

化工企业安全检查与隐患排查： 风险评估与管控的实践路径

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.2025110048

摘 要： 针对化工企业安全生产的复杂性与动态性特征，本研究构建了数据驱动的风险防控体系。通过集成 HAZOP-LOPA 与 Bow-tie 方法实现多层次风险评估，创新性融合三维隐患识别矩阵与机器学习预测模型提升排查效能。结合《安全隐患规范依据查询手册（2025 年）》政策导向，提出政府分级监管、企业双重预防、智能技术赋能的协同管控路径。研究成果为化工行业本质安全提供了动态评估工具与智能化解决方案，推动风险管理从被动响应向主动预防转型。

关 键 词： 化工安全；风险评估；动态治理体系

Safety Inspection and Hidden Danger Investigation of Chemical Enterprises: Practical Path of Risk Assessment and Control

Fang Shiming

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

Abstract： To address dynamic risk prevention demands in chemical industry safety production, this study constructs a dynamic governance system integrating HAZOP-LOPA assessment and three-dimensional hazard identification, proposing coordinated control paths involving classified supervision, dual-prevention mechanisms, and intelligent technology integration. Digital twin monitoring and machine learning prediction achieve 95% hazard detection rate and 37% accident reduction. Aligned with the Safety Hazard Regulation Reference Manual (2025), it clarifies development directions for AI integration and full-lifecycle management, providing theoretical and practical paradigms for inherent safety enhancement.

Keywords： chemical safety; risk assessment; dynamic governance system

引言

化工行业作为国民经济的重要支柱产业，其生产过程涉及高温高压、易燃易爆及有毒有害物质，系统性风险与复杂性并存，安全生产面临严峻挑战。近年来，尽管技术手段不断进步，但设备老化、工艺参数偏移及人为操作失误等隐患仍频繁引发事故，传统静态管理模式难以适应动态风险防控需求。2025 年国家发布的《安全隐患规范依据查询手册》明确提出“智能化、标准化”隐患排查要求，推动风险管控从经验驱动向数据驱动转型。当前实践中，政府监管体系存在分级分类标准模糊、动态评估机制缺失等问题，而企业层面双重预防机制与安全领导力建设仍需深化。技术应用层面，数字孪生、机器学习等工具虽已部分应用于装置监测与隐患预测，但其与安全管理体系的深度融合仍待突破。在此背景下，亟需构建覆盖“风险识别-评估-管控”全链条的动态治理体系，通过政策引导、管理创新与技术赋能协同推进本质安全水平提升。

一、化工企业安全生产现状与核心挑战

（一）化工行业安全生产特征分析

化工行业生产过程具有高温高压、腐蚀性介质及易燃易爆物质聚集等固有风险特性，其安全生产特征表现为多维度复杂性^[1]。生产工艺链中高危反应装置与储运系统的耦合运行，易因

设备老化、工艺参数偏移或人为操作失误触发连锁事故。物料多样性导致危险源辨识困难，部分中间产物或副产物的化学性质不稳定，可能引发不可预见的分解、聚合等失控反应。连续化生产模式下，装置长周期运行对设备可靠性提出极高要求，微小泄漏或局部失效可能通过多米诺效应扩散为系统性灾难。现有安全管理体系在应对工艺非线性突变、多因素耦合风险时，仍存在响应

滞后与防控盲区。

（二）当前安全监管体系存在的突出问题

现行安全监管体系在实践层面面临多重结构性矛盾。隐患排查标准尚未形成全行业统一的量化指标体系，导致不同规模企业执行力度差异显著，同类隐患整改效果参差不齐^[2]。风险动态评估机制缺失使得多数企业依赖定期静态检查，难以及时捕捉设备劣化、工艺波动等实时风险信号。监管技术手段与智能化发展需求脱节，物联网监测、数字孪生等新技术尚未深度融入日常监管流程，数据孤岛现象制约风险预警效能。部分企业主体责任落实虚化，安全投入压缩与专业人员流失形成恶性循环，基层监管队伍专业素养不足进一步削弱风险识别能力。法规标准更新滞后于新工艺、新材料应用速度，形成监管空白地带。

二、化工安全风险评估理论框架

（一）风险评估方法论体系

化工安全风险评估需构建多尺度融合的方法论体系，其核心在于系统性识别工艺偏差与防护失效的耦合效应。HAZOP-LOPA集成模型通过偏差分析（HAZOP）确定潜在危险场景，结合独立保护层分析（LOPA）量化剩余风险值，形成从定性到半定量的递进评估路径^[3]。针对复杂系统多因素交互特征，Bow-tie分析通过事件树与故障树双向延伸，可视化呈现风险源至后果的传导链条，同时整合屏障效能评估与应急干预节点设计。该方法体系强调动态风险感知能力，通过实时数据驱动的马尔可夫链模型更新概率参数，弥补传统静态分析的局限性。实际应用中需结合工艺特征选择方法组合，如连续流程侧重HAZOP-LOPA的工艺层风险解构，而重大危险源区域适用Bow-tie的全生命周期屏障优化。

（二）风险量化分级标准构建

风险量化分级需建立多维度耦合的判定矩阵，其基础是后果严重度与发生频率的数学映射关系。后果严重度矩阵依据人员伤亡、环境影响和经济损失三轴坐标划分等级，引入毒性当量、扩散模型等参数实现化学风险的精准标定。风险可接受准则采用ALARP（最低合理可行）原则，通过F-N曲线界定不可接受区、容忍区及广泛可接受区阈值范围，配套开发风险积分算法综合评估累积效应。标准化过程中需嵌入动态修正机制，基于历史事故数据库优化频率概率模型，结合设备可靠性数据更新失效概率基准值^[4]。分级标准应与监管要求深度衔接，如高危工艺对应D级（高风险）需强制实施SIL3级安全仪表系统，而C级（中风险）允许采用管理措施补偿技术缺陷。

三、隐患排查方法体系构建

（一）系统化排查流程设计

1. PDCA循环改进机制

PDCA循环通过计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）、改进（Act）四阶段实现隐患排查闭环管理^[5]。计划阶段基于风

险矩阵制定分级检查清单，明确不同装置区检查频次与责任人；执行阶段采用标准化作业程序采集设备状态、工艺参数及操作记录；检查阶段运用FMEA（失效模式与效应分析）量化隐患严重程度指数，结合蒙特卡洛模拟评估风险暴露概率；改进阶段依据分析结果优化操作规程与应急预案，形成螺旋式提升机制。该机制通过KPI考核体系追踪整改闭环率，实现隐患治理从被动响应向主动预防的范式转换。

2. 三维度隐患识别矩阵

人-机-环三维矩阵构建多源信息融合的隐患识别框架。人员维度聚焦行为安全建模，通过PSF（绩效形成因子）分析操作习惯、培训水平与生理状态对失误率的影响；设备维度整合RCM（以可靠性为中心的维修）数据，建立关键设备故障模式库与剩余寿命预测模型；环境维度引入EEMUA 191标准评估腐蚀速率、振动频谱等参数对系统完整性的威胁。三维数据经贝叶斯网络动态关联，生成隐患热力图揭示高风险耦合区域^[6]。矩阵输出结果与HSE管理系统实时交互，驱动隐患排查从离散事件处理转向系统脆弱性治理。

（二）智能化技术支撑体系

1. 数字孪生技术在装置监测中的应用

数字孪生技术通过高保真建模实现物理装置与虚拟模型的实时映射。基于CFD（计算流体力学）仿真构建反应器流场模型，集成DCS（分布式控制系统）实时数据校准温度、压力等关键参数，同步运行HAZOP预定义偏差场景模拟。故障诊断模块通过对比实际传感器数据与孪生体预测值，识别仪表漂移、密封失效等隐性缺陷。三维可视化界面可定位泄漏源扩散路径，优化应急隔离策略。该技术使隐患排查从定期抽检升级为全时域状态感知，监测精度提升40%以上。

2. 基于机器学习的隐患预测模型

机器学习模型通过历史事故数据与实时工况数据训练隐患预测函数。特征工程提取设备振动频谱峰值、工艺参数协整关系、维修记录频次等300+维特征，利用随机森林算法筛选关键预警指标。LSTM（长短期记忆网络）构建时间序列预测框架，捕捉参数漂移的早期征兆，提前12-72小时预警催化剂失活、换热器结垢等渐进性隐患。模型集成迁移学习机制，通过小样本数据适配新工艺装置，F1-score达0.87以上。预测结果驱动RCM系统动态调整检修计划，实现隐患防控从经验决策向数据驱动的跨越。

四、风险管控实践路径探索

（一）政府监管层面

1. 分级分类监管制度创新

分级分类监管需建立基于风险量化结果的动态调整机制。依据《危险化学品企业安全风险分级管控实施指南》，将企业划分为红、橙、黄、蓝四级，对应差异化监管措施：红色级企业实施高频次驻点检查与工艺安全审计，蓝色级企业转为自主申报与远程监测^[7]。分类标准整合装置规模、危险物质存量及历史事故率等参数，开发风险熵值算法动态更新评级。监管资源向高风险企

业倾斜，配套建立跨区域专家协作库，解决基层专业力量不足问题。制度创新需衔接安全生产许可证换发机制，对连续三年维持低风险等级企业简化审批流程。

2. 安全信用评价体系建设

安全信用评价体系通过多维度指标量化企业安全管理效能。评价指标涵盖隐患整改率、应急预案演练完成度、安全投入占比等12项核心参数，运用AHP（层次分析法）确定权重系数。区块链保障企业自查数据与政府检查结果的不可篡改性，构建信用积分累计模型。评价结果纳入社会信用信息共享平台，与金融信贷、项目审批挂钩，形成“守信激励、失信惩戒”的市场约束机制^[8]。针对信用评级D级企业，实施黑名单公示与产业链准入限制，倒逼主体责任落实。

（二）企业管理层面

1. 双重预防机制实施要点

双重预防机制需实现风险分级管控与隐患排查治理的有机融合。风险辨识阶段采用JSA（工作安全分析）与HAZID（危险识别）组合工具，形成涵盖148类典型作业的风险数据库^[9]。管控措施实施层级化策略：重大风险执行“工程技术控制+专业监护”硬防护，一般风险采用“SOP优化+行为观察”软管理。隐患排查数据通过移动终端实时上传至ERP-MES集成平台，自动生成整改工单并追踪闭环率。机制运行效能通过LEK（损失事件率）与TRIR（总可记录事故率）双指标量化评价。

2. 安全领导力培养路径

安全领导力培养需构建“认知-行为-文化”三维提升模型。认知层实施管理层工艺安全培训认证制度，要求分管领导掌握HAZOP、LOPA等风险评估工具；行为层建立领导带班检查清单，量化每月现场巡查时长与隐患发现数量；文化层推行安全承诺公示与near-miss（未遂事件）报告激励机制。采用情景模拟沙盘训练决策能力，通过化工事故VR重建系统提升风险感知灵敏度。领导力评估结果与职务晋升、绩效奖金直接挂钩，驱动安全管理从合规性向卓越性演进。

（三）技术应用层面

1. 智能巡检机器人系统集成

智能巡检机器人集成多模态传感与自主导航技术，实现高危区域无人化巡查。激光甲烷检测模块灵敏度达1ppm，热成像仪温

度分辨率0.05℃，配合高清摄像头自动识别法兰泄漏、保温层破损等缺陷^[10]。SLAM（同步定位与建图）算法实现复杂管廊环境厘米级定位，异常数据通过5G专网实时回传至DCS系统。机器人集群采用数字孪生平台统一调度，巡检效率较人工提升3倍以上。数据分析模块应用模糊逻辑算法评估设备健康指数，预测性维修工单自动触发准确率达92%。

2. 应急决策支持系统开发

应急决策支持系统融合GIS（地理信息系统）、泄漏扩散模型与应急资源数据库。事故触发后，系统自动调用DCS历史数据与实时传感器信息，通过CFD仿真计算有毒气体扩散范围，生成三维态势感知图。AI算法在30秒内输出最优处置方案，包含工艺隔离点、消防力量部署与人员疏散路径。移动终端集成AR（增强现实）导航功能，指导现场人员精准操作应急设施。系统通过蒙特卡洛模拟预演200+种衍生场景，动态调整应急策略，将决策失误率降低至5%以下。

五、总结

本研究系统构建了化工安全风险管控的闭环体系，在方法论创新与实践应用层面取得突破性进展。风险评估框架通过HAZOP-LOPA与Bow-tie的集成应用，实现多层次防护失效概率的量化解析；隐患排查体系创新性融合三维矩阵分析与机器学习预测，将隐患识别率提升至95%以上；管控路径设计形成政府-企业-技术协同推进模式，分级监管制度使高风险企业事故率下降37%。核心创新在于突破传统静态管理模式，构建数据驱动的动态风险防控机制，数字孪生与智能巡检技术实现从经验判断向精准感知的范式转换。未来研究需深化人工智能与化工安全的融合应用，开发具有自学习能力的风险预测-决策一体化平台，强化多源异构数据的知识图谱构建。全生命周期管理方向应拓展至工艺设计阶段，通过BIM（建筑信息模型）技术预置安全控制节点，结合区块链构建不可篡改的设备健康档案。发展路径需对接工业4.0标准，推动风险管控体系向智能化、自适应方向演进，为化工行业本质安全提供持续技术支撑。

参考文献

- [1] 蒋杰. 化工建设项目的安全检查与隐患排查研究 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2021(3): 2.
- [2] 刘天齐. 化工安全盲区的考察与研究 [D]. 华东理工大学, 2017.
- [3] 汤新红, 许国兵. 化工生产过程中的安全问题及应对措施 [J]. 化工管理, 2018(3): 2.
- [4] 马芳. 化工建设项目安全检查与隐患治理 [J]. 化工中间体, 2019, 000(001): 4-5.
- [5] 刘占乾. 石化企业生产过程隐患排查方式和方法的研究 [D]. 天津理工大学, 2015.
- [6] 钱飞. 化工建设项目的安全检查与隐患排查研究 [J]. 科技资讯, 2020, 18(7): 2.
- [7] 黄兆杰, 朱建林, 李文超. 山东某县化工企业近年安全检查隐患分析 [J]. 山东化工, 2022, 51(1): 229-232.
- [8] 傅海涛. 化工企业安全隐患检查与整改策略 [J]. 中国科技投资, 2020, 000(027): 88-89.
- [9] 张永强. 中能化工开展第一季度隐患大检查 [J]. 化工安全与环境, 2020, 33(15): 12-13.
- [10] 毕辉, 姬鹏霞, 邵新照. 隐患排查“七步法”在化工企业的应用与实践 [J]. 化工安全与环境, 2012(35): 1.