為，可以向其發放小額、具即時價值的禮券（如渡假村餐飲額度或超市現金券）。

• 團隊安全慶祝：當某個部門（例如公共區域房務部）達到連續 100 天無可記錄工傷的里程碑時，應舉行實實在在的團隊慶祝活動，如集體午餐或部門抽獎。這能建立集體榮譽感，激勵團隊成員在現場互相照應。

執行策略

當員工蓄意做出魯莽的違章行為時，紀律處分程式必須迅速、公正，且在所有部門間保持一致。如果前線員工看到一名產出高產的廚

師或資深技術員繞過關鍵安全步驟卻不受任何處分，整個安全項目的公信力將蕩然無存。問責制必須平等地適用於每個人，不論其營運職級或業務表現多麼優秀。

支柱五：安全文化發展

最後，也是最重要的一根支柱，是推動組織從「盲目遵守規則」轉變為「真正活出安全」的文化。派翠克・哈德森（Patrick Hudson）教授的演進模型將安全文化的成熟度劃分為五個不同階段：

1．病態型（Pathological）：「只要不被抓到，我們根本不在乎。」

2．被動反應型（Reactive）：「出了工傷事故後，我們才開始重視安全。」

3．計算型（Calculative）：「我們有整整幾大夾的規則和文書表格。」

4．主動預防型（Proactive）：「我們主動預測並試圖消除潛在隱患。」

5．引領型（Generative）：「安全已經完全融入我們工作的血脈之中。」

要達到引領型文化，安全必須擺脫自上而下的行政強加，轉變成綜合渡假村內每一位員工內心深處共用的個人價值觀。

領導層的現場能見度與參與度

一個創建式文化無法從辦公室隔間建立。高階主管和安全管理人員必須在實際工作進行的現場保持高度能見度。

• 管理層安全巡查（Management Safety Walks）：行政高管和安全總監應每月定期對渡假村的後勤區域、廚房和工程機房進行結構化巡查。這些巡查不是為了懲罰員工而進行的合規檢查，而是與前線員工面對面溝通、詢問他們日常安全痛點並確保他們擁有安全作業工具的絕佳機會。

• 前線主管的主動支持：前線班次主管對員工日常的安全習慣有著巨大的影響。統計研究表明，只要有主管給予主動的安全支持，員工遭受身體傷害的風險將比缺乏主管支持的環境降低 3.5 倍以上（Yanar et al.，2019）。那些日常主動關心團隊福祉、迅速解決現場隱患的主管，是將安全政策轉化為現實世界保護屏障的核心紐帶。

開放溝通與心理安全感

為了讓安全文化持續演進，前線員工必須感到百分之百的「心理安全感」去發表意見。如果員工害怕上報一次意外的化學品洩漏、一把損壞的梯子或一次險失事故（Near-miss）會讓自己或隊友陷入麻煩，他們就會選擇隱瞞。建立真正的心理安全感，意味著管理層應將隱患報告和險失記錄視為保護整個渡假村大家庭的寶貴貢獻予以表彰，從而將團隊的思維模式從「害怕被責怪」扭轉為「共同保持警惕」。

結論與具體行動建議

在管理超過萬名多元化員工的博彩綜合渡假村時，必須果斷摒棄傳統、沉重的紙面合規主義。大量複雜且無人閱讀的標準作業程序，對快節奏渡假村前線正在操作的員工起不到任何保護作用。真正的安全效益，是透過直接投資於「人」來實現的。

透過將精力聚焦於易於理解的培訓、持續的隱患意識、行為管理、公正的問責制以及具支持性的開放文化，港澳地區的安全從業員可以創造出一個既高效又深度安全的現代化工作場所。

給安全領袖的核心行動綱領

• 第 1 個月–進行文書工作審計：全面審查組織現有的安全文檔。識別並剔除冗餘的表格、過度設計的程式以及繁瑣的行政任務。

• 第 2 至 3 個月–重新設計培訓項目：將冗長、文字密集的培訓投影片淘汰。改為推行精簡、高度視覺化且注重動手演練的微學習課程。

• 第 4 個月–啟動行為安全試點計劃：在關鍵營運部門（如管事部或房務部）引入簡單的同事間行為觀察項目。

• 第 5 個月–確立清晰的公正文化政策：制定並推行一套清晰、透明的政策，明確區分無心的人為錯誤與蓄意的違章行為。

參考文獻

［1］ Amirah, N. A., et al.（2024）. “Fostering a safety culture in manufacturing through safety behavior: A structural equation modelling approach”. Journal of Safety and Sustainability, 1, 108–116.

［2］ Hale, A.（2025）. “Management of safety rules and procedures: A systematic literature review”. Institution of Occupational Safety & Health（IOSH）Research Report.

［3］ Hudson, P.（2000）. “Safety culture — Theory and practice”. DTI Center for Human Sciences Report, 1–14.

［4］ Hudson, P.（2007）. “Safety management and safety culture: The long, hard and winding road”. Aviation Safety Management Systems, 3–21.

［5］ Moon, K.（2024）. “Effect of a safety leadership training including coaching on safety performance and climate in wood-processing companies”. Safety and Health at Work, 15（3）, 310–316.

［6］ Oğuz, A.（2025）. “Evaluating safety training's role in reducing construction accidents: Poisson and Weibull model analysis”. International Journal of Occupational Safety and Health, 15（1）, 45 – 58.

［7］ Rahman, A. V.（2020）. “The analysis of worker safe behaviour based on the Antecedent Behavior Consequence（ABC）behavior model”. Semantic Scholar Corpus ID: 254891102.

［8］ Reason, J.（1997）. “Managing the risks of organizational accidents”. Ashgate Publishing.

［9］ Yanar, B., Lay, M., & Smith, P. M.（2019）. The interplay between supervisor safety support and occupational health and safety vulnerability on work injury. Safety and Health at Work, 10（2）, 172 – 179.

電力作業的主動式風險防護方案

王開原，李雅媛，周子雯，李志釗
澳門電力股份有限公司

摘　要：澳門電力股份有限公司是擁有對澳門特別行政區的輸送、分配及出售高、中和低壓電力的供電公共服務專營機構。澳電人員在輸配電設備的建設及維護工作中，多暴露於觸電、電弧灼傷、高處墜落或人因性危害等風險。過去澳電用於減輕上述風險的控制措施多局限於被動式安全監督或層次較低的工程管理控制方法，此類方法缺乏可視化的安全審核和知識及績效反饋系統，且高度依賴監督人員自身的危害辨識能力及經驗，在應對較複雜的作業環境時，其防護效能顯著不足，難以有效控制作業的風險程度。

要使有關風險的防護辦法更有效，應設法將意外發生概率予以降低。從 2022 年開始，澳電就著手利用主動式風險防護方案，通過引入高新科技在日常電力設備巡檢及維護工作的應用、不同類型風險因子數據可視化和作業場所風險評估流程標準化等措施，目前所取得的成效是意外率和作業風險的明顯下降。引入主動式風險防護方案後，作業者能較準確地知道自身所處狀態及危險程度，由此形成以人為核心、靠科技保障的安全運行思路。

未來，澳電將持續研究高新科技在風險管理中的探索應用，加強電業人員的職安培訓，為專營業務儲備足夠的本地人才，以進一步保障人員的作業安全及電網的穩定運行。

壹、引　言

澳門勞動人口目前正以一定速度增長，與之對應的工傷人數也有所上升，按勞工事務局 2025 年公佈的統計數據（勞工事務局，2025），2024 年因工受傷者共 5095 人，較 2021 年增加 236 人。在澳門勞工局的積極防治下，工傷總數量沒有出現劇烈波動，但已構成對勞動者人身安全比較確定的威脅（或潛在威脅）。

在各類型工作意外中，電力作業事故導致的致死率遠高於其他常見的事故類型，根據香港在 2006 至 2015 年間的統計，因電力作業事故導致的死亡率比高處墜落和交通意外高出 5 至 7 倍（職業安全健康局，2016）。此外，電力作業事故一般會衍生區域性停電與設備損毀等延伸性災害，除導致人員傷亡外，亦會直接或間接造成經濟損失。除了具有高致死率外，電力作業事故亦具有高隱蔽性的特點，其在發生前往往難以察覺且發生時蔓延迅速，現場人員一般來不及作出有效反應。

各地區所採用的電力作業風險防護方案一般都是根據本地法規及實際特點加以調整，但過去多以事前風險分析、安全工作制度、定期檢修、正確使用防護裝置等這類被動式安全監督或低階工程管理來處理問題。從澳門電力股份有限公司（以下簡稱“澳電”）的角度說，2022 年以前其風險防護主要依賴於評估、宣傳、個人防護及圍封等措施，這類被動式防護方案存在固有缺陷：不能保證危害辨識的及時準確、標準作業流程不易更新、糾正措施常有延遲。在參照中國有關數智化電力管理思路的

基礎上，澳電從 2022 年開始對舊式方案作改進，把人工智慧、資料視覺化納入考慮範圍，使防護方案轉為主動形式，由此形成較完整的體系，並在 2024 年達成了零工傷的理想結果。

貳、電力作業的管理體系變革：從被動到主動

一.主動式風險控制的基石

澳電輸配電部（簡稱“TAD”）長期肩負著澳門電網的建設維護及應急響應等電力作業任務。隨著澳門市電網日趨複雜，有關電力作業的難度也在上升，而對承包商施工作業作安全檢查時所用的資料並不集中，監管上易有空白，單純靠被動式安全防護方案不能很好解決所遇困難。

為解決上述問題，TAD 自 2022 年開始採用主動式風險防護方案，該方案是以澳電所使用的傳統被動式風險防護方案為基礎，並以澳電開發的工程管理系統（簡稱“WMS”）為核心所構建的作業管理體系，其架構如圖 1 所示。WMS 包括開發網頁端與手機應用端如圖 2 所示，可對一線現場的查詢進行及時確認，亦可作爲後端匯總分析平臺，以此實現一線人員、管理人員和承辦商之間的資訊互通、觀點統一和減少誤解。

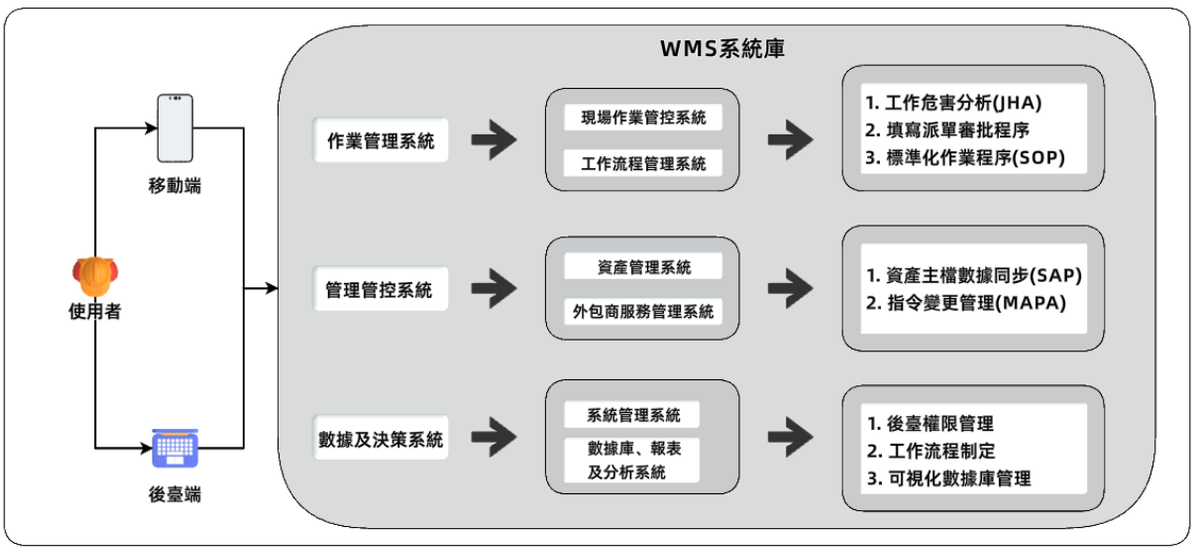


圖 1　工程管理系統（WMS）

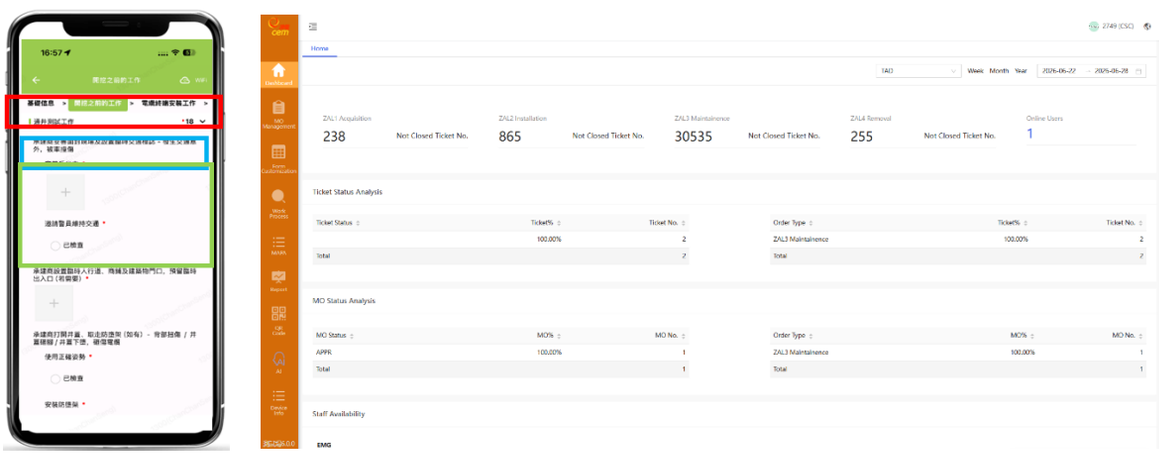


圖 2　左：移動端操作介面　右：網頁端操作介面

WMS 系統能設定異質權限控制，把有關資料、業務及標準化作業程式（簡稱“SOP”）等都納入查詢範圍。就安全及風險管理而言，2022 年起 WMS 系統加入了風險源數據整合功能，一線人員發現的風險問題可用移動設備即時報告、由管理人員依流程加以確認後存入系統內風險來源資料庫，由此達到全平臺風險資訊統一化和可視化效果如圖 3 所示。同時又將工作危害分析（簡稱“JHA”）納入系統考慮中，當要處理類似工程作業時，就按類別從已知風險源中搜索匹配項，相關結果直接帶入 JHA 步驟，協助一線人員完成危害識別與風險評估，強化一線人員風險識別的準確度和效率。

最終，透過上述標準化機制，可統一全體人員對 JHA 和 SOP 程式的理解，並以此減少 JHA 和 SOP 程式對安全工程師和一線人員經驗的依賴。

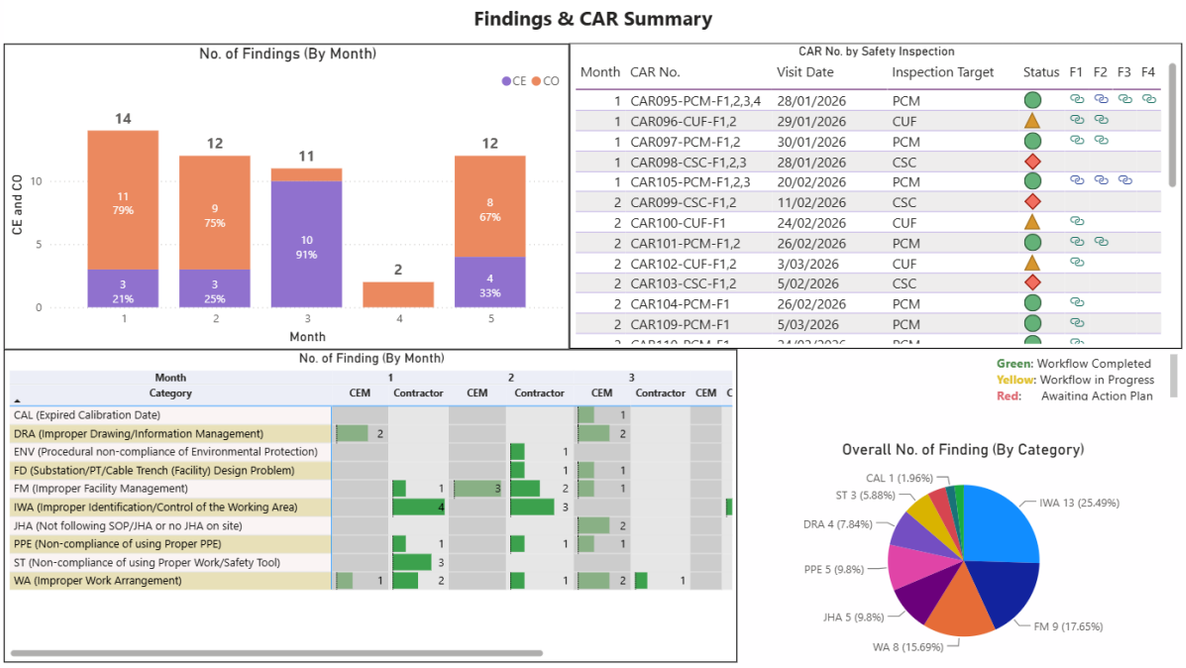


圖 3　可視化數據介面

二.風險評估模式的量化創新

TAD 在以往的風險評估時主要依靠電力作業團隊的領隊在每次作業前依據表 1 對作業的每個 SOP 步驟進行風險評估，並依據式 1 進行風險度計算，基於計算結果判斷 SOP 步驟是否需採取相應防護措施。以 2021 年澳電一單不幸的工傷爲例，作業團隊需通過樓梯降入 2 米深的曲軸箱體內部進行作業，因進行環境風險度評估時未注意樓梯階梯被油漬覆蓋，導致一名人員在攀爬時打滑而導致跌傷。這起事故發生的直接原因便是由於對環境隱蔽性的風險度評估並不充分，同時評估人員亦缺乏相關經驗導致的。

表 1　風險識別矩陣

風險矩陣			後果嚴重度（C）				
			幾乎不發生損失	損失較小	一般性損失	遭受大量損失	損失不可接受
			1	2	3	4	5
發生可能性（L）	極易發生	5	5	10	15	20	25
	發生可能性大	4	4	8	12	16	20
	可能會發生	3	3	6	9	12	15
	發生可能性小	2	2	4	6	8	10
	幾乎不發生	1	1	2	3	4	5

$$D = L \times C \qquad （式 1）$$

式 1 中，D 為風險度，L 為發生可能性，C

為後果嚴重度。

爲盡可能降低因風險評估不到位導致的意外概率，在參考類似項目的風險識別方案後（陳國華，2013）和（李宗坤，2020），TAD 在 2022 年主動對傳統採用的風險防護方案中的風險評估方式進行量化創新，並在風險度評估中引入了權重係數 ω 作為評定各獨立作業風險等級（高、中、低）的客觀依據。澳電專家組將後果嚴重度 C 拆分為兩個影響維度：工期影響 I_T 和安全/社會效果 I_S，並通過層次分析法（AHP）進行賦值比較，以降低主觀影響，其風險度演算法如式 2 所示。此方式可以避免因個人經驗問題導致的誤判，並可結合危險源數據庫提供的資料獲得更加客觀真實的長期數據，不但提高了風險評估的準確性，並通過 WMS 與 JHA 結合的方式，讓一線作業人員可以直接使用和參考相關結論，通過知曉不同權重之間的大小比較，可清晰識別高風險的目標，以做到準確預防、提前預判的效果。

$$D = L \times (\omega_T I_T + \omega_S I_S) \qquad (式 2)$$

三.管理人員的交叉安全巡檢制度

從澳電已有的事故調查資料來看，若固定班底以同一方式、同一週期做檢修工作，就有可能使作業者陷入“僥倖心理”，將危險環境潛移默化地識別成“家常便飯”，這種心理本身對危險情境的防範是不利的，在多次沒有事故發生之後“僥倖心理”往往迅速增長，誤判所做作業的傷亡概率為極低或完全無可能（秦曉瑜，2026）。此種因馬虎大意而漠視潛在重傷或死亡風險的行為，正是傳統被動式安全管理的短板，其長期效果在很大程度上要依靠員工個人經驗及自律狀態。

爲儘量將因“僥倖心理”而出現的風險概率予以控制或減少，TAD 在 2022 年採用主動式風險防護方案後，同時著手制定、推行“健康環境安全及品質巡查制度（簡稱“SHEQ”）”。該制度是針對管轄區域內一切有風險源的工程而設的協力監督機制，按一定週期派遣專業巡檢組進行突擊性檢查，用以確認現場操作者實際是按 SOP 執行安全作業，並確保其作業方式符合澳電規範要求。巡檢結果亦會通過數據分析系統分析發現的隱患並依據情況執行糾正方案或承辦商懲罰機制。SHEQ 協調員負責編製年度巡查計劃，確保各工程項目接受巡查的次數均衡，避免漏查或某單項工程巡查過度。

同時，為防止巡檢人員因自身的“經驗主義”導致存在認知盲區或對隱患“習以為常”，SHEQ 巡查制度應用了“雙重巡查”與“交叉驗證”機制。第一次巡查按作業所屬部門來安排，第二次則由其他部門做交叉性檢查。由此所定的機制對“燈下黑”現象是有力的防範，提升巡查結果的可信度，而且多部門合作有助於消除各自的認知盲點、吸收彼此的成功經驗。有關巡查內容本身也按風險邏輯來確定，在做風險分析之後將中、高風險項目列為重點，把主要力量用在最危險的地方，藉以獲得最大化的風險前期控制效果。

四.風險閉環管理系統

為防止所擬風險防護方案的改正辦法同現實作業之間有較大落差、不具操作性、難於執行等，TAD 於 2022 年將風險閉環管理系統優化爲以下五個階段：風險識別、職員約談、風險分類/分析、專家組討論和 SOP 更新。結合 WMS 平臺使用的情形來看，新系統不但比舊式風險防護方式節省時間，又對實際問題有更切題的應對能力如圖 4 所示，其具體操作流程如下：

1．巡查團隊完成巡檢後提交《安全巡查報告》。若發現問題，SHEQ 協調員將簽發《糾正措施要求書》予被巡查部門，明確記錄具體問題；

2．被巡查部門須於 7 日內提交調查報告，闡明原因及提交糾正方案。SHEQ 協調員會安排對有關人員進行面談，就實際情形作出瞭解；

3．SHEQ 協調員要按所涉問題分別處理，對已知的糾正辦法作歸納再報給部門總監審查。

4．SHEQ 協調員對各項數據作實時分析，所得到的有關 WMS 的信息都用於更新風險源資料庫，糾正辦法確定之後即修改相應 SOP，讓有關單位清楚地知道所遇風險及處理辦法，由此可以促使大家認真對待問題、合理利用資源、不斷取得進展。

5．要避免已有問題再度出現，TAD 每兩個月組織全體人員作案例討論，把過去巡查所見的實例及其改善措施作具體介紹，強化人員安全意識。

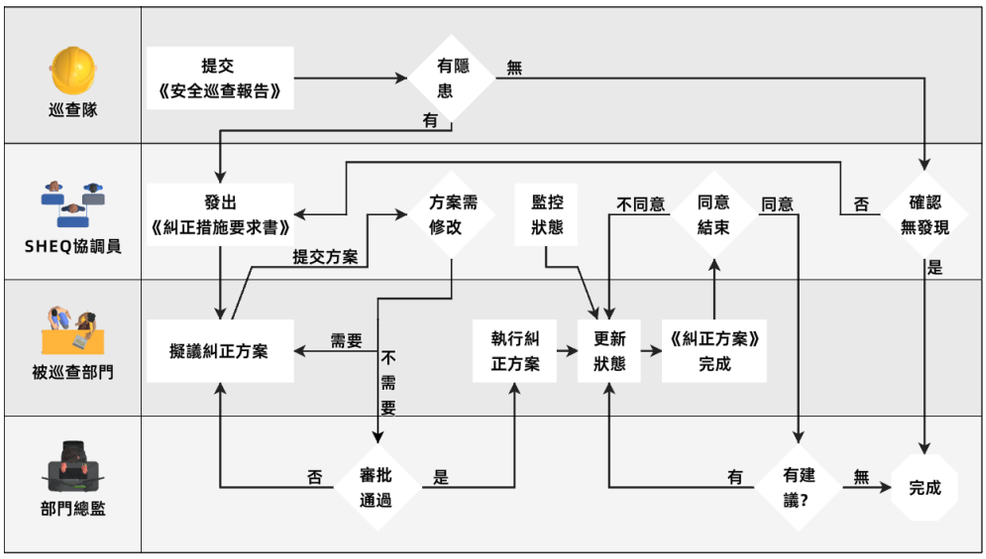


圖 4　風險閉環管理系統流程圖

五.高新科技對電力作業的賦能

當電力系統的體量和複雜程度不斷上升時，傳統所用的變電站巡檢方法便開始顯現出局限性，如圖 5 所示，其中人工巡檢本身有大量重複性勞動，長時期做下去易使操作者疲倦、判斷力衰退；而站內各種高壓裝置是全天候帶電體，且分佈於不同高處、低處及高溫區域，相關區域既不宜作業又較難完全監控。若只按舊式思路安排人力，就很難保證對可靠性和及時性的充分滿足，所以應重視高新技術，尤其是人工智慧引導的智慧巡檢方案，將其作為變電站運維的基本方向。

圖 5　左：巡檢人員需爬入設備底部進行檢查　　右：儀錶位置太高

四足機器人作為一種具有卓越場景適應性的移動平臺，可對傳統巡檢方式短板進行有效的補充。四足機器人可以代替人到低處狹小空間或須“爬入”檢查的部位進行作業，不迫使工作人員長期保持彎腰或受限體態而避免職業性損傷；有關高空作業、需搭設臨時腳手架才能接近的設施，四足機器人能借由預先裝載的長焦鏡頭清晰觀察，由此從根本上降低非必需高空作業的比例，消除監測盲點，如圖 6 所示。

圖 6　左：機器狗巡檢作業　　右：儀錶數值分析

若以作業效率為標準考察四足機器人，其可作 24 小時連續的、高頻率巡檢如圖 7 所示，能按照預定排程或依事件驅動自動進行密集檢測，從而大幅提升巡檢覆蓋率與響應速度。夜間或人手疲勞狀態下也能提供標準化和高頻次的巡檢，能將班次或人員狀態所限的漏檢、誤期現象大為減少，對系統總體可用性及可靠性是明顯增强。而且該類機器人配置有紅外熱成像、局部放電、氣體、溫濕度感測器及儀錶讀數採集模組，能從多維度獲取資訊，利用不同感測手段互相補充，聯合分析所獲資料，就異常情況給出較準確判斷，既少誤判又少漏判，亦可辨識一般目視無法發現的前期故障跡象。

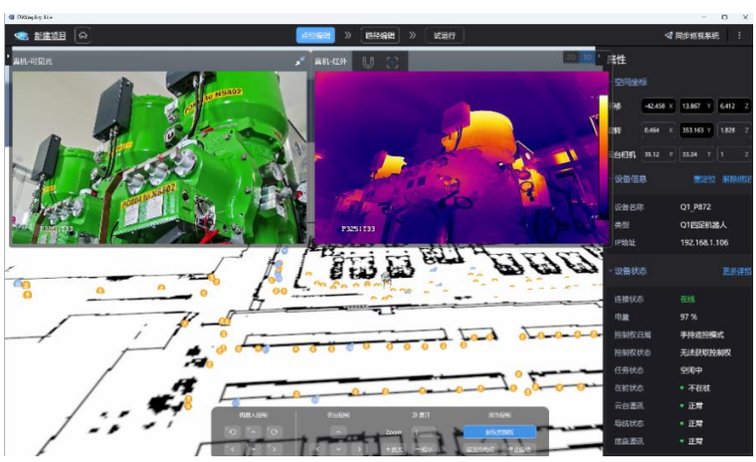


圖 7　左上：一般巡檢視角　　右上：紅外視角　　中下：定制化巡檢路徑

高新科技的基本價值應包含對 AI 所驅動的資料、決策的運用。用已訓練好的機器學習方法來處理即時獲得的影像或感測資訊，如圖 8 所示，就能自動形成統一格式的巡檢說明、有關異常及故障的判斷乃至成因分析，同時把風險資訊輸入 WMS 並給出優先派工方案，可迅速

地完成故障定位、資源安排、運維工作，保障人員安全。若利用歷史記錄加以研究，就可將維護從被動搶修轉為預防性維保，由此避免很多緊急維修的需要，資產管理因而更有效率。

圖 8　巡檢報告展示

此外，技術引進對運營所涉的價值不只以效率或安全作直接體現，它還有利於資產管理的改進及有關流程（包括組織層面）的重新設計。若能運用自動巡檢所得到的結構化資訊，運營各方就可把風險分析、維護安排都做得很細緻，同時根據實際需要來定作業標準、培訓員工或規劃應急步驟，由此減少低層次的勞動量，把人從單純體力任務中解放出來，轉而投入到處理判斷性或策略性工作。

叁、主動式風險控制方案成果與分析

本公司自 2022 年起採用主動性風險防護方案後，判定爲工傷的次數逐年下降，並在 2024 年實現全年無工傷目標如圖 9 所示。

圖 9　澳電歷年工傷統計圖

值得注意的是，本公司自從實行主動式風險防護方案至今，被記錄的未遂事件數量顯著增加，該現象可藉助伯德事故金字塔得到合理解釋（Bird，1969）。該金字塔指出每一起重大安全事件發生前會有大量未遂事件作爲預兆。後續學者將伯德事故金字塔進一步擴展，在底層增加了“不安全行爲”如圖 10 所示，以此強調重大事故往往是無數不安全行爲纍計導致。未遂事件的增加，恰好說明澳電成功且及時的發現制止了大量不安全行爲，將重大事故扼殺在萌芽階段。

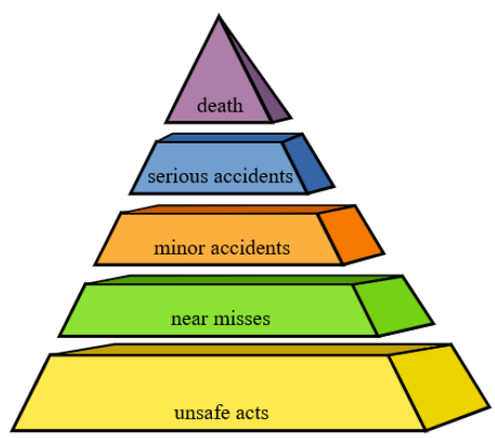


圖 10　事故金字塔

肆、結　論

澳電所稱的 2024 年無工傷成績不是僥倖得來的，而是對自身一直存在的安全管理問題作了完整的思考、對症下藥後提出的一套主動式風險防護方案，在借助科技手段的助力下已能較好地控制作業時的風險，用實際觀察與資訊回饋促進各項措施落實，把原來以“一線為主”或“事後查證”為特點的安全責任調整為由“事前預防”加以保障的新型思路。

目前國內外所用的數智化技術對電力作業已作較充分的思考與嘗試，澳電正據此考慮如何把高科技引入澳門的電力領域，同時有計劃地開展有關人才培訓工作，努力使本地人才達到高技能、強安全的標準，以形成有利於澳門未來整體發展的健全電力行業新格局。

參考文獻

［1］ 勞工事務局（2025），工傷統計分析報告，澳門：勞工事務局。

［2］ 香港職業安全健康局（2016），觸電工傷意外統計分析報告，香港：職業安全健康局。

［3］ 李宗坤、王特、葛巍等（2020），基於 WBS-RBS 和 AHP 的港珠澳大橋人工島建設風險分析，鄭州大學學報（工學版），第 41 卷，第 3 期，62－66 頁。

［4］ 陳國華、吳武生、徐三元等（2013），基於 WBS-RBS 與 AHP 的跨海橋樑工程施工 HSE 風險評價，中國安全科學學報，第 23 卷，第 9 期，51－57 頁。

［5］ 秦曉瑜、管鵬、王平強等（2026），建築工人習慣性違章心理因素剖析，建築與施工，第 5 卷，第 12 期，134－136 頁。

［6］ Bird, F. E. Jr.（1969），Management Guide to Loss Control, Loganville：International Loss Control Institute.

澳門建造業僱員職業健康之研究：結合參與式研究（PI）與網絡分析方法

龍綺汶
澳門大學醫學院公共衛生與醫藥管理學系

摘　要：建造業僱員長期從事高強度體力勞動，工地環境條件不一，對身心健康帶來一定壓力。近年澳門建造業工程項目持續增加，相關法律制度及行政申請流程逐步完善，工地安全與職安健議題備受關注。過往職安健研究多由上而下進行，較難反映實際工作環境下僱員主觀關注的身心健康訴求。

研究先透過「公眾參與」方式，邀請建造業僱員及相關持份者參與，討論其關注的健康因素及設計問卷；其後調查近九百名澳門現職建造業僱員的健康相關生活質量，配合高斯圖模型作網絡分析方法，分析疲勞、睡眠質量及痛症等因素與整體健康狀況之間的關係。希望從工地出發，讓研究更貼近建造業僱員的實際訴求及需要。

研究結果顯示，睡眠障礙與痛症均與建造業僱員生活質量下降存在顯著關聯。網絡分析進一步顯示，焦慮／抑鬱在整體網絡中呈現較突出的核心及橋接作用，而疲勞對工作／社交生活及履行職責的影響亦具有較高連結性。疲勞是僱員優先關注的健康議題之一，而網絡結果指出，其對日常功能及工作生活的影響尤其值得重視。

改善建造業僱員的健康狀況建議同時關注疲勞引起的功能影響，心理狀態、睡眠質量與疼痛問題。若能在行業發展過程中同步關注建造業僱員的健康福祉，將有助促進建造行業的長遠可持續發展。（500words）

關鍵詞：公眾參與式、建造業僱員、生活質量、睡眠障礙、痛症

第一章　引言與背景

近年澳門建造業整體發展穩定，根據統計暨普查局於 2025 年公布的資料顯示，2024 年行業場所數量增加了 272 間，總數達到 4,754 間，按年約上升 6%；同期收入約為 546.6 億澳門元，增幅約 3.7%，顯示建造業工程活動保持活躍，市場需求有基本支撐。政府亦在此背景下，加強了建造業工程的相關法律法規建設，例如：2023 年制定《建築業職業安全健康法》並於同年 11 月 1 日生效，正式將職安健立入法規監管，對於工地的巡查和監管亦有法可依，工程審批方面亦開始推動行政程序電子化，例如優化工程審批流程等，以提升整體管理質量。這些舉措有利於行業發展之餘，亦有利於澳門整體城市發展。

因應建築業活動活躍，僱員健康問題、工地安全等議題亦越來越受重視，特別是由於建造業僱員都在高溫、高噪音的工作環境工作，亦需要較高強度的體力勞動（Boadu et al.，2023），因此，他們的身體容易出現痛症、睡眠障礙、及心理健康問題（Adhikari et al.，

2021；Li et al.，2021；Maisey et al.，2022；Turner & Lingard，2020），研究上已證實這些與施工現場的安全風險與事故機率增高相關（Cao et al.，2021；Maisey et al.，2022）。傳統的職安健研究多採取「自上而下」的路徑，將僱員群體視為被動的受試者，由研究者主導的研究容易出現「研究者偏差」，即研究者因自身觀點或專業領域而影響研究結果的偏見，導致研究結論最後脫離工地實務，進而造成嚴重的研究浪費（Minogue et al.，2018）。

本研究旨在提出以基層為本的研究框架，首先，透過「公眾參與（Public Involvement，PI）」座談會模式（Carroll et al.，2022；Summers et al.，2025），將建造業基層僱員轉化為研究的共同創作者，真正反映基層聲音（Blake et al.，2025；Buffey et al.，2024）。其次，利用高斯圖模型（Gaussian Graphical Model，GGM）進行網絡分析，以嚴謹的網絡分析（Network analysis）方法了解僱員身心症狀間的交互影響結構。透過定性溝通與定量建模的深度耦合，旨在構建「與僱員共建」而非「為僱員創建」的職安健研究，了解僱員生活質量情形。

第二章　文獻綜述與理論架構

在大健康領域的研究中，「公眾參與式」的研究模式逐漸被視為應被重視的重要倫理原則之一（Carroll et al.，2022；Hung et al.，2023；Summers et al.，2025）。但目前現有的 PI 框架呈多元發展，且多以英國經驗為基礎，整體仍停留於概念層次（Johnson et al.，2025），例如：對於參與者的招募方式、參與歷程如何延續，以及研究者與公眾之間的互動模式等具體操作說明仍相對不足（Blake et al.，2025；Lang et al.，2022），相關實證經驗尚未一致。根據研究，僅約有 22.6%已發表的研究曾報告採用了 PPI 方法，而中國地區研究在使用 PPI 的比例只有 3.4%，是該研究所歸納的各國與地區中屬最低水平（Lang et al.，2022）。此結果顯示，儘管此方式有許多好處，但不同地區研究者用此方法的次數仍存在明顯差異，而在華人地區中，這種「公眾參與式」的研究仍不普遍。

公眾參與式的研究主要重點在於將參與者都視為對等的合作夥伴（Bryant et al.，2022；Buffey et al.，2024），使用名義群體法（Nominal Group Technique）的方式來舉辦小組會，讓參與者對會議內容先沈默思考，然後就議題輪流提出見解，在每個人都分享完自己的意見後再作團體討論，最後透過投票達成共識（Ryan et al.，2024）。本研究使用這個方法，希望收納不同持份者的觀點並將其關心的問題排優先順序，以確保所有人的聲音都能被平等地聽見，形成大眾都較具共識的結果，進而減輕因側重某些類別持份者的意見而引出的偏見（Liu，2024；Musbahi et al.，2021）。

因此在研究進行時，會召開多次的小組座談會，將研究進度、收案情形，問卷設計、數據解讀這些部份的情況都和小組參與者討論，用以修正研究設計中的潛在偏差，改善收集數據的方式及用字，提升臨場回答問卷時的適應性，在完成分析後，數據解讀時除科學化解讀外，亦增加現實依據，加強專業人員與公眾之間的互動（Bryant et al.，2022）。目前，公眾參與式的研究已越來越多被使用在醫療大健康的研究與政策討論之中（Baines et al.，2022；Blake et al.，2025；Bryant et al.，2022；Carroll et al.，2022；Liu，2024；Minogue et al.，2018）。不過，對這方法可以有效降低資源浪費及提升研究品質方面的效果，仍需更多研究數據支持（Minogue et al.，2018）。

另一方面，隨著大數據與系統科學的發展，網絡分析逐漸被應用於探索複雜病理機制。職場健康是一個複雜的議題，多種因素交

錯影響，難以用簡單的因果邏輯去概括。網絡分析（Network analysis）較單一因果關係為基礎的線性回歸方法更強調症狀與心理狀態之間的交互影響，並將其視為一個相互連動的系統（Bootsma et al.，2024）。透過建立影響因子的節點（nodes）與連結（edges），研究者能夠更清楚地描繪各變項之間的關係，並可以以節點的中心性位置辨識出整體結構網絡中的核心關鍵因素，以及從連結的粗細，可以看出關聯強度，從而理解健康相關生活質量中，不同症狀與不同生活質量之間錯綜複雜而又相關的互動關係（Ma et al.，2025）。

本研究結合公眾參與式研究與網絡分析的優勢，一方面從僱員角度出發，識別其關注的健康議題（如疲勞或疼痛），另一方面從大數據層面驗證這些因素之間的關聯。

第三章　研究方法：公眾參與式研究與網絡分析

本研究先進行六次公眾參與式座談（PPI）。前四次為主題討論和研究方向定立，由建築業工會代表、職安健專家、基層僱員及研究人員共同組成參與，每場小組座談會約 6 至 8 人，每種角色 1 至 2 人組成，確保不同持份者的觀點均能被平均聽見（Bryant et al.，2022）。參與者包括澳門大學醫學院博士生研究員、澳門建築業總工會代表、澳門電力股份有限公司代表、澳門建築安全協會代表及澳門職業健康與安全協會等代表。整體流程包括會議主題說明、約 10 分鐘的個別思考、每位參與者輪流發言，以及最後的集體討論或投票，以確立研究優先方向。這種可確保每位參與者都會發言，亦有足夠的獨立思考時間，同時避免會議方向被人數較多的某一群體主導。

在第 1 至第 4 輪座談中，參與者首先共同訂立了 6 個基本研究方向，分別為：1）職業疲勞和精神健康問題；2）長期接觸危險物質對健康的影響；3）特定工作環境下的職安健問題分析及解決方案；4）現有職安健措施的執行情況和建議；5）職安健培訓現況及對工人成效；6）建造業工人慢性損傷情況篩查及可能預防方案。其後再以匿名方式邀請 66 名現職建造業僱員進行多選投票，讓他們根據自身最關心的議題作進一步排序；由於每位參與者可同時支持多項議題，因此本文以支持人次而非唯一人數作統計。根據四場座談會與後續匿名投票的整體結果，職業疲勞與精神健康、長期接觸危險物質對健康的影響、建造業工人慢性損傷情況篩查及可能預防方案，以及特定工作環境下的職安健問題分析與解決方案均獲得較多支持，而現有職安健措施執行情況及建議、職安健培訓現況及對工人成效等題目亦有一定關注。研究團隊其後按座談會結論整合各項意見，並將問卷內容收斂為兩個大項，即職安健培訓相關，以及職業疲勞或勞損相關，以配合工友最關切的健康主題。

在第 5 及第 6 輪 PPI 中，研究團隊再與 PPI 成員討論問卷設計、題目用詞、問卷填寫方式以及初步結果解讀，藉此確認題目是否仍然貼近工友語言與關注重點，並確保研究過程屬於與工友「共創」。在記錄與分析方面，座談內容由研究者於會後整合整理，並根據共識結果修訂問卷題目與表述方式，以減少因語言差異所造成的理解落差。所有資料均採用去識別化處理，以群體結果呈現，避免涉及個別個體或公司資訊，並在報告中避免使用可能引起衝突的敏感語言。研究亦強調參與完全基於自願，所有參與者在座談與問卷前均已獲充分說明研究目的、資料用途、可能風險及潛在利益，並在知情同意後才參與研究。

「座談會（PPI）中，最初有點不明白，但經過討論後開始明白。這是一個從組織會議、到內容、問卷設計等，對受眾理解問題共同商討，（會議中各成員）沒有高低之分，（這是一個）共同使研究更貼近業界工友（所需）的

經歷。」—引述與會者意見。

而以這種面對面、輪流發言及共同決策的方式來釐清研究細節，有助於以平等的方式「和」建造業界群體共同創建一個對具有深遠意義的職安健研究，而不是「為」他們創建。此外，本研究獲澳門大學倫理委員會批准，批准編號為 SSHRE23-APP053-FHS，日期為 2023 年 6 月 18 日。所有參與者在座談與問卷前均已獲充分說明研究目的、資料用途、可能風險及潛在利益，並在知情同意後才參與研究。

定量分析階段則基於 PPI 座談會優化後的問卷進行大規模數據採集。樣本特徵顯示，澳門建造業僱員平均年齡為 40.9 歲，且 95.5%為男性，其職業資歷平均長達 14.6 年，月薪主要分佈在 10,000 至 19,000 澳門幣區間。多數參與者的身體質量指數（BMI）屬正常範圍，且主要從事室內或混合作業環境，如表一所示。本研究運用 R 語言（版本 4.5.2）構建 GGM 網絡，將睡眠品質（PSQI 各維度）、疲勞感（FSS 總分）及生活質量（EQ-5D 各維度）納入分析框架。由於網絡模型採用完整案例分析（complete-case analysis），所有 13 個節點均無缺失值者共 820 人，故 GGM 的最終分析樣本為 820 人；模型估計採用 LASSO 正則化與 EBIC 模型選擇技術，以確保網絡結構的簡潔性與穩健性。

建造業僱員的健康相關生活質量採用 EQ-5D-5L 進行評估。EQ-5D-5L 由 EuroQol Group 發展，主要包括 EQ-5D 描述系統和 EQ 視覺類比量表（EQ Visual Analogue Scale，EQ VAS）兩部分。描述系統涵蓋行動能力、自我照顧、日常活動、疼痛／不適及焦慮／抑鬱五個維度（Luo et al.，2017）。本研究的 GGM 網絡分析納入 EQ-5D-5L 的五個描述維度，以分析健康相關生活質量各領域與睡眠及疲勞之間的關係；EQ VAS 則用於反映參與者對整體健康狀態的主觀評估，可應用於中國人群（Yang et al.，2018）。EQ VAS 要求受試者以 0 分至 100 分評估自身健康狀況，其中 0 分代表「你能想像的最差健康狀況」，100 分代表「你能想像的最佳健康狀況」，用以反映個體對整體健康狀態的主觀感知。一般而言，缺失值≤5%及地板效應≤15%被視為可接受（Feng et al.，2021）。

睡眠質量採用匹茲堡睡眠質量指數（Pittsburgh Sleep Quality Index，PSQI）進行評估。PSQI 由 Buysse 等人開發（Buysse et al.，1989），主要用於評估個體在過去一個月內的睡眠質量。該量表包括 19 道自評題目，並可歸納為七個組成部分，分別為主觀睡眠質量、入睡潛伏期、睡眠時長、睡眠效率、睡眠障礙、安眠藥物使用及日間功能障礙。既往研究顯示，PSQI 具有良好的信度與效度（Fontes et al.，2017；Zhang et al.，2020）。每個組成部分的評分範圍為 0 分至 3 分，其中 0 分代表「沒有困難」，3 分代表「嚴重困難」。七個組成部分的分數相加後形成總分，總分範圍為 0 至 21 分；當總分>5 時，表示個體可能存在睡眠障礙。

參與者的疲勞情況採用疲勞嚴重程度量表（Fatigue Severity Scale，FSS）進行評估。FSS 主要用於測量疲勞對個體日常生活與功能狀態的影響。每個題目均採用七點評分，分數由 1 分至 7 分不等，分別代表「非常不同意」至「非常同意」。九個題目的平均分被用作整體疲勞程度的指標；當平均分達到 4 分或以上時，通常被視為具有臨床意義的重要疲勞，這一判定標準亦與既往研究一致（Naik et al.，2022）。

工作相關疼痛採用視覺類比量表（Visual Analogue Scale，VAS）進行評估。VAS 是一種常用於疼痛測量的工具，可用以反映個體主觀感受到的疼痛強度。本研究中，受試者需要根據自身疼痛程度進行評分，分數範圍為 0 分至 10 分，其中 0 分代表「沒有疼痛」，10 分代表

「最嚴重的疼痛」（Heller et al.，2016）。

表 1：898 名建造業僱員的人口學及特徵摘要。

變項	統計量	總體（N=898）
Age（years）	Mean（SD）	40.9（9.3）
	Median（IQR）	41.0（15）
Gender	Male	858（95.5%）
	Female	40（4.5%）
BMI	<18.5	18（2.0%）
	18.5 – 24.9	595（66.3%）
	25 – 29.9	228（25.4%）
	>30	55（6.1%）
	Missing	2（0.2%）
Income	Less than 10000	83（9.2%）
	10000 – 14999	310（34.5%）
	15000 – 19999	213（23.7%）
	20000 – 29999	121（13.5%）
	Above 30000	171（19.0%）
Years of work	Mean（SD）	14.6（11.0）
Work environment	Indoor	398（44.3%）
	Outdoor	149（16.6%）
	Both	351（39.1%）
Injured in 12 months	Yes（N/%）	28（3.1%）
	No（N/%）	870（96.9%）

註：數據以平均數（標準差）、中位數（四分位距）或人數（百分比）表示。百分比以總樣本數 N=898 計算。BMI=身體質量指數

表 2　研究變項的描述性統計

Variable	N	Mean ± SD	Median（IQR）	Range
EQ–VAS	898	81.7 ± 21.6	87（25）	0 – 100
EQ5D5LindexValue	898	0.960 ± 0.089	1.000（0.049）	0.217–1.000
PSQIglobalscore	824	4.7 ± 3.4	4（5）	0 – 18
FSSscore	898	4.4 ± 1.6	4.3（2）	1 – 7
PainVAS	898	0.4 ± 1.3	0（0）	0 – 8

縮寫：EQ–VAS，EuroQol 視覺類比量表；PSQI，匹茲堡睡眠品質指數；FSS，疲勞嚴重度量表；VAS，視覺類比量表。EQ–5D 指數值採用中國 EQ–5D–5L Luo 2017 TTO 價值集計算。

第四章　研究結果：網絡分析結果

4.1　個案特徵與公眾參與式座談（PI）議題確認

透過 PI 座談會及後續多選投票，疲勞與精神健康被確定為建造業基層最關注的研究方向。綜合四場座談會及 66 名現職建造業僱員的匿名投票結果，較多支持的議題包括職業疲勞與精神健康、長期接觸危險物質對健康的影

響、建造業工人慢性損傷篩查及預防方案，以及特定工作環境下的職安健問題分析與解決方案；現有職安健措施的執行情況及建議、職安健培訓現況及其對工人的成效亦受到一定關注。研究團隊其後根據結果，將問卷內容聚焦於疲勞與慢性損傷，並以建造業僱員較易理解的語言優化題目表述，以減少因誤解造成的資訊偏差。（Information Bias）。

本研究共納入 898 名建造業僱員資料。受訪者平均年齡為 40.9 歲（標準差=9.3），平均工作年資為 14.6 年（標準差=11.0），顯示樣本具有相當的建造業工作經驗。男性佔絕大多數（95.5%），與本澳建造業以男性從業者為主的情況相若。過半數參與者的身體質量指數（BMI）處於正常範圍（66.3%），另有 25.4%屬超重，6.1%屬肥胖。收入分布主要集中於澳門幣 10,000 – 14,999（34.5%）及 15,000 – 19,999（23.7%）區間。工作環境方面，44.3%主要從事室內工作，16.6%主要從事室外工作，39.1%同時涉及室內及室外工作。過去 12 個月內曾受傷者佔 3.1%，高於部分官方統計所呈現的工傷比例。此差異可能與資料來源、受傷定義及 PPI 情境下受訪者較願意表達實際工作經驗有關，仍需進一步資料作比較。未曾受傷者佔 96.9%。相關人口學及工作特徵列於表一。

主要研究變項的描述統計列於表二。EQ-VAS 平均分為 81.7 分（標準差=21.6），EQ-5D-5L index value 平均為 0.960（標準差=0.089），顯示參與者整體自評健康及健康相關生活質量偏高。PSQI global score 平均為 4.7（標準差=3.4，N=824），接近常用睡眠障礙切點；FSS score 平均為 4.4（標準差=1.6），顯示整體疲勞程度達中等水平。Pain VAS 平均為 0.4（標準差=1.3），中位數為 0，顯示多數受訪者未報告明顯疼痛。

4.2 網絡結構

本網絡採用 graphical LASSO 正則化方法進行估計，並結合擴展貝葉斯資訊準則（EBIC）進行模型選擇。預期影響力（Expected Influence，EI）排序顯示，EQ5D5（焦慮／抑鬱）最高，其次為 FSS9（工作／社交生活）、EQ5D3（日常活動）及 FSS7（履行職責）；PSQI4（習慣性睡眠效率）的 EI 最低。預測性分析（Predictability,R^2）顯示，較高值主要落在疲勞及其功能影響相關節點，其中 FSS7 為 76.8%，FSS6 為 74.0%，FSS9 為 72.4%，FSS5 為 71.3%，PSQI6 則為 16.2%。邊線表示兩個變項在排除其他變項影響後仍存在的直接關聯。綠色實線表示正向關聯，紅色虛線表示負向關聯。邊線越粗，代表關聯越強。相關指標分佈如圖一所示。

EQ5D5（焦慮／抑鬱）在整體健康網絡中呈現核心及橋接位置。其 EI 為 1.411，為所有節點中最高；橋接預期影響力（Bridge Expected Influence）為 1.125，同樣位居最高，而預測性則為 45.9%。網絡邊權結果顯示，EQ5D5 與 PSQI7（日間功能障礙）、PSQI6（使用安眠藥物）及部分疲勞相關節點存在直接連結，反映焦慮／抑鬱可能是連接睡眠、疲勞與健康相關生活質素的重要橋接節點。網絡穩定性分析（case-dropping bootstrap 與 edge bootstrap）顯示，本研究以整體連結模式及較具一致性的邊權作為主要詮釋依據；預期影響力的穩定係數（CS coefficient）為 0.128，節點排序作輔助性及探索性參考。

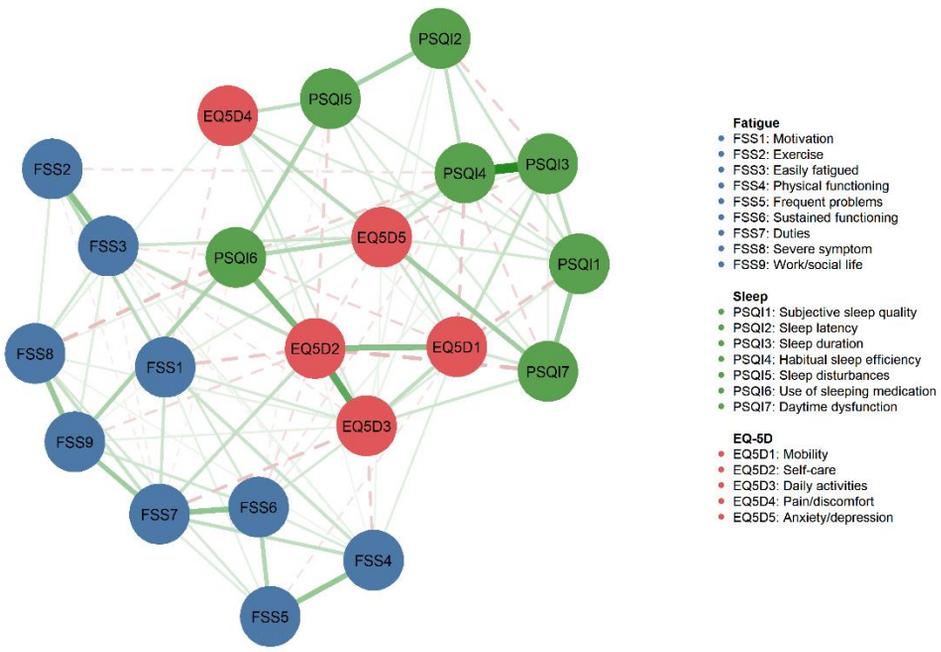


圖 1：基於高斯圖模型之澳門建造業僱員生活品質各維度的網絡結構

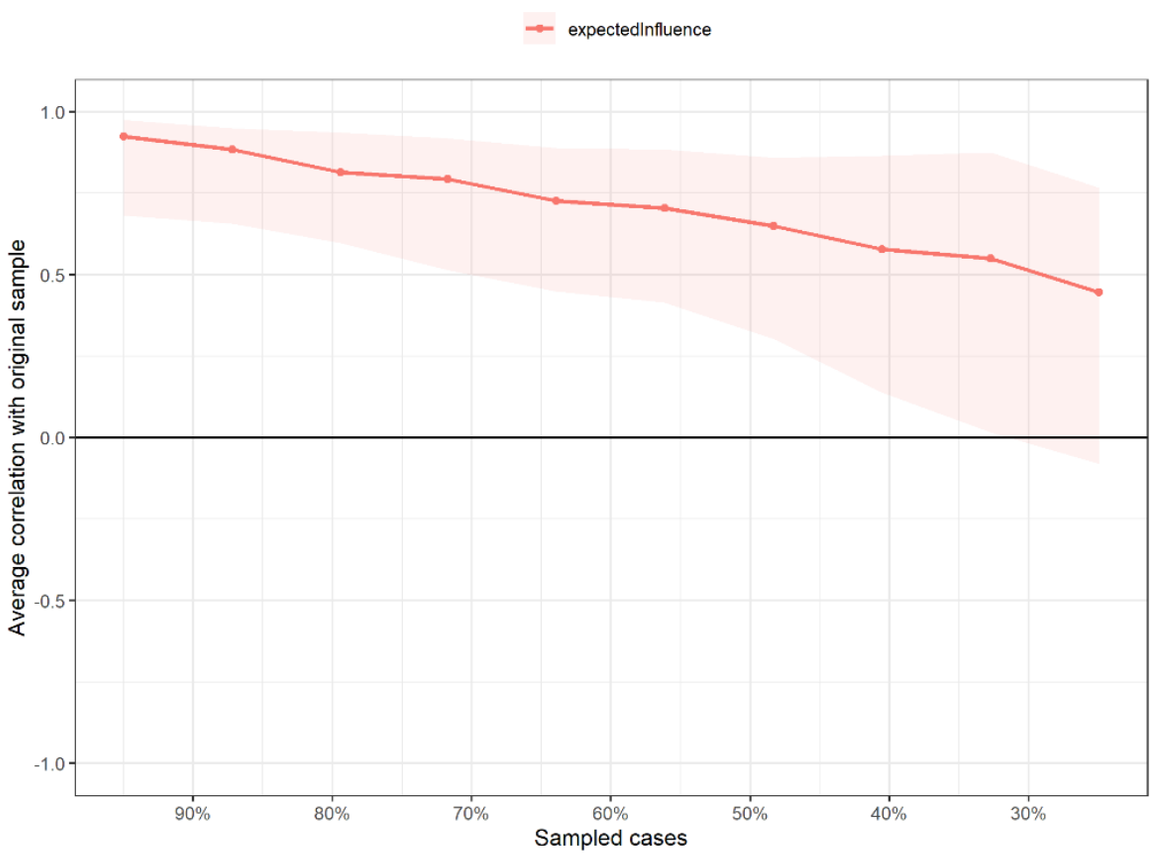


圖 2：澳門建築工人生活品質各維度模型之網絡穩定性分析

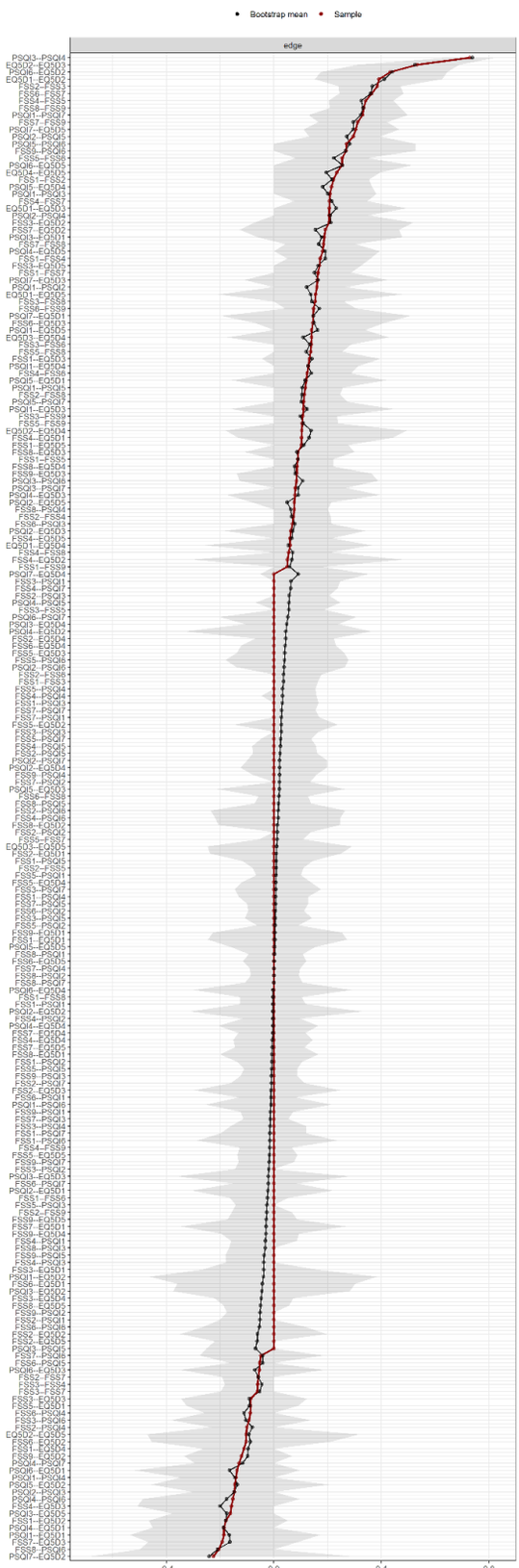


圖 3　澳門建築工人生活品質各維度網絡中邊權重的自助法（Bootstrapped）信賴區間

第五章　討論與結論

將 PPI 階段的質性觀察與網絡分析的量化結果相對照，可以發現建造業僱員常反映「日間工作力不從心」且伴隨「不明原因的焦慮」。這與網絡模型中 PSQI7（日間功能障礙）與 EQ5D5（焦慮/抑鬱）的高中心性相互呼應。這種對話顯示參與式研究不僅是倫理要求，也有助於辨識科學關鍵點。

在問卷設計初期，建造業僱員的參與讓題目表述更貼近實際工作語境，也降低了因專業術語理解差異而產生數據偏差的可能性。在數據詮釋上，研究團隊亦持續與業界代表保持溝通，使分析結果能更好地對應現行作業模式及相關政策要求，為相關政策提供具落地參考價值的依據。這種持續與業界互動的方式，有助於讓研究過程與現場情況保持連結，從而降低「研究浪費」。

由於疲勞感在整體網絡中呈現相對邊緣的位置，所以根據結果顯示，醫療策略及職安健改善政策重點不宜只停留在表層的疲勞症狀改善，而應進一步轉向心理支持及睡眠品質的提升。日間功能（PSQI7）作為關鍵的連結節點，若能加以改善，相信具有介入參考價值，進一步帶動情緒狀態改善及意外事故預防能力的整體改善（Castano-Asins et al.，2025；Etienne et al.，2021）。將醫療及職安健資源集中於核心影響因素範疇，更有助於提升整體職安健成效。從研究解讀而言，本研究的 flow network 與 bootstrap 結果僅支持探索性推論，仍需在後續研究中進一步驗證其穩定性與外部可重現性。

本研究結果顯示，疲勞與其他身心因素之間存在複雜關聯，其中日間功能受損以及焦慮與抑鬱在整體結構中具有較關鍵的影響力，情況不容忽視。疲勞雖然在 PPI 中是建造業僱員最直接關注的表徵感受，但較可能是多種因素交叉影響後的結果，而非主要原因，因此，職安

健政策方向不宜僅著重於緩解疲勞，應同時關注心理健康及特別是睡眠狀況。例如可透過改善工作組織與管理模式，例如建立良好的溝通及回饋機制、優化工作流程、合理分配工作量與工時，以及設立科學化的激勵制度等，營造友善的工作環境，提升僱員的工作體驗與工作效能，從而改善工作壓力與心理健康狀況。

文獻引用：

［1］ Adhikari, B., Ghimire, A., Jha, N., Karkee, R., Shrestha, A., Dhakal, R., Niraula, A., Majhi, S., Pandit, A. K., & Bhandari, N.（2021）. Factors associated with low back pain among construction workers in Nepal：A cross-sectional study. PLoS One, 16（6）, e0252564. https://doi. org/10. 1371/ journal. pone. 0252564

［2］ Baines, R., Bradwell, H., Edwards, K., Stevens, S., Prime, S., Tredinnick-Rowe, J., Sibley, M., & Chatterjee, A.（2022）. Meaningful patient and public involvement in digital health innovation, implementation and evaluation：A systematic review. Health Expect, 25（4）, 1232-1245. https://doi. org/10. 1111/hex. 13506

［3］ Blake, H., Abbott-Fleming, V., Greaves, S., Somerset, S., Chaplin, W. J., Wainwright, E., & Walker-Bone, K.（2025）. Five years of patient and public involvement and engagement（PPIE）in the development and evaluation of the Pain-at-Work toolkit to support employees' self-management of chronic pain at work. Res Involv Engagem, 11（1）, 81. https://doi. org/10. 1186/s40900-025-00757-5

［4］ Boadu, E. F., Okeke, S. R., Boadi, C., Osei Bonsu, E., & Addo, I. Y.（2023）. Work-related respiratory health conditions among construction workers：a systematic narrative review. BMJ Open Respir Res, 10（1）. https://doi. org/10. 1136/bmjresp-2023-001736

［5］ Bootsma, T. I., van de Wal, D., Vlooswijk, C., Roos, D. C., Drabbe, C., Tissier, R., Bijlsma, R. M., Kaal, S. E. J., Kerst, J. M., Tromp, J. M., Bos, M., van der Hulle, T., Lalisang, R. I., Nuver, J., Kouwenhoven, M. C. M., van der Graaf, W. T. A., Janssen, S. H. M., & Husson, O.（2024）. Exploring the interconnectedness between health-related quality of life factors among long-term adolescent and young adult cancer survivors（AYAs）：a network analysis. Support Care Cancer, 32（2）, 104. https://doi. org/10. 1007/s00520-023-08295-0

［6］ Bryant, E. A., Scott, A. M., Greenwood, H., & Thomas, R.（2022）. Patient and public involvement in the development of clinical practice guidelines：a scoping review. BMJ Open, 12（9）, e055428. https://doi. org/10. 1136/bmjopen-2021-055428

［7］ Buffey, A. J., Langley, C. K., Carson, B. P., Donnelly, A. E., & Salsberg, J.（2024）. Participatory Approaches in the Context of Research Into Workplace Health Promotion to Improve Physical Activity Levels and Reduce Sedentary Behavior Among Office-Based Workers：Scoping Review. JMIR Public Health Surveill, 10, e50195. https://doi. org/10. 2196/50195

［8］ Cao, Z., Chen, T., & Cao, Y.（2021）. Effect of Occupational Health and Safety Training for Chinese Construction Workers Based on the CHAID Decision Tree. Front Public Health, 9, 623441. https://doi. org/10. 3389/fpubh. 2021. 623441

［9］ Carroll, P., Dervan, A., Maher, A., McCarthy, C., Woods, I., Kavanagh, R., Beirne, C., Harte, G., O'Flynn, D., O'Connor, C., McGuire, T., Leahy, L. M., Gonzalez, J. G., Stasiewicz, M., Maughan, J., Gouveia, P. J., Murphy, P. J., Quinlan, J., Casey, S., ...Flood, M.（2022）. Applying Patient and Public Involvement in preclinical research：A co-created scoping review. Health Expect, 25（6）, 2680-2699. https://doi. org/10. 1111/hex. 13615

[10] Castano-Asins, J. R., Barcelo-Soler, A., Royuela-Colomer, E., Sanabria-Mazo, J. P., Garcia, V., Neblett, R., Bulbena, A., Perez-Sola, V., Montes-Perez, A., Urrutia, G., Feliu-Soler, A., & Luciano, J. V. (2025). Effectiveness of peri-operative psychological interventions for the reduction of postsurgical pain intensity, depression, anxiety and pain catastrophising: A systematic review and meta-analysis. Eur J Anaesthesiol, 42 (7), 609-625. https://doi.org/10.1097/EJA.0000000000002157

[11] Etienne, R., Laurent, M., Henry, A., Bioy, A., Salleron, J., Schohn, C. H., & Cretineau, N. (2021). Interest of a standardized hypnotic message for the reduction of pain and anxiety in cancer patients treated by capsaicin patch for neuropathic pain: a randomized controlled trial. BMC Complement Med Ther, 21 (1), 154. https://doi.org/10.1186/s12906-021-03329-8

[12] Feng, Y. S., Kohlmann, T., Janssen, M. F., & Buchholz, I. (2021). Psychometric properties of the EQ-5D-5L: a systematic review of the literature. Qual Life Res, 30 (3), 647-673. https://doi.org/10.1007/s11136-020-02688-y

[13] Fontes, F., Goncalves, M., Maia, S., Pereira, S., Severo, M., & Lunet, N. (2017). Reliability and validity of the Pittsburgh Sleep Quality Index in breast cancer patients. Support Care Cancer, 25 (10), 3059-3066. https://doi.org/10.1007/s00520-017-3713-9

[14] Heller, G. Z., Manuguerra, M., & Chow, R. (2016). How to analyze the Visual Analogue Scale: Myths, truths and clinical relevance. Scand J Pain, 13, 67-75. https://doi.org/10.1016/j.sjpain.2016.06.012

[15] Hung, L., Wong, K. L. Y., Chan, I., & Vasarhelyi, K. (2023). Facilitators of and barriers to patient and public involvement in building learning health systems in community health services settings: a scoping review protocol. BMJ Open, 13 (9), e073837. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2023-073837

[16] Johnson, E. E., Gill, S., Still, M., Trenchard, D., Smith, D., Harmston, R., McDermott, J., & Pearson, F. (2025). Understanding the Scope, Intent and Extent of Published Conceptual Frameworks of Frameworks for Patient and Public Involvement in Health and Social Care Research: A Rapid Scoping Review. Health Expect, 28 (5), e70425. https://doi.org/10.1111/hex.70425

[17] Lang, I., King, A., Jenkins, G., Boddy, K., Khan, Z., & Liabo, K. (2022). How common is patient and public involvement (PPI)? Cross-sectional analysis of frequency of PPI reporting in health research papers and associations with methods, funding sources and other factors. BMJ Open, 12 (5), e063356. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2022-063356

[18] Li, X., Yang, X., Sun, X., Xue, Q., Ma, X., & Liu, J. (2021). Associations of musculoskeletal disorders with occupational stress and mental health among coal miners in Xinjiang, China: a cross-sectional study. BMC Public Health, 21 (1), 1327. https://doi.org/10.1186/s12889-021-11379-3

[19] Liu, L. T., Nathan; Partridge, Judith. et al. (2024). Improving Recruitment Of Older Patients For Patient And Public Involvement And Engagement Work (PPIE) Ensuring A Representative Voice. Age and ageing.

[20] Luo, N., Liu, G., Li, M., Guan, H., Jin, X., & Rand-Hendriksen, K. (2017). Estimating an EQ-5D-5L Value Set for China. Value Health, 20 (4), 662-669. https://doi.org/10.1016/j.jval.2016.11.016

[21] Ma, M., Xiao, C., Ou, W., Li, X., Yang, Y., Chen, Y., Ke, C., Liu, J., Liu, B., Li, Y., Yang, S., Lu, Y., Li, L., Lv, G., Zhao, X., Qin, Y., Wang, M., Wang, Q., Zhang, Y., & Ju, Y.（2025）. Depression and anxiety symptoms associated with internet addiction and non-suicidal self-injury in Chinese adolescent students – a network analysis. BMC Psychiatry, 25（1）, 731. https://doi.org/10.1186/s12888-025-07131-5

[22] Maisey, G., Cattani, M., Devine, A., Lo, J., Fu, S. C., & Dunican, I. C.（2022）. Digging for data: How sleep is losing out to roster design, sleep disorders, and lifestyle factors. Appl Ergon, 99, 103617. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103617

[23] Minogue, V., Cooke, M., Donskoy, A. L., Vicary, P., & Wells, B.（2018）. Patient and public involvement in reducing health and care research waste. Res Involv Engagem, 4, 5. https://doi.org/10.1186/s40900-018-0087-1

[24] Musbahi, O., Syed, L., Le Feuvre, P., Cobb, J., & Jones, G.（2021）. Public patient views of artificial intelligence in healthcare: A nominal group technique study. Digit Health, 7, 20552076211063682. https://doi.org/10.1177/20552076211063682

[25] Naik, H., Shao, S., Tran, K. C., Wong, A. W., Russell, J. A., Khor, E., Nacul, L., McKay, R. J., Carlsten, C., Ryerson, C. J., & Levin, A.（2022）. Evaluating fatigue in patients recovering from COVID-19: validation of the fatigue severity scale and single item screening questions. Health Qual Life Outcomes, 20（1）, 170. https://doi.org/10.1186/s12955-022-02082-x

[26] Ryan, L., Wenke, R., Carlini, J., Weir, K. A., Shapiro, M., Baglot, N., Tobiano, G., Sargeant, S., & Hattingh, L.（2024）. Exploring barriers and solutions to consumer involvement in health service research using a nominal group technique. Res Involv Engagem, 10（1）, 72. https://doi.org/10.1186/s40900-024-00604-z

[27] Summers, B., Farmer, L., Cooper, S., von Wagner, C., Friedrich, B., Abel, G. A., Spencer, A., & Cockcroft, E.（2025）. Patient Bridge Role: a new approach for patient and public involvement in healthcare research programmes. BMJ Open, 15（5）, e094521. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2024-094521

[28] Turner, M., & Lingard, H.（2020）. Examining the interaction between bodily pain and mental health of construction workers. Construction Management and Economics, 38（11）, 1009-1023. https://doi.org/10.1080/01446193.2020.1791920

[29] Yang, Z., Busschbach, J., Liu, G., & Luo, N.（2018）. EQ-5D-5L norms for the urban Chinese population in China. Health Qual Life Outcomes, 16（1）, 210. https://doi.org/10.1186/s12955-018-1036-2

[30] Zhang, C., Zhang, H., Zhao, M., Li, Z., Cook, C. E., Buysse, D. J., Zhao, Y., & Yao, Y.（2020）. Reliability, Validity, and Factor Structure of Pittsburgh Sleep Quality Index in Community-Based Centenarians. Front Psychiatry, 11, 573530. https://doi.org/10.3389/fpsyt.2020.573530

醫療服務中熱壓力管理的策略方向：香港醫療機構成功案例分享

馬婉婷教授
香港職業安全衛生協會

摘　要：香港夏季高溫高濕，醫療機構的前線與支援員工（如社康護士、外展人員、保安、園丁、廚房及洗衣房員工等）長期在酷熱環境下從事體力勞動或操作高溫設備，面臨極高的熱壓力風險，易引發脫水、熱痙攣甚至中暑。研究顯示，當氣溫達攝氏 29 度後，每上升一度死亡人數即增長約 1.8%，嚴重威脅公共健康。

根據世界衛生組織定義，熱是重要的職業與公共衛生危害，高溫不僅導致熱中暑，更會加劇員工心腎疾病與慢性病惡化。在政策層面，香港勞工處雖已發佈《預防在工作時中暑的指引》並推行「工作暑熱警告」制度，要求僱主提供遮蔭、通風與休息安排[2]。然而，中暑至今尚未被列為香港的法定職業病，目前僅能按一般工傷處理，導致基層員工的職安保障依然不足。

為彌補政策缺口，香港部分醫療機構已主動將熱壓力管理納入職安健框架，實施多項具體措施，包含改善空調通風系統、提供防護裝備與補水設施、調整工作時段及建立定期健康監察機制，這些舉措有效降低了員工的熱負荷。

面對全球極端高溫加劇，作者建議應全面落實「風險評估–工程控制–行政措施—健康監察–教育培訓」的五層策略[4]。未來醫療服務亦需進一步科技化與優化，包括引入實時熱指數監測、利用智能穿戴裝置監察員工生理狀況，並推動綠色被動降溫建築設計。同時，強烈呼籲政府將中暑納入法定職業病。透過這套系統性管理，方能全面保障員工健康與確保醫療服務的持續性，為氣候變遷下的挑戰提供永續策略。

***關鍵字：**熱壓力、醫療服務、職業安全、社區外展、老人科外展、熱中暑死亡

第一章：引言與文獻回顧

引　言

香港夏季持續出現高溫、高濕及強烈太陽輻射，熱壓力已由傳統戶外工作風險，演變為影響醫療服務持續性、員工安全及病人照護質素的重要公共衛生與職安健議題。醫療機構的工作情境具高度異質性，除臨床照護外，亦包括社康護理、老人科外展、社區隔離中心、病人運送、保安巡邏、園藝維修、清潔、廚房及洗衣房等支援服務；這些崗位均可能因長時間曝曬、體力勞動、接近熱源、通風不足及穿著不透氣防護裝備[4]，而增加熱疾病風險。根據香港勞工處《預防工作時中暑指引》[2]及醫院管理局（醫管局）《熱壓力評估及管理安全指引》[3]，熱壓力管理已由單一的安全措施，轉化為制度化的五層治理架構。作者探討了熱壓

力管理的策略方向，並展示醫管局在風險評估、工程控制、行政措施、健康監察及教育培訓方面的具體做法。研究分析顯示，當熱壓力管理被系統性嵌入機構治理與部門日常營運，並結合實時監測與針對性的行政調度，可顯著降低職業性中暑風險，提升機構韌性[4]。作者進一步探討了實時監測的成本效益與實施障礙，指出其能將風險管理由「事後反應」轉向「事前預警」，並建議醫療機構應將數位化監測、建立明確的行動矩陣，精細化排班及彈性供應鏈管理結合，以應對日益嚴峻的氣候挑戰，確保醫療服務的持續性與公共衛生功能[7][8]。

1.1 氣候變化與醫療系統之脆弱性

在全球暖化持續加劇的背景下，極端高溫事件的頻率、持續時間與強度均呈現明顯上升趨勢。對香港這類高密度、高溫高濕的亞熱帶城市而言，都市熱島效應進一步加劇市區熱負荷，使戶外工作者及需長時間暴露於高溫環境的人員承受更高的生理壓力。醫療機構作為社會關鍵基礎設施，其功能不僅限於臨床照護，更延伸至社區外展、後勤支援、病人運送、設備維修及感染控制等多層次運作。這些功能彼此緊密相連，一旦任何環節因熱壓力而失效，便可能造成服務延誤、病人照護中斷及整體營運風險上升。

醫療系統在極端熱壓力下呈現出特殊脆弱性，主要原因在於其多樣的工作環境異質。部分員工需在冷氣恆溫的臨床區域工作，部分則需在戶外或高熱後勤區域移動，例如社康護理、老人科外展、社區隔離中心、保安巡邏、鍋爐房、廚房、洗衣房及園藝維修等。這些崗位不僅面對不同程度的熱暴露，亦常需要穿著防護裝[4]、搬運物資或長時間站立，令身體散熱受阻，增加脫水、熱衰竭與中暑風險。更重要的是，醫療服務具有不可停擺的屬性，即使在極端天氣下，急症、住院與後勤服務仍需維持，這使熱壓力管理不能單靠停工，而必須以系統化策略維持服務與安全平衡[4]。

從公共衛生角度看，高溫不單影響員工健康，也會間接影響病人照護質素。當員工因頭暈、疲倦或熱不適而反應減慢時，臨床決策與照護準確性可能下降；當後勤團隊因人手不足而延誤供應或維修時，病房管理便可能受阻；當外展團隊因高熱而減少探訪頻率時，長者或慢性病患者的社區支援亦會受到影響。因此，熱壓力管理不應被視為單純的安全議題，而應提升至與醫療服務韌性、公共衛生應變及機構治理同等重要的戰略層面。

1.2 勞工處《預防工作時中暑指引》與監管要求

為應對日益嚴峻的高溫職業危害，香港勞工處制定並持續優化《預防工作時中暑指引》，為僱主提供風險管理框架。該指引的重要意義，在於它將熱壓力由一般健康提醒轉化為具體可執行的管理責任，要求僱主按環境、工作及個人因素進行系統性風險評估。其核心機制為工作暑熱警告（HSWW），並以香港熱指數（HKHI）作為預警依據，讓僱主能根據不同警示級別，調整工作安排與控制措施[2][5][6]。

多站點監測機制進一步提升了警示的代表性。香港地形複雜、建築密集，不同地區微氣候差異明顯，單一站點難以反映全港實際狀況。引入多個監測站後，當有足夠數量的站點達到門檻，便會觸發相應警示，從而更準確反映區域性熱風險。對醫療機構而言，這一制度意味著部門主管可根據警示狀態預先調整外展行程、戶外工作、搬運安排與休息時間，不再只是依賴主觀感受[2][5][6]。

指引亦明確要求僱主在熱警告生效期間提供足夠飲水、遮蔭、通風及工作休息安排，並根據工作強度制定相應的補充措施。這使熱壓力管理從「員工自己注意」轉為「僱主需主動預防」[2][5]。對醫療機構來說，這一點尤其重要，因為員工不是單純的生產力單位，而是病

人安全與服務連續性的核心[7][8]。

1.3 醫院管理局《熱壓力評估及管理安全指引》[2]之制度轉化

由於醫療機構的運作情境極具特殊性，勞工處的通用指引未必足以直接涵蓋所有臨床與後勤部門。醫院管理局因此制定《熱壓力評估及管理安全指引》[3]，將外部法規要求轉化為內部治理制度。這種制度化做法的重點，在於把熱壓力納入常規職安健框架，而非視為季節性宣導活動。醫療機構若僅依賴一般性提醒，往往難以應對不同單位之間存在的顯著熱暴露差異，因此需要更具場景化與操作性的管理工具。

醫管局指引首先強調管理責任的部門化與場景化[3]。各部門主管須根據轄下工作場景進行獨立評估，例如社區外展團隊的風險與洗衣房、廚房及鍋爐房完全不同，因此控制措施亦應不同。其次，指引將緩解措施明確分為五個層次：風險評估、工程控制、行政措施、健康監察與教育培訓[2][3][4]。這使制度不只是原則，而是可落地的標準作業程序。這種制度設計亦有助於把臨時應變轉化為常規管理，提升機構的持續性與一致性[5]。

1.4 職安健治理的範式轉移

職業安全與健康治理，已由傳統機械安全、防火與工傷防範，逐漸轉向氣候相關職業健康治理。熱壓力作為一種沉默的職業危害，其風險常被忽略，因為它不像跌倒或割傷那樣即時可見，卻會透過脫水、疲勞與生理失調逐步累積。過去的安全策略多依賴宣傳與個人警覺，但這種方式不足以處理制度性風險。現代治理思維強調，安全應被內嵌於組織架構、排班流程、設備配置與問責機制中[3]。

對醫療機構而言，這代表熱壓力管理必須由被動式提醒轉向前瞻式治理。若制度能在風險升高前自動觸發行動，員工便不必依賴個人判斷承擔全部責任。這種轉變不但有助於減少事故，也有助於提升機構在氣候變化下的韌性。本文即在此背景下，探討香港醫療機構如何透過風險評估、工程控制、行政措施、健康監察及教育培訓，建立應對極端高溫的可持續治理模式。

1.5 文獻回顧與研究意義

現有文獻普遍指出，熱壓力會對工作能力、健康結果與經濟效益產生不利影響。高溫除了增加中暑與脫水風險，亦會降低專注力、反應速度與判斷能力，進一步影響工作效率與事故率。醫療場景的文獻則特別指出，後勤與社區服務員工在熱浪期間更容易出現工作中斷與身體不適，若缺乏制度化管理，便可能對患者照護造成間接衝擊[4]。

然而，現有研究多聚焦於一般工業、建造或戶外勞動，針對醫療機構的場景化分析相對不足。尤其在香港這類高濕熱城市，醫療體系兼具臨床、後勤與社區外展功能，熱壓力風險具有高度複雜性。本文的研究意義，在於把熱壓力管理置於醫療治理與公共衛生韌性框架下，並以本地制度、場景與實務案例作分析基礎，補足現有文獻在醫療機構層面的討論缺口。

第二章：風險評估之理論與實務應用

2.1 多維度評估模型：環境、工作與個人因素

醫療機構的熱壓力風險評估不能採用單一指標，而應建立多維度模型，該模型綜合了以下三個核心軸線[2][3][6][9]：

（i）環境軸線（Environmental Domain）：包括氣溫、濕度、太陽輻射、風速及局部熱源。高濕會削弱汗液蒸發效率，使散熱受阻；太陽直射與反射則會增加戶外暴露風險；室內高熱區如廚房、洗衣房與鍋爐房則常因熱源集中而形成局部高溫。

（ii）工作軸線（Workload Domain）：包括勞動強度、工作時長、搬運負荷與穿戴裝備。高體力工作會增加代謝熱量（Metabolic Heat Load），而厚重或不透氣的個人防護裝備則會妨

礙熱散失。

（iii）個人軸線（Personal Domain）：這是醫療場景中最容易被忽略的變項。需將員工的生理狀況納入評估，包括年齡、慢性疾病史、藥物影響（如利尿劑可能增加脫水風險）、懷孕狀態及熱適應能力。這些因素會影響個體對熱壓力的耐受程度[2][7]。

在醫療場景中，三個維度往往互相交疊。例如一位社區護士可能在高溫天氣下長時間步行，並需同時攜帶工作設備；一位清潔員可能要在高熱、通風不佳的室內區域持續工作；一位保安則可能在院區巡邏時不斷曝曬並保持高度警覺。若風險評估僅看單一氣溫指標，便容易低估實際負荷。因此，醫療機構應採用結合熱指數、工作負荷與人員脆弱性的綜合判斷模式。

2.2 場景化分析：室內高熱區與戶外流動區

醫療機構的工作場景差異甚大，因此風險評估必須場景化。社區外展屬於典型的流動式高風險區，其風險不僅來自高溫本身，更來自室內外溫差快速變化。員工在冷氣環境與高溫戶外之間頻繁轉換，會加重心血管負荷及熱調節壓力[7]。若能結合行程路線、探訪時間與暑熱警告資料進行分析，便可更有效安排外展服務[3]。

廚房、洗衣房與鍋爐房則屬穩定高熱區，其風險通常較持續且可預測。這些區域常有固定熱源與高濕條件，因此應特別重視綜合溫度熱指數（WBGT）或其他綜合熱指標，而非只看一般氣溫。對這些區域的管理應以源頭減熱、局部排風與工作輪替為核心。由此可見，熱壓力管理不能只依賴統一規則，而應結合空間、工作與員工三方面資料，建立具針對性的風險評估流程。

2.3 閉環流程與部門風險管理

醫管局的五層策略治理框架可被視為一種閉環管理系統。首先，主管利用標準化風險評估表定期（如每年），以及在有需要時進行風險評估，如在開始工作前快速檢視當日環境與員工狀況；其次，若熱指數達到警示級別，系統應自動提示部門啟動行政降壓措施；再者，當工作流程或人員組成變更時，需重新評估，確保控制措施持續有效。這種閉環流程的關鍵，在於把風險評估與日常管理連接起來。風險評估不應只是存檔文件，而應成為排班、任務分配與現場調度的依據。唯有如此，才能真正把熱壓力管理由事後補救轉向事前預防。

第三章：工程控制與被動降溫技術

3.1 源頭降溫與局部工程措施

在高熱區域中，工程控制是最具根本性的措施。透過優化通風、加裝局部抽風、改善補風系統與設置隔熱屏障，可從源頭減少熱積聚。對中央廚房、洗衣房與鍋爐房等區域而言，局部排風與氣流組織優化尤為重要。若能在設計階段利用計算流體動力學模擬熱氣流路徑，便可更精準地配置排風位置與風量，減少熱氣回流[3]。此外，在固定作業區旁配置局部冷卻設備，例如噴霧風扇、蒸發冷卻裝置或小型風冷站，也能在不影響作業流程的情況下降低體感溫度。這些做法雖不一定完全消除高溫，但能有效減輕員工熱負荷。

3.2 被動式建築設計

除了主動式冷卻，被動式建築設計亦具長期效益。高反射率屋面塗層、遮陽設施、綠化屋頂及自然通風設計，皆可減少建築吸熱與室內熱積聚。對醫療機構而言，這類措施不僅有助於降溫，也可降低空調能源消耗，符合可持續發展與環境、社會及管治（ESG）方向。

尤其在新建或翻新工程中，若能在規劃階段將熱韌性納入設計標準，日後的營運成本會更低。被動式設計的價值在於，它能從建築物理層面提供長期保護，避免單靠人手與行政手段承擔全部風險。

第四章：行政措施、合約治理與健康監察

4.1 精細化排班與動態調度

行政措施的重點在於控制暴露時長。當熱警告生效時，部門應根據工作強度與時段調整排班，把高體力任務安排在較涼快的時間，並以短頻密休息方式分散熱負荷。對外展、保安、病人運送及清潔等高風險崗位，這種安排尤其重要[2][3][9]。

同時，部門可透過交叉作業，把高熱暴露與低負荷工作混合安排，避免員工長時間處於單一高壓環境。這不僅有助降低中暑風險，也能改善工作疲勞與整體效率。

4.2 合約治理

醫療機構大量依賴外判服務，因此熱壓力管理不能只限於內部員工。採購與合約文件應明確列出補水、遮蔭、透氣裝備、輪替與休息要求，並把高溫天工作紀錄納入承包商關鍵績效指標（KPI）。若外判員工在紅色或黑色警示期間仍被要求執行高風險工作，機構應啟動問責與稽核程序。這種合約治理的價值，在於它可防止職安健責任因外判而被稀釋，確保所有在院區內工作的人都受到一致保護。

4.3 健康監察與熱適應

健康監察是熱壓力管理的重要一環。員工需能辨識頭暈、噁心、疲倦、異常出汗、皮膚濕冷及意識混亂等早期警號。醫療機構應建立同儕監察機制，並鼓勵員工在不適時立即報告，而非勉強完成工作。對新入職或復工員工，機構應實施熱適應計劃，逐步增加暴露時間與工作量，避免一開始就承擔滿負荷工作。對高風險員工，例如妊娠、慢性病或年長者，則應安排彈性調崗，降低熱暴露。

第五章：治理障礙、成本效益與科技前瞻

5.1 政策與執行之間的落差

即使醫管局已有完善指引，政策與前線執行之間仍可能存在落差。原因包括：監測數據未能與排班系統直接連動、前線主管需在服務效率與安全之間作取捨、員工對體感熱度的理解不一致，以及現場工作流動性高，難以完全按標準程序操作。這些因素都會削弱制度成效。因此，熱壓力管理不能只依賴文件，而必須建立跨部門治理網絡，讓設施管理、職安健、臨床、採購與後勤形成協作鏈，將預警真正轉化為行動。

5.2 成本效益分析

熱壓力管理的成本效益，應以長期風險降低與服務韌性提升來衡量。前期成本包括監測設備、通風改善、補水設施與教育訓練；後續維護成本則包括系統校準、資料整合與跨部門協調。然而，這些投入可減少工傷索償、病假、替班成本、事故調查、服務中斷及聲譽損失。相較之下，預防成本通常較低且可預測。文獻顯示，職業熱壓力不僅與健康損害相關，也會造成明顯的生產力下降與社會經濟損失，因此對高風險機構而言，預防措施具備相當高的投資價值[3][6]。

尤其對醫療機構而言，熱壓力管理的回報並不只體現在財務節省，更體現在服務連續性、員工安全文化與機構韌性。若熱警告與即時監測能在風險升高前調整工作安排，便可避免重大事故並提高整體效益。從全成本角度看，這是一項高回報的治理投資。

5.3 科技應用與未來方向

隨著可穿戴裝置與人工智能技術發展，醫療機構可探索更精細的熱監測模式，例如結合心率變異、皮膚溫度與環境感測器進行風險預警。若能把這些數據整合至數位化儀表板與排班系統，便可形成從監測到行動的一體化流程。

同時，機構亦應將熱風險納入企業風險管理（ERM）框架，從董事會層級明確問責，並把熱安全要求延伸至外判與供應鏈管理。這有

助把熱壓力管理從單一安全項目提升為整體策略議題。

第六章：結　論

熱壓力管理已從單純的職安健措施，演變為醫療機構在氣候變化下維持服務穩定與組織韌性的核心策略。對香港醫療機構而言，面對高溫高濕、工作場景複雜及服務不能中斷的現實，唯有透過風險評估、工程控制、行政措施、健康監察及教育培訓構成的五層治理架構，才能有效保護員工並維持病人照護質素[1, 5]。

本文顯示，熱壓力管理的重點不僅在於防止中暑，更在於把熱風險納入治理、流程與文化之中。當監測數據能驅動行動、當排班能隨風險調整、當員工能安心報告不適、當承包商亦納入問責框架時，熱壓力管理才真正成為制度的一部分。從成本效益角度看，相關投資不僅可減少事故損失，也可提升機構聲譽、員工信任與服務持續性，因此是一項具長遠價值的治理選擇[4][7][8]。

參考文獻

[1] 世界衛生組織（World Health Organization）.（2026）. Heat and Health.［https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health］

[2] 勞工處.（2026）. 預防工作時中暑指引（第三版）.［https://www.labour.gov.hk/tc/osh/pdf/SSA-01-2015.pdf］

[3] 醫院管理局.（2024）. 熱壓力評估及管理安全指引（第二版）.［https://cdn1.get-qr.com/files/67077264f6b74794c2af99f7/1728541973462-b576385b1e85678fdf4224bd2914b744.pdf］

[4] Foster, J.; Hodder. S. G.; Goodwin. J., et al.（2020）. Occupational Heat Stress and Practical Cooling Solutions for Healthcare and Industry Workers During the COVID-19 Pandemic. Annals of Work Exposures and Health, Nov 16; 64（9）: 915-922.

[5] 香港特別行政區政府.（2025, June 25）. 立法會九題：預防僱員在工作時中暑.［https://www.info.gov.hk/gia/general/202506/25/P2025062500348.htm］

[6] 勞工處.（2020）. 熱壓力的危害與控制措施.［https://www2.cic.hk/files/past_event/538/1.%20LD_Heat%20Stress%20Hazard%20and%20Control%20Measures.pdf］

[7] Ebi, E. L.; Capon, A. PhD; Berry, B., et al.（2021）. Hot Weather and Heat Extremes: Health risks. The Lancet - Heat and Health Series, 398,（10301）, August. 698-708.

[8] M. A. Borg; Xiang, J.; Anikeeva, O, et al.（2021）. Occupational heat stress and economic burden: A review of global evidence. Environmental Research, April, 195.［Occupational heat stress and economic burden: A review of global evidence - ScienceDirect］

[9] 職業安全健康局.（2024）. 工作地點熱壓力風險評估. 綠十字, 34（2）, 39-43.［https:// www.oshc.org.hk/oshc_data/files/greencross/2024/GXAPR-JUN2024-10.pdf］

新兴产业安全健康政策研究

——以生物医药产业为视角的分析

李　莎

中钢集团武汉安全环保研究院　武汉　430081

摘　要：随着新一轮科技革命和产业变革的深入推进，新兴产业已成为各国经济增长的新引擎和综合国力竞争的战略制高点。然而，新兴产业在技术创新、商业模式、产业组织等方面的高度不确定性，使其在安全与健康领域面临前所未有的治理挑战。本文首先系统梳理了新兴产业安全健康政策的总体框架，分析了其政策内涵、国际经验与中国实践；继而聚焦生物医药产业这一典型新兴产业领域，从研发安全、生产质量、临床应用到数据伦理四个维度，深入剖析其安全健康政策体系的现状、问题与优化路径；最后，从制度创新、协同治理和全球视野三个层面提出政策建议，以期为我国新兴产业的高质量发展提供理论支撑与实践参考。

关键词：新兴产业；安全健康政策；生物医药；风险治理；协同监管

一、引言

以人工智能、生物技术、新能源为代表的新一轮产业变革，正在深刻重构生产生活方式。我国将战略性新兴产业增加值占 GDP 比重目标设定在 17%左右[1]，新兴产业已成为国家竞争力的核心支点。然而，技术突破往往伴随风险外溢：基因编辑引发伦理争议，自动驾驶造成责任认定困境，储能设备存在热失控隐患，算法决策产生歧视性后果。这些新型风险对基于传统工业社会形成的监管体系构成了根本性挑战。

安全健康治理是新兴产业行稳致远的前提。一方面，技术的前沿性与产业的跨界融合使风险更具隐蔽性和系统性，事后追责模式难以及时阻断危害扩散；另一方面，过于刚性的规制可能抑制技术迭代与商业模式创新，导致产业竞争力流失。因此，如何在激励创新与风险防控之间建立动态均衡机制，构建适配新兴产业演进规律的治理框架，是当前公共政策领域亟待回应的核心议题。

二、新兴产业安全健康政策的总体情况

（一）新兴产业安全健康风险的特点

相较于传统产业，新兴产业的安全健康风险呈现出四个方面的质性差异：

第一，技术不确定性带来的系统性风险。新兴产业依托尚未完全成熟的技术底座，其长期生物学效应和环境外部性在短期内难以被充分识别。例如，纳米材料在医疗领域的应用前景广阔，但其对人体健康和生态环境的长期影响至今仍缺乏充分评估。这种“未知中的未知”使得传统的风险评估方法面临失效风险。

第二，跨界融合导致监管缝隙。数字疗法、智能网联汽车等新业态横跨多个传统行业边界，现有部门化监管架构难以对其形成完整覆盖，出现职责交叉与监管盲区并存的结构性矛盾。

第三，创新迭代快与政策滞后性的矛盾。产业创新周期以周或月为单位推进，而政策制定需经过调研、论证、征求意见、立法审议等程序，制度供给天然滞后于技术演进，形成“产业先行、监管追赶”的被动局面。

第四，全球化竞争下的政策协调难题。新兴产业的发展高度依赖全球创新网络，技术、数据、人才、资本的跨境流动日益频繁。然而，各国在安全健康标准、数据跨境规则、技术出口管制等方面的政策差异，给新兴产业的全球化发展带来了合规成本和不确定性。

（二）国际新兴产业安全健康政策的经验借鉴

主要发达国家在新兴产业安全健康治理方面进行了积极探索，形成了各具特色的政策模式。

美国采取“创新优先、灵活监管”的模式。以肿瘤免疫治疗审批为例，FDA 在 2012 年创设的“突破性疗法”通道将平均审评周期压缩了约 30%，其“软件预认证”计划则尝试将监管重心从终端产品前移至企业质量管理体系。这种“信得过企业才信得过产品”的逻辑转换，本质上是对传统上市前审批模式的结构性松绑。同时，美国高度重视网络安全和人工智能伦理，通过《人工智能应用监管指南》等文件，确立了以风险为基础、以原则为导向的灵活监管框架。

欧盟奉行“precautionary principle（预防原则）”的审慎监管路径。欧盟在数据保护（GDPR）、人工智能伦理、基因技术等领域采取了较为严格的规制立场。例如，《人工智能法案》将人工智能系统按风险等级分为四类，实施差异化监管；在生物医药领域，欧盟药品管理局（EMA）建立了完善的药物警戒体系，强调全生命周期安全管理。该模式强化了公众安全保护，但也引发对创新抑制效应的担忧。

日本推行“社会 5.0”导向的协同治理。日本强调政府、企业、科研机构与公众的多元共治。在再生医疗领域，日本创设“有条件批准”制度，允许产品在确认初步安全性后提前进入市场，同时强制企业持续提交真实世界临床数据，形成“加速准入——动态监测”的平衡机制。

（三）中国新兴产业安全健康政策的现状与不足

我国新兴产业安全健康政策体系正处于快速完善阶段。在顶层设计层面，国务院安全生产委员会印发的《“十四五”国家安全生产规划》（安委〔2022〕7 号）等文件明确了新兴产业安全健康发展的战略方向；在体制机制层面，国家市场监督管理总局、国家药品监督管理局、国家数据局等机构的设立和职能优化，提升了跨领域监管协调能力；在具体领域层面，智能网联汽车、基因编辑、人工智能等领域陆续出台了专门的管理办法和技术标准。但仍存在若干短板：

一是政策碎片化问题突出。新兴产业的安全健康治理涉及科技、卫健、工信、市场监管、生态环境等多个部门，部门间协调机制尚不健全，存在“九龙治水”现象。例如，一款 AI 辅助诊断软件可能同时涉及医疗器械注册、数据安全审查、算法伦理评估等多个监管环节，企业面临多头申报、标准不一的困境。

二是标准体系建设滞后。新兴产业的技术标准、安全标准、伦理标准往往处于空白或探索阶段，国家标准、行业标准、团体标准之间的衔接不够顺畅。部分领域存在“企业标准高于行业标准，行业标准又高于国家标准”的倒挂现象，反映出标准供给与产业需求的脱节。

三是社会参与机制薄弱。当前新兴产业安全健康政策的制定仍以政府主导、专家参与为主，普通公众、消费者组织、行业自律组织的参与渠道有限。由于新兴产业的专业门槛较高，公众往往处于信息不对称的弱势地位，难

以有效行使知情权和监督权。

四是国际规则话语权不足。在人工智能伦理、基因数据跨境流动、数字疗法认证等新兴领域，国际规则和标准主要由美欧主导。我国虽然在部分产业领域具备技术和市场优势，但在安全健康国际标准的制定中仍处于“跟跑”状态，面临“技术领先、规则被动”的风险。

三、生物医药产业安全健康政策的深度剖析

生物医药产业是战略性新兴产业的重要组成部分，也是安全健康政策需求最为迫切、治理复杂度最高的领域之一。本文将从研发安全、生产质量、临床应用和数据伦理四个维度，对生物医药产业的安全健康政策进行具体阐述。

（一）生物医药产业安全健康风险的特点

伦理敏感性极强。基因编辑、干细胞治疗、合成生物学等前沿技术触及人类生命本质和伦理底线，“贺建奎基因编辑婴儿”事件充分暴露了伦理监管缺位的严重后果。

风险暴露周期长。药物和医疗器械的安全性问题往往在上市后的长期使用中才能充分暴露。“反应停事件”和“万络事件”均表明，即使经过严格的上市前审批，药品仍可能存在迟发性安全风险。

创新主体多元且能力参差。我国生物医药创新主体涵盖大型药企、科研院所、初创企业、医疗机构乃至个人研究者，创新主体的研发能力、质量管理水平和风险意识差异大。部分初创企业受融资和上市压力驱动，存在数据合规瑕疵和临床试验操作失范等问题。

产业链供应链安全风险。生物医药产业链长且高度全球化，关键原材料、核心设备、高端试剂对外依存度较高。近年来地缘政治冲突和公共卫生事件反复冲击供应链稳定性，暴露出产业安全的深层隐患。

（二）研发阶段的安全健康政策

在实验室研究环节，我国已建立起较为完善的生物安全实验室分级管理体系。《中华人民共和国生物安全法》对病原微生物实验室管理、生物技术研究开发活动、人类遗传资源管理等作出了系统性规定[2]。但在实际执行中，部分高校和科研机构的实验室生物安全意识仍显薄弱，实验室安全事故时有发生，“重产出、轻安全”的惯性思维尚未根本扭转。

在临床试验环节，我国药物临床试验质量管理规范（GCP）已与国际接轨，建立了伦理审查委员会（IRB/EC）制度和临床试验信息公示平台。但临床试验中的安全健康政策仍面临现实挑战：一是受试者权益保护机制有待完善，知情同意过程的规范性和充分性不足，弱势群体（如儿童、孕妇、认知障碍患者）的特殊保护机制不够细化；二是临床试验数据的真实性和完整性监管难度较大，数据造假、选择性报告等问题依然存在。

在基因技术等前沿领域，2025 年 9 月，国务院颁布《生物医学新技术临床研究与临床转化应用管理条例》（国务院令第 818 号），对基因编辑等高风险生物医学新技术的临床研究和转化应用建立了分级审批制度，明确涉及遗传物质改变的技术须经国家卫生健康委员会审查批准。但基因技术的快速发展对政策的及时性和前瞻性提出了更高要求，如基因治疗产品的长期安全性监测、基因脱靶效应的评估标准、基因数据的隐私保护等，仍需要更加精细化的政策设计。

（三）生产环节的质量安全政策

我国已建立与国际接轨的 GMP（良好生产规范）和 GSP（良好供应规范）体系。《中华人民共和国药品管理法》确立的药品上市许可持有人（MAH）制度，将质量责任主体由生产企业扩展至研发机构和流通企业，实现了全生命周期质量责任的制度重构[3]。然而，生产环节的安全健康政策仍面临多重挑战：

质量一致性难题。单克隆抗体、疫苗、细

胞治疗产品等生物药具有高度复杂性和批次间变异性，传统化学药的质量控制范式难以直接套用。我国生物药质量标准体系仍在完善中，细胞治疗、基因治疗等个性化产品的生产对质控提出了全新要求。

供应链安全管理薄弱。我国虽是原料药生产大国，但部分高端原料药和关键辅料依赖进口，供应链稳定性易受外部冲击。同时，药用辅料和包装材料的监管力度相对薄弱，历史上多次发生由辅料质量问题引发的药品安全事件。

数字化转型的监管适应。智能制造、连续制造及 AI 辅助质量控制正在重塑生产模式。我国监管部门已推进“智慧监管”建设，但针对数字化生产场景的 GMP 指南、数据完整性规范、AI 算法验证标准等仍处于探索阶段，监管能力与产业创新之间存在落差。

（四）临床应用的安全健康政策

在合理用药政策方面，我国建立了国家基本药物制度、处方药与非处方药分类管理制度、抗菌药物临床应用分级管理制度等，但临床不合理用药现象依然严峻。特别是新兴的生物靶向药物、免疫治疗药物、细胞治疗产品等，其适应症把握、剂量优化、不良反应监测对临床医生的专业能力提出了极高要求，而相关的临床用药指南和培训体系更新速度往往滞后于新药上市速度。

在医疗器械临床使用安全方面，我国建立了医疗器械不良事件监测和再评价制度，但高风险医疗器械（如植入式心脏起搏器、人工关节、医美填充材料等）的临床使用安全管理仍存漏洞。部分医疗机构在医疗器械采购、验收、使用、维护、报废等环节的管理不够规范，医美行业的器械使用乱象更是社会关注的焦点。

（五）数据安全与伦理治理

在健康医疗数据安全方面，《个人信息保护法》《数据安全法》《人类遗传资源管理条例》等构成了基础法律框架。生物医药研发涉及大量敏感个人信息的采集、存储、处理和跨境传输，数据泄露和滥用的风险日益凸显。特别是跨国药企和 CRO（合同研究组织）在全球多中心临床试验中，数据的跨境流动频繁，如何在保障数据安全的前提下促进国际科研合作，是政策设计的难点。

在人工智能医疗应用方面，AI 辅助诊断、AI 药物发现、AI 健康管理等应用快速发展。我国已出台《人工智能医用软件产品分类界定指导原则》等监管文件，但 AI 医疗算法的透明度、可解释性、公平性和鲁棒性等伦理问题尚未得到充分规制。算法偏见可能导致特定人群（如少数族裔、罕见病患者）被系统性忽视或误诊，而“黑箱”特性又使得医疗责任的认定变得复杂。

在基因数据伦理方面，基因信息具有唯一性和不可更改性，一旦泄露将造成终身性隐私侵害。基因数据的商业应用（如直接面向消费者的基因检测）引发了知情同意、数据主权、基因歧视等一系列伦理争议。我国现行政策对基因数据的保护尚不够细化，基因数据与保险、就业等领域的“防火墙”机制有待建立。

四、结论与政策建议

新兴产业不同于传统产业的“先成熟、后推广”线性路径，其技术验证往往在市场应用中同步完成。这种“边运行、边修复”的成长模式使风险呈现高度动态化和情境依赖特征，静态风险清单和命令控制型监管已难以适配。

以生物医药产业为聚焦点的分析进一步揭示，新兴产业安全健康政策的复杂性在生命健康领域体现得尤为充分。从实验室到病床，从分子设计到全球供应链，从数据比特到伦理底线，每一个环节都需要精细化的政策设计。我国生物医药安全健康政策体系已基本建立，但在伦理审查质量、供应链韧性、数字化监管适

应、数据伦理治理等方面仍存在明显短板，亟需通过制度创新加以补齐。

面向未来，我国新兴产业安全健康政策的优化完善应着力推进以下三个方面的创新：

第一，构建“敏捷治理”的制度框架，提升政策的适应性和韧性。借鉴国际“监管沙盒”“真实世界证据”“有条件批准”等创新工具，在生物医药、人工智能、自动驾驶等领域建立更具弹性的准入和监管机制。同时，建立政策的定期评估和快速迭代机制，运用大数据监测、风险预警等技术手段，推动监管范式由“被动响应”向“主动感知”转型。

第二，完善“协同治理”的体制机制，破解碎片化治理困境。在国家和地方层面设立新兴产业安全健康协调机制，整合科技、卫健、市场监管、网信、生态环境等部门职能，推行“一件事一次办”的集成式监管服务。同时，激活行业协会、第三方认证机构、消费者组织等社会力量，形成政府监管、行业自律、社会监督相结合的多层次治理网络。

第三，强化“全球治理”的规则参与，提升国际话语权。积极参与世界卫生组织（WHO）、国际人用药品注册技术协调会（ICH）、国际标准化组织（ISO）等多边机制，将我国在生物医药、数字健康等领域的产业优势转化为规则制定优势。加强与发展中国家的政策对话与技术合作，在全球公共卫生治理中贡献中国方案。

新兴产业是通往未来的船，安全健康政策则是压舱石。压舱石过轻则难以抵御风浪，过重则拖累航速。在百年未有之大变局与新一轮科技革命的历史交汇点上，我国新兴产业正处于从“跟跑并跑”向“并跑领跑”跨越的关键阶段。好的安全健康政策不是创新的绊脚石，而是创新的导航仪。它应当在尊重科学规律和市场规律的前提下，划定不可逾越的红线，指明值得信赖的航线，让新兴产业这艘巨轮在守护与开拓之间，行稳致远，驶向人类健康与福祉的星辰大海。

参考文献

［1］ 中华人民共和国国务院. “十四五”规划和 2035 年远景目标纲要. 2021.

［2］ 中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国生物安全法. 2020.

［3］ 中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国药品管理法. 2019.

高等职业院校赋能传统村落防灾减灾路径研究

徐素军，许曙青，陈章余
江苏省南京工程高等职业学校，应急管理系，南京，211135

摘　要：传统村落兼具文化遗产保护与基层社区双重属性，其古建密集、街巷狭窄、原住民老龄化及文旅人流集中等特征，导致灾害风险突出、防灾能力薄弱，是职业安全健康领域亟需关注的特殊场景。然而，现有基层防灾研究针对传统村落的系统性防灾减灾路径研究明显不足，职业教育力量参与其中的机制探索几乎空白。本研究以江苏省传统村落为研究对象，构建“需求—供给—机制”三维分析框架，系统识别不同地域村落的灾害风险特征与防灾服务需求，同时结合职业院校应急管理及相关专业的社会服务能力与现有模式。研究发现：传统村落防灾需求与职业院校技术服务供给之间存在“匹配度低、转化不畅、机制缺失”等关键障碍。据此，本研究设计出四维赋能路径：技术服务嵌入（简易监测、智慧预警）、人才培养对接（课程嵌入、订单培养）、校地协同治理（信息共享、应急联动）及社会服务长效机制（项目化运作、品牌建设），并形成可复制、可推广的实施建议，为江苏乃至海峡两岸传统村落的安全韧性提升提供低成本、可持续的校地协同方案，助力文化遗产保护与乡村安全治理融合发展。

关键词：职业院校；传统村落；防灾减灾；校地协同；江苏

一、引言

近年来，防灾减灾救灾技术在灾害监测预警、风险评估、应急响应等领域快速发展，遥感、GIS、物联网、AI 等技术已广泛应用于城乡灾害管理。但现有研究多聚焦城市或一般乡村，对传统村落这一特殊空间单元的系统性防灾减灾研究明显不足。

在传统村落灾害风险领域，国内研究主要集中于风险评价与空间规划（吕晓等，2025）、脆弱性量化评价（郑舰等，2026）、传统防灾智慧挖掘（张笑笑等，2025）等。但普遍存在以下局限：一是对防灾减灾技术的系统嵌入路径、落地障碍关注有限；二是缺少“技术—空间—社区”整合的分析框架；三是职业教育力量参与传统村落防灾减灾的机制研究几乎空白。

近年来，职业院校在基层防灾减灾领域积累了丰富实践经验。湖南安全技术职业学院“民安防灾减灾志愿服务队”深入湘西传统村寨开展木楼火灾隐患治理；云南国土资源职业学院开展地灾防治专项培训，累计培训基层骨干 451 人次；重庆安全技术职业学院构建“厅市共建+产教融合”模式服务城市韧性治理。这些实践表明，职业院校具备将专业技术能力转化为基层服务效能的潜力。然而，现有实践多停留在志愿服务或零散培训层面，尚未形成系统化的防灾减灾服务路径。

职业教育如何有效服务乡村振兴，特别是职业院校如何将防灾减灾能力嵌入传统村落治理，正是当前高职教育改革的重要议题。江苏作为经济大省、文化大省，拥有众多传统村落，且地处自然灾害多发区域，对职业院校助

力防灾减灾有着迫切需求。

二、理论与框架

（一）职业教育服务社会的理论逻辑

相对于普通教育而言，职业教育与经济社会的联系更加直接、更为紧密。从功能定位来看，高职院校对区域社会发展承担着培养技术技能人才、推动科技创新、促进产业升级和服务社会治理等多重功能。服务乡村振兴战略是新时代高职教育的历史使命，是彰显职业教育类型特征的内在要求，也是高职院校实现内涵式发展的重要途径。

研究指出，职业教育赋能乡村振兴在实践中面临目标多元导致供需错配、内容错位引发人才断层、方式偏差加剧实践脱节、主体分离削弱协同效能等现实困境。这意味着，职业院校的社会服务需要建立在对需求精准识别、供给能力客观评估和协同机制系统构建的基础之上。

（二）“需求—供给—机制”三维分析框架

基于上述理论逻辑，本文构建了“需求识别—供给匹配—机制保障”三维分析框架，用以分析职业院校赋能传统村落防灾减灾的系统逻辑。

第一维度：需求识别。传统村落的防灾需求是多层次、多维度的，既包括硬件层面的设施需求（消防设施、监测设备、应急通道等），也包括软件层面的能力需求（村民防灾意识、应急队伍能力、管理制度等），还包括特定场景下的差异化需求（旅游村落的安全管理、空心化村落的照护体系等）。精准识别这些需求是赋能的前提。

第二维度：供给匹配。职业院校具备专业设置、技术研发、人才储备、实训条件等方面的供给能力。但供给能否有效匹配需求，取决于院校是否了解基层实际、课程是否对接真实场景、技术是否具备可操作性。供需错配是当前职业教育服务乡村振兴的突出问题。

第三维度：机制保障。即使需求识别精准、供给能力具备，缺乏制度化的协同机制，赋能也难以持续。机制保障涉及校地合作的制度化安排、服务项目的常态化运作、激励考核的体系化设计等层面。只有建立起稳定的机制，才能将职业院校的“一次性服务”转化为“持续性赋能”。

三、现实困境：供需错配的三重表现

基于对江苏典型传统村落的实地调研和对职业院校服务现状的分析，当前职业院校赋能传统村落防灾减灾主要面临三重困境。

（一）制度化不足：从“一阵风”到“常态化”的断裂

当前职业院校服务传统村落防灾减灾的主要形式是暑期“三下乡”社会实践、志愿服务或短期培训。这些活动虽然具有积极意义，但普遍存在“来去匆匆”的特征——活动结束后，院校与村落的联系随之中断，服务的持续性无法保障。调研发现，多数传统村落与职业院校之间缺乏正式的合作协议和制度化的沟通渠道，校地合作“人走茶凉”的现象较为普遍。

这种制度化不足导致两个直接后果：一是院校的服务资源无法形成累积效应，每次服务都需“从头开始”；二是村落无法对院校服务形成稳定预期，难以将院校资源纳入自身的防灾规划。从“一次性服务”到“持续性赋能”的断裂，是制约职业院校发挥更大作用的首要障碍。

（二）转化不畅：从“实验室”到“村落”的鸿沟

职业院校在防灾减灾技术方面具有一定的研发能力，但这些技术成果往往与村落的实际需求和承接能力存在距离。一方面，部分技术方案对设备要求高、维护成本大，超出了传统村落的承受能力；另一方面，技术推广缺乏“最后一公里”的落地服务，村民“不会用、

不愿用、用不起”的问题突出。

调研发现，传统村落最需要的往往是“低成本、易操作、可维护”的简易技术方案，而非高精尖的智慧系统。然而，职业院校的技术研发往往更倾向于前沿探索，对基层适用性的关注不足。这种“供给”与“需求”之间的错位，使得院校的技术优势难以有效转化为村落的防灾能力。

（三）匹配度低：从“课堂”到“现场”的距离

职业院校应急管理类及相关专业的课程设置偏重理论教学，实践环节与真实场景的结合不够紧密。毕业生走向基层后，往往面临“学非所用”的困境——课堂上学的是城市社区的应急管理规范，工作中面对的是传统村落的特殊场景。这种人才培养与基层需求之间的匹配度不高，既影响了毕业生的就业质量，也制约了基层防灾能力的提升-。

与此同时，传统村落的防灾需求对人才提出了复合型要求——不仅需要掌握基本的应急管理知识，还需要了解传统建筑保护、熟悉村落社会网络、具备与村民沟通的能力。现有的人才培养体系对这些特殊要求的回应明显不足。

四、赋能路径：从理念到实践的设计

破解上述困境，需要从技术、人才、机制、制度四个层面系统设计赋能路径。

（一）技术服务嵌入路径

技术服务嵌入是职业院校赋能传统村落防灾减灾最直接的路径。这一路径的核心在于将院校的技术优势与村落的实际需求进行有效对接，而非简单地将“先进技术”移植到村落场景中。

具体而言，可分三个层次推进：基础层，以低成本、易操作的简易技术为主，如简易水位报警器、消防沙池、手持终端上报系统等，解决村落防灾“从无到有”的问题；提升层，在基础条件较好的村落适度引入数字化监测手段，如物联网烟感、地质灾害简易监测桩、风险地图等；示范层，在具备条件的村落探索智慧应急与传统文化融合的示范项目，如结合村规民约的智能预警系统、融入传统巡更制度的数字化监测等。技术嵌入的关键不在于技术的先进性，而在于技术的“可嵌入性”——能否与村落的空间肌理、社会结构和文化传统相融合。

（二）人才培养对接路径

人才培养是职业院校的核心职能，也是赋能传统村落防灾减灾的根本路径。这一路径的关键在于打破“课堂”与“现场”之间的壁垒，实现人才培养与基层需求的有效对接。

具体措施包括：课程嵌入，在应急管理类专业课程中增加传统村落防灾减灾的专题内容，让学生了解传统村落的特殊性；实践教学，将传统村落作为实践教学基地，组织学生参与村落风险排查、防灾宣传、应急演练等真实场景的教学活动；订单培养，与地方应急管理、文旅等部门合作，定向培养熟悉传统村落、掌握防灾技能、愿意扎根基层的复合型人才。通过“把课堂搬到村落、把现场引入课堂”，缩短人才培养与基层需求之间的距离。

（三）校地协同治理路径

校地协同是实现从“一次性服务”向“持续性赋能”转变的关键机制。这一路径的核心在于建立职业院校与地方政府、传统村落之间的制度化合作框架。

具体而言，可从三个层面推进：合作机制，推动职业院校与县级应急管理、文旅、住建等部门签订框架合作协议，明确双方的权利义务、合作内容和保障措施；信息共享，建立校地之间的信息沟通渠道，使院校能够及时了解村落的防灾需求，村落能够知晓院校的服务能力；应急联动，在突发事件发生时，院校能够迅速调集专业力量参与应急处置，形成“平

时服务、急时应急”的联动模式。校地协同的关键在于将“人治”转化为“制治”——依靠制度而非个人关系维持合作的稳定性。

（四）社会服务长效机制路径

长效机制是职业院校赋能传统村落防灾减灾的可持续保障。这一路径的核心在于将社会服务从“活动导向”转变为“制度导向”。

具体措施包括：项目化运作，将服务传统村落防灾减灾纳入院校的社会服务项目体系，实行项目申报、过程管理、成果验收的规范化运作；考核激励，将教师参与社会服务的成效纳入绩效考核和职称评审，将学生参与实践纳入学分认定和综合素质评价，形成正向激励；品牌建设，培育和打造服务传统村落防灾减灾的品牌项目，通过品牌效应吸引更多资源和更广泛的参与。长效机制的建立，需要院校在理念上真正将社会服务视为核心职能而非“额外负担”，在制度上将服务成效纳入院校发展的核心指标体系。

五、结论与展望

高等职业院校赋能传统村落防灾减灾，既是职业教育服务乡村振兴战略的时代要求，也是传统村落应对日益严峻的灾害风险的现实需要。本文通过构建“需求识别—供给匹配—机制保障”三维分析框架，揭示了当前职业院校服务传统村落防灾减灾面临的制度化不足、转化不畅、匹配度低三重困境，并据此设计了技术服务嵌入、人才培养对接、校地协同治理、长效机制建设四条赋能路径。

研究认为，职业院校赋能传统村落防灾减灾的核心逻辑不在于“提供多少服务”，而在于“建立怎样的关系”——将院校与村落之间从松散的、临时的“服务—被服务”关系，转变为紧密的、持续的“协同—共生”关系。唯有如此，职业院校的技术优势、人才优势才能真正转化为传统村落的防灾能力，职业院校也才能在服务乡村振兴的过程中实现自身的价值增值。

未来的研究可以在以下方向继续深入：一是开展更大范围的实证研究，验证不同赋能路径的适用条件和实施效果；二是探索职业院校赋能传统村落防灾减灾的绩效评价体系；三是关注数字技术条件下职业院校赋能传统村落防灾减灾的新模式与新可能。

参考文献：

［1］吕晓，陈喆. 集中连片视角下传统村落雨洪灾害防治路径研究——以北京门头沟区为例［C］//中国城市规划学会，规划的价值与作为——2025 中国城市规划年会论文集（02 城市安全与防灾规划）. 北京工业大学建筑与城市规划学院；，2025：145–156.

［2］张笑笑，江子玉. 韧性防灾视角下徽州传统村落空间营造智慧挖掘——以宏村、呈坎村、阳产村为例［J］. 沈阳建筑大学学报（社会科学版），2025, 27（6）：617–624.

［3］邓德艾，蒋海波. 湖南安全技术职业学院“教育方舟”育训基层应急安全人才［N］. 光明日报，2025–09–20（08）. .

［4］郑舰，邓集铉，蒋杰敏. 传统聚落景观环境脆弱性的量化评价与动态监控研究——以武陵山区 206 个传统村落景观单元为例［J］. 西部人居环境学刊，2026, 41（2）：178–186.

［5］李亦祺，翟斌庆. 传统村落的空间韧性分异特征与治理策略研究——以陕南秦巴山区山地型村落为例［C］//中国城市规划学会，沈阳市人民政府. 迈向中国式现代化：规划的价值与作为——2025 中国城市规划年会论文集（18 山地城乡规划）. 西安交通大学，2025：25–34.

［6］广东水利电力职业技术学院全力帮扶筑牢乡村振兴民生水利防线［EB/OL］. 教育在线，2025–07–03.

［7］古镇资产智慧防护与活化系统：构建安全与价值并重的数字治理体系［EB/OL］. 2025–06–25

[8] Heijman W, Hagelaar G, van der Heide M. Rural resilience as a new development concept [R]. European Association of Agricultural Economists, 2007.

[9] Cox R S, Hamlen M. Community disaster resilience and the rural resilience index [J]. American Behavioral Scientist, 2014, 59 (2): 220–237.

基于全链条责任追溯视角下平台经济职安健政策研究与对策

李繁生
横琴粤澳深度合作区商事服务局，广东　横琴　519031

摘　要：平台经济是以互联网平台为载体，以数据生产要素为核心，在供需双方间牵线搭桥，通过数据分析、算法优化提高对接效率的一种经济模式，在扩大内需、就业创业方面发挥巨大作用。当前，国内从事平台经济人数众多，劳动关系复杂，社会保障政策覆盖不足，算法管理不透明，网约配送员、网约车驾驶员等从业人员在道路交通等高风险场景下人身伤害事故较多。

本文从全链条责任追溯视角出发，围绕核心生产要素追溯平台经济职安健管控责任主体，并通过对比研究不同经济体内平台经济职业安全健康政策，在现行框架下突出存在人身伤害事故风险的一线网约配送员安全生产保障和关怀。同时，强调发挥政府、国企作用，深度参与平台经济建设，强化政府调节和监管能力，引导平台经济等新兴产业安全平衡有序发展。

关键词：平台经济　职业安全健康　产业发展

壹、引　言

平台经济是数据要素占主导的经济模式，在传统产业数字化转型的背景下，平台经济发展出了比雇佣、劳务模式更加灵活，劳动关系更不确定，劳动者职安健保护向劳动过程职业安全保护的劳动者就业形态。在经济转型升级、产业迭代的背景下，平台经济为大量摩擦失业者、新时代务工人员群体提供了灵活就业机会，工业经济时代以资本、技术、劳动力等要素为基础，建立起来职安健保障制度注重以企业为单元落实对劳动者保护，而互联网时代以数据要素为主导的对现有劳动保障制度提出了一系列问题和挑战。

以网络预约配送员（以下简称骑手）为例，无论是企业自有骑手、劳务派遣骑手还是众包骑手，都是接受互联网平台的统一调度、考核、支配，用工模式从岗位导向转为任务导向，职安健保护对象从劳动者变成了具体劳动过程。在平台经济的算法里，骑手和无人汽车、无人机都是具体劳动过程的执行者。

貳、研究内容

本文主要从关注以下三方面问题，一是新就业形态劳动者发生事故伤害后保障问题；二是平台经济如何开展新就业形态劳动者安全生产保障与关怀；三是如何构建劳动者友好型的平台经济，促进平台经济安全良性发展。

叁、讨　论

一、生产安全事故全链条责任追究思路及启发

生产安全事故是指生产经营单位在生产经

营活动（包括与生产经营有关的活动）中突然发生的，伤害人身安全和健康、损坏设备设施或者造成直接经济损失，导致生产经营活动暂时中止或永远中止的意外事件。在生产安全事故原因调查过程中，我们发现造成人身伤亡的事故通常呈现“多因一果”的结构，即生产经营单位、管理人员、劳动者乃至技术服务机构共同造成了事故后果。事故责任认定穿透传统的劳动合同、劳务合同、承揽等民事合同关系，以生产经营业务为核心，直指各岗位人员履职情况与事故后果的关联。各行业领域对资本、土地、技术、劳动力等生产要素进行不同程度的组织，形成本行业领域的具体生产经营业务，而基于“管业务必须管安全、管生产经营必须管安全”的事故责任认定思路，正是针对其主要生产要素的支配者实施职安健监管的具体体现。

在工程建设类活动中，资本、技术和劳动力要素结合，居于枢纽的施工总承包单位（承造商）作为责任主体；在交通运输类活动中，以劳动力要素为主，私家车交通事故的责任主体是自然人；在村居自建房事故中，以土地要素为主，事故责任主体为自建房所有人。

平台经济行业以数据生产要素为核心，劳动力等要素为辅助。如仅按照传统劳动力要素认定站点、第三方劳务公司甚至负责配送的骑手个人为责任主体，与平台经济的实际并不相符。通过围绕核心生产要素开展责任追溯，确定在平台经济中生产要素的支配者作为职安健责任主体，才能有效回答新就业形态劳动者为谁工作的问题，才能针对性加强平台经济职安健建设。

二、新就业形态劳动者职安健政策对比

2025 年 1 月 1 日，新加坡《平台工人法案》正式施行，该法案将平台工人界定为雇员、自雇人士间的独特法律类别，要求平台运营商为平台工人提供工伤赔偿保险，该举措为新加坡 592 万人口中约 7 万名平台工人提供保障。

2025 年 9 月，中华人民共和国人社部等九部门印发通知扩大新就业形态人员职业伤害保障试点。职业伤害保障实行“按单缴费”、“每单必保”，较好地解决了新就业形态人员发生职业伤害事故后的救济问题。职业伤害保障与工伤保险类似且不能共享，《新就业形态人员职业伤害保障办法（试行）》的第十一条（职业伤害确认条款）与《工伤保险条例》第十四条（工伤认定条款）内容相近。职业伤害保障是国家在现行工伤保险体制不做大调整的情况下，穿透传统劳动关系，专门针对新就业形态人员因为事故伤害发生类似“工伤”情况后给予伤亡人员的职业伤害保障待遇。职业伤害保障基于平台订单，要求各平台企业据实申报缴纳职业伤害保障费，实现对新就业形态人员的权益保障。

对比新加坡和中国内地对新就业形态人员的保障，可以看出不同体量经济体结合国情、行业情况对平台经济职安健治理思路。中国内地渐进式、“分两步走”的治理思路更加符合一个幅员辽阔、平台经济发达、劳动力密集、数据要素迸发的大型经济体。

三、强化平台责任　推动劳动过程职安健措施完善

在平台经济等新兴行业领域，参与方众多，经营者、消费者必须经由互联网平台完成信息数据交互，达成交易意向后付诸线下执行，互联网平台经营者处于居中调度位置，既掌握经营者、消费者数据，又搭建两者交易的渠道。平台经济职安健措施的焦点在于线下执行过程，对象是参与到道路交通等高危场景的劳动者（如骑手），传统的劳动关系下职安健措施被分解为不同主体，造成了依托劳动力要素的职安健措施失效。

借鉴事故责任追究思路，处于枢纽、支配

数据生产要素的互联网平台实际上掌控了平台经济的话语权，而其职安健措施的滞后或仅覆盖建立传统劳动关系管理本单位职工，暴露出互联网平台职安健管理思维欠缺或仍停留在劳动力要素为主的行业，并不适应以数据要素为核心的平台经济。所谓“无劳动合同关系”、“骑手自主接单”在“拒单多降低派单优先级”、“多次违规封禁账号”情形下，实际上构成了互联网平台对一般劳动者的业务强制，凸显平台经济中数据要素的主导地位，劳动力要素的从属地位。

平台经济应以互联网平台建立劳动友好型配送规则加强配送阶段职业安全，构建新型职安健保障体系。

（一）优化取送衔接，分工提高效率。设置外卖区域集散点，将送餐流程分解为“商家取餐”–“配送”–“顾客取餐”三个阶段，由“取餐员”、“骑手”配合衔接，通过分工提高效率。从事“商家取餐”、“顾客取餐”阶段的取餐员事故风险较低，更强调对地址的熟悉、人员服务态度，通过相对固定人员取餐，推动两个终端从陌生人社会到小型熟人社会的转变，强化人员责任感和服务态度；从事“配送”阶段的骑手事故风险较高，更强调专注与技术性，通过“集散点”对“集散点”配送，避免骑手与商家、顾客不良互动消耗配送员精力，影响配送安全。

（二）配送阶段总量控制，兼顾公平与效率。每月确定派送服务人员基本工资、固定单量、固定单价，在基本工资范围内，平台不得给予配送员任何形式处罚，作为骑手的保底待遇。在基本待遇以外，配送服务的边际收益应呈现先高后低的特点，将大多数骑手的收入限制在特定范围。通过经济手段确定个体接单上限，抑制“单王”骑手过度劳作，为大多数骑手、潜在骑手提供就业机会。

（三）强化技防措施，防范交通事故。通过骑手头盔加装 HUD 功能等技术手段，实现导航线路、订单信息、接单选择、当前时速等信息平视显示，减少骑手低头操作导致注意力分散，尽可能提高交通运输行业劳动过程中的技术安全水准，降低非机动车交通事故发生率，从源头化解交通安全风险。

（四）优化算法，提升每单效率。根据法律法规规定，将红绿灯时长设置为不可压缩时长，调整推荐路线，配合前述配送阶段总量控制措施，避免部分劳动者自我加压，牺牲时间冗余多接订单。对骑手连续多单超时配送的，立即停止新增派单，并在既有订单配送完毕后，按累计超出时间相应给予双倍禁单时长，强制骑手下线休息。

按照“管业务必须管安全”的规定出发，内地互联网平台在确定骑手配送时限时，应当附带算法确定该时限的依据、配送安全规程，确保一线执行人员安全高效地执行，告诉劳动者“应当如何做”，提供骑手配送操作的合规路径，并且在法规约束、现实道路障碍以及骑手能力约束下的，使用算法优化配送方案。而不仅仅是类似安准卡制度的“禁止如何做”，更不应该将个别骑手透支安全、违反交通管理法律法规而形成的不合理配送时间，成为全体骑手的配送标准方案。

四、积极发挥政企作用引导平台经济安全平衡发展

（一）主动引导要素市场化配置。各级政府针对网约配送特点，鼓励和推动下属国企积极参与平台经济，通过招揽骑手等方式，实现骑手职业伤害保障纳入传统工伤保险体系，通过汇聚劳动力要素的工会与掌握数据要素的互联网平台进行“集体协商”，参与算法规则制定，提升劳动者劳动条件和职安健保障权重；同时，通过政府国企自建平台，为商家、顾客提供服务，增加区域性互联网平台供给，打造安全企业标杆的互联网平台，打造政府对平台

经济的调控的抓手，倒逼盈利性平台企业强化职安健保障，促进平台经济等新兴产业安全发展。

（二）规范数据要素市场定价。平台经济的核心是数据要素，数据来源于各市场主体参与者，其使用应当依据产权建立有偿收集和授权使用的定价机制。政府依托国企自建平台，通过对商家、顾客、劳动者三方信息支付有偿使用成本，和利用数据要素优化算法所获取的超额效益，量化体现数据要素占全体要素的百分比，逐步形成数据要素定价机制，确定作为信息中介的互联网平台的费用比例。既可以实现商家、消费者、从业人员通过数据要素获得收入，又可以探索形成数据要素的市场定价机制。

（三）强化政府交通管理部门作用。对配送阶段骑手的开展随机抽查，发现互联网平台推荐线路存在未单列红绿灯时长，规划逆行路线、禁行路线或穿越小区内部道路线等不合理情况的，予以记录并要求互联网平台调整推荐算法。对拒不配合调整的，采取违法案例曝光、从严管控、信用记录等方式对互联网平台予以处理。

参考文献

［1］ 尚勇, 张勇。《中华人民共和国安全生产法释义》［Z］。出版地：中国法制出版社, 2021。

［2］ 中华人民共和国人社部。《新就业形态人员职业伤害保障办法（试行）》［Z］。

［3］ 孙萍。《过渡劳动：平台经济下的外卖骑手》［M］。出版地：华东师范大学出版社, 2024。

［4］ 闻效仪。《新加坡如何保障平台经济用工权益》［N］。《学习时报》, 2026。

面向职安健人才培养的体验式培训场馆设计研究

陈馨雨，乐有邦，吴晓煜，吕　垒，郑一帆
中钢武汉安全环保研究院股份有限公司

摘　要：传统安全培训存在理论和实际操作脱钩、受训人员参与积极性不高等问题。近年来，体验式安全培训场馆扩张迅速，但这些场馆的设计初衷和主要服务对象仍集中在一线作业人员与社会公众，针对职安健领域专业人才培养的体验馆设计，还缺乏系统性研究。本文通过解构体验式安全培训场馆的空间属性，重点关注职安健专业人才在风险识别、评估研判、系统化管理及教学传播等方面的独特能力需求，提出面向专业化人才培养的场馆设计方法论，目的是打破“体验式场馆仅适用于工人岗前培训”的传统认知局限，揭示这类场馆在专业人才培养过程中的潜在价值。该方法论为体验式场馆的功能扩展——从基础安全教育向高层次专业人才培养转型——提供了设计层面的理论依据，给后续的工程实践指明了可行的方向。

壹、职安健人才培养研究背景

如今，我国安全生产的形势依旧严峻，传统培训模式长期存在理论与实践脱节的问题，无法有效适配实际的安全需求。数据表明，96%的安全事故都是由生产人员的不安全行为引发的，具体体现在操作违规、风险认知不足、应急技能欠缺等方面（雷・普雷斯特，2022）。同时，职业健康领域人才紧缺加剧了安全管理的困境。根据《中国安全应急管理人才发展报告（2024）》的数据，全国安全应急人才缺口达 550 万人，但每年从高校毕业的安全应急相关专业本科毕业生仅约 1.6 万名，无法满足市场的需求。我国每万名劳动者对应的职业健康专业人员仅约 1.0 人，人才配置密度低于全球主要国家的平均水平，与美国（4.6 人/万名劳动者）、芬兰（22.0 人/万名劳动者）这类发达国家差距更为突出（彭红，2026）。另外，现有的人才队伍建设还要面对人才加速流失、从业人员实践能力偏弱、工程治理与复合型人才严重紧缺等多重压力（曹媛媛，2025）。这些问题的深层原因在于，高校的培养方案与用人单位的实际需求存在结构性错位，行业参与课程设计、实践基地建设的深度不足，导致毕业生无法快速胜任岗位要求，进一步拉大了人才供需的矛盾（彭红，2026）。

贰、体验式安全培训场馆概况

体验式培训借助模拟真实的现场隐患与事故场景，把抽象的安全知识转变成直观的沉浸式体验，让参训者完成“从被动听讲向主动体验”的认知转变。研究显示，体验式学习的知识留存、记忆保持效果都远高于传统听讲式培训（苏晓，2023）。因此，体验式培训场馆在提高培训质量上优势十分明显，有效补足了传统培训缺少情景、实操性不足的缺点。近年来，在政策引导与市场需求的共同促进下，国内体验式安全培训场馆建设发展十分迅速。按照建设形式的不同，这些场馆主要可以分为三类。

综合性公共安全培训中心。主要面向社会

公众进行通识性安全教育，覆盖消防、交通、自然灾害、应急救护等多个领域，是促进职业安全健康知识“进企业、进社区、进学校、进家庭”的高效载体，能够切实提高全民安全素养与应急实操能力。

专业性体验式培训点。主要针对建筑施工、消防、交通等专项领域，面向行业从业人员进行精准的实操培训。这类场馆规模不大、定位清晰，只针对单一或者少数工种的高频风险场景，培训效率更高，通常支持月度、季度的常态化复训，可以长期帮助员工巩固并提高岗位技能，有效弥补传统培训“学用脱节”的漏洞，保证岗位能力持续符合要求。

企业自建的安全培训中心。其核心优势在于培训内容的岗位适配性与场景仿真度。跟特种作业培训考点的通用考试设备相比，这类场馆的培训内容更贴合企业实际生产情况，可以围绕企业具体的生产流程、设备型号和岗位操作规范进行深度定制，实现从“通用考核”到“岗位实战化训练”的质变。

叁、体验式培训场馆对专业人才培养的特殊价值

体验式安全培训场馆在职安健人才培养中起到了双重作用。在岗位技能实训层面，管理人员和技术骨干可进入仿真作业场景，在实际操作中增强风险感知，在应急处置中打磨专业判断能力。这种培养方式，可以基于真实作业场景训练专业人才识别隐患、分析风险、制定防控措施的全链条实战能力，让场馆成为帮助专业人员不断提高岗位胜任力的实战化训练平台。它可以有效填补传统培养体系里“实操应用”的缺口，促进专业人才的综合能力培养。

在教学与管理能力塑造层面，通过体验式培训，可以促进安全培训人员完成“被动听课者—主动体验者—未来课程设计者”的角色跃迁，在沉浸式体验中掌握“教、学、练、考”一体化培训方案的设计逻辑与落地方法，充分发挥其专业价值。在这种培训模式下，职安健专业人员不需要驻场运维，可以把精力放在课程设计、培训组织与成效评估这类核心管理环节，既能降低人力成本，还能最大化提高场馆的安全教育效能。这种模式可以缓解专业人才的结构性供给不足，从而实现集约化、可持续的安全治理路径。

体验式培训为职安健专业人才打开了一条立体化成长通道，覆盖从知识内化到能力外显、从个人提高到养成系统思维、从被动响应到主动防控的完整成长过程。场馆定位也可借此从服务高危行业员工的安全技能训练基地，升级为面向职安健人才的综合能力提升平台。

肆、体验式场馆服务职安健人才培养的设计策略

职安健专业人才与普通工人的培训，其培训目标有着本质区别，怎样用好这类场馆来助力职安健专业人才的培养，是一个值得思考的问题。普通工人的培训目标集中在岗位安全操作技能的习得，追求的是“在特定场景中按规定完成准确动作”；但职安健专业人才不仅要掌握安全操作技能，还得拥有系统性风险评估、安全管理体系构建、安全教育培训策划与实施等综合能力。因此，体验式场馆的功能设计需要围绕“能力进阶”这个核心，对场馆的功能定位、空间布局、内容体系和评价方式做出系统性重构。

一、从基础体验到高阶训练的分层设计

面向职安健人才培养的体验式场馆设计，首先要遵循“分层递进”的核心原则。不同培训受众在知识储备、技能需求和学习目标上存在明显差异，“一刀切”模式必然导致培训效果大打折扣。因此，培训内容要匹配因材施教的理念，遵循“分层递进”的核心原则，采用三层递进式结构，完整覆盖从基础体验到专业训练再到管理能力的全部内容。

基础层面向所有人群，围绕消防逃生、应

急急救等通用安全体验展开，能够帮助体验者建立“安全第一”的基础意识和危机应对能力，是搭建安全素养的起点。

专业层针对特定工种进行定向实操训练，比如高空作业、电气操作、化学品处置、受限空间作业等高风险领域工种。这一层培训要紧密贴合岗位实际，尽可能还原真实作业场景，让工人在进入现场前就把安全规范全部转化成肌肉记忆。比如有限空间作业人员借助专项实训体验，可以系统掌握企业特定的作业票审批与操作流程，深入了解作业过程中的风险点，以及对应的预防与急救措施，最终把标准化规范内化为安全操作本能。

管理层主要面向安全工程师、安全管理人员等职安健专业人才，培养目标应聚焦两大核心能力：一是通过体验式培训提高将理论转化为实践的能力。培训对象需作为“主动体验者”亲身经历高危场景，将抽象的风险评估理论转化为具象的身体记忆，最终能够精准研判风险并制定贴合一线的安全措施。二是“培训设计”能力。专业人才作为“未来培训的设计者”，通过观察学员反应、分析行为数据，学会设计更具针对性的培训方案，成为“会分享、会培训、会改善”的复合型人才。从这两个角度出发，管理层应包含两个维度的培训内容，一是专门针对安全管理人员的风险研判与安全管理等实训内容，二是对于基础层、专业层及其对应群体的培训内容与培训情况的整体把控，空间上二者势必会存在交叉。

中新天津生态城安全体验馆的设计充分体现了“分层分区“的理念。主场馆包含五大展区，其中前三个展区面向公众进行公共安全体验，模拟各类逃生场景、聚焦日常安全隐患，公众可以在此学习并掌握常用的应急与自救方法；“危机现场”展区作为天津市安全生产行政执法实训基地，面向相关从业人员开展粉尘爆炸、有限空间作业等专业类培训项目；而“安全岛”则定位为文化休闲空间，在此举办各类安全文化交流活动，借此为场馆注入持续的社会活力。这种从公共安全体验到专业实训再到文化休闲的完整闭环设计，初步展现了场馆面向不同人群、不同培训目标进行功能分区的可能性。

二、模块化空间布局

体验式场馆通常设有接待导览区、VR/AR沉浸式体验区、实操技能训练区三大功能区，部分有条件的场馆还会设置考核复盘区，利用AI 技术分析培训数据和结果，用于反馈学习成效。此外，依据管理层培训需求，为实现场馆对职安健专业人才风险评估与培训教学能力培养的价值，本文提出在原有基础上可以新增风险研判区、教学观察区两个模块。

风险研判实训区是提高职安健专业人才现场风险评估与管控能力的核心模块，可配备高仿真作业场景沙盘、隐患排查实训设备或风险分级管控电子屏等设备，通过“模拟巡查–识别隐患–分析风险–制定措施”的闭环流程进行系统训练。例如，利用 VR 技术将现实场景叠加虚拟风险点，要求学员在规定时间内找出隐患并选择对应的防控措施；或通过物理沙盘情景模拟教具或数字孪生工厂模型，让学员模拟分析不同工况下的风险等级，并制定相应的管控方案。

教学观察区是为职安健专业人才设计的特色区域，让未来的安全培训师在不干扰体验者的情况下，观察学员的真实反应，深入理解其面对风险时的心理状态和行为方式，从而提高培训方案的针对性。观察区的形式可以结合场地条件与项目特点灵活进行选择，可以采用单向透视玻璃或视频监控实现“远程观察”，也可以在设备旁划出独立区域，实现“就近观察”，原则是在尽可能降低干扰的前提下，为培训师提供观察、分析与反思的空间。

表 1　体验式场馆核心功能区一览表

功能区名称	设置目标	培训内容与形式	功能优势
接待导览区	入口引导、信息登记、安全知识普及。	互动设备、导览系统、安全文化展墙。	建立心理准备，强化安全意识。
VR/AR 沉浸式体验区	零风险感受事故后果，形成风险认知。	高空坠落、触电等 VR 场景，可定制课件。	场景宏大、安全可控，成本低。
实操技能训练区	强化规范化技能，形成肌肉记忆。	PPE 穿戴、灭火器使用等实操项目，可设置与 VR 形式互补的实体项目。	真实度高，身体感知强，形成本能反应。
考核复盘区	量化评估培训效果，给出合理建议。	理论测试、实操考核、AI 智能分析。	数据驱动，精准定位薄弱环节
风险研判实训区	培养系统性风险评估与管控能力。	沙盘模拟、隐患排查训练，完成“识别–分析–制定措施”闭环训练。	从被动体验到主动管控，提升高阶决策能力。
教学观察区	培养安全培训师的观察、分析与教学能力。	单向玻璃或视频监控，观察学员反应，分析行为模式。	不干扰体验者，为培训设计提供真实依据。

三、技术与内容的可扩展性设计

安全体验场馆的相关规定与培训内容一直处于动态更新中。目前政策层面的标准体系还不够完善，更新速度也相对滞后，而市场层面不断涌现新的创新成果，技术与产品迭代迅速。体验式场馆必须预留充足的技术与内容扩展空间，才能避免“建成即落后”的尴尬局面。

某钢铁集团安全文化中心的实践为此提供了直接参考。其培训内容从早期的电气、起重、机械伤害等基础训练起步，逐步扩展至机械伤害、安全防护、高处作业等 9 个实训区。此后，场馆在原有基础上进行了全面升级与扩容，根据自身生产工艺特点，进一步定制开发了直接由生产设备改造而来的部分培训设备与 VR 课件。这种“先建核心、分期扩展”的建设路径，正是“可扩展性”设计理念的体现。

硬件层面，建设初期应规划标准化数据接口与物联网接入协议，支持新设备（如智能穿戴设备、新一代 VR 头显、动感平台等）的快速接入，核心机房也要预留一定的供电与网络容量，为后续设备更新提供基础保障，持续提升内容吸引力。内容层面，不同行业、不同岗位的安全风险差异明显，因此建议采用模块化架构，有条件的可以预留一定空间，便于后期补充、灵活组合各个体验模块。时效层面，应及时把政府与企业的新规定与真实事故案例转化为培训内容，鼓励企业提交未公开的事故细节，经脱敏处理后开发成培训案例。综上所述，借助这套“接口+模块+更新”三位一体的可拓展性设计，可以保障场馆持续满足不断变化的培训需求。

四、数据驱动的培训评估体系

智能化的体验式场馆能够自动记录操作者的操作轨迹、反应时间、错误次数等关键数据，对培训效果进行从知识掌握、技能熟练度到行为转化的数据化评估。系统自动生成的可视化评分报告与个性化改进建议，使培训管理形成“评估–反馈–提升”的闭环。在团队层面，系统可生成班组安全热力图，识别高风险人群与高频错误模式，为企业优化安全管理提供数据支撑，推动培训管理从“经验驱动”向“数据驱动”转变。

培训管理人员可以借助系统生成的数据提升判断的精准度，设计更具实用性的评估模板与改进建议书。系统基于最终的分析结果自动推送针对性的训练建议，形成“发现短板–推送训练–再次评估–持续提升”的闭环机制，确保每一次培训都能带来真实的能力进阶。此外，通过数据融合与多维分析，还能够识别高频风险场景的共性特征与体验者的能力短板，从而实现管理升级。

伍、结　语

现有的体验式安全培训场馆，在功能设计上大多围绕一线工人的岗位技能训练展开，而对职安健专业人才所需的系统性风险评估、安全管理体系构建及培训方案策划等专业能力的支撑明显不足。因此，本文提出面向专业人才培养的体验式场馆设计思路，目的是促进场馆功能定位提升至综合性“能力进阶平台”。

但是，要达成这一目标，还有不少基础性空白亟待填补。目前，专门服务职安健人才培养的体验式培训教材、课程体系以及配套设备不够完善，如果能将这些内容进行系统开发与效果验证，补齐现有短板，体验式培训就有望解决当前职安健人才培养体系里“理论和实践脱节”的结构性问题，也能为缓解行业人才供给不足提供一条切实可行的实践路径。

参考文献

［1］ 雷・普雷斯特, 克莱尔・梅耶, 张微明（2022）, 如何设计一个效果持久的安全培训, 现代职业安全, 第 12 期, 22–24 页。

［2］ 彭红, 崔西勇, 郑昀, 等（2026）, 我国职业健康专业人才队伍建设现状与展望, 工业卫生与职业病, 第 52 卷, 第 3 期, 193–196 页。

［3］ 曹媛媛, 吴小娟, 刘想, 等（2025）, 健康中国背景下职业健康安全技术专业人才培养路径探索——以镇江市高等专科学校为例, 产业与科技论坛, 第 24 卷, 第 17 期, 142–144 页。

［4］ 苏晓（2023）, “经验之塔”理论在设计类专业课程教学中的应用研究, 上海包装, 第 1 期, 220–222 页。

［5］ 李四清, 李晓东, 闫令宁, 等（2022）, 生产经营单位安全体感培训的创新与实践, 科技风, 第 21 期, 151–153 页。

［6］ 北京市住房和城乡建设委员会, 北京市市场监督管理局（2022）, DB11/T 1976–2022 建筑施工安全体验技术规程, 第 1 版, 北京。

［7］ 李迪, 齐书慧, 赵汗青（2021）, 培养复合型人才保障职业安全与健康, 现代交际, 第 18 期, 188–190 页。

［8］ 魏玉林, 李四清, 胡杰, 等（2025）, 岗位安全风险辨识描述工作体系构建及应用研究, 产业与科技论坛, 第 24 卷, 第 16 期, 42–44 页。

香港強制性基本安全訓練（平安卡）課程改革研究

廖家俊
香港執業安全師學會

摘　要：強制性基本安全訓練課程（平安卡）作為香港建造業、貨櫃業從業人員入職必備培訓，是基層工地安全管理的基礎制度。隨著建造工藝、智能機械設備普及，傳統平安卡課程暴露內容陳舊、實操不足、考核單一等缺陷，難以應對現場高風險作業需求，改革優化已成行業共識。本文分四大模塊展開研究：首先梳理傳統平安卡課程的起源、培訓時數、受訓群體與課程內容短板；其次對比澳門建築業職安卡及廣東省建築工人安全初級培訓的制度差異與優勢；第三提出課程全方位改革建議，包含內容重組、延長培訓時數、政府統一考核、業界共研課綱四大核心舉措；最後總結改革路徑，主張結合香港本地法例，融合澳門、內地培訓制度長處，建構務實、高效、具公信力的新型強制性安全培訓體系。

關鍵詞：平安卡；建造業；職安健；強制安全培訓；區域對比；課程改革

一、傳統強制性基本安全訓練（平安卡）課程體系梳理

1.1　課程實施起源與法定依據

香港平安卡全稱《建造業安全訓練證明書》，法定名為強制性基本安全訓練課程，依據《工廠及工業經營條例》（第 59 章）於 2001 年 5 月 1 日正式強制推行。立法初衷是解決九十年代建造業工業意外高企的問題，規定所有進入地盤執行建造、貨櫃處理作業的人員，必須完成課程並持有有效平安卡方可開工，無證從事工地作業屬違法行為，僱主及僱員均需承擔法律責任。

課程監管主體為勞工處，所有培訓機構必須申請並取得勞工處批准，持有認可資格方可開班，包括香港建造學院、職業安全健康局、各類進修中心、各大職安健培訓會、民間訓練機構等。平安卡證書有效期為三年，到期前需完成 3.5 小時續證複修課程更新資格，維持從業合法性。

1.2　培訓時數規範與執行情況

現行全新平安卡課程標準授課時數為 7.5 小時，當中包含理論講解、短片觀摩、防墮裝置/安全帽/體力處理操作實習、筆試四大環節。時數分配大致如下：

	教學類別	分鐘
1.	法例條文講解、工地危險類型、防護基礎知識、短片觀摩	270 分鐘
2.	緊急應變	25 分鐘
3.	防墮裝置/安全帽/體力處理操作實習	80 分鐘
4.	小休	30 分鐘
5.	課程總結	5 分鐘
6.	筆試考核、試後複習	40 分鐘
	總時數	450 分鐘（7.5 小時）

從業界執行層面觀察，多數培訓機構壓縮危險案例或沒有更新案例、現場應急教學缺乏，過度傾向法例文字解讀，實務內容佔比極低。續證課程僅 3.5 小時，內容重複度高，無法跟進近年新型施工風險。

1.3 目標受訓群體界定

法定強制參加訓練對象分兩大產業板塊，覆蓋建造業與貨櫃物流業全體從業者，無學歷要求、工種門檻，僅要求年滿 18 歲且可合法在港工作：

1．建造業全體人員：地盤雜工、指定工種人員（包括：紮鐵、泥水、棚架、吊船、機械操作、裝修維修等 70 個工種）、管工、工程師、項目經理等，任何需進入建築地盤、維修工地的人員；

2．貨櫃處理行業從業者：碼頭貨櫃搬運、堆疊、裝卸、貨櫃維修人員；

3．豁免群體僅限專業團體/學會會員，例如：香港工程師學會會員、香港執業安全師學會會員等持高階資格人士。

制度設計初衷是實現「全員覆蓋、入職必訓」，但受時數限制，課程僅能傳授通用基礎知識，無法針對不同工種、不同資歷、不同人群差異化教學。

1.4 傳統課程核心內容與內在短板

1.4.1 現行標準課綱重點

香港勞工處統一規範的課程內容分六大板塊，以文字理論教學為主：

1．職安健基礎理念、意外預防基本原則；

2．《工廠及工業經營條例》全套附屬規例、僱主與僱員法定責任；

3．工地常見潛在危險：高處工作、挖掘、電力、起重、化學品風險；

4．個人防護裝備（PPE）分類與基本使用規範；

5．棚架、梯子、臨時工作台通用安全守則；

6．意外呈報流程、簡單緊急應變基礎概念。

1.4.2 課程體系深層缺陷

結合近年工地意外數據與培訓觀察，舊制課程存在四大核心矛盾，亦是改革的核心驅動因素：

第一，內容嚴重滯後，脫離現場新型工藝。課綱自 2001 年推行後，只在 2011 年、2012、2014、2015、2017 及 2023 年局部修改，長期沒有大幅更新，未納入玻璃幕牆機械人清洗、密閉空間自動化設備、吊船智能監控、環保建築新材料、建築信息模擬（BIM）、組裝合成建築法（MIC）、製造和組裝設計（DfMA）等當下普及作業場景，學員完成培訓後無法識別新型設備隱藏風險。

第二，法例內容佔比過高，實務教學空間被擠佔。超過 6 成時數用於解讀法律條文、罰則細節，基層工人難以理解抽象法律文字，對實際自救、風險辨識能力提升有限。

第三，完全缺失系統實操訓練。全程大量文字、僅靠有限圖片、短片提示、應急處理偏低，單靠個人認知，學員無親身操作機會，遇突發事故時無法靈活運用知識。

第四，考核形式單一、公信力不足。現行考試由開班培訓機構根據勞工處當天指定的試卷進行考試、然後自主改卷，部分機構存在放水、考前洩題、未完成課程直接參考等違規情況，勞工處曾多次撤銷違規機構認可資格，反映自主考核制度存在舞弊漏洞。

第五，無分級培訓機制，一體化課程無法匹配所有從業人員，一般工人、指定工種工人、管工、工程師、項目經理、安全督導員及註冊安全主任等，而吊運工、高空作業人員等高風險工種的差異化亦得不到合理需求。所以，一般前線工人與中高層管理人員應該劃分。中高層管理人員應加重安全管理的知識，如何事前規劃、協調佈局，將安全與生產同時投入，而不是單純學習基本安全概念。再者，安全從業人員應該加深學習不同的安全知識，而不是盲目地每三年上一次基礎安全課程。

二、鄰近地區建造業強制安全培訓制度對比分析

本部分選取澳門特別行政區、廣東省兩大緊鄰地區的強制入職安全培訓制度，從立法架

構、課程設計、考核模式、行業參與度四維度對比，提取可供香港平安卡改革借鑒的制度優勢。

2.1 澳門建築業職安卡培訓制度

澳門法定強制證書為《建築業職安卡》，依據第 3/2014 號法律《建築業職安卡制度》推行，2014 年立法強制所有地盤從業者持證上崗，證書有效期 5 年，制度設計具兩大特色：

1．政府統一考試體制

培訓及資格考試由澳門特別行政區勞工事務局統一舉辦，課程內容包括法例法規、安全基本知識及個人保護裝備實習等等...而考核使用筆試或口試。整個課程由培訓到考試，全程由澳門特別行政區勞工事務局負責，徹底杜絕認可培訓機構（註：香港培訓制度）在考試上帶來的舞弊問題，公信力更高。

2．課程實務導向，法例內容精簡

課程時數 6 小時，包括建築業職安健法例、地盤安全基本知識及個人防護裝備實習；同時設立分項進階訓練，例如高空、密閉空間、起重作業、電力操作等單獨專項進階課程，與基礎職安卡形成分級培訓體系。

2.2 廣東省建築施工人員初級安全培訓（平安卡）制度

內地廣東省實行《建築施工特種作業人員安全培訓考核管理規定》，所有建築工地普工必須完成初級安全培訓並取得上崗證，制度優勢集中在實操教學與動態更新機制：

1．強制配置實操課時

初級培訓總時數 8 小時，其中實操模擬佔大約 3 小時，培訓場所必須配備安全帽、安全帶、臨時棚架模擬裝置、滅火設備等教具，學員需親自完成穿戴、檢查、應急動作考核方可合格，解決香港平安卡少實操的痛點。

2．建立年度課綱更新機制

廣東省住建廳每年結合全省工傷事故統計數據，調整培訓重點，近年新增建築機械人、高層幕牆維護、地下管網密閉空間作業等新章節，課程內容與建築技術發展同步。

3．政企行業聯合研發教材

住建部門牽頭，聯合本地建築企業、安全協會、職校共同編寫培訓教材，大量採用地盤真實事故視頻、現場圖片作教學素材，減少純法律條文講解。

2.3 三地制度綜合對比與借鑒總結

表一

維度	香港 平安卡	澳門 建築職安卡	廣東 初級建築安全培訓	可借鑒亮點
考核主體	培訓機構自主考核	政府統一公開考試	住建部門統一考核	參考澳門、內地，改為勞工處獨立統一考試
實操時數	80 分鐘，僅理論演示	基礎實操	3 小時強制實操	增加平安卡實操訓練環節，延長總課時
課綱更新機制	長期固定，多年不更新	由勞工事務局定期更新	每年依意外數據調整	建立年度課程檢討更新機制，吸納業界意見
法例內容佔比	大約 60%	/	大約 20%	精簡繁瑣條文講解，加重實務教學比重
分級培訓	無分級，單一課程	基礎、額外專項課程	初級證+特種工進階證	搭建基礎平安卡+工種專項分級培訓體系

綜合對比可見，香港現行平安卡制度的核心短板恰好是澳門與廣東培訓體系的優勢：政府獨立考核、強制實操時段、行業共研課綱、動態更新教學內容。在改革設計中，可吸納兩地經驗，同時兼容香港本地《工廠及工業經營條例》法定框架，避免直接照搬產生法律衝

突。

三、香港平安卡課程全方位改革優化建議

結合前文課程短板與鄰近地區成熟經驗，本部分從課程內容重組、培訓時數調整、考核制度革新、行業參與機制四大維度提出具體可落地改革方案，核心目標是提升培訓實效、強化考核公信力、匹配現場基層作業真實需求。

3.1 課程內容重組：刪減冗長法例，強化實務與新型風險教學

3.1.1 精簡法律條文教學比重

現行課程過度側重條文逐字解讀，基層工人吸收效率低下。改革後將法例相關內容佔比由 6 成降至 2 成，教學重點從「法律文字背誦」轉向「工人實際權益、違規帶來的自身傷害後果」，刪除與前線工人無直接關聯的企業管理層責任細則，僅保留僱員必須遵守的核心法定義務、應急及意外呈報流程兩大模塊，釋放時間用於實務訓練。

3.1.2 新增現代建造業高風險作業模塊，同步更新課綱

設立年度課綱檢討機制，每年由勞工處聯合建造業議會、職業安全健康局、安全專業學會、安全人員工會，整理全年致命、嚴重工傷案例，將新興作業風險納入課程，重點新增三大章節：

1．智能機械設備安全：外牆清洗機械人、密閉空間管道清洗機械、吊船自動監控設備、無人機的操作風險、檢查要點；

2．密閉空間、高空幕牆維護專項防護：模擬有限空間氣體檢測、全身式安全帶掛點選擇、防墮裝置使用；

3．突發應急實戰內容：地盤火災疏散及逃生、高處墮下傷者初步處理、化學品洩漏應急隔離，取代過往單純文字應急理論。

3.1.3 區分通用基礎內容與工種差異化內容，搭建分級培訓

1．基礎平安卡（必修）：所有從業人員通用內容，覆蓋基礎危險辨識、PPE 正確穿戴、通用應急常識；

2．高風險工種附加單元（選修、進階）：吊運、密閉空間、棚架、機械操作工人，完成基礎卡後需加修對應專項模塊，方可從事高風險工序，實現分級管控，彌補舊制一體化課程的局限性。

3.2 延長總培訓時數，劃定理論+強制實操時段

將全新平安卡總授課時數由 7.5 小時提升至 10 小時，拆分為法規最多 2 小時、安全知識理論 4 小時、實操 4 小時，分一日半完成，時數科學分配如下：

1．理論 6 小時：法例基礎 2 小時、傳統工地通用風險 2.5 小時、新型機械與高風險工藝 1.5 小時；

2．實操 4 小時（強制不可刪減）：

–PPE 實操：安全帽、安全帶、防毒面罩正確穿戴、檢查、掛點測試；

–應急模擬：滅火器材使用、傷者固定與簡單急救；

–危險辨識互動：現場事故圖片、短片分組討論，識別潛在風險並提出改善方法。

續證課程同步調整，由 3.5 小時提升至 5 小時，當中包含 1.5 小時新型風險實操複習，解決舊制續證課程內容陳舊、無更新知識的問題。同時勞工處增設培訓場所檢查標準，要求所有認可機構必須配備實操模擬教具，不達標者撤銷開班資格。

3.3 參考運輸署、海事處模式，設立政府獨立統一考核制度

現行培訓、出卷、閱卷、發證全流程由民間機構包辦，存在嚴重監管漏洞，參考香港運輸署駕駛執照、海事處船員證考核的成熟體制，分三步改革考核機制：

1．分離培訓與考試主體：民間認可機構僅負責授課教學，所有資格考核統一由勞工處獨

立組織，設立專屬考試中心，全港設置不同考點，學員完成課程後自行預約政府公開考試；

2．考核形式分筆試+實操兩部分：

–筆試：勞工處建立標準試題庫，隨機抽題，全程閉卷電腦考試，獨立監考，杜絕洩題；

–實操考核：現場測試 PPE 穿戴、簡單應急動作，考核員由勞工處直屬職安健主任擔任；兩項考核同時合格方可獲發平安卡；

3．完善考試監管與復核機制：設立考試監控錄像、成績復核申請渠道，對舞弊學員實施 1－3 年禁考處分，大幅提升證書公信力，從源頭解決「有證無能」的培訓失效問題。

3.4 開放行業參與渠道，建立業界共研課程機制

為確保課程內容貼近前線實際運作，建立常態化行業諮詢與課綱共創機制，具體措施分三項：

1．設立平安卡課程諮詢委員會：委員包含建造業工會、承建商商會、安全專業學會、地盤前線監督、特種工種代表、勞工處官員，每半年召開一次會議，收集地盤一線培訓痛點、新型作業風險資訊；

2．開放教材素材徵集渠道：向全港建造業從業者、安全從業員徵集真實工地意外案例、不安全作業相片及影像，經諮詢委員會審核後納入官方教材，讓課程內容來自業界、服務業界；

3．培訓導師資格評審引入業界代表：勞工處審核平安卡導師資格時，邀請資深註冊安全審核員、職安局及建造業議會課程主任參與面試，確保導師具備真實地盤經驗，而非僅掌握理論文字，提升教學實務性。

四、總結：融合本地法例與區域優勢，建構新型平安卡培訓體系

香港強制性基本安全訓練（平安卡）推行至今二十餘年，曾為建造業基層安全意識普及帶來重大貢獻，但伴隨建造工藝、智能安全設備迭代，舊有課程體系在時數分配、內容設計、考核監管、行業參與四大層面已無法匹配當下工地安全管理需求，改革勢在必行。

透過對澳門建築業職安卡、廣東省初級建築安全培訓的制度對比可見，兩地成熟制度的核心優勢集中在政府獨立考核、強制實操教學、行業動態參與課程更新，這恰好彌補香港現行平安卡的核心短板。本研究提出的改革方案，並非直接照搬鄰近地區制度，而是以香港《工廠及工業經營條例》法定框架為基礎，融合兩地培訓制度長處，實現本土化優化：精簡冗長法例教學、延長實操培訓時數、拆分培訓與考核主體、建立業界常態化共研機制，同時搭建基礎平安卡加高風險工種分級培訓架構。

改革落地後，可實現三大核心價值：第一，提升基層工人風險辨識、應急處置實務能力，從源頭降低建造業工傷意外發生率；第二，統一政府考核標準，消除培訓機構自主考核帶來的舞弊漏洞，強化平安卡證書的行業公信力；第三，建立動態更新的課程機制，緊跟新型建造技術、機械設備發展，讓強制安全培訓真正貼合地盤前線運作實況。

長遠而言，優化後的平安卡制度不僅能夠完善香港本地建造業職安健基礎培訓體系，亦可為粵港澳大灣區建造業跨境勞工安全培訓證書提供統一標準、規範、務實的制度基礎，推動整個大灣區建造業安全管理水平整體提升。

參考文獻

［1］ Labour Department – https://www.labour.gov.hk/common/osh/pdf/Part_II_1a_Chi_V4_1.pdf

［2］ Labour Department – https://www.labour.gov.hk/common/osh/pdf/Part_II_1b_Chi_V1.2.pdf

［3］ Transport Departement – https://www.gov.hk/tc/residents/transport/drivinglicense/roadtest.htm

［4］ Marine Department – https://www.mardep.gov.hk/

tc/public-services/examination-guidebooks/index. html

［5］澳門勞工事務局 – https://www. dsal. gov. mo/zh_tw/standard/health_curriculum_card_exam. html

［6］廣東省建築安全協會 – https://www. cisagd. cn/info/105

澳門建造業安全員的創新功能衍生及執行先導培訓與成效

李紹鋒
奧斯建築策劃及工程有限公司

摘　要：澳門建造業伴隨新城填海區、輕軌東線、地下共同管道等大型公共工程持續開展，安全管理從業隊伍伴隨職安健強制法規逐年擴充。安全從業人員核心職能包含現場安全巡視、全工序風險評估、勞工安全培訓、突發事故應急管理，具體工作涵蓋安全操作規程制訂、施工機具設備檢查、安全演練籌辦、工傷事故整改追蹤。

近十年特區政府透過施政規劃引導建造業導入 BIM 建築資訊模型、物聯網監控、無人機低空發展巡檢、穿戴式體感設備、機械人工序使用等創新工具，安全從業人員傳統單純現場監督職能持續衍生全新工作內涵：數字數據解讀、動態風險即時研判、智慧管理系統維護、跨單位技術協調等模塊逐步成為崗位必備能力。

本文以澳門公共建設局、勞工事務局公開政策、本地真實工程案例為基礎，梳理近十年安全從業人員職能衍化進程；結合動態風險評估（DRA）國際學術理論；參照中國內地、新加坡、台灣地區建造業成熟職安健監管與持續教育制度，對比各地制度落地邏輯；最後針對澳門企業安全創新投入、安全人員專業能力升級、政府法規配套完善提出可執行建議，為澳門建造業智慧化職安健體系建構提供理論與實務雙重參考。

標題一　安全從業員現況與十年行業發展

1.1　建造業工程規模與安全人力需求走勢

依澳門土地工務運輸局、公共建設局歷年工程統計資料：2016 年起新城 A 區公共房屋、輕軌線路、地下共同管道、多個大型商住綜合體陸續動工，建造業整體用工規模穩步提升。同期特區陸續更新職安健監管規範，強制所有施工地盤配置專職安全主任與安全督導人員，直接帶動安全從業人力需求持續擴張。

2020 年受全球疫情影響，多項公共工程暫緩開工，安全崗位需求短期收縮；2022 年後大型工程集中復工，持證安全從業人員供不應求，成為行業長期共性痛點。

1.2　安全從業人員結構特徵

2025 年整體特徵行業變化說明年齡分佈，資深從業者占比偏高，2020 年後青年新入行人員逐年增加行業呈現明顯年輕化趨勢，中青年兼具現場經驗與資訊或數字化工具學習能力

學歷分層高中及以下學歷從業者規模大，大專為主體，本科以上佔比建築相關專業大專新人持續增長，低學歷從業者占比明顯收縮行業對複合型技術安全人才門檻持續抬高，持證上崗雖然仍有部分小型地盤存在無證督導情形，持證覆蓋率不足，然而中型建築地盤的安全主任上崗近乎全面覆蓋，無證執勤大幅減少，政府巡查執法加強及務實建議的持續下，行業專業化、制度化程度大大提升不少。

從 2022 年新法成立前，每月最少都與政府部門到地盤巡查檢閱，從初立法階段的定期宣傳。至新法成立初期，可見政府持續監督建議，口頭提示及筆錄意見的數據支持下。從

2024 年的重大工傷事故及危害均有減少的數字，加上崗位專業注冊制度，責任制及法規等監察下，可見新法成效呈現。

標題二　建造業安全創新政策投入與理論基礎

2.1　澳門官方數據建造與安全融合政策

澳門特區政府與勞工事務局加強宣導「科技創新與職業安全管理融合」發展方向。自 2020 年起，大型公共工程要求導入 BIM 建築資訊模型技術。政府透過公建工程導向，引導承建商增加安全投入計劃，鼓勵各承建設置智慧安全監控設備、數字化管理系統、新型安全培訓課程之資源投放。藉以落實加強承建及分包、甚至前線工種的安全教育，獎勵制度及新法刑罰形成鮮明比例，俗語話：『有獎、有罰』。

*BIM Building Information Modeling，中文翻譯為 建築資訊模型

BIM（建築資訊模型）與安全風險分級管控平臺的結合，關鍵在於將傳統的、靜態的二維風險管理，升級為三維、可視、動態的智慧管理。BIM 模型不再只是一張圖紙，而是成為一個承載著所有風險資訊的“數據及數字孿生”載體

澳門建造商會、建築置業商會、工會聯合總會、澳門建築安全協會等各會均配合政府持續舉辦數字化資訊建造交流會，鼓勵民營企業將智慧安全系統納入項目前期成本規劃，資源投入邏輯由早年「出事後補償、被動採購防護用品」，轉變為「事前數據風險管控、主動預防事故」。定期舉辦持續進修計劃、包括安全人員進修課程、專題及特定工作證課程、個案分享及職業衛生安全環保等進修計劃，從持續教育、溫故知新的層級式遞進持教。正正每季度滲透澳門建造業及休企等工作環境及安全環境得到持續優化等里程。

2.2　核心安全管理理論體系

基於「預防為主」的安全管理理論，澳門建造業逐步將資源投入從事後補救轉向事前預防。例如，引入「*動態風險評估模型」，通過實時數據分析預測施工風險。同時，依據「技術賦能理論」，利用物聯網、大數據等技術提升安全監管效率。

容許以下數點作為論據：

2.2.1　預防為主安全管理理論

工業安全管理哲學經歷兩大階段演變：

– 事後治理階段：早期安全管理僅針對已發生事故進行處罰、賠償、整改，屬亡羊補牢式被動應對，缺乏系統前瞻性思維，同類隱患重複發生率高；

– 預防優先階段：二十一世紀全球建立大安全觀，以系統工程整合人、機、料、環、資訊五大要素，建構「風險分級管控、隱患排查糾正」雙重預防機制，透過事前識別、實時監控、閉環整改縮減事故發生機率；搭配長期安全文化培育、周期性技術培訓，實現從被動應對向預警式管控轉型。

2.2.2　動態風險評估 DRA 三級模型

動態風險評估（Dynamic Risk Assessment，DRA）與開工前一次性靜態風險清單存在本質差異，核心定義為：在施工場地環境、工序、作業人員持續變化的條件下，循環開展危害識別、風險評估、風險削減、監測檢討之完整流程。

參考國際安全專家 Dr. Stephen Asbury 與 Edmund Jacobs 合著《Dynamic Risk Assessment：The Practical Guide to Making Risk-Based Decisions with the 3-Level Risk Management Model》，其三級風險管理架構分為：

1．SRA 戰略風險評估：項目開工前宏觀整體風險盤點；

2．PRA 預測性風險評估：單一高危工序開工前專項風險推演；

3．DRA 即時動態評估：施工過程現場條件突變時，快速現場風險判斷與調整管控措施。

Dr. Stephen Asbury 史蒂芬•阿斯伯里博士（生於 1965 年）是國際知名的職業安全、風險管理專家、企業家及暢銷作家。他擁有法學背景，並在職業安全與健康領域貢獻超過 30 年，曾為 Chevron、Coca-Cola 及 McDonald's 等跨國企業提供諮詢服務。

根據 Stephen Asbury 與 Edmund Jacobs 合著的《Dynamic Risk Assessment: The Practical Guide to Making Risk-Based Decisions with the 3-Level Risk Management Model》一書，其核心動態評估理論是一個旨在將風險評估從一項靜態的、一次性的合規活動，轉變為一個持續的、嵌入業務流程的動態管理框架

整套架構形成完整管理閉環，適配澳門輕軌、盾構式地下線段、大型明挖式地下共同管道等環境變化複雜的大型工地，打破過去僅依賴開工前單次靜態評估的剛性管理模式。

本人曾參與地下共同管道的建設，從設計圖則至 BIM 內容，可以更準確有效預見施工過程出現的安全漏洞。舉例：如金屬支撐深層至岩土深度形容的特大存水風險、又如管通結構進行過程與承建交匯處會產生的交接點安全施工的難處及交叉作業產生的高風險危害，並包括大型物料吊運及鋁塑模板交替施工的環節。

而軟件及數字系統資訊提供輔助下可修正優化施工階段的交叉細節，細化加強施工流程，減少高風險及高危害工序的出現。

標題三　創新科技在地應用案例與安全人員職能轉型

澳門公共建設局自 2020 年起，對所有大型公共工程強制實施 BIM 全流程應用，新城 A 區公屋群、輕軌東線、地下共同管道均為標準落地項目：

1．新城 A 區 A 類及 B 類地塊公屋項目：運用 BIM 開展管線、結構碰撞模擬檢查，施工前排除設計衝突，減少現場臨時變更與返工；三維模型標註高空吊裝、基坑臨邊等高風險區域，安全交底直觀易懂，降低勞工理解偏差引發之工安風險，項目曾獲勞工事務局安全施工獎勵計劃獎項。

2．輕軌東線、地下共同管道工程：BIM 模型綁定吊裝、密閉空間、深基坑等高風險工序，風險評估可直接對應模型區塊，縮減多專業團隊協調時間，優化臨時支撐、大型機械包括盾構鑽挖作業安全方案。

無人機、穿戴式監測、密閉空間機器人、吊運及打拆工序機械人應用場景。近年澳門大型工地逐步普及數位監控裝備，作為安全從業人員輔助工具：

1．無人機巡檢：適用高層外牆、基坑邊坡、人工難以抵達之高空區域，替代人員攀爬高危位置巡視，覆蓋傳統人工巡查盲點，及時辨識腳手架變形、防護設施缺失等隱患，新城 A 區地下管道項目常態化運用；

2．穿戴式監測設備：智能安全帽透過 AI 影像辨識偵測未佩戴頭盔、工地吸煙、翻越臨邊防護等違規行為；體徵監測腕帶實時採集高溫作業工人心率、體溫，提前預防中暑突發狀況；

3．密閉空間檢測機器人：地下管廊、污水井等高危密閉空間，優先使用機器人執行氣體濃度、結構穩定性前期檢查、排查，減少人員直接暴露於中毒、坍塌風險。

4．吊運及拆打工序機械人：輕量化吊運型機械人可解決局部未能架設穩固的重型吊運機械，可使用搖控式操作使用建築物使用的吊運物，充分解決沿邊高危操作及盲點下的二次溝通操作。拆打型機械市場上可見小型履帶式或輪胎式地域使用的拆打機械人，配上合適拆打工具，並配以搖控操作使用，減少操作員近距離高危噪音區或污染區的作業環境，更有效地滲入無人區的環境施工。

智慧技術帶動安全人員功能衍化，數位監控設備全面普及後，安全從業人員核心工作內容出現明顯分野：

1．傳統基礎職能：每日全場人工巡視、紙質隱患登記、事故後整改跟進；

2．創新衍生職能：智慧雲平台數據解讀、BIM 風險模塊維護、無人機械巡檢報告分析、現場動態風險即時監察、新型施工技術及工人操作培訓執行。

崗位能力需求新增數字化工具操作如 BIM、工地數據基礎分析、動態風險評估實踐等組合型技術能力。

2025 年本人亦有幸代表澳門建造商會參與澳門勞工事務局與政府聯合部門主辦、澳門各團體協會協辦的 2025 年建築業職安健施工獎勵計劃的評委評審工作。多個大型承建項目，包括澳門輕軌、澳門國際機場擴建及各類經屋項目等。都以 BIM、智慧數字工地系統作為前置式施工環境、安全環境、環境保護等集合質量、安全及環保意念為主要管控。

標題四　鄰近地區職安健制度借鑒（內地、新加坡、台灣地區）

4.1　中國內地：安全人員持續教育與雙重預防機制

中華人民共和國住房和城鄉建設部發布《智慧建造安全管理指南》與各地風險分級管控地方標準，明確兩大核心制度：

1．安全管理人員周期性繼續教育制度，定期更新數據及數字化建造、動態風險評估相關專業知識；

2．全面推行風險分級管控、隱患排查雙重預防機制，建立從項目部到總公司分層級風險管控架構。

澳門參照該制度邏輯，2022 年推出安全從業員持續教育計劃，要求持證安全主任定期修滿規定時數進修課程，課程內容涵蓋新法規、特定工序風險控制、單元項目、各種施工及安全研討會等，改善過往「一證終身、專業知識滯後」的短板。期待更有效地推行持續進修、溫故知新等措施雙管齊下令各行各業的安全文化更加深化。

4.2　新加坡 BCA：數字化安全管理生態體系

新加坡建築局（BCA）推出「Construction 2.0」數字化資訊建造轉型規劃，搭建統一線上安全管理平台，整合風險評估、巡檢記錄、隱患整改閉環、應急資源調度全流程；當地《Workplace Safety and Health（Risk Management）Regulations》強制所有營造項目隨工序變更同步更新動態風險評估文件。

澳門雖然地少人多，區域空間建造有限，並未能大大參考其全域平台化管理思路，但仍有可以借鑑的地方，例如投標案卷增加條文要求達到相關人數佔比的專業年資人員數目、要求必須提交新型有效的施工方案，降本增效之餘，亦可以減少舊派的勞動人力，改為更專業的技能人力。建議搭建或採用智慧型數字雲平台或人工智慧型的數據分析，實現巡查記錄、整改單、培訓檔案線上存檔跟蹤，簡化傳統大量紙質檔案管理負擔，提升隱患整改閉環效率。

4.3　台灣勞動部門：營造業風險分級資源配置機制

台灣地區勞動部門發布《營造業安全衛生風險分級管理辦法》，依項目高度、地下工程長度、橋樑結構等指標劃分風險等級，對超高層、長隧道等高風險工程強制增配專職安全工程師，並加裝專項智能監控設備，依風險等級匹配對應人力與技術資源。

澳門參考分級配置邏輯，針對新城 A 區地下管廊、輕軌隧道、25 層以上超高層建築，於工程招標、政府巡查階段提高安全人員配備數量、智慧監控設備配置要求，高風險項目提升巡查頻次。

標題五　企業與安全人員發展總結及未來建議

5.1　企業推動安全創新之執行啟示

1．數據及數字化資訊安全投入長期價值：

企業應將 BIM、智慧監控系統納入項目前期整體規劃，不單純視為額外成本；透過提前設置風險識別減少現場返工、工傷賠償、停工整改等間接損失，實現安全投入轉化為長期營運效益；

2．落實分級動態風險體系：參考台灣地區、內地分級管控模式，依項目風險等級靈活分配安全人力、監控設備，避免低風險工程資源浪費、高風險工程管控不足；

3．生產協同研發：加強地區學府學院及大學、本地工程學會與建造企業合作，針對澳門工地場地狹小、專業技術員和勞動人口區域多元等的特點，開發適配型智慧安全工具，教育及引進新型施工技術，加速技術在地落實以有效更大化培育技術型人才，減少非專項人員的跨越職能，減少違規操作等人員錯誤等。

5.2 安全從業人員未來功能衍化與能力架構

（一）角色轉型方向

由傳統「現場巡查監督者」升級為專業安全技術角色：動態風險監察及落實人員、數字化數據分析及預案人員、智慧系統運作人員、跨團隊技術培訓執行人員。

（二）四大核心能力模塊

1．技術操作能力：BIM 平台基礎操作、無人機機巡檢作業、智能監控系統日常維護；

2．風險管理能力：LEC/LS 風險矩陣運用、DRA 三級動態風險評估全流程操作；

3．管理協調能力：多施工團隊安全協調、工傷事故源頭調查排查及糾正、突發事件應急指揮、隱患整改閉環控制管理；

4．溝通培訓能力：適配多區域戶籍勞工環境，執行多種語言的安全交底培訓機制、工地安全文化宣導。

5.3 面向政府與行業之政策優化建議

1．法規與考核體系優化：將 BIM 運用、智慧工地操作、動態風險評估等技術內容，納入安全主任資格考試、定期續證繼續教育必修模塊，強制從業人員技術能力定期更新；

2．構建行業共用智慧安全模塊平台：由土地工務運輸局、公共建設局、勞工事務局牽頭，帶動行業商會、社會企業，整合公建、社會及休閒企業生產工程數字化平台管理需求，開放標準化 BIM 安全插件、雲端巡檢系統，降低中小企業技術採購成本；

3．綠色建造與職安健融合：結合澳門碳中和長遠施政目標，推廣太陽能臨時供電、環保輕質防護材料、裝配式構件施工、推行循環再生資源利用，同步研究綠色工法對現場安全的正向效益，實現低碳建造與工地安全雙重目標。

論文總結

2023 年 11 月第 2/2023 號法律《建築業職業安全健康法》正式施行，標誌澳門建造業職安健監管進入全新規範階段。依澳門勞工事務局歷年《工作意外統計分析報告》公開資訊，建造業工傷主要成因集中於高處墜落、物體撞擊、夾刺扭傷三大類，亦是智慧技術、動態風險管控機制重點覆蓋之領域。

近十年透過 BIM、無人機機、穿戴式監測等數據技術在地推廣，搭配中國內地、新加坡、台灣地區成熟職安健制度借鑒，澳門建造業安全管理於理論層面完成從事後補救向前期預控的轉型，安全從業人員崗位職能同步衍生數字化全新工作模塊。

實務層面，新城各區、輕軌各線等大型公共工程透過風險管控體系，有效壓縮高危工序隱患數量；勞工事務局年度巡查數據顯示，存在嚴重違規之工地數量呈逐年下降趨勢，印證「預防為主、科技創新」管理模式符合澳門在建工地環境。

長遠發展觀之，澳門建造業需持續完善安全配套法規、專業技術型安全人員長效培訓機制，推動政府、企業、科研單位三方協同合

作，讓科技與安全從業人員專業能力互補增效，持續壓低建造業工傷風險，推動行業邁向高安全標準可持續發展。

文獻參考摘錄

［1］ 澳門勞工事務局.（2024）.2023 年度工作意外統計分析報告.

［2］ 澳門公共建設局.（2020－2023）.新城 A 區、輕軌東線 BIM 建造技術指引

［3］ Asbury, S., & Jacobs, E.（2015）. Dynamic Risk Assessment：The Practical Guide to Making Risk-Based Decisions with the 3-Level Risk Management Model［M］. Routledge.

［4］ 中華人民共和國住房和城鄉建設部.（2024）.智慧建造安全管理指南.

［5］ 新加坡建築局 BCA.（2023）. Construction 2.0 Digital Transformation Roadmap.

［6］ 新加坡人力部.（2021）. Workplace Safety and Health Risk Management Code of Practice.

［7］ 台灣地區勞動部門.（2025）. 營造業安全衛生風險分級管理辦法

［8］ 澳門建築置業商會.（2024）. 澳門建造發展交流會紀要

［9］ 澳門特別行政區立法會.（2023）. 第 2/2023 號法律《建築業職業安全健康法》

安全人員的定位、思維及知識

李光昇博士
香港軌業安全師協會

摘　要：安全是一門獨立的學科，我們安全人員都有著不可替代的因素，令安全人員須有獨特的思維方式，及須要充分掌握及制定安全的標準。誰主管、誰負責，管生產必須管安全是黃金法則，那麼安全人員和生產人員之間有什麼不同之處？在定位、思維及知識又有什麼分別？既然生產人員必須管安全，那我們安全人員是否沒有了生存的空間？若果他們同時擁有安全的認知，是否可能以安全為主體考慮生產？我們安全人員當了老闆的眼睛，耳朵、鼻子、雙腿和腦袋，去協助老闆去跟進要實現安全的人（包括工人）執行安全要求的情況。通過監督、檢查、督促、指導、教育、培訓、建議、咨詢等一系列方式，以安全為著眼點和角度去解決安全問題，那麼我們須要有什麼定位、思維及知識？

安全體系下的工作者

安全工程技術人員

有沒有想過安全工程技術人員只是一種角色。首先三要素中的第一要素便是「人」，第二要素是「物」，第三要素是關係的實現方式，即「事」。安全工程技術人員是在關係實現方式中的其中一個角色。而關係實現方式有六個角色（包括外在的法規、經濟、管理，還有內在的倫理、教育、文化），當中的管理是外在三要素中的其中一個。但因為安全工程技術人員是從事安全管理環節的人，所以須要掌握如何從安全管理的角度去實現全面安全及與他們發生連繫。安全工程技術人員扮演安全管理的角色，但是必須在整體情況下才可以發揮作用，及要搞清楚如何配合其他方面去完成關鍵任務。

作為安全工程技術人員，我們可以用管理。在管理的同時，要把有關的其他因素都一一列出來，並與他們發生關係。意思就是說要給自己地位。要發揮自己的功能，是離不開其他因素，必須要與其他因素有正確的連繫產生關係，這就可以正確發揮安全工程技術人員的作用。我們並不一個人就能解決問題的，需要其他人的配合。所以在考慮這個問題時必須定好自己的位置，如錢學森老師的一句話：我們必須找到上下左右不同方向的因素及因素之間的關係。在這些領域的地位中找到定位，才能發揮作用。如果沒有定位，便無法與其他人連繫，作用就不容易發揮出來，這些是我們怎樣考慮工作崗位的一個先決條件。

安全管理人員

作為安全管理人員，不可以廣義的管理概念去界定這個崗位，而需要用狹義概念去考慮安全工程技術人員的崗位。因為安全人員不是頂層領導，只是扮演一個角色，而狹義就是具體的工作任務，廣義就是所有的都可以在我們的領導，安全工程技術人員在扮演一個安全管理角色，只是三要素的其中一個要素而已，是外在關係實現方式中的一個要素。安全工程技術人員不是老闆，而是一個具體實現管理的人員，但不是負責法規的人員，亦不是負責經濟

的人員，而是一個負責主體工程領域裡的一個管理要素人員。

安全專業技術人員

具體安全專業技術人員的角色體現在三要素四因素系統的管理要素，有必要將這個概念說清楚。安全管理分成廣義和狹義，老闆的管理是他要安全，他的決策是廣義的管理概念。狹義安全管理就是說要有一個具體實現安全的人員。在這個安全關係實現方式的外在安全系統裡面便是管理。和管理並行的還有法規、經濟，就是條件，有他們自己的角色。從管理的角度看，便是如何應用法規及經濟兩種手段去達至安全為最終目的，即和它們發生了連繫來實現我們的工作。

先要明確自己的崗位就是一個狹義崗位後，便可以開始由局部向整體思考，局部的角色是外在系統內的一個角色，在外在系統的角色裡，首先要把裡面的相關角色的關係搞清楚。搞清楚就是要充分利用相連角色的條件，當條件充分利用好，就可以放大到這個角色。

安全專業人員，是為社會創造財富，為人類的健康服務。要實現安全，就必須要實施安全三要素四因素。把三要素構成一個安全系統，才能達到安全目的。一個人只扮演一個角色，就是安全管理這個角色，真正實現安全工作，不是個人（安全工程技術人員）能完成的，是要給所有其他角色發生連繫，發生關係。可以把個人的角色作為整體角色，成為種種角色的一種，發揮個人（安全工程技術人員）的作用。

在外要利用的條件，就是內在的三要素四因素。這個條件利用好再放大到三要素大的、最外面的那兩個要素，就是人的主體要素，物的客體要素和關係實現方式的輔助要素。為什麼要弄清楚所有要素的關係，就是要用這個邏輯去分析，分析好了再想怎樣搞管理。實現的人是一個主體，要把局部的功能發揮到外面來，扮演好你的角色。如果不能由局部到整體就做不好，與事實不行的。我們雖然在局部，但可以在整體上體現我們的功能，那麼工作就好了。我們是在主體，外在三要素要主體（法規）、客體（經濟）這些社會條件，安全條件是客體，要找出主客體之間的關係。並隨時有方法去處理主客體關係，即關係的實現方式。負責連繫，要平衡的，內在的匹配，可以互補，再提高。要掌握好外在系統，本質的要求，很顯然在大的三要素裡關係實現方式的系統就完成了。就要在大的三要素四因素有所調整，調整整個安全的三要素四因素變成了主體作用。

意思是說，主體作用不可以拖著其他相關因素，但是怎樣將其他相關因素發生連繫？首先將自己局部的連繫搞好，搞好之後功能就等於放大了，是一個大的關係實現方式要素。當大的關係實現方式要素搞好了後，把大系統的三要素調整好，整體的安全就有保証，這樣就可以把局部的提升到整體功能了。這情況就好像京劇中的不同角色，其中丑角就是要連繫各個角色，正如馬戲團中的小丑一樣，都要用作調整關係。管理就相當於小丑，不要小看他叫輔助條件，這個輔助湊合到整體上可以調整個事件，由局部調整到整體。我們必須考慮怎樣可以從局部走到調整，因為整個的動態過程，就靠這個調整。試想想看，從局部的外在輔助調整到整個調整，就是內外調整，內外調整好之後，再調整大的主體和客體，所以輔助可以關係到所有的角色裡面。

安全人員的知識體系

安全人員的知識體系，有縱向和橫向之分。縱向的有安全人體類、安全設備類、安全社會類、安全系統類、安全基礎類。在這 5 個分類，加上分析他的功能，人是一個要素，物是一個要素，關係實現方式是一個要素，方法

就是解決這個問題把三者綜合的一種方法。這四個方面就是三要素四因素的基礎，就形成了安全科學的一個整體。

橫向的有安全哲學、安全基礎科學、安全技術科學，工程技術。

學科科學的本身就分有層次，層次最高的是哲學，之後就是基本規律的科學（基礎科學），技術科學形成了便可以指導解決問題的具體學問，我們工程技術方面的理論，就是技術科學，當我們深入到某個具體情況上或是具體領域裡，就是某某安全的具體問題的解決，這個部分就是應用技術。而剛才說的三個台階，四個層次，就是我們安全學科科學的理論研究，所以就分成了哲學理論，基礎科學理論，基礎技術理論和工程技術理論，這是橫向的層次，縱向的我們安全科學有分支，分支就是物質上的學問，人體上的學問，關係實現方式的學問和系統的學問。如果是培養人的話，就是 5 門科，哲學和技術科學是一門科，下面有 4 方向就是 4 個分支學科，這 5 門科暫時為止並沒有成熟的教材。

安全本身是一門獨立的學科，我們安全人員都有不可替代的因素：

1．安全人員有獨特的思維方式（會以安全為著眼點和角度去解決安全問題）

「要注意：即使生產人員擁有安全的認知，也不可能以安全為主體考慮生產」

2．安全人員是老闆的眼睛、耳朵、咀巴、鼻子、雙腿和腦袋，幫助老闆去跟進要實現/體現安全的人（生產者/工人）執行安全要求的情況。實施的方法順序有監督、檢查、督促、指導、教育、培訓、建議、咨詢

3．安全人員都要充分掌握及制定安全的標準（安全要求）

安全人員的定位

我們首先要為自己定位，才可以開始由局部向整體的思考，局部的角色是外在系統內的一個角色，在外在系統的角色裡，首先要把裡面的相關角色的關係搞清楚。搞清楚就要充分利用相連角色的條件，當條件充分利用好，就放大到這個角色。

試想想看，從局部的外在輔助調整，調整到整個的調整部分，就是內外調整，內外調整好之後，再調整大的主體和客體，所以輔助可以關係到所有的角色裡面。我們的管理功能，是從狹義講的，從整體說，它是決策的。說廣義的話，是我們範疇裡面可以用這個概念。但是我們要講主要的管理工作時候，就不過搞這個的，我們不是老闆，只是其下的一個小角色，但即是有限角色都要發揮到最大的功能，調整整個的安全系統。要想怎樣從一小角色可以從局部調動到整體。

安全的思想方法

有一些安全思想很重要，第一、科學哲學，能把科學哲學上升到安全科學哲學，給科學哲學帶上安全帽，到了這個層次，我們算是成形了。第二、系統科學（方法論）。我們要創建安全系統科學，就要參加研究，希望用三到四年的時間，將一個完整的《安全系統導論》搞出來。

我們要從兩頭展開，哲學及技術科學和方法論，把視野放寬，放寬到科學學範疇。科學學就是把人類所有的科學作為研究對象，形成的學問。安全科學：那裡沒有安全，事實上周圍都有，所以我們只能用科學學內容的大範疇去創建我們的安全科學。我們必須用科學學的框架，傚仿科學學。

我們必須的清晰因素不可能絕對是那一個是有利，那個是有害，而且物的因素會有三個量崗決定，就是物質的種類、質量的大小、作用方式，這三個量綱綜合起來，才能決定這個物質，在這個人及這個狀況下，到底是有益還

是有害。我們以藥物作為例子：營養的東西都可以變成藥醫人但也可以傷人，如人參這些好東西，多食會流鼻血，就不健康。大眾對鴉片的認知是個壞東西，但痛症病人痛到死去活來的時候，就只用這種毒藥。醫生會控制用量，痛的時間就打一針，止痛的效果可以維持在某一個時間內，明顯有益於人體。但為什麼對吸毒的人卻是有害及很難擺脫？這些典型的例子就是說明了一個道理，一種物質對人體有害與否，主要視乎它的種植、劑量及作用方式。當劑量太大時就給毒死。就是說明了，找不到任何物質是絕對有害或是絕對有益，所以要用過這三個量綱去決定，於是就形成了安全專業工作者的根本任務，什麼事情都要有標準，科學的制度標準，是我們安全技術人要把的關。

現在安全專業人員要求的是具專家性的意見，不是隨便一個人。他必須是從安全的角度和安全的著眼點去把關，而需要的物質不可以多，但也不可以少，這個標準在生產者身上是不可能，因為他的專業是生產，於是只好由我們安全專業人員提出設計標準，即安全量。交由生產者去遵守及去實現，這就是為什麼我們安全人員具有的不可替代性。但是到現在，我們這個觀念並不普遍，大家就要就事論事，並未有提升到這個高度。安全專業人員的重大責任，在於我們要制定在什麼情況下要有什麼安全量，什麼是對人類有益，什麼是對人類有害，但不可單純用物質的存在臼與否來決定。所以講什麼有害因素是以工作的，針對具體的質量來說，從量綱的條件下說的，超了不行，少了也不行。因此，我們考慮問題時，必須把人體一分為二，即身心，但這個身心又可以分成兩個方面，第一、身心的需要（廣義）；第二、利用人身心的行為去實現安全（狹義）。在科學上，我們不講大講小，是講廣義和狹義。我們講的安全文化，是為了實現安全的文化，所以我們用的是狹義安全文化。另一個文化的狹義概念就是從倫理到動作之間的連繫，而我們所講的廣義安全文化是人類需要的，人類需要有高的安全素質，安全素質包括了外在給我的保障，和我們本身對物質訊息的應用，就是健康，所有這十幾年從世紀 90 年代到現在，只單純講需要建立安全文化，但什麼是安全文化及如何利用安全文化去解決安全問題卻無人問津及研究。

我們可以借鑒系統科學中的三大塊，即訊息、運籌及控制。安全管理中最重要部份就是掌握對物質方面的運籌，而非物質就靠訊息，這兩者結合起來才構成控制，這個控制就是我們說的關係實施的方式。因此，我們以安全系統來講，就是三要素，從安全的角度把它運作起來，控制就是我們實在安全的目的，它就形成它的功能。

安全系統是系統科學在安全領域的應用，用他的方法論，將系統科學裡的系統理論，應用在安全系統裡，把安全系統看成一種方法去實現安全。所以，安全科學思想來自 3 個組成部分：

第一、科學哲學思想，我們要概括安全科學的哲學思想；

第二、系統科學方法，我們能夠用系統科學來形成我們的安全系統科學方法。

第三、安全科學學，研究的內容是科學學的內容在安全科學裡的應用，也就是安全科學學的內容與框架，從他人的理論變成我們的實踐，就是我們要形成的結果，這個結果就是我們的安全科學。

施工场景滑倒、绊倒与跌倒事故研究现状与发展趋势

方翊臻[1]，文兆铖[1]，李　凡[2]，陈海寿[3]
1. 华南理工大学
2. 香港理工大学
3. 香港城市大学（东莞）

摘　要：施工场景的职业伤害发生率较高，其中滑倒、绊倒与跌倒是主要原因。本研究对建筑业施工场景的滑倒、绊倒与跌倒相关研究进行了综述，并识别其关键影响因素。基于 Web of Science、Scopus 和 PubMed 数据库中 2022－2026 年发表的相关文献开展的文献计量分析表明，自 2022 年以来，该研究领域呈现出显著增长趋势。关键词分析显示，安全管理、风险因素和坠落防护是该领域的主要研究重点。同时，本研究对相关文献进行了范围综述，将影响建筑工人滑倒、绊倒与跌倒的因素归纳为人员因素、任务因素、机械设备因素和管理因素。本研究结果可为安全管理人员制定有针对性的滑倒、绊倒与跌倒事故预防策略提供实践指导。

关键词：施工场景；滑倒；绊倒；跌倒；研究综述

壹、引　言

建筑业是职业伤害和死亡事故高发行业，滑倒、绊倒与跌倒事故是建筑施工安全管理中的重要问题（Schneider，2025）。与一般工作场所相比，建筑工地具有临时性、动态性和复杂性等特点，现场常存在不平整地面、湿滑作业面、材料堆放、交叉作业、照明不足以及高处作业等风险源（Ibrahim，2024）。建筑工人不仅容易发生同平面滑倒和绊倒，也面临脚手架、屋面、梯子和作业平台等场景下的高处坠落风险（Qi，2025）。此类事故可能造成骨折、残疾甚至死亡，同时带来医疗费用、停工损失、生产效率下降和法律责任等经济负担（Lee，2022）。因此，系统梳理建筑工地滑倒、绊倒与跌倒事故的研究进展，并识别其关键影响因素，对于完善施工安全管理和制定预防措施具有重要意义（de las Heras-Rosas，2025）。

贰、研究方法

本研究采用文献计量分析与范围综述相结合的方法，对 2022—2026 年施工场景滑倒、绊倒与跌倒相关研究进行系统分析。文献来源于 Web of Science、Scopus 和 PubMed 数据库，以滑倒、绊倒、跌倒、职业安全健康和建筑施工等相关主题为关键词进行组合检索。文献计量分析主要用于识别发文趋势、主要发文国家和关键词聚类；范围综述则用于归纳事故影响因素、研究局限和未来方向。由两名研究人员独立完成文献筛选和内容提取，分歧通过讨论解决；无法达成一致时，由第三位研究人员裁决。为反映建筑滑倒、绊倒与跌倒事故在研究方法、数字技术和安全管理方面的最新进展，

本研究仅纳入 2022—2026 年发表的文献。初步筛选阶段，仅纳入同行评议期刊论文、综述论文和会议论文，以保证文献质量；评论、图书及书籍章节因缺乏同行评议或方法透明度不足而予以排除。删除重复文献及不符合条件的文献后，共获得发表于 2022—2026 年的 1023 篇文献。随后依据论文题目、摘要和关键词判断是否与施工场景滑倒、绊倒与跌倒事故相关，排除 655 篇无关文献。在阅读全文后，排除 146 篇仅仅涉及一般职业安全或其他风险，而未针对施工场景滑倒、绊倒与跌倒事故开展研究的文献。最终，共 222 篇文献纳入文献计量分析。在文献计量分析基础上，进一步筛选纳入范围综述的文章。具体而言，纳入分析滑倒、绊倒与跌倒事故影响因素的研究，排除仅提及滑倒、绊倒与跌倒事故而未分析其影响因素的研究；纳入以建筑工人为研究对象的研究，排除涉及多个行业或非建筑行业工人的研究；纳入报告实证结果的研究，排除仅提出概念模型而缺乏实证验证的研究。最终，共 39 篇文献纳入范围综述。本研究的文献筛选过程遵循 Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses（PRISMA）报告规范。

叁、结果与讨论

一、文献计量分析

文献计量结果显示，2022—2026 年施工场景滑倒、绊倒与跌倒相关研究发文量总体保持较高水平，但呈现一定的波动趋势。2022 年共发表 54 篇文献，2023 年下降至 43 篇；2024 年略有回升至 45 篇；2025 年进一步增长至 57 篇，为统计期间的最高值，表明该领域研究关注度持续提升。2026 年发表 23 篇文献，但由于统计时间尚未覆盖全年，因此该数据尚不具有年度可比性。

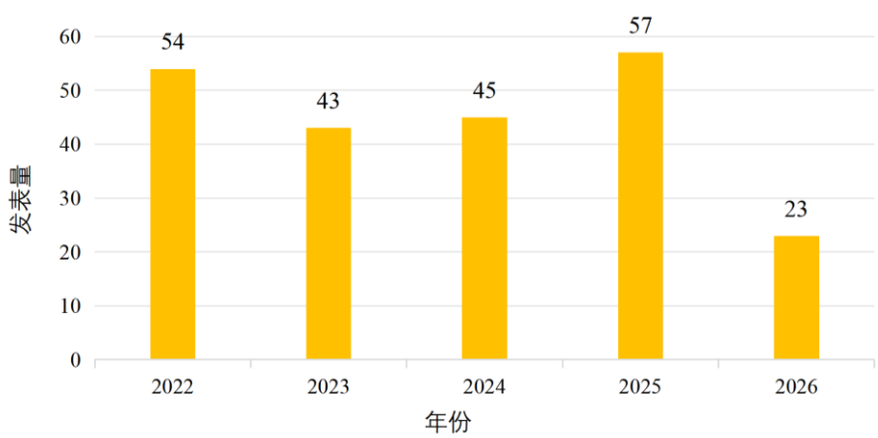


图 1　论文发表趋势图

2022—2026 年施工场景滑倒、绊倒与跌倒相关研究主要集中于亚洲地区，其中中国发文量最多，共 68 篇，显著高于其他国家，表明中国在该领域具有较高的研究活跃度。韩国以 40 篇位居第二，美国以 28 篇位列第三。总体来看，发文主要集中于中国、韩国和美国，反映出这些国家在建筑施工安全与滑倒、绊倒、跌倒风险研究方面处于领先地位。从区域分布来看，亚洲国家占据较大比重，美国、澳大利亚、英国等发达国家也保持较高的研究产出，表明滑倒、绊倒与跌倒风险已成为全球建筑安全领域持续关注的重要议题。

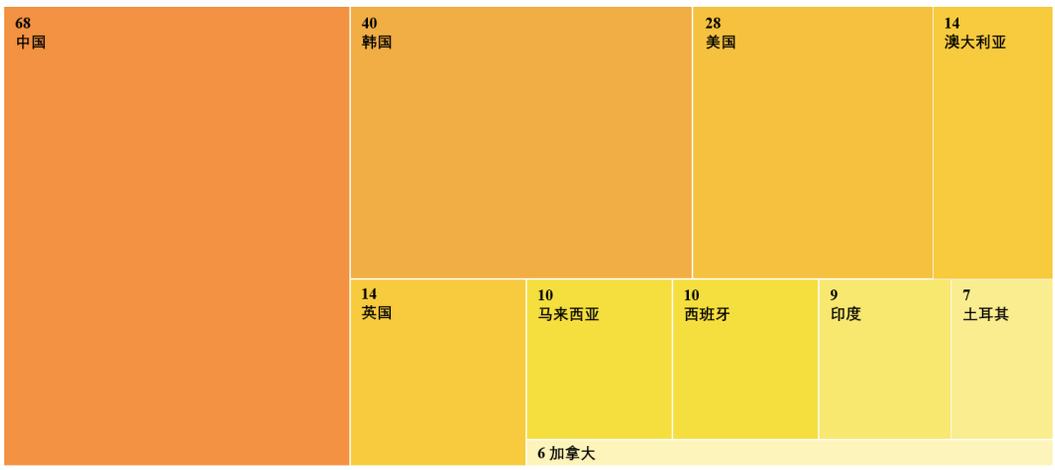


图 2　发文量排名前十的国家

二、范围综述

范围综述发现，建筑工地滑倒、绊倒与跌倒事故并非由单一因素造成，而是人员、任务、机械设备和管理因素共同作用的结果。

（一）人员因素

人员因素是影响建筑工人滑倒、绊倒和跌倒的重要因素，包括人口统计特征、身体状况、职业压力、安全知识、风险感知和不安全行为。

1、人口统计特征

现有研究对人口统计特征与滑倒、绊倒与跌倒事故的关系尚未形成一致结论。一些研究认为年龄和工作经验是重要风险因素（Kaur，2023），而另一些研究认为其预测作用有限（Kayastha and Kisi，2024）。缺乏经验的工人因安全意识和技能不足更容易发生跌倒事故，而经验丰富的工人则可能因过度自信忽视安全规定（Man，2017）。

2、身体状况

良好的身体状况有助于维持姿势稳定，降低复杂施工环境中的跌倒风险；而肌肉力量下降、平衡能力不足及协调性减弱会增加失稳风险。长期高强度劳动引起的腰部和下肢疼痛会削弱身体控制能力（Kayastha and Kisi，2024）。长时间工作和休息不足也会降低注意力、反应速度和身体协调能力，从而增加跌倒风险（Jo and Kim，2024）。

3、职业压力

职业压力是影响施工安全的重要心理因素（张晓玥，2020）。工期紧迫、高工作负荷及复杂施工环境容易导致精神紧张，增加工人的职业压力（Muley，2025）。长期处于压力状态的员工在面对工作环境中突发的跌倒风险时反应迟缓，往往无法及时采取规避措施，导致事故率上升（Zhang，2023）。

4、安全知识

安全知识是识别和控制跌倒危险的重要基础。安全知识不足会削弱建筑工人识别湿滑地面、洞口、边缘及防护缺失等危险源的能力，并影响个人防护装备和防坠落装置的正确使用（Khoshakhlagh，2024）。仅依赖安全制度难以有效降低跌倒事故风险，还需持续开展安全教育和针对性培训，提高工人的安全知识及其实际应用能力（Lestari，2019）。

5、风险感知

风险感知是指个体对危险情境中风险水平的主观判断，涵盖对风险发生概率、潜在后果严重性以及由此产生的情绪反应等（Man，2017）。较高的风险感知促使工人更主动地采取安全措施，从而降低跌倒风险（Li，2019）。

动态的安全监督和有针对性的安全培训能够通过强化危险意识和安全决策能力，进一步增强工人的风险感知（Nguyen，2016）。

6、不安全行为

不安全行为是建筑工人跌倒最直接的致因之一（Fass，2017），主要包括未正确使用个人防护装备和防坠落装置、违规进入危险区域、忽视安全警示以及冒险作业等行为（Ho，2020）。监督不足、安全培训不到位和安全氛围较差都会增加不安全行为发生的可能性（Man，2021）。因此，减少跌倒事故不仅需要纠正违规行为，还应结合安全培训、安全氛围建设等主动安全管理措施，从根本上改善工人的不安全行为。

（二）任务因素

任务因素主要包括作业类型和作业环境，反映施工现场工作特征及环境条件对建筑工人滑倒、绊倒和跌倒风险的影响。

1、作业类型

不同施工任务具有不同的风险特征，其中高处作业是跌倒风险最高的作业类型之一（孟浩蓉，2023）。脚手架、屋面、钢结构、模板安装和梯子作业因存在开放边缘、洞口及高空作业平台，更易发生高处坠落（方俊，2020）。另外，不同施工阶段具有不同的风险特点，结构施工阶段容易发生高处坠落事故（段占立，2018），而装修阶段则更容易因材料堆放、电缆和建筑废弃物引发绊倒事故（Memarian，2022）。

2、作业环境

作业环境是影响建筑工人滑倒、绊倒和跌倒风险的关键因素。湿滑或不平整地面、积水、泥浆及散落材料会降低地面摩擦力并增加跌倒风险（Al Shaaili，2023）。雨雪、强风及高温等恶劣天气不仅改变地面状况，还可能降低工人的身体稳定性，增加跌倒风险（Han，2021）。此外，照明不足也会削弱工人对障碍物、边缘及洞口的识别能力，从而增加跌倒事故发生风险（Sanni-Anibire，2020）。

（三）设备因素

设备因素包括生产设备、防坠落设备和鞋类条件，直接影响建筑工人的滑倒、绊倒和跌倒风险。

1、生产设备

施工设备的性能、维护状况及适用性直接影响跌倒风险（Jonathan and Xiong，2025）.。在适当条件下，生产设备可为施工人员提供稳定的作业基础（Li，2023）。然而，若梯子、脚手架和移动平台等高处作业设备存在结构缺陷、安装不规范或缺乏定期检查，容易导致高处坠落事故（Fass，2017）。

2、防坠落设备

防坠落设备包括安全护栏、安全网、安全带等。研究表明，正确使用防坠落装置能够显著降低高空坠落风险（Choe and Leite，2020）。然而，仅提供防护设备并不能完全避免事故（Ho，2020）。防护装置安装不规范、维护不足、错误使用或未正确连接锚固系统，是导致坠落事故的重要原因（Baszczyński，2022）。

3、鞋类条件

合适的安全鞋能够提高建筑工人的稳定性（Sanni-Anibire，2020）。建筑工人应根据不同作业环境选择合适的鞋类，并及时更换磨损鞋底，以保持足够的防滑性能。较高且柔性的靴筒以及较薄、较硬的中底有助于提高姿势稳定性（Derby，2022）；但在木屋面或沥青瓦屋面等特殊环境中，防滑性能过强反而可能限制移动，影响作业灵活性（Ho，2020）。

（四）管理因素

管理因素主要包括现场整理与清洁、安全监督与检查、安全培训以及安全警示。

1、现场整理与清洁

现场整理与清洁主要指保持通道畅通、及时清理碎屑、废弃物、积水及闲置设备（Sanni-

Anibire，2020）。研究表明，良好的现场整理能够减少地面不平、障碍物和湿滑区域等危险源，从而降低跌倒风险（Brolin，2021）。随着数字技术的发展，自动化异常检测系统通过识别和定位诸如垃圾堆积和积水等易引发跌倒事故的隐患，辅助现场整理和清洁（Sun，2025）。

2、安全监督与检查

持续开展安全监督与检查能够保障设备的规范使用和维护，及时发现并纠正不安全行为及危险环境，降低跌倒风险（Choi，2019）。安全监督已从传统的检查逐步发展为数字化的实时监控系统。近年来，计算机视觉、惯性测量单元、物联网及 AI 边缘摄像机等技术已广泛应用于施工现场安全监督，可实时识别防坠落设备佩戴情况、安全挂钩使用及工人不安全行为（Khan，2023）。

3、安全培训

培训不足是导致建筑业致命坠落事故的重要原因，而针对高风险岗位开展实践性培训能够有效降低滑倒、绊倒和跌倒风险（Man，2024）。此外，安全培训还能改善工人的姿势控制和平衡能力，降低动态作业环境中的失稳风险（Cyma-Wejchenig，2020）。近年来，VR 已成为建筑安全培训的重要工具。通过模拟湿滑地面、高处作业等危险场景，VR 可使工人在无实际风险的环境中开展沉浸式训练，提高危险识别和应急处置能力（Yu，2022）。

4、安全警示

合适的安全警示标志能够降低认知负荷，引导视觉注意力，提高建筑工人的跌倒危险识别能力（Kumar，2024）。然而，长期暴露于固定警示标志容易产生习惯化效应，削弱警示效果（Wang，2025）。基于计算机视觉、混合现实及可穿戴设备的智能预警系统可实时识别跌倒风险，并通过视觉、声音等方式主动提醒工人采取安全措施，具有更强的实时性和针对性（Wu，2022）。

肆、结　论

本研究表明，建筑工地滑倒、绊倒与跌倒事故是多因素耦合作用的结果，人员、任务、机械设备和管理因素共同构成事故风险系统。未来研究应进一步揭示各类影响因素之间的相互作用机制，加强现场实时数据采集和智能预警技术应用，并关注新兴技术在实际工程中的经济性和可操作性。对于施工企业和安全管理人员而言，应建立系统化预防框架，将安全管理贯穿设计、计划、施工和监督全过程，从而有效降低建筑工人滑倒、绊倒与跌倒事故风险。

参考文献

[1] Al Shaaili, M., Al Alawi, M., Ekyalimpa, R., Al Mawli, B., Al-Mamun, A., and Al Shahri, M.（2023）, Near-miss accidents data analysis and knowledge dissemination in water construction projects in Oman, Heliyon, Vol. 9, No. 11, pp. e21607.

[2] Baszczyński, K.（2022）, Effect of safety harness design on the pressures exerted on the user's body in the state of its suspension, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, Vol. 28, No. 3, pp. 1894-1903.

[3] Brolin, K., Lanner, D., and Halldin, P.（2021）, Work-related traumatic brain injury in the construction industry in Sweden and Germany, Safety Science, Vol. 136, pp. 105147.

[4] Choe, S. and Leite, F.（2020）, Transforming inherent safety risk in the construction Industry: A safety risk generation and control model, Safety Science, Vol. 124, pp. 104594.

[5] Choi, S. D., Guo, L., Kim, J., and Xiong, S.（2019）, Comparison of fatal occupational injuries in construction industry in the United States, South Ko-

rea, and China, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 71, pp. 64–74.

[6] Cyma–Wejchenig, M., Tarnas, J., Marciniak, K., and Stemplewski, R. (2020), The influence of proprioceptive training with the use of virtual reality on postural stability of workers working at height, Sensors, Vol. 20, No. 13, pp. 3731.

[7] de las Heras–Rosas, C., Su á rez–Cebador, M., Salguero–Caparr ó s, F., and Rubio–Romero, J. C. (2025), Analysis of the main components precursors of occupational accidents in the construction industry in Spain (2003 – 2022), Safety Science, Vol. 190, pp. 106902.

[8] Derby, H., Chander, H., Kodithuwakku Arachchige, S. N., Turner, A. J., Knight, A. C., Burch, R., Freeman, C., Wade, C., and Garner, J. C. (2022), Occupational footwear design influences biomechanics and physiology of human postural control and fall risk, Applied Sciences, Vol. 13, No. 1, pp. 116.

[9] Fass, S., Yousef, R., Liginlal, D., and Vyas, P. (2017), Understanding causes of fall and struck–by incidents: What differentiates construction safety in the Arabian Gulf region?, Applied Ergonomics, Vol. 58, pp. 515–526.

[10] Han, S. –R., Wei, M., Wu, Z., Duan, S., Chen, X., Yang, J., Borg, M. A., Lin, J., Wu, C., and Xiang, J. (2021), Perceptions of workplace heat exposure and adaption behaviors among Chinese construction workers in the context of climate change, BMC Public Health, Vol. 21, pp. 1–16.

[11] Ho, C., Lee, H. W., and Gambatese, J. A. (2020), Application of Prevention through Design (PtD) to improve the safety of solar installations on small buildings, Safety Science, Vol. 125, pp. 104633.

[12] Ibrahim, A., Nnaji, C., Namian, M., and Shakouri, M. (2024), Evaluating the Impact of Hazard Information on Fieldworkers' Safety Risk Perception, Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 150, No. 3, pp. 04023174.

[13] Jo, D. and Kim, H. (2024), The Influence of Fatigue, Recovery, and Environmental Factors on the Body Stability of Construction Workers, Sensors, Vol. 24, No. 11, pp. 3469.

[14] Jonathan, E. and Xiong, S. (2025), Influence of passive arm–support exoskeleton on static postural balance in load–holding tasks: effects of supportive force, weight and load location, Ergonomics, Vol. 68, No. 4, pp. 588–601.

[15] Kaur, H., Wurzelbacher, S. J., Bushnell, P. T., Bertke, S., Meyers, A. R., Grosch, J. W., Naber, S. J., and Lampl, M. (2023), Occupational Injuries Among Construction Workers by Age and Related Economic Loss: Findings From Ohio Workers' Compensation, USA: 2007 – 2017, Safety and Health at Work, Vol. 14, No. 4, pp. 406–414.

[16] Kayastha, R. and Kisi, K. (2024), Assessing Factors Affecting Fall Accidents among Hispanic Construction Workers: Integrating Safety Insights into BIM for Enhanced Life Cycle Management, Buildings, Vol. 14, No. 9, pp. 3017.

[17] Khan, N., Zaidi, S. F. A., Yang, J., Park, C., and Lee, D. (2023), Construction work–stage–based rule compliance monitoring framework using computer vision (CV) technology, Buildings, Vol. 13, No. 8, pp. 2093.

[18] Khoshakhlagh, A. H., Malakoutikhah, M., Park, J., Kodnoueieh, M. D., Boroujeni, Z. R., Bahrami, M., and Ramezani, F. (2024), Assessing personal protective equipment usage and its correlation with knowledge, attitudes, performance, and safety culture among workers in small and medium–sized enterprises, BMC Public Health, Vol. 24, No. 1, pp. 1987.

[19] Kumar, M., Yaligar, U. S., Rajpradeesh, T., Ravendar, K., Murthy, K. N., and Banerjee, C. (2024),

Identification of Key Factors Influencing Accidents on Construction Sites by Using SPSS, International Journal of Communication Networks and Information Security, Vol. 16, No. 3, pp. 456–462.

[20] Lee, H., Lee, G., Lee, S., and Ahn, C. R. (2022), Assessing exposure to slip, trip, and fall hazards based on abnormal gait patterns predicted from confidence interval estimation, Automation in Construction, Vol. 139, pp. 104253.

[21] Lestari, R. I., Guo, B. H. W., and Goh, Y. M. (2019), Causes, solutions, and adoption barriers of falls from roofs in the Singapore construction industry, Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 145, No. 5, pp. 04019027.

[22] Li, F., Zeng, J., Huang, J., Zhang, J., Chen, Y., Yan, H., Huang, W., Lu, X., and Yip, P. S. (2019), Work-related and non-work-related accident fatal falls in Shanghai and Wuhan, China, Safety Science, Vol. 117, pp. 43–48.

[23] Li, X., Guo, Y., Ge, F.-l., and Yang, F.-q. (2023), Human reliability assessment on building construction work at height: The case of scaffolding work, Safety Science, Vol. 159, pp. 106021.

[24] Man, S., Chan, A. H., and Wong, H. (2017), Risk-taking behaviors of Hong Kong construction workers - A thematic study, Safety Science, Vol. 98, pp. 25–36.

[25] Man, S. S., Chan, A. H. S., Alabdulkarim, S., and Zhang, T. (2021), The effect of personal and organizational factors on the risk-taking behavior of Hong Kong construction workers, Safety Science, Vol. 136, pp. 105155.

[26] Man, S. S., Wen, H., and So, B. C. L. (2024), Are virtual reality applications effective for construction safety training and education? A systematic review and meta-analysis, Journal of Safety Research, Vol. 88, pp. 230–243.

[27] Memarian, B., Brooks, S. B., Le, J. C., and Rivera, J. E. (2022), High-Risk Electrical Tasks & Contributing Work Factors, Professional Safety, Vol. 67, No. 08, pp. 14–20.

[28] Muley, S., Wang, C., Aghazadeh, F., and Bangaru, S. S. (2025), Assessing Construction Near-Miss Detection Proficiency for Workers Under Stressor Conditions Using Psychophysiological Measures: An Eye-Tracking Investigation, Applied Sciences, Vol. 15, No. 3, pp. 1558.

[29] Nguyen, L. D., Tran, D. Q., and Chandrawinata, M. P. (2016), Predicting safety risk of working at heights using Bayesian networks, Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 142, No. 9, pp. 04016041.

[30] Qi, H., Zhou, Z., Manu, P., and Li, N. (2025), Falling risk analysis at workplaces through an accident data-driven approach based upon hybrid artificial intelligence (AI) techniques, Safety Science, Vol. 185, pp. 106814.

[31] Sanni-Anibire, M. O., Mahmoud, A. S., Hassanain, M. A., and Salami, B. A. (2020), A risk assessment approach for enhancing construction safety performance, Safety Science, Vol. 121, pp. 15–29.

[32] Schneider, M., Seeser-Reich, K., Fiedler, A., and Frese, U. (2025), Enhancing Slip, Trip, and Fall Prevention: Real-World Near-Fall Detection with Advanced Machine Learning Technique, Sensors, Vol. 25, No. 5, pp. 1468.

[33] Sun, K., Shao, Z., Goh, Y. M., Tian, J., and Gan, V. J. (2025), Change detection network for construction housekeeping using feature fusion and large vision models, Automation in Construction, Vol. 172, pp. 106038.

[34] Wang, Y., Wang, Y., and Geng, X. (2025), The effectiveness of safety signs on construction sites: A study of key influencing factors and action paths,

Work, Vol. 81, No. 4, pp. 3211–3223.

[35] Wu, S., Hou, L., Zhang, G., and Chen, H.（2022）, Real–time mixed reality–based visual warning for construction workforce safety, Automation in Construction, Vol. 139, pp. 104252.

[36] Yu, W.–D., Wang, K.–C., and Wu, H.–T.（2022）, Empirical Comparison of Learning Effectiveness of Immersive Virtual Reality – Based Safety Training for Novice and Experienced Construction Workers, Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 148, No. 9, pp. 04022078.

[37] Zhang, S., Sunindijo, R. Y., Frimpong, S., and Su, Z.（2023）, Work stressors, coping strategies, and poor mental health in the Chinese construction industry, Safety Science, Vol. 159, pp. 106039.

[38] 段占立，戴建波，李健，梁爽（2018），基于DEMATEL/ISM 的高空坠落事故影响因素研究，价值工程，第 37 卷，第 33 期，212–215 页。

[39] 方俊，胡军，韦卉，陈正福，陈涛（2020），建筑工地高空坠落人因安全风险关键因素识别，武汉理工大学学报（信息与管理工程版），第 42 卷，第 5 期，409–413 页。

[40] 孟浩蓉，许雯，郑克勤，成会荣，毕志梅，施红娟，刘卫，杜雅素，伍福仙，陈杨（2023），2020 年云南省跌倒/坠落伤害的严重程度及影响因素分析，中国健康教育，第 39 卷，第 1 期，12–17 页。

[41] 张晓玥，李钰灵，何树勇，何淑嫦（2020），职业压力与职业伤害模型研究进展，伤害医学（电子版），第 9 卷，第 4 期，54–60 页。

“岗课赛证训”五维融通：五年制高职防灾减灾救灾技术专业人才培养模式探索

宗俊秀，崔炳辉，许曙青，陈章余
江苏联合职业技术学院南京工程分院，南京　211100

摘　要：在“大安全、大应急”框架加速构建背景下，基层防灾减灾救灾技术技能人才供给不足问题日益凸显。五年制高职具有初中起点、学制贯通、技能训练周期长等优势，但新设专业在培养定位、课程体系、实训条件与质量评价等方面仍面临现实困境。文章立足全国首批五年制高职防灾减灾救灾技术专业建设实践，在“岗课赛证”综合育人基础上，结合安全应急类专业能力形成规律，提出并实践“岗课赛证训”五维融通人才培养模式：以“岗”定向，研制“空地协同、全链条应对”岗位能力标准；以“课”筑基，构建模块化课程体系；以“赛证”校验，将竞赛标准与职业证书标准融入教学；以“训”落地，依托农用无人机防灾减灾重点实验室与虚拟仿真实训基地打造“空地协同”实训路径；配套建设跨学科“双师型”教学团队和“四维多元”评价体系，形成闭环式人才培养生态系统，为同类院校提供可借鉴的实践样本。

关键词：五年制高职；防灾减灾救灾技术专业；岗课赛证训；人才培养模式；产教融合

基　金：江苏省职业教育教学改革研究课题《五年制高职安全生产与应急救援虚拟仿真实训基地建设实践研究》（ZDZC154）；2026 年度学院立项研究课题《五年制高职防灾减灾救灾技术专业“岗课赛证训”融通育人模式创新与实践研究》（B/2026/6/001）

1. 问题的提出

随着应急管理体制改革深入推进，“全灾种、大应急”的工作格局加快形成，防灾减灾救灾工作的重心不断向基层下沉。基层是灾害风险防范的第一线和应急处置的主战场，然而当前我国应急管理人才培养长期以本科及以上层次为主，侧重管理决策与科学研究，面向基层一线、熟练掌握实操技能的技术技能人才供给明显不足。2024 年，中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于进一步提升基层应急管理能力的意见》，明确提出支持有条件的高校、职业学校开设应急管理相关学科专业，加强对基层应急管理人员的专业培训。培育一支“留得住、用得上、干得好”的基层防灾减灾救灾技术技能人才队伍，已成为推进应急管理体系和能力现代化的迫切要求。

五年制高职是现代职业教育体系中独具特色的办学形式。石伟平指出，五年制高职通过一体化设计、一体化实施与一体化评价，能够实现高素质技术技能人才在五年时间内的贯通培养；郝云亮、孙书娟认为，五年制高职教育利于把握时间特色，应坚持一体化设计、分层次实施、螺旋式推进，中高职一体化人才培养已成为职业教育体系建设的重要方向。五年制高职学生初中起点、入学年龄小、可塑性强，

五年贯通的学制为技能的长周期训练和职业素养的持续养成提供了时间保障，特别适合培养周期长、技能要求高的专业领域，防灾减灾救灾技术专业正是这样一个典型领域。我校作为全国首批开设防灾减灾救灾技术专业的五年制高职院校，依托教育部教育强国项目“首批孵化的全国省级基层应急管理技术技能人才培养工程示范单位”平台，率先开展了该专业人才培养模式的探索。

作为新设专业，防灾减灾救灾技术专业建设初期面临四个突出问题：一是培养定位不清，容易简单移植本科应急管理专业或三年制高职相关专业的培养方案，缺乏五年制高职辨识度；二是课程体系与岗位需求脱节，课程内容按学科逻辑组织，与基层应急管理工作真实任务相脱节；三是实训条件支撑不足，灾害场景具有高危、不可逆、难再现的特点，传统实训手段难以满足能力训练需要；四是质量评价方式单一，重结果轻过程，缺乏对学生职业适配能力的关注。针对上述问题，本研究提出构建“岗课赛证训”五维融通人才培养模式，探索五年制高职防灾减灾救灾技术专业育人的有效路径。

2. 坚持“大安全、大应急”理念，确立“技术应用与现场管理”并重的培养规格

培养定位是人才培养模式构建的逻辑起点。五年制高职防灾减灾救灾技术专业的培养定位，既不能照搬本科应急管理专业“重管理、轻技能”的学术化取向，也不宜简单套用三年制高职“短平快”的技能训练模式，而应立足五年制高职的学制特点和基层应急管理岗位的用人需求，明确定位于“技术应用与现场管理并重”的复合型技术技能人才：一方面，学生应熟练掌握灾害风险辨识与评估、灾害监测设备操作、基础救援装备使用、无人机灾情侦察等技术技能；另一方面，应具备灾害现场组织协调、安全管控、资源调度等初步的现场管理能力，能够胜任基层应急管理机构和企事业单位安全管理岗位的工作。

同时，“大安全、大应急”理念要求突破传统单一灾种、单一环节的培养局限，构建覆盖“灾前预防—灾中处置—灾后恢复”的全链条能力结构。五年贯通的学制优势为全链条能力的递进养成提供了可能：一、二年级突出知识入门、单项技能与职业认同，三、四年级突出知识关联、专项技能与职业定向，五年级突出综合应用、现场管理与职业发展，形成工学交替、学用互嵌、螺旋递进的能力进阶路径，最终形成具有五年制高职辨识度的人才培养规格。

3. “岗课赛证训”五维融通育人模式的内涵与构建逻辑

3.1 从“岗课赛证”到“岗课赛证训”

“岗课赛证”综合育人强调通过融“岗”“赛”“证”要素于“课”，增强育训融通课程目标与内容的兼容性[6]。已有研究多将实训实践隐含于课程之中，但对于安全应急类专业而言，能力形成高度依赖真实或仿真情境下的反复训练：灾害处置技能无法仅靠课堂讲授习得，必须在接近真实的场景中反复演练，方能形成稳定的岗位胜任力。“训”不是“课”的简单延伸，而是包含虚拟仿真训练、岗位实操训练和综合演练训练三个层次的能力落地环节。将“训”独立出来，既是五年制高职实践教学比重大、技能训练周期长的学制特点使然，也是安全应急类专业“能力必须在场景中落地”的专业规律使然。

3.2 五维融通的内在逻辑

“岗课赛证训”五维融通人才培养模式中，“岗”明确培养方向，“课”承载核心内容，“赛”检验技能水平，“证”对标行业标准，“训”保障能力落地。五个要素不是简单叠加，而是有机融合、相互赋能：以“岗”为逻辑起点，岗位能力标准同时规约课程内容、

竞赛项目、证书标准和实训任务；“课”居于枢纽地位，岗、赛、证、训四要素均通过课程实现转化与落地；“赛”与“证”作为外部标准，反向校验课程与教学质量；“训”作为能力出口，检验并反哺前四个要素。同时，校企协同、双元育人的长效机制贯穿五维融通全过程，行业企业在人才培养方案制定、课程开发、实训指导、质量评价等各环节发挥主体作用，五要素与协同机制共同构成闭环式人才培养生态系统（图 1）。

岗	课	赛	证	训
明确培养方向	承载核心内容	检验技能水平	对标行业标准	保障能力落地
岗为起点·课为枢纽·赛证校验·训为出口——五维有机融合、相互赋能				
校企协同、双元育人：行业企业全过程参与（方案制定—课程开发—实训指导—质量评价）				

图 1　“岗课赛证训”五维融通人才培养模式逻辑框架

4. “岗课赛证训”五维融通育人模式的实践路径

4.1　以“岗”定向：研制“空地协同、全链条应对”岗位能力标准

针对新专业建设初期培养目标宽泛的问题，联合地方应急管理部门、消防救援机构和行业龙头企业，通过实地走访、岗位访谈、技能问卷等方式，系统梳理防灾减灾救灾领域的核心岗位能力要求，构建覆盖灾害风险防控与管理、灾害监测预警技术、灾害现场管理与处置、应急预案与演练管理、应急救援技术应用、灾后恢复与重建管理六大领域的岗位能力矩阵，细化出灾害风险识别与评估、灾害监测设备操作、现场安全管控与防护、基础救援装备操作、灾害损失调查与评估等 19 项核心能力点。在此基础上，融入无人机灾情侦察、无人机物资投送、“生产事故应急救援”赛项技能以及民用无人机操作合格证、应急救护员证等特色能力要求，形成五年制高职防灾减灾救灾技术专业特有的“空地协同、全链条应对”岗位能力标准清单，为课程体系构建提供精准依据。

4.2　以“课”筑基：构建五维融通模块化课程体系

按照“岗位任务课程化、课程内容模块化”的思路，将岗位工作任务转化为课程内容，将技能竞赛标准融入教学项目，将职业证书标准嵌入课程模块，将实训任务与理论教学有机整合，构建“基础平台+专业核心+方向拓展”模块化课程体系。一是岗课融通，以灾害风险排查、应急准备与响应、灾害现场侦察等典型工作过程为逻辑主线重构课程序，破解课程内容与岗位需求脱节问题；二是课证融通，将民用无人机操作合格证、应急救护员证、应急救援员证等证书标准解析为知识技能点，归属到相应课程模块，实现课程学习与证书考核的无缝对接；三是课赛融通，将“生产事故应急救援”等国赛赛项的竞赛内容和评分标准转化为课程项目和考核标准，以赛促学、以赛促教；四是课训一体，专业核心课程全部采用理实一体化教学，配套开发活页式、工作手册式教材和数字化教学资源。

4.3　以“训”落地：校企协同、虚实共建，打造无人机特色实训基地

深度整合学校安全生产与应急救援虚拟仿真实训基地和与孙行者（江苏）数字科技有限公司共建的农用无人机防灾减灾重点实验室，构建“虚拟仿真+岗位实操+综合演练”三位一体的实践教学体系。一方面，针对灾害场景高危、不可逆、难再现的特点，利用虚拟仿真技术开展灾害情景推演、应急指挥模拟等训练，让学生在安全可控的环境中经历完整处置流程；另一方面，以无人机技术为特色突破口，

开发无人机灾情侦察、应急物资投送、灾区现场测绘等 5 个以上典型实训项目，设计“天上无人机侦察、地上人员处置”的“空地协同”综合演练方案，配套实训指导手册、任务工单、操作规范和考核标准，实现特色实训资源向教学的有效转化。在此基础上，依托两大基地构建“教学—实训—培训—竞赛—科普”五位一体综合育人平台：教学环节突出理实一体与防灾减灾课程思政；实训环节开展“无人机+应急”虚实结合技能训练；培训环节面向社会开展无人机飞手、特种作业操作员等技能提升服务；竞赛环节建立梯队培育机制，对接生产事故应急救援、无人机应用技能等赛项；科普环节面向社区和中小学开展防灾减灾宣传与应急体验。平台内部实现资源共享、数据互通、学分积累与协同育人，形成校企双向赋能、人才培养与基层应急需求精准对接的运行机制。

4.4 以“师”为撑：建设跨学科“双师型”教学创新团队

针对防灾减灾救灾技术专业跨工程、管理、信息等多学科的特点，依托学校江苏省职业教育防灾减灾技术专业教师教学创新团队，探索校内专任教师与行业企业专家、一线应急管理人员协同教学的模式。一是结构化组队，按照模块化教学要求，将公共课教师、专业课教师、实习指导教师和企业兼职教师组建成结构化团队，明确课程开发、教学实施、实训指导等职责分工；二是双师共育，落实教师企业实践制度，安排专业教师定期赴应急管理机构和合作企业实践锻炼，同时聘请消防救援机构业务骨干、企业技术专家担任产业导师，参与人才培养方案制定、课程标准开发和实训指导；三是协同教研，围绕无人机实训项目开发、赛证标准转化等任务开展集体备课与联合攻关，提升团队整体的模块化教学设计与实施能力，为五维融通育人模式落地提供师资保障。

4.5 以“评”促改：构建“四维多元”综合评价体系

针对专业首届招生的实际，聚焦教学过程质量，构建涵盖学习过程、学习成果、高阶能力、职业适配四个维度的过程性评价指标体系[14]。其中，学习过程评价侧重课堂参与度、互动协作及实训安全规范；学习成果评价包括理论知识掌握、无人机灾情侦察与物资投送等技能操作水平、虚拟仿真与岗位实操项目成果质量；高阶能力评价考察创造性思维、批判性思维及灾害现场问题解决能力；职业适配评价关注岗位技能匹配度、职业发展规划及适应行业变化的能力。同时，将“生产事故应急救援”赛项表现、民用无人机操作合格证和应急救护员证获取情况、“空地协同”实训任务完成度等特色要素纳入核心指标。在评价方法上，坚持“质性+量化、多维+多元”，依托课堂观察、实训数据采集、阶段测试、学生自评互评和企业导师反馈，形成“教学—评价—反馈—优化”的闭环改进机制，实现从学习表现到岗位胜任的全链条质量监控，保障人才培养初期质量可控、稳步提升。

5. 特色与创新

5.1 率先构建五年制高职防灾减灾救灾专业“全链条”培养理念。

本研究在全国五年制高职领域率先将“大安全、大应急、大减灾”理念系统融入人才培养全过程，突破传统单一技能训练模式，构建覆盖“灾前预防—灾中处置—灾后恢复”的完整培养体系，确立技术应用与现场管理并重的五年制高职特色培养目标，填补了该领域系统性研究的空白。

5.2 以无人机应用为特色抓手，形成“空地协同”实训教学新路径。

研究紧密结合农用无人机防灾减灾重点实验室建设，将无人机技术作为实训教学的特色突破口，开发无人机灾情侦察、物资投送、现

场测绘等典型任务实训项目，实现“天上无人机侦察、地上人员处置”的协同训练，形成区别于同类院校的鲜明特色。

5.3 建立“校企协同、虚实共建”的实训基地建设与运行机制。

研究依托农用无人机防灾减灾重点实验室和安全生产与应急救援虚拟仿真实训基地，形成“实体场景+虚拟仿真”双轮驱动的实训基地功能布局；在运行机制上，建立“双师共育、资源共享、校企共建”的长效机制，形成一套可复制、可推广的防灾减灾救灾领域校企协同育人范式。

6. 结　语

五年制高职防灾减灾救灾技术专业人才培养是一项开创性工作。“岗课赛证训”五维融通人才培养模式立足五年制高职学制特点和安全应急类专业能力形成规律，以岗位能力标准为起点，以模块化课程体系为枢纽，以无人机特色实训为突破口，以“双师型”团队和多元评价为支撑，初步形成了闭环式人才培养生态系统。由于专业首届学生尚未完成完整培养周期，模式的育人成效仍需持续跟踪检验。下一步，将依托教学过程数据积累，对课程体系、实训项目和评价指标进行迭代优化，并适时开展毕业生跟踪调查与用人单位满意度评估，不断完善模式内涵，为同类院校安全应急类专业建设提供可借鉴的实践样本。

参考文献

［1］ 中共中央办公厅，国务院办公厅. 关于进一步提升基层应急管理能力的意见［Z］. 2024.

［2］ 郝云亮，孙书娟. 以中高一体促进能力一体：五年制高职人才培养优势及其实现［J］. 教育视界，2023（15）：5–9.

［3］ 沈中彦，孙丹. 职业院校教师教学创新团队建设：逻辑、成效与未来向度：基于 32 个团队的研究［J］. 职业技术教育，2025，46（02）：54–60.

［4］ 葛俊洁，易俊华. 新时代职业教育教师教学创新团队建设途径研究与实践：以国家级无人机应用技术教师教学创新团队为例［J］. 昆明冶金高等专科学校学报，2024，40（03）：26–30.

［5］ 陈乐冉. 职业院校虚拟仿真实训基地建设探析：以 2022 年度实训基地培育项目典型案例为例［J］. 实验技术与管理，2024，41（10）：227–236.

［6］ 秦国锋，李国帅，杨雯铃，等. “岗课赛证”融通视域下职业教育课程评价：范式转变与多元路径构建［J］. 职教论坛，2023，38（11）：47–54.

［7］ 许世建，徐榕霞，郑琼鸽. 系统观视域下产教融合政策协同的运行机理和实践路向［J］. 职业技术教育，2025，46（04）：45–51.

虚实融合驱动下安全生产与应急救援虚拟仿真实训基地的构建与实践

崔炳辉，宗俊秀，许曙青，陈章余
江苏联合职业技术学院南京工程分院，南京　211135

摘　要：针对当前安全生产与应急救援培训中普遍存在的“高危场景难复现、实训成本高昂、实战风险不可控”等核心痛点，本文深入探讨了基于虚拟仿真技术的实训基地构建路径。研究聚焦于有限空间、建筑坍塌、隐患排查及社区灭火等核心应急救援模块，以及消防、电工、高处作业、制冷空调等特种作业的虚实结合实训体系。通过重构“情境沉浸–决策推演–数据反馈”的教学模式，建立全过程数据画像与量化考核评价机制，本文系统阐述了该基地在教学实践中的应用成效。实证分析表明，该基地不仅显著降低了实训成本与安全风险，更在提升学员应急决策能力、规范操作技能及心理抗压素质方面取得了突破性进展，为新时代应急管理人才培养提供了可复制、可推广的范式。

关键词：安全生产；应急救援；虚拟仿真；实训基地

基　金：江苏省职业教育教学改革研究课题《五年制高职安全生产与应急救援虚拟仿真实训基地建设实践研究》（ZDZC154）；2026 年度学院立项研究课题《五年制高职防灾减灾救灾技术专业“岗课赛证训”融通育人模式创新与实践研究》（B/2026/6/001）

1. 引　言

安全生产是经济社会发展的基石，而应急救援能力则是防范化解重大安全风险、保障人民生命财产安全的最后一道防线。随着工业化进程的加速与城市化的深入，化工、建筑、市政等高危行业的事故形态日益复杂，对应急救援人员的专业素质、协同能力及心理素质提出了前所未有的挑战。然而，传统的安全生产与应急救援培训模式长期受制于客观条件的束缚，难以满足现代化应急体系建设的需求。

当前，主流的培训方式主要依赖“课堂讲授+实地演练”的传统路径。这种模式存在显著的局限性：首先，高危场景难以复现。如有限空间中毒窒息、建筑坍塌掩埋、大型危化品泄漏等极端事故场景，受限于安全规范与资源条件，无法在真实环境中进行高频次、全要素的模拟演练，导致学员缺乏对极端环境的直观认知与处置经验。其次，实训成本高昂且资源消耗大。实地演练往往需要消耗大量专用装备、耗材，且场地搭建与维护成本巨大，难以支撑常态化、全员化的训练需求。再次，试错风险不可控。在真实演练中，操作失误可能导致二次事故或人员受伤，这种“零容错”的环境使得学员在训练初期往往畏手畏脚，难以在实战中形成肌肉记忆与本能反应。

随着人工智能、虚拟现实（VR）、增强现实（AR）及数字孪生技术的迅猛发展，虚拟仿真实训基地应运而生，为破解上述难题提供了全新的技术路径。虚拟仿真技术能够构建高保

真、强交互、可重复的沉浸式训练环境，使学员在“零风险”的前提下体验“真事故”，实现从“被动接受”到“主动探索”、从“单一技能”到“综合决策”的转变。

本文旨在系统阐述安全生产与应急救援虚拟仿真实训基地的构建逻辑与实践路径。不同于以往仅关注技术实现的单一视角，本文重点聚焦于教学模式的深层重构、多行业应用场景的精准适配（涵盖有限空间、建筑坍塌、隐患排查、社区灭火及特种作业等）以及建设成效的科学评估。通过构建一套科学、规范、高效的虚拟实训体系，探索如何利用技术手段赋能应急管理教育，为提升我国安全生产与应急救援整体水平提供理论支撑与实践参考。

2. 教学模式重构：从“经验驱动”向“数据驱动”的转型

虚拟仿真实训基地的核心价值不在于技术的堆砌，而在于其对传统教学模式的颠覆性重构。本文提出构建“情境沉浸–决策推演–数据反馈”的闭环教学模式，实现培训过程的标准化、个性化与智能化。

2.1 构建分层递进的实训体系

传统的培训往往“一刀切”，忽视了学员的基础差异与岗位需求。基于虚拟仿真技术，我们构建了“基础认知—专项技能—综合协同”的三级实训体系，并针对基地内的核心模块进行了精细化设计。

（1）基础认知层。利用 VR 全景漫游技术，让学员身临其境地熟悉作业现场环境、设备布局及危险源分布。例如，在隐患排查演练模块中，学员可“走进”8 大高危场景（如化工装置区、粉尘涉爆场所、涉氨制冷车间等），通过视觉交互识别潜在的安全隐患，解决传统教学中“看不见、摸不着”的难题。

（2）专项技能层。针对特定岗位操作进行精细化训练。在有限空间救援演练模块中，学员需模拟进入受限空间前的气体检测、通风置换、个人防护装备（PPE）穿戴及救援三脚架操作；在建筑坍塌救援演练模块中，重点训练生命探测仪使用、破拆工具操作及伤员搬运技巧。系统通过动作捕捉技术实时监测学员操作规范度，对错误动作进行即时语音提示与视觉纠正，确保技能动作的标准化。

（3）综合协同层。模拟复杂事故场景下的多部门、多工种协同作战。系统支持多人异地接入，学员需扮演指挥员、侦察员、灭火员、医疗员等不同角色，在动态变化的灾害环境中进行通讯联络、战术部署与资源调度。特别是在社区灭火演练模块中，模拟居民楼火灾场景，训练消防队、社区网格员、物业及居民之间的联动机制，培养全局观与协同作战能力。

2.2 创新“虚实结合”的混合教学流程

虚拟仿真并非要完全取代实地演练，而是作为其前置与补充，形成“虚实互补”的混合教学流程。基地内设置的消防设施操作实训室、电工特种作业实训室、高处作业特种作业实训室、制冷与空调特种作业实训室等，均采用“虚拟预演+实物操作”的混合模式。

（1）虚拟预演环节。在接触真实设备前，学员先在虚拟环境中进行多次全流程推演。系统可模拟各种极端变量（如电气短路引发火灾、高处作业平台突然晃动、制冷系统高压泄漏），让学员在低风险环境下试错，优化应急预案，形成初步的战术思路。

（2）实地验环节。携带虚拟训练中形成的方案进入虚实结合的实训室进行验证。例如，在电工特种作业实训室，学员先在虚拟环境中进行电路故障排查逻辑训练，再在实物平台上进行接线与排障操作，系统实时监测电流、电压及操作规范，确保安全。

（3）复盘强化环节。训练结束后，系统自动回放训练全过程，生成多维度的数据报告，帮助教官与学员进行深度复盘，针对薄弱环节

进行针对性强化训练。

2.3 建立全过程数据画像与量化考核评价

传统考核多依赖教官的主观观察与纸质评分，存在标准不一、反馈滞后等问题。虚拟仿真实训基地依托大数据技术，建立了全过程、多维度的量化考核评价体系。

（1）多维度数据采集。系统实时记录学员的操作轨迹、反应时间、决策路径、生理指标（如心率、眼动轨迹）及团队交互数据。

（2）智能评分模型：基于专家规则库与机器学习算法，构建智能评分模型。不仅考核最终结果，更对操作过程的规范性、决策的科学性、协同的流畅性进行实时评分。例如，在有限空间救援中，系统不仅评估是否成功救出人员，还评估学员是否严格执行了“先通风、再检测、后作业”的程序，是否在气体浓度超标时及时撤离。

（3）个性化能力画像：训练结束后，系统自动生成学员的“能力雷达图”，直观展示其在知识储备、操作技能、决策能力、心理素质及团队协作等方面的强弱项，为后续的个性化培训提供数据支撑，真正实现“因材施教”。

3. 多行业应用场景的深度适配

安全生产与应急救援涵盖行业广泛，不同行业的事故机理、处置流程及风险特征差异巨大。本基地通过模块化设计，实现了有限空间、建筑坍塌、隐患排查、社区灭火及特种作业等场景的深度适配。

3.1 有限空间与建筑坍塌救援：高危场景的零风险复现

有限空间事故与建筑坍塌事故具有突发性强、环境恶劣、救援难度大、致死率高等特点，是传统实训的“禁区”。

（1）有限空间救援演练模块。高精度还原污水井、化粪池、地下管廊等典型有限空间环境。系统模拟硫化氢、一氧化碳等有毒有害气体积聚，以及缺氧环境。学员需在虚拟环境中体验中毒窒息、救援人员盲目施救导致伤亡等惨痛后果，强化“严禁盲目施救”的安全意识。同时，模拟救援三脚架、安全绳、呼吸器等装备的复杂操作，训练学员在狭窄空间内的动作协调性。

（2）建筑坍塌救援演练模块：利用物理引擎模拟建筑物在爆炸、地震或施工失误下的坍塌过程，生成复杂的废墟堆叠结构。学员需利用生命探测仪在废墟中搜索幸存者，使用液压剪、扩张器等破拆工具开辟救援通道，并进行伤员固定与搬运。系统可设置余震、二次坍塌等突发变量，考验学员的动态决策能力与心理稳定性。

3.2 隐患排查与社区灭火：从源头治理到末端处置

（1）隐患排查演练模块。内置 8 大高危场景（如涉爆粉尘、涉氨制冷、液氯储存、有限空间、危化品仓库、加油站、烟花爆竹、冶金有色），覆盖主要行业风险点。学员需以“检查员”身份进入场景，通过交互操作识别设备缺陷、管理漏洞及违章行为。系统根据隐患等级、识别准确率及整改建议的合理性进行评分，培养学员的“见微知著”能力。

（2）社区灭火演练模块。针对城市社区高层建筑多、人员密集、疏散困难的特点，构建逼真的居民楼火灾场景。模拟火灾初起、蔓延及失控全过程，训练学员在浓烟、高温环境下的内攻灭火、人员搜救及疏散引导能力。特别强调与社区网格员、物业人员的协同，模拟“第一响应人”机制，提升基层应急处突能力。

3.3 特种作业实训：虚实结合的技能固化

针对消防、电工、高处作业、制冷与空调等特种作业，基地构建了虚实结合的实训室，解决了高危作业“不敢练、练不起”的难题。

（1）消防设施操作实训室：结合 VR 模拟

火灾场景与实物消防栓、水带、灭火器，训练学员在真实火情下的快速出水、控火能力。

（2）电工特种作业实训室：模拟高压触电、电气火灾等事故，学员在虚拟环境中体验触电后果，在实物平台上进行规范接线与排障，杜绝违章操作。

（3）高处作业特种作业实训室：利用高空模拟平台，模拟吊篮作业、脚手架搭建等场景。系统实时监测安全带挂点、防坠器状态，一旦学员出现违章行为（如未系挂安全带），系统立即触发虚拟坠落反馈，强化安全警示。

（4）制冷与空调特种作业实训室：模拟制冷剂泄漏、高压爆裂等风险，训练学员在密闭空间内的设备检修与应急处置能力。

4. 实践教学案例与成效分析

为验证虚拟仿真实训基地的实际效果，本文选取某市应急管理学院作为试点单位，开展了为期一年的对比实验。实验组采用“虚拟仿真+虚实结合”的混合模式，对照组采用传统“课堂+实践”模式，每组各 120 名学员，涵盖消防员、企业安全员及特种作业人员。

4.1 案例一：有限空间救援实战演练

在某化工企业污水池清理事故模拟演练中，实验组学员先在有限空间救援演练模块进行了 3 次全流程虚拟训练。系统模拟了硫化氢浓度超标、通讯中断、救援人员晕倒等极端情况。学员在虚拟环境中经历了“盲目施救导致伤亡”的失败推演，深刻理解了“先通风、再检测、后作业”的铁律。

随后，学员进入虚实结合的实训室进行实操。数据显示，实验组学员在进入受限空间前的气体检测规范率达到 100%，救援装备穿戴平均耗时比对照组快 35%，且在模拟突发气体泄漏时的撤离决策准确率达到 95%。而对照组学员在首次实操中，仍有 15%的人员未严格执行检测程序，且救援配合默契度较低，导致演练超时。

4.2 案例二：建筑坍塌综合救援

在一次模拟高层建筑施工坍塌事故演练中，实验组利用建筑坍塌救援演练模块进行了多轮次战术推演。系统生成了复杂的废墟结构，并设置了余震干扰。学员在虚拟环境中反复练习生命探测、破拆开辟通道及伤员搬运战术，形成了标准化的协同流程。

在随后的综合考核中，实验组学员在废墟中的搜索效率提升了 40%，破拆作业的精准度显著提高，且未发生任何因操作失误导致的“二次伤害”。相比之下，对照组学员在面对复杂废墟结构时显得手足无措，破拆路径选择不当，导致救援时间延长，且出现了 2 起模拟中的“伤员二次受损”事件。

4.3 案例三：特种作业技能考核

在电工特种作业实训室的考核中，实验组学员先在虚拟环境中完成了 20 种常见电气故障的排查训练，系统实时纠正了其接线错误与违章操作。进入实物考核环节后，实验组学员的一次性通过率达到 92%，平均故障排除时间缩短了 28%。而对照组学员由于缺乏在虚拟环境中的试错机会，在实物操作中因紧张导致误操作的比例较高，一次性通过率仅为 76%。

4.4 综合建设成效

通过一年的运行数据对比，该基地在以下方面展现出显著成效：

（1）培训效率显著提升：实验组学员完成同等难度实训课程的平均耗时较对照组缩短了 45%。场景切换由小时级降至秒级，单日训练频次提升 3 倍以上。

（2）技能掌握度与规范性增强：在综合考核中，实验组学员的操作规范度评分平均高出 22 分，应急决策准确率提升 30%。虚拟环境的即时反馈机制有效遏制了不良操作习惯的养成。

（3）心理抗压素质提升：在模拟极端灾害

场景下的心理测试中，实验组学员的心率波动幅度较对照组小 30%，表现出更强的心理稳定性。虚拟环境的高沉浸感有效模拟了实战压力，起到了“脱敏”作用。

（4）成本效益优化：相比传统实建基地，虚拟基地无需消耗大量危化品、燃油及专用耗材，且场地维护成本极低。测算表明，同等规模的实训中心，虚拟基地的建设与运营成本约为传统基地的 60%，长期运行效益显著。

5. 结论与展望

本文系统构建了安全生产与应急救援虚拟仿真实训基地的理论框架与实践路径，重点探讨了教学模式重构、多行业场景适配及建设成效评估。研究表明，虚拟仿真技术通过构建高保真、强交互、可重复的沉浸式环境，有效解决了传统培训中高危场景难复现、成本高、风险大等核心痛点。

通过实施“分层递进”的实训体系、“虚实结合”的教学流程及“数据驱动”的考核评价机制，该基地显著提升了学员的应急决策能力、操作规范性及心理抗压素质，实现了培训效率与质量的双重飞跃。特别是在有限空间、建筑坍塌、隐患排查及特种作业等关键领域的应用，证明了虚拟仿真技术在解决行业特定难题方面的巨大潜力。

然而，虚拟仿真实训基地的建设与发展仍面临一些挑战。例如，部分复杂物理现象（如多相流耦合、结构非线性破坏）的仿真精度仍需进一步提升；多模态交互体验（如触觉、嗅觉）的逼真度有待加强；不同行业间的数据标准与接口规范尚需统一。未来，随着人工智能大模型、数字孪生、脑机接口等前沿技术的进一步融合，虚拟仿真实训基地将向“智能化、个性化、全感官”方向演进。

安全生产与应急救援虚拟仿真实训基地的建设，是应急管理现代化的重要标志。我们应继续深化技术创新与模式探索，推动虚拟仿真技术在更广范围、更深层次的应用，为构建“大安全、大应急”格局提供坚实的人才保障与技术支撑，切实守护人民群众的生命财产安全。

参考文献

［1］ 张华, 李明。基于数字孪生的化工园区应急仿真系统研究 ［J］. 安全与环境学报, 2023, 23（4）: 112–118.

［2］ 王强, 刘伟。虚拟现实技术在矿山应急救援培训中的应用实践 ［J］. 煤炭学报, 2022, 47（8）: 345–352.

［3］ 陈思, 赵刚。混合现实技术在消防实战训练中的效能评估 ［J］. 消防科学与技术, 2024, 43（2）: 88–93.

［4］ 李娜。基于大数据的应急能力画像构建与评价研究 ［J］. 中国安全生产科学技术, 2023, 19（5）: 56–62.

［5］ Smith, J., & Doe, A.（2023）. Virtual Reality in Safety Training: A Meta-Analysis. Journal of Safety Research, 85, 112–125.

北京工业职业技术学院城市安全学院安全应急类专业群建设路径与实践

赵卫强[1、2]，沈　杰[1、2]，张明珠[1、2]
1. 北京工业职业技术学院，北京　100042
2. 中国矿业大学（北京），北京　100083

摘　要：基于构建技能型社会与经济高质量发展的背景，北京工业职业技术学院主动对接首都韧性城市建设与安全应急管理需求，于 2024 年 9 月成立城市安全学院（含安全技术与管理、安全智能监测技术等 4 个专业及北京市电气安全技术研究所）。论文聚焦安全应急类专业群组群逻辑与实训室共享机制，提出“紧扣'一条主线’、搭建'两个平台’、建设'三个基地’、锚定'四个中心’”的建设思路，并从“金专业、金课程、金教材、金师团、金基地”等维度系统构建建设路径，为高职院校安全应急类技术技能型人才培养提供可借鉴的实践范式。

关键词：城市安全，安全应急专业群，技术技能型人才，产教融合，建设路径

“十五”期间，北京工业职业技术学院被评为全国首批八所优秀院校之一，“十三五”期间，被评为北京市“特高”校，之后，教育部公布了一批高水平专业群建设高校，势必会带动我国高职院校专业群建设迈向新的高度。

北京工业职业技术学院积极响应国家号召，主动对接首都韧性城市建设、安全应急管理需求，于 2024 年 9 月成立城市安全学院（二级学院）。学院由“4 个专业+1 个研究所”构成。4 个专业为安全技术与管理、安全智能监测技术、电气自动化技术（电气安全）、无人机应用技术（防灾预警）。其中安全技术与管理专业是学校首批入选的 4 个“国家级示范性重点建设专业”之一，是北京市应急管理局、北京市应急管理科学技术研究院合作专业，本科对接北京建筑大学工程管理专业（一本、有硕士点）。1 个研究所为北京市电气安全技术研究所，是学校和北京市应急管理科学技术研究院共同组建的独立法人事业单位。

一、城市安全学院专业组群建设目标与思路

（一）建设总体目标

建设总体目标：助推北京成为全国超大型城市安全运行示范区，建立安全应急创新产业园，辐射京津冀，带动国内外职业院校同类专业同步发展提升，成为国际安全应急人才培养典范。根据《国家职业教育改革实施方案》、《北京市韧性城市空间专项规划（2022 年—2035 年）、《北京市“十四五”时期安全生产规划》和《关于加强新时代首都高技能人才队伍建设的实施方案》的要求，主动服务北京“十四五”安全生产规划战略，围绕首都城市建设、运行、管理、服务等领域，面向安全生产规划新要求，对接世界水准，坚持以“立德树人”为根本任务，按照“三元协同、双向融合、四线贯通”的人才培养模式，坚持育训结合、长短结合、内外结合的基本原则，创建北

京龙头、全国一流、国际知名的安全技术与管理专业群[1-2, 5-8]。

（二）建设总体思路

1．紧扣“一条主线”

以“首都安全技术与管理高素质技术技能型人才培养”为主线，培养首都安全技术与管理高素质技术技能型人才。根据《关于加强新时代首都高技能人才队伍建设的实施方案》的要求和习近平总书记多次就做好新时代技能人才工作发表的重要讲话、做出的重要指示批示，加快建设首都人才力量，培养造就更多高素质技术技能型人才。

2．搭建“两个平台”

为深入贯彻落实《国务院办公厅关于加快应急产业发展的意见》、《关于深化产教融合的若干意见》等文件精神，搭建城市安全生产产教融合平台和城市智慧应急创新服务平台，见图 1。

（1）城市安全生产产教融合平台。面向首都城市建设、运行、管理、服务等领域，与捷安和新兴合作，实施产教融合、特色发展，助推校企业深度融合。

（2）城市智慧应急创新服务平台。面向智能城市运行过程中面临的安全生产风险，与百度和华为合作，探索应急安全领域产教融合协同机制，增加应急安全领域优质教育资源供给，为城市智慧应急输出高素质安全技能型人才，开展安全培训，提升从业人员安全生产和应急处突和救援实战技能。

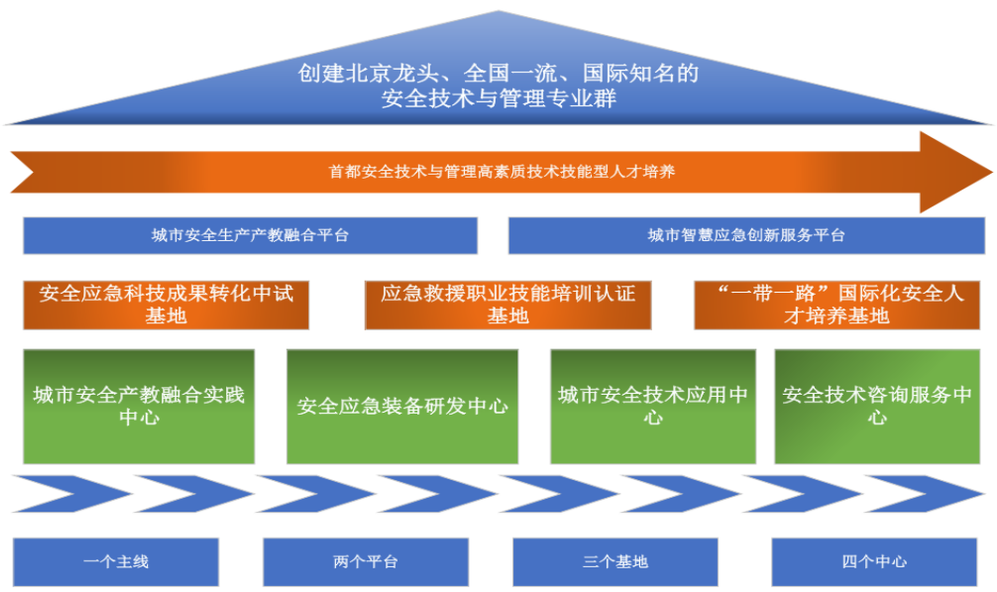


图 1　建设总体思路示意图

3．建设“三个基地”

建成安全应急科技成果转化中试基地、应急救援职业技能培训认证基地和“一带一路”国际化安全人才培养基地。应急救援职业技能培训认证基地：随着首都城市人口密度的增加，安全风险也在加大，给人们的生命财产安全和生活工作秩序造成了严重危害，应急救援人才队伍突显不足，加快首都培养突发事件应急救援处置的技能人才，提高全民的灾害应急能力。“一带一路”国际化安全人才培养基地。服务国家“一带一路”战略：面向沿线国家招收国际学生开展学历教育和安全技术管理培训，面向走出去中资企业开展当地从业人员安全培训，打造“一带一路”国际化安全人才

培养基地。

4．锚定“四个中心”

成立城市安全产教融合实践中心、安全应急装备研发中心、城市安全技术应用中心和安全技术咨询服务中心。

（1）城市安全产教融合实践中心。对标城市安全技术发展前沿，集技能实践教学、社会演练培训、真实安全生产和技术技能服务功能为一体的实践教育中心，更能实现产教融合参与主体的多元化和包容性，更加实现学生参与安全应急过程的共建性和成果的共享性，进而实现产教融合过程中的产业供求匹配属性和切实发挥服务区域经济社会发展的基本功能。

（2）安全应急装备研发中心。负责城市安全应急处置与救援装备设备研究，关键技术与装备设备物资研发、测试与应用示范工作。

（3）城市安全技术应用中心。依据安全应急装备研发中心的研究成果，组织开展城市安全应急装备成果转化及推广工作。

（4）安全技术咨询服务中心。为了落实安全和应急产业发展政策，围绕首都城市建设、运行、管理、服务等领域，开展应急体系建设指导、安全生产标准化、生产安全事故应急预案、隐患排查与治理、风险分级与隐患排查治理、清单制管理、安全培训、安全文化建设等全过程安全技术咨询。

二、城市安全应急类专业群建设路径研究

（一）匹配需求，集聚要素，重点打造全国“城市安全”金专业

培养懂安全、精技术、善操作、能管理的复合型国际化高素质技术技能人才[3]。

1．深化产教融合，构建“五.四”育才职教模式

采用标准共订、专业共建、人才共育、技术共研、服务共拓“五共同”，实现人员、资源、经验、成果“四共享”，见图 2 所示。

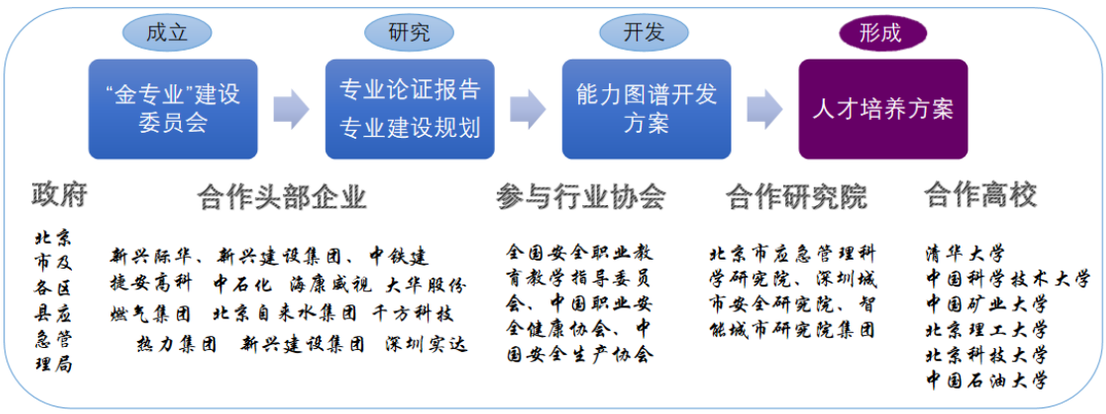


图 2　复合型国际化高素质技术技能人才培养方案形成示意图

2．创新“四育贯通，五元协同，六素集聚”人才培养模式

汇聚产教优质资源，健全城市安全学院专业群建设委员会组织架构和管理运行机制。深入实施中国特色学徒制，完善招工招生一体化制度，创新工学结合、工学一体人才培养模式，企业深度参与人才培养全过程，实现高质量就业。

思政素质教育、专业技能教育、数智能力教育和创新创业教育等四育相贯通；学校、行业、政府、科研机构与企业五元相协同；学生、课程、实训、文化、环境与岗位等六要素聚集，见图 3 所示。

图 3 “四育贯通，五元协同，六素集聚”人才培养模式示意图

3．赋能技术与服务创新中心，以成果转化提升专业社会服务能力

校企联建共性技术服务四中心，发挥“中试车间”作用，验证、优化科研成果或技术理论，针对企业生产性技术难题开展攻关，助力行业企业技术改造、工艺改进、产品升级。

城市安全产教融合实践中心。对标城市安全技术发展前沿，集实践教学、社会培训、真实生产和技术服务功能为一体的实践中心。

安全应急装备研发中心。负责城市安全应急处置与救援装备设备研究，关键技术与装备设备物资研发、测试与应用示范工作。

城市安全技术应用中心。开展城市安全应急装备成果转化及推广工作。

安全技术咨询服务中心。围绕首都城市建设、运行、管理、服务等领域，开展应急体系建设指导、安全生产标准化、生产安全事故应急预案、隐患排查与治理、风险分级与隐患排查治理、清单制管理、安全培训、安全文化建设等全过程安全技术咨询。见图 4 所示。

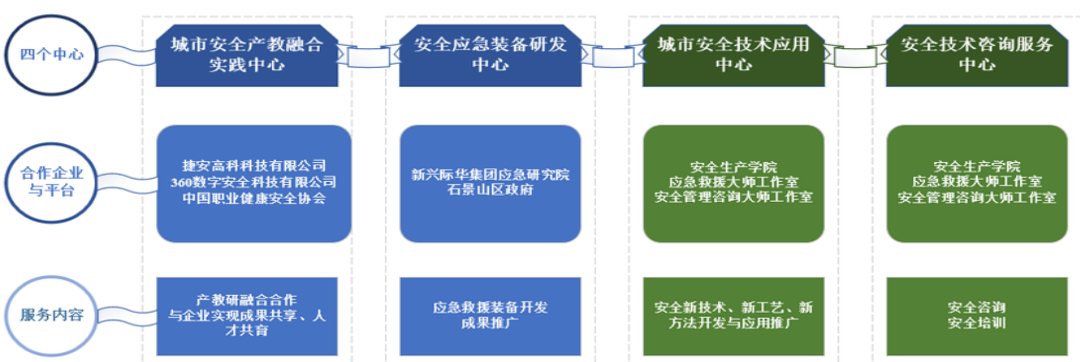


图 4 赋能技术与服务创新中心以成果转化提升专业社会服务能力示意图

5．组建安全应急技术服务中心，着力服务乡村振兴战略

城市安全学院可通过组建安全技术服务中心，为北京各类企事业单位提供隐患排查、消防设施检测、网络安全维保、志愿消防救援等安全技术服务，提升为区域安全与应急服务水

平。通过“三下乡”“安全生产月”“消防月”等安全应急活动，对定点帮扶北京各区乡镇、企事业单位开展安全隐患排查、应急救援知识培训、应急演练，筑牢农村“安全防火墙”，助力北京市各区乡村平安振兴工作。

（二）跟岗挖掘，融合数智，动态建设企业“安全技术”全课程

1．岗课赛证一体化，培养安全与应急工匠人才

对接各类安全应急生产行业标准和城市内各类技能岗位典型工作任务要求，结合生产事故应急救援技术技能比赛，以及现代化工 HSE 技能、基本消防灭火系统安装与调试、信息安全管理与评估等学生技术技能比赛的最新内容，主动融入注册安全工程师、消防设施操作员、消防员、救援员、网络安全工程师等技能型职业资格证考试内容，重构安全应急技能型的课程体系，实施“岗位课程比赛证书”融合与综合育人，打造“高职本科学历证书+安全职业技能等级证书”安全应急人才培养模式与样板[4]。总之，一要鼓励教师到企业参与项目技术改造、产品研发等技术实践；二要鼓励教师参加各类教学技能比赛[9]。

2．提炼安全应急技术专业文化，实施文化育人计划

深入挖掘和提炼以“有安全素养、有红线意识、有底线思维、有工匠精神、有应急能力”为核心的安全与应急专业特色文化，建设具有应急特色的安全文化展馆，通过宣贯式、体验式教育活动，提炼了文化育人案例，发挥了安全与应急文化在思想引领、价值引导、精神塑造和情感激发等方面的作用，提升了学生安全素养与应急能力，培养了勇于担当、甘于奉献的新时代安全应急人才[7]。

3．建设“智能贯通、专业共享”专业群金课程体系

校企共建课程开发中心，完善课程开发和动态更新机制，开发城市安全发展重点工程领域、安全保障体系课程模块，培养城市安全运行技术人才、城市智慧应急技术人才。见图 5 所示。

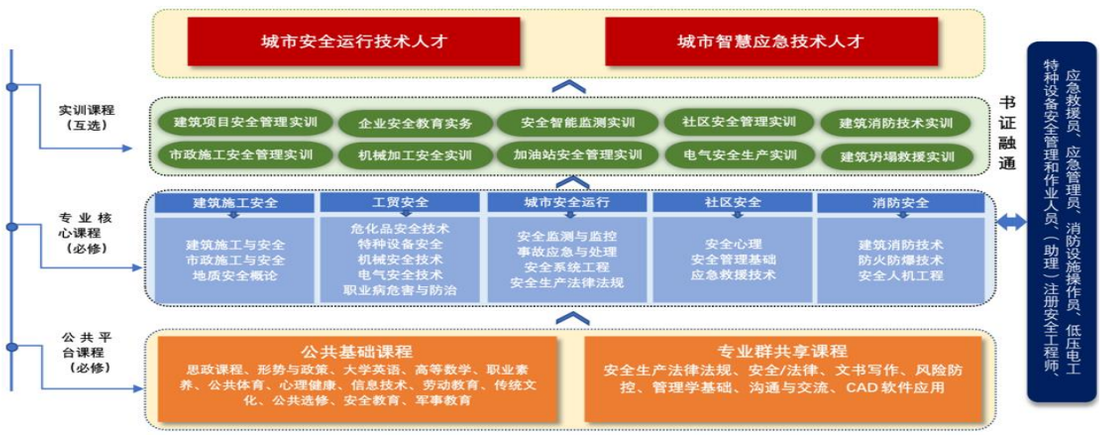


图 5　“智能贯通、专业共享”专业群金课程体系示意图

4．建设“金课”教学资源平台，实现专业群教学资源共享

以“金课”标准，建设国家在线精品课程 1 门，北京市在线精品课程 1 门，优质双语课程 4 门，全部专业课程建成在线精品课程，开发 VR 虚拟实训项目 6 个，实现学校教师、学生、企业员工、社会人员、国际留学生等多方教学资源共享，为每位学习者搭建网络学习空间，提供优质学习资源。见图 6 所示。

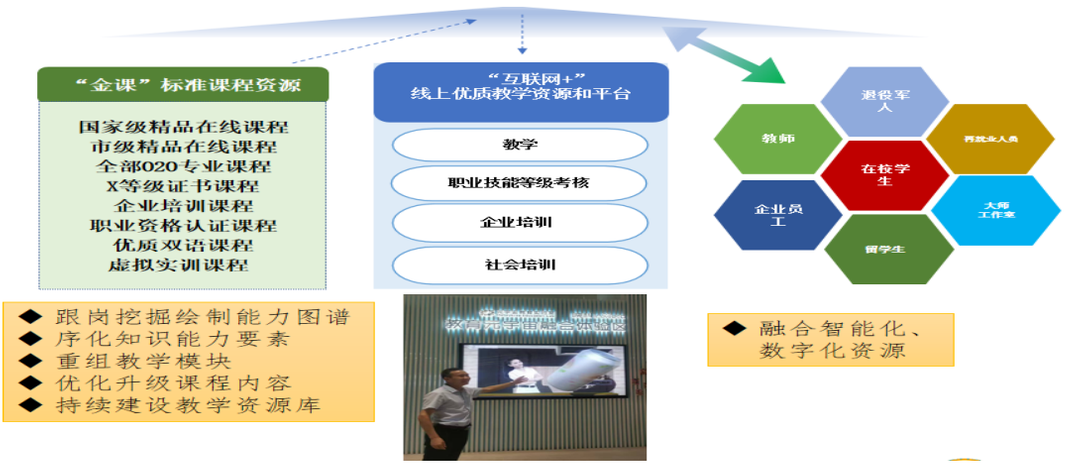


图 6　“金课”教学资源平台，实现专业群教学资源共享示意图

平安城市与雪亮工程建设，智慧城市建设中的安防系统，智能安全检测（中铁建），低空经济上下游产业链企业（天途航空）。

（三）双元开发，创新形态，打造技术中心“数智安全”金教材

1．线上线下混合式教学，拓展学习空间

全部专业课程实现线了上线下混合式教学，推动“互联网+教学练做”一体化的教学模式改革，实现线上线下混合式学习。采用启发式、探究式、参与式、合作式等教学方式的专业课程达到 100%。

2．开发金教材，满足岗位能力培养需求

立足以面向城市生命线、工贸安全、社区安全、建筑施工安全、危险化学品安全、重大活动安全等领域，服务安全管理、隐患排查、安全评价、智慧监测、风险防控、应急救援、安全宣教、制度建设、法律惩治等安全生产岗位群的需求为导向，安全与应急技术技能专业应开发适合各行业的各类产教融合教材。例如校企合作开发出版《安全管理基础知识（第二版）》、《建筑防火》、《防火防爆技术》、《建筑消防工程实训》、《安全生产基础知识实训教程》等 10 余本活页教材。1 部获评“十四五”规划教材。见图 7 所示。

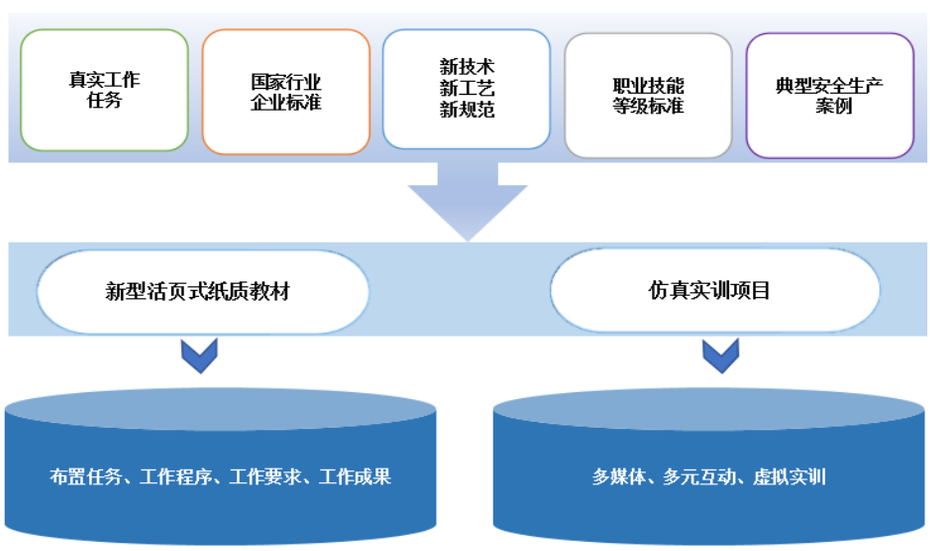


图 7　“数智安全”金教材示意图

3．打造“安全培训超市”，满足个性化的技能培训需求

进一步推进与北京市应急管理局、工业和信息化局、人力资源和社会保障局等单位的合作，城市安全学院积极探索线上线下培训新模式，着力拓展社会培训渠道，打造“安全培训超市”，提供个性化培训服务。同时，基于现有的数字化资源和智能化资源开发更多培训项目，利用已出版的各类安全技能培训教材及校内实训基地，开展多种类型、多种方式的安全应急培训，以满足首都社会各界各类人员的安全培训需求。进一步加强与首都各类大学的开放合作，做好安全应急类专业的在线课程建设工作，为形成灵活开放的终身安全教育体系创造条件。

（四）创造新质生产力，聚拢融合，打造开放型“安全场景”金基地

1．聚焦安全应急，打造产教培融合共同体

依托“中国一带一路应急管理合作基地”“全国应急安全职业教育联盟”和“北京市应急安全职业教育集团”，聚焦安全应急产业，加入市域产教培联合体，集聚各方资源，共同研究安全应急人才培养标准、开发课程体系、开展培训，实现了学校安全应急的“育”与企业的“训”的有机结合，形成了校企命运共同体。

2．共建实践中心，推进“五链”深度融合

与北京市应急管理局等政府部门共建应急救援员和消防设施操作员技能鉴定培训基地，聘请企业工程师指导学生实训，要求教师参与企业安全应急实践，实现以产助教、以教助产、以技育人，形成了产学研用深度融合的办学生态，推动了教育链、产业链、培训连、供应链、人才链、价值链的深度融合。

3．引大联强，成立智慧应急技能工程服务中心

依托大师工作，积极开展中铁十九局、首都机场、大兴机场、北京地铁等企业合作成立“联合创新中心”，可与应急管理厅联合发起如“智慧应急技术研究院”，学校可联合一带一路相关国家的高校、科研机构和企业成立如“智慧应急工程服务中心”等，通过统筹规划、相互支撑、资源共享，形成一支高水平的安全应急科技创新团队，助推北京市及一带一路沿线国家安全应急人才培养与安全应急产业发展。

围绕安全生产、安全监测、应急救援核心技能，按照“专业实训基地+工程师学院+大师工作室”建设模式，打造校企共享、产教研学创培融合的真实安全应急生产实训基地。（1）专业实训基地：校企共建安全生产实训基地、韧性城市护航产教融合基地、电气安全实训中心、智能安全监测实训中心、建筑消防实训中心。（2）产教融合实训基地：校企共建智慧应急工程师学院、安全生产工程师学院，满足企业研发、实践教学、教师科研创新、实习实训、创新创业、社会培训需求。（3）大师工作室：引进中国国际救援队核心成员，建设“应急救援大师工作室”，开展应急救援技能培养培训。见图 9 所示。

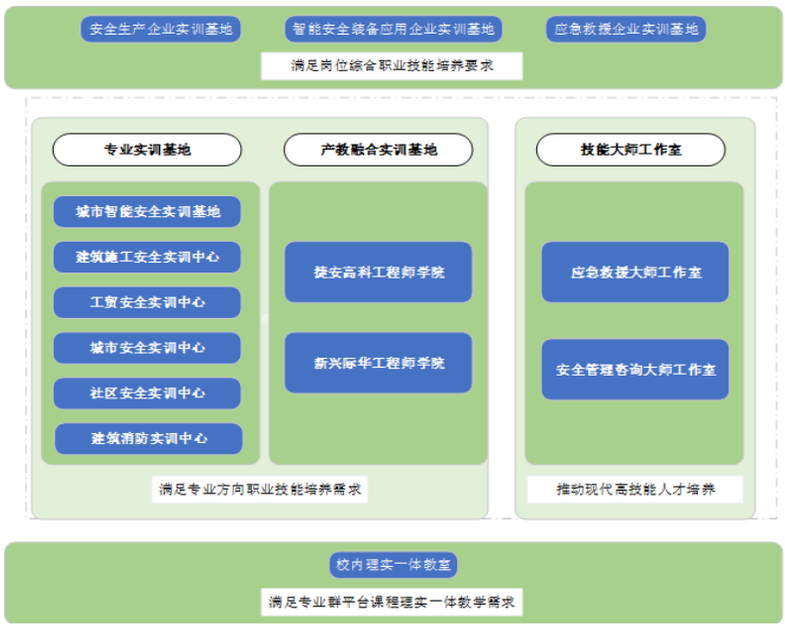


图 9　专业群平台课程理论–实训一体化示意图

（六）培训认证，打造技能知名品牌，提升首都城市安全服务能力

1．保障安全城市运行，开展安全生产教育培训

以“服务首都安全，建设平安北京”为目标，对接北京市应急管理局，参与各区生产企业安全生产教育培训工作，为首都各类重大活动提供安全监督检查服务。深度服务自来水集团、施耐德电气、北京燃气、北京供暖、京港地铁和京东集团等城市生命线企业，开展新入职员工上岗安全培训、转岗员工安全培训、在岗员工安全技术培训，助力企业优化人力资源结构，保障城市运行管理。

2．引领职教发展，开展职业技能认证与大赛承办

开发安全技术“1+X”培训认证项目，面向京津冀其他职业院校在校生和社会人员开展职业技能培训认证。积极承办北京市职业院校技能大赛赛项，积极推进赛课融合。

3．开展技术服务与成果转化，助推产业转型升级

依托北京电气安全技术研究所、新型环境与健康矿物质材料研发与应用中心、北京市煤炭矿用机电设备技术开发有限公司、安全生产学院等技术技能平台助力企业技术革新。开展智能安防系统、智慧监测装置、风险预警与控制技术优化等创新研发，引领 40 家中小企业的技术改造与技术升级，为企业带来效益 300 万元。力争实现年均助力 3–5 家中大型社区进行安全建设，大力推进智慧社区建设。

五、结束语

城市应急学院积极参与开展国际职业教育服务，计划招收“一带一路”沿线国家留学生，为“一带一路”沿线国家开展短期技能培训，推送社区安全、安防、隐患排查、人密场所风险防控、城市生命线安全、城市应急救援、安全教育、安全评价等方面人才，提供智慧建造领域人才培养培训的中国方案。

参考文献

［1］ 王燕华. 高职安全应急类专业群的组群逻辑与建设路径研究［J］. 大学教育, 2024（06）：29–34.

［2］ 孙于萍, 赵国敏, 高天宝, 等. 我国应急管理人才培

养现状研究［J］. 消防科学与技术，2020，39（6）：872–875.

［4］ 黄辉，赵明全，徐阳，幸鼎松. 安全技术与管理专业群校内共享实训室建设研［J］. 实验技术与管理，2022, 39（3）：, 220–224+263.

［3］ 颜烨，王琼. 基于需求的安全与应急类人才培养超越战略［J］. 消防科学与技术，2022，41（11）：1571–1575.

［5］ 章安平, 梁帅, 米高磊. 高职院校高水平专业群建设的内在逻辑、现实问题与实践路径［J］. 职业技术教育, 2022, 43（29）：23–29.

［6］ 张新民，杨文涛. 论高职院校专业群建设的组群逻辑［J］. 职教论坛, 2021, 37（7）：6–12.

［7］ 金永花. 构建安全应急产业体系的国际经验及启示［J］. 行政管理改革, 2022（9）：79–87.

［8］ 宁文博，马汉鹏. 高职应急管理类技能型人才培养的条件、机遇及路径. 现代职业教育, 2023（7）：153–156.

服务“平安卫士”培养的职业安全健康技术技能人才实践教学体系构建与效能验证

许曙青，汤　涛，崔炳辉，姚　淼，宗俊秀
江苏省南京工程高等职业学校，江苏　南京　211135

摘　　要：新型工业化进程中，高危行业事故隐患交织叠加，职业安全健康领域技术技能人才缺口高达 43 万人。为贯彻高危行业安全技能提升行动计划，本研究以“平安卫士”型高技能人才培养为目标，构建了覆盖“预防—管控—应急—恢复”全生命周期的实践教学体系。该体系以能力图谱为靶心重组 16 门核心课程为 72 个任务驱动型教学模块，通过“认知浸润—仿真实战—岗位淬炼”三阶递进路径，辅以德技双维智能化评价体系，实现职业素养与专业技能协同提升。实践表明：培养毕业生 500 余名，双证获取率 100%，就业率 98%以上，用人单位满意度 96%；学生获世界职业院校技能大赛金奖 2 项、银奖 1 项。安全教育惠及 221 所院校 101 万学生，为职业安全健康人才培养提供了可推广范式。

关 键 词：职业安全健康；平安卫士；实践教学体系；人才培养；职业教育

基金项目：2026 年江苏省科技智库计划项目《新质生产力背景下江苏职业健康智能监测与应急管理体系建设研究》；江苏省职业教育教学改革研究课题“职校安全类专业实践教学体系创新研究”（ZYB320）

1　引　言

安全生产是国家治理体系和治理能力现代化的重要基石。随着新型工业化进程加速，矿山、化工、建筑施工等领域安全风险复杂交织，对一线安全技术技能人才的需求日益迫切。据统计，2020 年全国安全监管、安全服务、安全技术应用领域人才缺口高达 43 万人，其中 81.15%的缺口指向中高职培养层次，职业学校安全类专业人才培养责任重大[1]。为补齐高危行业从业人员安全技能短板，应急管理部等五部门联合印发《关于高危行业领域安全技能提升行动计划的实施意见》，提出从业人员安全技能 100%培训考核合格后上岗的硬性要求[2]。国务院安委会随后启动全国安全生产专项整治三年行动计划，进一步强调从根本消除事故隐患、强化源头治理[3]。职业学校作为安全类专业人才的主要供给端，其培养质量直接关系高危行业安全发展的根基。

然而，当前安全类专业实践教学普遍存在四个突出问题。其一，课程模块割裂。传统实践课程按学科逻辑设置，学生在单项实训中操作熟练，但在危化品泄漏、火灾救援等综合演练中难以整合运用，呈现“单项熟练、综合混乱”的困境。其二，思政主线模糊。安全责任教育未能有效融入实训环节，学生对安全责任的认知停留在浅层，缺乏从“要我安全”到“我要安全”的价值转变。其三，高危场景受限。粉尘爆炸、建筑

坍塌等场景因安全风险高、成本大、不可逆而难以真实复现，学生主要通过视频观摩等间接方式学习，风险感知迟钝。其四，评价方式单一。传统考核以知识记忆和单项技能为主，对风险辨识敏锐度、应急决策合理性等深层素养缺乏科学测量工具，反馈不精准。

针对上述问题，本研究依托江苏省安全生产教育培训示范职业院校建设项目，联合政校行企多方力量，于 2020 年启动研究，历经四年实践检验，构建了服务“平安卫士”培养的实践教学体系。所谓“平安卫士”，是指企业亟需的、在职业素养上强操守、勇担当，在专业认知上熟规范、辨风险，在实战能力上善应急、精处置的高技能人才。下文将从理论基础、体系构建、实施效果三个维度展开论述。

2 理论基础与体系框架

2.1 三重理论根基

实践教学体系的构建并非经验堆砌，而是建立在三重学理根基之上。第一重是课程论根基。职业教育的课程开发应遵循行动体系逻辑而非学科体系逻辑[4]。徐国庆进一步提出，项目课程的开发应以典型工作任务为载体，通过工作任务分析、行动领域归纳、学习领域转换、学习情境设计四步，实现从职业世界到教育世界的转译[5]。这一理论为能力图谱驱动的课程综合化改造提供了方法论支撑。第二重是思政育人根基。落实立德树人根本任务，要求将价值塑造、能力培养、知识传授“三位一体”贯穿于教学全过程[6]。石伟平、郝天聪指出，产教深度融合背景下，校企双元育人不仅是技能传递，更是职业精神与价值认同的共同塑造[7]。第三重是评价改革根基。《深化新时代教育评价改革总体方案》提出改进结果评价、强化过程评价、探索增值评价、健全综合评价[8]。辛涛强调，过程评价是“四个评价”落地的关键抓手[9]，这为德技双维智能化评价体系的设计提供了政策与学理双重依据。

2.2 “四链融通”体系框架

基于上述理论，本研究提出“四链融通”的实践教学体系框架（图 1）：以素养为本的能力链定向，以课程为基的任务链驱动，以实践为要的资源链承载，以增值为重的评价链反馈。四者以能力链定向、任务链驱动、资源链承载、评价链反馈，螺旋递进，耦合形成“思政引领—能力递进—场景实战—数智诊断”的闭环体系。这一框架将“全生命周期”理念具象化为可操作的课程、资源与评价链条，实现了从“学科割裂”到“能力贯通”的根本转变。

图 1 职校安全类专业“四链”融通实践教学模型

3 体系构建：四大核心环节

3.1 能力图谱驱动的课程综合化改造

针对课程模块割裂问题，体系以能力图谱为靶心，实施课程综合化改造。依据国家职业资格标准与行业调研，将“平安卫士”能力要求拆解为风险管控、隐患排查、应急处置等 19 项关键技能指标，绘制覆盖“预防—管控—应急—恢复”全链条的能力图谱。在此基础上，打破传统学科界限，将《事故应急救援》《防火防爆技术》《职业健康与职业安全》等 16 门核心课程的 500 余个技能点，按突发事件演进规律重新整合，形成纵向贯穿事件链、横向融通岗证标准的网状课程结构[4]。整合后的知识技能被转化为危化品泄漏围堵、火灾联动控制系统操作、矿山应急指挥等 72 个能力递进的典型教学任务模块，每个模块均配套实训指导书、操作视频与考核标准，并深度对接消防设施操作员、应急救援员等职业资格证书标准，实现岗证融课[10]。

以“危化品泄漏围堵”模块为例，学生依次完成泄漏源识别、防护装备穿戴、围堵技术操作、环境监测与洗消等子任务，形成完整的行动链。这一改造将“工作过程”而非“学科知识”作为课程组织的逻辑主线[5]，使学生从零散的技能点学习转向完整工作过程的系统训练。

图 2 覆盖“预防—管控—应急—恢复”全链条的能力图谱

3.2 “认知—认同—行为—内化”职业素养全程融入机制

针对思政主线模糊问题，体系将职业素养培养按“认知→认同→行为→内化”四个层次递进实施，贯穿实践教学各环节。认知层以案铸魂，开发安全责任事故案例库，精选印度博帕尔事故、国内典型危化品泄漏等重大责任事故，按“事故还原—责任溯源—规范对照”环

节嵌入教学模块，引导学生剖析事故链条中每一个责任缺失环节，从源头建立安全责任认知。认同层情境浸润，设置“事故现场指挥员”“安全员”“企业安全总监”等角色，在高仿真危化品泄漏、火灾救援等高压情境中，学生必须在限定时间内完成信息上报、人员疏散、泄漏控制等任务，使安全责任从“知道应该遵守”转化为“我要安全”的情感认同。行为层标准引领，将责任意识、团队协作、规范执行等维度融入各实训模块操作标准，通过企业导师现场评价、团队协作行为记录等方式，引导学生在实操中规范执行、主动担当。内化层知行合一，通过校企双导师的共同评价与素养档案，培养面对安全与利益冲突时的伦理决策能力，实现安全责任从外规约束到内心自觉的升华[6][7]。

3.3 “课堂浸润—仿真交互—生产实践”三阶递进路径

针对高危场景受限问题，体系打通课堂、仿真、岗位的能力进阶通道，实施“教—仿—产”三阶递进实践路径。课堂浸润阶段，通过还原真实事故案例、情景模拟与角色扮演，在认知阶段即建立风险直觉，让学生在内化责任担当中形成“安全第一”的价值观。仿真交互阶段，依托自主研发的 JANVR 引擎与 57 个虚拟仿真实训平台，构建矿山、化工、建筑施工等主要高危行业的高保真场景，学生在可试错、无风险的高压环境中反复锤炼，系统实时记录决策路径、操作步骤与反应时间[11]。生产实践阶段，学生进入 63 家产教融合实践基地，以“准员工”身份独立承担隐患排查、应急方案制定等真实任务。以江苏银河物业项目为例，学生排查出配电间消防通道堵塞、应急照明缺失等隐患，提交整改报告后被企业采纳，累计排查隐患 1200 余处，采纳率达 92%，实现了从“会练”到“会战”的能力跃升[12]。

三阶路径之外，体系还建立“赛训结合、服务赋能”的双翼驱动机制：以承办高端安全技能赛事为动力翼，倒逼教学标准与前沿技术接轨；以大规模社会安全培训与科普服务为提升翼，积累真实案例反哺实践教学[10]。

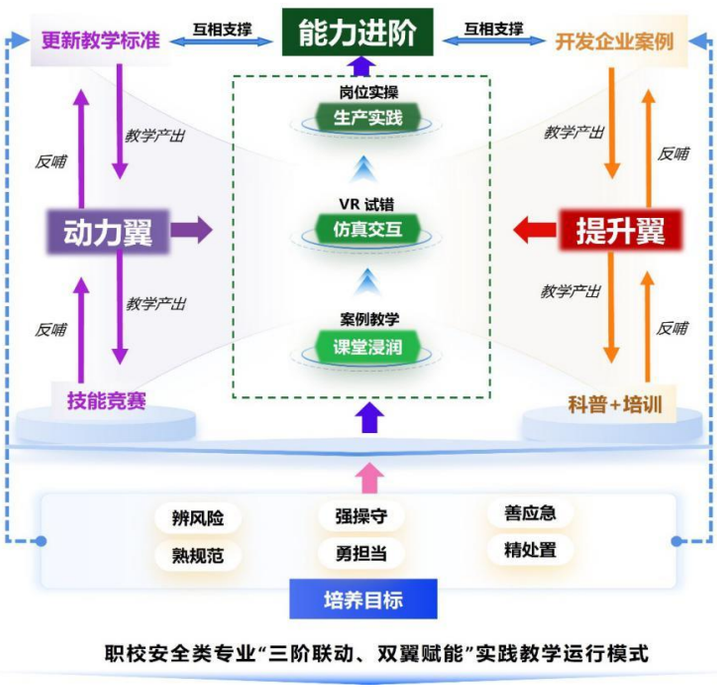


图 3　职校安全类专业“三阶联动、双翼赋能”实践教学运行模式

3.4 德技双维智能化评价体系

针对评价方式单一问题，体系自主研发安全应急智慧管理平台，构建职业素养与专业技能德技双维四环节闭环评价。数据采集环节，平台全过程采集学生在认知浸润、仿真实战、岗位淬炼各环节的操作轨迹、决策逻辑、协作行为，自动记录 VR 仿真操作、团队演练语音、岗位隐患报告及整改结果，形成多源异构的“行为指纹”。素养诊断环节，通过智能算法生成个性化能力画像，精准诊断风险辨识敏锐度、应急决策合理性、团队协同有效性等深层素养短板，并动态追踪思政成长维度。精准反馈环节，自动推送定制化训练模块，实现精准干预。教学改进环节，汇聚群体数据反哺教师优化课程与实践流程，形成“采集—诊断—反馈—改进”育人闭环[8][9]。评价体系有机融合学校导师的理论迁移评价与企业导师的岗位绩效评价，确保安全人才培养可追溯、可诊断、可持续提升[13]。

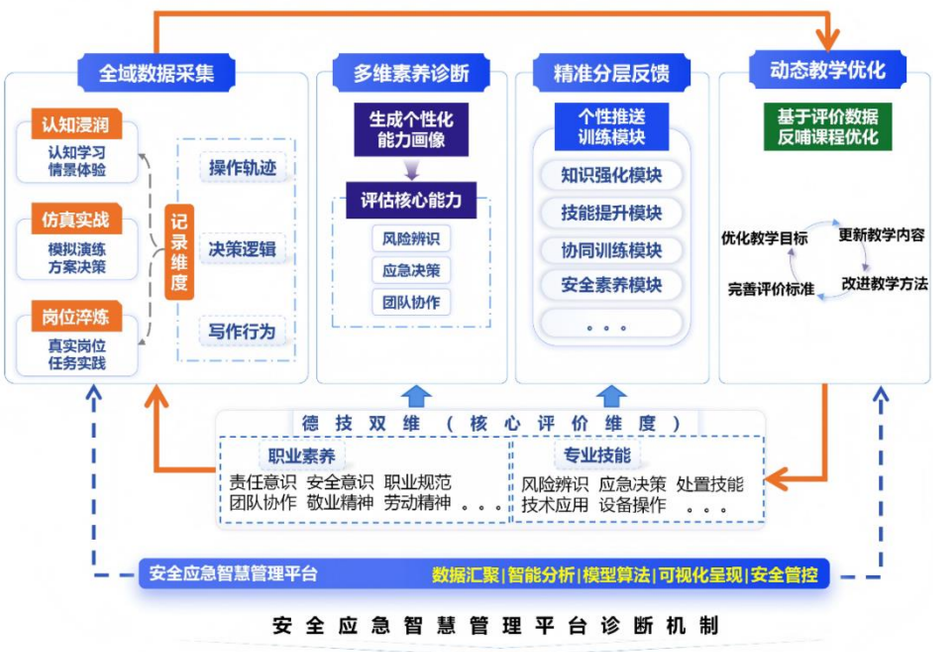


图 4 安全应急智慧管理平台诊断机制

4 实施效果与推广应用

历经四年实践检验，该体系在人才培养质量、资源建设共享、社会服务引领、教师团队成长四个维度均取得显著成效。

一是人才培养质量全面跃升。累计培养职业安全健康类毕业生 500 余名，双证获取率 100%，就业率连续保持在 98%以上，用人单位对学生职业忠诚度、风险防范意识和应急应变能力满意度达 96%。学生在世界职业院校技能大赛中斩获金奖 2 项、银奖 1 项，在省级矿井灾害应急救援等赛项中获一等奖 4 项，累计获省级以上技能大赛奖项 38 项。20%的毕业生成长为企业班组长或安全主管，成为企业安全管理的骨干力量。

二是资源建设实现全域覆盖。牵头建设江苏省职业学校安全教育平台，集成事故复盘、应急演练等虚拟仿真模块，服务全省 221 所院校、惠及 101 万学生，学校成为第二批全国急救教育试点。校企联合开发的高保真 VR 教学资源及互动式事故警示教育系统，被新加坡、马来西亚、越南等国职业院校直接采用，通过全国安全职业教

育教学指导委员会、世界职业教育大会等平台，在南京科技职业学院、新疆克州职业技术学校等省内外 62 所院校深度应用[11]。

三是社会服务贡献突出。近四年为江苏省 320 家机构培训安全生产师资近 4000 人次，学员满意度 99%；完成技能人才培训 17.03 万人次，覆盖消防救援、安全评估、应急管理等关键岗位。安全培训师资培训项目获全国典型教学案例一等奖。成果承办一带一路暨金砖国家技能大赛应急救援赛项总决赛、江苏省生产事故应急救援职业技能大赛等重大赛事 12 项，获《新华日报》《光明日报》及学习强国等平台累计报道 35 次。

四是教师团队协同赋能成长。团队获省级以上教学与技能竞赛奖项 41 项，5 人获评江苏省技术能手，3 人获省级教学名师称号，孵化 1 个国家级、2 个省级教师教学创新团队。主持各级教改课题 25 项，主编“十四五”国家规划教材 9 部，发表高水平论文 56 篇，牵头申报的防灾减灾救灾技术专业纳入教育部专业目录，制定 3 项专业教学标准在全国推广应用。

图 5　成果应用推广效果概览

5　结论与展望

本研究针对职业安全健康技术技能人才培养中的课程割裂、思政融入不足、高危场景受限、评价方式单一等突出问题，构建了服务“平安卫士”培养的实践教学体系。其创新点体现在三个层面：在育人理念上，坚持生命至上、安全发展，确立全生命周期育人理念，提出“安全职业本能内化”育人范式；在培养路径上，创新“三阶联动、双翼赋能”运行模式，生成全过程实践教学培养新路径；在评价机制上，创建多方协同智能考评平台，形成多维度数据驱动诊断新机制。实践证明，该体系显著提升了人才培养质量，具有广泛的推广应用价值，可为海峡两岸及港澳地区职业安全健康教育提供有益借鉴。

面向国家公共安全治理模式向事前预防转型的战略需求，后续研究将从三个方向深化：一是依托全国安全职业教育教学指导委员会等平台，向全国安全类院校推广人才培养经验，扩大培养规模；二是充分发挥省级职业体验中心功能，面向中小学广泛开展安全体验活动，将安全预防意识培养从职教延伸到基础教育阶段；三是持续深化“全链条贯通、多场景协同、数智化赋能”实践教学体系，拓展 AI 大模型、数字孪生在风险辨识与应急决策训练中的

应用[14]，推动课程体系、仿真平台及评价方案向行业标准对接，为国家高危行业培养更多“下得去、用得上、靠得住”的高技能安全专业人才。

参考文献

［1］ 应急管理部培训中心. 应急管理行业人才供需匹配分析谱系图研究报告［R］. 北京：应急管理部培训中心, 2023.

［2］ 应急管理部, 人力资源和社会保障部, 教育部, 等. 关于高危行业领域安全技能提升行动计划的实施意见：应急〔2019〕107 号［Z］. 2019.

［3］ 国务院安全生产委员会. 全国安全生产专项整治三年行动计划：安委〔2020〕3 号［Z］. 2020.

［4］ 姜大源. 工作过程系统化课程的结构逻辑［J］. 教育与职业, 2017（13）：5–12.

［5］ 徐国庆. 职业教育项目课程开发指南［M］. 上海：华东师范大学出版社, 2009.

［6］ 马磊, 张爱华, 郭莉, 等.《化工安全概论》“课程思政”建设的实践与体会［J］. 广州化工, 2020, 48（9）：187–189.

［7］ 石伟平, 郝天聪. 产教深度融合校企双元育人：《国家职业教育改革实施方案》解读［J］. 中国职业技术教育, 2019（7）：5–11.

［8］ 中共中央, 国务院. 深化新时代教育评价改革总体方案［Z］. 2020.

［9］ 辛涛. 以强化过程评价为抓手推动“四个评价”落地［J］. 陕西教育（综合版）, 2022（5）：1.

［10］ 曾天山. “岗课赛证融通”培养高技能人才的实践探索［J］. 中国职业技术教育, 2021（8）：5–10.

［11］ 魏巍, 韩鸿华, 刘威. 职业安全类虚拟仿真教学资源的校企协同开发路径研究与实践［J］. 北京劳动保障职业学院学报, 2024, 18（3）：51–56.

［12］ 赵志群. 职业教育工学结合一体化课程开发指南［M］. 北京：清华大学出版社, 2009.

［13］ 郝俊琪, 闫智勇, 吴全全, 等. 职业教育行动导向教学模式的内涵澄明与实施策略——基于工作过程系统化课程开发范式［J］. 中国职业技术教育, 2024（20）：60–69.

［14］ 毕树沙, 张琳琳. 职业教育智能体：AI 赋能职业教育新图景［J］. 中国职业技术教育, 2025（20）：5–11+20.

科技有溫度：多模態 AI 輔助澳門年長及數碼弱勢從業人員職安健文書應用探索

林澤堯
澳門建築安全協會（MCSA）

摘　要：澳門建築及旅遊業的職安健管理，因應制度化趨勢，合規文書責任持續增加。年屆五十或以上、從業數十年的年長及數碼弱勢從業人員（DDAW），開口說話難不倒他們，卻對執筆填表、觸控介面均感費時吃力。問題不限於前線，中層管理同樣如此。

本文提出三個應用場景，探討多模態人工智能如何簡化現場安全記錄流程，在不改變現行法定責任鏈的前提下，降低 DDAW 參與安全合規工作的操作負擔：拍照輔助消防設備到期追蹤、語音輸入輔助法定點檢表合規填寫、語音口述輔助風險評估初稿生成。三個場景依技術複雜度由低至高排列，分別示範不同情境下的易用設計邏輯，並就各場景之可行性與制度配合方向進行初步分析。

工具愈來愈多，落地的並不多。不是技術問題，而是從業人員覺得麻煩費時，最終放棄。AI 的角色是工作流程輔助，要簡單到讓他們願意試。最終判斷必須回到指定人員手上——AI 承擔操作負擔，責任留在人手上。在 AI 普及的今天，大多數討論聚焦於讓懂得使用 AI 的人更有效率。但這只是 AI 價值的一半。AI 真正的使命，是幫助那些不懂得使用它的人，也能把工作做好。這才是「科技有溫度」。

關鍵詞：多模態人工智能、職安健文書、年長及數碼弱勢從業人員、包容性安全管理

壹、引　言

一、研究動機

筆者早年擔任地基工程助理安全期間，曾與一名吊運總管共事。他年逾六十，從事地基及吊運工作超過三十年，對吊運流程及高風險工序安排極為熟悉——只需觀察現場配置，已能快速指出潛在危害及控制措施。然而每當需要填寫風險評估或安全文件，他卻要花上數小時，甚至依賴安全部門協助。問題不在於缺乏安全知識。他最自在的溝通方式是開口說話——現場指揮、電話交代、微信語音——但沒有一種職安健文書接受「說話」作為有效輸入。有現場經驗的人，往往在文書操作上最感困難。

近年拍照識別、語音辨識及自然語言處理技術快速發展，多模態人工智能已具備同時處理影像、語音與文字的能力。本文嘗試從「科技適應人」的角度出發，探討多模態人工智能如何透過拍照識別及語音輸入，協助年長及數碼弱勢從業人員簡化現場安全記錄工作。

二、澳門職安健文書現況

第 2/2023 號法律《建築業職業安全健康法》及第 32/2023 號行政法規實施後，澳門工地安全管理的制度化記錄要求進一步提高。風險評估、巡查記錄及設備檢查表等文件愈來愈

多，然而現行系統大多假設使用者具備數碼操作能力，對年長前線從業人員而言，仍可能因文書操作困難而無法參與。

三、研究目的與範圍

本文定位為概念性應用框架研究，聚焦澳門建築業及酒店業，以三個由低至高的應用場景，探討 AI 輔助 DDAW 完成法定安全合規要求的可行路徑。

貳、背景與問題陳述

一、目標群體：年長及數碼弱勢從業人員

本文所指 DDAW，其核心特徵並非不識字或完全不懂科技，而是其最自然的表達方式——開口說話——與現行職安健文書系統所要求的輸入方式存在根本性落差。現行文書制度預設使用者能流暢地以文字完成記錄，無論紙筆書寫還是電子輸入；但對習慣以語音溝通、文字輸出費力的年長從業人員而言，這個預設本身就是障礙。他們知道應該記錄什麼，問題在於現有系統不接受他們最擅長的表達方式。此類從業員多以五十歲或以上為主，普遍具十年以上現場經驗，熟悉工序風險，亦能操作手機拍照及語音通訊等基本功能，但對複雜數碼及多步驟操作介面接受程度有限。

澳門統計暨普查局（2025）的數據顯示，本澳從業員的手機普及率高達 93.5%，個人電腦使用率卻只有 61.2%；65 歲以上群體的互聯網日常使用率亦較核心勞動力低逾 18 個百分點。兩組數字指向同一現象：DDAW 並非拒絕科技，而是習慣與現有系統之間存在結構性落差。工地及酒店維修現場亦未必具備理想文書環境：工人需戴手套、巡樓期間難以停留輸入，加上觸控介面對習慣語音溝通的 DDAW 而言門檻較高。

二、現行職安健文書系統的設計缺口

現行電子化系統大多針對具數碼能力的管理人員設計，較少考慮前線工友的操作習慣。現時已有具備粵語語音識別能力的通用大型語言模型，技術上能以語音口述生成風險評估草稿；然而上述工具均以文字介面或帳號登入為前提，輸出格式亦未能對應澳門法定職安健表格，且欠缺指定人員簽核的責任閉環——工具已在，DDAW 仍走不到「開口說話」那一步。Kalasapudi 等人（2026）指出，建築業行政文書自動化及使用者認知負擔問題至今仍屬缺乏關注的應用領域。

三、文書障礙的實際後果

實務上常見情況包括：風險評估只填部分內容、巡查記錄事後補填、表格用語不符規定，以及依賴他人代填。真正了解現場風險的人未有直接參與安全記錄，可能造成安全數據出現結構性空白，影響事故調查、法規合規及保險理賠。

參、概念指框架

一、多模態人工智能與輔助性定位

多模態人工智能可同時處理語音、文字及影像等不同輸入。對年長及數碼弱勢從業人員而言，困難往往不在安全知識，而在操作介面本身。現有文書系統預設使用者具備數碼能力，卻未考量部分工友對手機填表、頁面切換的抗拒。De Marco 等人（2025）指出，低代碼多模態對話代理可有效作為前線安全合規工作之首輪篩查與輔助工具，其核心價值在於大幅減輕操作人員之行政與認知負擔，而非完全替代核心管理流程。

二、人機協同與法律問責原則

本文三個場景均建基於人機協同原則：人工智能負責語音轉文字、資料整理及初稿生成，最終確認與簽核由指定人員承擔。這不只是技術安排，更是職安健管理的法律要求——簽署人須對現場狀況及控制措施負責，此判斷不能交由人工智能取代。科技介入的價值在於支援人工監督，而非以自動化取代。

三、包容性安全管理與應用定位

包容性安全管理的核心在於確保每一位從業人員均能有效參與職安健制度，而非僅服務於管理層。香港數字政策辦公室的《長者友善網站／流動應用程式設計指引》指出，年長用戶的介面應採用大字體、簡化操作步驟及清晰的語音回應。設計邏輯如：語音回應以粵語確認、操作步驟力求簡化、字型支援放大顯示等。步驟每增加一層，年長使用者的放棄率顯著上升。易用設計的本質，是將操作負擔從工友轉移到系統本身。三個應用場景的法規依據與管理框架對應詳見表 1。

肆、應用場景分析

表 1　三個應用場景的法規與管理框架對照

場景	法規依據	SMS 14 元素	ISO 45001
場景一：拍照輔助整理消防設備巡查記錄	第 15/2021 號法律《樓宇及場地防火安全的法律制度》	元素 5：安全檢查計劃	Check
場景二：聲控法定安全表格填寫	第 32/2023 號行政法規第 84 條第 5 款	元素 5：安全檢查計劃	Do
場景三：語音驅動風險評估初稿生成	第 2/2023 號法律第 4 條第 1 款第 4 項	元素 11：工作危害分析	Plan

一、場景一：拍照輔助整理消防設備巡查記錄

按澳門第 15/2021 號法律《樓宇及場地防火安全的法律制度》，消防設備定期巡查是酒店及工地的基本要求。滅火器通常批次採購，同批到期日相同，分布各樓層或工區；巡查人員須逐一核對標籤，人手抄寫編號及到期日，再整理記錄。對 DDAW 而言，夜班後面對細小標籤字體進行文書錄入，記憶模糊或數據誤填在所難免。本場景提出以手機拍攝滅火器標籤，透過 OCR 技術識別編號及到期日，整理至電子表格並標示即將到期設備。巡查人員無需手抄，拍照即可完成基礎記錄——對 DDAW 而言，拍照比打字更貼近日常使用手機的習慣。現有電子巡查系統多需預先張貼 QR Code 或 RFID 標籤；本框架直接輔助辨識現有物理標籤，對中小企或臨時工地門檻更低。

原型開發中發現雲端 OCR 整合門檻較高，因此調整為拍照輔助人工確認模式，以簡單可靠換取實際可用性。

圖 1　場景一原型介面：（a）拍照記錄滅火器標籤；（b）系統依到期日自動計算剩餘天數並分類顯示

二、場景二：聲控法定安全表格填寫

吊船操作員須每日於使用前在安全地點完成點檢記錄，惟工地現場屬戶外環境，通常缺乏固定辦公空間及書寫環境；操作員多屬外判流動工作者，加上第 32/2023 號行政法規第 84 條第 5 款規定之專用表格（Form 15）要求，按檢查結果填寫「安全可用」或「禁止使用」，現場往往以「正常」或「OK」代替，容易出現用語不一致情況。

更深層的問題在於，部分操作員選擇完成多項巡查後，再集中憑記憶補填多份表格，增加遺漏、錯誤及用語不符規範的風險。這種做法在紙本管理環境下難以即時糾正，亦難以追蹤。

本場景將表格內容分為固定資料及每日記錄兩層。固定資料如承造商、工地及設備資料，由管理人員預先整理後發送，操作員以複製貼上方式快速完成，毋須每日重複輸入。每日記錄層中，操作員以語音或按鈕方式輸入設備狀態，系統協助轉換為 Form 15 所需之「安全可用」或「禁止使用」用語，降低因用語不一致產生的行政風險。

原型開發過程中發現，前線人員使用的移動裝置型號各異，不同的安卓系統及內置瀏覽器對原生語音功能（Web Speech API）的支援程度不一，部分裝置甚至無法正常啟動語音輸入。因此，原型同時保留「備用按鈕」作為降級方案，確保在語音功能失效時仍能輸入，而非令工具完全失效。

圖 2　場景二原型介面：（a）系統將口述內容（「安全好用」）自動轉換為 Form 15 所需用語（「安全可用」）；（b）記錄同步登記至 Form 15，惟簽署欄位留空，須由指定人員親筆確認

本研究並不改變現行法定檢驗、記錄與簽署制度——語音輸入須由現場親自執行檢查之指定人員本人提供，AI 僅協助整理文書內容，最終仍由該指定人員按現行制度親筆簽署，法律問責不因技術介入而轉移。本方案的價值不在完全自動化，而是將注意力從補填文書還給現場安全本身。

三、場景三：語音驅動風險評估初稿生成

風險評估是澳門第 2/2023 號法律明確要求的法定義務。建築及酒店維修環境中，大量

DDAW 具備精準的現場風險判斷能力，卻在文書執行上屢屢受阻——現行格式逐欄填寫作業步驟、危險源及控制措施，往往需要數小時，甚至依賴他人代勞。

現時通用大型語言模型（如豆包）已具備粵語語音識別能力，技術上能生成風險評估草稿；然而帳號註冊門檻、輸出格式未對應澳門法規、以及欠缺指定人員簽核的責任閉環，令 DDAW 實際上仍走不到「開口說話」那一步。本場景的貢獻不在技術，而在識別這最後一公里的具體障礙，為後續研究標示方向。本研究已就上述引導機制進行初步探索，結果顯示此方向有助於提升風險評估初稿之完整性；惟系統之計算過程透明度與風險評級穩定性仍待進一步驗證與完善。

伍、實施障礙與設計邏輯應對

一、慣性抗拒與設計策略

在澳門建築及酒店維修行業，阻礙新工具落地的最根本障礙往往不是技術，而是慣性。一套沿用多年的工作流程，只要沒有出過重大事故，管理層便傾向維持現狀；DDAW 同樣如此——他們不是抗拒改變，而是看不到改變的必要。「行咗幾十年都冇問題，點解要學新嘢？」這句話在工地和酒店後勤部門普遍存在，背後是合理的風險規避邏輯。

針對這種慣性，本框架的設計邏輯建立在「嵌入而非取代」的原則上：現有格式與提交程序完全保留，改變的只是輸入方式。對 DDAW 而言，感受到的不是「要學一套新系統」，而是「表格有人幫你填好了，確認一下就好」。推廣時應以「減少補填錯誤」和「減少法規用語不符的風險」為主要切入點，而非「數碼轉型」——前者才是管理層和 DDAW 真正在乎的問題。

二、私隱與法律合規考量

三個場景的數據敏感度存在明顯差異。場景一的 OCR 拍攝對象是設備標籤，不涉及人員資料，私隱風險極低；場景二的語音輸入限於設備狀態描述，風險居中；場景三涉及工作細節描述，敏感度最高。澳門第 8/2005 號法律《個人資料保護法》適用於所有涉及語音及影像數據的部署，企業應優先採用離線運算或本地化方案。

澳門第 5/2005 號法律《電子文件及電子簽名》已確立電子文件的法律效力，惟該法同時訂明，如特定法律規定須以紙本或特定格式提交文件，電子文件的一般效力並不凌駕其上。就職安健文書而言，第 32/2023 號行政法規規定吊船點檢表須由指定人員按法定格式完成記錄；現行法規之問責機制已相當清晰：指定人員須對其簽署之表格內容負全部法律責任，不論記錄之輸入方式為何。

三、粵語語音識別的技術局限

粵語在現有主流語音識別系統中仍屬資源相對不足的語言。研究顯示，廣泛採用的開源語音識別模型其粵語字符錯誤率顯著高於普通話，根本原因在於粵語訓練語料庫規模較小，加上六聲調系統使同音異義字問題遠較普通話複雜。在職安健文書語境下，Form 15 要求填寫的用語（如「安全可用」）與近音詞之間的混淆，可能影響記錄之準確性，加上工地及酒店後勤環境的背景噪音，容錯空間極低。

本框架建議兩項應對措施：其一，為場景二設置詞彙表限制，將識別範圍收窄至 Form 15 所需用語集，從技術層面降低同音誤識的可能；其二，在所有場景設置強制人工確認環節。這是在現有技術條件下的風險管理設計，而非完整解決方案。本研究各場景之實際準確率、工友接受度及現場環境等變數，仍需後續試點驗證。Armenteros-Cosme 等人（2025）的系統性綜述亦指出，AI 在職安健風險預防中的應用仍面臨多重技術與制度整合挑戰；Vitrano 與 Micheli（2025）則從 Industry 5.0 視角強調，技

術賦能須以保障工人健康及社會包容為前提。

陸、結論與展望

一、研究總結

本文圍繞一個核心矛盾展開：澳門建築及酒店行業最熟悉現場風險的從業人員，往往是最難完成安全文書的一群。三個應用場景共同建立在同一原則上：不改變現行法律責任鏈，不強制取代現有流程，只以易用設計降低 DDAW 的參與門檻。

三個場景之開發經驗顯示，DDAW 職安健輔助系統之設計應把握三項原則：1.AI 僅生成文書草稿，法定核實與簽署仍須指定人員現場完成；2.介面應以使用者為中心，透過一次設定、拍照代替輸入、語音代替鍵盤降低認知負擔；3.導入宜循序漸進、風險最低之 OCR 場景優先試點，語音及風險評估等複雜場景先定位為輔助工具，經驗證後再擴展。核心理念：科技應服務人，而非要求人遷就科技。

兩個原型開發過程均顯示，前線職安健文書數碼化的主要挑戰並非人工智能能力不足，而是如何在不同設備、網絡及使用情境下維持穩定可靠的操作體驗。對數碼弱勢從業人員而言，適度降低自動化程度以換取系統穩定性，往往比追求全自動化更具實際價值。

二、研究局限與未來方向

本研究屬概念性框架，三個場景均未經現場試點驗證。粵語語音識別準確率、DDAW 接受度、現場環境穩定性及監管立場，每一個都可能在實際部署中成為決定性因素。未來研究應以 OCR 消防設備巡查作為首個試點，取得實測數據後方可評估其他場景的推廣可行性。

工具愈強，落地的關鍵愈不在技術，而在於能否設計出一個讓不懂 AI 的人也願意開口的入口。AI 真正的使命，是幫助那些不懂得使用它的人，也能把工作做好。這才是「科技有溫度」。

參考文獻

［1］澳門特別行政區（2005），第 5/2005 號法律——電子文件及電子簽名，政府印務局，澳門。

［2］澳門特別行政區（2021），第 15/2021 號法律——樓宇及場地防火安全的法律制度，政府印務局，澳門。

［3］澳門特別行政區（2023a），第 2/2023 號法律——建築業職業安全健康法，政府印務局，澳門。

［4］澳門特別行政區（2023b），第 32/2023 號行政法規——建築業職業安全健康技術規範，政府印務局，澳門。

［5］澳門統計暨普查局（2025），2024 年住戶使用資訊科技普及程度調查，澳門特別行政區政府，澳門。

［6］Digital Policy Office（n. d.），長者友善網站／流動應用程式設計指引，Digital Policy Office, Hong Kong.

［7］Armenteros-Cosme, P., Arias-Gonzá lez, M., Alonso-Rollá n, S., Má rquez-Sá nchez, S. and Carrera, A.（2025），Advancements in artificial intelligence and machine learning for occupational risk prevention, Sensors, Vol. 25, No. 17, p. 5419.

［8］De Marco, G., Niederwieser, E. and Siegele, D.（2025），Exploring a multimodal conversational agent for construction site safety, Buildings, Vol. 15, No. 18, p. 3352.

［9］Kalasapudi, V. S., Seelam, A., Ganupa, S. and Tofferi, C.（2026），The overlooked frontier of AI in construction, Frontiers in Built Environment, Vol. 11, p. 1713342.

［10］Vitrano, G. and Micheli, G. J. L.（2025），Rethinking work in Industry 5. 0, Public Health Challenges, Vol. 4, No. 3, p. e70130.

高風險機械設備安全標準與確效機制之推動成果以產業自主安全管理模式為例

湯家柔
中華安全衛生協會

摘　要：部分高風險機械設備因未納入法定列管機械設備範圍，缺乏一致性安全設計及管理機制，致使設備安全水準存在差異。為提升本質安全及源頭防災，本研究透過高風險機械設備辨識、風險評估、安全標準建立及設備確效認證推動，建構產業自主安全管理模式，以降低機械設備職業災害風險。

本研究透過產業需求盤點及職業災害統計，結合產業團體、設備製造商及使用端意見作為篩選依據。針對篩選設備，導入風險評估技術，建立安全標準，並透過產業團體推動設備確效認證制度，提供設備製造商自主申請驗證。2019 年至 2025 年間，與 6 個產業團體合作，完成 10 項機械設備安全標準，涵蓋電子零組件、金屬製品、機械設備等產業。2021 年至 2025 年間，完成 12 家廠商、12 種確效認證。

本研究建立之高風險機械設備安全標準與確效認證機制，串聯設備製造商、產業團體及設備使用端共同參與，形成兼具源頭管理及市場導向之自主安全管理模式，可作為降低職業災害風險及推動產業自主安全管理之參考。

關鍵詞：高風險機械設備、本質安全、風險評估、安全標準、確效認證

壹、前言－高風險機械設備安全管理之推動背景

製造業之生產高度依賴各類機械設備，設備在提高產能與品質的同時，也可能因夾捲、切割、衝壓、飛落、感電或控制系統失效等情形造成重大職業災害。傳統機械安全管理多著重於設備進入工廠後的防護設施、作業程序、教育訓練及現場稽核，但若設備在設計與製造階段即存在危害，使用端往往只能透過加裝護罩、聯鎖或行政管理補強，改善成本較高，且未必能消除根本風險。因此，將危害辨識與風險降低前移至設備設計及製造階段，是落實本質安全與源頭防災的重要方向。

台灣地區《職業安全衛生法》第 5 條第 2 項已明定，機械、設備或器具之設計、製造或輸入者，應於設計、製造或輸入階段實施風險評估，致力防止設備於使用時發生職業災害（台灣地區勞動主管機關，2025）。此外，第 7 條至第 9 條針對主管機關指定之機械、設備及器具建立資訊申報及驗證制度。然而，產業現場仍存在許多具夾捲、切割、衝擊或高能量危害的專用及非標準化設備，未必屬於法定指定列管範圍，其安全設計常依製造商經驗、使用端需求或個別契約辦理，容易產生安全規格不一致及改善責任落在使用端等問題。

國際標準 ISO 12100 提出機械安全設計的風險評估與風險降低方法，包含界定機械限制、危害辨識、風險估計、風險評價，以及依序採

取本質安全設計、防護與附加保護措施、使用資訊等三步驟風險降低策略（ISO 12100，2010）。國際勞工組織亦指出，機械安全不僅是雇主或操作人員的責任，設計者、製造者、供應者與使用者均應在設備生命週期中共同承擔安全責任（ILO，2013）。由此可知，單靠工廠使用端稽核或事故後改善，難以完整處理設備源頭風險，需建立能串聯製造商、產業工會及使用端的制度化機制。

基於上述背景，本研究以 2019 年至 2025 年間推動之高風險機械設備安全標準與確效認證工作為研究範圍，分析如何由產業需求與職業災害資料辨識高風險設備，導入風險評估建立安全標準，再透過產業團體推動設備確效認證，並依循《職業安全衛生法》第 5 條第 2 項之源頭風險管理精神，由政府引導制度建置、設備製造商自主申請確效及使用端於採購與驗收時辨識設備安全性，逐步形成產業自主安全管理模式。

貳、高風險機械設備安全標準研究方法與推動機制

一、研究範圍與資料來源

本研究以 2019 年至 2025 年間高風險機械設備安全標準之建置成果，以及 2021 年至 2025 年間設備確效認證之推動紀錄為研究範圍，研究方式整理歷年實務執行資料。資料來源包括產業需求調查、機械設備風險評估、安全標準研擬及設備確效查核等相關紀錄。

研究分析分為「機械設備安全標準建置」與「設備確效認證推動」兩個面向，分別檢視高風險機械設備之篩選、風險評估與安全標準形成過程，以及產業團體、設備製造商參與確效認證和制度持續運作之情形。

二、高風險機械設備選定與輔導對象

高風險機械設備之選定，並非僅以職業災害發生件數作為判斷依據，而是先就產業風險特性、設備危害程度及產業推動條件進行綜合評估。

首先，透過職業災害資料、勞工保險職業災害給付資料及產業需求調查，盤點災害發生頻率較高、可能造成夾捲、切割、衝擊或其他重大傷害，或安全防護及管理機制較不完善之機械設備；其次，考量產業團體及事業單位之參與意願、設備使用普遍性、技術改善需求，以及後續建立產業自主管理機制之可行性，篩選優先推動之產業及設備項目；完成初步盤點後，再由產業團體協助訪查會員需求，並邀集機械安全、風險評估及產業技術等領域專家共同討論，以確認優先建置安全標準之設備。後續則選定具改善意願之設備製造商或設備使用事業單位，作為風險評估及安全標準建置之輔導對象。

此篩選方式維持原稿以團體配合程度、事業單位意願、技術需求、職災頻率及安全管理現況等條件進行綜合評估的原則。

三、輔導機械設備製造商導入風險評估技術

本研究於高風險機械設備安全標準建置過程中，並非僅依據職業災害案例或專家經驗訂定安全要求，而是參考國際規範 ISO12100 技術文件建議流程主要分為確認機械設備的限制條件、危害辨識、風險評估、風險評估結果分析與降低風險五大步驟可參考圖 1 所示，藉以提升受輔導對象對機械設備本質安全設計之觀念，強化第一線人員之本質安全設計能力，使其於機械設計、製造階段即評估使用者操作時所需之安全防護，從源頭消弭危害因子。

有關危害鑑別方式依 ISO12100 中並無指定其分析工具，只取決於適當性，依人、機械、方法、材料及運作環境等五大面向思考潛在危害源。本計劃運用本研究搭配運用 ISO 12100、失效模式與效應分析法（FMEA）及工作安全分析法（JSA）等工具，分別由設備生命週期、零組件失效及人員操作程序等面向進行分析：以

機械生命週期層面分析的方法（ISO12100 標準揭示之流程）、以硬體零組件層面分析的 FMEA 及人為操作層面分析的 JSA 等方法辨識危害，並輔以 ISO13855（或 ISO13857 安全距離相關）、ISO14119（安全連鎖裝置）、ISO14120（安全防護裝置）、ISO13850（緊急停止控制裝置）或 IEC61496（主動式光電保護裝置）等國際安全標準，適時運用不同方法以軟體面及硬體面強化事業單位安全設計及防護要求，以達到全面且完整的分析結果。

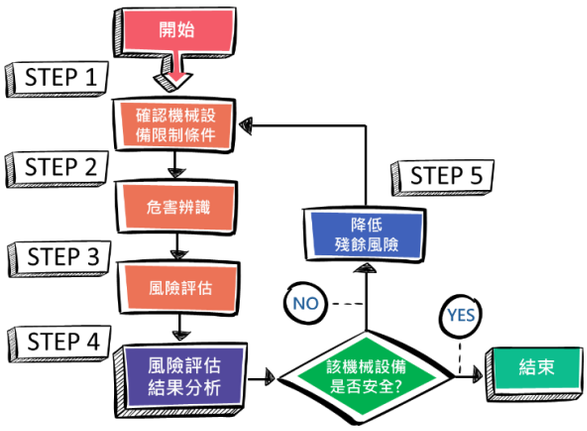


圖 1　機械設備風險評估基本流程與架構

四、風險等級判定與風險降低措施

完成危害辨識後，依傷害嚴重度（S）、暴露危害之程度及頻率（F）、事件發生機率（O），以及避免傷害之可能性（A）等四項因子進行評量，各項因子及其程度判定可參考表 1 所示。其中，傷害嚴重度係評估危害發生後可能造成的傷害後果；暴露程度及頻率用以判斷人員接近危害源的次數與時間；事件發生機率係評估設備或安全功能失效的可能性；避免傷害之可能性則判斷人員是否有機會及時察覺並避開危害。

完成各項因子的程度判定後，可參考圖 2 所示之風險等級判定方式進行分析，將評估結果區分為第 1 級至第 6 級，並依不同風險程度採取相對應之處置方式，可參考表 2 所示。第 1 級及第 2 級屬低度風險，原則上可維持現有安全措施，並視需要定期檢點或監測；第 3 級及第 4 級屬中度風險，應持續確認安全防護措施之有效性，必要時提出改善或預防措施；第 5 級及第 6 級屬高度風險，應優先針對危害源採取工程控制或管理改善，並訂定改善期程，以降低重大傷害發生之可能性。

風險降低措施可參考圖 3 所示之優先順序，先從設備設計著手，採取本質安全設計以消除或降低危害；對於無法完全排除之風險，再設置護罩、聯鎖、感應裝置或緊急停止等安全防護措施；對仍存在之剩餘風險，則透過警告標示、操作說明、教育訓練及個人防護具加以管理。

各項評估結果應記錄於機械設備風險評估表中可參考圖 4 所示。表單主要包括編號及名稱、危害類別與影響、現有防護措施、控制前風險、降低風險措施，以及控制後預估風險等六項內容。針對第 5 級及第 6 級高度風險項目，應提出改善措施及執行期程，並於完成改善後重新評估風險等級，以確認風險是否已降低至可接受範圍。

表 1 風險等級評量因子及其程度判定

風險等級評量因子	危害程度	
傷害嚴重度（S）	S1	表示輕微傷害或危害，通常是可復原的。 例如：割傷、劃傷、挫傷、碰傷或腫脹等
	S2	表示重度傷害，通常不可復原，甚至是致命的，例如：急性肌肉骨骼損傷（MST）、失能、死亡等
暴露危害的程度及頻率（F）	F1	表示輪班作業期間暴露兩次以下（含兩次）或更少，或是輪班作業期間總暴露時間 15 分鐘以下
	F2	表示輪班作業期間暴露超過兩次（不含兩次），或是輪班作業期間總暴露時間超過 15 分鐘

風險等級評量因子	危害程度	
事件發生的機率（O）	O1	表示成熟的且健全的技術，可預防或辨識危害的安全防護多，因此事件發生的機率極低
	O2	表示 1 年觀測到兩次以下（含兩次）的技術失效，因此事件發生機率低
	O3	表示技術失效頻繁發生，至少每半年發生 1 次以上（含 1 次），因此事件發生機率高
避免傷害的可能性（A）	A1	表示可能避免傷害或危害是可以控制的
	A2	表示不可能避免傷害

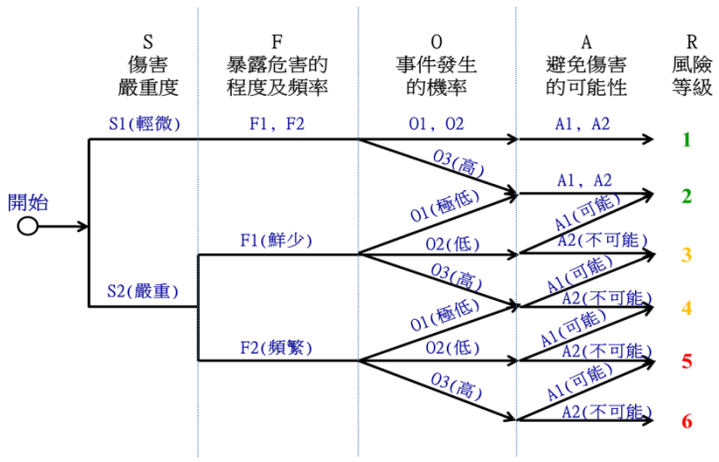


圖 2　風險等級判定

表 2　風險等級及其處置方式

風險等級		處置方式
1	低度風險	此類風險並不會造成立即性且重大之危害，建議維持現況，必要時定期檢點或監測觀察。
2		
3	中度風險	此等級風險代表有一定程度的機率發生危害事件或是危害發生的嚴重度高，建議定期監測或檢點安全相關防護措施，必要時提出改善或預防措施。
4		
5	高度風險	此等級之風險代表發生立即性或嚴重性的危害風險極高，務必針對潛在危害源進行工程或管理控制及改善措施，以降低發生重大傷害的風險。
6		

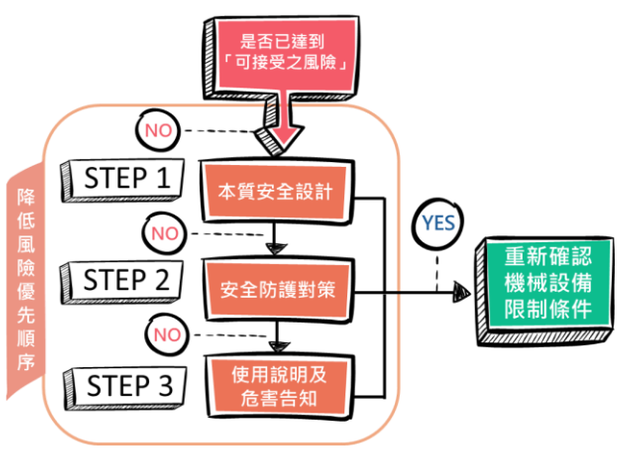


圖 3　降低風險優先順序及流程

1.編號及名稱			2.危害類型、原因與影響				3.現有防護設施			4.控制前預估風險					5.降低風險所採取之控制措施	6.控制後預估風險				
編號	工作名稱 (ISO 12100 Tab B.3)	危害區域或說明	危害大類 (ISO 12100 Tab B.1)	失效原因(請從動力源管制、Fail Safe, 硬體失效、軟體失效、製程特性、人為操作失誤、外力環境、天然災害等方向思考)	危害類型 (TW)	可能造成影響之情境描述	工程控制 (含偵測或建議)	管理控制	個人防護具	嚴重性 (S1, S2)	暴露層度及頻率 (F1, F2)	事件發生機率 (O1, O2, O3)	避免傷害之可能性 (A1, A2)	風險指標 (1-6)		嚴重性 (S1 ,S2)	暴露層度及頻率 (F1, F2)	事件發生機率 (O1 . O2, O3)	避免傷害之可能性 (A1 .	風險指標 (1-6)
T	Transport (運送)																			
T1	– Lifting (舉升)		機械危害	物體重心調整不佳	物體墜落	可能導致人員被壓重傷或死亡		操作手冊中之"安裝注意事項"：有談到吊掛及運送	安全帽及安全鞋	S2	F1	O2	A1	2						
		運送動線或使用工廠內	機械危害	(1)吊升設備之掛鈎或纜繩斷裂	物體墜落	可能導致人員被壓重傷或死亡		合作代理商	安全帽及安全鞋	S2	F1	O2	A2	3	吊升設備下方之動線嚴禁人員進出，並有專人設立警告標示及警戒	S2	F1	O2	A1	2
T2	– Loading (加載)					由代理商商處理		於操作手冊載明搬運SOP(含機台重心之調整)												
T3	– Packing (包裝)	製造廠	機械危害	手工具人為操作不當	切割	可能導致人員肢體輕傷				S1	F1	O1	A1	1						

圖 4　機械設備風險評估表單（範例）

五、機械設備安全標準建立程序

完成危害辨識、風險等級判定及風險降低措施研擬後，本研究彙整各項分析結果，並依機械設備之結構、功能、操作方式及使用情境，將危害預防措施轉化為具體且可供查核之安全要求。

安全標準草案完成後，邀集產業團體、設備製造商、使用端事業單位及機械安全專家共同檢視，確認其技術可行性及產業適用性，並依各方意見修正後定稿，作為後續設備改善及確效認證之查核依據。

六、機械設備確效認證程序

完成機械設備安全標準後，進一步協助產業團體建立確效認證制度，包括申請受理、文件審查、現場查核及證明核發等作業程序，並完成相關表單及查核基準之建置。

制度完成後，由產業團體依既定程序自主公告申請方式、辦理流程及應備資料，受理設備製造商提出申請。申請資料經文件審查確認完整並符合相關要求後，始進行現場設備查核；如有不符合項目，由申請廠商於規定期限內完成補正或改善後再辦理複查。經確認符合安全標準者，由產業團體核發確效認證證明，供設備製造商作為產品安全品質之佐證，並提供使用端於採購及驗收時參考。

參、機械設備安全標準確效認證機制之推動成果

一、安全標準建立成果

2019 年至 2025 年間共與 6 個產業團體合作，完成 10 項高風險機械設備安全標準，可參考表 3 所示，涵蓋電子零組件、金屬製品及機械設備等產業。考量各類設備之製程目的、結構及操作方式不同，安全標準係在共同風險評估架構下，依設備特性將機械安全原則轉化為具體且可供查核之安全要求。

安全標準可供設備製造商於設計、製造時參考，並提供使用端作為設備採購及驗收之依據，使風險評估及安全防護要求得以落實於源頭階段。

二、確效認證推動成果

2021 年至 2025 年間共完成 12 家設備製造商、12 種設備之確效認證，可參考表 3 所示。申請廠商依設備安全標準完成自評並提出相關資料，經文件審查通過後，再進行現場設備查核，以確認設備之安全防護及相關功能是否符合安全標準。

查核如有不符合項目，由申請廠商於規定期限內完成補正或改善後，再辦理複查；經確

認符合安全標準者，由產業團體核發確效認證證明，供設備製造商作為產品安全品質之佐證，並提供使用端於設備採購及驗收時參考。

表 3　2019 年至 2025 年安全標準及確效認證推動成果

成果項目	推動期間	完成數量	推動內容
合作產業團體	2019–2025 年	6 個	建立產業參與及制度承接平台
機械設備安全標準	2019–2025 年	10 項	將風險評估轉化為設備安全要求
參與確效廠商	2021–2025 年	12 家	促使製造商自主改善與申請
確效認證設備	2021–2025 年	12 種	以實機確認安全標準落實情形

三、產業參與及持續推動情形

推動期間，產業公協會協助整合設備製造商與使用端需求，參與安全標準研議，並依建置完成之確效認證制度辦理申請受理及查核等作業。合作團體於建置流程完成後，仍持續自主辦理確效認證，亦有設備製造商主動提出申請，顯示相關制度已具產業自主運作及持續推動之基礎。

肆、產業自主安全管理模式討論

一、由使用端防護轉向設備源頭管理

現行機械安全管理若僅著重於設備使用端，常於設備安裝或投入使用後才發現防護不足，此時可能面臨設備空間受限、控制系統不易修改及停機改善成本較高等問題。本研究透過風險評估、安全標準及確效認證，將危害辨識與風險降低提前至設備設計及製造階段，符合《職業安全衛生法》第 5 條第 2 項及 ISO 12100 所揭示之源頭預防精神。

此模式並非取代雇主對設備操作、維護及管理之責任，而是由製造端提供較安全的設備初始條件，降低使用端於設備進場後追加改善之需求，使機械安全管理由事故後補強逐步轉向設計源頭預防。

二、產業團體作為推動平台

未納入法定指定列管範圍之專用設備種類繁多，且各產業之製程、設備結構及操作方式差異甚大，若完全由政府逐項訂定強制規範，可能面臨技術調查期長、更新速度不足及產業細節不易涵蓋等限制。

產業團體熟悉會員設備、製程需求及市場發展，可協助整合設備製造商與使用端意見，參與安全標準研議，並承接申請受理、查核協調及標準維護等工作。透過團體參與，可使安全要求由政府計劃推動逐步轉化為產業共同規範，提升制度之產業認同及持續運作能力。

三、確效認證與採購機制之連結

確效認證除用以確認設備是否符合安全標準外，亦可作為設備製造商展現產品安全設計能力之依據，並提供使用端於採購及驗收時辨識設備安全性能。

當使用端將安全標準或確效證明納入採購、驗收及供應商評選條件時，可形成市場端對安全設備之需求，促使製造商主動改善產品並申請認證。此一由使用端採購需求帶動製造端安全改善之機制，是確效認證由政府計劃轉化為產業自主運作的重要條件。

伍、結論與後續推動建議

本研究以 2019 年至 2025 年間高風險機械設備安全標準及確效認證之推動經驗，建構由設備篩選、風險評估、安全標準、確效認證及產業承接所組成之自主安全管理模式。推動期間與 6 個產業團體合作，完成 10 項機械設備安全標準；2021 年至 2025 年間完成 12 家設備製造商、12 種設備之確效認證。部分產業團體於計

劃結束後仍持續辦理，並有設備製造商主動申請，顯示制度已具產業自主運作之基礎。

研究結果顯示，針對未納入法定指定列管範圍，但具有明確危害及產業需求之機械設備，可透過風險評估建立安全標準，再由產業團體承接確效認證機制，補充強制法規難以逐項涵蓋之管理缺口。部分設備於安全標準建立後，職災件數呈下降趨勢，雖尚無法完全歸因於本制度，仍可作為後續推動及成效追蹤之參考。

此模式將安全管理由設備使用後之改善，前移至設計、製造、採購及驗收階段，並串聯設備製造商、產業團體及使用端，形成兼具源頭管理與市場導向之自主安全管理架構。後續可持續擴大高風險設備種類，定期檢討安全標準，並鼓勵使用端將確效證明納入採購及驗收條件，以提升制度持續運作及推廣應用之可行性。

參考文獻

［1］ 台灣地區勞動主管機關（2025），職業安全衛生法, 台灣地區勞動主管機關。

［2］ 台灣地區勞動主管機關（2022）, 機械設備器具安全標準, 台灣地區勞動主管機關。

［3］ 台灣地區勞動主管機關（2020）, 機械設備器具安全資訊申報登錄辦法, 台灣地區勞動主管機關職業安全衛生署。

［4］ 中華安全衛生協會（2019—2025）, 高風險機械設備安全標準及確效認證推動計劃相關成果資料, 中華安全衛生協會。

［5］ International Labour Organization（2013）, Safety and Health in the Use of Machinery：ILO Code of Practice, International Labour Office, Geneva.

［6］ International Organization for Standardization（2010）, ISO 12100:2010 Safety of Machinery—General Principles for Design—Risk Assessment and Risk Reduction, International Organization for Standardization, Geneva.

［7］ International Organization for Standardization（2015）, ISO 13849-1:2015 Safety of Machinery—Safety-related Parts of Control Systems—Part 1: General Principles for Design, International Organization for Standardization, Geneva.

［8］ International Organization for Standardization, ISO 13850 Safety of Machinery—Emergency Stop Function—Principles for Design, International Organization for Standardization, Geneva.

［9］ International Organization for Standardization, ISO 13855 Safety of Machinery—Positioning of Safeguards with Respect to the Approach Speeds of Parts of the Human Body, International Organization for Standardization, Geneva.

［10］ International Organization for Standardization, ISO 13857 Safety of Machinery—Safety Distances to Prevent Hazard Zones Being Reached by Upper and Lower Limbs, International Organization for Standardization, Geneva.

［11］ International Organization for Standardization, ISO 14119 Safety of Machinery—Interlocking Devices Associated with Guards—Principles for Design and Selection, International Organization for Standardization, Geneva.

［12］ International Organization for Standardization, ISO 14120 Safety of Machinery—Guards—General Requirements for the Design and Construction of Fixed and Movable Guards, International Organization for Standardization, Geneva.

［13］ International Electrotechnical Commission（2016）, IEC 60204-1:2016 Safety of Machinery—Electrical Equipment of Machines—Part 1：General Requirements, International Electrotechnical Commission, Geneva.

［14］ International Electrotechnical Commission, IEC 61496 Safety of Machinery—Electro-sensitive Protective Equipment, International Electrotechnical Commission, Geneva.

應用擴增實境技術優化堆高機操作者職能可行性研究

楊欣宸
中華安全衛生協會

摘　要： 堆高機為製造、倉儲、物流及石化等場域常用之動力搬運設備，作業過程涉及車輛移動、貨物穩定、視線死角、人車交會、路線規劃與現場管理等多重風險；若操作人員未能即時辨識危害並採取正確行為，易造成碰撞、翻覆、物體飛落、崩塌或輾壓等重大職災。

在台灣地區，堆高機操作人員的教育訓練雖已建立操作資格與在職複訓制度，惟高風險情境不易於實體場域安全重現，且傳統課程對危害辨識、風險感知及互動式回饋仍有不足。本研究以擴增實境（AR）導入堆高機職能訓練為主題，運用虛擬堆高機訓練系統，設計「搬運物品未綁妥」、「車速過快翻覆」及「路線規劃不良撞擊」等職災情境，並以持有堆高機操作技術士證之在職操作人員為對象，蒐集 100 份有效問卷。

研究透過問卷調查與資料分析，從受訓者之風險感知、安全認知、學習感受及訓練導入可行性等面向進行探討。分析結果顯示，受訓者對 AR 導入堆高機複訓整體持正向評價，認為情境式模擬有助於具體呈現傳統課程難以重現之危害情境，並可提升其對操作風險、事故後果與安全行為之理解。研究建議 AR 可作為傳統實體訓練之輔助工具，補足高風險情境難以安全演練之限制，並提供教育訓練優化及產業安全人才培育之參考。

關鍵詞： 堆高機、擴增實境、體感訓練、教育訓練

壹、前　言

動力堆高機具備裝卸、搬運、堆疊及短距離轉運等功能，已成為產業現場常用的物料搬運設備，堆高機具有自重高、活動範圍大及作業動線複雜等特性，事故發生時常伴隨碰撞、翻覆、貨物倒塌、物體飛落或輾壓等嚴重後果。依據台灣地區勞動部門勞動及職業安全衛生研究所統計指出，堆高機重大職業災害中，人為因素占九成以上，主要災害類型包括被撞、崩塌、墜落及物體飛落；案例分析亦顯示，96.1%的案件涉及不安全行為或不安全行為與不安全狀態並存（勞動部門勞動及職業安全衛生研究所，2025）。由此可知，事故預防不僅取決於設備防護，也與操作人員是否能即時辨識危害、判斷風險及採取正確行為密切相關。

依台灣地區現行制度，荷重一公噸以上堆高機操作人員須完成教育訓練並通過技術士技能檢定，取得資格後每三年至少接受三小時在職教育訓練，雖然此制度可以建立基本操作門檻，但既有研究指出，受限於場地、設備及實習時間，部分學員取得證照後仍可能缺乏足夠的實機熟練度；在職複訓亦多以法規宣導、事故案例及投影片講授為主，較難讓受訓者實際經歷突發狀況（張志祥、嚴嘉錚，2021）。對長期從事重複作業的人員而言，經驗雖可提升熟練度，也可能形成慣性操作與風險低估，因此複訓內容除更新知識外，亦應強化危害辨識與安全決策。

過去研究也發現，沉浸式互動情境教育之知識內化成效，遠高於傳統靜態聽講課程（余文德、王琨淇、吳獻堂、劉國青，2022）；過模擬體驗高危害作業，以提升勞工危險辨識、緊急應變處置，有效達到教育訓練與預防危害（林怡慧，2021）；國外堆高機研究亦顯示，高擬真模擬器有助於安全訓練、操作練習及行為觀察（Yuen et al.，2010；Islam et al，2024）。擴增實境可在真實環境或實體操作介面上疊加數位資訊，兼具現場感、互動性及低風險重複練習之優勢，適合用於呈現實體訓練不宜直接演練的翻覆、撞擊及貨物倒塌等事故情境。

本研究以擴增實境技術導入堆高機複訓為主題，探討受訓者對傳統實體訓練侷限、系統擬真度、技能學習、安全認知及未來導入意願之評價，並分析不同受訓者類型的認知差異與系統改善重點，以評估其作為堆高機職能訓練輔助工具之可行性。研究所稱之職能不只包含車輛操控，也涵蓋作業前檢查、路徑判斷、貨物穩定、危害辨識、異常反應與安全態度；因此評估重點並非單純詢問系統是否新穎，而是檢視其能否補足現行複訓在高風險情境、安全試錯與學習回饋上的缺口。

貳、研究方法

一、研究對象與訓練系統

研究對象為參加堆高機操作人員在職複訓之持證人員，採立意抽樣。納入條件為持有荷重一公噸以上堆高機操作技術士證、完成模擬訓練體驗並自願填答。問卷於體驗後當場發放與回收，共取得 100 份有效樣本。受測者以男性 89 人為主，女性 11 人；年齡分布為 20 至 30 歲 15 人、30 至 40 歲 50 人、40 歲以上 35 人。工作年資原分為 0 至 5 年、6 至 10 年、11 至 20 年及 21 至 30 年，為維持各組樣本數並利於單因子變異數分析，將前兩類合併為 0 至 10 年組，最終分為 0 至 10 年 27 人、11 至 20 年 51 人及 21 至 30 年 22 人。

訓練設備以 2.5 噸堆高機駕駛艙為原型，整合方向控制、操作桿、腳踏設施、環繞顯示螢幕及可模擬橫搖、俯仰與旋轉之動感平台。訓練內容包含作業前性能檢查、S 型道路基本駕駛、倉儲裝卸作業及職業災害情境體驗。事故模組依實務常見災因設計三類情境：（1）搬運物品未綁妥導致貨物倒塌；（2）車速過快轉彎造成堆高機翻覆；（3）路線規劃不良造成作業人員遭撞擊。系統於事故發生後呈現原因與防止對策，再回到事故前示範安全操作，使受訓者可在低風險環境中觀察錯誤行為與事故後果。

(a) 受訓者操作模擬系統　　(b) 堆高機模擬訓練設備

圖 1　堆高機模擬訓練系統與實際操作畫面

二、問卷架構與資料方法

問卷採李克特五點量表，共 27 題，分為實體訓練侷限、AR 系統擬真度、AR 技能學習成效、AR 安全認知提升及未來導入意願五個構面。問卷初稿主管機關、學術界及產業界共 18 位專家進行內容效度審查，確認題意、構面代表性與實務適切性後形成正式問卷。依 Kirkpatrick 模式，本研究將 AR 系統擬真度及未來導入意願歸入反應層次，將技能學習成效及安全認知提升歸入學習層次；實體訓練侷限則作為訓練需求背景。行為層次與結果層次須追蹤實際工作行為、操作績效或職災結果，因本研究為單次體驗後調查，故未納入評估。

表 1　Kirkpatrick 訓練成效評估架構

評估層次	構面	題項	評估內容
訓練需求	實體訓練侷限	Q1–Q5	熟練度、危害理解、高風險情境、突發狀況與安全疑慮。
反應層次	AR 系統擬真度	Q6–Q11	畫面、流程、場域、音效、即時回饋及危險場景模擬。
反應層次	未來導入意願	Q23–Q27	入門工具、降低風險、再次使用及複訓應用。
學習層次	AR 技能學習成效	Q12–Q16	錯誤修正、流程熟悉、技能應用、重複練習及反應速度。
學習層次	AR 安全認知提升	Q17–Q22	事故類型、關鍵行為、安全原則、不安全操作及預防方式。

資料分析先以平均數及標準差描述各題項與構面表現，並以 Cronbach's α 檢視主要學習構面之內部一致性。接著以單因子變異數分析比較三個工作年資組在反應及學習層次的平均差異；若整體檢定達顯著水準，再採 Scheffé 法進行事後比較。顯著水準設定為 $\alpha = .05$。資料中有兩筆單題漏答，該題平均採有效樣本計算，層次分數則以受測者可用題項之平均值計算。

參、結果與討論

一、整體評價與反應層次

整體而言，受測者認為現行實體訓練仍有改善空間，實體訓練侷限構面平均為 4.42 分（SD=0.30）。其中「無法呈現日常作業常見突發狀況」平均 4.88 分，「無法模擬翻覆、盲區等高風險情境」平均 4.87 分，顯示受測者最明確感受到的缺口，並非一般課程內容不足，而是事故情境及突發狀況難以在實體訓練中安全重現。相較之下，「課程講解無法有效提升危害理解」平均 3.32 分，表示受測者並未全面否定傳統講授，而是認為講授仍具有基礎知識傳遞功能，但不足以取代情境體驗。

反應層次由 AR 系統擬真度與未來導入意願構成，整體平均為 4.67 分（SD=0.16）。AR 系統擬真度平均 4.43 分，其中「能有效模擬實體訓練難以呈現的危險場景」平均 4.84 分最高；畫面接近真實操作情境平均 4.21 分最低，顯示受測者主要肯定系統重現危害的能力，但對視覺擬真仍保有改善期待。未來導入意願平均 4.95 分，「能降低實體訓練時的受傷風險」100 名受測者皆給予 5 分，呈現明顯天花板效應；「可作為實體訓練前的入門工具」平均 4.97 分。結果表示受訓者高度接受 AR 作為輔助訓練，但其認同重點較偏向降低暴露風險與補充實體訓練，而非完全取代實機操作。

表 2　各構面描述性統計

構面	題數	平均數	標準差
實體訓練侷限	5	4.42	0.30
AR 系統擬真度	6	4.43	0.24
AR 技能學習成效	5	4.68	0.36
AR 安全認知提升	6	4.87	0.29
未來導入意願	5	4.95	0.13

二、學習層次

學習層次由 AR 技能學習成效及 AR 安全認知提升構成，整體平均為 4.78 分（SD＝0.28）。技能學習成效平均 4.68 分（SD＝0.36），Cronbach's α＝.763；其中「幫助更正錯誤操作習慣」平均 4.82 分最高，「熟悉前進、後退、貨叉升降及轉彎流程」平均 4.55 分最低。安全認知提升平均 4.87 分（SD＝0.29），Cronbach's α＝.909，顯示題項具有良好內部一致性；「理解常見堆高機重大事故類型」平均 4.91 分最高，理解不安全操作、安全體驗危險情境及理解事故前兆與預防方式均為 4.87 分。相較技能熟練，受訓者對安全認知效益的評價更高，顯示模擬系統的主要優勢在於事故視覺化、危害辨識及錯誤後果回饋。

三、不同工作年資組之差異

工作年資組別比較顯示，反應層次達顯著差異，F（2，97）＝7.77，p＝.001。0 至 10 年組平均 4.72 分，11 至 20 年組 4.68 分，21 至 30 年組 4.56 分；Scheff é 事後比較顯示，0 至 10 年與 11 至 20 年組均顯著高於 21 至 30 年組，而前兩組間無顯著差異。學習層次亦達顯著差異，F（2，97）＝11.22，p＜.001；三組平均依序為 4.90、4.81 及 4.57 分，事後比較結果同樣顯示 21 至 30 年組低於其餘兩組。至於實體訓練侷限構面，三組差異未達顯著，F（2，97）＝2.71，p＝.072，表示不同年資人員對傳統訓練缺口具有相近看法。

表 3　不同工作年資組在反應與學習層次之變異數分析

評估層次	0 至 10 年（n＝27）	11 至 20 年（n＝51）	21 至 30 年（n＝22）	F	p	Scheff é
反應層次	4.72（0.12）	4.68（0.12）	4.56（0.21）	7.77	.001	A＞C；B＞C
學習層次	4.90（0.14）	4.81（0.22）	4.57（0.39）	11.22	＜.001	A＞C；B＞C

註：表中數值為平均數（標準差）；A＝0 至 10 年，B＝11 至 20 年，C＝21 至 30 年。

資深組在反應與學習層次的評價較低，可能反映其長期實務經驗形成較明確的操作手感、場域判斷及設備差異基準，因此對畫面、操控回饋及技能移轉的要求較高。這樣的結果不宜解讀為資深人員排斥科技，因為 21 至 30 年組反應與學習平均仍高於 4.5 分，而應視為其對訓練真實性與實務連結較為謹慎。訓練設計若只提供一次性體驗，可能較容易獲得新鮮感與安全性認同，卻不足以回應資深操作者對操作細節的期待。

肆、結　論

本研究以 100 位持有技術士證之在職堆高機操作人員為對象，於其完成 XR CENTER 堆高機模擬訓練體驗後施測，依 Kirkpatrick 訓練成效評估模式，分析受測者在反應層次與學習層次之體驗結果，研究發現受測者普遍認為現行實體訓練較難呈現翻覆、撞擊、視線死角及貨物倒塌等高風險或突發情境，並對 AR 模擬系統在降低訓練暴露風險、重現事故情境及協助理解不安全操作後果等面向給予正向評價。相較於技能熟練，受測者對安全認知提升之評價較為明確，顯示 AR 情境模擬較適合用於危害辨識、事故原因說明及安全觀念強化。

不同工作年資組在反應與學習層次均呈現顯著差異，其中 21 至 30 年組之平均評價低於 0 至 10 年及 11 至 20 年組。這樣的結果可能反映資深操作者已形成較明確的操作經驗與場域判斷基準，因此對模擬畫面、操作回饋及實務連結具有較高的期待。實務導入時，建議將 AR 定位為既有教育訓練的輔助工具，並依「基礎知識說明、AR 危害情境體驗、系統回饋與討論、

實機操作驗證」安排整合式訓練流程。針對資深操作者，可增加不同載重、路面條件、視線遮蔽、狹窄空間及人車交會等進階情境，並提供反應時間、錯誤次數、碰撞位置及操作偏移等具體回饋，以提升訓練內容與實際作業需求的契合度。

本研究採單一場域、立意抽樣及單次體驗後自陳問卷，研究結果主要呈現受測者對訓練系統之接受程度與自我感受，尚無法直接反映實際操作技能、工作行為改變或職業災害降低成效。後續研究可採前後測設計、延宕測驗或不同訓練模式之比較，並加入實機操作評分、危害辨識測驗、操作錯誤紀錄及現場行為追蹤，以進一步檢驗 AR 輔助訓練的技能移轉與持續成效。

參考文獻

［1］ 台灣地區勞動主管機關（2025）。操作堆高機應留意周遭環境, 善用科技輔助, 可降低職災風險。

［2］ 余文德、王琨淇、吳獻堂、劉國青（2022）。以互動式 VR 體驗學習系統輔助工地高危害職安教育之效益評估。技術學刊, 37（3）, 149–164。

［3］ 張志祥、嚴嘉錚（2021）。技術士技能檢定堆高機操作訓練。教育大市集。

［4］ Islam, M. S., Zahabi, S. J. N., Kim, S., Lau, N., Nussbaum, M. A., & Lim, S.（2024）. Changes in forklift driving performance and postures among novices resulting from training using a high–fidelity virtual reality simulator. Applied Ergonomics, 117, 104223.

［5］ Kirkpatrick, D. L., & Kirkpatrick, J. D.（2006）. Evaluating training programs: The four levels（3rd ed.）. Berrett–Koehler.

［6］ Yuen, K. K., Choi, S. H., & Yang, X. B.（2010）. A full–immersive CAVE–based VR simulation system of forklift truck operations for safety training. Computer–Aided Design and Applications, 7（2）, 235–245.

TRIZ 方法於堆高機職業災害預防與改善之研究

曾宇群，許宏德
高雄科技大學　工學院

摘　要：堆高機具有機動性高、搬運效率佳及適用範圍廣等特性，廣泛應用於製造、物流、倉儲及運輸等產業。然而，堆高機作業常涉及人車混合作業環境，易因視線遮蔽、作業動線規劃不當及人為疏失等因素而導致職業災害。依台灣地區統計資料顯示，2011 年至 2022 年間，以堆高機為媒介物之職業死亡災害累計達 135 件，平均每年約造成 11 名勞工死亡，其中以被撞事故、物體倒塌或崩塌，以及墜落或滾落事故為主要災害類型。本研究導入 TRIZ（Theory of Inventive Problem Solving）創新問題解決理論，以 2021 年 5 件重大堆高機被撞，死亡事故案例為研究對象，透過事故成因分析、工程參數轉換及矛盾矩陣應用，建構「堆高機事故預防 TRIZ 對應表」及「堆高機災害事故預防矛盾矩陣表」。研究結果顯示，TRIZ 可有效將事故成因轉換為系統化改善策略，TRIZ 可有效將事故成因轉換為系統化改善策略，並提出人車分流、視線改善、感測警示及智慧安全技術等預防措施。研究進一步建立「問題定義、事故對應、矛盾分析及創意法則應用」之標準化分析流程，可協助企業快速辨識事故風險、擬定改善對策並提升安全管理效能。研究成果顯示 TRIZ 應用於職業災害分析之可行性外，亦可作為企業推動智慧安全管理及相關政策制定之參考依據。

關鍵詞：堆高機、TRIZ、矛盾矩陣、創意法則

壹、前　言

堆高機具備短距離搬運的便利性與機動性，已廣泛應用於製造、運輸及倉儲等產業，成為作業現場不可或缺的機械。近年來，隨著消費模式轉型及電子商務平台快速發展，物流中心、倉儲設施與大型商業場域持續擴增，進一步推升堆高機使用頻率與作業密度。然而，堆高機作業高度依賴人機互動，且多於人車混流之環境中進行，使其成為工作場所運輸事故的重要風險來源之一。

依據國際統計資料顯示，即使在職業安全管理制度相對成熟的國家，堆高機事故仍對勞工安全造成顯著衝擊。以美國為例，2011 至 2024 年間，堆高機相關事故平均每年造成約 72 人死亡，並衍生約 7,382 件需離開工作崗位之職業傷害事故，顯示其對勞工生命安全與工作能力具有重大影響（National Safety Council，2025；Bureau of Labor Statistics，2025）。相同趨勢亦見於英國，在各類工作場所運輸事故中，堆高機事故約佔整體的 25%，且每年約發生 1,300 件嚴重傷害事故，凸顯堆高機作業對職場安全的高度威脅（British Safety Council，2023；Health and Safety Executive，2023）。在台灣地區，勞動部門統計資料顯示，2011 至 2022 年間，以堆高機為媒介物之職業死亡災害累計達 135 起，平均每年約有 11 名勞工因堆高機事故死亡。其事故類型以「被撞事故」（28.91%）、「物體倒塌或崩塌」（22.66%），以及「墜落或滾落事故」

（17.97%）為主要型態，顯示堆高機作業同樣對台灣地區職場安全構成顯著威脅（勞動部門，2024）。

目前台灣地區職業災害原因分析多區分為直接原因、間接原因（包含不安全行為與不安全環境狀態）及根本原因等三個層次。雖然相關法規已針對堆高機機械安全標準、操作人員資格與教育訓練，以及設備定期檢查等面向加以規範，但現行防災對策多停留於法規層次，缺乏系統性且具體可行之安全管理機制，供事業單位於實務現場有效落實。相關研究亦指出，現行堆高機安全管理措施多採取單一介入方式，缺乏將事故成因、人為因素與工程控制整合之系統性架構，使得安全對策難以持續落實於現場（Larsson & Rechnitzer，1994）。

基於上述背景，本研究旨在導入 TRIZ 創新問題解決理論，透過系統化分析與創新思考模式，建構具實務可行性的堆高機作業安全管理機制。研究將深入探討堆高機事故之關鍵成因，並提出可具體執行之改善策略，以期有效降低堆高機相關職業災害風險，提升工作場所整體安全水準。因此，如何建立系統化且具實務可行性的安全管理機制，成為亟需探討的課題。

貳、研究方法

堆高機作業長期被視為製造與倉儲環境中之高風險作業，常見事故型態包含行人碰撞、貨物掉落及車輛翻覆，其中以被撞事故對作業人員所造成之傷害最為常見。既有研究指出，多數堆高機事故與操作行為及人因因素高度相關，僅依賴管理規範與教育訓練，仍難以有效降低事故發生率，顯示工程與系統層面的安全介入具有必要性（Milanowicz et al.，2018）。近年來，部分研究嘗試透過創新技術與訓練方式補強傳統安全管理之不足。例如，沉浸式技術可應用於安全訓練與風險模擬，以提升作業人員對危險情境之辨識能力（Żuchowicz & Lewczuk，2025）；體驗式安全訓練亦被證實能有效增進作業人員之風險預知能力，其成效顯著優於傳統講授式教學（Tseng & Hsu，2022）。然而，這些方法多著重於單一面向，缺乏整合事故成因與系統性改善策略的完整架構。

基於此，本研究引入 TRIZ（Theory of Inventive Problem Solving，發明問題解決理論）作為分析工具。TRIZ 為一套系統化創新方法，能用以識別系統中的矛盾關係，並透過矛盾矩陣與創新原則產生具體改善構想。過去研究指出，TRIZ 尤其適用於處理涉及效率與安全權衡之複雜系統問題，能協助使用者在既有限制條件下發展具創新性且可行之改善方案（Mann，2007）。相關研究亦顯示，TRIZ 可有效應用於物料搬運系統之改善，透過系統性設計降低堆高機使用需求，同時提升作業效率並降低職業災害風險（Wang et al.，2014）。此外，隨著智慧化物料搬運系統之發展，無人搬運車（Automated Guided Vehicles，AGVs）已能於無需人工操作的情況下穩定執行重複性搬運作業，有助於降低人為錯誤與工安風險（Adaptalift Group，2013）。本研究方法如下：

一、研究對象：

本研究以台灣地區勞工安全衛生研究所官方統計資料為基礎，蒐集並分析 2021 年間所發生之堆高機重大職業災害案例，事故類型以「被撞事故」為主要分析對象，共計 5 件如表 1 所示。研究首先依事故案例內容萃取造成事故之主要影響因素，並透過 TRIZ 矛盾矩陣方法，將所辨識之事故因素對應至 TRIZ 所定義之 39 項工程參數，以建立事故成因與系統矛盾之關聯性。接著，根據矛盾矩陣所對應之創新原則，結合 TRIZ40 條創新法則於非技術領域之應用意涵，建構「堆高機被撞災害事故預防之矛盾矩陣表」，作為後續提出事故預防與安全改

善策略之分析基礎。

表 1　堆高機被撞事故案例摘要表

編號	事故調查描述
01	罹災者自廠區西側行走至東側途中，因道路缺乏警示與動線規劃，遭視線受阻之堆高機撞擊，倒地昏迷送醫後傷重不治。
02	罹災者整理塑膠袋時，遭後方視線受遮蔽之堆高機撞擊，倒地送醫後傷重不治。
03	A 員駕駛堆高機因視線死角未察覺罹災者站立於後扶架綑綁布索，繼續行駛致罹災者遭夾擊受重傷，送醫後不治。
04	罹災者駕駛堆高機下車調整牙叉時，遭另一台倒退堆高機撞擊，左大腿出血送醫後傷重不治。
05	2 名勞工進行換包裝作業時，A 員駕駛啟動堆高機未察入檔狀況，堆高機瞬間前衝撞擊罹災者，送醫後傷重不治。

二、應用方法：

本研究參考 TRIZ 原始矛盾矩陣架構，依堆高機事故特性加以精簡與轉換，建構專屬於堆高機被撞災害事故預防之矛盾矩陣表。TRIZ 矛盾矩陣主要用以解決「技術矛盾」問題，即在改善某一系統特性時，可能同時導致另一特性惡化之情況，藉由系統性辨識矛盾衝突，提供相對應之創新解決原則，以協助產生具體改善方案。以堆高機事故預防為案例，所謂技術矛盾係指為改善某項安全或作業性能而採取的措施，卻可能導致其他性能下降或產生新的風險。例如在倉儲作業中，為減少堆高機撞擊行人事故，企業可能於轉角處加裝實體護欄，以提升人員防護能力。然而護欄設置後，可能造成堆高機駕駛視線受阻、轉彎空間縮小，反而增加車輛碰撞貨架或設備之風險。此時「提升人員安全性」與「維持良好視野及操作便利性」兩項目標之間即形成技術矛盾。TRIZ 方法的核心目的，即在於找出此類矛盾因素，並利用矛盾矩陣所對應之發明原則，尋求兼顧安全與效率的創新改善方案。

本研究係依事故主要致災因子，由兩位具職業安全衛生專業背景之研究者共同討論後，對應 TRIZ 39 項工程參數，並經交叉檢核確認，以降低參數判定偏差。重點在於建立事故分析與改善之標準化流程，TRIZ 工程參數係依事故核心問題及改善目標進行轉換，不同研究者可能產生不同之參數判定結果，但皆可透過相同分析架構獲得具有合理性之創新法則與改善方向。

三、研究流程：

本研究以原始 TRIZ 矛盾矩陣為基礎，結合堆高機重大職業災害案例分析結果，建構精簡化之「堆高機災害事故預防之矛盾矩陣表」。其研究流程如圖 1 所示，操作步驟如下：

（一）、問題定義：判定問題是否可透過直覺性方式解決；若可直接提出改善對策，則無須進行後續分析。

（二）、堆高機事故預防 TRIZ 對應表：若問題無法直覺解決，則查詢「堆高機事故預防 TRIZ 對應表」，直接找到矛盾技術問題。

（三）、堆高機災害事故預防之矛盾矩陣表：找出欲改善特性與須避免惡化之特性，並取得對應創新原則。

（四）、創意原則應用與方案形成：依取得之創新原則，聯想並選擇具實務可行性之改善方案。

透過上述四步驟之操作流程，可協助事業單位在面對堆高機作業安全問題時，系統性地分析事故成因並快速擬定改善對策，以提升災害預防效率並縮短問題解決時間。可供企業安全管理人員作為事故分析標準作業程序，亦能有效提升職業安全對策於組織層級之實務可行性。

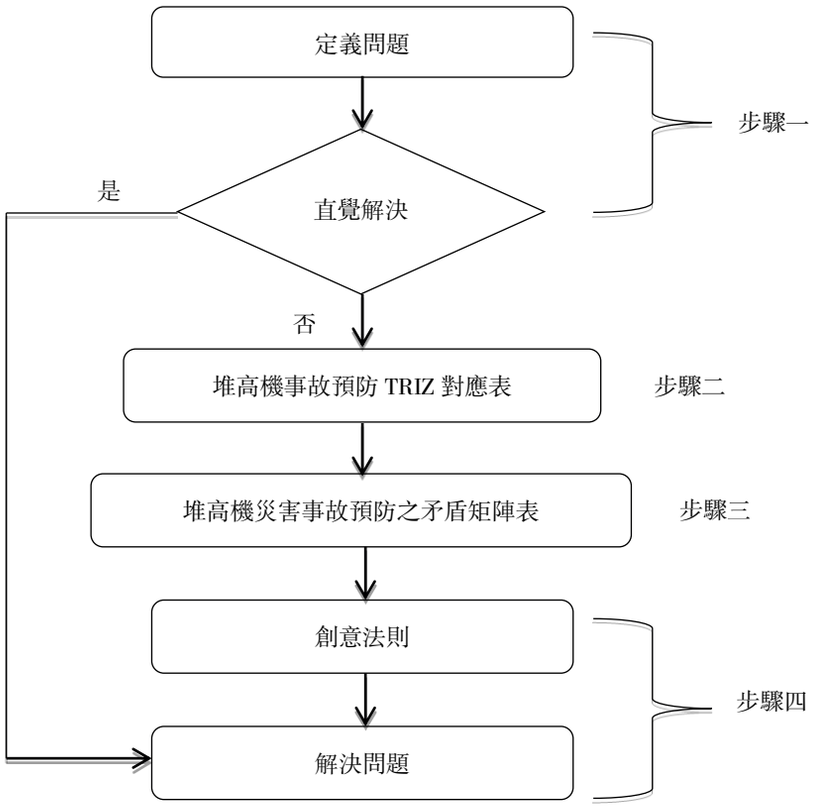


圖 1　本研究以 TRIZ 為基礎之堆高機災害事故預防分析流程

參、研究結果

為驗證所建構之「堆高機災害事故預防之矛盾矩陣表」之可行性，本研究以表 1 編號 01 之被撞事故進行分析，事故發生主因為貨物堆疊過高造成駕駛視線受阻，加上作業場所未規劃人車分流動線，使行人進入堆高機作業範圍而遭撞擊。另一方面，企業為提高搬運效率及減少搬運次數，通常傾向增加單次搬運量，因此形成提升搬運效率與降低作業風險間之技術矛盾。依據 TRIZ 矛盾矩陣分析，本研究將欲改善之工程參數為「07 移動物體的體積」，須避免惡化之工程參數為「33 可操作性」，經查詢矛盾矩陣後，獲得四項建議創新法則，並轉換為適用於堆高機安全管理之改善策略，如表 2 所示。

依據 TRIZ 分析結果，本研究針對堆高機視線遮蔽引發之操作技術矛盾，提出四項安全改善措施。其中，法則 15（動態性）採用垂直升降或旋轉駕駛艙，賦予系統靈活位移以主動擴展視野；法則 13（反向）打破車載偵測傳統，將感測器改置於路口區域，動靜對調實現場域主動雙向警示；法則 30（可撓性薄膜）改採 PET 鏡面板薄膜反射鏡，具備優異彈性以避免碰撞碎裂危害，黏貼於動線死角區域；法則 12（等勢原則）則建構雷射虛擬障壁，以光學防護邊界取代實體剛性阻擋，於無物理衝突下化解死角風險。

表 2　TRIZ 矛盾矩陣分析結果與改善策略

問題描述	改善參數	惡化參數	TRIZ 創新法則	改善策略
貨物堆疊過高造成視線遮蔽	07 移動物體體積	33 可操作性	15 動態性	垂直升降/旋轉駕駛艙

問題描述	改善參數	惡化參數	TRIZ 創新法則	改善策略
			13 反向	動靜對調，場域主動警示：偵測器置於路口區域（而非堆高機機上）
			30 可撓性薄膜	鍍膜可塑性塑料薄膜：PET 鏡面板製成反射鏡
			12 等勢原則	虛擬障壁：以光學虛擬屏障取代傳統剛性阻擋

一、堆高機事故預防 TRIZ 對應表：

本研究以案例 01 作為 TRIZ 分析示範，其餘案例亦依相同分析流程完成矛盾矩陣建構，

如表 3 堆高機事故預防 TRIZ 對應表。分析結果顯示，TRIZ 方法均能有效對應事故成因與創新法則，並據以提出具工程控制及管理改善意涵之預防策略，顯示本研究所建構之

分析流程具有良好的實務應用潛力。此結果顯示 TRIZ 不僅能提出工程控制措施，亦能

涵蓋管理制度與智慧技術介入。

表 3　堆高機事故預防 TRIZ 對應表

編號	事故調查描述	改善參數	惡化參數
01	因道路缺乏警示與動線規劃，遭視線受阻	07 移動物體的體積	33 可操作性
02	遭視線受遮蔽之堆高機撞擊（轉角處）	27 可靠性	25 時間浪費
03	因視線死角未察覺遭堆高機撞擊	27 可靠性	25 時間浪費
04	堆高機駕駛下車調整牙叉時，遭另一台倒退堆高機撞擊	27 可靠性	25 時間浪費
05	啟動堆高機未察入檔狀況，堆高機瞬間前衝撞擊	27 可靠性	36 設備複雜性

二、堆高機災害事故預防之矛盾矩陣表：

本研究依據堆高機被撞事故案例分析結果，將事故成因所對應之 TRIZ 工程參數進行彙整與篩選，建構「堆高機災害事故預防之矛盾矩陣表」如表 4 所示。該矩陣以事故改善過程中常見之技術矛盾為核心架構，將「欲改善參數」設置於縱軸，「避免惡化參數」設置於橫軸，藉由交叉比對方式呈現各項矛盾關係所對應之 TRIZ 創新法則。使用者可依事故情境快速辨識欲改善之安全特性，以及改善後可能產生之負面影響，再透過矩陣查詢適用之創新原則，以兼顧作業效率、安全性及操作便利性之改善策略，相較於傳統依賴經驗判斷之事故分析方法，本矩陣可提供系統化且標準化之決策依據，使事故預防措施之規劃更具一致性、可操作性及實務應用價值。

表 4　堆高機災害事故預防之矛盾矩陣表

避免惡化參數 → / 欲改善參數 ↓		25	33	36
		浪費時間	可操作性	設備複雜性
07	移動物體的體積	2 6 34 10	15 13 30 12	26 1
27	可靠性	10 30 4	27 17 40	13 35 1

肆、討論與結論

本研究之主要貢獻在於建構堆高機職業災害 TRIZ 分析架構，將事故調查結果轉換為 TRIZ 工程參數與技術矛盾，並結合控制層級原則提出改善策略，使事故分析由傳統經驗判斷提升為具系統性、標準化及可重複操作之決策流程。本研究導入 TRIZ 創新問題解決理論分析堆高機重大職業災害案例，結果顯示 TRIZ 不僅適用於產品設計領域，亦可有效應用於職業安全衛生事故分析。透過事故成因、工程參數、技術矛盾及創新法則之系統化轉換，可建立標準化分析流程，降低事故調查過度依賴個人經驗之限制。本研究建構之「堆高機事故預防 TRIZ 對應表」及「堆高機災害事故預防矛盾矩陣表」，可協助安全管理人員快速辨識事故問題並發展改善對策，使事故分析由經驗導向轉變為系統化決策模式。研究結果顯示，TRIZ 可有效連結工程控制、管理措施及智慧安全技術，具有良好的實務應用潛力。

一、研究成果：

（一）、建立「問題定義→TRIZ 對應→矛盾分析→改善策略」之標準化分析流程，可作為堆高機事故分析與改善作業之參考程序。

（二）、建構堆高機事故預防 TRIZ 對應表及矛盾矩陣表，可提升事故分析效率並縮短改善方案規劃時間。

（三）、運用 TRIZ 創新法則提出源頭管理、工程控制及智慧安全技術等多元改善策略，提升堆高機作業安全管理成效。

二、研究限制：

（一）、本研究僅以 2021 年重大職業災害之被撞事故為分析對象，尚未涵蓋物體倒塌或崩塌，以及墜落或滾落事故。

（二）、本研究著重於 TRIZ 分析架構之建構與可行性驗證，尚未進一步評估各項改善措施之實際成效。

三、未來研究方向：

（一）、擴大事故樣本數及分析年度，並納入不同類型堆高機職業災害進行驗證。

（二）、結合德菲法、AHP 或模糊理論，建立改善措施優先順序評估機制。

（三）、結合 AI 影像辨識、智慧堆高機及物聯網技術，建構主動式風險預警機制。

四、實務建議：

建議企業除持續強化教育訓練與安全管理制度外，應優先推動人車分流、視線改善、感測警示及智慧監控等措施，並結合工程控制與智慧科技應用，建立主動式風險管理機制，以降低堆高機職業災害發生風險。

參考文獻

［1］ National Safety Council（2025）, Injury Facts®: Work Safety – Forklifts, National Safety Council, Itasca, IL.

［2］ Health and Safety Executive（2023）, Workplace Transport Safety: Forklift Trucks, HSE, London, UK.

［3］ British Safety Council（2023）, Forklift Truck Safety and Accident Statistics in the UK, British Safety Council, London, UK.

［4］ Institute of Labor, Occupational Safety and Health, Ministry of Labor（2024）, Study on Safety Management Mechanisms for Powered Forklift Operations, Ministry of Labor, Taipei, Taiwan.

［5］ Milanowicz, M., Budziszewski, P. and Kędzior, K.（2018）, Numerical Analysis of Passive Safety Systems in Forklift Trucks, Safety Science, Vol. 101, pp. 98–107.

［6］ Żuchowicz, P. and Lewczuk, K.（2025）, Leveraging Immersive Technologies for Safety Evaluation in Forklift Operations, Applied Sciences, Vol. 15, No. 20.

［7］ Tseng, Y.–C. and Hsu, H.–T.（2022）, Investigating the Influence of Experiential Training on the Abil–

ity to Anticipate Risks of Caught-in Accidents, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, Vol. 28, No. 1, pp. 494-500.

[8] Adaptalift Group (2013), Forklifts vs. Automated Guided Vehicles, Australian Materials Handling Industry Technical Article, Australia.

[9] Wang, C.-N., Yang, G. K. and Hsiung, W.-M. (2014), Application of TRIZ to Improve the Material Handling and Productivity in a Screw-Packaging Factory, Journal of Testing and Evaluation, Vol. 42, No. 6, pp. 1450-1457.

[10] Larsson, T. J. and Rechnitzer, G. (1994), Forklift Trucks: Analysis of Severe and Fatal Occupational Injuries, Safety Science, Vol. 17, No. 4, pp. 275-289.

[11] Mann, D. (2007), Hands-on Systematic Innovation, IFR Press, Clevedon, UK.

香港飲食業四大工傷意外成因剖析與對策

林　莉首席顧問
香港職業安全健康局

摘　要：飲食業對推動香港經濟及旅遊業起著舉足輕重的作用。然而，飲食業工業意外長期居各行業之首。2024 年本港超過四成（3,105 宗）意外與飲食業有關，當中約八成來自四大類別：「滑倒、絆倒或在同一高度跌倒」、「觸及灼熱表面或物質」、「被手工具所傷」及「提舉或搬運物件時受傷」。為深入分析事故成因，本局收集了 2,430 份受傷僱員問卷，並訪問業界持份者，以瞭解業界所面對的職安健困難與挑戰。

調查發現，「被手工具所傷」的意外佔比最高（31%），主要因趕工和精神不集中導致刀具割傷。其次是「滑倒、絆倒或在同一高度跌倒」（28.2%），主因是地面濕滑而滑倒，且近半人沒穿著防滑安全鞋。「提舉或搬運物件時受傷」（21%）的主因是錯誤搬運姿勢及僱主沒有進行體力處理操作風險評估。「觸及灼熱表面或物質」（19.8%）則多涉燙熱液體濺出，約一半人因保護衣物覆蓋不足或隔熱效能欠佳而受傷。

業界表示近年人手短缺及臨時工增加，令從業員不熟悉工作流程，職安健意識相對薄弱。建議業界加強工作場所整理、改善工作流程安排、制定清晰內部安全指引，並為員工提供合適的輔助設備和個人防護裝備。長遠建議規範從業員的安全訓練，並透過獎勵形式表揚優良表現，藉此建立良好的職安健文化，提升行業的職安健水準。

研究背景

飲食業對推動本地經濟及旅遊業起着舉足輕重的作用。然而，飲食業的工業意外數字，卻長期居於各行業之首，情況令人關注。2024 年本港共發生了 7,371 宗工業意外，其中 3,105 宗，即超過四成意外（42.1%）與飲食業有關，每千名工人的意外率達 13.9，較整體工業意外率 12.3 為高。

在飲食業工業意外當中，約八成來自以下四大意外類別：「滑倒、絆倒或在同一高度跌倒」（下稱滑倒絆倒）、「觸及灼熱表面或物質」、「被手工具所傷」及「提舉或搬運物件時受傷」（下稱提舉搬運）。

為深入探究四大意外的根本成因，本局自 2005 年起透過前往勞工處職業醫學組辦事處，對飲食業四大意外受傷僱員進行問卷調查，並於 2014 年首次公布相關結果。為提升樣本代表性，我們持續收集數據。2024 年我們再次整合收集所得數據，對這四大意外類別作全面分析。

研究目的

這次研究的目的包括（1）收集飲食業受傷僱員的個人和職業背景資料；（2）探討飲食業工傷事故發生的規律及性質；（3）從受傷僱員的角度，剖析飲食業四大主要工傷意外的特性，尋找意外的根本成因；（4）提出改善建議幫助僱主及僱員防止意外，以提升香港飲食業的職業安全健康水平。

調查對象資料

為了解飲食業界所面對的職安健困難與挑戰，本研究分別透過對受傷僱員進行問卷調查，以及訪問了不同業界代表以收集相關的資料數據。

問卷調查於 2005–2024 年的 6 月至 8 月期間進行。調查對象是前往勞工處於灣仔修頓中心及長沙灣政府合署的職業醫學組等候安排判傷事宜的飲食業受傷僱員。

在研究進行期間，我們一直與不同業界持份者溝通並收集他們的寶貴意見。在整合相關的研究結果後，研究團隊於 2025 年的 4 月再次邀請飲食業商會及工會組織的代表進行訪談。訪談目的是收集業內不同持份者的意見，了解業界現時的行業生態及職安健狀況，以及他們在推行職安健時所遇到的困難和挑戰，並就我們是次有關飲食業四大意外類別的意外成因及初步分析結果提供意見。

調查結果

調查合共收集了 2430 份問卷，當中 753 人（31%）因「被手工具所傷」而受傷；687 人（28.2%）因「滑倒、絆倒或在同一高度跌倒」而受傷；510 人（21%）因「提舉或搬運物件時受傷」而受傷；以及有 480 人（19.8%）因「觸及灼熱表面或物質」而受傷。

受訪者的個人、工作背景，及工傷病假資料

受訪者（即曾受傷僱員）的年齡分佈平均，由 20 歲到 60 歲平均各佔約兩成。受訪者近六成為男性。在食肆規模方面，超過六成（63.4%）受訪者來自 50 人以下的中小型企業。至於意外發生時在該工作地點的年資，約五成七受訪者表示於該職位工作超過一年（57.0%），當中有五年或以上年資者則佔約兩成（19.9%），反映受訪者在行業的年資普遍較長。不過，仍有近三成（27.5%）受訪者表示在該工作崗位工作不足半年。

若以受訪者受傷時所屬的食肆類別劃分，大部分個案集中於以下類別：中式酒樓佔 36.4%、快餐店佔 14.5%，以及其他較常見的食肆種類包括茶餐廳（12.7%）、西式餐廳（9.9%）及飯堂、會所或院舍（8.3%）。

在工傷病假日數方面，受訪者的總平均病假日數為 68.9 天，當中因「提舉或搬運物件時受傷」的受訪者的平均病假日數最長，達 110.1 天。若以現時飲食業員工每月中位工資約 15,300 港元推算，平均每名飲食業受傷僱員之工傷病假可引致約 34,658 港元損失［平均病假日數（68.9）x 每日中位工資（$503）］。在 2024 年飲食業四大意外的工業意外個案合共有 2,476 宗，按是次調查所得的平均工傷病假日數推算，它們可造成約 85,812,326 港元的經濟損失。

受訪者曾接受的安全訓練

近六成受訪者表示自己在受傷前未曾接受任何安全訓練，整體受訪者接受過的安全訓練以防火（17.5%）及爐具使用（14.7%）最多，其次是手工具使用（14.1%）、人力提舉（11.2%）、處理灼熱東西（10.6%）。至於良好工作場所整理（6.6%）及個人防護裝備使用（6.0%）的訓練只有不足一成，反映他們的針對性安全訓練不足，需要進一步加強。

四大意外類別的意外分析

滑倒、絆倒或在同一高度跌倒

滑倒絆倒意外中，滑倒個案佔七成三，而絆倒及跌倒個案分別佔約一成半和一成二。在滑倒意外方面，近七成半受訪者表示當時環境濕滑（74.6%），而造成濕滑主要是由於地面有積水（56.7%）及油漬（28.7%）。近一半人表示意外時沒有穿著防滑安全鞋，而他們表示不

穿著的主要原因是由於僱主沒有提供（45.2%）或認為自己的工作不需要穿防滑安全鞋（42.6%）。對於意外時工作場所的情況，近六成（58.2%）人表示沒有或不清楚工作地點有否執行良好工場整理，而超過一半（52.4%）表示工作環境不安全是導致該次意外的主要原因之一。

滑倒、絆倒或跌倒意外可涉及多項因素，包括環境、工作情況和個人因素等。環境因素方面，建議飲食業界加強執行 5S 良好工作場所整理，工作間的物件擺放有序，物件有特定擺放位置，而且定時進行清潔和整理，保持廚房排水系統暢通，自然可以令地面沒有雜物及積水，有助減少滑倒、絆倒的意外。在裝修設計階段，業界應選用適合商業廚房使用，防滑系數較高的地磚，例如：動態摩擦系數 DCOF 達 0.42 或以上[1]，以減低滑倒風險。另外，在日常工作中，亦要經常保持地面乾爽及清潔，盡快將地上的積水及油漬清理，因為積水和油漬都會降低地面防滑效能，增加滑倒風險。

此外，我們發現侍應、傳菜及清潔員工的滑倒、絆倒或跌倒風險亦較高，可能是由於他們工作需要經常出入廚房和樓面，穿梭於乾濕地面。當地面的濕滑程度有明顯差異，而步伐及/或步速未能作出相應調整及適應，便可能增加滑倒風險。我們亦建議僱主可考慮為員工提供或資助他們購買防滑安全鞋，同時在工作地點較濕滑的地方或地面乾濕分界點增設防滑措施如防滑條和防滑地墊，並展示「小心地滑」等警告字句提醒僱員工有關的安全危害。

個人因素方面，是次研究發現女性受訪者較多出現滑倒、絆倒或跌倒的問題。有研究指出由於女性肌肉量及力量較低，當失平衡時其恢復平衡的能力較弱，導致跌倒風險較高，建議業界可透過本局和香港中文大學體育運動科學系早前推出的防跌運動方案，讓僱員於開工前或落場時多做運動，提升個人平衡能力，減低跌倒風險。

觸及灼熱表面或物質

在觸及灼熱表面或物質而受傷的受訪者中，超過九成都是觸及灼熱物質，而該物質主要是燙熱液體（87.2%）。絕大部分人（93.7%）表示他們事前都知道該物質是灼熱的，但在事發時因灼熱物質突然濺出，走避不及。約一半受訪者（48.1%）即使有穿著適當保護衣物或使用適當輔助工具仍然受傷。他們穿著的保護衣物主要是圍裙（44.3%）、膠手套（32.5%）及隔熱手套（26.3%）。至於使用了裝備仍然受傷的原因主要是保護衣物未能覆蓋受傷部位（74.7%），其次是保護衣物的隔熱效能欠佳（17.2%）。就受傷部位而言，近四分之一涉及足踝、腳掌或腳趾（24.4%），其次是手掌或手指（22.6%）。

有業界代表表示有廚師為方便每次能夠處理更多食材，在油炸食物時會將油量載滿至九成，增加滾油濺出灼傷的機會。另外，當盛載滾熱液體或食物過滿時，亦會增加運送時液體溢出的風險。進一步分析亦發現，廚師比起非廚師受訪者在觸及灼熱表面或物質的意外比例，較其他三大意外類別高出近一成。

建議加強廚師的入職安全訓練，並制定清晰的內部安全指引講解處理灼熱物質的正確程序，例如在處理油炸食物時避免將滾油盛載過滿，如不超過七成滿。另外，僱主亦要為需要處理灼熱物質的員工提供合適的保護衣物例如隔熱手套和圍裙，確保保護衣物有足夠的隔熱效能和長度。當運送滾燙的食物湯汁時，亦不能盛載過滿，並應將器皿蓋好，及使用手推車等輔助工具協助運送。為提高僱員對灼熱表面或物質的警覺性，亦可在存放滾熱東西的位置展示相關警告標語或海

1 根據「美國國家標準協會（ANSI）」制定的 ANSI A326.3《硬表面地板材料動態摩擦係數（DCOF）》測試方法，於室內平坦且預期會在濕滑條件下行走的硬表面地板材料，其 DCOF 須達到至少 0.42。

報，提高僱員的安全意識。

被手工具所傷

被手工具所傷的受訪者中，絕大部分的受傷類型為割傷（91.1%），而近七成都是遭刀具所傷。同時發現有因錯誤使用刀具而受傷的情況，例如使用魚生刀進行剁、劈或砍等工序而受傷。大部分受訪者表示他們都是從其他廚師身上學習使用刀具（71.6%），但有近兩成人表示他們沒有接受任何使用刀具的訓練。超過一半受訪者事前不認為手工具會引致受傷（55.9%），而他們主要認為是由於自己不小心（35.9%）、趕工（29.4%）和精神不集中（25.1%）而導致意外發生。

針對被手工具所傷的工傷意外，我們建議可從工作流程優化、加強安全培訓、刀具管理及個人防護裝備四個方面入手。透過改善工作流程安排，作好工作調配，避免員工因趕工而忙中出錯或因長時間工作而引致精神集中力下降。進行切割工作的地點應避免在人流多的通道上，以防碰撞造成意外。另外，為員工提供刀具安全使用培訓，培訓應涵蓋正確的刀具選用、使用技巧、切割姿勢等，以加強員工對刀具安全的認知。

同時，我們亦鼓勵業界制定清晰及統一的刀具安全使用指引，明確列出處理各類食材時應選用的合適刀具種類，以減少誤用情況。此外，僱主應根據實際工作流程，仔細評估及配備員工所需的各類刀具，確保工具選用得當。個人方面，員工在用刀時要集中精神，避免用刀時分心。最後，僱主應為僱員提供符合安全標準的防切割手套，進一步減少受傷的機會。

提舉或搬運物件時受傷

在提舉搬運時受傷的受訪者中，約七成三人表示他們進行提舉時主要是用腰（72.7%）發力將上身及負荷物提起，只有不足兩成（17.3%）是靠下肢力量。此外，超過一半的受訪者表示他們在處理負荷物時會彎腰（65.2%）及扭動腰部（54.2%）。一半人表示他們需要每分鐘重複動作一次（55.2%）。結果顯示，錯誤的搬運姿勢和重複性動作是導致受訪者受傷的主要因素之一。

針對意外時處理的負荷物特徵，約九成半人表示處理的負荷物都有異常的情況，包括過重（54.4%）、難以抓住（19.4%）和表面過熱（16.7%）等，而其中約八成三人表示沒有使用輔助設備。只有約五成人表示在處理該負荷物前，會先對該負荷物進行簡單評估以決定處理方法，但有約八成人表示其僱主沒有（59.0%）或不清楚（22.5%）有否為他們進行體力處理操作風險評估。約四成四人表示其工作地點沒有張貼正確體力處理操作姿勢的海報，當中六成八人認為這些海報會有提示作用。進一步分析中發現，提舉或搬運物件而受傷的兼職僱員比例較其他受傷類別高出近三成一。

建議僱主為所有員工，無論全職或兼職，安排入職培訓，教導他們提舉及搬運的正確姿勢。僱主亦必須按法例要求為體力處理操作工序進行初步評估及進一步評估，並制定控制措施以減低工作危害，並為他們提供手推車等輔助設備。另外，在工作地點展示正確體力處理操作的海報及示範短片，亦有助提示僱員，減少受傷機會。

業界代表的意見及建議

業界代表普遍表示近年經營環境極具挑戰。疫情期間生意大受打擊，許多食肆被迫裁員，不少具經驗員工轉投其他行業，導致人手短缺。疫後市道低迷亦導致生意額下降，令投放於職安健的資源亦隨之減少。縱然外勞輸入能舒緩人手短缺的問題，但外勞在工作文化上的差異，亦為職安健帶來新挑戰。另外，業內近年出現「師奶更」或「媽媽更」的安排，這些婦女員工一般在上午 10 時至下午 2 時上班，負責傳菜侍應或洗碗等崗位。由於她們的工時

通常較短，對食肆工作流程未必熟悉，職安健意識相對薄弱。

業界代表建議可透過獎勵形式，表揚和嘉許食肆、管理人員和工友在職安健的優良表現，在飲食業樹立良好職安健文化，並藉此互相借鏡。另外，亦可仿效建造業的「平安卡」制度，規範飲食業從業員的安全訓練，提升他們對飲食業安全的意識。

總　結

此次研究針對飲食業四大主要工傷意外的分析，為我們提供了很多有價值的資料。與 2014 年的調查相比，我們發現近十年（即 2015–2024 年），受訪者在接受安全訓練的比例上（42.3%對 37.3%）及安全意識方面（55.3%對 47.1%）都有所提升。另外，近十年業界對執行 5S 良好工場整理（48.3%對 39.7%）及穿著防滑安全鞋（63.8%對 47.3%）的比例有顯著進步；而在廚房使用隔熱手套的比例都有所提升（35.7%對 25.2%）。近十年有進行體力處理操作危險評估的比例則沒有明顯提升，反映有關方面的宣傳推廣仍有待加強。

本局一直積極推動行業職安健，在飲食業界和政府支持下，制定了一系列的方針和策略以提高業界的職安健水平。我們會繼續積極向業界推廣不同的飲食業安全健康計劃及活動，例如「職安健星級食肆計劃」為參與的食肆提供免費的 5S 良好工作場所整理顧問服務和安全訓練；「飲食業職安健福袋派發活動」和向業界派發「飲食業職安健提升計劃」換領券，換領符合安全規格的「飲食業安全三寶」包括防滑鞋、隔熱手套及防切割手套，提高他們使用個人防護裝備的意識。我們相信只要飲食業各持份者共同努力，做好預防這四大類意外的措施，便可大大減低工傷意外發生。

面向冶金过程参数越限的智能体安全研判方法

张智舟
中钢集团武汉安全环保研究院

摘　要：冶金生产过程的分布式控制系统持续记录温度、氧含量和压力等参数。传统阈值报警能够提示参数越限，但难以说明其持续性、关联工况、专业依据及核查重点。为此，构建了一种由大语言模型驱动的安全研判智能体。任务规划依据预设分析合同自动调用确定性数据工具、安全知识检索和情景记忆，大语言模型综合证据形成研判草稿，确定性证据审计控制最终输出。以某高炉煤粉制备系统的磨煤机为例进行验证。在 49 对同窗口案例中，共享数据证据与大语言模型、增加安全知识以及采用智能体编排研判时，通过配对核验的案例对数分别为 1、44 和 47，建议证据支持率分别为 41.4%、98.7%和 99.3%。工具链自动处理 320 个非重叠窗口，98 个正式案例均正确引用同机组既往记录，审计保留全部 53 个预设越限目标识别结果。该方法连续组织数据处理、知识调用、历史信息补充和输出准入，可为冶金过程参数越限提供可追溯的安全研判支持。

关键词：冶金安全；参数越限；大语言模型智能体；安全研判；证据约束

壹、引　言

冶金生产装置流程连续、设备关联紧密，分布式控制系统（distributed control system，DCS）时序数据能够反映设备启停、参数波动和工况变化，是识别参数越限及其演化的重要信息。高炉煤粉制备的干燥、磨制、收粉和储存过程中并存可燃煤粉、热介质与含氧气体，相关规范对设备密闭、惰化、温度和氧含量监测及压力控制提出了要求。

现有工业报警和过程监测主要完成限值比较、异常检测与状态识别（朱群雄等，2017；安剑奇等，2024），粉尘安全研究还通过危险因素辨识和综合评价形成风险分级（张晓蕾等，2024）。参数越限的安全含义受到设备运行状态、持续时间、相邻参数变化及测量质量等因素影响，短时越限、持续越限和多信号伴随变化需要不同的证据组合。形成安全相关性说明和核查建议，还需综合数据质量、关联测点、专业知识与历史工况。冶金安全监控正由单点报警向多源感知和智能分析发展，仍面临信息分散、专业知识融合不足和结果解释不足等问题（余正伟等，2026）。

大语言模型具备知识组织和报告生成能力，智能体可通过任务规划调用数据处理、知识检索和记忆等外部模块。检索增强生成（retrieval-augmented generation，RAG）能够提供与当前任务相关的外部资料（Lewis et al.，2020），大语言模型处理时序信息的研究也为数值特征与语言推理的衔接提供了技术基础（Zhang et al.，2024）。时序数据的持续时间、缺失断点和变量方向需要稳定的数值计算，检索知识也需与当前测点事实对应。基于此，本文提出面向冶金过程参数越限的智能体安全研判方法，将确定性计算、知识检索、历史信息调用和语言推理组织为连续任务，并设置输出

证据准入，以高炉煤粉制备 DCS 数据验证其实现过程和代表性效果。

贰、智能体安全研判方法

一、研判任务与总体框架

参数越限安全研判以质量控制后识别出的持续越限事件为主要对象，并将变化趋势、关联测点、运行状态和数据质量作为研判证据。确定性数据工具中的工程阈值筛查用于定位需要关注的时间片段，智能体进一步组织该片段的工况背景、安全知识和既往记录，形成安全相关性说明及需要核查的事项。报告中的“可观测事实”包括参数越限、趋势变化和数据质量状态，使越限事件能够在 DCS 可观测范围内获得结构化表达。

所构建智能体以大语言模型为推理核心，由任务规划与编排、确定性数据工具、安全知识检索、情景记忆和确定性证据审计共同支撑，如图 1 所示。任务规划模块依据预设分析合同组织“工具调用—知识检索—历史检索—综合研判—证据审计”的执行顺序：待分析数据进入后，自动调用数据工具，将运行状态、数据质量、参数越限和趋势等结果组织为结构化感知状态，再根据变量概念、越限方向和窗口状态调用知识检索与情景记忆；大语言模型综合证据生成研判草稿，证据审计负责最终输出准入。各模块通过统一证据标识传递信息，使数据事实、知识依据和历史记录能够回溯至相应来源，关键数值计算、工具调用和内容准入按照固定合同执行。

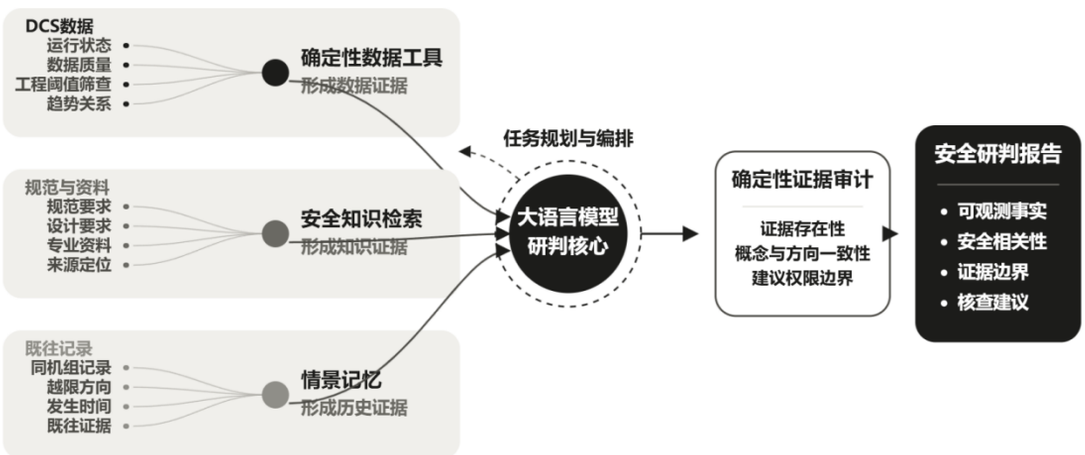


图 1　智能体安全研判的证据协同框架

二、数据、知识与历史信息协同

DCS 原始序列先由确定性数据工具处理。工具识别运行、停机和状态不确定等工况，隔离错误码、缺失值和采样中断，并在同一工具链内完成工程阈值筛查、窗口统计、持续越限、短期趋势及跨测点关系计算。处理结果以测点、方向、时间范围和证据标识等结构化信息提供给大语言模型，使较长的原始序列被压缩为可核查的事实集合。持续时间和工程量方向均由确定性程序计算，并为每项越限或趋势信息绑定当前窗口的数据证据。

安全知识由煤粉制备安全规范、工程设计要求和专业资料组成。检索模块根据变量概念、越限方向和核查目的返回相关片段及来源，用于解释越限涉及的安全条件，并支持仪表复核、关联工况检查和规程核对等建议。已有规程问答研究表明，专业知识检索与智能体任务协同有助于组织复杂技术内容（程远等，2026）。来源可定位的知识使安全解释和核查建议能够对应专业依据。

情景记忆保存已完成的同机组历史越限摘要，包括变量概念、越限方向、发生时间和对应证据。检索限于分析时刻以前的同机组记录，并优先匹配相同概念和方向。历史记录用于识别同类状态的重复出现及时间联系，当前判断仍以本次数据为基础。当前数据、安全知识和情景记忆分别提供本次事实、专业依据和历史参照，由任务编排组织为研判上下文。

三、证据约束与核查建议

智能体输出由可观测事实、安全相关性、证据边界和核查建议构成，其中可观测事实区分数据质量事件、参数越限与伴随趋势。证据边界说明当前数据与知识能够支持的判断范围，以及尚需现场核实的信息。不同内容采用差异化证据要求：数据质量结论需对应缺失、错误码或采样中断；参数越限需明确测点、方向、持续时间和当前数据；涉及多个条件的安全相关性判断需有相应的多测点信息或专业知识支持；核查建议需关联与其内容相匹配的数据或知识来源，涉及工艺安全依据时同时引用当前数据和专业知识。由此形成从可观测事实到安全解释、再到核查事项的递进关系。

模型形成草稿后，确定性证据审计逐项检查证据标识是否存在、变量概念与越限方向是否一致、历史记录是否满足机组和时间边界，以及建议是否处于研判权限范围内。审计按照统一证据和权限要求对条目执行保留、删除或降级，并将建议范围限定为仪表复核、关联工况检查、规程核对和运行记录查验。最终输出准入由确定性规则完成。带来源的生成内容与引用核验也是提高大语言模型结果可检查性的有效方向（Gao et al.，2023）。

叁、煤粉制备参数越限案例

一、案例对象与验证方式

案例数据来自某高炉煤粉制备系统的磨煤机，共约 36 万行 DCS 记录，中位采样间隔约 6s，包含入口和出口温度、入口及下游氧含量、煤气压力和升温炉压力等 7 个测点。源数据经完整性校验后保持只读，错误码按数据质量事件处理。数据按时间划分，开发期用于确定处理参数和构建情景记忆，锁定测试期用于正式验证。

以 45min 窗口为分析单元。数据工具区分运行、停机和状态不确定工况，隔离错误值与采样中断，通过工程阈值筛查识别持续越限，并计算短期趋势、质量事件和跨测点关系。知识库由规范和专业资料组成；情景记忆保存开发期越限事件，检索范围限定为分析时刻以前、概念和方向相符的同机组记录。任务规划模块依据预设分析合同自动调用上述工具，并将带有证据标识的结果组织为大语言模型生成判断、证据边界和核查建议所需的上下文。

为减少工况差异，在同一基础窗口构造未注入对照和受控越限两个分支，仅改变目标变量，模型输入中不包含场景编号和配对关系。两个分支共享采样时刻、设备状态和其他测点背景。经完整性和预设越限目标可检出性检查后，形成 49 对、98 个案例，覆盖 53 个预设越限目标。三种内容生成方式均使用相同的冻结数据工具结果：第一种由大语言模型组织共享数据证据，第二种增加安全知识，第三种由智能体按分析合同将相同数据事实组织为结构化感知状态，调用情景记忆并自动编排后续研判任务。配对核验通过需同时满足：受控越限分支检出全部预设越限目标，对照分支无对应目标误报，且受控越限分支至少形成 1 条证据可解析、符合预设证据与权限要求的核查建议。

受控案例用于检验目标响应，连续数据还包括正常运行、停机切换和不完整记录等状态。对锁定测试期 320 个非重叠自然窗口自动运行离线工具链，从运行、停机、混合和数据不完整状态中抽取代表性窗口，加入 2 个自然数据质量事件，形成 26 个模型调用案例，用于

检查停机和数据不足条件下的分析边界、证据可解析性及输出权限。两类案例分别检验目标响应和日常适用性，覆盖受控越限与自然运行状态。

二、代表性研判过程

图 2 给出了煤粉制备工艺观测信息及代表性窗口的研判链路。以磨煤机入口氧含量持续越限为例，数据工具首先确认设备处于运行状态，排除错误值和时间断点，并给出越限方向、持续时间及趋势证据；知识检索返回与系统密闭、惰化和含氧环境相关的规范及专业资料；情景记忆检查同机组此前是否出现同类越限。大语言模型据此组织安全相关性说明和核查事项，最终经证据审计形成报告。

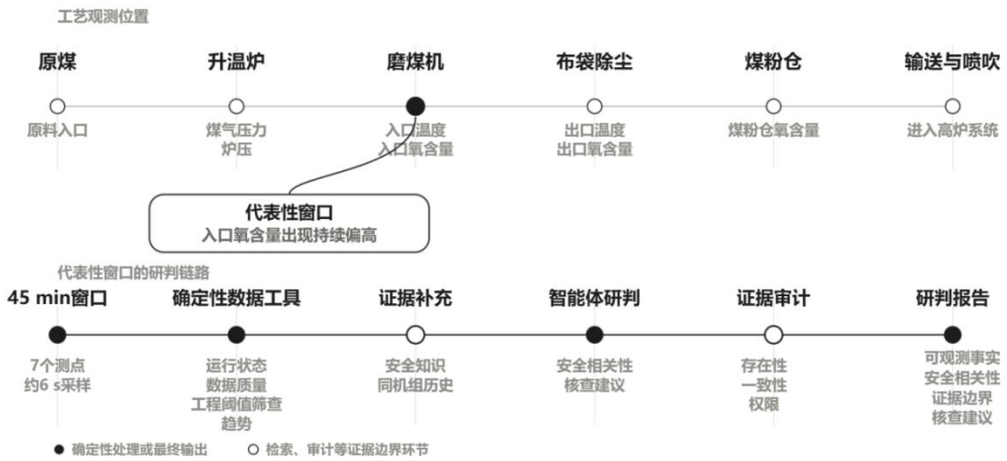


图 2　煤粉制备参数越限的安全研判流程

这种处理方式将传统阈值提示扩展为四个相互关联的部分：一是区分数据质量事件并说明参数越限及伴随趋势；二是结合工艺知识和既往记录说明安全相关性；三是明确当前证据支持范围及待核查信息；四是提出仪表、关联工况、规程和运行记录等核查建议。研判过程由越限事实出发，逐步补充工况和知识证据，将单点报警转化为可继续核实的分析线索，并形成以现场核实事项为落点的安全研判报告。

三、代表性结果

表 1 给出了三种研判内容生成方式在同一批 49 对案例上的核验结果。为保持输入公平，三种方式均使用相同的冻结数据工具结果。仅由大语言模型组织共享数据证据时，通过配对核验的案例为 1 对，建议证据支持率为 41.4%；增加安全知识后，分别提高至 44 对和 98.7%。在相同数据和知识基础上，由智能体将数据事实组织为结构化感知状态，调用情景记忆并自动编排研判任务后，47 对通过核验，建议证据支持率为 99.3%。案例对核验考察预设越限目标是否全部检出、对照分支是否无对应目标误报，以及受控越限分支是否形成有据可查的核查建议；建议证据支持率为通过预设证据要求的建议数占全部建议数的比例。

表 1　三种研判内容生成方式的核验结果

内容生成方式	通过配对核验的案例对数（共 49 对）	建议证据支持率
共享数据证据＋大语言模型	1	41.4%
共享数据证据＋安全知识＋大语言模型	44	98.7%
智能体编排研判	47	99.3%

工程阈值筛查是确定性数据工具中的越限识别环节，与运行状态识别、数据质量处理、趋势计算和跨测点关系分析共同形成数据证据。在实际智能体流程中，任务规划模块负责自动调用和组织这些工具；在表 1 的横向比较中，相同的数据证据被固定提供给三种内容生成方式，因此比较结果分别反映安全知识以及智能体对相同证据的结构化组织、历史信息调用与自动编排带来的变化。确定性证据审计位于最终输出准入端，不参与表 1 的内容生成比较。

情景记忆参与智能体研判，其功能采用单独的核验口径。98 个正式案例均检索到满足同机组、早于当前时刻以及参数概念和方向相符等条件的历史记录，智能体均完成正确引用，未出现未来信息或跨机组记录引用。情景记忆为当前事件补充既往越限的时间上下文，当前窗口的数据证据继续承担本次判断的依据。

智能体草稿进入确定性证据审计后，审计删除 12 条支持不足的判断和 2 条建议，保留与 53 个预设越限目标对应的识别结果。审计结果采用内容删留数量描述，反映最终报告的证据准入过程。数据证据、知识证据和历史证据均通过来源标识与具体判断建立联系，最终输出保持统一的证据和权限边界。

320 个非重叠自然窗口均完成离线工具处理。抽取的 26 个模型调用案例中，17 例按照预设规则需要触发运行适用性或数据质量约束，均得到相应的边界处理；26 例证据均可解析，未出现事故状态过度判断或越界控制建议。自然窗口检验补充了受控案例之外的运行状态和数据质量变化，使方法核验同时覆盖目标响应、自动工具调用、历史信息使用、最终内容准入和日常数据适用性。

上述结果显示，任务编排、数据工具、知识检索、情景记忆和证据审计分别承担流程协调、事实形成、专业支撑、历史补充和输出准入功能。

肆、结　语

面向冶金过程参数越限，本文构建了由大语言模型驱动的安全研判智能体。该方法通过任务编排协调确定性数据工具、安全知识检索和情景记忆，并利用确定性证据审计控制最终输出，将参数越限、工况背景、历史记录和核查建议组织为具有来源标识的结构化报告。

高炉煤粉制备案例表明，安全知识能够改善核查建议的证据支持，任务编排可依据预设分析合同自动组织数据处理、知识检索和历史信息调用，情景记忆提供既往越限参照，证据审计筛除支持不足的内容并保留可观测越限事实。非重叠自然窗口检验显示，所构建流程能够根据运行状态和数据质量调整分析范围。该方法为有限测点条件下冶金过程参数越限的安全研判提供了可实施路径，后续可结合其他同构设备、更多工艺变量和现场知识扩展研判范围。

参考文献

［1］ 朱群雄、高慧慧、徐圆（2017），工业过程报警管理研究进展，《自动化学报》，第 43 卷，第 6 期，955–968 页。

［2］ 安剑奇、郭云鹏、张新民等（2024），高炉炼铁过程智能感知、诊断与控制方法的研究现状与展望，《冶金自动化》，第 48 卷，第 2 期，2–23 页。

［3］ 张晓蕾、邓斌、杨松立等（2024），粉尘爆炸事故的模糊综合评估分析与预防策略研究，《中国安全生产科学技术》，第 20 卷，第 3 期，83–89 页。

［4］ 余正伟、詹文静、王光应等（2026），炼铁厂智能安全监控体系的应用现状与展望，《中国冶金》，第 36 卷，第 5 期，44–58、68 页。

［5］ Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., et al.（2020）, Retrieval–Augmented Generation for Knowledge–Intensive NLP Tasks, Advances in Neural Information

Processing Systems, Vol. 33, pp. 9459–9474.

［6］ Zhang, X., Chowdhury, R. R., Gupta, R. K., et al.（2024）, Large Language Models for Time Series: A Survey, Proceedings of the Thirty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 8335–8343.

［7］ 程远、刘政、纳智敏等（2026）, 基于知识图谱协同多智能体的电力规程问答方法,《昆明理工大学学报（自然科学版）》, 网络首发。

［8］ Gao, T., Yen, H., Yu, J., et al.（2023）, Enabling Large Language Models to Generate Text with Citations, Proceedings of the 2023 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, pp. 6465–6488.

全維度空間治理（TSG）：融合職業安全與健康與人體工學的 6Ws 職場優化框架

詹敏儀博士
詹士人體工學及職安健有限公司首席顧問　香港浸會大學客席講師

摘　要：在現代高密度營運環境中，工作空間品質是危害管理與組織韌性的關鍵決定因素。創新的全維度空間治理（Total Space Governance，TSG）模型將空間視為核心產能驅動源與營運資產，而非僅是物理結構。透過系統性整合人體工學、職業安全與健康管理、收納整理與空間優化，以及環境心理學，TSG 模型把工作環境轉化為持續競爭優勢，並在確保法規合規的同時，最大化組織產能與員工整體福祉。

本研究運用六何分析框架（6Ws），並結合香港實證案例，深入探討以下涵蓋空間優化、營運效益與員工福祉的整合性問題：

1. 為何：為何 TSG 模型對於減少空間資產流失及隱藏營運成本，同時預防肌肉骨骼疾病是必要的？

2. 何事：應用 TSG 可如何帶來符合世界衛生組織（WHO）宏觀健康定義與企業價值的雙重成果？

3. 何人：誰是 TSG 模型核心推動者？由管理高層至前線員工，各持份者如何受惠於其推行？

4. 何時：何時應啟動及檢視 TSG 框架，以構建健康、高效且可持續的工作空間？

5. 何地：TSG 模型及其原則可應用於哪些不同產業與場景？

6. 如何：如何透過嚴謹的危害管理與空間優化，系統化落實 TSG 的核心元素？

關鍵詞：收納整理、空間優化、環境心理學、員工福祉、預防肌肉骨骼疾病

壹、引　言

在現代高密度營運環境中，工作場所管理不僅要關注企業生產力，也要建立良好的管理系統，以支持員工的身體、心理及社會福祉。這一現代管理理念，亦與世界衛生組織對「健康」的定義一致（WHO，1998）。然而，現時職業安全與健康實務往往將人體工學、企業收納整理與空間運用，以及環境心理學視為彼此分離的不同專業領域。本論文提倡新建立的「全維度空間治理（Total Space Governance，TSG）」模型，提出一個更整合的企業管治框架，把四個領域，包括：1）科學應用於職業性人體工學；2）優化企業收納與整理；3）職業安全與健康管理；以及 4）應用環境心理學，結合作為一個空間系統統一管理的有效方案。

人體工學是一門以人為本的科學，旨在讓工具與環境適應人體需求，而非強迫人體適應環境；其核心目標在於預防不適與肌肉骨骼傷害、降低醫療與休假成本、提升工作生產力，

並優化人類整體福祉，系統涵蓋人員、任務、工具、環境及組織五大關鍵層面。優化企業收納與整理是透過去除雜亂及標準化儲物，以提升空間使用效率；職業安全與健康的各項措施有助符合法規及預防事故，並提供安全健康的工作環境；環境心理學則是研究人類與其周圍環境之間雙向互動關係的跨領域學科。它探討自然環境與人工建築（如房屋、辦公室、城市規劃）如何影響個人的情緒、壓力、思考與行為，同時亦研究人類行為如何反過來改變及影響環境。本論文介紹 TSG 模型，並說明其整合邏輯如何在減少空間資產流失的同時，提升職業安全與健康及企業組織績效。

貳、目　的

本論文之目的，是利用六何分析框架（6Ws）來闡釋全維度空間治理（TSG）模型，作為一套科學設計的系統，協助企業同時提升員工福祉、業務效率及空間管理等表現。它協助工作場所管理層根據世界衛生組織對健康的定義，即身體、心理及社會福祉的完整狀態，並透過人體工學、收納整理、職業安全與健康管理，以及環境心理學，把空間由被動的間接成本轉化為具策略價值的資產。

參、討　論

一、為何：為何 TSG 模型對於減少空間資產流失及隱藏營運成本，同時預防肌肉骨骼疾病是必要的?

現今企業面對高租金的營商環境，TSG 模型之所以必要，主要有三大因素。首先，有關 5S 良好工作場所整理及精益管理的個案研究顯示，一般企業存在大量企業空間被浪費。Mazur et al.（2024）發現在一間汽車零件工廠內，改革前工作坊地面近 48%屬非生產性空間；經 5S 介入後，透過整理、整頓、清掃、清潔及素養等管理提升，約 58 平方米空間得以回收，並於兩個季度內回本，顯示雜亂無序會悄然吞噬寶貴的樓面空間（Mazur et al.，2024）。另一項於 2025 年進行的大學儲物室個案研究，將 5S 與後進先出（Last In，First Out，LIFO）原則結合，亦在報告中指出空間使用顯著改善，且常用物資的提取時間縮短 37.4%，反映雜亂儲存會同時削弱空間效率與營運效率（Dube & Gupta，2023；Seema & Gupta，2025）。

第二個因素是，長時間使用電腦的人群中，患上與工作相關的肌肉骨骼疾病十分普遍，他們主要出現肩部、頸部及下背部不適（Chim & Chen，2021b）。以辦公室人體工學應用為例，有效預防肌肉骨骼疾病需要一個整全的人體工學框架，例如 FITS 模型，其包括：（1）家具評估與選擇（Furniture Evaluation and Selection）；（2）個人工作站評估（Individual Workstation Assessment）；（3）培訓與教育（Training and Education）；以及（4）伸展運動與休息安排（Stretching Exercises and Rest Break）（Chim，2014）。在香港，《職業安全及健康（顯示屏幕設備）規例》保障長時間使用電腦人士的職業健康（Labour Department，2003）。約 95%的香港辦公室員工每天使用電腦超過六小時。過去十年間，75%至 76%的受訪者持續報告肌肉骨骼症狀，當中肩部、頸部及下背部是三大持續性、長期疼痛或不適的主要部位（Chim，2025a）。

第三個因素是，隨著遙距工作增加，居家工作者因使用不合適的家具，以及只有手提電腦而沒有另外配備屏幕的設置，面對更高的肌肉骨骼疾病風險。在香港的研究顯示，對家居工作站的滿意度可直接改善身體健康，而家居環境舒適度，例如照明及聲學控制，則可顯著提升身體及心理健康（Chim，2025b）。因此，有效的緩解措施有賴於人體工學家對居家工作者進行在家工作的個人工作站評估、使用合適的在家工作家具，以及員工積極參與，共同建

立合適的在家工作環境。

二、何事：應用 TSG 可如何帶來符合世界衛生組織（WHO）宏觀健康定義與企業價值的雙重成果？

本論文提倡的 TSG 模型與世界衛生組織對健康的定義一致，即健康是身體、心理及社會福祉的完整狀態，而不只是沒有疾病或虛弱（World Health Organization，1998）。TSG 模型中的人體工學，不單單視為預防受傷或肌肉骨骼疾病，而是聚焦於能支撐員工在整個工作生涯中保持身心健康的工作環境、最佳生產力及員工舒適度，讓員工能力得以最佳發揮。

在身體福祉方面，TSG 模型針對「看不見的員工生產力殺手」，例如肩頸痛、腱鞘炎及腰椎間盤突出。這些問題會削弱員工的工作能力、增加缺勤，並推高補償及醫療成本。它運用生物力學分析及控制層級原則，透過 FITS 辦公室人體工學計劃及結構化顯示屏幕設備評估，令工作站要求與人體限制相匹配（Chim，2014，2024）。這一做法同樣適用於遙距工作；研究顯示，當在家工作使用手提電腦而設置不理想時，會增加肌肉骨骼疾病風險。而在高密度城市中，61.2%的遙距工作者報告有肌肉骨骼疾病，缺乏椅背支撐更會令嚴重肌肉骨骼疾病風險增加 2.6 倍。

在心理福祉方面，TSG 模型透過 5S 良好工作場所整理系統減少「視覺雜訊」及空間壓迫，從而降低潛在的心理負荷、疲勞及焦慮。環境心理學的應用中，例如晝夜節律照明管理，則透過光線審核及配合太陽週期的節律燈光進一步支持心理健康，有助避免小型燈具及夜間白光抑制褪黑激素分泌（Boubekri et al.，2014；Chim，2024）。

在社會福祉方面，TSG 模型結合 Vischer 學者提倡的環境舒適模型、符合 ISO 45003 的心理社會風險管理，以及 5S 良好工作場所整理教育，把被動遵從轉化為主動推動職業安全與健康及心理安全。職場心理安全有助建立開放溝通、包容文化及具韌性的團隊，從而提升職業安全與健康（Chim，2025；Vischer，2018）。

三、何人：誰是 TSG 模型核心推動者？由管理高層至前線員工，各持份者如何受惠於其推行？

TSG 模型的採納並非自下而上的自然改變，而是一項由企業內三個主要群組推動的方案，透過自上而下的策略性措施推行；而這些群組均認同員工福祉與業務表現密不可分。首先，行政管理層及董事局是主要的領導者。處於企業架構頂層的行政總裁（CEO）及財務總監（CFO），主要關注投資回報（ROI）及釋放隱藏的財務價值。在人口密集的城市中，房地產往往是企業第二大開支，因此他們明白雜亂無章及低效的工作場所布局會悄然吞噬 20%至 30%的寶貴資產空間，造成巨大的隱藏租金成本。因此，他們支持使用 TSG 模型來提升空間使用效率，確保每一平方呎都能創造真正價值。如此，企業便可由單純「避免違規」的防守思維，結合在環境、社會及管治（ESG）框架下「主動創造價值」的進取思維。

其次，人力資源管理層及職業安全與健康管理層是員工健康的守護者。他們的角色是維持人力資本的可持續性及提供法律保障。他們推動 TSG 模型，以預防看不見的生產力流失，特別是員工職業性肌肉骨骼疾病等問題。這些問題會引致慢性疼痛並增加缺勤。人力資源及職業安全與健康主管亦確保符合香港本地法規要求，例如《職業安全及健康（顯示屏幕設備）規例》下有關個別顯示屏幕設備評估的規定，並推動採用 ISO 45003，以管理心理社會風險、預防倦怠，並建立包容及具心理安全感的工作場所文化。

最後，設施經理及物業管理人員也是實際執行者。他們負責日常落實及空間結構調整，重點在於營運效率、資產運用及資本開支控

制。運作部經理可採用日本 5S 管理系統，要求所有物品在 30 秒內完成取用，以減少搜尋時間及不必要的人力損耗。他們亦可使用綜合工作場所管理系統及物聯網感應器，識別如空置率高的會議設施空間等設施錯配問題，並在採購家具前邀請人體工學家進行家具與使用者配合／工作場所設計模型評估，確保新家具切合員工的生理和工作需要，減少購買不合適家具的成本。

四、何時：何時應啟動及檢視 TSG 框架，以構建健康、高效且可持續的工作空間?

TSG 模型的啟動應在房地產策略及工作場所擴展規劃的早期階段便加以考慮。在簽訂新租約前，企業可使用人體工學測量數據進行空間診斷，並透過設計布局評估、改善動線規劃及設置垂直儲存方案，回收 20%至 30%的現有空間。這種前置行動有助實現「空間公義」，並藉延後不必要的擴張，減少搬遷及租金成本（Chim，2018；Chim & Chen，2021a）。

在混合辦公及遙距工作轉型階段，TSG 模型內的實踐同樣至關重要。當機構轉向遙距或混合工作模式時，應立即建立推動機制，因為在設計不理想的家居環境中使用手提電腦的員工，面對的受傷及疼痛風險會高出 2 至 3 倍（Chim，2025）。為減低此風險，企業應即時推行居家工作（Work-From-Home，WFH）方案。對員工而言，這包括可擴展的雲端支援及人體工學工作姿勢指導；對高層管理人員而言，則包括度身訂造的行政人員上門辦公套房優化。人力資源主管亦應推動心理脫離策略，協助員工在工作與家庭生活之間建立界線，以減少在家工作帶來的焦慮及倦怠（Chim，2024）。

TSG 亦應為符合法規及職業安全與健康管理而啟動。僱主必須在合理地切實可行範圍內，符合《職業安全及健康條例》的法定要求，確保員工安全與健康。其中條例定明，僱主須進行顯示屏幕設備評估及體力處理操作作業評估，以識別員工在工作中的風險。採用風險管理有助機構由單純避免違規轉向主動降低工傷申索及保險費用，並能提高職業安全與健康管理的水平。

五、何地：TSG 模型及其原則可應用於哪些不同產業與場景?

TSG 模型是一個跨行業框架，可按不同產業在空間管理、營運狀況及員工心理社會方面的需要作出調整，同時保留其核心原則，即空間最大化、活用人體工學及風險管理。在商業辦公環境中，TSG 可監察空間使用率、員工工作姿勢風險及工作行為模式。這些數據可協助機構重新設計工作區域，分別用於專注工作、團隊協作及休息，令每一平方呎都保持高效、安全，並切合員工需要（Chim，2018；Chim & Chen，2021）。

例如，在醫療機構中，TSG 著重透過更順暢的工作流程、更快的物資取用，以及有系統的體力處理操作評估，保護照顧者及病人。當與病房及護士站的晝夜節律照明管理結合時，該模式可減少肌肉骨骼壓力、提升輪班期間的警覺性，並為病人營造更有助康復的環境。

在混合辦公及家居辦公環境中，TSG 則把其原則轉化為多項居家工作方案。參考近期有關遙距工作人體工學及福祉的研究，可以為員工進行電腦使用者人體工學培訓及平衡生活與工作的教育，以減少工作、生活和家庭混合而引起的倦怠感（Chim，2025；Chim & Chen，2023）。

六、如何：如何透過嚴謹的危害管理與空間優化，系統化落實 TSG 的核心元素?

TSG 元素的系統化推行，首先從嚴謹的危害識別及量化診斷開始。詹士五步法包括五個階段：在第一階段，機構可透過快速人體工學量度進行以數據為本的初步評估，用以識別肌肉骨骼及視覺風險，並找出因布局混亂而造成的

空間資產隱藏租金成本。第二及第三階段則把這些發現轉化為工程控制：透過生物力學分析及第 509B 章顯示屏幕設備評估，令工作站要求與人體限制相匹配；同時利用 5S 管理系統及靈活工作空間規劃，減少實體工作場所的雜亂、視覺雜訊及不必要的人力損耗。晝夜節律照明管理及符合 ISO 45003 的心理社會風險程序，則進一步把危害管理延伸至疲勞、睡眠中斷及心理健康，並與國際上有關心理安全及工作福祉的指引保持一致。

第四及第五階段則聚焦於文化鞏固及績效檢討。針對性的 5S 及人體工學工作坊，有助建立共同語言及日常習慣，增強社會韌性及心理安全，而持續的投資回報率追蹤則把各項介入措施連結至具體成果，例如減少缺勤、降低保險費用，以及回收可用空間。透過這個閉環流程，TSG 把工作場所管理及空間優化轉化為一套以證據為本、可持續產生商業價值的系統。

肆、結　論

全維度空間治理（Total Space Governance，TSG）提供了一個清晰的系統層面方法，能夠把優良職業安全與健康和可持續的企業組織績效結合起來。透過詹士五步方法，安全與健康措施得以透過結構化及以證據為本的流程落實，同時更有效地運用空間資產。精準人體工學有助處理肌肉骨骼疾病及法定合規要求；以 5S 為基礎的清潔整理支持零事故原則；而工作場所危害管理亦把心理社會及環境風險納入考慮，並符合現時有關心理安全及健康工作場所的指引。綜合而言，這些元素把實務由被動防護轉向主動創造價值，使人體工學及職安健治理成為提升韌性、生產力及長遠商業可持續性的策略工具。

參考文獻

［1］ Boubekri, M., Cheung, I. N., Reid, K. J., Wang, C.-H., & Zee, P. C.（2014）. Impact of windows and daylight exposure on overall health and sleep quality of office workers: A case-control pilot study. Journal of Clinical Sleep Medicine, 10（6）, 603 - 611.

［2］ Chim, J. M.（2014）. The FITS model office ergonomics program: A model for best practice. Work, 48（4）, 495 - 501.

［3］ Chim, J. M.（2018）. 6Ws in ergonomics workplace design. In Proceedings of the International Ergonomics Association Congress.

［4］ Chim, J. M.（2024）. Employee well-being and ergonomics in work from home during COVID-19［Doctoral dissertation, National Taipei University of Technology］. National Digital Library of Theses and Dissertations in Taiwan.

［5］ Chim, J. M.（2025a）. A decade update on the musculoskeletal health of office employees in Hong Kong. In S. Jin, J. H. Kim, Y.-K. Kong, J. Park, & M. H. Yun（Eds.）, Proceedings of the 22nd Congress of the International Ergonomics Association, Volume 3.

［6］ Chim, J. M.（2025b）. Workstation setup satisfaction and environmental comfort: Impacts on the well-being of homeworkers in Hong Kong. Work, 0（0）, 10519815251383905. https://doi. org/10. 1177/10519815251383905

［7］ Chim, J. M., & Chen, T.（2021a）. 6Ws in the ergonomics review of macro and micro workplace design. In N. L. Black, W. P. Neumann, & I. Noy（Eds.）, Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association（IEA 2021）.

［8］ Chim, J. M., & Chen, T.（2021b）. Implementation of an office ergonomics program to promote musculoskeletal health: A case study in Hong Kong. IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors, 9（2）, 96 - 105.

［9］ Chim, J. M., & Chen, T. L.（2023）. Prediction of

work from home and musculoskeletal discomfort: An investigation of ergonomic factors in work arrangements and home workstation setups using the COVID-19 experience. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20 (4), 3050. https://www.mdpi.com/1660-4601/20/4/3050

[10] Dube, L., & Gupta, K. (2023). Lean manufacturing based space utilization and motion waste reduction for efficiency enhancement in a machining shop: A case study. Applied Engineering Letters, 8 (3), 121 - 130.

[11] Labour Department. (2003). Code of practice for working with display screen equipment. Hong Kong SAR, China.

[12] Mazur, M., Korenko, M., Žitňák, M., Shchur, T., Kiełbasa, P., Dostal, P., ... Idzikowski, A. (2024). Implementation and benefits of the 5S method in improving workplace organisation: A case study. Management Systems in Production Engineering, 32 (4), 498 - 507.

[13] Seema, T. L., & Gupta, K. (2025). A case study on organizing a workspace using 5S technique and LIFO principle. International Research Journal of Science, Technology, Education & Management, 5 (1), 67.

[14] Vischer, J. (2018). Building-in-use assessment: Foundation of workspace psychology. In W. Preiser, A. Hardy, & U. Schramm (Eds.), Building performance evaluation (Chapter 9). Springer Publishing.

[15] World Health Organization. (1998). Programme on mental health: WHOQOL user manual. https://apps.who.int/iris/handle/10665/77932

暑濕高溫環境–建築業職業性中暑的中醫藥病機探析與防控應急策略

藍清平
澳門建築安全協會理事

摘　要：建築業所涉地盤（工地）夏季高溫作業時發生中暑的概率很高，業內一般已把藿香正氣水或口服液當作常用消暑藥物。但按中醫思路來考察中暑必須作嚴格辨證，應將中暑劃入“陽暑”或“陰暑”兩類，二者致病機理及治療方法有明顯差別。從中醫古籍、現代醫學資料及職業安全健康實際案例出發，文中分析藿香正氣水適合“陰暑”（濕邪困表、寒濕阻於內）一類情形，對“陽暑”（高熱耗津）反有使病情惡化的可能。對地盤工人中暑的證型現狀已有較多統計，單獨用藥的風險是確定的。接著又就十滴水、人丹、生脈飲諸種中成藥做分類討論，結合當前有關中暑導致 SIRS（全身炎症反應綜合征）及中藥干預的藥理研究，提出中醫藥辨證用於建築業職安健的建議和操作方案，以理論及實例方式引導建築行業形成更理性、更因人而異的夏季防暑制度。

關鍵詞：建築業；職業安全健康；中暑；中醫藥；藿香正氣水；辨證施治

第一章　緒　論

1.1　研究背景與問題提出

建築業（地盤）屬於戶外所作的高強度行業，在夏季要應付很嚴酷的高溫。根據香港天文臺報告，全球氣候變暖已使近年來極端高溫出現得更頻繁，夏季平均溫度有上升趨勢。就地盤工人來說，高溫對效率是妨礙，亦可能造成生命危險。按職業安全健康局的統計，夏天正是建築業發生中暑類事故最多的時候，一般有頭暈、噁心、嘔吐現象，較重的病例會演變為熱痙攣或熱衰竭，極端情況即為致命的熱射病。

按傳統作業習慣來看，地盤管理一般會於夏季給工人配發消暑類藥物，其中藿香正氣水或口服液以“消暑”為傳統認識、價格便宜、買法簡便而著稱，是多數地盤藥箱所依賴的首選甚至唯一藥品。對若干建築工地有關夏季防暑辦法的調查抽樣分析表明，85%以上被訪問的地盤把藿香正氣系列劃入必須準備的藥品範圍之內。但若按此“一刀切”思路來用藥，是否真正契合中醫辨證施治的原則？是否所有類型中暑都該採用同樣的藥物？已有臨床實例證明誤用藿香正氣水反而使病情惡化，因此有必要結合中醫理論思考地盤用藥的科學基礎及其安全性問題。

1.2　研究目的與意義

本文旨在達成以下研究目的：

第一，應將中醫有關中暑的觀點作一完整說明，把“陽暑”和“陰暑”實際所指加以區分，給出地盤職安健管理的中醫辨證基礎。

第二，以已知的臨床觀察及文獻為依據，對藿香正氣水或口服液所適合的情況作一說明，去掉“萬能消暑藥”這類誤解，再提出按

中暑類型選擇較優藥物的可能性。第三，按現代醫學觀點來看，把有關中藥治療中暑所傷器官的藥理資料加以歸納，分析中醫藥對職業健康的意義。

第四，應就建築業所涉的職安健問題給出中醫藥防治辦法及落實方案，把行業中防暑的處理由“靠經驗”改為“按科學”來辦，真正保護勞動者的生命、健康諸項權利。

所談的課題既有理論價值，又有實際意義。按理論來說是中醫“辨證施治”觀念對職業醫學的一種運用或延伸；就現實而言，它把地盤管理中有關用藥、健康的內容加以整理，提出可行辦法，有利於減少夏季中暑及其嚴重後果的發生。

第二章　中醫對中暑的理論認識

2.1　中暑的病因病機

中醫對中暑的認識源遠流長，早在《黃帝內經》中就有“因於暑，汗，煩則喘喝，靜則多言”的記載。中醫學認為，暑為夏季之主氣，其性屬陽，具有炎熱、升散、挾濕的特性。中暑的發生，乃是由於人體正氣虧虛，加之暑熱或暑濕之邪侵襲，導致陰陽失調、氣機紊亂所致。

就暑邪致病來說有下列諸項特點：第一是暑性熱而易傷氣、耗津。暑熱之邪進入人體之後，一般很快使津液減少，造成口渴舌幹、尿少色赤一類的不適；同時“氣隨津脫”，所餘之氣不足，精神亦會委靡。第二是暑多兼有濕。夏季既熱又多雨，濕氣往往較盛，暑熱同濕邪結合時對脾胃不利，常引起胸悶、不想吃、大便不成形或稀軟的現象。第三是暑易犯心，傷及神明。暑熱若內入心包，就會有高熱昏迷、躁擾不寧這樣的嚴重表現。

2.2　中暑的分類：陽暑與陰暑

中醫所稱的中暑辨證最突出、最有特色的即“陽暑”與“陰暑”兩類。有關這種分法的歷史可以回溯到明代張介賓著作《景嶽全書》中的論述，其中已清楚地說明：“在暑月所遇的熱病中，由熱邪入髒者叫中暑，是陽暑一類；若怕熱而求冷、寒濕傷表即為中濕，是陰暑一類。”

所謂陽暑，在現代醫學上即為典型意義的中暑，是因人長期處於烈日之下、或於高溫中做過多勞作而讓暑熱之邪直接侵入機體者。基本病機應理解為暑熱過盛、津液與氣都受損。臨床上以高熱（體溫多在 40℃以上）、面色赤紅、大量出汗、口幹思飲、氣促煩躁、心煩不寧為常見症狀，重者可有神昏抽搐。舌象多呈紅舌、苔黃而幹，脈多為洪或滑數。按當代醫學觀點分析，所稱的陽暑正好對應熱射病、重度中暑一類的緊急狀況。

所謂陰暑，是特類的“中暑”現象，不是由單純暑熱所引起，而是因夏季貪涼飲冷而致。一般說來，長期在空調房內受冷、出汗之後馬上洗冷水、吃太多冷凍食品、夜裏不加遮蓋地貪涼，都會造成毛孔閉塞、體表滯留暑濕之氣。其病機應視為外有風寒、內有濕困，即“寒濕困表”的狀態。臨床上可見發熱或惡寒、無汗或冷汗不斷、頭身困倦、胸悶欲吐、腹痛泄瀉、舌苔白厚、脈弱而緩諸症。所稱的陰暑一般不伴高熱（或僅低熱），消化系統表現多較突出，在現代醫學中多被當作“空調病”或“胃腸型感冒”來處理。

下表概括了陽暑與陰暑的核心鑒別要點：

表：陽暑與陰暑的辨證鑒別

特徵	陽暑（暑熱證）	陰暑（暑濕證）
病因	高溫暴曬、過度勞作	貪涼飲冷、空調過冷
體溫	高熱（>39℃）	低熱或無熱（<38℃）
出汗	大汗淋漓、汗黏	無汗或冷汗

特徵	陽暑（暑熱證）	陰暑（暑濕證）
口渴	大渴喜冷飲	口不渴或喜熱飲
消化道症狀	較少	胸悶噁心、腹瀉明顯
舌象	舌紅苔黃燥	舌淡苔白膩
現代對應	熱射病、熱痙攣	空調病、胃腸型感冒

2.3 暑傷氣津與暑熱動風

對上面所提的兩類中暑不應作唯一劃分，中醫又依病情本身或臟腑所受影響來分別說明“暑傷氣津”“暑熱動風”諸證。

暑傷氣津的情況常見於中暑的早期或較輕病例。由暑熱所傷而致津液外泄，大汗頻作是其表現，津液因而有較大損耗；津是氣的依附物，失津即失氣，出現“氣隨津脫”一類的病機。所見症狀有口幹思飲、氣弱無力、精神疲倦及多汗少尿。此時以氣陰俱傷為基本病理要點，如不能迅速治療，就可能轉為脫證。

所謂暑熱動風證是中暑的一種危重症。此時暑熱已極，內入厥陰（即心包或肝經），使肝風發作、神志失常。所見的臨床現象有高熱昏迷、四肢搐搦、牙關難開、頸項強硬等。按現代醫學觀點看，這類情況接近於熱痙攣、熱射病及中樞神經受累的綜合表現，應劃為中醫急證，要立刻用中西醫方法作搶救處理。

2.4 小結

綜上所述，中醫有關中暑的論述是按層次、按系統來思考的。將“暑熱”同“寒濕”分別作為病因，把“在表”和“在裏”當作病位，又按“輕症”或“重症”判斷病情，由此得到完整的一套辨證方法。所用的這種分析思路正好可用來探討藿香正氣水的適應情況，亦可用於提出適合個體的用藥建議，因而具有實際意義。

第三章　藿香正氣水的適應症分析與藥物選擇

3.1 藿香正氣水的方劑組成與功效定位

藿香正氣水源自宋代《太平惠民和劑局方》所載的“藿香正氣散”，是中國傳統醫學中著名的祛濕劑。其藥物組成包括藿香、紫蘇葉、白芷、厚樸、大腹皮、陳皮、半夏、茯苓、白朮、甘草等。全方以藿香為君藥，取其芳香化濕、和中止嘔、解表散寒之效；紫蘇、白芷助君藥解表散寒；厚樸、大腹皮燥濕除滿；陳皮、半夏和胃降逆；茯苓、白朮健脾滲濕；甘草調和諸藥。

若按方劑的功效來歸納，藿香正氣水的基本作用應是解表化濕、調氣和中。其適用範圍以“外感風寒、內傷濕滯”這類病機為標準。所稱的“外感風寒”即體表有寒邪停留的現象；所稱的“內傷濕滯”即脾胃失運、濕濁自生的情況。由此可知，此方適合的病者同時具有表寒（怕冷、無汗）與裏濕（胸悶、噁心或泄瀉）兩類症狀的組合狀態。

3.2 藿香正氣水適用於陰暑的理論依據

若把藿香正氣水所載的方劑功效同前面分析過的中暑類型作比較，結論就很容易得到：藿香正氣水以治療“陰暑”為宜，不宜用於“陽暑”。

陰暑由“貪涼飲冷”所引發的寒濕困表構成病因，基本病機就是“外感風寒、內傷濕滯”。若用空調過度或飲用太冷之物，則毛孔不能通暢地開泄，暑濕不散而滯留於肌表，又使寒濕直接侵擾脾胃、運化失靈。這種情形與藿香正氣水的適應症正好相符。從臨床表現來說，陰暑多為頭身困倦、胸悶欲吐、腹痛下痢一類的病證，此時服藿香正氣水可借其散寒除濕、調和中氣之力較快地得到治療上的改善。

已有多種臨床研究證明此結論成立。彭美華等人曾把推拿與藿香正氣水一併用於陰暑的治療，按所用方法分組後觀察療效，發現治療

組比單用對照藥物者效果好得多，因而可認為藿香正氣水是陰暑治療的基礎用藥。周運就運動員中暑做過對照性研究，把藿香正氣水列入對照組所用藥物，其研究集中於先兆及較輕的中暑情況，得出針刺或拔罐療效更佳的結論，但同時也指出藿香正氣水對某些中暑有實際價值。另外有資料表明，將藿香正氣水內服、背部走罐同時運用治中暑可獲一次痊癒，該類報告所載病例多屬濕滯型的中暑表現。

3.3 陽暑誤用藿香正氣水的風險與數據警示

對於陰暑來說所見的明顯療效和陽暑證中誤用藿香正氣水而使病況惡化這兩者是對照現象，現已為中醫界所公認。

就藥性來說，藿香正氣水所含的藿香、紫蘇、白芷及陳皮多是溫性藥物，全方藥性偏溫。其中所用乙醇（酒精）亦為溫熱類物質。而陽暑的病機要旨是“暑熱由內而盛”，治療應以“清熱、解暑、益氣、生津”為指導，宜採用寒涼藥。對陽暑患者使用溫熱性的藿香正氣水，實為“助紂為虐”，對津液有害、對熱邪亦無抑制作用。臨床上已有實例說明高溫勞動導致頭暈、噁心者，有時被當作中暑來處理，服用了藿香正氣水，結果所遇不適沒有減輕，甚至體溫上升、精神煩擾的情形更明顯。

廣州醫科大學附屬第二醫院的藥師明確指出：“很多人有一個用藥誤區，一說到中暑就用藿香正氣水（丸），事實上藿香正氣水（丸）只適用於陰暑，陽暑誤服藿香正氣水，可能會引發高熱昏迷！”這一警示值得地盤職安健管理人員高度重視。

就藥物流行病學而言，對地盤工人所遇中暑的各證型做大規模統計調查目前尚無結果，但從臨床角度可以作一定推測：夏季在戶外工作而中暑者，有以陽暑為主（長期曝於烈日）的情形，亦可因馬上進冷房、多飲冰水而得到陰暑類診斷，或同時有二者的徵兆。因此若地盤上只把藿香正氣水當作萬能藥，規定所有不適都應服用它，便要冒陽暑病人被錯誤地給予溫熱藥物之險，治療不能及時展開，有關的不良後果亦較容易發生。

3.4 不同中暑證型的優選藥物方案

基於以上分析，地盤夏季防暑用藥應當建立“辨證選藥”的思路，根據工人的具體症狀表現選擇相應的藥物。

針對陽暑證（高熱、大汗、煩渴），治療應以清熱解暑、益氣生津為原則。可選用的中成藥包括：

十滴水：由樟腦、乾薑、大黃等組成，具有健胃、祛暑、散寒的作用，適用於中暑所致的頭暈、噁心、腹痛等症狀。與藿香正氣水相比，十滴水藥性相對平和，對陽暑輕症有一定緩解作用。

人丹：所列成分是薄荷腦、冰片及丁香一類的物質，可作清暑開竅、驅邪解毒之用，對因中暑而有頭暈、胸悶或噁心的情況很有療效，尤宜輕症陽暑。

生脈飲：人參類藥物（即黨參、麥冬及五味子）所制的方劑可作益氣複脈、滋陰生津之用，正好適合暑邪所傷的氣津不足證（如氣短、口渴、多汗）。按現代醫學的觀點看，生脈飲有促進心肌、穩定血壓的作用，對於防止或治療熱衰竭來說是良法。

白虎湯類製劑：若所遇的陽暑熱象很突出，可用白虎湯、清暑益氣湯之類複方加以治療，不過這類方藥要由醫生來指導使用。

若所遇為陰暑證（有惡寒、無汗、噁心及腹瀉諸症），藿香正氣水（或軟膠囊、口服液）應作首選。午時茶可以作為替代品加以考慮，對解表、化濕都有一定作用。

有關暑傷氣津的情況（即乏力、口渴或大汗），以生脈飲為最好療法。所用藥物性質溫和，治療時可用，平時亦可當飲料，在炎熱勞動的間隙予以服用，對補充氣液、提高耐熱功能有幫助。

所稱的暑熱動風證（即高熱神昏或抽搐）是嚴重疾病，不能由病人自己處理、用藥，應即送醫院。如醫生認為有必要，可將安宮牛黃丸一類藥物用於清心開竅，但萬不可把它當作現代急救的唯一辦法。

下表概括了不同證型的用藥選擇：

表：中暑不同證型的藥物選擇對照

證型	核心病機	首選藥物	輔助藥物	禁用藥物
陽暑	暑熱內熾	十滴水、人丹	白虎湯類	藿香正氣水
陰暑	寒濕困表	藿香正氣水	午時茶	清熱解毒藥
暑傷氣津	氣陰兩傷	生脈飲	西洋參茶	燥熱傷陰藥
暑熱動風	熱極動風	安宮牛黃丸	羚角鉤藤湯	所有口服藥物

3.5 現代藥理學研究對中藥治療中暑的證據支持

目前所見的現代藥理學資料對中醫藥用於治療中暑已有較多科學說明。從病理生理角度看，中暑不單是熱性損害，還與電解質失衡、缺血再灌注、橫紋肌溶解、內毒素血症、炎症及免疫現象、細胞壞死或凝血異常諸項有關。已有文獻指出：由中暑引起的全身性炎症反應（即 SIRS）或多個器官功能障礙是造成死亡的基本原因。

按此思路已有多種研究討論中藥對於中暑相關器官損傷的療效。從《BMC Complement Altern Med》上所載的徐秋林等人論文可知：血必淨注射液可明顯減少中暑小鼠體內促炎細胞因數（TNF-α、IL-6）含量，使內皮相關指標（vWF、E-selectin）有所下降，同時對肝、心、腎的損害作一定緩解，而且有提高存活率的作用。文中清楚指出血必淨借由抗炎及抗內皮損傷機制來保護中暑時的多器官系統。儘管所用藥物是靜脈製劑，不能直接用於地盤上的急救，但上述結果支持以中醫藥方式處理中暑重病的思路，又暗示口服中成藥或能沿此路徑起預防或治療作用。

有另一篇綜述對因中暑而發生的急性腎損傷作較完整的機制分析及治療討論，把傳統中醫藥當作可能的調節手段加以考慮，因而提出有關新式治療方案發展的可行思路或方向。所提證據顯示中醫藥對於職業性健康問題很有應用潛力。

第四章　建築業職安健引入中醫藥的建議與實施路徑

4.1 現狀評估：地盤防暑工作的優勢與不足

當前建築業地盤的夏季防暑工作已經形成了一套較為成熟的體系。多數大型建築公司會制定高溫作業應急預案，採取包括調整作業時間（避開正午高溫）、設置休息棚、提供飲用水、配備常用藥品等措施。宿舍區要求通風乾燥，生活設施有專人管理，這些都是值得肯定的做法。

然而，所談的藥物配置及健康手段仍有相當大的缺欠：

第一，有關用藥的觀念不夠先進。“一藥治百暑”是較普遍的誤解，藿香正氣水被當作萬能的解暑劑，不能分辨各種中暑類型。

第二，沒有按辨證方法來處理問題。藥箱所備的藥品一般只是一種，由工人自己用藥，少有指導。

第三，所談的健康教育不夠完整。有關中暑的知識只說“熱的時候會得”，沒有把貪涼、飲冷同“中暑”（即陰暑）聯繫起來，也未提藥物應按情況使用的問題。

第四，目前中西醫結合的狀況不夠理想。有關職業安全與健康的現代制度沒有將中醫藥

作整體性的運用，中醫特長未被很好利用。

4.2 引入中醫藥的理論基礎與實踐價值

將中醫藥納入建築業所用的職安健體系是既有理論、又有實際意義的做法。

若按理論來考察，中醫所稱的“治未病”與職業健康以預防為主的思路是高度一致的。“治未病”應作三方面理解：未病先防、既病防變、瘥後防複。就夏季防暑而論，未病先防即利用調節生活、改善飲食或用藥物的方式，使工人能較好地應付高溫；既病防變就是對中暑的前兆作出判斷、迅速處理、不令其惡化；瘥後防複是借助中醫方法治療中暑，將病人身體的正氣予以恢復或重新調和。

若按實際應用來考察，中醫藥以“簡、便、驗、廉”為基本特點。所稱的中成藥多價低、用法不繁、療效可靠，對地方情況很適應，宜予推廣。至於中醫所用非藥物療法（例如刮痧或穴位按壓），本身不難操作、不用專門器械，是急救時可用的輔助方法。

4.3 具體實施路徑

從上面所作的分析出發，給出這樣的實施方法：

第一，建立分級用藥指導體系。

按中暑所處的階段及具體證型來考慮分級用藥。對於地盤醫藥箱來說，所備的藥品要分三類：對陽暑輕症可用十滴水或人丹一類；對陰暑宜用藿香正氣水（或軟膠囊）一類；對氣陰兩傷者應有生脈飲口服液一類。藥箱上最好附有清楚的用藥提示，用圖或文字指明各項症狀與對應藥物的關係。舉例說明時可寫成：“高溫下長時間曝曬而大汗、口幹、頭昏——該用十滴水”“吹冷風或用空調致噁心、瀉下、無汗——該用藿香正氣水”。

第二，開展中醫防暑知識培訓。

應把中醫有關防暑的知識列入地盤工人職業安全的培訓範圍。所講內容要以實用為主：先兆中暑怎樣識別、陽暑或陰暑如何簡單地區分（是否多汗、是否口渴、有無腹瀉）、有關藥物應怎樣用及不宜怎樣用。培訓宜採取多種形式，例如發單、貼畫、開講座、放短片等手段加以說明。按年計畫安排夏季到來之前的專門培訓，使全體工人對所涉知識作一基本瞭解和記憶。

第三，推廣中醫非藥物療法。

應提倡對所轄地區採用較簡單的中醫非藥法。例如：

穴位按壓：若已有頭暈或噁心一類的先兆性中暑表現，按人中、合穀及內關諸穴予以刺激，對醒腦止暈、減痛有幫助。

刮痧療法：若因陰暑出現頭身困倦或胸悶噁心的情形，可用頸部及背部膀胱經作刮痧以解暑濕之困。此時刮痧要按規程做，不要傷及皮膚。

代茶飲：高溫作業所處的間歇時間適合用綠豆湯或西瓜翠衣湯、荷葉粥來清暑。若屬氣虛體質，西洋參片泡水作茶是補氣養陰的好辦法。

第四，應把中醫健康檔案和個體干預結合起來。

有關曾中暑或體質較弱的工人應設立基本的中醫健康檔案，把所遇的體質類型（氣虛、濕熱等）記清楚，在夏季高溫到來前提出適合的防暑辦法。對氣虛體質的人要推薦用生脈飲加以預防；濕熱體質者宜吃淡食而不要多油。若有必要可由中醫師作巡迴檢查或做遠程會診，按具體情況對工人做專門的健康提示與指導。第五，應把中醫藥列入中暑預案的考慮範圍。

有關地盤中暑的應急預案要清楚說明中醫藥如何運用。對輕、中度中暑所作的辨證分析可用中成藥來處理，同時配合一般降溫及補液辦法予以治療。遇到重症中暑（高熱神志不清、抽搐）應即送醫搶救，但此時若能有專業人員協助，可在轉運或入院時就用安宮牛黃丸

之類急救中藥。對已用過的藥物須做登記，以利於醫療過程各階段的銜接和資訊溝通。

4.4 可行性分析與預期效果

所提的實施方法基本是可行的。從成本角度說，中成藥本身價低，加多藥箱內藥物種類對費用影響不大。培訓內容不難、不抽象，工人學起來比較快。非藥物類療法沒有特殊器械要求，適合推廣。至於健康檔案的建立，可考慮用試點班組做試驗，取得成效之後再把做法擴展到其他班組或單位。

預期實施效果包括：第一項是有關工人中暑發生率的改善，特別是誤用藥所造成病情惡化的情況變少。第二項是工人自己對中暑已有較清楚認識、防護意識較強。第三項提到工地在職業安全與健康上作較完整的安排，有以人為本的思想。第四項給出針對建築行業實際而設計的中西醫結合模式，可供其他露天作業類行業參考、學習。

第五章 結論與展望

5.1 研究結論

所論內容是“地盤夏季職安健之中暑篇”，以中醫藥為線索對中暑作辨證分析，把藿香正氣水作為實例加以說明，分別指出各證型用藥及將中醫藥用於建築職安健的可能性。文中給出的主要結論是：

第一，按中醫的說法，中暑要分作陽暑及陰暑兩類，所涉病因、病機、症狀與治療原則並不相同。陽暑是暑熱過盛於裏，應以清熱、解暑作為療法；陰暑是寒濕阻於外表，須散寒、化濕。

第二，藿香正氣水以治療陰暑證為最宜，對於陽暑證沒有效果，有時甚至因溫熱藥性使病況惡化。從中醫觀點及實際病例看，此結論是成立的。

第三，有關地盤上所用的防暑藥物應以辨證方法來考慮，即按工人實際症狀分別使用十滴水、人丹、生脈飲或藿香正氣水。各種藥物適用的情況有別，不能互相代替。

第四，目前所知的現代藥理學資料對中醫藥治療中暑已有說明，像血必淨一類的中藥可用來控制炎症或緩解器官損害，由此可以判斷中醫藥對職業健康是可行的療法。

第五，將中醫藥用於建築業的職安健是可行、必要的。有關做法可有以下五項：按級別設定用藥辦法、把中醫防暑列入培訓內容、利用非藥性手段、做健康記錄、擬訂應急方案。

5.2 研究貢獻

本研究的理論貢獻在於：用中醫辨證論治的方法整體地思考建築業職業健康問題，是把傳統中醫藥同現代職業醫學連接起來的理論嘗試。對藿香正氣水實際適用情況加以分析，既可修正過去有關用藥的錯誤看法，又可使職業性中暑防治更趨完整。

本研究的實踐貢獻在於：所提方案是實際可用、費用合理的類型，正好適合用於地盤上的管理。對建築現狀及施工人員的需要作了較完整的分析，因而有較大的操作餘地與推廣意義。

5.3 研究局限與未來方向

所做研究本身有若干限制。從流行病學角度來說，對地盤工人有關的中暑證型資料尚不充分，不能很好估計藥物用量需求。目前未找到足夠多以地盤為背景的中醫藥治療實例或分析，循證依據要作進一步補充說明。另外一些中成藥因地域而異（供應、價格皆然），由此產生的問題或可削弱方案的普遍適用性。

未來研究可從以下方向深入：第一項是有關地盤工人中暑證型的調查分析，要以所得資料指導藥物的配置工作。第二項是用隨機對照法來考查各類中成藥對中暑所作的預防或治療及其安全性。第三項是關於中西醫配合治療中暑的思考，要找出中醫藥各階段應用的合理方法。第四項是對中藥有效組分抗中暑、護器官

的機理作分析，將已知作用歸入可能的新藥靶點加以說明。

5.4 結語

夏季高溫是建築行業所面對的實際危險，科學合理的防暑手段應成為勞動健康的基本保障內容。中醫藥為中華民族提供了大量關於養生及各類病患處理的歷史性智慧。從傳統醫學角度來思考建築業的職安健問題，是繼承中醫傳統的做法，亦是職業健康制度的補充或革新。希望文中所述思路能激發有關中醫藥治中暑的討論，促成多種穩妥、實用、可行的防暑辦法被應用到工地之中，使所有高溫作業者都可得到較完整的健康照顧與保護。

參考文獻

［1］ The Chinese Herbal Formula Huoxiang Zhengqi Dropping Pills Prevents Acute Intestinal Injury Induced by Heatstroke by Increasing the Expression of Claudin-3 in Rats, Wiley Online Library, 2022

［2］ Huoxiang Zhengqi Dropping Pills Alleviate Exertional Heat Stroke - Induced Multiple Organ Injury through Sustaining Intestinal Homeostasis via Regulating MAPK/NF-κB Pathway and Gut Microbiota in Rats, Frontiers, 2024

［3］ Qingshu Yiqi tea prescription attenuates heat-stressed injury: network pharmacology and experimental validation, ScienceDirect, 2025

［4］ Huoxiang Zhengqi dropping pills alleviate exertional heat stroke - induced multiple organ injury through sustaining intestinal homeostasis via regulating MAPK/NF-κB pathway and gut microbiota in rats, Frontiers in Pharmacology, 2025

［5］ Preventive administration of shengmaiyin: a novel approach to counteract heatstroke-induced coagulopathy in rats, Frontiers in Pharmacology, 2025

［6］ 藿香正氣口服液通過調節短鏈脂肪酸水平和TLR4/NF-κB p65 通路減輕 LPS 誘導的急性肺損傷, 劉馥溧, 巴元明 - 中國藥房, 2025

［7］ 基於抗炎作用的質量標誌物的金銀花口服液質量評價研究,《世界科學技術-中醫藥現代化》2023 年 25 卷 11 期

［8］ 生脈飲的化學成分、藥理作用和臨床應用進展,《天津中醫藥大學學報》2024 年 43 卷 6 期

［9］〈藿香正氣水並非中暑「萬能藥」〉,《大眾健康》2023 年第 8 期, 中國知網

［10］〈解暑先分清中暑類型〉,《健康時報》, 王澤民, 2007 年

［11］ 中西醫結合治療重症中暑的臨床研究,《中國中醫急症》2012 年第 6 期

［12］ Sheng Mai San Mitigates Heat Stress-Induced Myocardial Injury by Coordinated Regulation of the Keap1-Nrf2-HO-1 and Stub1-HSF1 Signaling Pathways, J Dong, Q Ma, R Yang, X Zhang, Y Hua, P Ji, W Yao…- Antioxidants, 2025

［13］ 血必淨注射液預處理通過減輕小腸損傷緩解重症中暑大鼠全身炎症反應,《中華危重病急救醫學》2015 年第 27 卷第 8 期

［14］ 大柴胡湯通過 TLR4/NF-κB 通路改善重症中暑大鼠炎症的機制研究,《中國中醫急症》2024 年第 6 期

［15］ 新冠肺炎病人使用中醫藥治療及常用方劑之比較, 廖韋程, 方喬玲, 陳朝宗, 王明仁 - 北市醫學雜誌, 2022

［16］ The progress of the research on the characteristics function and the action mechanism of qing re jie du yao, SS Lam, Y Feng - 香港中醫雜誌, 2009

物業管理在極端天氣下的安全韌性策略

基於 ISO/PAS 45007:2026 的氣候相關職業安全健康管理框架研究

謝津權博士（Dr. TSE CHUN KUEN，Alex）
香港勞工處職業安全及健康委員會委員
香港職業安全健康協會委員
香港安全專業人員協會榮譽顧問

摘　要：全球氣候變化正改變職業安全健康管理的風險圖像。超強颱風、極端暴雨、山泥傾瀉及持續酷熱天氣，使物業管理及設施管理行業面對前所未有的安全挑戰。物業管理人員在極端天氣前、中、後期需維持樓宇及設施運作，並執行防風、防洪、巡查、搶修、疏散及災後復原等工作，因而暴露於觸電、滑倒、高空墜物、密閉空間、熱應力及斜坡失穩等危害。本文以 ISO/PAS 45007:2026 為理論基礎，結合 ISO 45001:2018、香港勞工處指引、物業管理業監管局操守守則、屋宇署通函及土木工程拓展署《岩土指南第五冊》，採用文件分析及案例輔助分析，探討物業管理行業如何由被動應急轉向主動式安全韌性管理。本文提出「硬體韌性、程序韌性及人本韌性」三層模型，強調透過防洪設施、智能監測、動態風險登記冊、安全停工授權、緊急演習、熱應力管理及員工參與，提升組織在極端天氣下的預測、監察、應變及復原能力。

關鍵詞：物業管理；極端天氣；安全韌性；ISO/PAS 45007；職業安全健康；斜坡管理；ESG

1. 引　言

氣候變化已不再只是環境保護議題，而是直接影響城市安全、企業營運及職業安全健康的重要風險因素。近年香港先後經歷超強颱風、黑色暴雨、嚴重水浸、山泥傾瀉及酷熱天氣，反映極端天氣已由偶發性自然災害逐步演變為城市日常營運中的常態風險（Government of the Hong Kong Special Administrative Region. Information Services Department，2023；香港天文台，2023a）。對物業管理行業而言，這種變化尤其明顯：颱風前需檢查外牆附屬物、棚架、排水及天台設施；暴雨期間需啟動防洪及泵房監察；災後則需安排清理、復檢、住戶溝通及設施復原。

傳統物業管理主要關注保安、清潔、維修及客戶服務，但在氣候風險加劇下，物業管理公司實際上已成為城市氣候韌性的前線執行者。單靠固定應急手冊或事後處理，已不足以應對複合、動態及跨專業風險。因此，物業管理企業有需要將極端天氣納入職業安全健康管理系統，並由合規導向轉向以安全韌性為核心的主動管理模式（International Organization for Standardization，2026）。本文旨在探討極端天氣如何改變物業管理職安健風險，並提出可供業界應用的三層安全韌性模型。

2. 文獻回顧與理論基礎

安全韌性源於韌性工程及現代安全管理理論，強調組織不僅要防止事故，也要在不確定及高壓環境下維持安全運作。相對於傳統以事故後調查、違規糾正及損失控制為主的模式，安全韌性更重視預測、監察、應變及學習能力。預測是根據氣象、設施狀況及歷史事件識別危害；監察是透過巡查、感測器、資訊系統及匯報渠道掌握風險變化；應變是迅速採取控制措施；學習則是災後檢討並修訂制度。

ISO/PAS 45007:2026 要求組織識別、評估及管理由氣候變化影響及氣候行動衍生的職安健風險，並可與 ISO 45001:2018 的職安健管理系統整合（International Organization for Standardization，2018，2026）。對物業管理企業而言，防洪設施、智能樓宇、排水改善、太陽能設備、外牆維修及承辦商工程均可能帶來高空工作、電氣安全、密閉空間、新技術操作及承辦商管理等風險。因此，氣候韌性不應只被視為樓宇或資產保護問題，也應被納入職安健管理及企業風險治理。

3. 研究方法

本文採用質性文件分析法、主題分析法及概念模型建構法。研究資料包括 ISO/PAS 45007:2026、ISO 45001:2018、香港勞工處《惡劣天氣及「極端情況」下工作守則》及《預防工作時中暑指引》、物業管理業監管局《處理緊急事故》及《處理棚架工作》操守守則、屋宇署有關雨季及颱風季節文件，以及土木工程拓展署《岩土指南第五冊：斜坡維修指南》（International Organization for Standardization，2018，2026；香港特別行政區政府勞工處，2026a，2026b；物業管理業監管局，2022a，2022b；香港特別行政區政府土木工程拓展署土力工程處，2023）。

分析程序包括四個步驟。第一，蒐集與氣候相關職安健、惡劣天氣工作安排、緊急事故、棚架、渠務、樓宇及斜坡安全有關的標準及指引。第二，按風險識別、風險評估、預防控制、應變安排、員工保護及持續改善六個主題進行歸納。第三，比較不同文件之間的共通點及差異。第四，結合安全韌性理論與物業管理實務，建構「硬體韌性、程序韌性及人本韌性」三層模型。本文亦參考 2023 年超強颱風蘇拉及 2023 年 9 月破紀錄暴雨作案例輔助分析（Government of the Hong Kong Special Administrative Region. Information Services Department，2023；香港天文台，2023a；Guy Carpenter，2023）。

為避免只是羅列法規要求，本文將各文件要求重新轉化為物業管理日常運作語境，包括颱風前預防巡查、暴雨期間現場管制、酷熱天氣工作安排、承辦商高風險工程管理及災後復原檢討。此方法有助將分散於不同制度中的要求，整合成一套可供物業管理企業操作的安全韌性框架。本文屬概念性及應用導向研究，目的並非判斷個別事故責任，而是建立一個可供後續專家訪談、德爾菲法或個案比較研究驗證的初步模型。

4. 監管及實務框架

香港現行多項指引均與極端天氣下物業管理安全有關。勞工處《惡劣天氣及「極端情況」下工作守則》要求僱主在颱風、暴雨及極端情況下預先制定切實可行的工作安排，並以員工安全、法例責任及雙方協商為主要原則（香港特別行政區政府勞工處，2026a）。《預防工作時中暑指引》則要求僱主評估熱壓力，並採取休息、飲水、遮陰、通風、輪休及健康監察等措施（香港特別行政區政府勞工處，2026b）。

物業管理業監管局《處理緊急事故》操守

守則要求持牌物業管理公司建立緊急事故處理機制，包括識別可能發生的緊急事故、進行風險評估、制定程序、委任負責人、安排演習、設立溝通渠道及保存紀錄（物業管理業監管局，2022a）。土木工程拓展署《岩土指南第五冊》則指出斜坡及擋土牆需定期維修檢查，以減低暴雨後失穩風險（香港特別行政區政府土木工程拓展署土力工程處，2023）。上述要求雖來自不同機構，但共同指向事前準備、員工保護、承辦商管理、事故應變及災後檢討。

從實務角度看，這些規管文件若分開執行，容易出現部門各自為政的情況。例如，保安部門較重視人流及住戶溝通，工程部門重視排水、泵房及機電設備，清潔隊伍負責渠口、沙井及積水處理，承辦商則涉及棚架、吊船、外牆或斜坡工程。若缺乏統一的氣候風險平台，現場資料可能在災害期間未能迅速整合。因此，本文認為應以 ISO/PAS 45007 作為整合框架，把不同文件要求轉化為一套跨部門、可追蹤及可改善的管理安排。

表一　主要管理框架與物業管理應用

來源	核心要求	物業管理應用
ISO/PAS 45007	管理氣候相關職安健風險	納入職安健管理及企業風險治理
勞工處指引	惡劣天氣工作安排及中暑預防	制定上班、停工、輪休及熱應力措施
物業管理業監管局操守守則	緊急事故機制、演習及紀錄	建立應變程序、負責人及客戶溝通
土木工程拓展署《岩土指南第五冊》	斜坡、樓宇及颱風季節安全	檢查外牆、棚架、排水及斜坡設施

5. 極端天氣下的主要職安健風險

暴雨及水浸是物業管理最常見的氣候相關風險。當暴雨警告生效時，管理人員需巡查天台、排水渠、沙井、泵房、電掣房、後備發電機房、停車場及外圍排水設施，並按需要安裝沙包、防洪板及潛水泵。水浸不但造成設施損壞，也會引致觸電、滑倒、污水感染、肌肉骨骼勞損及溺水風險。若員工在地庫水位急升時進入泵房、升降機井附近或停車場處理事故，更可能面對突發斷電、短路及倒灌危害（香港特別行政區政府勞工處，2026a；物業管理業監管局，2022a）。

颱風期間的主要風險包括高空墜物、玻璃破裂、棚架倒塌、樹木倒塌、強風吹襲及戶外巡查跌倒。物業管理公司應在颱風季節前檢查天台、外牆、棚架、吊船、排水口及可移動物件，並提醒住戶移走露台雜物。當風力增強時，前線人員不應為非緊急任務暴露於戶外危險環境。棚架、吊船及外牆維修涉及承辦商管理及公眾安全，應包括天氣預警聯動、合資格人士覆核、停工安排、現場封鎖及災後復檢（物業管理業監管局，2022b；香港特別行政區政府屋宇署，2025）。

酷熱天氣亦是容易被低估的職業健康風險。保安、清潔、園藝、外圍巡查及斜坡檢查人員可能因高溫出現脫水、熱衰竭及中暑。酷熱亦會降低警覺性及判斷力，間接增加跌倒及操作錯誤。企業應按工作強度、工作地點、天氣指數及員工健康狀況安排輪休、飲水、遮陰、透氣制服及主管訓練（香港特別行政區政府勞工處，2026b）。香港地形多山，私人斜坡及擋土牆廣泛分布於住宅及公共設施附近。物業管理公司應協助業主保存斜坡維修手冊及檢查紀錄，定期清理排水渠及疏水孔，並在山泥傾瀉警告生效時限制人員接近高風險位置（香港特別行政區政府土木工程拓展署土力工程處，2023）。

除上述物理危害外，極端天氣亦會產生組織及人因風險。當公共交通受阻、通訊中斷或

住戶求助增加時，前線員工可能面對長時間值勤、決策壓力、情緒勞動及資訊超載。災後復原階段看似危機已過，但清理碎片、檢查機房、處理積水及協調承辦商復修，仍可能涉及二次事故。因此，物業管理企業不應只關注警告生效期間的應變，也應將災前準備及災後復原納入同一套風險管理週期。

表二　極端天氣風險、控制措施與韌性層面

情境	主要危害	控制措施	韌性層面
暴雨及水浸	觸電、滑倒、污水感染、倒灌	防洪板、泵房監測、水位警報、封鎖	硬體 / 程序
颱風及強風	高空墜物、棚架倒塌、塌樹	預防檢查、停工安排、現場封鎖	程序
酷熱天氣	中暑、疲勞、判斷力下降	飲水、輪休、遮陰、主管訓練	人本
斜坡及擋土牆	山泥傾瀉、排水失效	定期維修、清理疏水孔、限制接近	硬體 / 程序
災後復原	疲勞、心理壓力、次生事故	復檢、支援、事故檢討及紀錄	人本 / 程序

6. 香港極端天氣案例分析

2023 年超強颱風蘇拉是近年香港面對的重要熱帶氣旋事件。根據香港天文台資料，蘇拉令香港發出十號颶風信號，並在接近香港期間帶來猛烈風雨及風暴潮（香港天文台，2023a，2023b）。從物業管理角度看，事件反映天台設施、外牆附屬物、棚架、排水系統、停車場及機電房均需在颱風季節前完成預防性檢查。此案例凸顯硬體韌性及程序韌性的重要，包括防洪設施、後備電力、停工程序、現場封鎖、緊急通訊及災後復檢。

2023 年 9 月香港出現破紀錄暴雨，天文台總部一小時錄得 158.1 毫米雨量，黑色暴雨警告持續超過 16 小時（Government of the Hong Kong Special Administrative Region. Information Services Department，2023；Guy Carpenter，2023）。該事件導致多區水浸，商場、停車場、道路及交通設施受影響。對物業管理而言，地下空間、泵房、電掣房及升降機井道是高風險位置，前線員工可能面對觸電、滑倒、污水污染及緊急疏散風險。此案例說明動態風險登記冊、實時水位監測、清晰指揮鏈及安全停工授權的重要性。

兩個案例亦顯示，物業管理的氣候風險並非單一工程問題，而是牽涉人員、設施、承辦商、客戶溝通及社區安全的系統問題。蘇拉事件突顯強風及風暴潮下外牆、棚架、天台及低窪設施的防護需要；破紀錄暴雨則突顯地下空間、排水能力及即時封鎖決策的重要。若物業管理公司能在災前完成清單化檢查、在災中保持即時監測、在災後進行復檢及經驗回饋，便可把個別事件轉化為組織學習。

表三　兩個香港案例對安全韌性的啟示

案例	暴露出的弱點	韌性改善方向
超強颱風蘇拉	外牆附屬物、棚架、天台及低窪設施受風暴影響	颱風季前預防檢查、後備電力、停工及封鎖程序
2023 年破紀錄暴雨	地下空間、泵房、電掣房及停車場水浸風險突出	水浸黑點登記冊、實時水位監測、安全停工授權

7. 極端天氣下物業管理安全韌性三層架構模型

本文提出「硬體韌性、程序韌性及人本韌性」三層架構模型，以整合極端天氣下物業管理的工程控制、行政管理及人員保護措施。第一層為硬體韌性，指物業設施及基礎設施抵禦

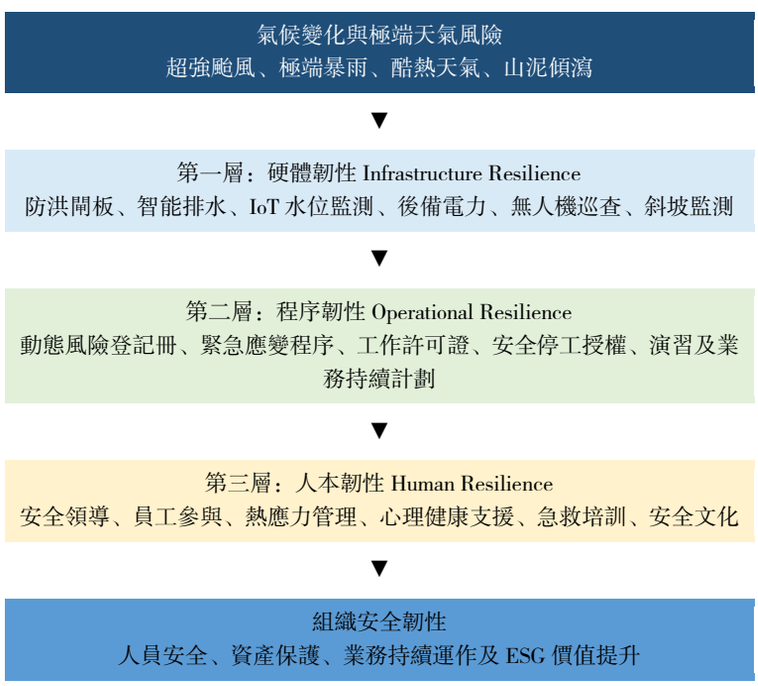
極端天氣衝擊的能力，包括防洪閘板、防水屏障、智能排水、IoT 水位監測、後備電力、無人機巡查及斜坡監測。其目的在於降低災害對物業設施的直接衝擊，並減少人員暴露於高危環境。

第二層為程序韌性，指組織透過制度及流程提升預警、應變及復原能力，包括動態風險登記冊、惡劣天氣應變程序、工作許可證、安全停工授權、承辦商管理、演習及業務持續計劃。動態風險登記冊應涵蓋水浸黑點、低窪地庫、外牆設施、棚架、斜坡、密閉空間、熱壓力工作及高風險承辦商活動，並按天氣警告及現場狀況更新。

第三層為人本韌性，強調前線員工的安全、健康、能力及心理福祉，包括安全領導、員工參與、熱應力管理、急救培訓、心理支援、疲勞管理及安全文化。前線員工不應只是被動執行指示的人員，而應是風險監察及早期預警系統的一部分。企業應賦予員工停止不安全工作的權利，並建立清晰匯報、支援及災後檢討機制。三層韌性相互支援，可提升組織的預測、監察、應變及學習能力，並有助企業 ESG 及業務持續管理（International Organization for Standardization，2026）。

三層模型的重點在於互補而非取代。硬體韌性可降低設施受損及人員暴露，但若缺乏程序韌性，設備可能未能在正確時間啟動；程序韌性可建立清晰責任及行動準則，但若忽略人本韌性，前線員工仍可能因疲勞、壓力或資訊不足而作出錯誤判斷。人本韌性則使員工具備識別異常、即時匯報及拒絕不安全工作的能力。因此，物業管理企業應同時投資設施、程序及人員能力，而非只依賴單一控制措施。

圖一　極端天氣下物業管理安全韌性三層架構模型



資料來源：根據 ISO/PAS 45007:2026、物業管理業監管局《處理緊急事故操守守則》、香港勞工處《惡劣天氣及「極端情況」下工作守則》及土木工程拓展署《岩土指南第五冊》整理及構建。

本研究顯示，香港物業管理行業在極端天氣應變方面已有相當多實務經驗及規範文件，但仍存在三項限制。第一，部分公司仍以事件驅動方式處理風險，待天文台發出警告後才啟

動措施。第二，不同風險分屬保安、工程、清潔及承辦商處理，若缺乏統一平台，容易造成資訊分散、責任不清及應變延誤。第三，前線員工的角色仍需重新定位，他們不應只是被動執行指示的人員，而應是風險監察及早期預警系統的重要組成部分。

本文建議物業管理企業從六方面推動安全韌性：一是把極端天氣納入企業風險治理及職安健管理系統；二是建立動態風險登記冊，定期更新水浸、棚架、斜坡、密閉空間及熱壓力風險；三是投資防洪、排水、後備電力及智能監測；四是建立安全停工授權及極端天氣工作程序；五是強化承辦商及棚架管理；六是將熱應力、心理健康、疲勞管理及災後支援納入人本韌性管理。相關成效可透過演習次數、員工培訓完成率、防洪設施檢查率、水浸黑點改善率、停工程序啟動紀錄及災後檢討完成率作為績效指標。

在落實優先次序方面，大型屋苑、商業大廈及綜合物業可先由水浸黑點、泵房、電掣房、升降機井道、棚架工程及斜坡位置建立風險清單，再按警告信號或天氣預報調整人手和承辦商安排。中小型物業即使資源有限，也可透過標準化巡查表、簡易水位警報、WhatsApp或物業管理系統通報、預先分配停工權限及災後檢討表，逐步建立安全韌性。此做法可避免安全韌性只停留在大型企業或高科技投資層面。

9. 結　論

極端天氣常態化正在改變物業管理行業的職業安全健康風險結構。前線物業管理人員在颱風、暴雨、酷熱及山泥傾瀉下已成為城市安全和設施持續運作的重要防線，但同時面對觸電、滑倒、高空墜物、熱應力、密閉空間及斜坡失穩等多重風險。本文以 ISO/PAS 45007:2026 為基礎，結合香港物業管理、勞工安全、樓宇安全及斜坡管理要求，提出「硬體韌性、程序韌性及人本韌性」三層安全韌性模型。研究認為，物業管理企業必須由被動應變走向主動預防，從單一合規走向整合式氣候安全管理。透過防洪設施、智能監測、動態風險登記冊、安全停工授權、熱應力管理及員工參與，企業可提升極端天氣下的預測、監察、應變及復原能力，保障前線員工生命健康，保護物業資產，並促進可持續發展。未來研究可透過專家訪談、德爾菲法或實地案例，進一步驗證模型在住宅、商業、公共設施及大型綜合物業中的適用性。

參考文獻

［1］ Government of the Hong Kong Special Administrative Region. Information Services Department.（2023 年 10 月 4 日）. A September with Super Typhoon Saola and record-breaking rainstorm. https://www. info. gov. hk/gia/general/202310/04/P2023100300488. htm

［2］ Guy Carpenter.（2023）. Post event report：2023 Hong Kong rainstorm. https://www. guycarp. com/ insights/2023/09/HK_Rainstorm_07-09-2023. html

［3］ International Organization for Standardization.（2018）. Occupational health and safety management systems：Requirements with guidance for use（ISO Standard No. 45001:2018）. https://www. iso. org/standard/63787. html

［4］ International Organization for Standardization.（2026）. Managing occupational health and safety risks arising from climate change（ISO/PAS Standard No. 45007:2026）. International Organization for Standardization.

［5］ 香港天文台.（2023a）. Report on Super Typhoon Saola（2309）. https://www. hko. gov. hk/en/ publica/tc/tc2023/section3_3rpt. html

［6］ 香港天文台.（2023b）. Super Typhoon Saola（2309）：23 August to 3 September 2023. https://

www. hko. gov. hk/en/publica/tc/tc2023/section3_3. html

［7］ 香港特別行政區政府勞工處.（2026a）.《惡劣天氣及「極端情況」下工作守則》. https://www. labour. gov. hk/tc/public/pdf/wcp/Rainstorm. pdf

［8］ 香港特別行政區政府勞工處.（2026b）.《預防工作時中暑指引》（第三版）. https://www. labour. gov. hk/common/public/oh/Heat_Stress_GN_tc. pdf

［9］ 香港特別行政區政府屋宇署.（2025）.《致物業管理公司的通函：颱風季節期間公眾及樓宇安全預防措施》. https://www. bd. gov. hk/doc/en/resources/codes-and-references/practice-notes-and-circular-letters/circular/2025/CL_PMPBSTS2025e. pdf

［10］ 香港特別行政區政府屋宇署.（2026）.《雨季和颱風季節期間公眾及樓宇安全預防措施》. https://www. bd. gov. hk/tc/resources/codes-and-references/precautionary-measures-typhoon-season/index. html

［11］ 香港特別行政區政府土木工程拓展署土力工程處.（2023）.《岩土指南第五冊：斜坡維修指南》（第四版）. https://www. cedd. gov. hk/ filemanager/tc/content_113/cg5_2023. 11. pdf

［12］ 物業管理業監管局.（2022a）.《處理緊急事故》操守守則（守則編號：C12/2022）. https://www. pmsa. org. hk/tc/regulatory/codes-of-conduct

［13］ 物業管理業監管局.（2022b）.《處理棚架工作》操守守則. https://www. pmsa. org. hk/tc/ regulatory/codes-of-conduct

氣候變化下空中服務員職業安全與健康的挑戰與協作應對

王肇鋒[1]，　　許嘉晞[2]
1. 英國職業安全與健康學會航空及航天委員會委員
2. 英國職業安全與健康學會特許會員

摘　要：氣候變化作為一項全球性的重要議題，對於需頻繁跨區域運營的航空公司而言，無疑帶來重大挑戰。極端天氣的頻繁出現，不僅讓航機在空中和地面的工作環境變得更加險峻，例如劇烈湍流、暴雨與高溫酷熱，進而顯著增加意外及健康風險。相關研究亦顯示，預計至本世紀中葉，湍流的強度與發生頻率預計大幅提升，暴雨和高溫持續時間亦將延長，此趨勢不僅威脅員工安全，亦影響飛行穩定性與乘客舒適度。面對極端氣候條件的挑戰，並不能單靠航空公司獨自應對，必須與機場管理單位、地勤團隊、氣象專家以及飛機製造商等多方緊密合作。

本篇論文將聚焦於飛機上空中服務員的職業安全與健康（職安健）議題，探討在氣候相關風險持續加劇與演變的背景下，如何透過不同持份者間的持續協作，推動創新的應對策略，攜手打造更安全與健康且具關懷性的航空職場環境。

壹、前　言

近年來，全球氣溫持續上升及極端氣候事件頻繁發生，促使人們對氣候變化所帶來的影響愈加關注。就航空業而言，氣候變化對航空安全以及機組人員與乘客的生命安全產生了顯著影響。鑑於其職務特性，在機上工作的空中服務員的職業安全與健康（職安健）面臨著最直接且顯著的挑戰。由於氣候因素難以加以控制，較為可行的策略在於採取緩解措施，以降低事故發生後所造成的損害。除了航空公司對空中服務員的管理外，亦需與多方持份者密切合作，共同應對相關危害，確保在守護乘客安全的同時，空中服務員自身亦能獲得充分保護。

貳、空中服務員的工作特性及環境

一、空中服務員的工作

自一九三零年首位女性空中服務員誕生以來，空中服務員一直肩負著保障乘客及飛行安全的重要職責，並致力於提供高品質的客戶服務，以確保乘客在整個飛行過程中有舒適的體驗（International Civil Aviation Organization，2022）。他們在航班的工作主要分為四個階段。

在乘客登機之前，空中服務員需對客艙內的安全設施及應急設備進行全面檢查，以確保客艙環境的安全；同時，在乘客登機過程中，空中服務員亦負責協助乘客就座，並向有需要的乘客詳細說明緊急應變程序。

在飛機準備起飛之前，空中服務員會進行安全示範，部分航空公司會以影片形式替代現場示範。

起飛後，空中服務員在飛行過程持續監控客艙環境，確保乘客遵守相關規定，並在緊急情況發生時協助處理火災、醫療緊急狀況、協調乘客疏散，甚至管理違規乘客。此外，空中

服務員依照航空公司安排提供餐飲服務。

飛行結束後，空中服務員會進行客艙檢查，確認所有乘客已安全離開客艙，並檢視客艙內是否遺留行李或存在安全隱患。若為返程航班，空中服務員還需在有限時間內完成乘客登機前的各項準備工作。

隨著氣候變化帶來的挑戰，空中服務員在飛行過程中面臨的風險也逐漸增加。

二、工作環境

目前商用航班所使用的飛機尺寸，主要可分為寬體機與窄體機兩大類（FAA Office of Aviation Policy and Plans，2024）。寬體機通常指配備有兩條走道的飛機，其洗手間與廚房設施分布於客艙的不同區域。相較之下，窄體機則僅設有一條走道，乘客座位分佈於走道的兩側，且洗手間與廚房設施分別位於客艙的前端與尾端。

與陸上交通工具不同，飛機採用密閉式設計，機艙內的空氣透過冷卻與循環系統進行供應與再利用（陈元先，1999）。此外，鑑於乘客在飛行過程中坐下，客艙內普遍不設置扶手，僅有部份機型在頂部行李櫃下方設置扶手裝置。

參、氣候變化帶來的職安健危害

一、高溫

根據世界氣象組織的預測，氣候變化將導致高溫事件發生頻率顯著提升，且其持續時間亦將延長（World Meteorological Organization and World Health Organization，2025）。此現象對於需於炎熱的機艙環境中執行職務的空中服務員構成重大挑戰。

人體若長時間暴露於高溫環境中，調節體溫的生理機制可能無法有效運作，進而引發不同程度的健康損害，包括熱衰竭與中暑（香港勞工處，2026），在嚴重時可能危及生命。熱衰竭主要因大量出汗及嚴重脫水，導致體內水分與鹽分大量流失，進而影響心臟及血管的正常功能；而中暑則是因長時間處於高溫環境，體內熱量持續累積，造成中樞神經系統中負責體溫調節的功能失調。

表一：熱衰竭及中暑

	徵狀	後果
熱衰竭	· 皮膚濕冷、蒼白 · 感到頭痛、暈眩及噁心 · 情緒不安 · 昏厥	身體出現虛脫情況
中暑	· 皮膚乾熱而潮紅 · 感到頭痛、口渴及噁心 · 可能會有暈眩，當情況惡化時，病人會神志不清，然後不省人事 · 體溫上升至攝氏 40 度以上	腦細胞受損

由於空中服務員在飛行前需於客艙內執行多項準備工作，外界持續高溫將直接影響機艙內的溫度環境。以下將探討導致機艙溫度升高的相關因素：

（一）飛機停放於遠端停機位（Outer-bay）之情況

由於多種因素，飛機常需於遠端停機位停放一段時間，例如航空公司地勤服務代理設備多集中於該區域，或需進行簡易維修作業（中國民航局，2015）。故當飛機執行當日首班航班時，可能已在陽光曝曬下停留一段時間，致使密閉機艙內溫度顯著升高。因此，首批登機的空中服務員或需在機艙溫度尚未完全降低的狀態下展開工作。

（二）冷卻設備未能及時連接的影響

鑑於部分機場配合環保規範，飛機不得透過啟動引擎或輔助動力系統以供電啟動空調系統。取而代之，飛機需連接固定地面供電系統及空氣預調系統以緩解機艙高溫（香港民航處，2013）。然而，當上述設備發生故障時，機組人員可能需一方面指示工程人員採取替代措施，另一方面仍要求空中服務員持續執行工作。若相關冷卻措施遲遲未能到位，空中服務員或需在機艙溫度尚未完全降低之狀態下開始其工作，直至飛機起飛後，利用引擎運轉所產生的動力啟動空調系統，進一步降低機艙溫度。

二、湍流

國際民航組織指出，氣候變化導致風暴及閃電現象日益強烈，對航空安全產生顯著影響，尤其是湍流的頻率與強度均呈現上升趨勢（International Civil Aviation Organization，2025）。此變化使飛行過程中的顛簸情況加劇，進而增加機組人員受傷的風險。相關數據顯示，在亞太區因亂流引發的事故佔所有航空事故的 40%，因此被列為全球航空營運安全的重要風險類別（Regional Aviation Safety Group－Asia Pacific，2025）。

在不少個案中，空中服務員因湍流而受傷的主要原因為被拋起後撞擊客艙後跌落所致。受傷程度範圍涵蓋輕微受傷至較嚴重的骨折不等。

表二：空中服務員因湍流而受傷的個案

事故日期	航班編號	事故過程	損傷程度	系統性成因
29/3/2026	UA115	空中服務員於走廊執勤時受強大離心力拋起，頭部與肢體劇烈撞擊頂部行李架	一名空中服務員頭部受傷及嚴重腦震盪	雷達局限
27/6/2025	SQ832	在進行降落前客艙安全檢查時，航機劇烈顛簸，空中服務員受撞擊並重摔在地上	兩名空中服務員受傷，一人嚴重骨折	雷達局限
10/6/2025	TR100	空中服務員在廚房和或走廊進行降落前準備時，航機突發顛簸，導致人員猛烈撞擊艙壁，隨後重摔於客艙地面	三名空中服務員受傷，一人嚴重骨折	氣象雷達探測盲區
21/5/2024	SQ321	於派發早餐期間遭遇嚴重亂流使航機急墜，多名空中服務員被拋向天花板後重摔。	八名空中服務員受傷，兩人嚴重受傷	預警時間不足
18/6/2019	HX337	進行執行安全檢查時遭遇湍流，受強大氣流拋起並重摔於客艙地面。	一名空中服務員右腳骨折	預警時間不足

三、暴雨

在極端氣候下，暴雨能在極短時間內影響機場運作，並對工作人員的安全構成威脅。最明顯的情況為飛機停泊在遠端停機位，空中服務員需要搭乘接駁巴士並在戶外登機，此時雷暴及暴雨等惡劣天氣將直接危及其安全。

肆、機構協作推動應對策略

一、氣象機構

在應對氣候變化中，氣象機構於科學觀測與風險預警方面扮演關鍵角色。以惡劣天氣及晴空亂流為例，氣象機構運用天氣預報模型及衛星觀測技術，提升對相關氣象現象的預警能力，並透過機場終端氣象報告（Lanyon，Buchanan，& Creswick，2025）和危險天氣警告（Significant Weather（SIGWX）Forecasts，2026），能夠提供更迅速且精確的預報資訊，協助機師有效避開相關空域，從而降低因飛行不穩定所對空中服務員造成的風險。因為當飛機遭遇劇烈氣流並急速下墜時，若加速度超過地心引力，空中服務員若無法及時返回座位並繫上安全帶，將因慣性保持原高度，導致撞擊天花板。隨著飛機下墜停止，被拋起的人體亦可能摔回地面或座椅（Industry Airplane Upset

Recovery Training Aid Team，2008），造成骨折等創傷。因此，及時掌握相關氣象資訊以避免此類危險，顯得尤為重要。

以香港特別行政區為例，香港天文台於香港國際機場設置機場氣象所。根據《國際民用航空公約》附件三《國際航行氣象服務》及香港民航處編制的《香港航行資料匯編》，香港天文台作為指定的「氣象當局」，為對特定空域發布可能影響飛行安全的惡劣天氣警示（香港立法會，2020）。

同時，暴雨極成的跌倒危害和雷暴也不容忽視。為此，香港天文台與香港國際機場共同研發「機場雷暴和閃電預警系統」。當探測或預測機場島周邊一公里範圍內出現雷擊時，系統會發出紅色閃電警告信號，並即時停止停機坪的運作，以保障工作人員及乘客的安全（李炳华，张冰，谢淑媚，& 周志坚，2013）。此舉正是從源頭出發，避免空中服務員在雨中上落機時遇險。

二、飛機製造商

空中服務員的工作環境主要在飛機機艙內，故機艙設計對其工作安全具有關鍵影響。由於職務性質，空中服務員無法如乘客般長時間坐著，正如第二節所述，他們需持續於機艙內執行送餐、檢查乘客安全帶及廚房作業等任務。當飛行狀況不穩定時，他們必須依靠扶手或其他支撐物以維持身體平衡，避免碰撞或跌倒。然而，目前部份飛機走道上方儲物櫃（圖 1）並未設置扶手（圖 2），致使空中服務員僅能依靠乘客座位頭枕作為支撐，但由於乘客已就座，他們往往無法即時利用頭枕以獲得穩定支撐。此外，飛機廚房內亦缺乏適當扶手，導致空中服務員在缺乏支撐且反應時間有限的情況下，容易發生跌倒意外。

圖 1

圖 2

故此，飛機製造商於設計新一代飛機時，應考慮候變遷所致飛行不穩定事件增加的趨勢，並在兼顧多方因素下，於走道上方及廚房區域增設小型扶手，以提升空中服務員的工作安全，打造更安全的工作環境。

三、航空公司

作為空中服務員的僱主，航空公司在職安健方面承擔著重要的法律責任。因為從飛機的選擇、空中服務員制服的設計，到工作流程的規劃，以及與機場管理機構及地勤服務公司的協作，航空公司均具備實質的管理權。面對湍流挑戰，航空公司可透過加強機師的模擬訓練，提升其駕駛技術以減少飛機受湍流而出現的劇烈晃動；同時，強化內部工作程序，使空中服務員能提早暫停餐飲服務及機艙巡視，盡早返回座位並固定物品，避免因飛機晃動而引發傷害。在機艙溫度方面，由於室內溫度可利用空調控制，航空公司理應制定合適的工作溫

度標準，並在溫度異常時啟動應變措施。此外，空中服務員制服的設計亦需平衡美觀、工作需求與職安健，確保其在高溫環境下仍能維持舒適與專業形象。

四、機場管理機構及地勤服務公司

如前章所述，氣候變化引發極端氣候現象，其中包括極端高溫環境。當空中服務員處於高溫機艙內工作，可能面臨嚴重的健康風險。有鑑於此，機場管理機構與地勤服務公司必須堅密合作，在合理可行的範圍內於停機位設置固定地面供電系統，使飛機能夠及早啟動空調系統，以降低機艙溫度。若缺乏或無法啟用相關電力設施，地勤公司應提前安排流動空調車輛，以避免空中服務員在高溫環境下工作。

此外，暴雨所致積水亦增加滑倒風險，故機場管理機構應於暴雨期間盡量安排飛機停靠於客運大樓，以透過行政措施降低相關風險。同時，應於客運大樓增設雨傘烘乾設備，避免乘客攜帶濕傘導致雨水沿途滴落至機艙內。若因作業需求必須使用遠端停機位，亦應盡力配備有蓋登機梯車，並參考中國內地經驗（钱蕾涛，2019），利用可移動式遠機位登機廊道，以減少空中服務員於雨中上下飛機時所面臨的安全風險。

五、學術機構

所有職安健策略的制定，必須依託科學的分析方法予以推動。從事故根源的調查開始，深入探究導致情況惡化的各個環節，進而擬定切實可行的改進方案。整個過程離不開嚴謹的科學計算與細緻的研究工作。尤其在高溫環境下，人類健康所受影響更需經由細緻觀察與科學驗證加以確認。因此，學術機構在此過程中扮演關鍵角色，憑藉豐富的科研資源，能夠深入探討並有效解決相關問題，為職安健策略和改善措施提供堅實的理論基礎。舉例而言，香港理工大學曾與香港建造業議會合作，研發建造業抗熱服技術及相關材料，以提升建造業工人的舒適度與安全性（香港建造業議會，2016）。

六、職安健業界組織

業界專業組織匯集眾多專業人才，成為推動職安健發展的重要力量。專業組織不僅可以將學術機構的研究成果轉化為具體可行的措施，亦促進全球各地寶貴經驗的相互借鑑與交流。以英國職業安全與健康學會所屬的航空與航天委員會為例，該委員會作為專業平台，透過網路文章及論壇等形式促進經驗分享，並針對行業特有的環境與文化提供支持與指導。

伍、總　結

氣候變化引發的極端天氣現象，以現有科技水平而言，難以完全加以控制或預防。人類可採取的策略，乃是積極運用多元方法，在面對極端氣候所帶來的職業危害時，實施有效的緩解措施，以減少其帶來的不良後果。職安健工作歷來非單一個人或單一機構所能獨立完成。相反，此項工作需跨機構協同合作，各司其職。以航空業為例，這涵蓋飛機設計、氣象預報、機場管理、學術研究及專業團體推廣等多方面，共同保障空中服務員的安全，確保他們在安全和健康的工作環境中執行職務。

參考文獻

［1］FAA Office of Aviation Policy and Plans.（2024）. 3. 2. 1 Aircraft Categories. 於 Aircraft Capacity and Utilization Factors（頁 3–4）. Washington：U. S. Federal Aviation Administration.

［2］Industry Airplane Upset Recovery Training Aid Team.（2008）. Negative G Force. 於 TeamAirplane Upset Recovery Training AidIndustry, Airplane Upset Recovery Training Aid Revision 1（頁 2. 45–2. 46）. Washington.

［3］International Civil Aviation Organization.（2022）.

Annex 6–Operation Of Aircraft–Part I– International Commercial Air Transport – Aeroplanes. Montr é al：International Civil Aviation Organization.

［4］ International Civil Aviation Organization.（2025）. ICAO Climate Adaptation Synthesis Report. Montreal：International Civil Aviation Organization.

［5］ LanyonAndre, BuchananPiers, & CreswickAndrew.（2025）. Improving Efficiency of Terminal Aerodrome Forecast Production. 105th Annual Meeting of the American Meteorological Society. New Orleans：American Meteorological Society.

［6］ Regional Aviation Safety Group – Asia Pacific.（2025）. APAC Annual Safety Report 2025 – Asia Pacific Region. Montreal：International Civil Aviation Organization.

［7］ Significant Weather（SIGWX）Forecasts.（2026 年 7 月 19 日）. 擷取自 SKYbrary：https://skybrary.aero/articles/significant–weather–sigwx–forecasts

［8］ World Meteorological Organization and World Health Organization.（2025）. Climate Change and Workplace Heat Stress. Geneva：World Meteorological Organization.

［9］ 中國民航局.（2015 年 9 月 23 日）. 滑行道和停机坪. 擷取自 中国民用航空局网站：www. caac. gov. cn/GYMH/MHBK/JCJS/201509/t20150923_1927. html

［10］ 李炳华, 张冰, 谢淑媚, & 周志坚.（2013）. 香港国际机场应对强对流天气影响空域及机场运作的最新发展. 第廿一民航氣象技術交流會. 成都.

［11］ 陈元先.（1999）. 旅客机环境控制系统的发展. 航空学报, 8–10.

［12］ 香港民航處.（2013）. 民航處環保報告 2013. 香港：香港政府物流服務署.

［13］ 香港立法會.（2020）. 香港國際機場三跑道系統的相關航空氣象系統. 香港：香港立法會.

［14］ 香港建造業議會.（2016）. 建造業抗熱服 提升工作舒適度. 香港：香港建造業議會.

［15］ 香港勞工處.（2026）. 預防工作時中暑指引. 香港：香港政府物流服務署.

［16］ 钱蕾涛.（2019）. 机场远机位发展及航站区规划趋势分析. 智能城市应用, 105–108.

核心研究一款新型碳基降溫背心搭配醫護個人防護裝（PPE），在高溫環境下對人體熱應激、生理指標及代謝水準的影響

Patarawadee Sainiyom，MSc[1]， Vitoon Saeangsirisuwan，PhD[1]，
Clarence Hong Wei Leow，BSc[1]，Jason Kai Wei Lee，PhD[1]，阮偉傑[2]
1. Faculty of Physical Therapy Mahidol University
2. 香港職業安全衛生協會

摘　要：本研究旨在探究碳基新型降溫背心搭配医用个人防护装备（PPE），在高温环境下对人体热应激、生理状态及代谢水平的干预效果。研究采用随机交叉试验设计，以 12 名健康受试者为对象，在 32℃、相对湿度 70%的人工气候舱内，分别开展仅穿医护刷手服（NoPPE）、刷手服配 PPE（PPE）、PPE 联合降温背心（PPE+Vest）三组试验，受试者完成 100 分钟模拟医护工作，全程监测体温、心率、能量消耗、主观体感等多项指标。

结果显示，单独穿戴 PPE 会显著加剧热应激，受试者核心体温达 38.4℃、心率升至 123 次/分，体感与舒适感明显下降；而搭配碳基降温背心后，核心体温降至 37.5℃、心率回落至 107 次/分，皮肤温度、皮核温差等体温调节指标均恢复至接近无防护水平，热不适感与劳作疲惫感也得到显著改善。代谢数据表明，PPE 组与 PPE+Vest 组能量消耗均为 317kcal，组间无显著差异，说明即便背心增加整体负重，也未额外提升机体代谢负荷。性别差异分析发现，男性穿戴 PPE 后体温升幅更大，降温背心对其热应激的缓解效果也更突出；受试者反馈指出，该背心存在肢体活动受限、部分人群体感偏重等问题。

综上，这款碳基降温背心凭借优异的导热散热性能，可有效缓解穿戴 PPE 引发的热应激与心血管负担，且不会增加代谢消耗，适用于高温环境下长时间作业的医护人员。后续可针对装备轻量化、人体工学进行优化，并开展实地试验，进一步完善其应用价值。

论文详细总结

该文献发表于《Scandinavian Journal of Work，Environment & Health》（在线首发，2025 年 11 月 17 日），由泰国玛希隆大学、新加坡国立大学等机构学者联合完成，核心研究一款新型碳基降温背心搭配医护个人防护装备（PPE），在高温环境下对人体热应激、生理指标及代谢水平的影响，旨在为高温环境下医护人员职业健康与作业安全提供解决方案。

一、研究背景与研究目的

1. 研究背景

1. 医护人员在隔离病房、野外医院等场景需长时间穿戴全套 PPE，PPE 会阻碍人体汗液蒸发与对流散热，在高温高湿环境下极易造成热量蓄积，引发热应激。具体表现为核心体温升高、心率加快、体感不适、注意力下降、疲劳加剧，既损害医护人员健康，也降低工作效率

与患者安全系数。

2．降温背心是缓解 PPE 所致热应激的常用手段，传统冰基、相变材料（PCM）、液冷背心存在短板：制冷时长有限、制冷效果不稳定；传统 PCM 导热系数低，散热慢、降温不均；冰类产品易造成皮肤刺激、体感不适。

3．碳材料（膨胀石墨、石墨烯）可提升 PCM 导热性能，新型碳复合降温背心散热效率理论上更优，但该装备搭配 PPE 使用时，对人体生理、代谢的影响尚不明确，缺乏实证研究。

2. 研究目的

评估碳基新型降温背心+PPE 组合在热带高温环境中，对人体体温调节、心血管状态、主观体感、能量代谢的综合作用，并分析性别差异与装备实际使用问题。

二、研究方法

1. 研究对象

共 12 名健康受试者（6 男 6 女，平均年龄 20.8 岁），均为久坐或轻度运动人群；两组受试者在体重、身高、体脂率、瘦体重等体格指标上存在显著性别差异。研究已通过玛希隆大学伦理委员会审批。

2. 实验环境与方案

1．环境条件：人工气候舱模拟热带环境，温度 32℃、相对湿度 70%。

2．实验设计：采用随机交叉试验，每名受试者依次完成三种穿戴场景，组间间隔至少 1 周以保证身体完全恢复：

- NoPPE：仅穿着医护刷手服；
- PPE：刷手服+全套医用防护装备；
- PPE+Vest：刷手服+PPE+新型碳基降温背心。

3．作业任务：连续 100 分钟模拟医护工作，分为 4 个周期，每个周期 25 分钟（10 分钟行走+10 分钟模拟护理动作循环训练+5 分钟休息），全程复刻医护人员日常活动强度。

4．装备参数：降温背心含 14 块碳复合制冷片，整套背心总重 3.0kg；三类穿戴组合总重量分别为 0.94kg、1.13kg、4.13kg；碳基制冷片导热系数达 34.7W・m^{-1}・K^{-1}，远高于普通水基材料。

3. 检测指标

1．生理指标：核心体温（吞咽测温胶囊）、平均皮肤温度、胸壁皮肤温度、皮核温差、心率；

2．代谢指标：能量消耗、摄氧量、代谢当量、人体储热量；

3．主观评价：自觉劳累程度（RPE）、冷热体感、热舒适感；

4．附加调研：收集受试者穿戴降温背心的主观使用反馈。

4. 数据分析

采用单/重复测量方差分析、弗里德曼秩和检验等统计学方法，以 $P<0.05$ 作为差异具有统计学意义的判定标准。

三、核心研究结果

1. 基线数据

三种场景下，受试者实验前的核心体温、皮肤温度、心率、主观感受等指标无显著差异，实验基线均衡。

2. 体温调节相关指标（热应激核心指标）

1．核心体温：单独穿戴 PPE 时核心体温升至 38.4℃，显著高于 NoPPE 组；搭配降温背心后降至 37.5℃，与仅穿刷手服水平接近，有效抑制体温升高。

2．皮肤温度：PPE 组皮肤温度显著偏高；PPE+Vest 组皮肤温度明显下降，整体与 NoPPE 组持平，仅实验最后阶段略高于无防护组。

3．皮核温差：PPE 组皮核温差显著降低，散热受阻；PPE+Vest 组皮核温差恢复至正常水平，热量传导效率提升。

3. 心血管指标（心率）

PPE 组平均心率 123 次/分，显著高于另外两组；PPE+Vest 组心率降至 107 次/分，和

NoPPE 组无明显差异，大幅减轻心血管负荷。

4. 代谢指标（关键结论）

三组总能量消耗无统计学差异：PPE 组与 PPE+Vest 组能量消耗均为 317kcal（P=0.891）。

尽管降温背心大幅增加装备重量（整体负重超过体重 5%，通常该负重会提升代谢消耗），但其散热效果抵消了负重带来的代谢负担；同时 PPE+Vest 组人体储热量远低于单纯 PPE 组，热量蓄积问题显著改善。

5. 主观体感与劳累程度

1．冷热体感&热舒适度：单纯 PPE 组受试者体感偏热、舒适度差；搭配降温背心后，体感从“炎热”转为“中性/微凉”，热舒适感大幅提升。

2．自觉劳累度（RPE）：PPE 组劳累感更强；PPE+Vest 组劳累程度与无防护组相近。

6. 性别差异

1．男性穿戴 PPE 后核心体温增幅远大于女性，热应激反应更明显；使用降温背心后，男性体温下降幅度也更大。

2．女性瘦体重更低、体表面积/瘦体重比值更高，散热能力更强，因此穿戴 PPE 时体温波动较小；男女在代谢、心率等指标上无其他显著差异。

7. 装备使用弊端（受试者反馈）

1．降温背心及制冷片结构限制躯干屈伸、旋转等动作，影响肢体活动灵活性；

2．半数女性受试者认为背心偏重，男性对重量敏感度较低，存在主观感受的性别差异。

四、讨论与机制分析

1. PPE 致热应激的核心原因：并非提升人体代谢产热，而是阻碍散热，迫使皮肤血管扩张、心率上升，最终引发一系列热应激反应。

2. 碳基降温背心的优势机制：碳材料构建导热网络，大幅提升 PCM 的导热效率，实现更快、更均匀的散热，降温效果优于传统冰基、普通 PCM 背心；且被动负重的穿戴方式，不会额外增加肌肉做功与代谢消耗。

3. 负重与代谢的特殊关系：常规情况下负重超过体重 5%会增加代谢，但该背心的强散热效果降低了身体热调节负荷，完全抵消了负重带来的代谢损耗，实现“降温不增耗”。

4. 性别差异成因：男性瘦体重更高，代谢产热更多，热负荷更大；女性身体结构特点更利于散热，热应激相对轻微。

五、研究局限性

1．未将该碳基背心与传统冰基、普通 PCM 背心做直接对比，也未实测制冷片表面温度、热通量等物理参数，散热机理仍为间接推断；

2．实验仅在可控实验室环境开展，未模拟户外光照、风力、动态劳作等真实职场场景，结论落地性有待现场试验验证；

3．女性受试者未做荷尔蒙周期的客观检测，无法排除生理期激素的潜在影响；

4．样本量仅 12 人，规模偏小，研究结论的普适性受限。

六、研究结论与展望

1. 主要结论

1．高温环境下长时间穿戴医用 PPE 会引发严重热应激，升高体温、心率，降低舒适度与作业状态；

2．新型碳基降温背心可有效缓解 PPE 带来的热应激：稳定核心体温、降低心率、改善主观体感，各项生理指标可恢复至接近无 PPE 状态；

3．该背心即便增加整体负重，也不会提升人体代谢消耗，是安全、高效的配套防护方案；

4．装备存在活动受限、部分人群体感偏重等设计缺陷，且人体热应激反应存在明显性别差异。

2. 未来研究与优化方向

1．优化背心结构与材质，提升活动灵活性、轻量化设计，兼顾制冷效率与人体工学；

2．开展现场试验、扩大样本量，并对比多

款传统降温装备，完善机理研究；

3．针对男女体格、体感差异，设计差异化款式的降温装备；

4．进一步探究热通量、皮肤接触温度等参数，深入解析碳基材料的散热原理。

七、研究价值

该研究为高温环境下穿戴 PPE 的医护人员提供了切实可行的热防护方案，既能保障医护人员身体健康与工作效能，也能间接提升医疗服务质量与患者安全，同时也为高温作业、职业防护领域的降温装备研发提供了数据支撑。

漸變中的建築業安全管理

——從人文關懷及科學技術視角探索其發展

黃達安　理事
澳門建築安全協會

摘　要：本文從“人文關懷”及“科學技術”兩個維度作切入點剖析其在當今建築業安全管理中不可或缺之重要性；並闡述兩者在安全管理實務中相輔相成，相得益彰，相須而行之機理；及論述人文關懷，科學技術指引建築業安全管理發展之方向。

關鍵詞：人文關懷　文化管理　科學技術　持續發展

1. 建築業安全管理中的人文關懷及其影響

1.1　人文關懷的定義

人文關懷，是從心出發，真誠理解作爲人的個體，並尊重及積極回應其訴求。這不是同情，更是情感連接，以維繫人的尊嚴，營造和諧社會氛圍。

人文關懷，是理解及被接納，並爲此付出時間，它強調的是人與人之間那種非物質性的連結，那種「我懂你」的共鳴，以及「我在這裡陪你」的安心感。

想像一下喔，當你遇到一個眼神充滿焦慮、語氣慌亂的朋友，他可能跟你說他最近工作很累，壓力很大。如果你只是回他一句「大家都很累啊，忍一忍就過去了」，這當然也算是一種「關心」，但這很難被稱為「人文關懷」。但如果你能停下來，放下手邊的事情，看著他的眼睛說：「欸，我看你真的撐得很辛苦耶，跟我說說怎麼回事好不好？我聽你說。」然後不打斷他、不評價他，只是靜靜地聽，並試圖去感受他話語背後的疲憊和無助，甚至給他一個溫暖的擁抱，這才更貼近人文關懷的真諦。

人文關懷（Humanistic Concern）是一種對人類價值和尊嚴的重視，以及對個人成長和幸福的關注。它強調對人的尊重、理解、愛護和幫助，以及對社會正義、平等和人權的追求。人文關懷的核心是對人的關心和關注，認為每個人都應該有機會實現自己的潛能，並且受到公正和平等的對待。

人文關懷是一種對人的全面關心和尊重，它強調人的價值和尊嚴，以及對個人成長和社會正義的追求。

人文關懷是指對人的尊嚴、價值、命運的關切，以及對人類生存狀態與精神需求的重視。它強調將「人」作為核心，維護人性尊嚴與基本權利，主張在社會發展與人際互動中給予個體同理心、尊重與愛。

1.2.1　管理的定義

管理是指在一定的組織或企業內根據一定的決策、規章進行協調活動，以達到某個明確的目標。

管理的演變由初始的經驗管理到科學管理再到文化管理，都有一個質的提升。

經驗管理是指沒有成型的管理規律、成文的管理制度可以遵循，經營管理者跟著感覺

走，憑經驗、直覺去管理。

科學管理一般分為例行管理和例外管理，按照二八原理，理想比例是例行 80%，例外 20%。對於例行管理，是將常規或標準的日常運作，建立系統化、規範化、標準化、檔化的流程和制度，在高層人員督導下，中基層人員負責處理。超常規或標準的一般例外情況，由中層管理人員督導、基層管理人員負責處理；重要例外情況，由高層管理人員督導、中層管理人員負責處理；重大例外情況，由高層管理人員負責處理。

1.2.2 文化管理之定義

文化管理是藉助共同價值觀營造健康和諧氛圍，使其成員作自我管理並實現團隊目標。

1.2.3 科學管理與文化管理之關係

科學管理的實質是以物為中心，文化管理的實質是以人為本；科學管理追求經濟效益。

文化管理建立起來的一種管理模式同時還包涵了科學管理的一部分合理內容，比如科學的決策機制、嚴格的制度管理、追求最大的工作效率等。

行爲科學實驗研究的先行者梅岳（Elton Mayo）教授認爲，工作的社會環境，特別是非正式團體（informal work group）的影響，對於生產裏有著重要的關係。因此，學者們認爲，管理必須要理解贊賞（recognition）與社會滿足（social satisfaction）的需要對員工的重要性。管理應該使工人擁有人性尊嚴的新意識，在健康愉快的情況下，設法與非正式團體意識轉變為積極的生產力量。這就是梅岳教授所强調的社會人（social man）觀念。個人獲致社會需要的激勵，和良好的社會關係，對於工作團體的壓力要比管理的控制活動具有較佳的反應。

1.2.4 安全管理之文化考量

安全管理，指透過危害識別及危險評估將風險控制在可接受範圍内的活動過程。

安全管理最重要是預防事故發生，消除隱患，控制不安全行爲及環境。

當前的建築企業所實施的安全管理大多會設立一套制度，比如有關違反安全守則時執行的罰款制度，認真遵守時的獎勵制度，安全施工技術層面的培訓制度等，對於建築工人而言這些都是建基於外部的科學管理制度的控制。於外部控制層面，强制性震懾作用確實是在相對空間時間内有效，惟未必能持續對某一偏差行爲作矯正及固化。

筆者於有數百工人的建築工地作前綫安全管理人員，每天與工人接觸，對其行爲，思想，習慣，價值取向，性情，態度等都有較深刻瞭解及認識。建築工人（來自内地外僱人員），大多文化知識水準並不高，其思想也不複雜，背井離鄉千里迢迢前來本澳務工，較純粹為獲取較内地高之酬勞，以提高自身及家庭之生活質素，其生活模式也近乎“兩點一綫（來回於工地與住所）”。其生活側重點大致為確保每天正常上下班（相對違反某項安全守則被停工反省則是災難性的，因會在一段時間内無收入，即使一天兩天），月末拿到預期的報酬。因此，當被發現違反安全守則時，會為妥協而終止不安全行爲，以免承受停工等懲罰。

當問及“如違反地盤安全守則，安全人員當面教育你，”有 46%工人選擇“先應付一下安全人員，改善。”由此可見，貌似效果立竿見影之外部控制，亦未能從内在從根本修正工人之不安全行爲。此爲科學管理制度之欠缺，可從文化管理層面補足之。上文提到“梅岳教授所强調的社會人（social man）觀念，管理應該使工人擁有人性尊嚴的新意識，在健康愉快的情況下，設法與非正式團體意識轉變為積極的生產力量。”

1.2.5 文化管理之基石

管理者應予以工人最基本的尊重及發自内心的人文關懷。筆者遇上的悖論亦甚爲深刻。

有一次，遇上工人沒扣安全帶，便發自內心語重心長說了一句，“你說怎麽一個素不相識的陌生人比你本人還要在意你的生命安危，這是什麽邏輯！？”工人聽罷沉思片刻，然後很羞愧的說不好意思，接著馬上扣好安全帶，在之後的巡查中碰上這名工人，都對筆者表示謝意。

文化管理是以人為本，變被動管理為自我約束，在實現社會價值最大化的同時，實現個人價值的最大化。

1.2.6 文化管理與人文關懷

文化管理實質操作過程中再度升華即向人文關懷貼近。

建築業由來是人員密集行業及手工作業密集行業，即便近年興起之裝配式建築及 A.I.或機器人建造等元素，亦未作重大改變；對於人，除用完善制度管理控制外，更應從發自內心的關心慰問，如此方可呈現對生命之尊重及敬畏。

在建築業安全管理體系內，工人由入職起（更准確說可能是入職前）就已經接受各種培訓，目的都是熟悉各工序操作，清晰各種可能出現之危害，學習如何規避從而避免發生意外。但怎樣從工人只是基於制度，規則而被動的接受相關培訓，甚或產生應付以至抵觸情緒，到自覺主動接受培訓而吸收相關知識，則需相關人員（尤其位於安全管理體系內）從心出發，真正關心工人使之作出“投桃報李”之行爲（每天平安下班便是對安全管理人員的最大回報）。

夏天的一碗涼茶，冬天的一杯熱水，生病時的一聲問候，意外後的慰問，工地熱綫電話接通後的情緒安撫……無不讓將心比心的工友們看在眼裏記在心裏；所換來的是積極學習接受培訓，相互信任，積極參與施工方案之制定，顧己及人，締造和諧之安全文化，建構零意外之施工環境。

建築業人文關懷所呈現之處，即生命得以重視，效率得以提升，意外得以避免，是之安全管理終極關懷。

2. 建築業安全管理中的科學技術及其影響

2.1 建築業正在應用及普及之科學技術

2.1.1 近年來科學技術進入建築業日新月異，包括智能建造，建築信息模型（B.I.M.），無人機及機械人，虛擬現實（V.R.）等等，慕然以爲古老的建築業蛻變成高科技企業。

2.1.2 建築業智能建造是指結合人工智慧、物聯網及建築信息模型（BIM）等新一代資訊技術與工業化建造技術，實現人機協同的全流程創新方式。其核心好處包含提升施工安全、降低建造成本以及提高生產效率。

2.1.3 建築信息模型（BIM）技術輔助管理工地職業安全健康事項，施工前將職業安全健康設施於施工規劃階段納入考量，模擬會影響安全事故發生之機率及影響嚴重程度等較高的工序作施工安全檢查，根據建築業職業安全法等法規規定實施危險調查及評估，將施工風險降至最低，並採適當防護措施，避免發生工業意外。

2.1.4 筆者早前參觀香港第二屆“職安健創新及科技博覽”，獲益良多。

現在的天秤操作員可以安坐在地面房間對著十數張螢幕從容操作；進入地下管道測量清潔的機器狗；用作吊運的無人機；可隔離漏電綫路區域的裝置；外骨骼穿戴裝置；物聯網分析等等。

科學技術涉足建築業不僅僅是效率的提高，更遠更重要的是保障相關人員，尤其是從事高危工序比如天秤操作員，密閉空間操作員等。

對於施工區域，通過物聯網/5G 網絡連接各傳感器，包括環境空氣監測，工作臺結構部件狀態，工人生命體徵監測等，提供即時大數據作分析監控，確保施工安全。

虛擬現實（V.R.）則用於安全操作培訓及現場操作輔助。其能提供高度沉浸式的環境，讓工人在零風險的情況下「親身體驗」工業意外（如墜落、觸電），大幅提升安全意識。

2.2 科學技術對建築業安全管理之影響

2.2.1 從事故發生後之檢討轉變為事故發生前置預防爲主。

透過建築資訊模型（BIM）模擬會影響安全事故發生之機率及影響嚴重程度等較高的工序作施工安全檢查；及實時採集，整理，分析大數據，A.I.實時影像監控，AIoT 人工智慧物聯網預警系統，安全管理人員於事故前即時介入，減低事故發生概率。

2.2.2 提升管理效率及準繩度

較於傳統依賴安全管理人員現場巡查及監督管理，轉向於依靠數字化平臺系統提供實時影像數據對施工現場環境作全天候無死角監控監督，使之安全管理更為客觀及精準。

2.2.3 提高安全培訓成效

較於傳統文字圖片口述授課方式，轉變為使用 AR/VR 等互動方式進行培訓，尤其對高空工作等高危工序所產生之危害比如人體下墮等讓工人在零風險下體驗，使其加深記憶印象，安全操作規範深植人心。

2.2.4 降低成本提高效益

科技設備初期投入需資金啓動，但能有效避免因意外事故造成工期延誤，賠付等危及企業信譽形象；長遠看待將大幅度降低項目成本。

3. 小　結

人文關懷與科學技術是建築業中不可或缺之元素，兩者相互推動，前者提供指引，價值取向，使其持續發展；後者提供措施及方案，工具，系統，及客觀規律，以使安全施工。

主要參考文獻：

［1］管理行爲學　雷動　水牛圖書出版事業有限公司 1990

［2］德魯克管理思想精要　彼得・德魯克　機械工業出版社　2016

［3］中國建築職業安全健康理論與實踐　沈永年　潘煌煜　徐永豐　全華圖書股份有限公司　2007

［4］安全管理　陳寶智　天津大學出版社　1999

［5］管理心理學　劉亦欣　大連理工大學出版社 2017

［6］管理學　Stephen　P. Robbins　中國人民大學出版社　2002

［7］西方現代社會思潮史　顧肅　張鳳陽　山東教育出版社　2004

［8］西方哲學名著提要　黃頌傑　江西人民出版社 2002

［9］文化理念　翁明德　臺北遠流　1990

［10］跨文化管理　陳曉萍　清華大學出版社　2009

［11］人文關懷與社會發展---人文篇　高雄復文圖書出版社　2003

［12］人文關懷與社會發展---管理篇　高雄復文圖書出版社　2003

從澳門安全管理實踐到國際認可：如何以實務經驗推動安全科技革新

陳詠輝
Edan Technology Solution Limited、澳門職業安全健康管理專業協會

摘　要：本研究以澳門前線安全管理實務為基礎，探討如何將實際經驗轉化為智慧安全管理科技，並以香港大型基建項目實證應用作為核心案例，分析其對澳門及鄰近地區未來安全管理發展的啟示。自 2010 年起累積的前線經驗與安全培訓工作顯示，行業普遍面臨人手不足、制度執行不一致及經驗難以傳承等問題，反映行業需要由「依賴個人」走向「依賴系統」。

基於多年實務觀察所形成的系統化思考，2018 年起展開智慧安全管理系統研發，將前線判斷、流程管理與風險控制結構化及數碼化，並於澳門不同工程項目及香港大型基建項目中成功落地。實證顯示，系統能提升管理透明度、執行一致性及跨部門協作效率，並縮短新人學習曲線，改善行業對個別經驗的依賴模式。相關成果亦獲得多個日內瓦國際發明展獎項，反映實務驅動科技創新的國際價值。

本研究指出，安全管理將由「實務+科技」共同構成。澳門可透過制度改革與政策引導，加速安全管理數碼化；香港實證經驗展示了制度、流程與科技協同運作的可行性。鄰近地區方面，雖然目前安全管理數碼化程度不一，但跨域協同發展將帶來標準化、人才流動及跨域合作需求。可從政策推動、標準制定及人才培養入手，建立具前瞻性的智慧安全管理框架。

關鍵詞：職業安全健康、安全管理、智慧工地安全生態系統、數碼化轉型、經驗傳承

壹、前　言

一、研究背景

建築業是職業安全健康管理的重要領域。隨著工程規模擴大、施工程序複雜化，以及參與工程的持份者增加，安全管理已由傳統巡查及培訓，逐步延伸至風險控制、資訊協調、文件管理及持續改善等範疇。

近年數碼化及智慧科技迅速發展，職安健領域亦開始探索以科技支援風險識別、監測及管理。國際勞工組織指出，人工智能、數碼化、機械人及自動化正改變職業安全健康工作，亦帶來需主動處理的新風險（International Labour Organization，2025）。

二、研究動機

作者自 2010 年起參與澳門大型工程安全管理工作，並於 2013 年獲澳門勞工事務局委任為職安健課程講師。多年實務及培訓經驗顯示，安全管理仍常依賴個人經驗及判斷，不同項目之間亦可能出現執行標準不一致的情況。

因此，作者開始思考如何把前線經驗、管理流程及風險控制方法整理為可複製、可追蹤及可傳承的管理邏輯，並透過科技工具支援安全管理工作。

三、研究目的

本研究旨在探討前線安全管理實務經驗如何透過系統化思維轉化為安全科技創新，並分析其於港澳工程項目中的應用價值。本研究亦嘗試提出對澳門、香港及鄰近地區未來安全管理發展的啟示。

四、研究方法與範圍

本研究採用實務觀察法、案例分析法及文件分析法，以作者多年工程安全管理經驗為基礎，結合港澳工程項目應用經驗及職安健數碼化趨勢進行分析。研究重點不在於介紹個別系統功能，而在於探討實務經驗如何推動安全科技革新。

貳、澳門安全管理實踐與行業痛點

一、澳門工程安全管理實踐概況

澳門工程項目具有場地限制、工期壓力、參與單位多及協調要求高等特點。安全管理人員需要處理現場巡查、風險評估、危害控制、培訓安排、文件記錄、承建商協調及事故預防等工作。

在實務環境中，安全措施能否落實，不只取決於制度是否存在，更取決於制度能否被現場理解、執行及持續跟進。因此，工程安全管理是一項高度依賴經驗判斷、溝通協作及即時應變的專業工作。

二、前線安全管理工作的實際挑戰

安全管理人員日常需要巡查現場、識別危害、安排培訓、記錄文件、提出改善建議及跟進整改。然而，現場狀況變化快，不同工種同時施工，安全資訊若未能有效整合，便容易停留在個別紀錄或個人記憶中，難以及時形成管理決策。

培訓亦是重要挑戰。工程項目人員流動較大，新入職或轉換工序人員需要快速掌握安全要求。若相關知識主要倚賴資深人員口頭傳授，培訓品質便容易受個人經驗、表達方式及時間限制影響。

三、行業管理痛點分析

綜合前線觀察，澳門工程安全管理主要面對四類痛點：一是人手與資源限制，安全管理人員需要處理的行政及跟進工作愈來愈多；二是制度執行不一致，管理品質容易受個人能力及項目文化影響；三是經驗傳承困難，資深人員的判斷未必能有效轉化為結構化知識；四是文件及資訊分散，巡查、培訓及整改資料不易檢索和追蹤。

四、從依賴個人到依賴系統的需求

上述問題反映，安全管理不能長期只依賴個別人員的經驗、記憶及即時判斷。安全管理需要由「依賴個人」逐步走向「依賴系統」，把前線經驗、制度要求及風險控制方法轉化為可持續運作的管理機制，以提升一致性、持續性及可傳承性。

參、從實務經驗到安全科技創新

一、從前線經驗到系統化思維

安全科技創新的起點並非技術本身，而是前線工作中反覆出現的管理問題。作者在多年安全管理工作中發現，不同工程雖然環境不同，但巡查資料分散、整改跟進困難、培訓紀錄不易整合及新人學習困難問題具有共通性。

這些問題表面上屬於個別項目的執行困難，但深層原因往往與管理流程缺乏結構化有關。系統化思維的形成，就是從反覆出現的痛點中提煉共同規律，並思考如何將個人經驗轉化為組織能力。

二、安全管理知識的結構化

安全管理包括危害識別、風險評估、控制措施、現場巡查、缺失整改、培訓安排及文件保存等元素。這些工作可被整理為一套連貫流程：先識別風險，再制定控制措施，然後檢查執行情況，最後透過紀錄及回饋促進改善。ISO 45001 亦將職業健康安全管理視為一套管理系

統，強調危害識別、風險評估、工人參與、績效評估及持續改善（International Organization for Standardization，2018）。

三、安全科技創新的形成過程

基於上述思考，作者自 2018 年起推動智慧安全管理系統研發，嘗試將前線判斷、流程管理與風險控制結構化及數碼化。其後，作者透過創辦 Edan Technology Solution Limited，建立研發及實踐平台，協助把實務經驗轉化為可操作的管理工具。

研發過程並非單純把紙本表格電子化，而是重新思考安全管理資訊應如何被收集、分類、追蹤及應用。例如，巡查紀錄應能連接整改、責任人、完成期限及覆核結果；培訓紀錄亦應成為新人理解項目安全要求的一部分。

隨著相關科技工具逐步發展，安全科技創新由單一功能延伸為「智慧工地安全生態系統」的整體構想。此一構想以中央管理平台為核心，連接電子作業許可、危險區域電子鎖、密閉空間監測、重型機械及危險區域監察、人員實名制與設備追蹤等不同模組，使高風險作業、人員資格、設備狀態及現場風險能夠在同一管理邏輯下被整合。

四、科技如何回應管理痛點

表 1　管理痛點與科技回應方向

管理痛點	科技回應方向
文件資料分散	建立集中化及可檢索的數碼紀錄
整改跟進依賴人手記憶	以流程追蹤責任、期限及覆核狀態
管理標準不一致	將常用程序及判斷邏輯標準化
新人學習曲線較長	以系統化管理流程、資料保存及傳承項目經驗
高風險作業缺乏閉環控制	以許可、授權、監測及警報形成閉環管理

科技回應管理痛點的關鍵不在於功能數量，而在於能否把安全管理資訊轉化為可追蹤、可分析及可傳承的管理資源。當工作流程被數碼化後，安全管理人員能更清楚掌握問題狀態，管理層亦能更及時了解風險趨勢及整改進度。

五、從依賴個人走向依賴系統

安全科技的價值不是取代安全人員，而是協助安全人員把專業判斷及經驗累積成組織資產。當巡查、整改、培訓、許可及監測工作透過統一流程運作，安全管理便能由個人習慣轉化為較穩定的管理機制。

肆、港澳案例實踐、成果驗證與國際認可

一、澳門工程項目的實踐經驗

在澳門工程項目實踐中，智慧安全管理模式主要回應安全資訊分散及整改跟進困難等問題。透過把巡查、整改、培訓及文件等資料逐步數碼化，安全管理工作能夠由單一紀錄轉化為持續追蹤過程。

澳門項目的經驗顯示，安全科技必須建基於現場需要。若系統設計脫離前線流程，使用者便難以持續採用。因此，相關模式的重點並非展示技術，而是協助安全管理人員減少重複行政工作，提升追蹤及整合能力。

二、香港大型基建項目的實踐經驗

香港大型基建項目通常具有規模大、協作單位多、管理層級複雜及程序要求嚴格等特點。當系統化管理模式應用於香港工程環境時，其價值不僅在於紀錄保存，更在於支援跨部門協作及提升執行一致性。

在香港大型基建應用中，「智慧工地安全生態系統」並非以單一產品形式存在，而是把中央管理平台、電子許可、危險區域控制、密

閉空間監測、重型機械監察及人員設備追蹤連接起來，形成一套面向高風險工序的整體管理架構。這種整合式方案有助不同崗位按較一致的標準掌握現場狀況。

三、管理效益與成果驗證

綜合港澳實踐經驗，相關模式的管理效益主要體現在四方面：第一，提升管理透明度，使管理層更清楚掌握風險及整改狀態；第二，提升執行一致性，減少因人員經驗差異造成的落差；第三，改善跨部門協作，使不同團隊較容易掌握同一套資訊；第四，縮短新人學習曲線，讓過往依賴口頭傳授的經驗轉化為結構化資料。

這些效益顯示，科技工具的真正價值並非單純提升工作速度，而是協助安全管理形成可持續、可追蹤及可傳承的管理能力。

四、國際認可與跨區域交流價值

相關成果其後以「智慧工地安全生態系統」概念參與第 51 屆日內瓦國際發明展。根據香港特別行政區政府新聞稿，該屆展覽於瑞士日內瓦舉行，由國際專家評審團對來自 35 個國家及地區約 1,000 項發明進行評審（香港特別行政區政府，2026a；香港特別行政區政府，2026b）。

是次參展並非單一產品展示，而是以一套智慧工地安全生態系統，呈現多項安全科技如何共同回應高風險作業、人員授權、設備監察及現場風險管理等需要。當中五項參賽項目分別為：危險區域電子鎖及作業許可系統、密閉空間智能職安健管理監控系統、重型機械及危險區域監察系統、職安健工作場所智慧管理平台 IntelliGuard OS，以及人員實名制與設備追蹤智慧軟件。

最終，「智慧工地安全生態系統」獲得兩項國際評審團特別金獎、一項金獎、一項銀獎及一項銅獎。當中，密閉空間智能職安健管理監控系統及人員實名制與設備追蹤智慧軟件獲國際評審團特別金獎；IntelliGuard OS 獲金獎；重型機械及危險區域監察系統獲銀獎；危險區域電子鎖及作業許可系統獲銅獎。

對本研究而言，國際認可的意義不只在於獎項本身，而在於反映來自澳門前線安全管理工作的實務經驗，能經由系統化整理、科技轉化及大型工程驗證，形成具國際交流價值的成果。相關技術方案透過 Edan Technology Solution Limited 持續實踐及優化，並於港澳職安健科技交流活動中促進政府、業界及技術供應者之間的討論，使安全科技成為跨區域職安健交流的重要媒介。

伍、對未來安全管理發展的啟示

一、安全管理模式的轉變

從前述分析可見，安全管理正由較依賴紙本紀錄、個人經驗及事後跟進的模式，逐步走向系統化、數碼化及前置管理。未來安全管理將由「實務+科技」共同構成：實務經驗提供問題意識及判斷基礎，科技則協助將經驗轉化為可執行及可傳承的流程。

二、對澳門安全管理發展的啟示

對澳門而言，工程項目規模及管理要求持續提升，安全管理數碼化具有現實需要。澳門可循序推動安全紀錄、培訓、整改、許可及風險資料的標準化和數碼化，讓不同項目使用較一致的管理語言及工作流程。

澳門中小企在資源及人手上相對有限，更需要低門檻、易應用及貼近現場的數碼化工具。若能透過政策引導及培訓支援，數碼化安全管理便有機會逐步擴展至更廣泛行業。

三、對香港及鄰近地區的啟示

香港大型基建項目的經驗顯示，制度、流程與科技可以形成協同作用。不同地區雖在法規及管理成熟度上各有差異，但經驗傳承、資訊整合、高風險作業控制及協作效率問題具有共通性，未來可在標準化流程、數碼化紀錄及

案例分享方面加強合作。

四、對職安健人才培育的啟示

未來安全管理人員除了需要掌握傳統職安健知識，亦需要具備系統思維、數碼化管理能力、資料分析意識及跨部門協作能力。科技不會取代安全人員，但安全人員需要懂得運用科技以回應日益複雜的工程管理需求。

五、實務經驗與科技創新的協同價值

真正具價值的安全科技創新，必須建基於前線實務需求。若科技缺乏現場經驗支撐，容易停留於功能展示；若實務經驗缺乏科技轉化，則難以形成可複製及可傳承的模式。兩者協同，才有可能推動安全管理持續進步。

陸、結論與建議

一、研究結論

本研究以澳門前線安全管理實務為出發點，探討實務經驗如何推動安全科技革新。研究認為，澳門工程安全管理長期面對人手資源限制、制度執行差異、經驗傳承困難及資訊管理挑戰。這些問題需要透過系統化思維轉化為更穩定的管理機制。

港澳案例顯示，當前線經驗被整理為流程、紀錄及管理邏輯後，安全科技便能在透明度、執行一致性、協作效率及新人學習方面產生實務價值。以「智慧工地安全生態系統」形式參與國際發明展，亦進一步說明源於實務的安全科技創新具備跨區域交流及推廣意義。

二、對政府及政策發展的建議

建議政府及相關機構持續鼓勵職安健數碼化發展，透過政策引導、交流平台及示範項目，促進業界了解安全科技的應用價值，並共同探討資料標準化、培訓資源共享及實務經驗交流機制。

三、對業界及人才培育的建議

業界應把數碼化安全管理視為提升管理能力的工具。企業可從巡查、整改、培訓、許可及文件管理等基本工作開始，逐步建立內部知識庫及流程化管理模式。安全管理人員亦應提升系統思維、數碼化能力及跨部門協作能力。

四、未來發展展望

未來安全管理的發展，不僅取決於科技本身，更取決於如何把前線實務經驗有效轉化為可傳承、可持續及可持續優化的管理模式。當實務經驗、科技工具、制度支持及人才培育能夠相互配合，安全管理便有機會由依賴個人逐步走向依賴系統。

參考文獻

［1］ International Labour Organization（2025）, Revolutionizing Health and Safety：The Role of AI and Digitalization at Work, International Labour Organization, Geneva.

［2］ International Organization for Standardization（2018）, ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use, International Organization for Standardization, Geneva.

［3］ 香港特別行政區政府（2026a），〈發展局團隊及其轄下部門於日內瓦國際發明展獲得佳績〉，香港特別行政區政府新聞公報, 2026 年 3 月 15 日。

［4］ 香港特別行政區政府（2026b），〈土木工程拓展署在日內瓦國際發明展榮獲四項最高榮譽評審團嘉許金獎〉，香港特別行政區政府新聞公報, 2026 年 3 月 15 日。

建築施工與安全並存發展

譚俊威
澳門建業安全協會理事

摘　要：澳門自 2023 年頒布實施《建築業職業安全健康法》以及配套《建築業職業安全及健康技術規範》，本地建築行業安全監管框架迎來全面革新。受城市建設周期更迭、建築結構日趨複雜、市場用工邏輯轉變、多層分包經營模式等澳門本地特有行業因素疊加影響，當前澳門各類在建工地普遍出現法規落地執行不到位、一線從業人員安全素養薄弱、企業經營層面重進度而壓縮安全投入、新型施工機具配套安全管控缺位等現實難題。本文以工地一線實情為基礎，緊扣澳門建築行業實際運行狀態，完整保留施工現場原生表述，分別從一線施工人員認知心態、承建與分包企業經營管理、新工藝新設備風險配套管理三大維度深挖矛盾根源，結合內地學者孫偉提出的施工安全動態管理理論，適配澳門本地法律權責劃分要求，提出分層人員培訓溝通、常態化巡查應急協調、精簡標準化安全管理體系、全鏈條安全責任制四項貼合本地工地的長效管理方案，旨在嚴守職業安全法定底線、保障施工人員生命健康的基礎上，兼顧工程質量、施工進度與項目合理經營收益，探索適配澳門城市發展特徵的施工生產與安全管理並行發展路徑，為澳門建築業規範化、長效化發展提供可落地的實操參考。

澳門建築業曾憑藉六大博企大型項目、政府公共工程迎來高速發展期，當時大量外地技術勞務來澳，本地工人薪金上漲，工地普遍加班趕工，行業重心集中於快速完工。而隨著大型新建項目逐步減少，市場轉入存量階段，用工邏輯徹底反轉，企業不再加價搶人，轉而對工人技術、安全素養提出更高篩選標準。與此同時，低價中標、多層分包、墊資施工壓縮分包商利潤空間，企業削減安全投入的動機明顯。2023 年澳門第 2/2023 號《建築業職業安全健康法》及配套規範正式實施，以立法形式劃定全鏈條主體安全責任，但不少企業、工人仍固守舊有施工思維，法規執行多流於應付檢查，難以融入日常作業。加之現代建築造型、結構日趨複雜，傳統施工工藝無法滿足建設需求，各類新型機具、複雜專項方案大量投入使用，衍生出以往少見的安全風險，現場管控難度持續加大。建築施工安全屬於全過程動態管理，如何兼顧工程質量、工期、成本與法定安全要求，實現施工生產與安全管理同步推進，是當下澳門建築業最核心的難題。

一、澳門建築施工現場安全管理現存突出問題

（一）一線施工人員安全認知存在偏差

一線工人是現場作業的直接執行者，個人安全認知、長期作業習慣直接決定工地整體安全底線，澳門本地務工群體普遍存在幾類共性認知短板。

第一，從業人員整體受教育程度有限，對整套工地安全管理制度、特區職業安全法規的理解較為淺顯，多數工人只把佩戴防護用具、現場風險排查、安全交底等各類管控措施當成

應付上級巡查、政府監管檢查的任務，單純當作「交功課」，沒能真正讀懂各項安全規範背後保護自身生命健康的核心初衷。以基礎個人防護裝備佩戴要求為例，安全帽、安全防滑鞋、高空作業安全帶均為法律強制佩戴的防護用品，但工人日常作業裡關心的重點從來不是防護裝備能夠抵禦多大衝擊、意外發生時如何保護自身，而是怎麼穿戴更舒服、哪些場景可以不佩戴，時常為了施工便利私自摘除防護用具、簡化佩戴規範，同類違規行為反覆出現。

第二，長期從業形成的經驗主義催生強烈僥倖心理。部分擁有數十年本地施工經驗的資深工人，常年依靠固有老辦法開展作業，過往多年從未遭遇安全事故的經歷讓他們形成片面認知，普遍抱有「做了幾十年都是這樣做，從來沒有發生意外」「準備那麼多無謂事情，我都做完了」這類想法，主觀上無視現行建築安全法律條文與企業內部標準化作業守則，主動規避各類安全管控要求，為現場埋下持續性安全隱患。

第三，單向灌輸式安全培訓很難扭轉工人固有認知，工人與管理人員之間缺少有效溝通渠道。現階段多數企業開展安全培訓僅採取集中宣讀文件、播放警示影片的單向輸出模式，沒有結合不同工種、不同年齡、不同學習接受能力的工人定製差異化內容，不少工人從心底認為各類培訓活動只是單純「交功課」，參與過程被動敷衍，培訓結束後並未真正吸收風險防範相關知識。工人在實際操作過程中遇到的工序難題、防護設備使用不便等合理訴求缺少穩定反饋渠道，長期溝通不暢進一步加劇工人對安全管理工作的抵觸情緒，在不少一線人員眼中，安全人員就像「瘟神」一樣，只會阻礙自己快速完成手頭工作，很難看見安全管理對工程平穩推進的正向作用。

（二）企業經營導向側重進度成本

承建總包、各級分包商作為工地安全管理法定責任主體，企業經營思路、內部資源分配模式直接決定安全管理投入力度，亦是澳門工地各類安全問題產生的核心根源。

1．經營考核偏重工期與利潤

本地建築企業項目考核核心指標大多集中於交付工期、施工成本控制、項目最終收益，安全管理工作無法直接產生可見的經濟回報，因此多數管理層會將安全相關投入視作額外經營開支，存有主動壓縮安全預算的傾向。不少分包企業劃撥的安全專項經費無法做到專款專用，防護設備採購、定期安全培訓、專職安全員薪酬等安全開支時常被挪用至材料採購、勞務薪金等直接生產環節，安全管理長期處於資源供給不足的狀態。

澳門本地多層分包、低價中標、分包墊資施工等行業普遍現象進一步壓縮企業盈利空間。部分分包單位為維持項目基本收支平衡，只能選擇削減安全相關各項支出：縮減專職安全管理人員編制、取消常態化安全培訓、超年限持續使用磨損老化、不符合安全標準的施工機具、不合理壓縮分項工程工期、減少臨邊防護、高空隔離等安全設施搭設投入。成本持續擠壓安全投入，形成「壓縮安全開支—現場隱患增多—事故與違規風險上升」的惡性循環。

2．安全崗位人員配置不專職

依據動態安全管理理論，安全管理覆蓋施工全流程，需要獨立專職人員全程統籌跟進，倘若安全管理人員同時兼任施工調度、材料清點、勞務人員管理等多項生產類工作，工作重心會自然向工程進度傾斜，安全管控工作極易流於形式。當前澳門大量中小型分包工地普遍存在一人多崗的人員配置模式，安全管理人員同時兼顧多項現場生產工作，面對總包、甲方下達的工期交付壓力時，管理人員會優先保障施工推進速度，簡化日常風險排查、違規現場整改、安全交底等關鍵流程。安全崗位缺乏獨立執行權限、人員精力分散，導致施工全過程

動態風險管控出現大量盲區，無法實現全覆蓋、全時段隱患排查。

3．安全管理制度建設趨於形式化、繁瑣化

雖然多數企業已經按照政府監管要求制定安全管理制度、作業指引、檢查台帳等書面文件，但制度實施效果參差不齊。部分企業為應對監管檢查，不斷疊加各類流程條款、重複檢查表單，沒有結合澳門工地實際精簡優化制度內容，冗餘繁瑣的管控要求大幅增加一線工人作業負擔。工人在高強度施工任務之外，還要完成大量重複台帳填報、簽字確認，極易產生抵觸心理，面對繁雜冗長的制度條文甚至「看都不想看」，進而輕視整套安全管理體系，出現台帳造假、現場違規操作、消極配合安全檢查等行為。

制度制定環節普遍缺少一線班組長、資深工人參與，僅由企業辦公室管理人員單方面擬定條款，內容脫離本地工地真實作業場景，冰冷刻板的流程守則、程序表、檢查表，很難對現場施工安全、工程進度形成正向引導，整套安全制度僅停留在書面文件層面，無法落地見效。

（三）新工藝、新型設備配套安全管控體系建設滯後

澳門城市建築造型與功能需求持續升級，新工藝、新設備廣泛投入使用，但企業安全管理體系更新速度無法匹配技術迭代節奏，出現「設備工藝更新快、配套安全管控滯後」的突出矛盾。企業引進新型施工設備、專項施工工藝時，工作重心全部集中於設備操作方法學習、施工效率提升，僅開展簡單基礎操作交底，很少系統梳理設備、工序對應的全新風險點，沒有針對性制定專項風險防控方案。以本地裝修、鋼結構工序常用的火藥槍為例，該設備能夠快速穿透硬質構件，大幅提升固定施工效率，但操作過程中存在多重隱蔽風險，例如，設備發射產生的後坐力容易擊傷操作人員或周邊交叉作業人員、火藥推進裝置存有爆炸隱患、長時間近距離使用會對操作人員聽力造成不可逆損傷。多數工地僅配發基礎勞保用品，沒有設置獨立隔離作業區域、配套專業聽力防護設備，亦未制定設備定期檢修、專項安全操作培訓制度，新型設備衍生的各類風險長期處於管控盲區。除此之外，高空升降平台、大型起重機械、深基坑複合支護等新型工序普遍存在交叉作業多、風險動態變化快的特點，傳統靜態單次安全檢查模式無法覆蓋疊加風險，進一步放大現場管控漏洞。

三、推動澳門建築施工與安全協同發展的管理路徑

針對行業的突出問題，澳門建築企業應立足本地工程的實際特點，結合動態施工安全管理理論，從人員培育、現場管控、制度建設、責任落實四個維度進行優化，在嚴守職業安全法定底線的基礎上，協調兼顧工程質量、施工進度與項目合理成本。

（一）搭建分層長效人員培訓與雙向柔性溝通機制

從業人員安全認知提升是安全管理落地的基礎，需搭建分層分類培訓、常態化雙向溝通相結合的人員培育體系，弱化單向管理的生硬感，以溫和引導方式培育全員主動安全意識。

第一，推行分層分類定製化安全培訓，覆蓋項目全層級從業人員。將培訓對象劃分為新入職務工人員、資深熟練工人、現場班組長、項目工程師、項目經理、分包企業管理層六大類別，結合崗位接觸風險、法定責任制定差異化培訓內容。針對新工人，重點講解基礎防護裝備使用、工地基礎風險識別、新法基礎要求；針對從業多年資深工人，結合澳門本地近年安全事故真實案例，拆解經驗主義帶來的安全隱患，破除「憑經驗做事不會出事」的僥倖施工思維；針對總包、分包負責人，重點解讀法律規定的企業主體安全責任、安全經費專款

專用要求、違規對應的行政處罰標準，從經營層面樹立合規安全意識。培訓形式摒棄單一文件宣讀，搭配工地實景示範、本地事故案例短片、現場風險實地踏勘、違規操作後果模擬演示等多元形式，降低工人理解門檻，避免工人將培訓視作單純「交功課」敷衍應付。培訓設置固定週期，每月開展基礎安全宣講、每季開展新工藝設備專項安全培訓、每年完成一次全員法規規範復盤，以持續性教育替代一次性短期培訓，鞏固全員安全認知。

第二，建立安全員與一線工人常態化雙向溝通渠道，化解雙方對立情緒。一線工人普遍將安全巡查、整改要求視作阻礙施工進度的約束，核心根源就是缺少充分的溝通理解渠道。要求專職安全員每日作業間隙主動走訪各工種作業區域，耐心傾聽工人在安全流程執行、防護設備使用、工序排布中遇到的實際困難，收集一線實操層面的合理優化建議。管理者的日常管理以鼓勵、引導為主，減少單純處罰的單一管控手段。針對工人提出的合理訴求，及時向項目管理層反饋，優化現場安全設施、調整作業工序；針對工人存在的安全認知誤區，結合現場實景溫和講解風險危害，讓工人理解安全管控措施是保護自身人身安全的保障，而非單純的管理約束，逐步消解一線人員把安全員當成「瘟神」的抵觸心理，營造主動配合合規作業的工地氛圍。

（二）落實常態化現場巡查、應急演練與多方協調聯動機制

建築安全管理核心是全過程動態管控，無法依靠靜態書面文件實現風險防控，須將分級日常巡查、實景應急演練、多方協調作為標準化常態管理動作，充分發揮專職安全員的媒介作用。

首先，管理者要建立三級全覆蓋日常安全巡查制度。劃分班組班前自查、專職安全員全日巡迴檢查、總包每週綜合大檢查三層巡查機制。各工種班組長每日開工前完成所屬區域風險自查，及時整改小型違規操作；專職安全員全日動態巡場，重點監控高空作業、動火施工、火藥槍等新型設備等高風險區域，發現違規即時現場制止、閉環整改，完整留存整改記錄；每週組織總包、分包、安全、技術管理人員開展全工地綜合排查，梳理系統性安全漏洞，制訂限期整改方案並持續跟進落實。巡查工作不僅限於拍照存檔、填寫台帳，核心聚焦施工過程中的即時動態風險，實現隱患早識別、早處置。

其次，管理者還要定期開展貼合澳門工地實景的專項應急演練。結合本地工地高發安全風險類型，設置高空墜落、機具反彈傷人、設備火情、基坑小型坍塌、機械噪聲損傷等演練場景，每季組織一次全員實操演練。演練杜絕走形式，模擬真實意外發生場景，訓練工人自救互救、緊急上報、現場隔離、簡易醫療處置等實操能力，讓從業人員熟悉事故發生後的標準處置流程，降低事故造成的人員傷亡損失。演練完畢後組織全員集中復盤，梳理演練暴露出的管控漏洞，同步優化現場應急物資存放、應急疏散路線、應急處置流程。

此外，專職安全員要發揮多方協調磨合媒介作用。專職安全管理人員兼具法規落地、現場生產協調雙重職能，如同銜接企業合規標準與一線施工實務的齒輪。一方面以柔性溝通搭配硬性規範的方式，向工人傳遞安全標準與法律要求，從心理層面取得工人理解認同；另一方面協調總包、分包、技術班組、甲方多方訴求，在完全符合澳門法定安全標準的前提下，合理優化施工工序排布，平衡安全管控要求與工程交付進度，化解工期壓力與安全規範之間的衝突矛盾，避免單一追趕工期而降低安全管控標準。

（三）推進安全管理流程標準化、精簡化，搭建配套的管理組織體系

完善且可持續的安全管理組織與制度體系是長期穩定管控的制度基礎，制度建構不可一味疊加條款，須兼顧法律合規底線與一線工人實務承受能力，建構精簡、可落地、持續迭代優化的標準化管理架構。

第一，須設立獨立專職安全管理組織，明確崗位獨立權責。澳門中型及以上在建工地須組建獨立安全管理小組，配置足額專職安全管理人員，嚴格禁止安全崗位人員兼任施工調度、材料管理等生產類崗位，保障安全員具備獨立現場巡查、停工整改、違規處置的執行權限，避免施工進度壓力干擾安全管控判斷。清晰劃分小組內人員細項分工，設置高風險工序專項管控、工人培訓籌辦、安全台帳管理、應急物資維護、制度優化修訂等專崗，實現專人專責、施工全流程風險全覆蓋。

第二，標準化制度內容須精簡優化。制度建構摒棄「條款越多管控越完善」的片面思維，嚴格區分法律強制硬性條款與輔助管理內容，刪除重複、冗贅、脫離本地施工實況的流程表單與管控條款。安全制度文件、現場檢查表單、作業指引一律以淺白易懂、重點突出為編製原則，大幅刪減多餘內容，避免條文繁雜令工人「看都不想看」，減輕一線工人填寫繁瑣台帳的負擔，防止繁複制度引發工人敷衍、輕視的負面狀況。制度初稿擬定完畢後，必須召集本地現場班組長、資深工人、一線技術人員共同研討，結合澳門工地多層分包、小型機具眾多、交叉作業頻繁等行業特徵，評估制度推行的實際難度、潛在漏洞以及對施工進度造成的影響，持續迭代優化整套安全管理系統，最終達成安全合規管理與工程施工進度並行推進的目標。

（四）落實全層級清晰化安全管理責任制，賞罰分明、循序漸進普法

依據澳門特區第 2/2023 號法律，法條已明確劃分分包商、承建商、安全人員、施工人員、工程技術人員各方之法定安全義務，任何一方出現違規作業均會遭受相應行政處罰。工地安全管理不能只依靠少數管理人員、安全員承擔全部管理壓力，過重的管理負荷會直接拉低安全管控整體水準，因此務必落實全層級全員安全責任制。

現階段一線工人普遍對本地建築安全相關法律條文認知不足，管理層與安全員須透過常態化、溫和有效的協調溝通，循序漸進開展普法引導，協助全體從業人員掌握落實規範安全操作的實務方法。針對經多次勸導仍漠視安全規範、冒險違規施工之行為，採取零容忍管理態度，藉由企業內部行政處罰機制及時糾正長年積累的不良作業習慣。現今澳門建築業市場環境早已不同於過往高速擴張階段，全體管理人員皆須主動捨棄舊式粗放管理思維，清晰向每位員工講解自身法定安全義務、違規作業所衍生的經濟損失、行政處罰、人身傷害等多重嚴重後果。於責任落實過程中，企業管理層應做到賞罰分明，配套設置安全合規正向激勵機制，對於長期規範施工、主動排查隱患、積極配合安全管理的班組與工人給予適度物質或精神獎勵，避免單一依賴處罰手段造成工人消極應對安全管理的心態，以正向引導搭配剛性約束，推動全員主動履行自身安全責任。

結　語

澳門建築業正處在行業轉型階段，疊加新法實施、施工技術更新、市場盈利空間壓縮等多重因素，工地安全管理暴露出工人將安全工作視作「交功課」、抵觸安全員、繁雜制度讓人「看都不想看」等現實問題。施工安全屬於動態全流程管理，難以直接產生經濟收益，容易被企業忽視，想要實現施工與安全同步發展，不能依靠單一管控手段。分層培訓溝通、常態化巡查演練、精簡標準化制度、全員安全責任制四項對策，兼顧了法律要求與澳門本地

現況，其推行有望扭轉企業重進度輕安全、工人憑經驗冒險作業的固有思維。行業各方應主動配合建築業安全相關法律規範，平衡工程質量、工期、成本與職業安全，將安全管理融入日常施工全流程，持續減少安全隱患與意外事故，推動澳門建築業邁向安全、規範、可持續的高質量發展路徑。

參考文件：

［1］ 楊凱：〈建築工程項目施工安全風險管理研究〉，收於《湖北應急管理》, 2026 年第 8 期。

［2］ 吳國華：〈建築工程施工安全管理存在的問題及解決策略〉, 收於《城市建設》, 2026 年第 7 期。

［3］ 李曉楠：〈建築施工企業安全生產管理現狀及優化策略探究〉, 收於《建材發展導向》, 2025 年第 23 卷 14 期。

［4］ 黃波：〈建築工程安全管理風險識別與動態預警機制研究〉, 收於《中國住宅設施》, 2025 年第 11 期。

［5］ 沈程, 刁殿永, 張成, 等：〈淺談澳門地區大型工程項目施工總承包安全管理〉, 收於《建築安全》, 2023 年第 38 卷 7 期。

某冶金技术研发机构职业病危害现状评价分析

但成栋，肖　登，秦梓航，杨梓涵
中钢集团武汉安全环保研究院　武汉　430081

摘　要：本文以某冶金技术研发机构为研究对象，综合运用职业卫生现场调查、作业场所检测、检查表分析及综合评价等方法，系统开展职业病危害现状评价工作。结果表明，该机构作业场所主要存在粉尘、化学毒物、噪声、噪声、高温五类职业病危害因素，所有检测指标均符合国家职业接触限值标准；厂区布局、建筑卫生、应急保障、职业健康监护等工作基本符合职业卫生相关法规要求，但在防护台账建立、个体防护用品佩戴、警示标识设置、档案管理等方面存在短板。结合现场实际问题提出分级整改与长效管理建议，旨在帮助用人单位补齐职业卫生管理漏洞，强化职业病防治主体责任，保障从业人员身体健康与作业安全。

关键词：冶金研发机构；职业病危害；现状评价；职业卫生管理

1　引　言

冶金行业技术研发环节涵盖理化分析、中试冶炼、材料加工、焊接酸洗等多类作业，工艺流程复杂，原辅材料品类繁多，不可避免产生各类职业病危害因素。职业健康作为安全生产工作的重要组成部分，直接关系从业人员生命健康与企业稳定发展。为全面排查作业场所职业健康风险，精准掌握职业病危害种类、分布、浓度（强度）以及防护措施运行实效，依据《中华人民共和国职业病防治法》《工作场所职业卫生管理规定》等法律法规要求，对该冶金技术研发机构开展全覆盖职业病危害现状评价。本次评价厘清现有职业卫生工作的优势与不足，明确风险等级与管控重点，既为企业优化职业病防治体系提供技术支撑，也为卫生监管部门开展监督管理提供客观依据。

2　评价概况与研究方法

2.1　评价对象

本次评价将机构划分为两大单元：一是以理化试验、材料分析为主的实验研究单元；二是包含冶炼、轧制、机加工、焊接、酸洗等工序的中试生产单元。机构实行长白班制度，每周工作 5 天，单日作业时长 8 小时，各岗位作业人员根据岗位职责接触不同类型的职业病危害因素。本次评价不含厂区辐射相关作业内容。

2.2　评价依据

本次评价严格遵循国家现行法律、法规、技术标准。法律法规层面以《中华人民共和国职业病防治法》《使用有毒物品作业场所劳动保护条例》等为核心；技术标准执行《工业企业设计卫生标准》（GBZ 1–2010）、《工作场所有害因素职业接触限值》（GBZ 2.1–2019、GBZ 2.2–2007）、各类职业病检测、作业分级、个体防护规范；同时参考企业历年职业卫生检测报告、评价报告、职业健康档案等历史资料。

2.3　研究方法

职业卫生调查法：通过现场实地踏勘、查阅台账资料、现场问询从业人员等方式，梳理

生产工艺、设备布局、原辅材料使用、岗位设置、防护设施、管理制度等基础信息。

现场检测法：按照国家采样规范，采用定点采样与个体采样相结合的方式，对粉尘、化学毒物、噪声、高温等危害因素开展检测，所有检测仪器均经计量检定，数据真实有效。

检查表分析法：对照职业卫生法规、标准逐条逐项核查厂区布局、建筑、防护、管理等内容，判定合规性。

综合分析法：整合调查、检测、作业分级结果，综合研判整体职业健康风险。

3 企业基本情况

该冶金技术研发机构成立时间久，拥有多座专业实验室、中试厂房及八百余台（套）先进试验设备，构建起实验室研究、中试试验、工艺模拟一体化研发模式。厂区分为实验楼与生产厂房，建筑类型包含钢筋混凝土结构、轻型钢结构等。当地属于亚热带季风湿润气候，夏季气温较高，易形成高温作业环境。

企业主要原辅材料为金属原料、各类酸碱化学试剂，原料与试剂均采用分区堆放、瓶装储存模式。岗位设置完善，包含实验工、制样工、化验工、焊工、机加工、炼钢工、轧钢工、水处理工等多个工种，各工种分区作业，分工明确。整体生产运行稳定，长期开展冶金新材料、新工艺、新技术的试验与验证工作。

4 现场硬件条件评价

4.1 总体布局评价

厂区严格按照功能划分生产区、非生产区与辅助区，分区界限清晰、布局合理。产尘、产毒、高温设备设置在厂区全年最小频率风向的上风侧，办公生活区布置在下风侧；高温厂房建筑走向与夏季主导风向夹角符合规范要求；多层实验楼将产热、产毒作业设置于上层，有效避免有害气体向下扩散；厂区配套完善的应急通道与卫生绿化带。综合判定，厂区总体布局完全符合国家工业设计卫生标准。

4.2 生产工艺与设备布局评价

实验单元以材料成分、微观结构、力学性能检测试验为主；中试单元配备熔炼、轧制、机加工、焊接等试验设备。企业对产尘、产毒设备优先采用密闭化、自动化设计，并配套局部通风设施；高噪声、高温设备集中布置，发热设备设置在作业人员下风方向。设备排布兼顾操作便利、设备检修与应急疏散需求，工艺及设备布局均满足职业卫生设计要求。

4.3 建筑卫生学评价

实验楼、办公楼采用钢筋混凝土结构，生产厂房采用轻型钢及混凝土排架结构。全场以自然通风为基础，关键作业点位增设机械通风装置；采光采用自然光与专业灯具结合的模式，针对粉尘、腐蚀、高温、防爆等不同作业环境，分类选用适配灯具。建筑通风、采光、照明、隔热等指标全部达标，符合建筑卫生学相关标准。

5 职业病危害因素分析与检测结果

5.1 危害因素识别

结合原辅材料、生产工艺及作业特点，共识别出三类职业病危害因素：第一类为粉尘，包含煤尘、电焊烟尘、金属其他粉尘，主要产生于制样、焊接、机加工、冶炼等工序；第二类为化学毒物，涵盖一氧化碳、氮氧化物、盐酸、硫酸、锰及其化合物，其中一氧化碳、锰及其化合物属于高毒物品，集中在矿石还原、冶炼、焊接、化学分析、酸洗岗位；第三类为物理因素，以噪声、高温为主，噪声普遍存在于各类运转设备岗位，高温主要出现在冶炼、酸洗等热作业区域。

此外，密闭空间检修、化学品泄漏、夏季高温天气还会带来次生职业健康风险。依据接触人数、暴露时长和危害程度，将煤尘、普通

粉尘、一氧化碳、氮氧化物、酸碱、噪声划定为主要危害因素，电焊烟尘、锰及其化合物、高温划定为次要危害因素。

5.2 现场检测结果

检测期间设备正常运行，防护设施全部开启，气象条件符合检测要求。全场所有岗位的粉尘、化学毒物、噪声、高温检测数值均低于国家职业接触限值。煤尘游离二氧化硅含量低于 10%，按常规煤尘管控。近三年检测数据波动较小，危害因素浓度（强度）整体稳定，作业环境管控效果良好。

5.3 职业病危害作业分级

按照《工作场所职业病危害作业分级》系列标准开展分级工作：所有粉尘作业、化学毒物作业均判定为 0 级（相对无害作业）；高温、噪声岗位检测数值未达到危害分级阈值。整体来看，全场各岗位职业病危害作业风险等级极低。

6 防护设施、应急保障与个体防护

6.1 职业病防护设施

企业针对粉尘、酸雾、有毒气体配置通风柜、除尘设备、排风扇等通风排毒除尘设施；对噪声设备采取隔声、减振、选用低噪声设备等管控手段；高温区域配备通风设备与防暑物资。防护设施选型合理、运行正常，但未建立统一规范的防护设施检修、维护台账，存在管理漏洞。

6.2 应急救援设施

在中毒、化学灼伤、中暑等高风险点位，配备气体报警器、洗眼器、防毒面具、空气呼吸器、急救箱、救援担架等应急器材，所有器材定期检定保养，状态完好，可有效应对各类急性职业危害事故，应急设施设置符合规范要求。

6.3 个人防护用品

企业根据岗位危害类型，为全员配发防尘口罩、防毒面具、防酸碱用品、防噪声耳塞等适配防护用品。但现场检查发现，部分作业人员安全意识不足，存在不按规定佩戴防护用品的行为，个体防护末端管理不到位。

7 辅助用室与职业健康监护

7.1 辅助用室

厂区配套休息室、浴室、更衣室、盥洗室、厕所、食堂等辅助设施，依据作业污染等级合理规划布局，设施数量、卫生条件均符合标准。因企业女职工人数较少，未设置专用妇女卫生室，该情况符合规范要求。

7.2 职业健康监护

企业建立完善的职业健康监护制度与从业人员个人健康档案，严格按照周期组织上岗、在岗职业健康检查，本年度全员受检率达到 100%。体检结果显示，全体人员未检出职业禁忌证、疑似职业病及职业相关疾病，职业健康监护工作落实到位。

8 职业卫生管理体系

8.1 组织与制度建设

企业设立专职职业卫生管理机构，配备持证管理人员，建立职业病防治责任制、危害检测、防护管理、应急管理等全套规章制度，按时完成职业病危害项目申报，职业卫生经费足额保障，基础管理框架完整。

8.2 培训与告知工作

企业常态化开展三级职业卫生教育培训，劳动合同中如实告知岗位职业病危害。但作业场所公告栏内容不完整，部分岗位职业病警示标识、中文警示说明缺失，危害告知工作存在短板。

8.3 应急与档案管理

企业编制职业病危害专项应急预案，定期开展中毒、中暑、气体泄漏等应急演练，演练记录完整。职业卫生档案分类归档，但部分档

案内容不够细化，需要进一步补充完善。

9 综合评价结论

风险等级：对照《建设项目职业病危害风险分类管理目录》，结合工艺特点、危害因素、检测结果综合判定，该机构属于职业病危害一般单位。

整体合规情况：厂区总体布局、建筑卫生、工艺设备、应急设施、辅助用室、职业健康监护、核心管理制度等均符合国家职业卫生法律法规与标准；作业场所各类职业病危害因素全部达标，作业风险整体可控。

现存主要问题：一是职业病防护设施缺少专项维护台账；二是部分作业人员未规范佩戴个人防护用品；三是作业场所公告栏、警示标识设置不完善；四是职业卫生档案内容存在缺项。

10 整改建议与长效管理措施

10.1 即时整改措施

第一，建立防护设施专项台账，统一设计检修、运行、维护记录表，明确责任人与检修周期，做到一设备一台账，记录及时归档。第二，强化现场监管与宣传教育，加大巡查力度，结合事故案例讲解防护用品的重要性；同时结合佩戴体验优化用品选型，提升佩戴依从性，督促全员规范佩戴防护用品。第三，补充完善作业场所警示标识、中文说明，更新公告栏内容，公示检测结果、规章制度、应急方案等信息，全面落实危害告知要求。第四，按照《职业卫生档案管理规范》补充档案资料，细化台账内容，实现档案规范化、可追溯管理。

10.2 常态化管理措施

其一，严格执行检测评价周期，每年委托资质机构开展职业病危害因素检测，每三年组织一次现状评价，动态掌握风险变化。其二，持续开展分层分类培训，针对新员工、高毒岗位人员开展专项职业卫生、应急技能培训，强化全员防范意识。其三，建立职业卫生隐患日常排查机制，定期检查防护设施、防护用品、警示标识，发现问题立行立改。其四，坚持常态化应急演练，优化应急预案，提升人员自救、互救能力。其五，持续落实职业健康体检工作，对体检异常人员及时跟踪、妥善安置，严禁职业禁忌证人员从事相关作业。

10.3 长远优化方向

立足本质安全，逐步推进工艺与设备升级，优先选用自动化、密闭化、低噪声设备，从源头降低职业病危害。结合季节特点落实防暑、防寒措施，持续优化作业环境，全面提升企业职业病防治整体水平。

11 结 语

本次评价结果表明，该冶金技术研发机构职业病危害整体处于可控状态，核心防护措施与管理体系运行有效。企业需正视当前管理细节上的短板，严格落实整改要求，压实职业病防治主体责任。坚持“预防为主、防治结合”的工作方针，将职业卫生管理融入研发、作业全流程，持续优化作业条件，筑牢职业健康防线，切实保障全体从业人员的身体健康与企业安全稳定发展。

参考文献

［1］ 中华人民共和国卫生部. GBZ 1–2002 工业用人单位设计卫生标准（S）. 北京：法律出版社, 2010.

［2］ 中华人民共和国卫生部. GBZ188–2007 职业健康监护技术规范（S）. 北京：人民卫生出版社, 2008.

［3］ 中华人民共和国卫生部. GBZ/T197–2007 建设项目职业病危害控制效果评价技术导则（S）. 北京：人民卫生出版社, 2008.

［4］ 中华人民共和国卫生部. GBZ159–2004 工作场所空气中有害物质监测的采样规范（S）. 北京：人

民卫生出版社 2008.

［5］ 中华人民共和国卫生部. GBZ2. 1–2007 工作场所有害因素职业接触限值第 1 部分：化学有害因素（S）. 北京：人民卫生出版社, 2008.

［6］ 中华人民共和国卫生部. GBZ2. 2–2007 工作场所有害因素职业接触限值第 2 部分物理因素（S）. 北京：人民卫生出版社, 2008.

某涂镀板公司职业危害调查

张志勇，朱灿松，张　丽，陈　强，辜　伟
中钢集团武汉安全环保研究院　武汉　430081

摘　要：目的　调查某涂镀板公司职业病危害现状，识别关键控制点。**方法**　采用职业卫生调查、危害因素检测（粉尘、化学毒物、噪声、X 射线）、健康检查资料分析及检查表法，对生产部、设备部和质检部进行评估。**结果**　识别危害因素 20 余种。8 个岗位噪声超标（85.8～92.5dB（A），超标率 38.1%），4 个达中度危害；噪声超标岗位暴露水平显著高于非超标岗位。化学毒物均未超标，但彩涂岗位二甲苯近三年波动较大（2024 年达 42.58mg/m³），甲苯呈上升趋势。存在正压式空气呼吸器缺配、酸洗岗位滤毒盒选型错误、在岗体检率仅 53.8%、外委人员体检率 10%～50%等问题。**结论**　该企业职业病危害风险分类为“严重”，噪声为首要危害因素。建议优先实施工程降噪和听力保护计划，纠正防护用品选型错误，强化外委人员统一管理。

关键词：涂镀板；职业病危害；现状调查；职业健康

彩涂板以其优良的装饰性、耐蚀性和高强度被广泛应用于建筑、家电等领域，市场需求持续增长[1]。彩涂板生产涉及酸洗、冷轧、热镀锌铝及有机涂层涂覆等复杂工序，其中涂层技术已从普通预涂彩板（PCM）发展至印刷彩板（PPM）、金属覆膜板（VCM/PEM）及数码打印彩板（DVM）等多元化产品体系[2]。该行业岗位人员接触酸雾、有机溶剂（甲苯、二甲苯等）、金属烟尘、高温、噪声及电离辐射等多种危害因素，呈现多因素联合暴露特征。研究表明，冶金涂镀行业噪声超标率普遍在 30%～50%，听力损失检出率随工龄显著上升[3-4]；而外包作业人员的职业健康管理缺失问题已成为行业共性难题[5]。

因此，系统调查典型涂镀板企业职业病危害现状，精准识别关键控制点，对落实用人单位主体责任、保护劳动者健康具有重要现实意义。

1　对象与方法

1.1　对象

以某涂镀板公司为研究对象。该公司位于湖北省某工业园区，镀锌钢卷、镀锌铝钢卷、彩涂钢卷的年总产能为 50 万吨。

企业生产工人 160 人（95%为男性），实行四班二运转工作制，每班工作 12h。研究对象涵盖生产部（酸再生、热镀锌铝、冷轧、彩涂）、设备部（废水处理、气保站、维修）和质检部。

1.2　方法

1.2.1　职业卫生调查

依据《职业病危害现状评价技术导则》（AQ/T　4270-2015）进行现场调查。调查内容包括：总体布局、生产工艺、原辅材料（含 MSDS 分析）、设备布局、职业病防护设施、应急救援设施、个人防护用品、辅助用室及职业

卫生管理制度等。同时收集企业近三年（2023—2025 年）的职业病危害因素检测报告和职业健康检查资料。

1.2.2 职业病危害因素检测

检测期间，企业处于正常生产状态，防护设施运行正常。粉尘与化学毒物依据 GBZ 159 等相关标准，采用个体长时间和定点短时间相结合的方式采样；噪声依据 GBZ/T 189.8 使用个体噪声剂量计测量 8h 等效声级（LEX，8h）。X 射线依据 GBZ 115 采用加压电离室巡测仪测量。所有检测仪器均经法定计量机构检定合格。

1.2.3 评价标准与分级

化学有害因素限值执行 GBZ 2.1-2019，物理因素执行 GBZ 2.2-2007。噪声作业分级按 GBZ/T 229.4-2012。

1.2.4 统计学处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 进行统计分析。计量资料以均数 ± 标准差表示，超标与非超标岗位噪声暴露比较采用两独立样本 t 检验；不同年份同岗位化学毒物浓度比较采用单因素方差分析。检验水准 α =0.05。

2 结 果

2.1 职业病危害因素识别

通过对原辅材料和生产工艺分析，共识别出职业病危害因素 20 余种。主要危害包括：粉尘（铁及其化合物粉尘、电焊烟尘）、化学毒物（盐酸、甲苯、二甲苯、异佛尔酮、乙酸丁酯、氨、硫化氢、铬及其化合物、锰及其化合物、氧化锌等）、物理因素（噪声、高温、紫外线、工频电场）及放射因素（X 射线）。其中氨、硫化氢、铬及其化合物、锰及其化合物、铅烟为《高毒物品目录》所列物质。主要原辅材料下表。

表 1 主要原辅材料分析

原辅料名称	主要成分/可能产生的危害因素	使用/产生环节
盐酸（再生酸）	HCl	酸洗、酸再生
热镀用锌合金锭	Zn，Al，Pb	热镀锌/铝锌（产生氧化锌、铅烟）
有铬钝化液	铬酸铬、三聚磷酸二氢铬	钝化处理（产生铬及其化合物）
环氧/聚氨酯卷钢底漆、稀释剂	甲苯、二甲苯、异佛尔酮、乙酸丁酯	彩涂（挥发有机气体）
液氨	NH_3	气保站氨分解制氢
聚合氯化铝、聚丙烯酰胺	其他粉尘	废水处理
X 射线装置	X 射线	轧机测厚、镀层测厚

2.2 职业病危害因素检测结果与分析

2.2.1 粉尘检测结果

生产部酸再生操作工接触的铁及其化合物粉尘 CTWA 为 0.12mg/m³，毛化床操作工为 0.25mg/m³，低于职业接触限值（8mg/m³）；设备部电焊工接触的电焊烟尘 CTWA＜0.39mg/m³（限值 4mg/m³）。所有粉尘检测结果均符合 GBZ 2.1-2019 要求，暴露水平低于限值的 10%，现有除尘设施控制效果良好。

2.2.2 化学毒物检测结果及多维度分析

18 个岗位的化学毒物检测结果显示（表 2），所有岗位接触浓度均符合限值要求。彩涂工艺操作岗位同时接触四种有机溶剂，二甲苯 C_{TWA} 为 12.52mg/m³，其短时间接触浓度（C_{STE}）17.6mg/m³；甲苯 CTWA 为 3.50mg/m³（占 7.0%）。该岗位二甲苯暴露水平显著高于涂料转运岗位（t=6.84，P<0.01）。近三年趋势分析（表 3）显示，甲苯浓度年均增幅约 25%，二甲

苯 2024 年出现异常高值（42.58mg/m³），与涂料配方变更有关；2025 年回落至 12.52mg/m³。高毒物品氨、硫化氢、铬酸盐等均低于限值，暴露水平极低。

表 2　主要职业病危害因素检测结果

评价单元	岗位/工种	危害因素	检测结果（mg/m³）	职业接触限值（mg/m³）	判定
生产部	彩涂工艺操作	甲苯	C_{TWA}：3.50	PC-TWA：50	符合
生产部	彩涂工艺操作	二甲苯	C_{TWA}：12.52 C_{TWA}：17.6	PC-TWA：50 PC-STEL：100	符合
生产部	酸洗工艺操作工	盐酸	C_{TWA}：<2.03	MAC：7.5	符合
设备部	气保站操作工	氨	C_{TWA}：0.06	PC-TWA：20	符合
设备部	废水处理工	硫化氢	C_{ME}：<1.8	MAC：10	符合

表 3　彩涂工艺操作岗位化学毒物暴露水平变化

（单位：mg/m³）

年份	甲苯（C_{TWA}）	二甲苯（C_{TWA}）	乙酸丁酯（C_{TWA}）
2023	<1.0	6.70 ± 2.10	未检测
2024	2.16 ± 0.85	42.58 ± 8.34	未检测
2025	3.50 ± 1.02	12.52 ± 3.21	13.20 ± 2.56

2.2.3　噪声检测结果及暴露水平分析

21 个岗位噪声结果显示，8 个岗位 LEX，8h 超过 85dB（A），超标率 38.1%（表 4）。超标岗位 $L_{EX,w}$ 均值 89.4 ± 2.5dB（A），其中轧机开卷工、轧机卷取工、锌锅工和彩涂入口操作工 4 个岗位达Ⅱ级（中度危害）。非超标岗位均值为 78.6 ± 4.2dB（A），差异有统计学意义（t=11.73，P<0.01）。不同工序比较（表 5）：冷轧工序 87.2 ± 5.1dB（A），镀锌工序 84.6 ± 6.2dB（A），彩涂工序 86.7 ± 3.8dB（A），但组间差异无统计学意义（F=1.82，P=0.17）。近三年趋势（表 6）显示，彩涂入口操作工噪声暴露从 80.4dB（A）升至 92.5dB（A），光整工从 73.7dB（A）升至 87.7dB（A），上升趋势明显。

表 4　噪声超标岗位检测结果

岗位/工种	$L_{EX,w}$［dB（A）］	职业接触限值［dB（A）］	危害分级
酸洗线酸洗工艺操作工	85.8	85	Ⅰ级（轻度危害）
轧机开卷工	91.0	85	Ⅱ级（中度危害）
轧机卷取工	90.3	85	Ⅱ级（中度危害）
热镀锌铝区锌锅工	92.0	85	Ⅱ级（中度危害）
热镀锌铝区光整工	87.7	85	Ⅰ级（轻度危害）
彩涂入口操作工	92.5	85	Ⅱ级（中度危害）
彩涂工艺操作工	88.1	85	Ⅰ级（轻度危害）
彩涂稀料回收工	87.4	85	Ⅰ级（轻度危害）

表 5　不同工序噪声暴露水平比较

工序	检测岗位数	$L_{EX,w}$［dB（A）］	范围［dB（A）］
冷轧工序	3	87.2 ± 5.1	80.3 ~ 91.0
镀锌工序	5	84.6 ± 6.2	77.4 ~ 92.0
彩涂工序	4	86.7 ± 3.8	83.5 ~ 92.5

工序	检测岗位数	$L_{EX,w}$［dB（A）］	范围［dB（A）］
辅助工序	4	79.3 ± 3.5	72.1 ~ 83.7

表 6　代表性岗位噪声暴露变化趋势

［单位：dB（A）］

岗位/工种	2023 年	2024 年	2025 年	变化趋势
酸洗工艺操作工	70.8	未检测	85.8	显著上升
轧机开卷工	87.8	未检测	91.0	上升
锌锅工	未检测	89.3	92.0	上升
光整工	73.7	83.9	87.7	显著上升
彩涂入口操作工	80.4	83.2	92.5	显著上升
气保站操作工	84.2	84.3	80.3	下降

3.2.4　X 射线检测结果

6 台 X 射线装置周围剂量当量率均低于 2.5 μSv/h，符合 GBZ 117–2015 要求，联锁装置和警示标识齐全。

2.3　职业病防护与应急救援设施

企业设置了酸雾净化系统、塑烧板除尘器、RTO 焚烧炉及隔声操作室等，运行正常。但应急救援设施不足：酸洗线仅配备 1 套正压式空气呼吸器（SCBA），按标准应至少 2 套；酸回收区仅 1 套；废水处理站未设置氨、硫化氢告知卡，也未配备便携式检测报警仪。

2.4　个人防护用品

企业配发了泡棉耳塞、防尘口罩、自吸式防毒半面罩等，但存在选型错误：酸再生、酸洗岗位配备防有机蒸气滤毒盒，而盐酸为酸性气体，应选用防酸性气体滤毒盒；废水处理工未配备防氨气的呼吸防护用品。

2.5　职业健康监护

外委单位职业健康机构率严重偏低：某包装公司体检率仅 10% ~ 20%，某工程公司 50%，某维修公司未包含电焊弧光眼科检查。

3.6　职业卫生管理综合评价

采用检查表法评价 32 项指标，7 项部分符合，25 项符合。主要问题：检测结果公告不规范；废水站无高毒告知卡；外委单位未进行职业病危害书面告知；职业病危害因素变化后未重新告知；外委单位在岗体检率不足。

3　讨论

噪声是首要危害因素，暴露水平呈上升趋势　本调查噪声超标率 38.1%，与文献报道的冷轧薄板厂 35.7%接近[3]，但高于金属表面处理企业平均水平（28%）[4]。近三年多个岗位噪声暴露显著上升（最大增幅 14.0dB（A）），与产能提升及设备老化有关。隔声操作室无法保护巡检作业人员，应优先实施工程降噪：对轧机加装隔声罩，对气刀管道加装消声器，同时实施听力保护计划，开展护听器佩戴效果验证。

化学毒物暴露总体可控，但需关注波动风险。所有毒物浓度均未超标，但彩涂岗位二甲苯 2024 年异常高值（42.58mg/m³）。甲苯浓度呈逐年上升趋势（年均增幅 25%），应加强局部通风维护。

外委人员职业健康管理是最大短板。外委单位体检率仅 10% ~ 50%，且未进行职业病危害书面告知。发包方应将外委人员纳入统一管理体系，并在外委合同中明确职业病防治的义务，督促外委单位落实职业病防治责任。

4　结论与建议

4.1　结论

（1）该涂镀板公司职业病危害风险分类为“严重”，噪声为首要危害因素，超标率38.1%，4个岗位达中度危害。

（2）化学毒物浓度符合限值，但存在年度波动和上升趋势，防护用品选型错误及应急设施缺配问题突出。

（3）职业卫生管理存在外委人员体检率低、告知缺失、在岗体检率不足等短板。

4.2 建议

（1）优先治理噪声：对轧机、气刀实施工程降噪，实施听力保护计划，验证护听器佩戴效果。

（2）为酸洗、酸再生岗位配发防酸性气体滤毒盒，为废水处理工配发防氨/硫化氢滤毒盒。

（3）强化外委人员管理：将外委单位纳入统一职业健康管理体系，确保职业健康监护率100%，完成危害告知。

（4）更新职业病危害告知书，增设废水站高毒告知卡。

参考文献

［1］ 孙力, 卢岳, 董伊康, 等. 彩涂板发展现状与应用进展［J］. 江西建材, 2022（6）：17–20.

［2］ 赵金榜. 彩涂板、彩涂板涂料和工艺的现状及其发展［J］. 现代涂料与涂装, 2006（1）：43–46, 60.

［3］ 张海, 李敏. 某冷轧薄板厂职业病危害现状评价［J］. 工业卫生与职业病, 2020, 46（3）：218–221.

［4］ 王军, 陈洁, 刘阳, 等. 金属表面处理企业职业病危害特征分析［J］. 中国职业医学, 2022, 49（5）：556–559.

［5］ 赵立华, 孙丽. 外包作业人员职业健康管理现状及对策［J］. 职业卫生与应急救援, 2021, 39（4）：461–464.

［6］ 李振宇, 张敏. 蓄热式氧化炉（RTO）在彩涂行业VOCs治理中的应用及职业卫生评价［J］. 环境与职业医学, 2019, 36（8）：752–756

基于职业健康检测的准确性提升–微孔滤膜中钙含量研究

张　蒙，邬姗姗，牛恩阳
中钢集团武汉安全环保研究院　武汉　430081

摘　要：目的　针对工作场所空气中钙及其化合物检测中混合纤维素（CN–CA）微孔滤膜钙本底值高的问题，研究优化滤膜预处理方法，提升职业健康检测数据的准确性。方法　采用去离子水、1%盐酸、1g/L 氢氧化钠溶液和 1%硝酸作为浸泡洗脱剂，比较钙本底降低效果及滤膜破损率。结果　使用 1g/L 氢氧化钠溶液和 1%硝酸引起 CN–CA 微孔滤膜钙本底值降低（P<0.05），使用 1%硝酸对滤膜中钙本底的去除效果最好，能够使钙本底值平均降低 68.6%，使用 1g/L 氢氧化钠溶液对滤膜中钙本底的去除效果优于 1%盐酸（P<0.05）和去离子水（P<0.05），使用 1%盐酸和去离子水去除效果差异无统计学意义（P>0.05）。氢氧化钠溶液会破坏 CN–CA 微孔滤膜的结构，不宜在实际中应用，1%硝酸浸泡后的 CN–CA 微孔滤膜破损率为 0。结论 1%硝酸预处理可显著提升职业健康检测数据的准确性，符合我国职业卫生标准要求，具有推广应用价值。

关键词：钙含量；混合纤维素微孔滤膜；硝酸洗脱；准确性

工作场所空气中钙及其化合物的准确测定是职业健康风险评估的关键环节，直接关系到劳动者职业暴露水平的科学评价[1]。根据《中华人民共和国职业病防治法》及 GBZ/T 300.7–2017《工作场所空气有毒物质测定第 7 部分：钙及其化合物》[2]标准，钙本底值过高可能导致职业暴露水平的高估或低估，影响防护措施的有效性。本研究旨在通过优化滤膜预处理方法，降低钙本底值干扰，为职业健康监测提供技术支撑。GBZ/T 300.7–2017 方法中用混合纤维素（CN–CA）微孔滤膜作为采集介质。在实验检测工作中发现，CN–CA 微孔滤膜空白样品钙本底值较高，远远高于原子吸收方法检出限，且不同张滤膜差异较大，对测量结果准确性有较大影响。使用去离子水浸泡处理可以有效较低钙本底值[3]，但其钙的本底值仍远高于方法的检出限。本研究采用不同的洗脱剂，探索最优的滤膜处理方式。

1　材料与方法

1.1　仪器与试剂：

240FSAA 火焰原子吸收分光光度计（安捷伦），配备钙元素空心阴极灯。智能型电热板，10.00mL 具塞式刻度试管，50mL 聚四氟乙烯烧杯，CN–CA 微孔滤膜数盒，孔径 0.8μm，直径 37mm。钙标准溶液：500μg/mL（生态环境部标准样品研究所 GSB07–1263–2000 101510），硝酸（优级纯 10014508）国药集团化学试剂有限公司，高氯酸（优级纯）成都市科隆化学品有限公司，盐酸（优级纯 10011008）国药集团化学试剂有限公司，氢氧化钠（分析纯 10019762）国药集团化学试剂有限公司，硝酸镧（80073114）国药集团化学试剂有限公司，硝酸镧作为释放剂，以消除 $PO4^{3-}$、$SO4^{2-}$等干扰[4]，硝酸铯（80031312）国药集团化学试剂有限公司，水质钙（1.43 ± 0.10）mg/L

（202919）环境保护部标样所。

1.2　方法

1.2.1　**标准曲线制备：**在 6 只 50.00mL 具塞式刻度试管中加入 5.00mL 镧铯混合溶液。再分别加入 0.00、0.10、0.20、0.40、0.6、1.00mL 钙标准溶液，用 1%盐酸溶液定容至刻度。配成 0.00、1.00、2.00、4.00、6.00、10.00μg/mL 浓度范围钙标准系列。

1.2.2　**质控样品配制选用国家有证标准物质水质钙（环境保护部标样所）。**取 2.00mL 水质钙标准溶液至 50.00mL 容量瓶中，加入 5.00mL 镧铯混合溶液，用 1%盐酸溶液定容至刻度，摇匀，该溶液浓度为（1.43±0.10）mg/L。

1.2.3　**实验组滤膜预处理：**取 CN-CA 微孔滤膜用去离子水、1%硝酸、1%盐酸和 1g/L 氢氧化钠溶液分别浸泡后再洗脱，晾干后分别放入 50mL 聚四氟乙烯烧杯中。对照组取与实验组同一批次的 CN-CA 微孔滤膜不经任何处理分别放入 50mL 烧杯中。将实验组与对照组每个样品烧杯中分别加入 5mL 消解液，盖上表面皿，在智能型电热板上约 200℃消解赶酸，取下稍冷，用盐酸溶液少量多次将残液定量转移入具塞刻度试管中，加入 1.00mL 镧铯混合溶液，用盐酸溶液定容至 10.00mL，摇匀待测定。

1.2.6　**工作场所空气样品采样测试：**参照 GBZ159-2004《工作场所空气中有害物质监测的采样规范》[3] 实验组选用经过比对最优的预处理方式的 CN-CA 微孔滤膜，对照组选用未经过处理的 CN-CA 微孔滤膜，分别同时在工作场所进行 12 组平行样品采集，统计滤膜破损情况。

2　结　果

2.1　标准曲线线性相关性 r=0.9997，Abs=0.07737C+0.00535，线性良好，标准系列 0.00、1.00、2.00、4.00、6.00、10.00μg/mL 吸光度分别为 0.0013、0.0809、0.1591、0.3173、0.4822、0.7709。

2.2　**质控样品结果国家有证标准物质水质钙（202919 环境保护部标样所）**检测浓度为 1.45mg/L，在标准值［（1.43±0.10）mg/L］范围内，质控结果准确可靠。

2.3　**统计分析：**各组数据分布符合正态分布，不满足方差齐性，P 值采用 Brown-Forsythe and Welch ANOVA tests（GraphPad Prism 8）计算，正态分布和方差齐性用 SPSS 25.0 分析。P 值小于 0.05 为显著。图中所有的误差条都表示 SEM，*p<0.05，**p<0.01，****p<0.001，ns 表示不显著。对照组 E 空白样品测得钙含量较高，样品浓度大小不一且极差较大。实验组空白样品经过预处理后测得钙含量有不同程度的降低，降幅较大且稳定性高的为硝酸溶液（D 组）。见图 1、图 2 和表 1。

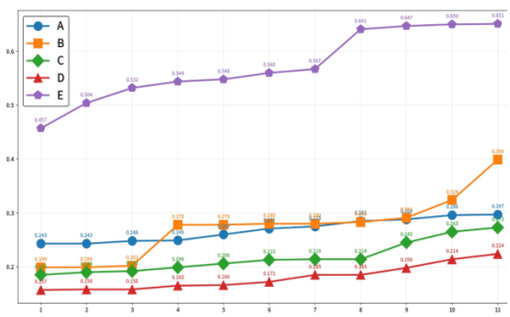


图 1　各组空白样品钙含量测试结果

表 1　各组空白样品钙含量测试结果统计（ug/mL）

组别	预处理	平均值	SD	RSD（%）	极差
A	去离子水	0.269	0.0211	0.0785	0.054
B	盐酸溶液	0.274	0.0592	0.2161	0.200
C	氢氧化钠溶液	0.218	0.0301	0.1383	0.088
D	硝酸溶液	0.180	0.0233	0.1295	0.067
E	无	0.573	0.0661	0.1154	0.194

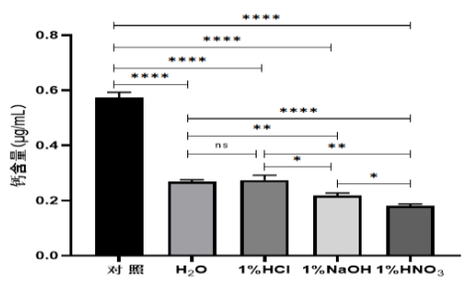


图 2　各组测试结果 SPSS 统计分析

2.4 工作场所空气样品采样测试结果

实验组 M 选用经过硝酸溶液预处理的 CN–CA 微孔滤膜，对照组 N 选用未经过处理的 CN–CA 微孔滤膜，分别在工作场所进行 12 组平行样品采集，实验组 M 和对照组 N 破损率均为 0。

3 讨论

滤膜钙本底值的显著降低（68.6%）可减少职业暴露评估中的系统误差，避免因本底干扰导致的防护措施过度或不足。例如，在水泥生产等钙化合物暴露高风险行业，准确的检测数据是制定分级控制策略（如工程防护、个体防护装备选择）的依据。本研究方法符合新版《职业病分类和目录》对职业病危害因素检测的要求，特别是对新兴职业病（如职业性肌肉骨骼疾病）的关联性监测需求。混合纤维素 CN–CA 作为一种较标准的常用微孔滤膜[5]，开发最早，应用也比较成熟[6]。原子吸收光谱法经历了 50 多年的发展，广泛应用于各种类型的痕量超痕量元素分析[7]。GBZ/T 300.7–2017《工作场所空气有毒物质测定第 7 部分：钙及其化合物》方法使用 CN–CA 微孔滤膜捕集工作场所空气中钙及其化合物，经酸消解–火焰原子吸收光谱法测定钙含量。而在实验检测工作中发现，CN–CA 微孔滤膜空白样品钙本底值较高，远远高于原子吸收方法检出限和方法检出限，且不同张滤膜差异较大，对测量结果准确性有较大影响。为了降低 CN–CA 微孔滤膜中的钙含量，通过选用去离子水，1%盐酸、1g/L 氢氧化钠溶液和 1%硝酸作为浸泡洗脱剂进行大量实验得出结论，1%硝酸能最好地降低 CN–CA 微孔滤膜中钙含量（$P<0.05$），提高滤膜钙本底值稳定性。经实验发现，经 1g/L 氢氧化钠溶液浸泡后的滤膜，洗脱晾干后易破损，使用 4g/L 氢氧化钠溶液浸泡 2 天后，滤膜会直接溶解。由此可以推断，氢氧化钠溶液会破坏 CN–CA 微孔滤膜的结构，不宜在实际中应用。在工作场所空气采样测试中，1%硝酸浸泡后的 CN–CA 微孔滤膜破损率较低，与未经处理的 CN–CA 微孔滤膜基本一致，由此可见，1%硝酸浸泡不会影响滤膜的结构稳定性，应该能够满足日常的采样需要。本方法虽然未能将 CN–CA 微孔滤膜钙含量降低到检出限以下，完全消除对工作场所空气中钙含量检测时的影响，但是使用经过 1%硝酸处理的滤膜能使其检测结果更趋近于真值，结果更加准确可靠，准确测定工作场所空气中金属类有害物质浓度，对于正确评价工作场所空气质量、保护职业人群身体健康有着重要的意义[8]。

4 结 论

针对工作场所钙暴露监测，建议职业卫生技术服务机构采用 1%硝酸预处理 CN–CA 混合纤维素微孔滤膜，保障检测数据精准度，为职业病危害识别、职业健康风险评估及防护措施有效性评价提供科学依据。采用 1%硝酸浸泡洗脱进行样品前处理，存在处理周期较长的不足，但可显著抑制滤膜固有钙本底带来的检测偏差，改善数据稳定性，规避原滤膜钙本底高、个体差异大的缺陷。试验表明，1%硝酸浸泡不会改变滤膜结构完整性，滤膜破损风险低，可正常应用于现场采样。预处理后滤膜钙本底平均降幅达 68.6%，检测结果更接近真实值。该预处理技术操作简便、准确度高、重现性好。建议采样前将 CN–CA 滤膜统一置于足量 1%硝酸溶液中隔夜浸泡，完成洗脱、晾干后再投入使用，减少异常检测样本。此外，该预处理思路对利用 CN–CA 微孔滤膜开展其他金属元素检测工作，同样具有参考价值。

参考文献

［1］ 王添琦, 李月红, 郭茹, 等. 国内工作场所空气中金属及其化合物测定方法的研究进展［J］. 中国卫生检验杂志, 2014, 24（12）：1823—1824.

［2］ 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会．工作场所空气有毒物质测定第 7 部分：钙及其化合物：GBZ／T 300．7—2017［S］．北京：人民卫生出版社, 2018：1—3.

［3］ 王鹏, 程永章, 王伟．CN-CA 微孔滤膜对工作场所空气中钙含量测定影响研究［J］．职业与健康 2018, 36（15）：2054—2057.

［4］ 中华人民共和国卫生部. 工作场所空气中有害物质监测的采样规范：GBZ 159—2004［S］. 北京：人民卫生出版社, 2006：1-7.

［5］ 宫美乐, 袁国梁．我国微孔滤膜研究现状与发展［J］．膜科学与技术, 2003（4）：186—189.

［6］ 李冰, 周剑雄, 詹秀春．无机多元素现代仪器分析技术［J］．地质学报 2011, 85（11）：1878—1916.

［7］ 湖南省计量检测研究院．镉、锰多元金属滤膜质控样品研制［J］．计量科学与技术, 2024, 63（10）：20—25.

［8］ 国家卫生健康委．2025 年职业病危害因素检测与评价技术指南［S］．北京：中国标准出版社, 2025：5—8.

某电子器件制造企业职业健康危害控制效果的分析

李克梅，邬姗姗，牛恩阳，张　蒙
中钢集团武汉安全环保研究院·武汉·430081

摘　要：目的　了解某电子器件制造企业职业病危害控制效果，为今后职业病防治工作提供科学依据。方法　依据国家相关卫生标准，采用现场调查、现场监测和职业健康检查相结合的方法，对某电子器件制造企业试生产过程中产生的主要职业病危害因素进行现场监测，评价职业卫生防护措施效果。结果　该项目的总平面布局、职业病防护措施、职业病个人防护用品、职业卫生管理、职业健康监护等内容基本满足国家现行法律法规和职业卫生标准要求。生产过程中产生的主要职业病危害因素包括毒物、噪声、高频电磁场、紫外辐射、低温等。毒物、高频电磁场、紫外辐射检测结果均符合标准要求。结论　该项目属职业病危害严重性建设项目，且项目职业病危害控制管理制度及措施有效、可行。

关键词：职业病危害因素监测；电子器件制造；职业病危害控制

某电子器件制造企业新建 CMOS 图像传感器芯片彩色滤光片、微透镜加工项目，总投资 50.3 亿元，2022 年 12 月开工，2024 年 3 月进入试运行，依据《中华人民共和国职业病防治法》[1]规定，对该项目进行职业病危害控制效果评价[2]。

1　评价内容与方法

1.1　评价方法

采用现场调查、现场监测和职业健康检查相结合方法对建设项目进行分析和评价。

1.2　评价内容

主要包括总平面布置、生产工艺及设备布局、建筑物卫生学要求、职业病危害因素检测和评价、职业病危害防护设施、职业卫生管理措施、个人防护措施、卫生辅助用室、应急救援设施、职业健康监护和职业卫生专项经费使用情况等。

2　结　果

2.1　工艺流程及职业病危害

2.1.1　主要生产工艺

建设项目主要进行 CMOS 图像传感器芯片生产，在一期成品芯片基础上进行彩色滤光片、微透镜加工，产品主要用于摄像头。CMOS 图像传感器生产工艺由两大部分组成：彩色滤光膜制程（Color Filter，CF）和微透镜制程（Micro Lens，ML）。首先通过涂胶、曝光、显影等工艺完成红、绿、蓝三色滤光膜制作；再通过涂胶、曝光、显影、蚀刻等工艺完成微透镜制作完成，最后再通过蚀刻工艺将芯片上焊盘露出，便于后续封装。主要原辅料为光刻胶、显影液、蚀刻气体。建设项目生产 CMOS 图像传感器芯片，产品主要用于手机摄像头。

2.1.2　职业病危害因素

综合建设项目生产工艺和使用原辅材料情况，对建设项目产生或存在的职业病危害因素进行了识别，识别出的职业病危害因素有：（1）化学有害因素：氟化氢、异丙醇、丙酮、丁酮、乙二醇、二甲基亚砜、硫酸、磷酸、盐酸、氢氧化钠、环己酮、氟及其无机化合物、

氮氧化物、二氧化硫、一氧化碳、柴油、甲烷、丙烷；（2）物理因素：噪声、工频电场、紫外线、激光、高频电磁场。生产过程中产生或存在职业病危害因素分布见下表。

表 1　职业病危害因素分布表

评价单元	生产环节	职业病危害因素	产生的原因	接触岗位/工种
生产单元	涂胶显影	异丙醇、丙酮、丁酮、噪声	显影液等中含有化学物质，使用丙酮进行管道清洗，作业过程中挥发产生；设备运行过程产生噪声	涂胶显影设备岗、涂胶显影制程岗
	光刻	氟气、氟化氢、异丙醇、丙酮、丁酮、紫外辐射、激光辐射、噪声	光刻胶等中含有化学物质，作业过程中逸散，使用氟氮氛混合气，气体逸散时在空气中可生成氟化氢，使用丙酮进行管道清洗，作业过程中挥发产生；设备运行过程产生紫外辐射、激光辐射、噪声	光刻机设备岗、光刻制程岗
	刻蚀	丙酮、异丙醇、乙二醇、氟及其无机化合物、高频电磁场	刻蚀气体中含有，IPA 进行配件清洗过程挥发产生；设备运行过程产生高频电磁场、噪声	刻蚀设备岗/化学气相沉积设备岗/湿法设备岗
	化学气相沉积	丙酮、异丙醇、氟及其无机化合物	化学物质来源于使用的物料；设备运行过程产生噪声	
	湿法设备	丙酮、丁酮、异丙醇、二甲基亚砜	化学物质来源于使用的物料；设备运行过程产生噪声	
	设备维保	氟气、氟化氢、异丙醇、丙酮、丁酮、乙二醇、氟及其无机化合物、二甲基亚砜、紫外线、激光、高频电磁场、噪声	设备维护保养过程接触到原料挥发产生的化学物质和各种设备产生的物理因素	涂胶显影设备 PM 岗/光刻设备 PM 岗/刻蚀设备 PM 岗/化学气相沉积设备 PM 岗/湿法设备 PM 岗
辅助生产单元	二次配	硫酸、磷酸、盐酸、氢氧化钠、二甲基亚砜、氟及其无机化合物、丁酮、异丙醇、噪声、工频电场	二次配管道连接过程逸散；设备运行过程中产生工频电场、噪声	CM 厂务运行课负责人/二次配岗/电力技术岗/机械技术岗/洁净技术岗/气化技术岗/水务技术岗/二次配技术岗/消防技术岗
	空调系统	噪声	设备运行过程产生	CM 厂务运行课负责人/电力技术岗/机械技术岗/洁净技术岗/气化技术岗/水务技术岗/二次配技术岗/消防技术岗
	暖通系统	二氧化硫、一氧化碳、甲烷、丙烷、噪声	锅炉等暖通设备运行过程产生	CM 厂务运行课负责人/洁净岗/电力技术岗/机械技术岗/洁净技术岗/气化技术岗/水务技术岗/二次配技术岗/消防技术岗
	废气净化处理装置	氢氧化钠、硫酸、氟及其无机化合物、氮氧化物、甲烷、丙烷、噪声	废气净化使用氢氧化钠、硫酸，废气中有氟及其无机化合物、氮氧化物，设备运行过程中产生噪声	CM 厂务运行课负责人/洁净岗/电力技术岗/机械技术岗/洁净技术岗/气化技术岗/水务技术岗/二次配技术岗/消防技术岗
	柴油发电机	柴油、噪声	柴油储罐卸油过程中可能逸散柴油，柴油发电机运行过程中产生噪声	CM 厂务运行课负责人/电力岗/紧急应变岗/紧急应变值班岗/电力技术岗/机械技术岗/洁净技术岗/气化技术岗/水务技术岗/二次配技术岗/消防技术岗
	电力设备	噪声、工频电场	电力设备运行过程产生	CM 厂务运行课负责人/电力岗/电力技术岗/机械技术岗/洁净技术岗/气化技术岗/水务技术岗/二次配技术岗/消防技术岗

评价单元	生产环节	职业病危害因素	产生的原因	接触岗位/工种
辅助生产单元	水务	硫酸、磷酸、盐酸、氢氧化钠、丁酮、异丙醇、二甲基亚砜、氟及其无机化合物、噪声	原料、废水中含有，原料载进时、检测时、维修操作时可能逸散；设备运行过程产生噪声	CM 厂务运行课负责人/水务岗/电力技术岗/机械技术岗/洁净技术岗/气化技术岗/水务技术岗/二次配技术岗/消防技术岗
	气化	硫酸、磷酸、盐酸、氢氧化钠、二甲基亚砜、氟及其无机化合物、丁酮、异丙醇	原料中含有，设备、管道维修、操作过程中逸散	CM 厂务运行课负责人/气化岗/电力技术岗/机械技术岗/洁净技术岗/气化技术岗/水务技术岗/二次配技术岗/消防技术岗
	仓库	氟化氢、氟及其无机化合物、环己酮、丙酮、丁酮、异丙醇、二甲基亚砜	原料、危废中含有	仓库管理岗
	生产辅助	丙酮、异丙醇、噪声	光阻调和使用的化学品中含有丙酮、异丙醇，通风橱正常运行过程中产生噪声	生产岗/生产技术岗/生产班长

2.2 结果与评价

2.2.1 检测结果

严格按照《工作场所空气中有害物质监测的采样规范》[3]等法规规范的要求，对该项目存在的主要职业病危害因素硫酸、丙酮、氮氧化物、丁酮、环己酮、氢氧化钠、异丙醇、乙二醇、氟化氢、氟化物、氯化氢及盐酸、噪声、高频电磁场、紫外辐射进行了检测，检测结果均符合职业接触限值[4-5]的要求。硫酸、丙酮、氮氧化物、丁酮、环己酮、氢氧化钠、异丙醇、乙二醇、氟化氢、氟化物检测结果≤1%OEL，盐酸检测结果≤10%OEL。该项目作业人员接触 8h 加权噪声强度、40h 加权噪声强度<80dB（A）。

2.3 职业病危害防护设施

该项目设置了防毒、防噪等防护设施，并有专人定期进行维护。防护设施设置情况见表 2。

表 2 职业病防护设施一览表

评价单元	生产环节	职业病危害因素	设置的职业病防护设施（类型、种类、位置）
生产单元	涂胶显影	异丙醇、丙酮、丁酮、噪声	洁净室通风净化空调系统、局部抽排风设施、联锁装置措施、屏蔽防护
	光刻	氟气、氟化氢、异丙醇、丙酮、丁酮、紫外辐射、激光辐射、噪声	局部洁净室通风净化空调系统、局部抽排风设施、联锁装置措施、屏蔽防护抽排风设施
	刻蚀	丙酮、异丙醇、乙二醇、高频电磁场	洁净室通风净化空调系统、局部抽排风设施、联锁装置措施、屏蔽防护
	化学气相沉积	丙酮、异丙醇、氟及其无机化合物	洁净室通风净化空调系统、局部抽排风设施
	湿法设备	丙酮、丁酮、异丙醇、二甲基亚砜	洁净室通风净化空调系统、局部抽排风设施
辅助生产单元	二次配	硫酸、磷酸、盐酸、氢氧化钠、二甲基亚砜、氟及其无机化合物、丁酮、异丙醇、噪声、工频电场	防高温设施：室内设通风净化空调系统；防噪设施：采取建筑隔声措施、设备设置消声器、减振措施；防工频电场设施：配电设备设屏蔽设施
	空调系统	噪声	防高温设施：室内设通风净化空调系统；防毒设施：局部排风净化设施；防噪设施：采取建筑隔声措施、设备设置消声器、减振措施
	暖通系统	二氧化硫、一氧化碳、甲烷、丙烷、噪声	防高温设施：室内设通风净化空调系统；防毒设施：全面机械通风系统、局部排风设施；防噪设施：采取建筑隔声措施、设备设置消声器、减振措施；防工频电场设施：配电设备设屏蔽设施

评价单元	生产环节	职业病危害因素	设置的职业病防护设施（类型、种类、位置）
辅助生产单元	废气净化处理装置	氢氧化钠、硫酸、氟及其无机化合物、氮氧化物、噪声	防毒设施：全面机械通风系统、局部排风设施；防噪设施：采取建筑隔声措施、设备设置消声器、减振措施
	柴油发电机	柴油、噪声	室内设通风净化空调系统；建筑隔声、减振措施
	电力设备	噪声、工频电场	变配电设备设屏蔽设施
	水务	硫酸、磷酸、盐酸、氢氧化钠、丁酮、异丙醇、二甲基亚砜、噪声	防毒设施：全面机械通风系统、局部排风设施及净化设施；防噪设施：采取建筑隔声措施、设备设置消声器、减振措施
	气化	硫酸、磷酸、盐酸、氢氧化钠、二甲基亚砜、氟及其无机化合物、丁酮、异丙醇	防毒设施：全面机械通风系统、局部排风设施及净化设施；防噪设施：采取建筑隔声措施、设备设置消声器、减振措施
	仓库	氟及其无机化合物、环己酮、丙酮、丁酮、异丙醇、二甲基亚砜	防毒设施：全面机械通风系统
	生产辅助	丙酮、异丙醇	防毒设施：全面机械通风系统、通风橱

2.4 职业卫生健康监护情况

对可能接触职业病危害的 77 名员工进行了上岗前职业健康检查。所检项目结果显示：未检出上岗前职业健康检查目标疾病—职业禁忌症[6]。建立了职业健康监护档案，并将检查结果告知了劳动者。

2.5 职业卫生管理措施

建设单位设立了职业卫生机构，配备了 1 名专职的职业卫生管理人员，主要负责人和职业卫生管理人员接受了职业卫生培训并取得了合格证书。建设单位建立了一系列职业卫生管理制度及各岗位操作规程，并在生产管理中按照制度执行。建设单位设立了职业卫生应急救援机构，编制了生产安全事故综合应急预案，建设单位组织作业人员开展了 F_2/Kr/Ne 泄漏应急事故、化学品储罐氢氧化钠泄漏应急事故的演练，演练情景中未设置人员中毒、化学品灼伤。建设单位组织作业人员开展了化学品溅入眼睛为事故演练情景的应急演练，演练中人员急救处置办法不当。建设单位未组织作业人员开展职业性酸碱化学品灼伤事故、有限空间检维修作业过程作业不当导致的中毒、窒息事故的应急演练。该项目工作场所设置了监测报警仪、喷淋洗眼器、防护服、空气呼吸器、事故排风装置、医药箱、敌腐特灵洗眼液、应急通讯设备等，应急救援设施，氟化氢报警装置报警值设置不当。该项目职业病危害防治经费投资包括职业病防护设施（防毒、降噪、防暑降温）费用，事故应急救援药品费用，职业病危害警示标识，个人防护用品费用，职业健康检查费用，职业卫生防护教育及培训等。建设单位设置了职业卫生公告栏，公告栏内容设置不全。在各辅助生产区设置了职业病危害警示标识、职业病危害告知卡以及中文警示说明，部分作业场所现场警示标识设置不全，未张贴告知卡。建设单位组织接触职业危害因素岗位的工种进行了上岗前、在岗期间的职业卫生培训，员工经过职业卫生培训并经考试合格后上岗，培训内容包括设备安全培训、化学品安全知识培训、职业卫生知识培训、应急理论知识等。

3 讨论

根据《建设项目职业病危害风险分类管理目录》[7]，该项目属“电子器件制造”类，其职业病危害风险分类为“严重”。结合该项目生产过程中使用到的化学物质的种类和用量和职业病危害检测结果，综合分析认为建设项目为职业病危害风险分类“严重”类项目。

该项目主要职业病危害因素检测结果均符

合职业接触限值的要求。其中硫酸、丙酮、氮氧化物、丁酮、环己酮、氢氧化钠、异丙醇、乙二醇、氟化氢、氟化物检测结果≤1%OEL，盐酸检测结果≤10%OEL。该项目作业人员接触8h 加权噪声强度、40h 加权噪声强度<80dB（A）。由检测结果分析，该项目可有效控制职业病危害因素浓/强度，符合《工业企业设计卫生标准》的要求。

根据《电子工业防尘防毒技术规范》[8] 10.7 的要求，该项目应急预案应定期演练，经常维护、及时更新。建设单位需组织作业人员补充开展急性职业性化学品中毒、职业性化学性皮肤灼伤、有限空间作业导致的急性职业性化学品中毒、缺氧窒息等职业病危害事故的应急演练。工作场所氟化氢报警装置预报值须设为 0.83ppm，报警值须设为 1.66ppm[9]。建设单位应根据作业人员接触职业病危害因素的实际情况，按照《职业健康监护技术规范》的要求，补充完善作业人员上岗前职业健康体检，规范开展作业人员在岗期间的职业健康检查。根据《用人单位职业病危害告知与警示标识管理规范》[10]的相关要求，产生职业病危害的工作场所，建设单位应当在工作场所入口处及产生职业病危害的作业岗位或设备附近的醒目位置设置警示标识。存在或者产生高毒物品的作业岗位，应当按照《高毒物品作业岗位职业病危害告知规范》[11]的规定，在醒目位置设置高毒物品告知卡，告知卡应当载明高毒物品的名称、理化特性、健康危害、防护措施及应急处理等告知内容与警示标识。建设项目在公告栏中公布有关职业病防治的规章制度、岗位具体的职业卫生操作规程、具体的职业病危害事故应急救援措施和工作场所职业病危害因素检测结果。建设单位应依据《职业卫生档案管理规范》[12]相关要求，补充完善职业卫生管理档案内容。正常生产过程中，采取了上述对策措施和建议的情况下，职业病危害控制管理措施能符合《中华人民共和国职业病防治法》、《工业企业设计卫生标准》[13]等要求。

参考文献

[1] 中华人民共和国国务院. 中华人民共和国职业病防治法［S］. 2011.

[2] 中华人民共和国卫生部. GBZ/T 197–2007, 建设项目职业病危害控制效果评价技术导则［S］. 2007。

[3] 中华人民共和国卫生部. GBZ 159–2004, 工作场所空气中有害物质监测的采样规范［S］. 2004

[4] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GBZ2. 1–2019, 工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分：化学有害因素［S］. 2019.

[5] 中华人民共和国卫生部. GBZ2. 2–2007 工作场所有害因素职业接触限值 第 2 部分：物理因素［S］. 2007.

[6] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GBZ 188—2025, 职业健康监护技术规范［S］. 2025.

[7] 国家卫生健康委办公厅, 国卫办职健发〔2021〕5 号, 国家卫生健康委办公厅关于公布建设项目职业病危害风险分类管理目录的通知［S］. 2021

[8] 国家安全生产监督管理总局, AQ 4201–2008, 电子工业防尘防毒技术规范［S］. 2008.

[9] 中华人民共和国卫生部. GBZ/T 223—2009, 工作场所有毒气体检测报警装置设置规范［S］. 2009

[10] 国家安全监管总局办公厅, 安监总厅安健〔2014〕111 号, 国家安全监管总局办公厅关于印发用人单位职业病危害告知与警示标识管理规范的通知［S］. 2014

[11] 中华人民共和国卫生部. GBZ/T 203–2007, 高毒物品作业岗位职业病危害告知规范［S］. 2007.

[12] 国家安全监管总局办公厅, 安监总厅安健〔2013〕171 号, 国家安全监管总局办公厅关于印发职业卫生档案管理规范的通知［S］. 2013.

[13] 中华人民共和国卫生部. GBZ 1–2010, 工业企业设计卫生标准［S］. 2010.

基于 LEC 法与 ICMM 法的铝精深加工企业职业病危害关键岗位识别研究

陈　强，张　丽，熊佳琪，朱灿松，张志勇，肖　登
中钢集团武汉安全环保研究院，武汉　430081

摘　要：铝精深加工环节职业病危害因素复杂，但系统性风险量化评估与关键岗位识别研究仍存在明显缺口。为识别高风险岗位并构建适配行业的分级管控模式，本研究以某年产 60 万吨的铝合金铸造及板带生产企业为对象，采用引入风险控制因子 K 的改进作业条件危险性评价法（LEC 法）与国际采矿与金属委员会（ICMM）定量法，对 25 个核心作业岗位开展职业病危害风险评估。结果显示，噪声为该企业最突出危害因素，岗位超标率达 45.83%；改进 LEC 法识别出 4 个Ⅳ级、8 个Ⅲ级高风险岗位，ICMM 定量法判定 6 个不可容忍风险、4 个非常高风险岗位，两种方法对高风险岗位的识别一致性良好（Kappa=0.782，P<0.01）。本研究揭示了铝精深加工企业职业病危害的核心特征，构建了“LEC-ICMM”的评估模式，可为铝精深加工企业职业病危害精准管控提供可推广的技术依据。

关键词：LEC 法；ICMM 法；铝精深加工；职业病危害；关键岗位

0　引　言

铝冶炼与压延加工是我国重要的基础原材料产业，产品广泛应用于航空航天、交通运输、建筑装饰、电子电器等领域。据中国有色金属工业协会数据显示，2025 年我国铝材产量达到 6750.4 万吨，居全球首位，其中高性能铝合金板带箔等精精深加工产品占比持续提升，行业已进入高质量发展转型阶段。铝精深加工覆盖熔炼、铸造、热轧、冷轧、精整、热处理等生产工序，过程中可产生氧化铝粉尘、铝合金粉尘、氯气、一氧化碳、氮氧化物、氟化氢、噪声、高温及 X 射线等多种职业病危害因素，具有多因素复合暴露、慢性累积效应强、急性中毒风险突出的特点。近年来，国内针对电解铝、氧化铝等前端生产的职业病危害研究已较为成熟，已形成较为有效的职业病防控体系[1-3]，但针对工艺链更长、危害因素更复杂的铝精深加工环节，系统性的风险评估与关键岗位识别研究相对不足，尤其缺乏多方法融合的量化评估[4-5]。

作业条件危险性评价法（Likelihood，Exposure，Consequence，LEC）作为操作简便、结果直观的半定量风险评价方法，已在冶金、化工、矿山等行业的安全与职业健康风险评估中广泛应用[6-10]；国际采矿与金属委员会（International Council on Mining and Metals，ICMM）发布的 2016 版定量风险评估模型[11]，以健康后果为核心驱动，对慢性累积性危害与急性致命风险的识别更为敏锐[12-15]，与 LEC 法具备天然的互补性。目前两种方法的融合应用在铝精深加工行业仍处于空白阶段。

基于此，本研究以某大型铝合金铸造及板带精深加工企业为对象，引入风险控制因子 K 优化传统 LEC 法，结合 ICMM 定量法开展全岗

位风险评估，识别职业病危害关键岗位，验证两种方法的行业适用性，构建分级管控策略，填补铝精深加工企业系统性风险评估的研究空白，为行业职业卫生精细化管理提供技术依据与实践案例。

1 对象与方法

1.1 研究对象

选取某年产 60 万吨某铝合金铸造及板带精深加工企业为研究对象，其生产工艺包括铝合金熔炼——铸造——热轧——冷轧——精整——热处理全链条，岗位设置、自动化水平与危害暴露特征具有行业典型代表性。本次研究纳入该企业熔铸厂、热轧厂、冷轧厂、公辅作业区、检化验中心 5 大生产单元的 25 个核心作业岗位，排除无职业病危害暴露的非生产岗位。

1.2 研究方法

1.2.1 现场职业卫生调查

采用资料查阅、现场踏勘、岗位人员访谈、作业流程写实相结合的方式开展系统调查，内容包括：企业生产工艺流程、原辅材料使用情况、生产设备布局与自动化水平；各岗位作业内容、作业方式、每班有效接触时间、作业频次与暴露规律；职业病防护设施类型、运行与维护情况；个体防护用品配备、发放与佩戴情况；企业职业健康监护档案、职业卫生管理制度等。

1.2.2 职业病危害因素检测

严格按照《工作场所空气中有害物质监测的采样规范》（GBZ 159–2004）、《工作场所空气有毒物质测定》（GBZ/T 160、300 系列）、《工作场所物理因素测量》（GBZ/T 189 系列）等国家标准开展现场检测。

1.2.3 改进的 LEC 法

针对职业健康风险特征与铝精深加工暴露特点，优化传统 LEC 法模型，修正后风险值计算公式为：$D=L\times E\times C\times K$。

式中：D 为岗位职业病危害风险值；L 为职业病危害事件发生的可能性；E 为作业人员暴露于职业病危害环境的频繁程度；C 为职业病危害事件导致健康后果的严重程度；K 为风险控制因子，K 为风险控制因子，用于量化现有职业病防护设施、个体防护用品、职业卫生管理水平对风险的削减/放大效应，结合铝精深加工职业病危害暴露特征、职业接触限值、职业病发病后果，优化制定各参数赋值标准，详见表 1–表 4，风险等级划分与关键岗位判定标准见表 5。基于现场调查结果，该企业整体防护设施运行正常，但高噪声岗位个体防护用品佩戴合规率不足 90%，职业健康监护工作规范开展，本次基准评估 K 值统一取 1.0，后续可根据岗位实际防控水平动态调整。

表 1 职业病危害事故发生可能性（L）赋值标准

分值	事故发生可能性	职业病危害事件发生的可能性
10	完全会被预料到	接触水平持续超标（B>1），或涉及高毒物品（如氯气、一氧化碳）且防护设施存在明显漏洞，曾发生群体性急性职业中毒；长期超标接触已出现多例确诊职业病病例
6	相当可能	接触水平接近限值（0.5<B≤1），或涉及中度以上危害物质，防护设施偶有失效
3	可能，但不经常	接触水平低于限值（B≤0.5），防护设施有效，但偶发意外暴露可能
1	完全意外，很少可能	接触水平远低于限值，防护设施完善，管理规范，仅在极端意外情况下出现暴露
0.5	可以设想，很不可能	理论可能，实际极难发生，仅在设备故障时存在瞬时暴露，无有效防护时极低概率发生健康损伤
0.2	极不可能	无职业接触途径，仅理论上存在风险
0.1	实际上不可能	无职业病危害因素暴露

注：B 为职业病危害因素检测浓度/强度与国家职业接触限值的比值。

表 2　暴露频繁程度（E）赋值标准

分值	暴露于危险环境的频繁程度	作业人员暴露于职业病危害环境的频繁程度
10	连续暴露	每班 8 小时全程持续接触危害因素，无间歇
6	每天工作时间内暴露	每班接触时长 4～8 小时，每日均接触
3	每周一次或偶然暴露	每班接触时长 1～4 小时，每周接触 3～5 次
2	每月暴露一次	每月接触数次，单次接触时长＜1 小时
1	每年几次暴露	年度检修、应急作业时偶然接触，年接触次数＜10 次
0.5	非常罕见地暴露	仅在极端事故、异常情况下暴露，数年一次

表 3　后果严重程度（C）赋值标准

分值	事故造成的后果	职业病危害事件导致健康后果的严重程度
100	十人以上死亡	发生群体性急性重度职业中毒，导致多人死亡或职业性癌症（如苯致白血病）
40	数人死亡	发生急性职业中毒致死（如氯气中毒），或多人确诊不可逆职业病（如铝尘肺）等
15	一个死亡	单人确诊职业病，或不可逆职业健康损伤（职业性慢性中毒、中度听力损伤、化学灼伤等）
7	严重伤残	出现职业禁忌证，或可逆性职业相关健康异常，如刺激性症状、轻度听力损伤
3	有伤残	仅引起健康不适，无永久性器质性伤害
1	轻伤，需救护	无明确健康损伤效应

表 4　风险控制因子（K）赋值标准

K 值取值范围	现场职业卫生管理状况描述
1.1～1.5	防护设施缺失或失效，个体防护用品佩戴合规率＜50%，职业健康监护未开展，管理混乱
0.9～1.0	防护设施部分有效，个体防护用品佩戴合规率 50%～90%，职业健康监护基本开展，管理体系一般
0.5～0.8	防护设施完善且运行良好，个体防护用品佩戴合规率＞90%，职业健康监护完成率 100%，管理体系健全

表 5　职业病危害风险分级与关键岗位判定标准

危险性分值	风险等级	风险程度	关键岗位判定
≥320	Ⅴ级	极度危险，不能继续作业	核心关键岗位
≥160～320	Ⅳ级	高度危险，需要立即整改	高风险关键岗位
≥70～160	Ⅲ级	显著危险，需要整改	中风险关键岗位
≥20～70	Ⅱ级	比较危险，需要注意	低风险岗位
＜20	Ⅰ级	稍有危险，可能接受	低风险岗位

1.2.4　ICMM 定量法

采用 ICMM 2016 版《职业健康风险评估良好实践指南》中的定量评估模型，风险值计算公式为：RR=C×PrE×PeE×U。

式中：RR 为职业健康风险值；C 为健康后果等级（赋值标准见表 6）；PrE 为暴露概率等级（持续超标=10，间歇超标=6，不常见但可能发生=3，仅有发生的可能性、其他地方发生过=1，能想象到但非常不可能=0.5）；PeE 为暴露时间等级（每个班次连续接触 8h=10，每个班次连续接触 2～4h=6，每个班次连续接触 1～2h=3，每月几次=2，1 年几次=1，每年 1 次

=0.5）；U 为危害风险和接触评估的不确定性系数（非常不确定=3，不确定=2，确定=1）。本次评估以岗位风险最高的职业病危害因素为基准进行赋值计算，避免多因素叠加导致的评估偏差；鉴于现场检测数据符合国家标准规范、暴露参数通过现场写实获得，数据真实可靠，不确定性系数 U 统一取 1.0。风险等级划分与管控要求见表 7。

表 6　健康后果等级数值

职业健康危害后果	数值
1 人或多人死亡（永久性不良健康影响，生活质量和（或）寿命的显著下降。可能导致永久性或长期功能障碍性疾病）	100
重大残疾（永久性不良健康影响，但不会显著影响生命质量和寿命。可能导致轻度功能受限或残疾。）	50
严重疾病且缺勤超过 14d（不危及生命的可逆健康影响）	15
重大疾病且缺勤超过 7d 但少于 14d	7
小病且缺勤 7d 或更少（不太可能对健康造成影响）	1

表 7　风险等级计算及相应的对策

风险值	风险分类	措施
≥400	不可容忍的风险	要求立即停止或关闭
200－399	非常高的风险	要求立即采取措施并制定永久解决措施
70－199	高风险	要求尽快采取措施
20－69	潜在的风险	要求采取措施或进行监测
<20	可容忍的风险	要求进行监测

1.2.5　结果一致性分析

采用 SPSS 26.0 软件进行数据分析，汇总两种方法的岗位风险评估结果，采用 Kappa 检验分析一致性。检验水准 α=0.05，Kappa 值≥0.75 为一致性较好，0.4～0.75 为一致性中等，<0.4 为一致性较差。

2　结　果

2.1　职业病危害因素检测结果

现场检测结果显示，噪声岗位超标率达 45.83%，为最突出的职业病危害因素；粉尘、化学因素、工频电场、X 射线检测结果均符合国家职业接触限值要求；高温为非最热月检测，结果仅作参考。各岗位危害因素接触情况、检测结果与防护情况详见表 8。

2.2　两种方法评估结果

以各岗位风险最高的危害因素为基准，分别采用两种方法开展独立评估，结果见表 9。改进 LEC 法评估结果显示：无Ⅴ级风险岗位，Ⅳ级（高度危险）岗位 4 个，Ⅲ级（显著危险）岗位 8 个，Ⅱ级岗位 9 个，Ⅰ级岗位 4 个。ICMM 定量法评估结果显示：不可容忍风险岗位 6 个，非常高风险岗位 4 个，高风险岗位 6 个，潜在风险岗位 5 个，可容忍风险岗位 4 个。两种方法风险等级分布对比见表 10。

2.3　两种方法评估结果的一致性分析

风险等级整体 Kappa 值为 0.621（P<0.05），呈中等一致性；高风险岗位（LEC 法Ⅲ级及以上、ICMM 法高风险及以上）Kappa 值为 0.782（P<0.01），一致性较好。两种方法对高风险核心岗位的识别高度重合，均将熔炼工、渣处理工、双室炉操作工、气垫炉操作工列为最高风险等级。

表 8　铝精深加工职业病危害及防护情况

岗位/工种	主要职业病危害因素	健康后果	暴露时间	检测结果	职业接触限值	职业病防护设施	个体防护用品	接触人数	职业健康检查
原料操作工	铝合金粉尘 噪声	铝尘肺 职业性噪声聋	6h/班	<0.4mg/m^3 83.3dB（A）	3mg/m^3 85dB（A）	—	3M9501V 防尘口罩、3M318-1005 防噪耳塞	24	无职业病、禁忌证、异常情况
熔炼工	氧化铝粉尘 氯气 一氧化碳 氮氧化物 氯化氢 高温 噪声	铝尘肺 职业性急性氯气中毒 职业性一氧化碳中毒 慢性阻塞性肺疾病等 牙酸蚀病、支气管哮喘等 职业性中暑 职业性噪声聋	5h/班	0.6mg/m^3 0.3mg/m^3 0.4mg/m^3 0.03mg/m^3 7.27mg/m^3 7.7℃ 84.9dB（A）	4mg/m^3 1mg/m^3 20mg/m^3 5mg/m^3 7.5mg/m^3 32℃ 85dB（A）	布袋除尘、送风、隔声、减振	3M9501V 防尘口罩、3M318-1005 防噪耳塞	52	无职业病、禁忌证、异常情况
铸造操作工	氧化铝粉尘 一氧化碳 氮氧化物 高温 噪声	铝尘肺 职业性一氧化碳中毒 慢性阻塞性肺疾病等 职业性中暑 职业性噪声聋	6h/班	0.4mg/m^3 0.1mg/m^3 0.01mg/m^3 12.1℃ 84.8dB（A）	4mg/m^3 20mg/m^3 5mg/m^3 33℃ 85dB（A）	布袋除尘、送风、隔声、减振	3M9501V 防尘口罩、3M318-1005 防噪耳塞	56	无职业病、禁忌证、异常情况
锯铣工	铝合金粉尘 噪声	铝尘肺 职业性噪声聋	8h/班	<0.4mg/m^3 84.3dB（A）	3mg/m^3 85dB（A）	收尘、降噪	3M9501V 防尘口罩、3M318-1005 防噪耳塞	20	无职业病、禁忌证、异常情况
氯气站点检员	氯气	职业性急性氯气中毒	1h/班	0.04mg/m^3	1mg/m^3	防爆型边墙风机	康宝仕 6280 半面罩	16	无职业病、禁忌证、异常情况
渣处理工	氧化铝粉尘 一氧化碳 氮氧化物 高温 噪声	铝尘肺 职业性一氧化碳中毒 慢性阻塞性肺疾病等 职业性中暑 职业性噪声聋	6h/班	<0.4mg/m^3 0.1mg/m^3 0.02mg/m^3 11.3℃ 80.5dB（A）	4mg/m^3 20mg/m^3 5mg/m^3 32℃ 85dB（A）	布袋除尘、送风、隔声、减振	3M9501V 防尘口罩、3M318-1005 防噪耳塞	8	无职业病、禁忌证、异常情况
双室炉操作工	氧化铝粉尘 一氧化碳 氮氧化物 高温 噪声	铝尘肺 职业性一氧化碳中毒 慢性阻塞性肺疾病等 职业性中暑 职业性噪声聋	5h/班	<0.4mg/m^3 0.4mg/m^3 0.04mg/m^3 12.7℃ 81.2dB（A）	4mg/m^3 20mg/m^3 5mg/m^3 31℃ 85dB（A）	布袋除尘、送风、隔声、减振	3M9501V 防尘口罩、3M318-1005 防噪耳塞、康宝仕 6280 半面罩	9	无职业病、禁忌证、异常情况
热轧轧机操作工	噪声 X 射线 铝合金粉尘	职业性噪声聋 职业性放射性疾病 铝尘肺	4h/班	86.9dB（A） 0.39mSv <0.4mg/m^3	85dB（A） 5mSv 3mg/m^3	减振、隔声、消声器	3M9501V+防尘口罩、3M 340-4004 防噪耳塞	68	无职业病、禁忌证、异常情况
热轧设备点检员	噪声 铝合金粉尘	职业性噪声聋 铝尘肺	4h/班	93.3dB（A） <0.4mg/m^3	85dB（A） 3mg/m^3	减振、隔声、消声器	3M9501V+防尘口罩、3M 340-4004 防噪耳塞	30	无职业病、禁忌证、异常情况
加热炉操作工	一氧化碳 氮氧化物 高温 噪声	职业性一氧化碳中毒 慢性阻塞性肺疾病等 职业性中暑 职业性噪声聋	10h/班	0.6mg/m^3 0.10mg/m^3 8.6℃ 88.7dB（A）	20mg/m^3 5mg/m^3 31℃ 85dB（A）	低噪声轴流通风机	3M9501V+防尘口罩、3M 340-4004 防噪耳塞	8	无职业病、禁忌证、异常情况
行车工	噪声 铝合金粉尘	职业性噪声聋 铝尘肺	10h/班	91.3dB（A） <0.4mg/m^3	85dB（A） 3mg/m^3	—	3M9501V+防尘口罩、3M 340-4004 防噪耳塞	24	无职业病、禁忌证、异常情况
热轧轧辊操作工	噪声	职业性噪声聋	4h/班	92.2dB（A）	85dB（A）	减振、隔声、消声器	中体倍力 9500 防尘口罩、3M1110 防噪耳塞	10	无职业病、禁忌证、异常情况
热轧精整操作工	噪声 铝合金粉尘 高温	职业性噪声聋 铝尘肺 职业性中暑	8h/班	85.6dB（A） <0.4mg/m^3 6.1℃	85dB（A） 3mg/m^3 31℃	减振、隔声、消声器	3M9501V+防尘口罩、3M 340-4004 防噪耳塞	19	无职业病、禁忌证、异常情况
热轧包装工	噪声 其他粉尘	职业性噪声聋 尘肺	6h/班	95.5dB（A） <0.4mg/m^3	85dB（A） 8mg/m^3	—	中体倍力 9500 防尘口罩、3M1110 防噪耳塞	60	无职业病、禁忌证、异常情况
冷轧轧机操作工	噪声 X 射线 二氧化碳	职业性噪声聋 职业性放射性疾病 中毒窒息	6h/班	88.7dB（A） 0.44mSv 99.9mg/m^3	85dB（A） 5mSv 9000mg/m^3	—	3M9501V+防尘口罩、3M 340-4004 防噪耳塞	49	无职业病、禁忌证、异常情况
高架库操作工	噪声	职业性噪声聋	10h/班	92.0dB（A）	85dB（A）	减振、隔声、消声器	中体倍力 9500 防尘口罩、3M1110 防噪耳塞	12	无职业病、禁忌证、异常情况
气垫炉	噪声	职业性噪声聋	4h/班	81.7dB（A）	85dB（A）	抽排风设施	3M9501V+防尘口罩、	27	无职业病、禁忌

岗位/工种	主要职业病危害因素	健康后果	暴露时间	检测结果	职业接触限值	职业病防护设施	个体防护用品	接触人数	职业健康检查
点检员	铝合金粉尘	铝尘肺		<0.4mg/m^3	3mg/m^3		3M 340-4004 防噪耳塞		证、异常情况
退火炉操作工	一氧化碳 氮氧化物 高温 噪声	职业性一氧化碳中毒 慢性阻塞性肺疾病等 职业性中暑 职业性噪声聋	4h/班	0.1mg/m^3 0.02mg/m^3 8.1℃ 82.0dB（A）	20mg/m^3 5mg/m^3 33℃ 85dB（A）	抽排风设施	3M 340-4004 防噪耳塞	36	无职业病、禁忌证、异常情况
气垫炉操作工	氟化氢 一氧化碳 氮氧化物 高温 噪声 铝合金粉尘	工业性氟病 职业性一氧化碳中毒 慢性阻塞性肺疾病等 职业性中暑 职业性噪声聋 铝尘肺	8h/班	<0.01mg/m^3 0.1mg/m^3 0.02mg/m^3 10.6℃ 82.9dB（A） <0.4mg/m^3	2mg/m^3 20mg/m^3 5mg/m^3 34℃ 85dB（A） 3mg/m^3	抽排风设施	3M9501V+防尘口罩、3M 340-4004 防噪耳塞	36	无职业病、禁忌证、异常情况
冷轧精整操作工	噪声 铝合金粉尘	职业性噪声聋 铝尘肺	4h/班	88.8dB（A） <0.4mg/m^3	85dB（A） 3mg/m^3	减振、隔声、消声器	3M9501V+防尘口罩、3M 340-4004 防噪耳塞	92	无职业病、禁忌证、异常情况
冷轧包装操作工	噪声 其他粉尘	职业性噪声聋 铝尘肺	4h/班	90.6dB（A） <0.4mg/m^3	85dB（A） 8mg/m^3	减振、隔声、消声器	中体倍力 9500 防尘口罩、3M1110 防噪耳塞	48	无职业病、禁忌证、异常情况
理化检验员	盐酸 硫酸 噪声	牙酸蚀病、支气管哮喘、 职业性化学性眼皮肤灼伤 职业性噪声聋	4h/班	3.16mg/m^3 <0.1mg/m^3 78.5dB（A）	7.5mg/m^3 1mg/m^3 85dB（A）	通风橱、排气扇	活性炭口罩	34	无职业病、禁忌证、异常情况
水处理工	硫化氢 氨 盐酸 硫酸 其他粉尘 噪声	职业性急性硫化氢中毒 慢性阻塞性肺疾病 牙酸蚀病、支气管哮喘、 职业性化学性眼皮肤灼伤 尘肺 职业性噪声聋	6h/班	<0.5mg/m^3 <0.08mg/m^3 3.54mg/m^3 <0.01mg/m^3 <0.4mg/m^3 76.7dB（A）	2mg/m^3 20mg/m^3 7.5mg/m^3 1mg/m^3 8mg/m^3 85dB（A）	屋顶风机	3M9501V+防尘口罩、3M 340-4004 防噪耳塞	21	无职业病、禁忌证、异常情况
电工	工频电场 噪声	神经等系统影响 职业性噪声聋	4h/班	0.047kV/m 83.2dB（A）	5kV/m 85dB（A）	—	—	8	无职业病、禁忌证、异常情况
检维修工	电焊烟尘 锰及其化合物 紫外辐射 噪声	电焊工尘肺 职业性慢性锰中毒 电光性皮炎、白内障 职业性噪声聋	时间不定	<4mg/m^3 0.15mg/m^3 0.01μW/cm^2 —	4mg/m^3 0.15mg/m^3 0.13μW/cm^2 85dB（A）	—	中体倍力 9500 防尘口罩、3M1110 防噪耳塞、康宝仕 6280 半面罩	91	无职业病、禁忌证、异常情况

表 9　各岗位职业健康风险评估结果

岗位/工种	主要职业病危害因素	LEC 法					ICMM 定量法					
		L	E	C	D	风险等级	C	PrE	PeE	U	R	风险等级
原料操作工	铝合金粉尘、噪声	3	6	3	54	II 级	1	3	10	1	30	潜在风险
熔炼工	氧化铝粉尘、氯气、一氧化碳、氮氧化物、氯化氢、高温、噪声	3	6	15	270	Ⅳ级	50	3	10	1	1500	不可容忍
铸造操作工	氧化铝粉尘、一氧化碳、氮氧化物、高温、噪声	1	6	7	42	II 级	1	3	10	1	30	潜在风险
锯铣工	铝合金粉尘、噪声	1	6	3	18	I 级	1	3	10	1	30	潜在风险
氯气站点检员	氯气	1	2	40	80	III 级	15	3	2	1	90	高风险
渣处理工	氧化铝粉尘、一氧化碳、氮氧化物、高温、噪声	3	6	15	270	Ⅳ级	15	3	10	1	450	不可容忍
双室炉操作工	氧化铝粉尘、一氧化碳、氮氧化物、高温、噪声	3	6	15	270	Ⅳ级	15	3	10	1	450	不可容忍
热轧轧机操作工	噪声、X 射线、铝合金粉尘	3	3	7	63	II 级	15	3	6	1	270	非常高风险
热轧设备点检员	噪声、铝合金粉尘	3	3	7	63	II 级	1	10	6	1	60	潜在风险
加热炉操作工	一氧化碳、氮氧化物、高温、噪声	1	6	15	90	III 级	15	3	10	1	450	不可容忍
行车工	噪声、铝合金粉尘	3	6	7	126	III 级	1	10	10	1	100	高风险

岗位/工种	主要职业病危害因素	LEC 法					ICMM 定量法					
		L	E	C	D	风险等级	C	PrE	PeE	U	R	风险等级
热轧轧辊操作工	噪声	3	3	7	63	II 级	7	10	6	1	420	不可容忍
热轧精整操作工	噪声、铝合金粉尘、高温	3	6	7	126	III 级	1	10	10	1	100	高风险
热轧包装工	噪声、其他粉尘	1	6	3	18	III 级	7	3	10	1	210	非常高风险
冷轧轧机操作工	噪声、X 射线、二氧化碳	3	6	7	126	III 级	1	10	10	1	100	高风险
高架库操作工	噪声	3	6	7	126	III 级	1	10	10	1	100	高风险
气垫炉点检员	噪声、铝合金粉尘	1	3	7	21	II 级	1	3	6	1	18	可容忍
退火炉操作工	一氧化碳、氮氧化物、高温、噪声	3	3	15	90	III 级	15	3	6	1	270	非常高风险
气垫炉操作工	氟化氢、一氧化碳、氮氧化物、高温、噪声、铝合金粉尘	3	6	15	270	Ⅳ级	15	3	10	1	450	不可容忍
冷轧精整操作工	噪声、铝合金粉尘	3	3	7	63	II 级	7	6	6	1	252	非常高风险
冷轧包装操作工	噪声、其他粉尘	3	3	7	63	II 级	7	3	6	1	126	高风险
理化检验员	盐酸、硫酸、噪声	1	3	7	9	I 级	1	3	6	1	18	可容忍
水处理工	硫化氢、氨、盐酸、硫酸、其他粉尘、噪声	1	6	7	42	II 级	1	3	10	1	30	潜在风险
电工	工频电场、噪声	1	3	3	9	I 级	1	3	6	1	18	可容忍
检维修工	电焊烟尘、锰及其化合物、紫外辐射、噪声	1	3	7	21	I 级	1	3	6	1	18	可容忍

表 10　两种评估方法岗位风险等级分布对比

风险等级	LEC 法	ICMM 定量法
Ⅴ级/不可容忍风险	0	6
Ⅳ级/非常高风险	4	4
Ⅲ级/高风险	8	6
Ⅱ级/潜在风险	9	5
Ⅰ级/可容忍风险	4	4

3　讨论

本研究采用改进 LEC 法与 ICMM 定量法对铝精深加工企业 25 个岗位开展职业病危害风险评估，结果显示两种方法对高风险岗位识别一致性良好（Kappa=0.782，P<0.01），验证了双方法联用在铝精深加工行业的适用性与互补性。改进 LEC 法通过引入风险控制因子 K，可量化现有防护措施对风险的削减作用，操作简便，适合企业全岗位风险快速筛查；ICMM 法以健康后果为核心，对急性中毒、职业性噪声聋等慢性不可逆损伤的识别灵敏度更高，评估更为严格。二者互补可为制造业职业健康风险评估提供方法学参考。

本次调查显示，企业噪声岗位超标率达 45.83%，为最突出的危害因素，结合评估结果，本研究明确了铝精深加工行业危害的三大核心特征：一是熔铸、热处理等岗位存在高毒化学物、粉尘、高温、噪声复合暴露，健康风险叠加效应明显；二是噪声危害贯穿熔铸、热轧、冷轧、精整、包装全生产流程，长时间高声级暴露使其成为行业首要物理性危害；三是氯气站点检员等高毒岗位暴露时间短但健康后果极重，呈现“低频高险”特征，需重点强化应急管理与密闭通风措施。上述结果与已有铝行业研究相互印证，进一步完善了精深加工环节的危害特征认知，填补了上游冶炼研究与下游深加工研究之间的缺口。

基于两种方法的互补性与行业危害分布特点，本研究构建的“LEC 快速筛查–ICMM 深度量化”双阶递进评估模式，可实现岗位风险的

分级精准管控，有助于企业将有限的职业卫生资源向高风险关键岗位精准投放，契合我国职业病危害分级管控的政策导向，具备较强的现场推广价值。

本研究存在一定局限性：仅选取单家大型铝精深加工企业开展研究，模型普适性有待多中心数据验证；以单因素最高风险开展评估，未量化多因素复合暴露的协同健康效应；高温检测为非最热月开展，数据代表性不足；风险控制因子 K 的赋值标准有待行业大样本数据校准。未来应开展覆盖不同规模、不同工艺类型企业的研究，建立行业统一的评估标准；构建多因素复合暴露风险模型，提升评估准确性；完善全年周期性检测，形成更全面的风险判定依据；开发智慧化风险评估工具，推动铝精深加工行业职业卫生管理向精细化、数字化转型。

参考文献

［1］ 邢聪, 赵敬生. 2012—2015 年某大型电解铝厂职业危害情况调查分析与预防对策探讨［J］. 预防医学情报杂志, 2018. 34（3）：390–393.

［2］ 孙守锋　赵国坡　李航, 等. 某 30 万 t 氧化铝厂职业病危害分析与评价［J］. 现代职业安全, 2021.

［3］ 汤瑛, 林文敏, 潘绥. 某铝重铸企业职业病危害因素识别及关键控制点分析［J］. 海峡预防医学杂志, 2019, 25（6）：48–51.

［4］ 林伟涛, 余新天, 代浩, 等. 深圳市某铝材生产企业职业病危害现状评价［J］. 职业与健康, 2017, 33（3）：294–297.

［5］ 朱巧娥. 某铝镁合金厂建设项目职业病危害控制效果评价［J］. 中国卫生工程学, 2015. 14（5）：424–427.

［6］ 王忠旭, 李涛. 职业卫生风险评估方法研究进展［J］. 中国职业医学, 2018, 45（3）：367–371.

［7］ 汤小鸥, 邹亚玲, 陆利通. LEC 评价法在碳粉生产企业职业健康风险评估中的应用［J］. 中国公共卫生管理, 2016, 32（5）：652–654.

［8］ 邱劲松, 金若刚, 李继猛, 等. 不同职业健康风险评估法在某铝粉生产企业的应用比较［J］. 工业卫生与职业病, 2022, 48（4）：310–313.

［9］ 顾明华, 徐晓雯, 章敏华, 等. 应用 3 种职业健康风险评估模型评估氧化铝粉尘岗位的健康风险［J］. 环境与职业医学, 2021, 38（1）：64–69.

［10］ 梁志明, 符发雄, 黎丽春, 等. 多种风险评估方法在铝尘作业岗位职业健康风险评估中的应用比较［J］. 中国职业医学, 2018, 45（6）：766–769.

［11］ International Council on Mining and Metals. Good practice guidance on occupational health risk assessment［R］. 2016. https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/health-and-safety/2016/guidance_health-risk-assessment-2016.pdf

［12］ 顾明华, 徐晓雯, 章敏华, 等. 2016 版 ICMM 健康风险评估模型的应用研究［J］. 中国卫生工程学, 2023, 22（2）：145–149.

［13］ 苗超, 叶虹, 胡向前. ICMM 评估方法在某铸造企业职业健康风险评估中的应用［J］. 工业卫生与职业病, 2020, 46（2）：129–134.

［14］ 卢建国, 唐杰彬, 邓小懂, 等. 基于两种 ICMM 风险评估模型研究某蓄电池生产企业职业健康风险［J］. 职业卫生与应急救援, 2020, 38（5）：482–486.

［15］ 刘静, 李梅莉, 杨雪莹, 等. ICMM 职业健康风险评估模型在某焦化厂职业病危害评价中的应用［J］. 中国工业医学杂志, 2019, 32（2）：151–153.

职业危害共暴露复杂度与职业健康管理需求关联研究

王均云，吴丽娜，王泽辉，王小春，丁春光
国家卫生健康委职业安全卫生研究中心，北京　102308

目　的：探索利用多年度职业健康监护数据构建可解释的职业危害共暴露复杂度指标，并评价其与进一步职业健康管理需求的关联，为多危害岗位分层监测和精准管理提供依据。方法：纳入某机构 2019—2025 年职业健康体检记录，对危害因素自由文本进行标准化清洗，构建噪声、粉尘、化学有害因素及其他物理因素 4 类互斥变量，按类别数量 K 划分单一至四类暴露，并构建共暴露复杂度指数（CCEI）。采用多因素 Logistic 回归和研究对象聚类稳健标准误；排除单纯补充检查后开展严格结局敏感性分析。结果：纳入 111 366 条记录。单一、双重、三重和四类暴露组进一步管理需求率分别为 6.64%、8.37%、10.60%和 11.27%；调整 OR 值分别为 1.000、1.514、2.048 和 2.348（趋势 P<0.001）。CCEI 每增加 10 分，OR 值为 1.119（95%CI：1.108～1.130）。严格结局分析方向一致，双重、三重和四类暴露的调整 OR 值分别为 1.503、1.857 和 2.323。结论：职业危害类别数量和共暴露复杂度与进一步管理需求稳定相关，可辅助分层监测、复查随访和资源配置，但不能替代现场暴露检测与专业判断。

关键词：职业暴露；多重暴露；职业健康监护；分层管理；健康管理

壹、前　言

劳动者在真实工作场景中常同时接触粉尘、化学物、噪声、高温或振动等多种职业病危害因素。单一因素分析难以完整反映多种应激因素的共同负担，累积风险评估因此主张将化学与非化学因素纳入统一框架（Niemeier et al., 2020；Fox et al., 2021）。近年来的综述也指出，多重职业暴露研究仍多集中于少数特定组合，缺少可复现、可直接嵌入常规监护数据的指标体系（Barbey et al., 2024）。环境混合暴露研究虽已形成分位数 g 计算等统计方法（Yu et al., 2022；Keil et al., 2020），但此类方法通常需要较完整的连续暴露数据。

我国职业健康检查机构积累了大量跨行业、跨年度监护资料，但危害因素多以自由文本记录，且常缺少岗位浓度、每日接触时间及防护措施等精细信息，导致多危害共暴露难以被标准化识别和用于管理分层。直接将“是否接触某类危害”解释为真实剂量并不科学。依据职业健康监护重在早期发现健康损害、识别重点人群和实施干预的定位（国家卫生健康委员会，2025），本研究探索利用多年度职业健康监护数据构建可解释的职业危害共暴露复杂度指标，并评价其与进一步职业健康管理需求之间的关联，为多危害岗位的分层监测与精准管理提供依据。

贰、对象与方法

一、研究对象

采用回顾性研究设计。原始数据库包含 2019—2025 年 115 923 条职业健康体检记录，排

除体检日期缺失或异常 1 条。对 115 922 条记录进行危害因素结构化，主分析纳入至少识别出 1 类职业病危害因素的 111 366 条记录。4 556 条 K=0 记录主要为驾驶、高处、电工等特殊作业或无法进一步分类的记录，仅用于流程描述，不作为无暴露对照。描述性分析保留全部合格体检人次；多因素模型采用完整病例，并通过研究对象 ID 处理重复体检的相关性。

二、危害因素标准化与共暴露指标

（一）危害因素标准化

统一全角/半角字符、空格和标点，采用括号层级感知算法，仅在括号外按逗号、顿号和分号拆分多危害字段，避免将“苯（接触工业甲苯，二甲苯参照执行）”等规范描述错误拆分。依据《职业病危害因素分类目录》和职业卫生标准（国家卫生计生委等，2015；国家卫生和计划生育委员会，2017），将 104 个原始危害词条映射为噪声、粉尘、化学有害因素和其他物理因素 4 个互斥主类；其他物理因素明确不含噪声。氢氧化钠归为腐蚀性无机碱，二甲基甲酰胺归为酰胺类有机溶剂。兼具粉尘和金属毒性属性的词条在计算 K 时按粉尘计 1 次，同时保留金属毒性次级标签；特殊作业单独标记，不计入 K。

（二）共暴露指标

对第 i 条记录，分别设置噪声、粉尘、化学有害因素和除噪声外其他物理因素的二分类指标，并将危害类别数量定义为：

$$K_i = N_i + D_i + C_i + P_i$$

式中，N、D、C 和 P 分别表示噪声、粉尘、化学有害因素和其他物理因素暴露，存在该类暴露时取 1，否则取 0。K=1、2、3、4 分别定义为单一、双重、三重和四类暴露，并生成 15 种具体暴露组合。

为同时表征暴露类别广度和具体危害因素多样性，构建共暴露复杂度指数（co-exposure complexity index，CCEI）：

$$\mathrm{CCEI}_i = 50\left[\frac{K_i}{4} + \frac{\min(A_i, A_{95})}{A_{95}}\right], \quad A_{95} = 6$$

式中，A_i 为第 i 条记录在上述 4 类范围内经标准化、去重后的不同危害因素数量；A_95 为 A 的第 95 百分位数，本研究取 6。CCEI 范围为 0～100 分，数值越高表示共暴露类别更广且具体危害因素更多。作为敏感性分析，使用接触有害工龄构建时间权重 D_i：

$$D_i = \frac{\ln[1 + \min(T_i, T_{95})]}{\ln(1 + T_{95})}, \quad T_{95} = 20$$

式中，T_i 为接触有害工龄，T_95 为其第 95 百分位数，本研究取 20 年。在此基础上构建工龄修正共暴露负荷代理指标（CEBI-D）：

$$\mathrm{CEBI\text{-}D}_i = \mathrm{CCEI}_i \times D_i$$

上述指标仅反映共暴露复杂度及其时间累积特征，不解释为实际接触剂量、危害商或定量职业健康风险。

三、结局定义

主要结局“需进一步职业健康管理”定义为职业健康检查结论中出现复查、补充检查、职业禁忌证或疑似职业病任一情形；数据库历史字段“补检”统一映射为补充检查。严格结局定义为复查、职业禁忌证或疑似职业病，排除仅需补充检查的记录。次要结局为其他疾病或异常。由于研究期跨越不同版本职业健康监护规范，上述结局用于反映历史数据库中的管理需求，不等同于单一疾病终点。

四、统计学分析

采用均数 ± 标准差或中位数（P25，P75）描述连续变量，分类变量以例数和构成比表示；组间比较采用 Kruskal-Wallis 检验或 χ^2 检验。以 K=1 为参照建立多因素 Logistic 回归模型，调整年龄、性别、接触有害工龄、体检类型和体检年份，采用研究对象聚类稳健标准误，并将 K 作为有序变量检验趋势。具体组合模型以单纯噪声暴露为参照。CCEI 和 CEBI-D 按每增加 10 分估计 OR 值及 95%CI；采用 4 自

由度自然立方样条评价 CCEI 与主要结局的非线性关联，以 CCEI 中位数 41.67 分为参照。排除单纯补充检查后重复主模型和 CCEI 分析，评价结果稳健性。所有检验均为双侧检验，$P<0.05$ 为差异有统计学意义。

五、伦理学

本研究使用既往脱敏职业健康监护资料。正式提交前请补充："本研究经单位伦理委员会批准（批件号：2025-R-08），因使用去标识化既往资料，免除研究对象知情同意。"

叁、结果

一、基本特征

111 366 条记录中，男性 88 008 条（79.0%），平均年龄为（37.7 ± 10.7）岁，接触有害工龄中位数为 4.0（1.0，10.0）年，在岗期间体检占 74.4%。单一、双重、三重和四类暴露分别为 60 413、31 188、8 707 和 11 058 条，占 54.2%、28.0%、7.8%和 9.9%。主要结局共 8 788 例（7.9%），各 K 组发生率依次为 6.64%、8.37%、10.60%和 11.27%（表 1）。

表 1　不同职业危害类别数量体检记录的基本特征

变量	总体（n=111 366）	K=1（n=60 413）	K=2（n=31 188）	K=3（n=8 707）	K=4（n=11 058）	*P*值
年龄（岁），均数 ± 标准差	37.7 ± 10.7	38.3 ± 11.3	36.9 ± 9.8	38.6 ± 9.5	36.2 ± 9.6	<0.001
男性，n（%）	88 008（79.0）	43 599（72.2）	26 033（83.5）	8 256（94.8）	10 120（91.5）	<0.001
女性，n（%）	23 358（21.0）	16 814（27.8）	5 155（16.5）	451（5.2）	938（8.5）	
接害工龄（年），M（P25，P75）	4.0（1.0，10.0）	5.0（1.0，10.0）	3.0（1.0，8.0）	5.0（1.0，11.0）	4.0（1.0，11.0）	<0.001
上岗前体检，n（%）	19 028（17.1）	10 089（16.7）	5 609（18.0）	1 289（14.8）	2 041（18.5）	<0.001
在岗期间体检，n（%）	82 851（74.4）	43 614（72.2）	23 599（75.7）	6 946（79.8）	8 692（78.6）	
离岗时体检，n（%）	7 927（7.1）	5 151（8.5）	1 980（6.3）	471（5.4）	325（2.9）	
离岗后检查，n（%）	1 560（1.4）	1 559（2.6）	0	1（0.0）	0	
CCEI（分），M（P25，P75）	41.7（20.8，50.0）	20.8（20.8，20.8）	41.7（41.7，41.7）	79.2（62.5，79.2）	100.0（100.0，100.0）	<0.001
进一步管理需求，n（%）	8 788（7.9）	4 010（6.6）	2 609（8.4）	923（10.6）	1 246（11.3）	<0.001

注：K 为噪声、粉尘、化学有害因素及除噪声外其他物理因素的类别数量；CCEI 为共暴露复杂度指数。连续变量组间比较采用 Kruskal-Wallis 检验，分类变量采用 χ^2 检验；分析单位为职业健康体检记录，同一劳动者可贡献多次记录。

二、危害类别数量与管理风险

完整病例模型纳入 111 217 条记录、55 796 名劳动者和 8 752 例主要结局。与单一暴露相比，双重、三重和四类暴露的调整 OR 值分别为 1.514（95%CI：1.425 ~ 1.609）、2.048（95%CI：1.871 ~ 2.241）和 2.348（95%CI：2.163 ~ 2.549），随 K 增加呈稳定上升趋势（*P* 趋势<0.001，图 1）。

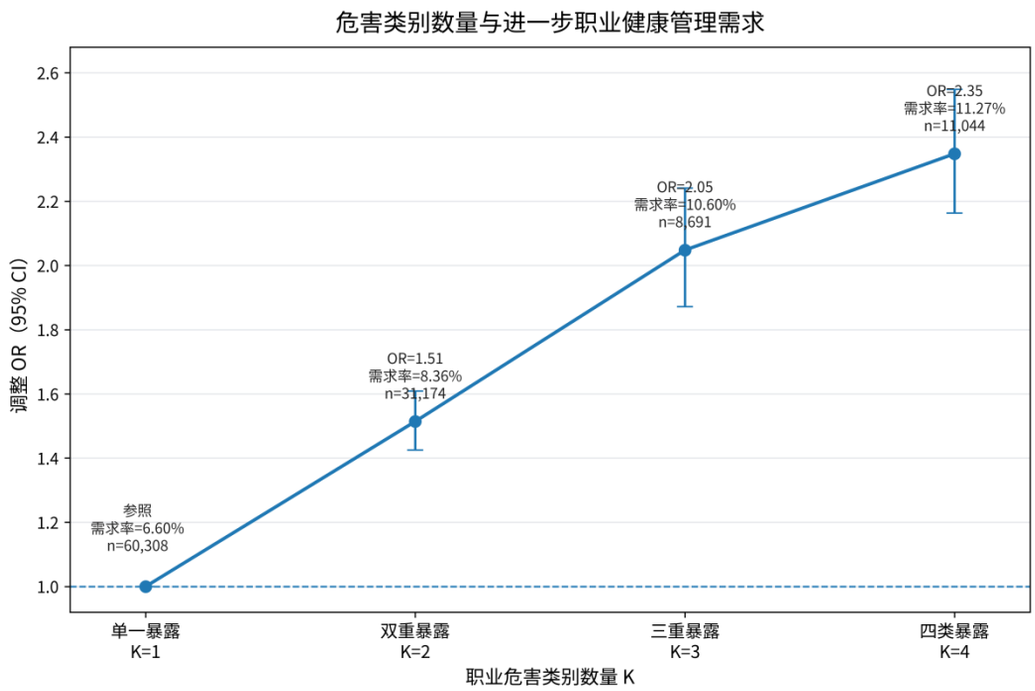


图 1　危害类别数量与进一步职业健康管理需求的关联

注：点表示调整 OR 值，误差线表示 95%CI，虚线表示 OR=1；模型调整年龄、性别、接触有害工龄、体检类型和体检年份，并采用研究对象聚类稳健标准误；K=1 为参照。图中百分数为相应 K 组进一步职业健康管理需求率。

三、具体暴露组合

具体组合模型以单纯噪声暴露为参照。单一粉尘、单一化学有害因素和单一其他物理因素的调整 OR 值分别为 1.292、1.261 和 3.391。双重暴露中，噪声+粉尘和噪声+化学有害因素的调整 OR 值分别为 1.651 和 1.506；含其他物理因素的部分组合估计值较高。不同组合间存在明显异质性，但受危害类型构成、行业岗位及体检项目配置影响，不宜据此进行毒性强弱排序（表 2）。

表 2　不同职业危害暴露组合与进一步职业健康管理需求的关联

暴露组合	K	记录数	管理需求率（%）	调整 OR（95%CI）
噪声	1	26 986	4.69	1.000（参照）
粉尘	1	10 111	13.23	1.292（1.156 ~ 1.443）
化学有害因素	1	21 819	5.39	1.261（1.146 ~ 1.388）
其他物理因素	1	1 392	14.44	3.391（2.758 ~ 4.168）
噪声+粉尘	2	17 100	8.64	1.651（1.505 ~ 1.811）
噪声+化学有害因素	2	7 892	6.28	1.506（1.329 ~ 1.707）
噪声+其他物理因素	2	2 952	12.80	3.965（3.438 ~ 4.573）
粉尘+化学有害因素	2	1 790	5.81	1.428（1.139 ~ 1.790）
粉尘+其他物理因素	2	178	13.48	3.272（2.093 ~ 5.115）
化学有害因素+其他物理因素	2	1 262	10.14	2.855（2.325 ~ 3.506）
噪声+粉尘+化学有害因素	3	2 841	8.13	1.936（1.639 ~ 2.286）

暴露组合	K	记录数	管理需求率（%）	调整 OR（95%CI）
噪声+粉尘+其他物理因素	3	1 521	15.65	3.680（3.051 ~ 4.439）
噪声+化学有害因素+其他物理因素	3	1 455	17.59	4.853（4.080 ~ 5.772）
粉尘+化学有害因素+其他物理因素	3	2 874	6.82	1.391（1.168 ~ 1.657）
噪声+粉尘+化学有害因素+其他物理因素	4	11 044	11.27	2.813（2.547 ~ 3.106）

注：OR 为优势比，CI 为置信区间。参照组为单纯噪声暴露。模型调整年龄、性别、接触有害工龄、体检类型和体检年份，并采用研究对象聚类稳健标准误；共纳入 111 217 条完整记录、55 796 名劳动者。

四、CCEI 及敏感性分析

CCEI 中位数为 41.7（20.8，50.0）分。调整混杂因素后，CCEI 每增加 10 分，主要结局的 OR 值为 1.119（95%CI：1.108 ~ 1.130）；自然立方样条显示，以 41.67 分为参照，CCEI 与进一步职业健康管理需求呈总体上升的非线性关联（图 2）。排除单纯补充检查后，严格结局共 6 373 例；双重、三重和四类暴露的调整 OR 值分别为 1.503（95%CI：1.397 ~ 1.618）、1.857（95%CI：1.665 ~ 2.072）和 2.323（95%CI：2.103 ~ 2.565），P 趋势<0.001。严格结局中 CCEI 每增加 10 分的调整 OR 值为 1.095（95%CI：1.082 ~ 1.109），结果方向一致。CEBI-D 结果亦总体一致，但其四分位数组未呈完全单调梯度，故仅作为补充敏感性指标。

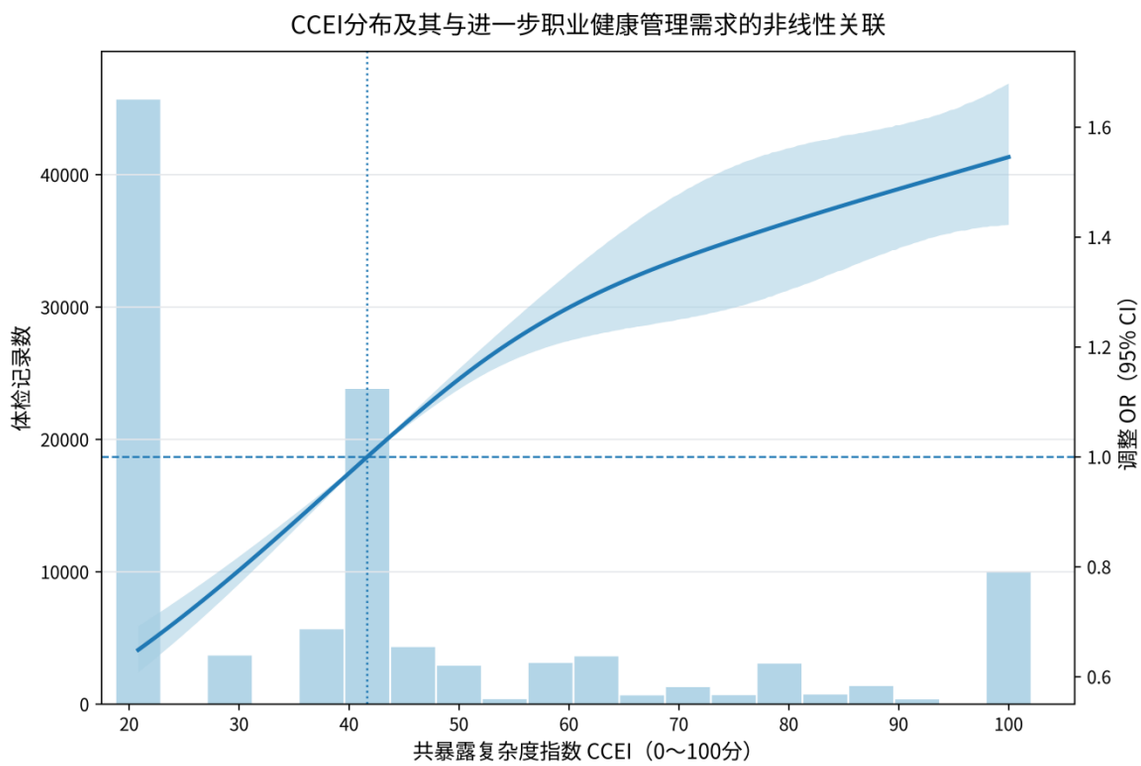


图 2　共暴露复杂度指数分布及其与进一步职业健康管理需求的非线性关联

注：柱形表示主调整模型完整病例中 CCEI 的分布，实线表示调整 OR 值，阴影表示 95%CI，水平虚线表示 OR=1，垂直虚线表示 CCEI 中位数 41.67 分。非线性关联采用 4 自由度自然立方样条估计，模型调整年龄、性别、接触有害工龄、体检类型和体检年份，并采用研究对象聚类稳健标准误。

肆、讨　论

本研究利用 7 年、多行业、大样本职业健康监护资料发现，随着职业危害类别由 1 类增加至 4 类，进一步职业健康管理需求率和调整后关联强度均逐级升高；排除单纯补充检查后的严格结局分析仍保持一致，提示主要结果并非由检查项目不完整所驱动。CCEI 连续分析和样条结果进一步支持，共暴露复杂度越高，后续管理需求总体越高。上述结果支持在常规监护中由“单一危害—单项结论”转向“共暴露广度—组合模式—管理优先级”的分析视角。

K 是本研究最稳健的主指标。其不对不同危害类别赋予未经验证的精确毒性权重，也不利用研究结局反推暴露权重，因而透明、可解释且便于跨机构复现。CCEI 在 K 的基础上进一步纳入标准化危害因素数量，可提供更细的复杂度信息；但由于缺乏接触浓度、频率和防护条件，它只能作为监护数据中的暴露复杂度替代指标，不能等同于危害商、累积剂量或个体风险预测值。

具体组合结果提示，不同共暴露模式对应的管理需求并不相同，尤其是含其他物理因素的若干组合呈现较高 OR 值。但“其他物理因素”涵盖高温、振动、电磁辐射等异质暴露，且综合管理结局同时受检查项目配置、行业岗位、复查制度和健康劳动者效应影响，故不宜将组合 OR 直接解释为生物学协同作用或不同危害的毒性排序。后续应结合岗位检测结果，并分别以听力、肺功能、胸部影像或血液学异常等器官特异性结局开展验证。

本研究的创新性主要体现在三个方面：第一，将括号感知文本拆分、同义词归一和互斥主分类应用于真实世界职业健康监护资料，减少危害词条错误拆分和重复计数；第二，形成“危害类别数量 K—具体暴露组合—CCEI”三个层次的可解释共暴露表征体系，兼顾方法透明性和管理分层精度；第三，将共暴露复杂度与复查、补充检查、职业禁忌证和疑似职业病等管理结局衔接，并以严格结局进行稳健性检验，为常规监护数据转化为数字化管理决策支持提供了可实施路径。

数字化分层管理应用框架：可概括为“数据接入与质量控制→危害词典映射与互斥分类→K、暴露组合和 CCEI 自动计算→管理优先级提示→工程控制复核、个体防护核查、复查随访与岗位干预→结果反馈和规则迭代”。该框架旨在帮助企业和职业健康检查机构优先识别需要关注的多危害岗位，形成监测—干预—随访闭环；其定位是专业决策支持，不替代现场检测、职业健康检查医师判断，也不应被用于简单限制劳动者就业。

本研究也存在局限。其一，暴露来源于体检登记字段，缺少浓度、强度、频率、个人防护和工程控制资料，可能发生暴露错分；其二，主要结局为管理性复合终点，不能替代职业病或器官损害结局，尽管严格结局分析降低了单纯补充检查的影响，仍可能受机构管理流程影响；其三，同一劳动者可跨年重复体检，虽采用聚类稳健标准误，仍无法完全消除健康劳动者效应和残余混杂；其四，资料来自单一职业健康检查机构，外部推广前需在其他地区和机构验证，并结合行业、单位及岗位实测资料进一步校准。

伍、结　论

职业危害类别数量和共暴露复杂度与进一步职业健康管理需求呈稳定关联，排除单纯补充检查后结果仍一致。基于常规职业健康监护数据构建的 K、具体暴露组合和 CCEI 具有透明、可复现及易于数字化部署的特点，可辅助多危害岗位开展分层监测、复查随访和资源优先配置。实际应用中应将其与工作场所暴露检测、工程控制、个体防护及器官特异性健康结

局结合，避免将代理指标误解为真实剂量、因果效应或自动化岗位决策依据。

陆、声　明

利益冲突：所有作者声明不存在与本研究相关的潜在利益冲突。

基金项目：国家自然科学基金面上项目（82574060）；职业健康安徽省重点实验室开放基金资助项目（2024ZYJKB002）；煤炭环境致病与防治教育部重点实验室开放课题基金资助项目（MEKLCEPP/SXMU-202411）。

作者贡献：王均云负责研究设计、数据分析和论文撰写；王泽辉负责数据收集；吴丽娜和王小春负责职业卫生专业复核；丁春光负责研究指导和论文审阅。

参考文献

［1］国家卫生健康委员会（2025），职业健康监护技术规范：GBZ 188—2025，中国标准出版社，北京。

［2］国家卫生和计划生育委员会（2017），工作场所化学有害因素职业健康风险评估技术导则：GBZ/T 298—2017，中国标准出版社，北京。

［3］国家卫生计生委、人力资源社会保障部、国家安全监管总局等（2015），职业病危害因素分类目录。

［4］Niemeier, R. T., Williams, P. R. D., Rossner, A., et al.（2020）, A cumulative risk perspective for occupational health and safety professionals, International Journal of Environmental Research and Public Health, Vol. 17, No. 17, 6342.

［5］Fox, M. A., Niemeier, R. T., Hudson, N., et al.（2021）, Cumulative risks from stressor exposures and personal risk factors in the workplace: examples from a scoping review, International Journal of Environmental Research and Public Health, Vol. 18, No. 11, 5850.

［6］Barbey, C., Bonvallot, N. and Clerc, F.（2024）, Health outcomes related to multiple exposures in occupational settings: a review, Safety and Health at Work, Vol. 15, No. 4, pp. 382-395.

［7］Yu, L., Liu, W., Wang, X., et al.（2022）, A review of practical statistical methods used in epidemiological studies to estimate the health effects of multi-pollutant mixture, Environmental Pollution, Vol. 306, 119356.

［8］Keil, A. P., Buckley, J. P., O'Brien, K. M., et al.（2020）, A quantile-based g-computation approach to addressing the effects of exposure mixtures, Environmental Health Perspectives, Vol. 128, No. 4, 047004.

［9］von Elm, E., Altman, D. G., Egger, M., et al.（2007）, Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology statement: guidelines for reporting observational studies, The Lancet, Vol. 335, No. 7624, pp. 806-808.

海峽兩岸及香港、澳門地區
職業安全健康學術研討會

1993