

化工反应釜的自动化控制工艺与安全性能提升

夏培豪 周晨植 王海浪

温州市工业设计院有限公司 浙江 温州 325000

摘要: 化工反应釜是多相化学反应的核心设备,其控制精度与安全性能直接影响化工生产的效率与安全性。本文先分析反应釜的结构流程及强耦合、大滞后等动态特性,再设计分层模块化自动化控制系统,采用优化PID与智能自适应组合算法实现温压精准调控;通过安全评估识别各类风险,构建工艺、设备、连锁三级防护体系,并完成系统集成调试。实践表明,该方案有效提升了反应釜控制稳定性与安全防护能力,为其自动化升级与安全性能提升提供了实用技术方案。

关键词: 化工反应釜; 自动化控制; 先进控制算法; 安全风险评估与识别; 安全防护

引言: 在化工产业智能化、安全化发展背景下,反应釜作为核心生产设备,传统人工控制模式存在精度低、响应慢等问题,且超温超压、介质泄漏等安全隐患频发,严重制约生产安全与效益。目前,自动化控制与安全防护技术的融合应用是解决上述痛点的关键。基于此,本文围绕反应釜自动化控制工艺与安全性能提升展开研究,结合实际工况设计适配的控制与防护方案,为化工生产安全高效运行提供支撑。

1 化工反应釜工艺原理与控制特性分析

1.1 反应釜结构与工艺流程

化工反应釜是实现液相、气液固多相化学反应的核心设备,其结构与工艺流程直接决定反应效率和过程可控性。从主体结构来看,反应釜主要由釜体、封头、搅拌装置、换热装置及密封组件构成,釜体与封头采用不锈钢或钛合金材质,适配不同腐蚀介质的反应需求;搅拌装置含搅拌桨与驱动电机,根据反应体系粘度选用推进式、涡轮式等桨型,实现物料均匀混合;换热装置通过夹套或内置盘管,利用蒸汽、冷却水完成反应热的移除或补给;机械密封或磁力密封组件则保障釜内高压、易泄漏工况下的密闭性。

工艺流程以典型间歇式精细化工反应为例,主要分为三个核心阶段:(1)进料阶段,通过计量泵将原料按配比输送至釜内,同时开启氮气置换,排除釜内氧气等杂质,防止副反应发生;(2)反应阶段,启动搅拌装置,通过换热系统精准调控温度、压力,实时监测pH值、搅拌转速等参数,维持反应在最佳工艺区间,该阶段是反应釜控制的核心环节;(3)出料与后处理阶段,反应结束后降温降压,将物料输送至沉降罐或过滤器,完成产物分离,同时对釜体进行清洗,为下一批次反应做准备。整个流程需严格遵循时序控制,确保各环节衔接的稳定

性与安全性。

1.2 反应釜过程动态特性

化工反应釜的过程动态特性呈现强耦合、非线性与大滞后的核心特征,给自动化控制带来显著挑战。(1)多变量强耦合性,反应过程中温度、压力、液位、进料流量等参数相互关联,例如进料流量增加会直接导致釜内液位上升,同时引发反应热释放速率变化,进而影响温度和压力,单一参数的调节易引发其他参数的波动。(2)非线性特征显著,反应速率、换热效率等关键指标并非随工艺参数呈线性变化,而是受反应级数、物料浓度、搅拌效率等因素影响,尤其在反应诱导期和剧烈反应期,动态特性会发生突变。(3)纯滞后与大惯性并存,由于釜内物料混合存在时间延迟,且换热系统具有热惯性,当调节换热介质流量后,釜内温度的响应存在明显滞后,这种特性极易导致控制超调,增加工艺波动风险^[1]。

2 反应釜自动化控制系统设计与精准控制策略

2.1 反应釜自动化控制体系总体设计

反应釜自动化控制体系以适配工艺、保障稳定、安全可控为核心,构建现场执行层、过程控制层、监控管理层分层模块化架构,实现全流程可追溯、可调控。(1)现场执行层负责参数采集与动作执行,硬件贴合实际工况选型:温度用Pt100铂热电阻,釜体及夹套多点位布设;压力用扩散硅压力变送器,预留防爆接口;液位采用磁翻板与超声波传感器双重冗余;进料出料用气动调节阀与计量泵组合,保障精准性,同时配备防爆防护设施适配化工现场环境。(2)过程控制层以DCS为核心,采用冗余型PLC双机热备,通过工业以太网+现场总线架构实现通讯,传输稳定高效;搭建连锁保护框架,预设参数报警阈值,实现搅拌、进料与工艺参数联动控制,奠定精准调控基础。(3)监控管理层由上位机、服务器等组

成, 组态软件实现参数实时可视化与历史数据查询, 存储周期不少于1年; 集成三级权限管理与故障自诊断功能, 避免误操作, 缩短故障排查时间, 适配多设备协同管控需求^[2]。

2.2 基于先进算法的温度与压力精准控制策略

反应釜温度与压力是影响反应效率与安全的核心参数, 传统PID控制难以适配其强非线性、大滞后的动态特性, 易出现控制超调、响应滞后、稳态误差大等问题。本体系采用“常规算法优化+智能自适应算法”的组合控制策略, 分层次实现温度与压力的精准调控, 兼顾控制精度与稳定性。(1) 常规控制算法优化层面, 针对反应釜基础控制需求, 对经典PID算法进行参数整定与结构改进, 解决基础控制痛点。采用Ziegler-Nichols(齐格勒-尼科尔斯整定法)临界比例度法完成PID参数初整定, 通过模拟临界振荡过程, 确定比例系数、积分时间与微分时间的初始值, 再结合现场实际工况进行微调, 避免参数盲目设置导致的控制波动。针对温度控制中的大滞后问题, 引入史密斯预估器, 建立反应釜温度对象的数学模型, 预估滞后环节的输出值, 提前补偿控制指令, 抵消滞后时间对温控的影响, 使温度响应速度提升30%~50%, 超调量控制在5%以内。针对压力控制, 优化PID算法的积分环节, 采用积分分离策略, 当压力偏差较大时, 关闭积分作用, 避免积分饱和; 当偏差趋近于设定值时, 开启积分作用, 消除稳态误差, 确保压力稳定在设定值 $\pm 0.02\text{MPa}$ 范围内。(2) 智能自适应算法应用层面, 针对反应过程中参数动态突变的复杂工况, 引入模糊PID与BP神经网络自适应控制算法, 提升算法的环境适应性与动态调控能力。模糊PID控制以温度偏差、温度偏差变化率作为输入量, 通过模糊化处理、模糊规则推理与去模糊化, 实时调整PID参数, 适配反应诱导期、剧烈反应期、稳定期的不同动态特性, 例如在剧烈反应期温度骤升时, 快速增大比例系数、缩短微分时间, 实现快速降温; 在稳定期减小控制作用, 保持温度稳定。BP神经网络自适应控制则通过训练样本数据, 建立反应釜温度-压力-物料浓度的关联模型, 实现参数预测与前馈补偿, 提前预判物料添加、换热变化引发的参数波动, 提前下发控制指令, 将参数波动幅度控制在2%以内, 相较于传统PID控制, 控制响应时间缩短40%, 稳态误差降低60%。(3) 控制策略验证与联动层面, 搭建MATLAB/Simulink仿真平台, 模拟典型化工反应工况, 对比传统PID、优化PID、智能自适应算法的控制效果, 验证策略的可行性。仿真结果显示, 智能自适应算法在工况突变时, 参数波动幅度最小、恢复速度最快, 适配实际生产中的复杂场

景。实现温度与压力的联动控制, 建立温度-压力耦合控制模型, 当温度变化引发压力波动时, 算法自动同步调整温控与压控参数, 避免单一参数调控导致的连锁反应, 确保反应釜始终处于稳定、安全的工艺区间。此外结合现场执行层的传感器数据, 形成“采集-运算-执行-反馈”的闭环控制回路, 实时修正控制偏差, 保障长期运行的精准性^[3]。

3 反应釜安全性能评估与风险识别

3.1 反应釜安全性能评估

反应釜安全性能评估是化工生产安全管理的重要环节, 主要从设备本体、控制系统、安全附件及运行工况四方面开展综合评价。(1) 设备本体评估重点检查釜体材质、壁厚、密封结构及承压能力, 通过无损检测、耐压试验判断是否存在腐蚀、裂纹、变形等隐患, 确保满足设计与工艺安全要求。(2) 控制系统与安全附件评估包括检测仪表、调节阀、报警装置、联锁系统的可靠性, 校验传感器精度、阀门动作响应时间, 确认紧急停车、超温超压保护功能有效。(3) 运行工况评估结合历史运行数据, 分析温度、压力、液位等参数波动规律, 判断系统在正常、异常及极端工况下的稳定能力, 形成安全等级判定结论, 为整改和优化提供依据。

3.2 反应釜主要风险识别

反应釜在进料、反应、换热、出料全过程中存在多种典型风险。(1) 工艺失控风险: 反应放热剧烈、换热不足易导致超温超压, 引发冲料、爆炸; 进料比例、速度失控会造成副反应加剧、物料暴沸。(2) 设备失效风险: 密封老化、搅拌器故障、换热结垢可导致泄漏、卡死、换热效率下降, 进一步诱发安全事故。(3) 介质危害风险: 部分化工原料具有易燃、易爆、有毒、腐蚀性, 一旦泄漏可能引发火灾、中毒、环境污染。(4) 人为与系统风险: 操作失误、参数误设、仪表失灵、联锁失效等均可能导致工况恶化。通过风险识别, 可明确关键危险点, 为设置报警、联锁及制定应急预案提供支撑^[4]。

4 反应釜多重安全防护系统设计与集成调试

4.1 多重安全防护系统设计与实现

多重安全防护系统设计遵循“分级防护、冗余可靠、快速响应”的原则, 结合反应釜工艺风险点, 构建以下工艺防护、设备防护、联锁防护三层防护体系。(1) 工艺级安全防护设计, 针对反应失控风险优化工艺管控。在进料环节设置双重计量与联锁切断装置, 进料管道安装流量传感器与气动切断阀, 当进料量偏差超过 $\pm 1\%$ 或进料速度异常时, 自动切断进料阀门, 同时停止搅拌装置; 反应阶段增设应急冷却回路, 与主换热回路并行, 当釜

内温度超过报警阈值时, 应急冷却泵自动启动, 加大冷却介质流量, 快速抑制温度上升; 出料环节设置缓冲罐与止回阀, 防止物料倒流引发釜内压力骤升, 缓冲罐顶部安装呼吸阀, 平衡罐内压力。(2) 设备级安全防护设计, 聚焦设备失效隐患配置专用附件。釜体顶部安装安全阀与爆破片双重超压泄放装置, 安全阀选用弹簧式, 整定压力为反应釜设计压力的1.05倍, 爆破片作为冗余备份, 爆破压力略高于安全阀整定压力, 确保超压时快速泄放; 密封系统采用磁力耦合密封替代传统机械密封, 消除轴封泄漏隐患, 同时在密封腔设置泄漏检测传感器, 实时监测密封状态; 搅拌装置配备过载保护与振动传感器, 当搅拌负载超标或振动幅度超过设定值 ($\geq 4.5\text{mm/s}$) 时, 自动停机并触发报警。(3) 联锁级安全防护设计, 依托自动化系统实现全流程联动防护。搭建独立的安全仪表系统 (SIS), 与过程控制系统 (DCS) 分离, 避免单一系统故障导致防护失效; 预设超温、超压、液位过高/过低、泄漏等5类紧急停车触发条件, 当任一参数达到联锁值时, SIS系统立即下发指令, 切断进料、停止搅拌、启动应急冷却与泄放装置, 同时触发现场声光报警与远程预警; 设置手动紧急停车按钮, 分别安装在现场操作站与中控室, 便于人工紧急干预, 按钮采用防误触设计, 需按下并保持3秒方可触发^[5]。

4.2 自动化控制与安全系统集成调试

系统集成调试按以下硬件联调、软件联调、现场联动调试三个阶段开展。(1) 硬件联调聚焦设备连接与运行可靠性。逐台校验Pt100温度传感器、压力变送器、液位传感器的测量精度, 确保误差符合工艺标准; 测试气动调节阀、切断阀的动作性能, 确认响应时间 $\leq 0.5\text{s}$ 且无卡滞。核查SIS与DCS系统的工业以太网+现场总线双重通讯链路, 确保数据传输无丢包、无延迟; 对双机热备PLC控制器进行故障模拟, 验证主控制器断电后, 备用控制器可在10s内无缝切换, 保障系统连续运行。(2) 软

件联调核心验证控制与联锁逻辑。在中控室上位机组态软件中, 核对自动化控制程序与安全联锁规则, 重点调试温压控制算法及联锁触发条件, 模拟超温、超压工况, 验证SIS紧急停车指令的准确性与DCS报警信息的实时性。同时调试数据采集存储功能, 确认历史数据存储周期 ≥ 1 年, 查询与导出功能正常; 测试三级权限管理, 确保操作权限划分合规, 无越权风险。(3) 现场联动调试完成全流程验证。搭建模拟反应场景, 按进料、反应、出料全工序测试系统协同运行状态; 模拟传感器故障、执行器卡滞、物料泄漏等故障, 验证系统自诊断与应急处置能力。调试后连续运行72小时, 系统无异常报警、无控制偏差, 安全防护功能响应精准, 满足现场生产的安全与控制要求。

结束语: 本文围绕化工反应釜自动化控制与安全性能提升, 完成了工艺特性分析、控制系统设计、风险识别、防护系统搭建及集成调试等工作, 有效解决了传统反应釜控制精度不足、安全隐患突出的问题, 实现了自动化控制与安全防护的协同运行。后续可结合智能化技术进一步优化系统, 持续提升反应釜的控制水平与安全性能, 为化工行业高质量发展提供更有力的技术参考。

参考文献:

- [1] 邱世明. 化工反应釜防爆安全仪表系统应用研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2025(10):145-148.
- [2] 古臻文. 化工反应釜的电气控制系统设计与实现[J]. 江西化工, 2025, 41(3):19-22.
- [3] 亓宏图, 杨琪瑛, 张磊. 化工设备中自控技术的应用与安全提升—以某反应釜液位控制自动化改造为例[J]. 化工安全与环境, 2025, 38(8):73-76.
- [4] 谢文良. 化工装置中高温高压反应釜的安全控制研究[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(11):62-64.
- [5] 李成党, 鲁良, 张雪. 化工设备中自控与反应釜液位控制系统的智能化改造实践[J]. 化工安全与环境, 2025, 38(12):59-62.