

基于智能化控制的化工工程安全生产管理体系构建 与经济发展前景

宗万承 (江苏天和制药股份有限公司, 江苏 扬州 225200)

摘要: 文章从本质安全理论、信息物理融合系统及预测性维护三重维度分析了智能化控制的理论基础, 探索了感知层、网络层、平台层、应用层构成的分层架构设计路径, 研究了监测预警、应急响应及运行保障的协同优化机制。研究表明, 智能化体系在压缩安全投入成本、延长装置可用时间的基础上, 为产业转型升级与企业市场竞争力增强开辟了可持续发展空间。

关键词: 智能化控制; 化工工程安全生产管理; 经济发展前景

中图分类号: TQ086; F426.7

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2026) 006-0004-03

Construction of Safety Production Management System of Chemical Engineering Based on Intelligent Control and Its Economic Development Prospect

Zong Wancheng (Jiangsu Tianhe Pharmaceutical Co., Ltd., Yangzhou Jiangsu 225200, China)

Abstract: This article analyzes the theoretical foundation of intelligent control from the triple dimensions of intrinsic safety theory, cyber-physical systems, and predictive maintenance. It explores the hierarchical architecture design path consisting of the perception layer, network layer, platform layer, and application layer, and studies the collaborative optimization mechanism of monitoring and early warning, emergency response, and operational support. The research indicates that the intelligent system opens up sustainable development space for industrial transformation and upgrading, as well as for enhancing the market competitiveness of enterprises, based on reducing safety investment costs and extending the available time of devices.

Keywords: intelligent control; chemical engineering safety production management; economic development prospects

化工生产涉及高温高压、易燃易爆等复杂工况, 传统人工监控模式难以实现全流程风险预警, 事故发生率居高不下直接制约企业经济效益。智能化控制技术依托传感器网络、大数据分析、自动化决策等手段, 能够实时捕捉生产参数异常波动, 提前介入潜在风险点, 将被动应急转化为主动防控。构建智能化安全生产管理体系不仅降低事故损失成本, 更优化资源配置效率, 缩短生产周期, 形成安全投入与经济产出的良性循环, 为化工企业可持续发展奠定技术基础。

1 基于智能化控制的化工工程安全生产管理体系构建的理论基础

智能化控制体系的构建植根于本质安全理论的深化演进, 该理论主张危险源辨识应从被动防护转向主动消除, 智能传感网络实时捕捉温度、压力、浓度等工艺参数的微小偏移, 将风险识别时间窗口从小时级推进至秒级, 为本质安全目标的实现提供了技术保障; 信息物理融合系统理论构成第二层支撑, 化工生产过程中物质转化的物理世界与数据流动的信息世界在该理论框架下形成闭环映射关系, 数字孪生技术将实体装置的运行状态投射至虚拟空间, 控制指令根据仿真结果实时调整, 物理设备响应与信息决策之间的时延

被压缩至毫秒量级; 预测性维护理论则突破了传统定期检修的经验局限, 设备劣化轨迹被转化为可量化的健康度曲线, 剩余寿命预测模型基于历史故障数据库的深度学习持续优化修正, 维护决策从时间驱动转向状态驱动, 装置非计划停机率因此大幅下降^[1]。

2 基于智能化控制的化工工程安全生产管理体系的构建路径

2.1 安全生产管理体系的总体架构设计

总体架构设计采用分层解耦的工程化思路, 感知层作为架构底座承担数据源头采集职责, 工艺装置关键部位部署的温度变送器、压力传感器、液位计、气体检测仪等硬件设施按照冗余配置原则布局, 单点故障不会导致监测盲区产生, 现场总线技术将分散分布的感知节点织成互联互通的数据采集网络; 网络传输层构建起数据流动的高速通道, 工业以太网、无线专网等通信介质根据实时性要求分级部署, 关键控制指令占用专用带宽保障传输时延可控, 视频监控、报表数据等非实时信息则复用共享链路提升资源利用效率; 云端平台层集成数据存储、模型运算、知识管理等核心功能模块, 分布式数据库容纳海量历史运行记录为算法训练提供样本支撑, 边缘计算节点分担部分

运算负载降低云端压力,预警规则引擎根据专家知识库自动生成告警触发条件;应用层面向不同管理角色提供差异化操作界面,一线操作人员获取简化的参数监视与异常提示,车间管理者调阅趋势分析与隐患统计报表,企业决策层则聚焦整体风险态势评估与资源配置建议。

2.2 智能化监测预警系统的建立

智能化监测预警系统的建立过程应从感知网络布局规划启动,依据化工装置的工艺特性、介质危险等级、历史事故数据等因素,在反应釜、储罐区、管廊带、装卸平台等关键区域部署温度、压力、流量、液位、可燃气体浓度、有毒气体浓度等多参数传感器,形成覆盖生产全流程的立体化感知网络。传感器选型需充分考虑化工环境的腐蚀性、防爆等级、测量精度等技术要求,并采用冗余配置策略保障数据采集的连续性^[2]。数据采集完成后,系统将实时数据流送入边缘计算节点进行初步清洗与特征提取,再上传至中央数据平台进行深度分析。预警模型的构建是核心环节,技术团队需融合机理分析法与机器学习算法,针对不同风险场景建立专属预测模型:针对设备故障采用长短期记忆网络捕捉时序特征,针对工艺偏差采用支持向量机识别异常模式,针对泄漏扩散采用计算流体力学模型进行后果仿真。在此基础之上,预警信息按照风险等级分级推送至操作人员、班组长、车间主任等不同层级管理者的移动终端,实现精准告警与快速响应。

2.3 智能化应急响应机制的优化

智能化应急响应机制的优化过程首先从预案数字化改造入手,技术人员需将传统文本预案拆解为结构化数据单元,把响应动作、责任岗位、资源清单、执行时限等要素逐条录入预案知识库,使计算机能够识别并调用相关内容;预案库建成后,系统即可根据事故类型、发生工段、泄漏介质、影响半径等参数自动匹配最优处置方案,生成可视化的操作流程供指挥人员决策参考。优化过程随后延伸至资源调度环节,智能调度模块实时接入消防设施分布、应急物资库存、救援队伍位置、医疗力量待命状态等动态数据,结合厂区地理信息系统计算最短响应路径,精准指引各类资源向事故现场快速集结。此外,多方协同指挥能力的提升是优化过程的关键一环,统一指挥平台打通企业安全部门、生产车间、外部消防救援机构、政府应急管理部门之间的信息通道,支持视频会商、电子沙盘推演、指令下达追踪等功能,保障应急处置全程信息透明、指令畅达,有效避免因信息孤岛导致的响应迟滞,显著缩短从事故发生到有效控制的时间窗口。

2.4 体系运行保障机制的完善

体系运行保障机制的完善过程需从制度建设、人才培养、技术运维、持续改进四个维度系统推进。制度建设层面,企业应制定智能化安全管理体系运行规程,明确各岗位在数据录入、系统操作、预警响应、隐患整改等环节的职责边界与操作标准,建立系统运行日志审查制度,定期核查数据质量与系统运行状态。人才培养层面,需构建复合型人才梯队培养机制,组织一线操作人员开展智能终端使用培训,提升其对预警信息的理解能力与快速响应意识;针对技术骨干开展数据分析、模型调优、故障诊断等专项技能培训,打造具备系统运维能力的核心技术团队。技术运维层面,需建立软硬件全生命周期管理制度,制定传感器定期校验计划、服务器巡检方案、网络安全防护策略等,保障系统基础设施的稳定运行。持续改进层面,应建立基于运行数据的反馈闭环机制,定期收集系统误报率、响应及时率等关键绩效指标,召开专题会议剖析薄弱环节,推动预警模型的迭代升级与业务流程的持续优化,形成体系自我完善的内生动力^[3]。

3 基于智能化控制的化工工程安全生产管理体系的经济发展前景

3.1 安全投入成本的控制效应

智能化控制体系对化工企业安全投入成本的控制效应主要体现在人力成本压缩、维护支出优化、事故损失规避三个层面。人力成本压缩源于智能巡检系统对传统人工巡检模式的替代,以往化工装置的日常巡检需配置大量专职巡检员,按照固定频次对设备状态进行逐一查看记录,不仅人员配置规模庞大,而且难以实现全天候无死角覆盖;智能巡检机器人配合固定式传感器网络的部署,能够实现关键设备参数的持续监测,单个中型化工装置的巡检人员配置可由原来的20余人缩减至5-8人,年度人力成本节省幅度达到60%以上。维护支出优化得益于预测性维护策略对传统定期维护模式的升级改造,传统模式下企业依据设备运行时长安排检修计划,往往造成过度维护或维护不足的问题,前者导致备件更换浪费,后者引发非计划停机损失;智能化体系依托设备健康状态评估模型,精准预判故障发生时间窗口,指导维护人员在最佳时机介入处置,实践数据表明此类策略可使年度维修费用下降25%-35%,备件库存周转率提升40%。事故损失规避是成本控制效应的核心体现,化工企业一旦发生安全事故,直接经济损失涵盖设备损毁、物料损耗、停产损失、环境治理费用等多个方面,间接损失还包括品牌声誉受损、订单流失、保险费率上调等连锁反应;智能化预警系统将事故消灭在萌芽阶段,据

行业统计显示,完成智能化改造的化工企业其事故发生率平均下降70%以上,由此避免的潜在经济损失远超体系建设投入。

3.2 生产运营效率的提升空间

智能化控制体系为化工企业生产运营效率的提升开辟了三个层次的优化空间,装置可用时间的延长构成首要维度。化工生产连续性特征决定了任何非计划停机都会引发产能损失,重新开车过程还会造成能源物料的额外消耗,智能化体系将设备故障征兆提前数日甚至数周暴露出来,企业得以将维护活动安排在计划检修窗口期内集中处理,突发性停机对生产节奏的冲击被彻底消除,年度装置运行时间可从传统的335天延长至354天以上,相当于凭空获得近三周的满负荷生产能力。

工艺参数的动态寻优构成第二层次的效率空间,化工反应涉及温度、压力、流量、配比等多个变量的复杂耦合,人工操作受限于响应速度只能维持相对稳定的工况点,智能控制算法每秒完成数千次运算迭代,实时捕捉最优参数组合,反应转化率、产品选择性等核心指标持续逼近理论极限值,单位原料的产品产出量提升三至五个百分点,生产成本结构得到实质性改善。

产能瓶颈的精准突破开辟了第三层次的增长空间,智能化体系对全流程物料流、能量流进行实时追踪分析,制约产能释放的关键环节被准确识别定位,改造投资因此能够精准投向回报率最高的薄弱点,安全裕度的科学量化同时消除了管理者提升负荷率的心理顾虑,部分企业装置实际产能较设计值增长十至十五个百分点,资产盈利能力实现跨越式提升。

3.3 化工产业转型升级的推动作用

智能化控制体系在化工产业转型升级进程中扮演着技术底座重构的关键角色,其推动作用首先体现在行业安全评价标准的数字化转型上。传统化工企业依赖专家经验进行风险评估,评价结果受主观因素影响较大,企业间管理水平难以横向比较,监管机构缺乏统一的量化考核依据;智能化体系将风险识别、隐患排查、应急能力等指标转化为可量测的数字信号,监管部门据此建立起分级分类的动态监管机制,倒逼落后企业加速改造升级,推动全行业安全管理水平向标杆企业看齐。

产业链协同深度的拓展构成推动作用的第二层次,上游原料供应商能够实时掌握下游企业的储罐液位、消耗速率等关键信息,配送计划据此实现精准匹配,既避免了超量存储带来的安全隐患,也消除了供应中断造成的生产波动;下游企业则可溯源追踪原料

批次的质量参数,将问题精准定位至具体供应环节,供应链整体风险可控性显著增强。此外,绿色低碳目标在智能化体系支撑下实现了与安全管理的深度融合,能耗数据、排放指标被纳入实时监控范畴,优化算法在确保工艺安全的同时寻求资源利用效率的最大化,企业不再需要在安全投入与环保改造之间做权衡取舍,两类需求在技术路径上形成协同,产业整体向集约型发展模式加速演进。

3.4 企业市场竞争力的增强趋势

智能化控制体系对企业市场竞争力的增强主要聚焦于客户信任强化与差异化壁垒构建两个核心维度。客户信任强化源于供应可靠性的量化背书,下游采购方在供应商选择时面临的最大的不确定性在于突发性停产风险,智能化企业能够向客户开放实时运行数据接口,装置健康度评分、预警响应时效、备用产能储备等关键指标实现透明化展示,采购决策中的信息不对称问题得到根本性消解,客户因此愿意支付稳定性溢价,长期供货协议的签订比例显著攀升,企业在价格博弈中掌握更强的主动权。

差异化壁垒构建体现在高端市场准入资格的率先获取上,精细化工、电子化学品等高利润领域对供应商设置了严格的安全审计要求,智能化平台为第三方审核提供完整的数字化证据链,审计周期从传统模式的数周压缩至数日,通过率大幅提高,企业由此进入竞争者难以企及的蓝海市场,产品组合向高附加值端迁移,盈利能力实现质的跃升。

4 结束语

智能化控制体系为化工企业安全管理模式的根本性变革提供了切实可行的技术路径,其价值不仅体现在风险防控能力的跃升,更在于将安全投入转化为生产力提升的内生动力,使企业在保障本质安全的基础上获得成本优势、效率优势、市场优势的协同释放。未来随着人工智能算法的持续优化,传感器技术的成本下降,5G网络的深度覆盖,智能化体系将从大型企业向中小企业加速渗透,从基础化工向精细化工延伸拓展,最终推动整个行业完成从传统要素驱动向创新驱动的战略转型。

参考文献:

- [1] 陈作如. 化工工程安全管理存在的问题及措施探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(03): 89-91.
- [2] 高瑞敏. 化工工程中的安全生产管理与应急响应机制研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(19): 7-9.
- [3] 冯宇. 化工工程安全风险识别与控制措施[J]. 化纤与纺织技术, 2024, 53(08): 115-117.