Deepening Application of Dual Prevention Mechanism in Safety Production Management of Coal Chemical Enterprises

Luo Man

National Energy Group Xinjiang Hami Energy Chemical Co., Ltd., Hami, Xinjiang, 839000, China

Abstract

Addressing continuous coupling and energy-intensive operational scenarios in coal chemical plants, this study validates the theoretical applicability of a dual prevention mechanism combining "preliminary hierarchical control + feedback-based closed-loop governance." It proposes an implementation pathway starting with scenario-based risk identification and ending with closed-loop remediation: Establishing hierarchical standards integrating HAZOP and LEC methodologies coupled with LOPA to form a dynamic risk database; Driving closed-loop hazard management through IoT monitoring and event correlation analysis; Connecting early warning systems to work order execution chains via OPC UA integration with semantic models for MES, DCS, and SIS systems; Developing a three-tiered evaluation framework comprising outcome-process-support metrics and AHP weight assessment. Engineering case studies demonstrate significant improvements: Accident rates decreased from 0.8 incidents/year to 0.1, hazard rectification completion rate increased from 85% to 98%, median response time for red-orange risk incidents reduced from 14 hours to 6 hours, DCS alarm effectiveness rose from 43% to 76%, invalid alarm suppression rate improved from 18% to 41%, SIS interlock health status enhanced from 0.92 to 0.97, stable operation days for major hazard sources extended from 180 to 320 days, and bypass compliance rate increased from 88% to 99%. These results validate the mechanism's capability to incorporate major hazard sources, highly toxic media, and interlock failures into a hierarchical, verifiable, and traceable governance framework.

Keywords

dual prevention mechanism; coal chemical industry; risk classification and control; hidden danger investigation and management; integrated safety management

双重预防机制在煤化工企业安全生产管理中的深化应用

罗满

国家能源集团新疆哈密能源化工有限公司，中国 · 新疆 哈密 839000

摘　要

面向煤化工连续耦合与能量密集的工况场景，本文论证了双重预防机制“前置分级管控+反馈闭环治理”的理论适配性，提出以场景化风险识别为起点、处置闭环为终点的深化路径：构建HAZOP与LEC耦合的分级标准并对接LOPA，形成动态风险数据库；以物联网监测与事件关联驱动隐患闭环；通过OPC UA与语义模型融合MES、DCS、SIS，打通预警到工单的执行链；建立结果—过程—支撑三层指标与AHP权重评估体系。工程案例表明，事故发生率由0.8次/年降至0.1次/年，隐患整改完成率由85%升至98%，红橙级风险处置时效中位数由14 h缩短至6 h，DCS报警有效率由43%升至76%，无效告警抑制率由18%升至41%，SIS联锁健康度由0.92升至0.97，重大危险源稳定运行天数由180 d增至320 d，旁路合规率由88%升至99%。结果验证该机制可将重大危险源、剧毒介质与联锁失效纳入可分级、可核验、可追溯的治理路径。

关键词

双重预防机制；煤化工；风险分级管控；隐患排查治理；一体化安全管理

1 引言

煤化工装置普遍存在高温高压、剧毒介质与复杂联锁的耦合特征，启停、吹扫与联锁切换阶段的非定常性使系统脆弱性显著放大。传统做法中风险识别不全面、隐患处置不闭环与联锁管理不精细等痛点，难以支撑对重大危险源的持续稳态控制。国家层面推动双重预防机制为流程工业提供了可操作的总体框架，但在煤化工这一高能强耦合场景下仍需实现场景化、动态化与数字化落地。基于此，本文以场景化辨识为入口，探索将 HAZOP、LEC 与 LOPA 融合用于风险分级，将隐患治理从阶段性抽查升级为事件驱动的闭环链条，并在 MES、DCS、SIS 等系统间构建一体化数据底座与联动逻辑。同时建立覆盖结果、过程与支撑维度的量化评估与权重体系，旨在验证双重预防机制在煤化工中的理论适配与工程有效性，为行业实现系统性、现场化与时序化安全治理提供可复制路径。

【作者简介】罗满（1984–），男，中国新疆哈密人，本科，工程师，从事煤化工安全管理研究。

2 双重预防机制在煤化工企业的理论适配性分析

鉴于煤化工工艺的连续耦合与能量密集特性，双重预防机制的核心内涵可概括为把风险分级管控作为前置屏障，把隐患排查治理作为反馈修正，两者以场景化风险识别为起点、以处置闭环为终点，借助循环反馈把控制措施的有效性不断迭代。结合鄂尔多斯煤制烯烃与榆林煤制油装置的运行场景可见，高温高压设备如气化炉、加氢反应器在 4 MPa、500 ℃以上条件下运行，热应力与密封磨损易触发容器超压与泄漏；含毒介质如 CO、H2S、NH3 在变换、净化、硫回收单元存在多点逸散路径；而 DCS 集散控制系统与 SIS 安全仪表系统的交互、联锁逻辑失配以及 ESD 紧急停车旁路管理不到位，往往在启停、吹扫、联锁切换阶段放大系统脆弱性。需重点关注的是，双重机制把风险识别不全面、隐患处置不闭环等痛点纳入统一框架：依靠基于危险能量强度的能量分级与 LOPA 层级防护分析矩阵对气化、变换、合成等关键单元实施分层控制，把高等级风险绑定隔离、联锁、惰化等硬隔离措施，把中低等级风险嵌入作业许可与作业前 JHA 作业危害分析；同时把隐患治理流程固化为发现、交办、整改、复核与追溯的闭环，并且与 MOC 变更管理制度、临时旁路台账、检维修隔离清单进行对接，在装置启停窗口期和非定常工况下保持动态更新。由此推导，双重预防机制能够把重大危险源、剧毒介质与联锁失效等典型风险纳入可分级、可核验与可追溯的治理路径，契合煤化工企业对系统性、现场化与时序化安全管理的迫切需求 [1]。

3 双重预防机制在煤化工企业的深化应用路径

3.1 风险分级管控体系的优化构建

鉴于煤化工装置高温高压、毒性介质与联锁复杂的耦合情境，本研究把风险分级管控的起点前移至工艺单元的场景化辨识，对气化、合成、精馏等单元构建 HAZOP 与 LEC 耦合方法：以节点偏差与原因—后果链梳理危险源清单，借助发生可能性 L、暴露频度 E、后果严重度 C 的定性定量打分，形成工艺偏差—风险等级—控制措施的对应关系。从分级标准来看，设定红、橙、黄、蓝四级：红级对应高暴露且后果致命的能量释放与剧毒介质失控，要求把隔离、联锁、惰化与本质安全设计作为必选项；橙级面向联锁失配、超限波动等高影响中频事件，要求把双通道联锁、旁路授权与在线监测固化到操作规程；黄色聚焦检维修、动火与受限空间等中等风险情境，要求把作业许可、作业前作业危害分析与气体检测执行到位；蓝色覆盖常规偏差与一般管理缺陷，要求把点巡检与岗位自查予以常态化。进一步观察发现，静态清单难以应对启停与非定常工况的快速变化，需构建动态风险数据库，把 HAZOP 结论、LEC 评分、变更管理、旁路台账以及 DCS 与 SIS 报警数据进行关联，形成按单元、时间窗口与作业活动维度的风险台账；并且把风险等级的变更、处置责任与时限、复核结论写入数据版本历史，借助可视化看板呈现红橙热点、趋势与闭环状态，使分级管控在生产节律中得以持续迭代 [2]。

3.2 隐患排查治理机制的动态升级

立足煤化工装置在启停切换与联锁切换阶段呈现的快速风险累积特性，隐患排查治理需要从阶段性抽查转向流程化闭环管理，以把问题识别、处置与复核拎成一条可追溯的链条。本研究把流程起点设置为排查任务生成，任务来源覆盖定期点检、非定常工况专项排查以及来自 DCS 与 SIS 报警的事件触发，并把任务与设备位号、工艺节点和风险等级进行绑定，生成面向具体场景的检查清单。现场检查环节围绕 P&ID 与作业活动双主线展开，检查人员借助移动终端完成标准项核对与异常项补充说明，同时把测温枪读数、便携式气体检测数据与照片证据固化到记录结构中。问题记录环节把隐患按照工艺偏差、设备失效与作业违章三大类进行归档，并标注临时控制措施与建议风险等级；整改指令下发环节把处置责任、时限与资源需求明确到岗位，涉及工艺参数变更或联锁策略调整的事项同步触发变更管理与临时旁路审批流程；验收销号环节由独立复核方进行到场确认，依据复核标准对有效性、持续性与副作用进行核验，验收通过后把记录归入装置级知识库，若复核不通过则自动回退至整改阶段并更新时限与措施，从而使闭环在数字化工单体系内得以稳定运行 [3]。

进一步观察到传统人工巡检难以及时捕捉参数突变，本研究把物联网智能监测纳入隐患早期识别路径，在气化、变换与合成单元布设温度与压力传感器、H2S 与 CO 电化学探头以及阀位与振动监测点，借助边缘计算节点进行阈值与变化率双阈判别，并把 DCS 过程报警、SIS 联锁动作和在线监测信号进行事件关联，生成分级预警与任务工单。需重点关注的是，为防止预警泛化导致处置疲劳，预警逻辑引入时序窗口与空间邻近约束，把同一设备与相邻管线的多源异常合并归并，同时把旁路状态与检维修隔离清单作为过滤条件，减少非有效告警。由此推导，隐患从被动发现转向事件驱动触发，排查链条在秒级时域内开始运转，处置节奏与生产节律同步。

本研究立足煤化工企业对问题本质治理的现实需求，建立隐患溯源分析模型，把五步追问、因果图与障碍失效分析进行整合，并把 HAZOP 偏差结论、LOPA 防护层失效信息以及历史隐患台账构成数据输入，输出设计缺陷、维护不当、操作偏差与组织管理四类根本缘由及其权重分布。针对高权重缘由，系统自动推荐结构性对策库，如把隔离级别提升、把联锁冗余通道配置、把作业许可要点增补与把培训内容定制化纳入长期措施包，并与年度技改、标准修订和人员能力提升计划对接。这样，隐患排查从事件层面的修补转向机理层面的重构，动态升级的治理链把短期整改与长期预防贯通到一个可核验、可迭代的管理框架中。

3.3 双重机制与现有安全管理系统的融合路径

面向煤化工的连续耦合场景，双重预防机制与既有信息系统的融合聚焦数据交互的颗粒度与时效。面向 MES 制造执行系统，需要把生产计划、批次切换、检修窗口以及工单状态纳入风险判别前置条件，用来修正启停与非定常工况的风险基线。面向 SIS 安全仪表系统，需要获取联锁回路健康度、旁路与投退记录以及需求动作计数，以支撑对高等级风险的快速识别与分层处置。进一步观察到，DCS 报警与 SIS 动作存在时序耦合，一体化平台还需把两类事件进行关联与归并，抑制重复派发与误触发。

4 双重预防机制深化应用的效果评估

4.1 评估指标体系的构建

结合双重预防机制的前置屏障与反馈闭环，本研究把效果评估定位为对风险识别充分性、处置及时性与结果安全性的综合刻画。指标体系按结果、过程与支撑三类展开：结果层关注百万工时事故发生率、重大危险源稳定运行天数、联锁需求动作失效率；过程层聚焦风险分级管控覆盖率、红橙级风险处置时效中位数、隐患整改完成率与复核一次通过率、DCS 报警有效率与抑制率；支撑层纳入 SIS 联锁健康度、旁路合规率、作业许可合规指数、MOC 变更闭环率、人员能力达标率。各指标均设定统一口径与取样窗口，并把启停、批次切换与联锁切换单独标识为高权场景。

从数据来源来看，评估数据由 SIS 与 DCS 实时事件、MES 计划与批次记录、作业许可与工单系统闭环状态汇聚获得，采集链路对接 OPC UA 与 API 并以位号为主键进行语义映射。进一步观察发现，不同装置与时段存在负荷与检修对指标的扰动，本研究把极差标准化与时间权重修正结合运用，把非定常工况与启停窗口纳入计分修正项，使横向对比与纵向趋势具有可比性。指标定义强调可核验性，例如把风险分级管控覆盖率界定为进入动态风险数据库的场景数除以应识别场景数，把隐患整改完成率分解为按期完成与一次通过两项并行打分，从而把治理质量与治理效率同步纳入刻画。

权重分配采用层次分析法构建目标层、准则层与指标层三层结构，以鄂尔多斯煤制烯烃与榆林煤制油两套装置的生产与安环骨干开展成对比较，形成判断矩阵，进行一致性检验后得到权重向量。采用几何平均法求解权重，计算表达如下。

$$w_i=\frac{\left(\prod_{j=1}^{n} a_{ij}\right)^{1/n}}{\sum_{k=1}^{n}\left(\prod_{j=1}^{n} a_{kj}\right)^{1/n}}$$

其中，w_i 表示第 i 个指标的权重，a_{ij} 为判断矩阵中第 i 个指标相对于第 j 个指标的重要性标度，n 为参与权重计算的指标数量。

在权重确定后，把各指标按月度与季度进行归一化计分并加权求和，输出装置级综合安全绩效得分，同时生成过程与支撑子维度得分，以便定位薄弱项。需重点关注的是，模型内置数据质量评分与缺失惩罚因子，把异常缺报与迟报转换为分值扣减，并把启停窗口的高权事件以时间邻近权重进行修正，使评估结果能够反映非定常工况下的真实风险水平。由此推导，评估体系在不改变生产节律的前提下，把双重预防机制的运行有效性沉淀为可计算、可追溯与可迭代的量化框架。

5 结语

研究表明，将风险分级管控作为前置屏障、将隐患闭环治理作为反馈调节，并以场景化识别与处置闭环贯穿全过程，能够显著提升煤化工装置在启停与联锁切换等高权场景下的安全韧性。以动态风险数据库、事件关联与移动工单为核心的数字化链条，使高等级风险实现快识别、快处置与可追溯；与 MES、DCS、SIS 的语义融合及标准化接口，为预警、许可、变更与旁路管理提供了一键贯通的执行通道；结果—过程—支撑三层指标与 AHP 权重模型，将治理有效性沉淀为可计算与可比的绩效刻画。实践同时提示成功落地的前提条件包括位号与语义统一、时间同步与数据质量保障、告警治理与功能安全标准对齐、旁路授权与 MOC 刚性执行。未来可在跨装置泛化、预测性维护与韧性评估、知识库持续学习等方面深化，进一步提升极端与非定常工况下的主动防御能力，并推动双重预防机制与企业经营管理一体化协同，形成安全绩效与生产节律同频共振的长效机制。

参考文献

[1] 陈海莲.双重预防机制下化工企业安全管理优化研究[J].品牌与标准化,2025,(06):158-160.

[2] 李志伟,黄起中,赵开功,张晓蕾.煤化工企业双重预防数字化平台构建与应用[J].中国安全科学学报,2024,34(S1):172-178.

[3] 袁亮,肖文东,蒋洋,赵军,梅晶,张教.基于双重预防机制的化工园区信息系统研究与设计[J].现代化工,2025,45(S1):370-374+380.

[4] 彭健锋,李林蔚.双重预防机制在长输油气管道的探索与实践[J].石化技术,2025,32(11):94-96.

[5] 罗兆琛,胡炜杰,卢永前,陈焕鑫,欧政.基于数字化转型的石化企业双重预防机制运行效果提升策略[J].现代化工,2024,44(S2):13-18.