

化工仪表与电气控制系统协同应用研究

刘小伟

中盐内蒙古化工股份有限公司 内蒙古 阿拉善盟 750336

摘 要: 化工仪表与电气控制系统的协同应用是实现化工生产自动化、智能化的关键。本文系统梳理了仪表检测与电气控制的理论基础,分析了协议融合、逻辑互锁、HMI 融合设计等关键协同技术,结合反应釜、精馏塔、压缩机组及公用工程等典型场景,阐述了协同控制在工艺参数调节、安全联锁、节能优化中的实际应用效果,并对 AI 预测性维护、数字孪生、5G/TSN 等前沿方向进行了展望,为化工智能制造转型提供理论与实践参考。

关键词: 化工仪表; 电气控制; DCS/PLC 集成; 协同控制; 工业自动化

引言: 化工生产具有高温、高压、易燃易爆等特点,对过程控制的精度与安全性要求极高。传统模式下,仪表系统与电气控制系统独立运行,存在数据孤岛、协同不足、响应滞后等问题,制约了生产效率与安全水平。随着 DCS/PLC 集成技术与工业通信协议的发展,两类系统的深度协同已成为行业趋势。本文围绕化工仪表与电气控制系统的协同机制、关键技术、典型应用及未来方向展开研究,旨在为化工自动化向智能化升级提供系统性参考。

1 化工仪表系统与电气控制系统理论基础

1.1 化工仪表系统概述

化工仪表系统是化工生产过程感知、检测与信号传输的核心载体,是实现化工自动化生产的基础单元,主要负责对生产过程中温度、压力、流量、液位、成分等关键工艺参数进行实时采集、转换与传输。该系统包含检测元件、变送器、显示仪表、调节仪表及执行机构等核心设备,具备高精度检测、信号标准化转换、实时数据反馈等核心功能。化工生产具有高温、高压、易燃易爆、腐蚀性强的特点,因此化工仪表需具备防爆、防腐、抗干扰、稳定性强的特性,可适配复杂恶劣的工业生产环境^[1]。仪表系统以模拟信号或数字信号为传输载体,将现场工艺参数转化为控制系统可识别的标准信号,为后续参数调节、逻辑控制、安全联锁提供精准的数据支撑,是保障化工生产工艺稳定、参数可控的第一道核心环节。

1.2 电气控制系统概述

电气控制系统是化工生产设备动力驱动与运行管控的核心系统,主要依托断路器、接触器、继电器、变频器、PLC、电机等电气设备,实现对生产机械设备的启

停、调速、保护、联动控制,保障化工生产动力系统稳定运行。该系统核心作用是接收控制指令,驱动泵体、风机、搅拌器、压缩机等生产设备运行,同时具备过载、短路、欠压、接地等电气故障保护功能,可有效规避电气设备损坏及生产安全事故。相较于普通电气控制系统,化工电气控制系统对安全性、连续性、可靠性要求更高,需适配连续化、规模化的化工生产模式。系统依托电气控制逻辑完成设备基础运行管控,同时可接收上层控制指令,配合工艺参数完成动态调节,是衔接生产动力设备与自动化控制系统的关键枢纽。

1.3 协同控制的物理基础

化工仪表与电气控制系统的协同控制,依托信号互通、能量匹配、时序同步三大物理基础实现深度联动。从物理层面而言,仪表系统负责工艺状态的精准感知,提供实时工艺数据,电气控制系统负责设备动力执行与状态反馈,二者形成“感知-决策-执行-反馈”的闭环控制体系。信号互通是协同核心物理前提,标准化的电信号可实现两类系统的数据对接与指令传输;能量匹配保障电气执行设备的功率、运行状态适配工艺参数调节需求,避免参数调节与设备运行不匹配的问题;时序同步则确保工艺参数采集、控制指令下发、设备动作执行保持时间统一,杜绝控制滞后与动作偏差。同时,工业现场的屏蔽接地、抗干扰布线、电压电流适配等物理工程设计,为两类系统稳定协同运行提供环境保障,是实现工艺与设备一体化控制的底层支撑。

2 仪表与电气协同的关键技术与通信集成

2.1 协议融合与数据传输

协议融合与数据传输是实现仪表与电气系统协同联动的核心通信技术,解决了两类系统通信标准不统一、

数据无法互通的核心问题。传统化工生产中,仪表系统多采用 4-20mA 模拟信号、HART 协议,电气控制系统常用 Modbus、Profibus 等总线协议,协议壁垒导致数据孤岛问题突出。协议融合技术通过网关转换、协议适配、数据封装等方式,实现不同通信协议的兼容对接,完成工艺检测数据与电气设备运行数据的双向传输。数据传输过程依托工业总线、以太网等传输介质,搭配数据校验、断点续传、加密传输技术,保障数据传输的实时性、准确性与稳定性。通过协议融合,控制系统可统一采集仪表工艺数据与电气设备工况数据,为全域生产调控、故障溯源、数据统计提供完整的数据支撑,是实现系统智能化协同的核心前提^[2]。

2.2 逻辑互锁与控制策略优化

逻辑互锁与控制策略优化是保障化工生产安全、稳定、高效运行的核心协同控制技术。逻辑互锁依托仪表检测数据与电气设备运行状态,搭建双向联锁控制逻辑,针对化工生产高危工况设置安全防护机制。当仪表检测到温度超标、压力超限、液位异常等工艺故障时,可通过联锁逻辑快速触发电气设备停机、泄压、切断进料等保护动作;当电气设备出现过载、停机等故障时,也可反向联动工艺参数调节,规避工艺紊乱问题。控制策略优化则基于两类系统的协同数据,摒弃传统单一参数调节模式,采用自适应 PID 控制、分段调节、模糊控制等优化算法,根据设备运行工况动态调整工艺参数调节幅度与速度。通过逻辑互锁筑牢生产安全底线,通过策略优化提升控制精度与生产稳定性,有效降低生产波动与能耗损耗。

2.3 人机交互界面(HMI)的融合设计

人机交互界面(HMI)融合设计是实现仪表与电气协同可视化管控的重要手段,打破了传统工艺界面与电气设备界面分离的管控模式。融合后的 HMI 界面整合仪表工艺参数监测、电气设备状态监控、控制操作、故障报警、数据记录等全维度功能,将温度、压力等工艺数据与电机转速、设备电流、运行状态等电气数据集中展示。界面采用分区可视化设计,可实时呈现生产全域运行状态,操作人员无需切换多个系统界面,即可完成参数监控、设备操控、联锁复位、参数修改等操作。同时,融合 HMI 具备智能报警功能,可关联工艺异常与电气故障,精准定位故障点位与诱因,并存储历史运行数据与操作记录。这种一体化交互设计大幅简化操作流程,降低人工操作失误概率,提升化工生产管控的便捷性与高效性。

3 典型化工场景下的协同应用分析

3.1 反应釜温度与搅拌电机控制的协同

反应釜是精细化工、医药化工的核心反应设备,温度参数与搅拌电机运行状态直接决定反应效率与产品质量,二者协同控制是反应釜稳定运行的关键。在生产过程中,温度仪表实时采集釜内物料温度,将数据传输至控制系统,当温度偏离工艺设定区间时,系统联动电气控制系统调节加热、冷却介质流量。同时,搅拌电机的转速、运行时长直接影响物料换热均匀度,电气系统实时反馈电机转速、负载电流数据,控制系统结合温度变化趋势动态调整电机转速。升温阶段可提高搅拌转速,加快物料换热;恒温阶段降低转速,维持反应稳定。若仪表检测到温度急剧异常,系统触发电气联锁,控制搅拌电机平稳停机并关闭加热系统,避免物料过热变质、釜内压力骤升等安全问题,全方位保障反应过程稳定可控。

3.2 精馏塔回流比控制与进料泵的联动

精馏塔是化工分离提纯的核心设备,回流比与进料流量的稳定匹配是保障精馏分离精度、提升产品纯度的关键,需依托仪表与电气系统联动控制实现。生产中,流量、液位、组分仪表实时检测精馏塔进料流量、塔釜液位、塔顶产品纯度等参数,将实时数据传输至控制系统。控制系统根据工艺要求计算最优回流比,同步联动电气系统调节进料泵、回流泵的运行频率与转速,实现进料量与回流量的动态匹配^[3]。当进料流量出现波动时,仪表实时捕捉参数变化,控制系统快速修正回流泵运行参数,稳定回流比;当塔釜液位过高或过低时,联动进料泵启停与调速,避免塔内气液失衡。该协同联动模式有效解决传统单一控制导致的分离效率低、产品纯度波动大的问题,提升精馏系统运行稳定性与生产效率。

3.3 大型压缩机组的仪表保护与电气联锁

大型压缩机组是石油化工、煤化工装置的关键动力设备,属于高危核心设备,其仪表保护与电气联锁协同是设备安全运行的核心保障。压缩机组配备振动、温度、压力、转速等高精度检测仪表,全天候监测机组轴承温度、机身振动、进出口压力、润滑油压力等关键参数。仪表系统实时采集运行数据并进行阈值判断,当出现振动超标、轴温过高、油压不足等异常工况时,立即向电气控制系统发送联锁信号。电气系统接收信号后快速执行保护动作,触发机组紧急停机、切断进气阀门、启动辅助油泵等操作,杜绝机组轴瓦烧毁、机身损坏、介质泄漏等重大安全事故。电气系统反馈机组启停、故

障状态,辅助仪表系统完成故障溯源与数据记录,实现机组运行状态全程可控、故障快速防护,保障大型机组长周期稳定运行。

3.4 公用工程系统(循环水、蒸汽)的优化

循环水、蒸汽等公用工程系统是化工装置连续运行的基础保障,其仪表与电气系统的协同优化可有效降低生产能耗、提升系统运行效率。公用工程系统中,温度、压力、流量仪表实时监测循环水水温、水压、流量及蒸汽压力、温度、消耗量等参数,全面采集公用工程运行数据。控制系统结合生产装置负荷变化,联动电气系统调节循环水泵、蒸汽输送泵的运行频率与台数,实现按需供能。当生产装置负荷降低时,仪表检测到介质参数富余,系统自动降低水泵转速、关停冗余设备,减少能耗浪费;当负荷升高时,提前联动设备提负荷,保障介质供应稳定。通过联锁协同实现异常防护,如水压过低时联动备用泵启动,蒸汽超压时联动泄压装置动作,在保障生产稳定的前提下,实现公用工程系统节能优化运行。

4 未来展望:面向智能制造的深度融合

4.1 基于 AI 的预测性协同维护

基于人工智能的预测性协同维护,是化工仪表与电气系统融合发展的重要方向,彻底颠覆传统事后维修、定期检修的运维模式。依托 AI 算法搭建智能分析模型,实时采集仪表检测数据、电气设备运行参数、设备历史故障数据等海量信息,通过机器学习、大数据分析技术挖掘设备运行潜在故障规律。模型可精准预判仪表精度漂移、传感器老化、电气电机磨损、线路老化等潜在故障隐患,提前预警故障发生时间与故障点位。同时, AI 系统可实现两类设备的协同运维分析,判断仪表参数异常是否由电气设备故障导致,规避单一数据误判问题。基于预判结果,系统自动生成最优维护方案,指导工作人员提前开展设备检修与校准,有效降低设备故障停机概率,延长设备使用寿命,大幅提升化工装置运维智能化与高效化水平。

4.2 数字孪生技术

数字孪生技术为化工仪表与电气系统的深度融合提供了虚拟仿真与全域管控平台,推动化工生产从自动化向智能化、可视化升级。该技术通过构建与现场化工生产装置、仪表系统、电气系统一比一映射的虚拟孪生模型,实时接入现场仪表采集的工艺数据与电气设备运行

数据,实现虚拟模型与物理设备的实时同步迭代。工作人员可依托虚拟模型,模拟不同生产工况下仪表与电气系统的协同运行状态,提前预判生产波动、设备运行隐患,优化控制策略^[4]。同时,数字孪生模型可实现设备全生命周期管理,记录仪表校准数据、电气设备运维记录、系统联动运行数据,为工艺优化、设备运维、故障溯源提供全方位数据支撑,有效降低生产调试成本与运行风险。

4.3 5G/TSN(时间敏感网络)在协同中的应用

5G 与 TSN 时间敏感网络的融合应用,彻底解决了传统工业网络传输延迟高、时序错乱、数据传输不稳定的痛点,为仪表与电气系统高精度协同控制提供网络支撑。5G 技术具备高速率、低延迟、广连接的优势,可实现现场海量仪表、电气设备数据的实时上传与控制指令的极速下发,满足化工全域数据传输需求。TSN 时间敏感网络则通过精准时序同步、数据优先级划分、流量调度机制,解决多设备、多系统数据传输时序混乱问题,保障工艺数据采集、指令传输、设备执行的时序精准统一。二者结合可实现化工生产分布式设备的高精度协同控制,支撑远程操控、无人值守、智能联动等高端应用场景,大幅提升化工控制系统的实时性、稳定性与扩展性,助力化工智能制造转型升级。

结束语

化工仪表与电气控制系统的协同,已从简单信号对接发展为涵盖协议融合、逻辑互锁、智能管控的一体化控制体系,显著提升了生产安全性与运行效率。面对智能制造转型需求, AI 预测性维护、数字孪生、5G/TSN 等技术将进一步打破系统边界,实现全域感知、精准决策与自适应控制。未来,两类系统的深度融合将持续推动化工行业向安全、高效、绿色方向发展。

参考文献

- [1] 陈鹏. 石油化工仪表与控制系统的应用 [J]. 当代化工研究, 2025(18):124-126.
- [2] 施洋. 石油化工电气仪表自动化计量与通信的集成控制系统研究 [J]. 化工管理, 2025(23):63-65.
- [3] 刘昌健. 化工电气自动化仪表安装检修技术研究 [J]. 天津化工, 2025, 39(6): 41-43.
- [4] 余顺, 翟琨. 基于化工分散控制系统 I/O 控制点设计与实践的思考 [J]. 氮肥与合成气, 2023, 51(5):47-50.