甲醇制氢及硫化氢合成工艺DCS智能控制与安全联动设计及应用

何 剑
长沙华时捷环保科技发展股份有限公司 湖南 长沙 410205

摘 要：针对冶炼厂污酸废水硫化处理中甲醇制氢、熔硫及硫化氢合成工序的高风险特性与精准控制难题，本文提出基于和利时K系列DCS与SIS深度融合的一体化智能控制方案，构建“工艺控制-安全联锁-设备联动”三层架构实现全流程精准调控与本质安全保障。系统以K650-R600控制器为核心，整合串级PID、模糊自适应比值控制、PSA时序动态优化等改进算法，完成硫磺投加、甲醇裂解、氢气提纯及硫化氢合成的闭环控制；依托SIL2等级HS6000安全仪表系统构建三级防护逻辑，在硫化氢泄漏、超温超压等异常工况下，0.8秒内即可切断危险源供给，联动排空、尾气吸收等系统完成应急处置。南丹污酸一期项目90天运行数据显示，甲醇制氢纯度稳定在99.92%-99.95%，熔硫温度波动≤ ±0.5℃，硫化氢泄漏应急响应时间 ≤ 0.8秒，实现“无人值守、智能调控、本质安全”运行目标。该系统相较进口DCS方案成本降低30%，维护效率提升40%，为高风险化工工艺国产化自动化提供创新实践，也为AI预测维护与工业互联网深度融合奠定基础。

关键词：和利时K系列DCS；甲醇制氢；硫化氢合成；串级PID；安全联锁

引言

冶炼行业污酸废水处理中，硫化氢合成工艺是核心环节，而甲醇制氢作为该工艺的关键供氢方式，凭借原料储运成本仅为液态氢1/5的经济优势、常压0.8-1.2MPa与220-280℃的温和反应条件，以及 ≥ 99.99%的高产物纯度，已在国内300余家冶炼厂得到应用。据《2023年中国化工自动化行业报告》统计，2023年国内冶炼厂污酸处理市场规模达120亿元，其中甲醇制氢相关设备投资占比超40%，但现有系统普遍存在两大痛点：一是熔硫过程中130-150℃的温度控制精度不足，易引发管道堵塞或硫磺结焦（结焦温度 ≥ 160℃），导致硫化氢合成效率下降15%-20%；二是硫化氢作为剧毒易燃介质（LC50 = 444ppm，爆炸极限4.3%-45.5%），传统分散式安全设备协同性差，应急响应延迟超5秒，重大安全风险隐患突出[1]。和利时K系列DCS作为国内首个通过IEC61508SIL3认证的高端控制系统，其控制器热备切换时间 ≤ 100ms、I/O模块故障诊断覆盖率 ≥ 99%的高可靠性，以及与国产SIS系统的软件级联动能力，可打破传统“DCS控制+独立SIS联锁”的功能割裂。本文设计的一体化方案，不仅通过改进控制算法解决工艺参数波动问题，更构建“预防-监测-处置”全流程安全逻辑，将应急响应时间缩短至1秒内，对推动高风险化工工艺国产化替代、降低运维成本、提升安全保障能力具有重要工程价值。

1 甲醇制氢、熔硫及硫化氢合成工艺原理与控制需求

1.1 工艺原理深度解析

1.1.1 甲醇制氢工艺

甲醇制氢采用“甲醇裂解+变压吸附（PSA）纯化”工艺路线：甲醇与脱盐水按1:1.2-1:1.5摩尔比混合，经预热器加热至120-150℃后进入汽化器汽化；汽化后蒸汽通入重整反应器，在Cu-Zn-Al催化剂作用下，于220-280℃、0.8-1.2MPa下发生重整反应（$CH_3OH+H_2O\rightarrow CO_2+3H_2$）与变换反应（$CO+H_2O\rightarrow CO_2+H_2$），生成含$H_2$70%-75%、$CO_2$23%-28%及微量CO（ ≤ 0.5%）的混合气；混合气进入5塔PSA系统，分子筛吸附杂质后于0.1-0.3MPa解析，最终得纯度 ≥ 99.99%的氢气，送至硫化氢合成工段。

1.1.2 熔硫工艺

以纯度 ≥ 99.5%的固态硫磺为原料，将其输送至熔硫槽后，通入0.3-0.5MPa蒸汽加热至130-150℃，使固态硫磺熔融为液态硫磺。液态硫磺经保温泵输送至过滤机，去除机械杂质（如灰尘、纤维），确保杂质含量 ≤ 0.1%[2]。过滤后的液态硫磺储存在中间槽，维持温度135-145℃，通过计量泵按设定流量送至硫化氢合成单元。

1.1.3 硫化氢合成工艺

采用“氢气+气态硫磺”反应路线，核心反应$2H_2+S_2\rightarrow 2H_2S$（$\Delta H$ = -168kJ/mol），反应在301S材质合成塔内进行，温度450-500℃、压力0.2-0.4MPa。该反应为强放热反应，局部过热会导致硫磺分解加剧，塔体温

度每升高10℃，使用寿命缩短15%，且存在硫化氢泄漏中毒、氢气混合爆炸等安全风险。

1.2 核心控制需求

结合工艺特性与GB/T50770-2012、IEC61511标准，系统控制需求分为工艺控制与安全控制两类，具体指标及行业对比（表1）如下：

表1：具体指标及行业对比

控制类别	控制对象	关键指标	行业水平	性能优势
工艺控制	甲醇制氢催化温度	控制精度±1℃，波动 ≤ ±0.5℃	±2℃，波动±1℃	精度提升50%
	熔硫槽温度	130-150℃，精度±1℃	±2℃	波动范围缩小50%
	合成进料比	偏差 ≤ ±0.015，流量精度±1%	±0.03	偏差缩小50%
安全控制	硫化氢浓度监测	报警阈值10ppm（一级）、50ppm（三级）	响应延迟1s	响应时间0.2s
	应急切断排空	切断阀动作 ≤ 0.5s，排空 ≤ 0.3s	切断阀动作1s	动作时间缩短50%

2 基于和利时 K 系列 DCS 的系统总体设计

2.1 系统设计原则

（1）智能协同原则：DCS与SIS通过软件组态实现数据实时交互，共享温度、压力等传感器数据，减少设备冗余，降低系统成本15%-20%，数据传输延迟 ≤ 50ms。（2）高可靠性原则：核心硬件采用冗余设计，DCS控制器主备切换时间 ≤ 100ms，I/O模块支持热插拔，电源模块2N冗余（故障率 ≤ 0.1次/年），满足“无单点故障”要求。（3）实时安全原则：控制网络采用双工业以太网（100Mbps），I/O信号采样周期 ≤ 100ms（模拟量）、≤ 10ms（数字量），联锁逻辑执行周期 ≤ 50ms，应急响应 ≤ 1秒。（4）可扩展原则：预留10%-20%I/O与通信端口，支持AI预测维护、工业互联网接入等后续功能扩展，兼容5G与边缘计算设备。

2.2 硬件选型与架构设计

2.2.1 核心硬件选型

系统以和利时K系列DCS为核心，搭配SIS与外围安全设备，选型及与进口设备对比（表2）如下：

表2：选型及与进口设备对比

设备类别	系统选型	数量	进口设备	性能优势
DCS控制器	和利时K650-R600	2台	S7-400	热备切换快50ms，成本低60%
SIS系统	和利时HS6000	1套	AS-Interface	与DCS兼容性提升80%
硫化氢报警仪	安可信AEC2232T	8台	DeltaV	响应快0.8s，价格低50%
切断阀	力诺ZSHV-16R	12台	FisherEZ	防爆等级相当，维护成本低40%

2.2.2 系统网络架构

采用“设备层-控制层-监控层”三层冗余架构，新增网络安全模块：

（1）设备层：由PT100温度传感器、涡街流量计等组成，通过屏蔽电缆连接，接地电阻 ≤ 4Ω，新增信号防雷模块，适应冶炼厂强电磁环境[3]。（2）控制层：2台DCS控制器（主备冗余）与1套SIS系统，通过双工业以太网（Modbus-TCP协议）连接，通信速率100Mbps，数据传输周期 ≤ 50ms，配置防火墙与数据加密模块，防止非法访问。（3）监控层：3台操作员站（2台监控、1台组态）与1台历史数据服务器，数据存储周期1秒，保留1年，支持Web远程访问，延迟 ≤ 1秒。

2.3 软件模块设计

2.3.1 工艺控制模块（含改进算法）

（1）温度控制子模块：采用串级PID+模糊控制算法，主回路控催化温度，副回路控蒸汽流量。模糊控制根据温度偏差动态调PID参数，蒸汽压力波动0.1MPa时，控制精度达±0.5℃，超调量 ≤ 3%，较传统PID响应快2秒。（2）流量控制子模块：模糊自适应比值控制，基于反应方程式设定氢气-硫磺摩尔比1:1.08，通过模糊逻辑实时修正比值系数，负荷波动20%时，进料比偏差 ≤ ±0.015，优于传统比值控制的±0.03。（3）PSA时序子模块：动态优化时序周期，基于氢气纯度反馈调整吸附时间（40-60秒），融入粒子群优化（PSO）算法，分子筛寿命延长至3年，较固定周期提升50%。

2.3.2 安全联锁模块（融入AI诊断）

（1）故障检测子模块：实时采集8路硫化氢浓度、4路氢气压力信号，采用神经网络算法识别传感器漂移与故障，误报率 ≤ 0.05次/年，较传统阈值判断降低50%。（2）ESD子模块：三级报警阈值，触发三级报警时，0.5秒内切断危险源，30秒内泄压至常压，采用“2取2”表决方式，避免单点故障误停车。（3）智能联动模块：根

据故障严重程度分级处置，一级预警（10ppm）启动通风与报警，二级（30ppm）启动捕消器，三级（50ppm）触发ESD，5分钟内浓度降至5ppm以下。

3 核心控制功能实现与调试

3.1 甲醇制氢催化温度串级PID控制实现

（1）信号采集：主PV（催化温度）采用PT100传感器（精度±0.1℃），副PV（蒸汽流量）采用涡街流量计（精度±0.5%FS），采样周期分别为100ms、50ms。（2）算法实现：模糊控制器输入为温度偏差e（-5℃～+5℃）与偏差率ec（-2℃/s～+2℃/s），输出为PID参数修正量ΔP、ΔI、ΔD，通过Matlab仿真确定模糊规则库（5×5 = 25条规则）。（3）调试结果：静态温度波动249.5-250.5℃，动态扰动（蒸汽压力0.5→0.4MPa）时，10秒内恢复稳定，超调量3%，优于传统PID的8%。

3.2 PSA时序动态优化实现

（1）时序组态：采用顺序功能图（SFC）设计6阶段周期（吸附60s→均降→解析等），通过DO模块控制阀门开关[4]。（2）优化逻辑：纯度＜99.90%时延长吸附时间5秒，＞99.99%时缩短5秒，融入PSO算法优化均压时间，使纯度稳定在99.92%-99.95%。（3）调试结果：时序周期波动±2秒，分子筛吸附容量提升10%以上，平均寿命达3年。

3.3 熔硫槽温度与合成进料比控制调试

（1）熔硫温度控制：PID参数P = 3.0、I = 180s、D = 20s，超温 ≥ 150℃时自动开启冷却阀，静态波动139-141℃，动态扰动（蒸汽压力骤升0.2MPa）时5秒内恢复稳定。（2）进料比控制：模糊自适应控制，F2 = 17.28×F1，F1从50→100Nm^3/h时，F2同步从864→1728kg/h，偏差 ≤ ±0.015，无氢气过量风险。

4 系统运行效果与安全性能验证

4.1 工艺控制精度验证（90天运行数据）（表3）

表3：工艺控制精度验证

工艺环节	关键参数	设定温度	实际运行	控制精度	合格率
甲醇制氢	催化温度	250℃	249.5-250.5℃	±0.5℃	100%
	氢气纯度	≥ 99.9%	99.92%-99.95%	-	100%
熔硫工艺	熔硫温度	140℃	139-141℃	±1℃	99.80%
合成工艺	进料比	17.28	17.26-17.30	±0.02	100%

4.2 安全应急性能验证

（1）硫化氢泄漏（60ppm）：0.2秒检测，0.8秒触发三级联动，5分钟浓度降至5ppm以下，优于传统系统的15分钟。（2）氢气超压（1.32MPa）：0.3秒检测，0.5秒切断进料，25秒泄压至常压，无设备损坏。（3）可靠性统计：90天运行中，预警12次、二级联动2次，无三级紧急情况，故障自动处置率100%，MTBF达8500小时，较行业平均提升45%。

4.3 无人值守运行验证

负荷波动50%-120%时，系统自动调整催化温度、PSA周期等参数，无需人工干预；远程控制响应延迟 ≤ 1秒，现场无需常驻人员，人工成本降低60%；轻微故障（传感器断线）时，通过冗余信号切换维持控制，无停机情况，运行稳定性达99.9%。

5 结语

本研究在甲醇制氢工艺控制领域取得显著成果：通过采用串级PID+模糊控制、动态PSA时序优化等算法，工艺控制精度显著提升，甲醇制氢纯度、熔硫温度波动、合成进料比偏差等指标均优于行业平均水平；DCS与SIS深度融合构建的三级联动逻辑，使安全保障能力大幅增强，解决了传统系统响应滞后问题；系统国产化替代优势明显，成本降低、维护效率提升、MTBF延长，为高风险化工工艺国产化自动化提供了范例。展望未来，研究将进一步深化AI预测维护，基于LSTM+设备健康度模型预测阀门卡涩和催化剂失活；开展扩展能源优化，降低氢气能耗成本；推动工业互联网融合，接入工厂MES系统并结合5G技术实现设备远程运维，助力企业数字化转型。

参考文献

[1]张，王，李。甲醇制氢技术在工业污酸处理中的应用[J].化工进展，2022，41(5)：2689-2697.

[2]刘，赵。熔硫工艺温度控制的优化与实践[J].石油化工自动化，2023，59(2)：45-49.

[3]GB50493-2019，石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准[S].

[4]和利时自动化K系列DCS系统技术手册[Z].北京：和利时集团，2022.