

基于风险预警的化工工艺安全管理体系构建与应用

凌克强

广东 清远 511500

DOI:10.61369/ME.2025120030

摘要：本文围绕基于风险预警的化工工艺安全管理展开，涵盖风险预警机制理论、安全风险管理理论基础等多方面。介绍了工艺危害分析技术集成、本质安全导向工艺设计优化等内容，阐述了从智能控制到大数据预警等多项措施，强调在工程设计与运维管理的应用价值及未来发展方向。

关键词：化工工艺；风险预警；安全管理

Construction and Application of Chemical Process Safety Management System Based on Risk Warning

Ling Keqiang

Qingyuan, Guangdong 511500

Abstract : This article focuses on chemical process safety management based on risk warning, covering various aspects such as the theory of risk warning mechanism and the theoretical basis of safety risk management. This article introduces the integration of process hazard analysis technology, intrinsic safety oriented process design optimization, and elaborates on multiple measures from intelligent control to big data warning. It emphasizes the application value and future development direction in engineering design and operation management.

Keywords : chemical process; risk warning; safety management

引言

随着化工行业的发展，风险预警机制理论在化工工艺安全管理中持续演进。2022 年颁布的《化工园区安全风险智能化管控平台建设指南（试行）》强调了化工工艺安全管理的重要性。在此背景下，从风险预警机制理论的发展，到化工工艺安全风险管理理论基础，再到工艺危害分析技术集成等多方面，共同构建基于风险预警的化工工艺安全管理体系。通过优化各环节，包括设备监测、维护决策、智能控制等，实现化工工艺安全管理的创新应用，以应对复杂的安全生产形势，推动化工行业安全发展。

一、化工工艺安全风险管理理论框架

（一）风险预警机制理论演进

风险预警机制理论在化工工艺安全管理中不断演进。早期，工业过程安全预警模型处于初步探索阶段，随着化工行业的发展，逐渐出现了更为成熟的模型。其中，Bowtie 模型因其形象直观地展示风险因果关系，在化工安全领域受到关注，从最初仅用于简单风险场景分析，到如今不断适配复杂化工工艺，在多环节风险预警中发挥重要作用。LOPA 保护层分析从基础的风险防护评估，逐步深入到化工工艺的精细化风险管理，对化工系统中各保护层有效性评估的准确性不断提升。其在化工安全领域的适配性演变，反映了风险预警机制理论从传统向现代、从单一到综合的发展趋势，为化工工艺安全管理提供了更坚实的理论支撑^[1]。

（二）工艺安全管理体系理论基础

化工工艺安全风险管理理论基础涵盖 CCPS 过程安全要素框

架与 ISO 14224 设备可靠性标准等重要内容。CCPS 过程安全要素框架旨在全面识别、评估和控制化工过程中的风险，其核心要求涉及工艺设计、操作规程、人员培训等多个关键环节，确保化工工艺在整个生命周期内的安全性^[2]。ISO 14224 设备可靠性标准着重于设备的可靠性管理，从设备的选型、维护到更新，都制定了严格的规范，为化工工艺的稳定运行提供坚实保障。多层次防护体系则以这两者为依托构建，通过不同层次、不同角度的风险防控措施，如本质安全设计、安全仪表系统、应急响应计划等，形成层层递进的保护网，降低事故发生的可能性与后果严重程度，实现对化工工艺安全风险的有效管理。

二、本质安全导向的工艺设计优化

（一）工艺危害分析技术集成

在化工工艺安全管理体系中，工艺危害分析技术集成至关重

要。构建 HAZOP – LOPA – QRA 集成分析方法，可有效实现工艺参数偏差分析与保护层设计的动态耦合。HAZOP 分析能够系统地识别工艺过程中潜在的危险与可操作性问题，对工艺参数偏差进行详细剖析^[3]。LOPA 则在此基础上，进一步评估事故场景的风险，确定所需的保护层。而 QRA 通过定量风险评价，精确计算风险水平，为决策提供量化依据。将这三种分析方法集成，能够在工艺设计阶段，从不同层面和角度全面分析工艺危害，及时发现潜在风险，进而对工艺设计进行优化，使其更符合本质安全导向，显著提升化工工艺的安全性与可靠性。

（二）安全联锁系统设计标准

在本质安全导向的工艺设计优化中，安全联锁系统设计标准至关重要。需制定 SIL3 级联锁逻辑的架构规范，SIL3（安全完整性等级 3 级）代表着较高的安全要求，其联锁逻辑架构应严谨且科学，确保在危险状况出现时能迅速且准确地做出反应，防止事故扩大^[4]。同时，要建立基于 PFD（要求时失效概率）/PFH（每小时危险失效概率）指标的安全仪表功能验证体系。通过对 PFD/ PFH 指标的精确计算与评估，验证安全仪表功能的有效性，确保安全联锁系统在规定时间内可靠运行，及时切断危险来源或采取相应安全措施，为化工工艺安全提供坚实保障，实现本质安全导向下工艺设计的优化与完善。

三、智能过程控制技术体系构建

（一）设备完整性监测系统

1. 关键设备状态感知网络

关键设备状态感知网络是设备完整性监测系统的重要组成部分。通过部署多参数融合的振动 – 温度 – 腐蚀复合传感系统，可全方位获取关键设备的运行状态信息。振动参数能反映设备的机械运行稳定性，温度参数体现设备运行中的热状态，腐蚀参数则关乎设备的结构完整性^[5]。这些参数的融合监测，克服了单一参数监测的局限性，能更准确地捕捉设备潜在的故障隐患。基于此，进一步构建设备健康度实时评估模型，利用采集到的多源数据，对设备健康状况进行动态评估。该模型通过先进的算法，可及时发现设备健康度的变化趋势，为后续的风险预警和维护决策提供有力依据，实现对关键设备状态的精准感知与高效管理，提升化工工艺安全管理水平。

2. 预测性维护决策机制

预测性维护决策机制旨在依据设备完整性监测系统所收集的数据及开发的 RUL 预测算法，做出精准且合理的维护决策。借助先进的数据分析技术，深入挖掘设备运行数据背后隐藏的信息，评估设备的健康状况与潜在风险。基于剩余寿命驱动的维修策略优化模型^[6]，充分考虑维修成本、设备停机损失等多方面因素，综合权衡后制定出最优的维护计划。例如，当预测到设备剩余寿命接近临界值时，及时安排针对性的维护活动，既能避免设备突发故障导致的生产中断，又能有效降低过度维护带来的资源浪费，实现以最小的成本投入保障化工工艺安全、稳定运行的目标。

（二）智能控制联锁实施

1. DCS–SIS 协同控制架构

在智能过程控制技术体系构建的智能控制联锁实施中，DCS–SIS 协同控制架构起着关键作用。DCS（分布式控制系统）侧重于生产过程的常规控制与监测，SIS（安全仪表系统）则专注于在危险情况发生时执行紧急停车等安全动作。为实现两者协同，需设计有效的信息交互协议，但 SIS 保持独立运行，基于自身的安全逻辑和传感器数据判断潜在风险并适时介入，^[7] 从而在 DCS 发生故障或异常时仍能保障安全操作。同时，要构建失效保护机制，当 DCS 或 SIS 某一方出现故障时，系统能维持在安全状态，防止因故障引发化工生产事故。通过这种协同控制架构，化工工艺安全管理体系在过程控制环节实现更高效、更可靠的风险预警与应对，保障化工生产安全稳定运行。

2. 联锁投用有效性验证

联锁投用有效性验证是确保化工工艺安全的关键环节。在这一过程中，需从多方面进行验证。对智能控制联锁的各项参数进行严格核对，确保与设计要求相符，参数的精准性直接影响联锁动作的可靠性^[8]。通过模拟各类可能出现的异常工况，观察联锁系统能否及时、准确地做出响应，触发相应的安全措施，比如紧急停车、切断物料输送等操作，以此验证其在实际危险场景下的有效性。同时，检查联锁装置与其他安全设施之间的协同配合情况，保障整个安全系统的协调性和一致性。定期对已投用的联锁进行功能测试和评估，依据实际生产运行数据，分析联锁投用后对工艺安全风险的降低程度，持续优化联锁系统，切实提升化工工艺的安全性。

四、新型工艺技术集成应用

（一）大数据预警平台建设

1. 多源数据融合处理

在大数据预警平台建设中，多源数据融合处理是关键环节。化工生产涉及工艺参数、设备状态与环境数据等多源信息，需构建标准化接入及特征提取框架。对于工艺参数数据，精准采集温度、压力、流量等关键指标，通过归一化等方法进行标准化处理，以统一数据格式与量纲，便于后续分析。设备状态数据涵盖运行时长、振动频率等，利用数据挖掘技术提取故障特征。环境数据如温湿度、空气质量等，同样要规范采集与处理。通过这些多源数据的融合，运用机器学习算法进行特征提取与关联分析，挖掘潜在风险模式，实现对化工工艺风险的精准预警，为化工工艺安全管理提供有力支持^[9]。

2. 风险态势可视化

在基于风险预警的化工工艺安全管理体系中，风险态势可视化至关重要。通过开发基于数字孪生的三维风险热力图，能直观呈现化工工艺各区域风险分布状况。以不同颜色和热度标识风险程度，操作人员可迅速定位高风险区域。同时，结合分级预警推送机制，依据风险等级向相关人员精准推送预警信息。低风险通过系统消息提醒，高风险则立即触发短信、语音等强提醒。这种

可视化与预警推送相结合的方式,为管理人员提供全面、实时的风险态势感知,助其及时制定应对策略,有效降低化工工艺运行风险,保障生产安全^[10]。

(二) 智能感知技术创新

1. 特种传感装置研发

为实现基于风险预警的化工工艺安全管理,在特种传感装置研发方面,重点研制耐高温高压的MEMS传感器与分布式光纤监测装置。MEMS传感器凭借其微型化、集成化优势,可精准感知化工生产中复杂环境里的温度、压力等关键参数。通过优化材料与结构设计,提升其耐高温高压性能,确保在恶劣化工工况下稳定可靠运行,实时反馈关键数据。分布式光纤监测装置利用光纤的传感特性,实现对化工工艺管道沿线温度、应变等信息的分布式监测。其具有抗电磁干扰、耐腐蚀等特点,能够敏锐捕捉管道微小变化,为及时发现潜在泄漏、变形等安全隐患提供有力支持,两种装置相互配合,共同提升化工工艺安全管理中的智能感知水平,为风险预警筑牢基础。

2. 无线传输网络优化

在化工工艺安全管理体系中,无线传输网络优化至关重要。构建符合IEC 62591标准的WirelessHART网络冗余架构,能显著提升网络可靠性。该架构通过增加备用路径与设备,确保在部分网络组件出现故障时,数据传输仍不间断。比如当某一节点因设备老化或化工环境干扰而失效,冗余路径可及时接替数据传输任务。同时,优化网络拓扑结构,依据化工场地布局与设备分布,合理规划节点位置与连接方式,减少信号干扰与传输延迟。采用先进的信道分配算法,动态分配无线信道,避免不同设备间信号冲突,提升频谱利用率,进而保障风险预警相关数据能准确、快速地在网络中传输,为化工工艺安全管理提供有力的网络支撑。

(三) 本质安全工艺开发

1. 微反应器技术应用

在化工工艺安全管理体系构建中,微反应器技术应用具有重要意义。微反应器凭借微小的内部结构,能实现反应物料的精准

混合与高效传热传质。它可大幅缩减反应体积,量化这种体积缩减带来的风险消减效应,让反应过程更易控制,降低诸如因反应失控引发的安全风险。其连续流的特性,改变了传统间歇式反应的模式,减少物料积累,从根源上降低危险发生的可能性。通过精确调控反应参数,如温度、压力、流量等,使反应在更安全的条件下进行,从而有效提升工艺的本质安全性,为基于风险预警的化工工艺安全管理体系增添有力的技术支撑。

2. 工艺强化技术集成

工艺强化技术集成旨在通过融合超重力反应与过程强化技术,实现化工工艺的本质安全提升。超重力技术能极大强化传质和微观混合过程,使反应更高效、精准,从而降低反应失控风险。将其与过程强化技术结合,能有效减少设备体积、缩短工艺流程,降低潜在的泄漏与爆炸风险。通过对超重力反应过程中的温度、压力、流量等关键参数进行精确调控,并借助过程强化技术优化反应路径与条件,构建安全边际提升的量化评估模型。该模型可依据实时监测数据,准确评估工艺安全边际的变化,为工艺优化与风险预警提供科学依据,推动化工工艺向本质安全方向发展,提升整个化工生产系统的安全性与稳定性。

五、总结

基于风险预警的化工工艺安全管理体系,在工程设计与运维管理层面展现出显著创新应用价值。通过风险预警提前识别潜在风险,为工程设计提供精准方向,优化设计方案以增强工艺本质安全性;在运维管理中,实现实时监测与动态评估,及时发现并处理异常,降低事故发生概率。随着技术发展,数字孪生与AI技术在工艺安全领域的深化融合是必然趋势,将进一步提升风险预警的准确性与时效性。同时,标准化建设为体系推广与应用提供统一规范,人才培养则为体系持续优化提供智力支持。未来,需不断完善该体系,促进化工行业安全、稳定、高效发展,以应对日益复杂的安全生产形势。

参考文献

- [1] 郭永超. A企业财务风险预警模型构建与应用 [D]. 山东建筑大学, 2023.
- [2] 蒋刚军. 化工新材料产品研发项目风险评价与风险预警研究 [D]. 东华大学, 2022.
- [3] 余美茜. 基于功效系数法的海信家电风险预警体系构建研究 [D]. 江西师范大学, 2022.
- [4] 陈欣. 基于机器学习构建老年 PICC 导管相关血栓风险预警模型 [D]. 电子科技大学, 2022.
- [5] 余国强. 基于机器学习的债券违约风险预警模型研究与应用 [D]. 首都经济贸易大学, 2022.
- [6] 张启宝. 化工工艺安全管理中 HAZOP 的应用 [J]. 现代盐化工, 2021, 48(01): 102-103.
- [7] 孙宗稳. 化工工艺的风险识别与安全评价简析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(01): 7-9.
- [8] 朱振尧, 朱红玉, 朱亚光. 化工工艺风险识别与安全评价 [J]. 化工管理, 2023, (05): 152-154.
- [9] 李霞娟. 化工工艺的风险识别与安全评价 [J]. 化工管理, 2021, (36): 162-163.
- [10] 王喜梅. 化工工艺的风险识别与安全评价 [J]. 化工管理, 2021, (25): 168-169.