

化工行业安全风险管理：风险评估、 隐患排查与管控策略

方石明

佛山市世和安全技术有限公司，广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025120042

摘要：化工行业安全风险管理需通过风险评估、隐患排查与动态管控策略的闭环集成，应对工艺复杂性与事故连锁效应挑战。2024年《化工和危险化学品安全生产治本攻坚三年行动方案（2024—2026年）》强调全流程自动化改造与双重预防机制建设，推动本质安全升级。研究融合HAZOP-LOPA联合分析、BIM与区块链等技术案例，验证智能化工具在风险识别与协同治理中的效能，揭示数据壁垒与技术适配性对管理实践的制约。未来需深化数字孪生与人工智能融合，构建自适应风险管理框架，实现从被动响应向智能预控的范式转型。

关键词：安全风险管理；双重预防机制；智能预控

Safety Risk Management in the Chemical Industry: Risk Assessment, Hidden Danger Investigation, and Control Strategies

Fang Shiming

Foshan Shihe Security Technology Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract : Chemical industry safety risk management requires closed-loop integration of risk assessment, hidden hazard investigation, and dynamic control strategies to address process complexity and accident cascading effects. The Three-Year Action Plan for Fundamental Improvement of Chemical and Hazardous Chemical Safety Production (2024–2026), issued in 2024, emphasizes full-process automation transformation and dual prevention mechanisms to enhance inherent safety. The study integrates technical cases such as HAZOP-LOPA joint analysis, BIM, and blockchain, demonstrating the effectiveness of intelligent tools in risk identification and collaborative governance, while revealing constraints from data barriers and technological adaptability. Future research should deepen the integration of digital twins and artificial intelligence to build adaptive risk management frameworks, enabling a paradigm shift from passive response to intelligent pre-control.

Keywords : safety risk management; dual prevention mechanism; intelligent pre-control

引言

化工行业作为国民经济的重要支柱，其生产过程涉及易燃、易爆、有毒有害物质，安全风险具有复杂性、动态性与连锁性特征。近年来，全球范围内化工事故频发，凸显火灾爆炸、有毒气体泄漏、设备老化及人因失误等核心风险源的系统性挑战。在此背景下，中国于2024年1月颁布《化工和危险化学品安全生产治本攻坚三年行动方案（2024—2026年）》，明确要求通过全流程自动化改造、风险分级管控与隐患排查双重预防机制，提升行业本质安全水平。当前研究与实践表明，化工安全风险管理需融合多学科理论与技术创新，涵盖风险评估方法优化（如HAZOP-LOPA联合分析）、智能化隐患排查技术（如无人机与AI图像识别）及动态管控策略设计（如数字孪生驱动的应急预案）。然而，数据壁垒、技术成本与跨组织协同仍制约风险管理的深度落地。本文旨在系统性整合理论与实践经验，提出闭环风险管理框架，为化工行业实现从被动响应向智能预控的范式转型提供科学依据。

一、化工安全风险评估理论与方法

（一）化工安全风险的内涵与特征

化工安全风险是指化工生产活动中因工艺缺陷、设备故障、

人为失误或外部干扰等因素导致事故发生的可能性及其后果严重性的综合表征。其复杂性源于化工系统多变量耦合、物质能量交互作用的非线性特征，例如反应失控可能由温度、压力、催化剂活性等多参数异常共同引发^[1]。动态性表现为风险随生产阶段、

环境条件或管理状态的变化而演变，如设备老化、工艺调整或操作人员流动均可能改变风险等级。连锁性特征则体现在单一事故可能通过物质泄漏、能量释放或信息传递触发多米诺效应，例如储罐泄漏引发火灾后，高温辐射可能波及邻近装置导致连环爆炸。上述特征要求风险分析需兼顾多维度、多尺度的系统关联与动态演化规律。

(二) 风险评估方法体系

化工安全风险评估方法可分为定性、半定量与定量三类^[2]。定性方法如危险与可操作性分析（HAZOP），通过结构化研讨识别系统偏差与潜在危害，适用于设计阶段或复杂工艺的初步风险筛查，但其结果依赖专家经验且缺乏量化支撑。半定量方法如保护层分析（LOPA），通过设定初始事件频率与独立保护层失效概率，评估剩余风险是否可接受，常用于确定安全仪表系统的完整性等级，但场景简化可能导致关键风险因素遗漏。定量风险评估（QRA）基于概率模型与后果模拟计算风险值，例如通过事件树与故障树量化事故链概率，结合扩散模型预测有毒物质影响范围，能够为保险决策与土地利用规划提供数据支持，但其准确性受限于基础数据的完整性与模型假设的合理性。三类方法需根据评估目标、数据条件与资源约束进行适配与集成，以实现风险识别的全面性与决策的科学性。

二、化工安全隐患排查体系构建

(一) 隐患排查流程设计

化工安全隐患排查流程需基于PDCA循环构建系统性闭环管理体系。计划阶段（Plan）通过风险识别确定排查目标与范围，结合历史事故数据与工艺特性制定分级分类排查方案，明确责任主体与资源分配^[3]。执行阶段（Do）采用常规巡检、专项检查与全员参与模式，依托标准化检查表与数字化工具实现隐患的精准识别与记录。检查阶段（Check）通过隐患台账动态更新与整改效果跟踪，利用统计分析工具评估排查覆盖率与整改时效性，识别流程漏洞或管理盲区。改进阶段（Act）针对重复性隐患或系统性缺陷，优化工艺设计、操作规程或培训体系，形成隐患治理的长效机制。PDCA循环通过迭代反馈实现隐患排查从被动响应向主动预防的转变，确保风险管理的持续改进。

(二) 智能化隐患排查技术

智能化技术通过多源数据融合与自动化分析提升隐患排查效率与精度。无人机巡检利用高精度摄像头与激光雷达，实现高空管线、储罐顶部等危险区域的快速三维建模与腐蚀、变形缺陷检测，降低人工攀爬风险。物联网传感器网络实时采集温度、压力、振动等设备状态参数，结合机器学习算法预测异常趋势，例如通过振动频谱分析识别泵阀早期故障。AI图像识别技术依托卷积神经网络（CNN）对仪表读数、法兰密封面或安全阀状态进行智能诊断，减少漏检率。技术优化需聚焦多源数据融合（如无人机影像与传感器数据协同分析）、算法轻量化（适应边缘计算场景）与系统集成（与ERP、MES系统互联），同时需解决数据安全、模型泛化能力与跨平台兼容性等挑战，推动隐患排查向智能

化、无人化方向发展。

三、化工安全风险管控策略设计

(一) 预防性管控策略

1. 工艺安全设计优化

工艺安全设计优化以本质安全理念为核心，通过消除或减少危险源降低系统固有风险。采用替代策略（如以低毒性溶剂替代高危物质）、最小化策略（减少危险物料存量与反应器容积）与简化策略（避免复杂联锁装置），从源头上抑制事故触发条件^[4]。设计阶段需融合HAZOP分析与LOPA评估，识别关键控制节点并设置冗余保护层，例如通过紧急泄放系统与惰性气体覆盖抑制反应失控。全生命周期管理则需借助BIM技术实现工艺参数与设备状态的动态监控，确保设计安全性与实际运行一致性，避免因偏离设计工况引发的次生风险。

2. 人员培训与行为管理

人员安全行为管理需构建基于胜任力的培训体系，根据岗位风险特征设计分层次课程（如操作规范、应急技能与风险辨识），结合虚拟现实（VR）模拟事故场景强化实操能力。安全文化激励机制通过积分制、正向反馈与绩效考核联动，引导员工主动参与隐患上报与行为纠偏。例如，引入“安全观察卡”制度鼓励全员记录不安全行为，依托大数据分析识别行为模式缺陷并定向干预。管理层需通过定期安全巡检与公开承诺强化示范效应，推动安全价值观从制度约束向文化自觉的转化^[5]。

(二) 应急响应与恢复策略

1. 应急预案动态优化

应急预案需基于多维度情景模拟实现动态迭代，利用数字孪生技术构建火灾、泄漏、爆炸等典型事故演化模型，量化不同应急响应路径的效果差异。实战演练通过融合压力测试与无脚本推演，暴露预案盲区（如跨部门协作迟滞或物资调配瓶颈），并采用A/B测试对比处置方案效率^[6]。预案优化需集成实时数据（如气象条件、人员定位）与智能决策模块，生成自适应应急指令。例如，依托GIS系统动态规划疏散路线，结合事故扩散模型调整救援力量部署，提升预案的时效性与可操作性。

2. 事故后恢复机制

事故后恢复需统筹环境修复、生产恢复与社会影响消减，构建多主体协同治理框架。环境修复采用原位生物降解、化学中和与物理隔离等技术，结合在线监测评估污染清除效果，避免次生生态灾害。生产恢复通过冗余生产线快速启动与工艺安全再认证，确保复工过程风险可控。社会影响管理需建立信息公开机制与社区补偿方案，例如通过定期发布环境质量数据、组织公众参与监督修复工程，重建社会信任。恢复阶段需嵌入经验反馈循环，将事故教训转化为设计标准、操作规程与培训案例，形成“处置—学习—改进”的闭环管理体系^[7]。

四、管控策略的应用与实践案例分析

(一) 技术应用案例

1. 某石化企业 HAZOP-LOPA 联合风险评估实践

某石化企业在乙烯裂解装置改造中采用HAZOP-LOPA联

合风险评估方法，通过 HAZOP 识别工艺偏离（如反应器超温超压），LOPA 量化保护层失效概率并确定安全仪表系统（SIS）的 SIL 等级^[8]。联合分析发现原设计中紧急冷却系统冗余不足，通过增设独立泄压阀与温度联锁控制，将残余风险降低至可接受范围。实践表明，HAZOP 的定性分析与 LOPA 的半定量评估结合，可有效平衡风险识别的全面性与决策效率，避免单一方法的局限性，为高复杂度工艺的风险管控提供可复用的技术范式。

2.BIM 技术在化工厂隐患排查中的集成应用

某化工厂将 BIM 技术融入隐患排查全流程，基于三维模型集成设备参数、管线布局与实时监测数据，实现隐患空间可视化定位。通过碰撞检测模块识别施工阶段管线与结构冲突，利用历史数据对比发现法兰密封面老化或支架位移等隐蔽缺陷。BIM 与物联网结合后，系统自动关联传感器报警信息与模型对应区域，生成定向排查工单。应用后隐患识别效率提升 40%，维修响应时间缩短 30%，验证了 BIM 在跨阶段、多维度隐患排查中的协同价值。

（二）管理机制创新案例

1. 基于区块链的供应链安全信息共享平台

某化工集团构建区块链平台，实现供应商资质、危化品运输记录与应急资源的去中心化存证与共享。智能合约自动验证供应商合规性，分布式账本确保数据不可篡改，追溯危化品流向时效率提升 60%。平台通过加密权限控制敏感信息访问，解决传统模式下信息孤岛与信任缺失问题。应用后，供应商事故率下降 25%，应急资源配置时间缩短 50%，为供应链安全协同管理提供了可信技术底座。

2. 双重预防机制在精细化工企业的落地效果

某精细化工企业实施风险分级管控与隐患排查双重预防机制，将工艺单元按风险矩阵划分为红、橙、黄、蓝四级，针对性制定管控清单与检查频次。隐患排查采用“全员参与 + 专项审计”模式，通过移动端 App 实时上传隐患并跟踪整改闭环。机制运行一年后，未遂事件下降 38%，员工安全行为合规率提升至 92%，证明双重预防机制通过结构化分工与动态反馈，能够有效打

破传统安全管理中风险识别与治理脱节的困局^[9]。

（三）管控效果评估方法

1. 风险矩阵与 Bowtie 模型在效果评价中的应用

风险矩阵通过可能性 - 严重度二维评估量化管控前后风险等级变化，直观反映策略有效性。Bowtie 模型则通过“原因 - 屏障 - 后果”链路分析，识别管控措施对事故路径的阻断作用。某炼油厂结合两者评估 HAZOP 优化方案，发现新增紧急切断阀使关键屏障失效概率从 10^{-3} 降至 10^{-5} ，风险等级由“高”降至“中”，验证了多方法联用对管控效果的多维度诊断能力^[10]。

2. 基于数据驱动的管控策略动态调整模型

该模型集成历史事故数据、实时监测指标与外部环境参数，利用时间序列分析与随机森林算法预测风险趋势。某氯碱企业通过模型识别夜班操作失误率偏高，动态调整巡检频次与培训计划，使人为失误导致的事故减少 45%。模型通过闭环反馈持续优化决策规则，支持管控策略从静态预设向自适应演进，提升复杂工况下风险应对的敏捷性。

五、总结

化工安全风险管理需以系统性思维融合风险评估、隐患排查与管控策略，构建“识别 - 控制 - 反馈”的闭环体系。风险评估通过定性、半定量与定量方法的多层次适配，揭示复杂工艺的潜在风险演化路径；隐患排查依托 PDCA 循环与智能化技术，实现隐患从动态识别到长效治理的转化；管控策略以本质安全设计与人员行为干预为核心，结合情景驱动的应急优化与多主体协同恢复机制，形成风险防控的全周期覆盖。实践表明，技术与管理创新（如 HAZOP-LOPA 联合分析、区块链信息平台）能够显著提升风险管理效能，但数据壁垒、技术成本与跨组织协同仍是落地瓶颈。未来研究需深化数字孪生、人工智能与风险模型的融合，探索自适应风险管理框架，推动化工安全从被动响应向智能预控的范式升级，为行业可持续发展提供理论支撑与实践路径。

参考文献

- [1] 刘志双, 谭建新. 化工园区环境风险管理体系建设策略探析 [J]. 化工设计通讯, 2016, 42(5): 1.
- [2] 沈立彬. 化工业企业安全管理及隐患排查管理策略 [J]. 化工管理, 2023(5): 115-118.
- [3] 常法通. 化工企业的消防安全风险管理 [J]. 电脑爱好者 (电子刊), 2023(7): 253-254.
- [4] 黄潜. 煤制油化工企业安全风险及安全管理研究 [J]. 山西化工, 2017, 37(4): 4.
- [5] 周晓峰. 煤矿工程采煤技术及安全管控策略 [J]. 化工中间体, 2021, 000(012): 25-26.
- [6] 刘小勇, 王宇航, 李鹏智. 基于风险的化工过程安全管控实践 [J]. 化工管理, 2023(15): 85-87.
- [7] 程宝建. 化工安全管理中双重预防机制的应用 [J]. 化肥设计, 2024, 62(2): 59-62.
- [8] 酒江波, 刘尚志, 薛松霖, 等. 基于本质安全理论的化工过程安全管理研究 [J]. 安全与环境工程, 2023, 30(5): 11-18.
- [9] 李旭. 石油化工项目建设的安全管理策略 [J]. 中国地名, 2024(8): 0070-0072.
- [10] 刘刚. 煤化工企业安全管理要点及措施浅析 [J]. 数码 - 移动生活, 2023: 287.