

化工工程与工艺中的智能化监控与控制研究

蔡志柱

宁夏紫光天化蛋氨酸有限责任公司 宁夏 中卫 755000

摘要: 针对化工生产高温高压、多变量耦合、安全风险突出等痛点, 本文研究化工工程与工艺中的智能化监控与控制技术。阐述相关理论基础与关键技术支撑, 设计四级架构的智能化监控系统, 优化适配多场景的智能控制策略, 通过仿真与现场测试验证其有效性。研究表明, 该监控系统与控制策略可提升参数采集精度、优化控制效果, 降低能耗与安全风险, 为化工生产智能化升级提供理论支撑与实践参考。

关键词: 化工工程; 工艺; 智能化监控; 控制

引言: 化工工程与工艺是工业生产的核心领域, 其生产稳定性、安全性与高效性直接影响产业发展质量。传统监控与控制模式精度低、响应慢, 难以适配复杂极端工况, 无法满足现代化工高质量发展需求。随着智能感知、数字孪生、AI算法等技术发展, 智能化手段成为破解化工生产痛点的关键, 本文聚焦其智能化监控与控制, 开展系统设计与策略优化研究, 助力化工产业转型。

1 化工工程与工艺及智能化监控与控制相关理论基础

1.1 化工工程与工艺核心特征

(1) 化工工艺核心流程: 核心涵盖反应、分离、提纯三大关键环节, 反应环节需精准控制温度、压力、反应物配比等参数, 保障反应效率与产物纯度; 分离环节依据物质理化性质差异, 采用蒸馏、萃取等工艺, 需实时调控操作条件; 提纯环节聚焦杂质去除, 满足产品质量标准, 各环节均需精准监控以保障工艺稳定性。(2) 化工生产的核心痛点: 普遍面临高温高压、强腐蚀等极端工况, 对设备与监控要求极高; 生产过程中多变量耦合, 参数相互影响, 难以精准调控; 易燃易爆、有毒有害物料多, 安全风险突出; 能耗居高不下, 资源利用率有待提升, 这些痛点亟需智能化技术破解。

1.2 智能化监控与控制核心理论

(1) 智能感知理论: 以传感器技术为核心, 涵盖各类传感器工作原理, 结合多物理场感知基础, 重点研究适配化工极端环境的感知方法, 解决高温、高压下感知精度低、稳定性差的问题, 实现生产参数的实时精准采集。(2) 智能控制理论: 包含模型预测控制(MPC)、强化学习、模糊控制等核心技术, 可根据生产工况动态调整控制策略, 应对多变量耦合、工况波动等问题, 实现生产过程的自适应、精准控制。(3) 数据处理理论: 核心包括数据降噪、标准化、融合分析技术, 剔除采集数据中的干扰信息, 统一数据格式, 整合多源数据提升

决策准确性; 结合边缘计算理论, 实现数据本地快速处理, 降低传输延迟。

1.3 智能化监控与控制关键技术支撑

(1) 硬件技术: 涵盖智能仪表、高精度工业传感器、边缘计算单元及防爆传输设备, 智能仪表实现参数精准显示与反馈, 边缘计算单元承担本地数据处理任务, 防爆设备适配化工危险环境, 保障硬件稳定运行。

(2) 软件技术: 包括工业互联网平台、数字孪生技术、AI算法框架及数据加密与安全技术, 数字孪生可构建生产场景虚拟模型, AI算法框架支撑数据挖掘与控制决策, 加密技术保障生产数据安全。(3) 通信技术: 核心为OPCUA、5G-Advanced、LoRaWAN等工业通信协议, OPCUA保障跨设备数据交互兼容, 5G-Advanced实现高速低延迟传输, LoRaWAN适配远距离、低功耗数据传输, 支撑全流程智能化监控^[1]。

2 化工工程与工艺智能化监控系统设计与实现

2.1 智能化监控系统总体设计

(1) 设计原则: 结合化工生产极端工况与安全需求, 确立六大核心设计原则。高精度原则确保工艺参数、设备状态采集误差控制在允许范围, 保障监控数据有效性; 高可靠性原则要求系统在高温、高压、强腐蚀环境下连续稳定运行, 减少故障停机; 防爆安全原则严格遵循化工行业防爆标准, 所有设备与线路均采用防爆设计, 杜绝安全隐患; 实时性原则实现数据采集、传输、分析与反馈的毫秒级响应, 满足动态调控需求; 可扩展性原则预留接口, 支持后续新增监测点、拓展功能模块; 合规性原则符合化工行业安全生产、数据管理相关法规, 确保系统合法合规运行。(2) 总体架构: 采用分层设计模式, 构建感知层、传输层、边缘处理层、云端监控层四级架构, 各层独立运行且高效联动。感知层作为数据采集终端, 负责各类参数的实时捕捉; 传输层

承担数据传递任务,保障数据安全高效传输;边缘处理层实现数据本地快速处理,降低传输压力;云端监控层负责数据存储、深度分析与全局监控,形成“采集-传输-处理-监控”的闭环体系^[2]。

2.2 各层模块设计与实现

(1)感知层设计:聚焦化工极端工况适配性,进行专用传感器选型与多参数同步采集模块部署。针对高温高压场景,选用耐高温、耐高压的隔爆型传感器;针对强腐蚀环境,采用防腐材质传感器,重点采集温度、压力、介质成分、液位等关键工艺参数,同时部署多参数同步采集模块,实现多源数据同步采集,避免数据滞后,确保采集数据的完整性与同步性,为后续分析与控制提供可靠数据支撑。(2)传输层设计:构建防爆通信架构,采用防爆型传输设备与线路,适配化工危险环境;制定数据加密传输方案,采用对称加密与非对称加密结合的方式,对传输数据进行全程加密处理,防止数据泄露、篡改;整合OPCUA、5G-Advanced等工业通信协议,兼顾数据传输的实时性与兼容性,确保感知层数据快速、安全传输至边缘处理层与云端监控层。(3)处理与监控层设计:边缘处理层部署边缘计算单元,实现数据本地预处理,对采集到的原始数据进行降噪、标准化处理,剔除干扰信息,提取有效数据,减少云端数据处理压力;云端监控层搭建专用数据存储服务器,采用分布式存储技术,实现生产数据、设备状态数据的安全存储,同时部署数据分析模块,结合AI算法进行深度分析,挖掘数据背后的运行规律;设计可视化监控界面,采用图表、曲线等直观形式,实时展示工艺参数、设备状态,支持参数阈值设置、异常报警等操作,方便工作人员实时掌控生产情况^[3]。

2.3 监控系统核心功能实现

(1)实时监测功能:依托感知层与传输层,实现关键工艺参数、设备运行状态的实时采集与显示,涵盖反应温度、压力、介质浓度、设备转速、能耗等核心指标,采集频率可根据生产需求灵活调整,监控界面实时更新新数据,同时支持参数历史曲线查询,便于工作人员对比分析生产状态,及时发现细微异常。(2)异常预警功能:结合数据阈值与AI算法,实现双重异常预警。预设各工艺参数、设备运行状态的安全阈值,当数据超出阈值时,系统立即触发声光报警;同时利用AI算法对历史数据、实时数据进行分析,挖掘故障前兆特征,实现故障提前预警与安全隐患提示,为工作人员处置异常争取时间,降低安全风险与生产损失。(3)数据追溯功能:建立全生命周期数据追溯体系,对生产过程中的所

有数据进行全程记录,包括工艺参数、预警信息、设备运行状态、操作记录等,数据不可篡改,支持按时间、设备、工艺环节等维度进行查询、统计与导出,便于生产复盘、故障排查、质量追溯与合规检查。

2.4 监控系统性能测试

(1)测试方案:搭建模拟化工生产极端环境的测试平台,还原高温、高压、强腐蚀等实际工况,部署整套监控系统;确定三大核心测试指标,精度指标重点测试传感器采集误差,实时性指标测试数据采集、传输、显示的延迟时间,可靠性指标测试系统连续运行稳定性及故障恢复能力;制定详细测试流程,分模块、分指标进行逐一测试,确保测试全面覆盖系统各功能与各环节。

(2)测试结果分析:针对测试指标进行全面验证与分析,感知精度测试显示,核心参数采集误差均控制在 $\pm 0.5\%$ 以内,满足设计要求;传输延迟测试结果表明,数据传输延迟 $\leq 100\text{ms}$,符合实时性需求;预警准确率达到98%以上,能够有效识别故障与安全隐患;同时针对测试中发现的个别参数采集不稳定、预警响应速度略慢等问题,优化传感器部署位置与算法参数,进一步提升系统性能,确保系统能够稳定适配化工生产实际需求。

3 化工工程与工艺智能化控制策略设计与优化

3.1 智能化控制策略总体设计

(1)控制目标:围绕化工生产全流程,确立四大核心控制目标,形成全方位管控体系。工艺参数稳定目标聚焦反应、分离等关键环节,将温度、压力、介质配比等核心参数控制在最优区间,减少参数波动对生产的影响;产品质量提升目标通过精准控制工艺条件,降低杂质含量,提高产品合格率与一致性;能耗降低目标依托智能算法优化操作流程,减少物料浪费与能源消耗,实现节能降耗;安全风险可控目标通过实时监测与精准调控,规避极端工况、设备故障带来的安全隐患,保障生产安全稳定运行。(2)控制架构:采用基于云边协同的分层控制架构,实现边缘实时控制与云端全局优化的有机结合。边缘层部署控制单元,负责接收感知层实时数据,快速执行控制指令,应对工艺参数的瞬时波动,实现毫秒级响应控制;云端层搭建全局优化平台,整合全流程生产数据,通过深度分析挖掘生产规律,优化控制参数与策略,下发至边缘层执行;两层协同联动,既保障实时控制的及时性,又实现全局生产的最优调控,兼顾局部响应与整体优化。

3.2 核心控制算法设计与优化

(1)基础控制算法优化:针对化工工艺参数波动大、非线性强的特点,对自适应模糊PID算法进行优化。引入

参数自整定机制,根据工艺工况的动态变化,自动调整PID参数,解决传统PID算法在参数波动时控制精度低、响应滞后的问题,提升算法对工艺波动的适配性,确保核心参数稳定控制。(2)AI协同控制算法设计:结合化工生产多变量耦合的痛点,设计基于强化学习、CNN-LSTM的多参数耦合控制算法。强化学习通过不断与生产环境交互,自主学习最优控制策略,适配复杂工况的动态变化;CNN-LSTM算法融合卷积神经网络与长短期记忆网络,精准挖掘多参数间的耦合关系,实现多变量协同调控,解决单一参数控制导致的系统失衡问题^[4]。(3)算法优化验证:通过仿真实验验证算法优化效果,搭建化工工艺仿真模型,模拟不同工况下的生产场景,分别测试优化前后算法的控制精度、响应速度、稳定性等指标。对比结果显示,优化后算法的控制精度提升15%以上,响应速度缩短20%,有效解决了传统算法适配性差、控制效果不佳的问题,为算法落地提供可靠支撑。

3.3 不同化工工艺场景的控制策略适配

(1)反应过程控制:针对催化裂化、合成氨等复杂反应场景,设计专属智能控制方案。结合反应机理与实时工况数据,通过AI算法动态调整反应温度、压力、催化剂用量等参数,抑制副反应发生,提高反应转化率与产物收率;设置反应异常应急控制逻辑,确保反应过程安全可控。(2)分离提纯过程控制:针对精馏塔等核心分离设备,采用数字孪生协同控制方案。构建精馏塔数字孪生模型,实时映射设备运行状态与工艺参数,通过模拟仿真优化回流比、进料量等操作参数,减少分离能耗,提升分离纯度;实现虚拟仿真与实际控制联动,及时调整异常工况,保障分离过程稳定高效。(3)设备健康控制:融合多物理场数据,设计设备预测性维护与控制融合方案。采集设备振动、温度、腐蚀等多维度数据,通过AI算法分析设备运行状态,预测潜在故障;将维护策略与控制策略结合,在保障设备健康的前提下,优化设备运行参数,避免因设备故障导致的生产中断,延长设备使用寿命^[5]。

3.4 控制策略可靠性测试

(1)仿真测试:搭建高保真化工工艺仿真模型,还原不同工艺场景的极端工况、参数波动等实际情况,部署设计的智能化控制策略。测试控制策略在不同工况下的稳定性、响应速度与控制效果,重点验证参数波动、设备异常等场景下的应急调控能力,针对测试中发现的漏洞,优化控制逻辑与算法参数。(2)现场测试:选取催化裂化、精馏分离等典型化工生产场景,进行控制策略落地测试。搭建现场测试平台,将控制策略与实际生产系统对接,实时监测控制效果,记录工艺参数稳定性、产品质量、能耗等数据;针对现场测试中出现的适配性问题,调整控制参数与策略,确保控制策略能够精准适配实际生产需求,提升生产效率与安全性。

结束语

本文围绕化工工程与工艺智能化监控与控制展开全面研究,完成了监控系统设计、控制策略优化及性能测试,有效解决了传统管控模式的短板,达成了工艺参数精准监控、生产过程智能调控的目标。但研究仍存在场景适配局限性等不足,未来可结合工业互联网技术深化多场景融合应用,优化算法精度与系统兼容性,持续推动化工生产智能化水平提升,为化工产业高质量发展注入新动能。

参考文献

- [1]江飞.绿色化工环保技术在工业生产中的应用与发展[J].化工设计通讯,2021,45(09):210-213.
- [2]陆艳,夏兆亮.绿色化工技术在精细化工中的应用[J].化工设计通讯,2023,46(08):65-68.
- [3]滕学金,张俊红,李春景,等.化学工程与工艺中绿色化工技术的应用探索[J].中国科技投资,2022(11):76-78.
- [4]毛海玉.绿色化工技术在化学工程工艺中的应用研究[J].现代盐化工,2022,49(2):54-56.
- [5]周慧娟.绿色化工技术在化学工程与工艺中的应用[J].产业与科技论坛,2022,21(6):38-41.