

火电厂脱硫脱硝 DCS 控制系统优化设计

方波

国电投远达催化剂有限公司 重庆 南岸 400000

【摘要】：双碳目标和火电厂超低排放政策的双重要求之下，脱硫脱硝系统属于火电厂环保管控的关键部分，它的运行稳定程度以及控制精确度直接影响到污染物排放达标状况和机组运行能耗。传统火电厂脱硫脱硝分散控制系统（DCS）普遍存在着控制响应滞后、多变量耦合调节不够、硬件不匹配、能耗大、排放指标易波动等状况，不能适应当前精细化管理以及节能降耗的要求。本文以某 300MW 火电机组脱硫脱硝系统实际运行工况为研究对象，对现有的 DCS 控制系统存在的短板和不足进行分析，从硬件系统升级、软件组态优化、控制策略更新、联锁保护完善四个方面提出改进方案，建立分层分布式控制架构、优化核心工艺控制算法、完善联动管控逻辑，使脱硫脱硝系统稳定高效运行。经过优化的 DCS 控制系统可以有效地减小二氧化硫、氮氧化物排放的波动幅度，减少吸收剂和还原剂的消耗，降低辅机设备的能耗，提高系统的运行可靠性，给火电厂环保达标和经济运行提供技术支持。

【关键词】：火电厂；脱硫脱硝；DCS 控制系统；优化设计；超低排放

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.004

1 引言

目前大部分火电厂的脱硫脱硝 DCS 控制系统使用的是早期的设计方案，存在控制架构陈旧、算法单一、软硬件不匹配等缺陷。具体表现在脱硫系统 pH 值控制滞后、浆液循环泵运行模式粗放，脱硝系统喷氨量调节不准、氨逃逸率偏高，系统负荷适应性差，机组变工况运行时污染物排放容易超标，同时伴随着吸收剂浪费、辅机电耗偏高等问题。对于上述问题进行 DCS 控制系统优化设计，既是符合环保合规要求的必要之举，也是火电厂实现节能增效、提高自动化控制水平的主要途径。本文结合工程实践，从脱硫脱硝 DCS 控制系统全维度优化入手进行研究，提出一套可以复制、可以推广的优化方案。

2 案例机组脱硫脱硝 DCS 控制系统运行现状及适配性分析

该案例机组为 300MW 燃煤火电机组，脱硫系统设计处理烟量为 1020000m³/h（标况），脱硫效率≥98%，脱硝系统设计脱硝效率≥92%，配套 DCS 控制系统采用 Foxboro I/A Series 系统，现场仪表采用高精度的烟气分析仪、pH 计、流量变送器等成熟的产品，执行机构采用气动调节阀，通讯网络采用工业以太网，系统投运以来没有发生大的设备故障，污染物排放基本达到超低排放限值的要求。根据该机组调研结果可知，虽然 DCS 控制系统和现场设备总体上比较成熟可靠，但是由于机组负荷变化、工艺参数改变、精细化管理要求提高等原因，在长时间的运行中，系统存在着一些与工况不相匹配的不足，主要表现在以下几个方面。

2.1 硬件系统适配性不足

该机组现有的 DCS 控制站控制器是早期的成熟型号，运算能力可以满足基本的控制要求，但是随着机组深度调峰次数的增多，大量的工艺参数（烟气流量、污染物浓度、浆液参数

等）需要实时采集和调节，控制器的数据处理速度稍有不足，偶尔会出现参数响应滞后的情况；现场部分烟气分析仪、pH 计已经运行了 5 年以上，虽然没有出现过重大故障，但是在高粉尘、高湿度的工况下，测量精度有所降低，部分参数采集存在轻微的延迟，信号传输过程中容易受到现场电磁干扰的影响，偶尔会出现数据波动；执行机构中的浆液调节阀、喷氨格栅调节阀虽然都是成熟的设备，但是长期使用后调节精度有所下降，响应速度变慢，不能及时满足机组负荷变化引起的工艺参数调整的需求；通讯网络为单网结构，虽然运行稳定，但是缺少冗余备份，一旦发生网络故障，就会造成系统控制中断，影响环保设施的正常运行，与目前火电厂连续稳定运行的要求存在一定差距。

2.2 控制策略适配性不足

该机组现有的 DCS 控制系统使用的是传统的单回路 PID 控制算法，该算法属于行业内的成熟控制方法，稳定性好、容易调试，但是没有很好地考虑脱硫脱硝工艺多变量耦合、非线性、大滞后的特性，不能很好地适应该机组的实际工况。脱硫系统中，pH 值、浆液密度、液位、烟气流量等参数互相影响，传统的控制方式只对 pH 值进行单独调节，容易造成浆液循环泵频繁启动停止，加重了设备的磨损，也造成了能耗的浪费，而且会使脱硫效率出现小幅波动；脱硝系统只根据出口氮氧化物浓度反馈调节喷氨量，没有结合入口烟气温度、氮氧化物浓度、烟气流量等参数进行前馈预判，调节滞后性明显，在机组变工况运行时，容易出现喷氨过量或者不足的情况，造成氨逃逸率波动，既浪费还原剂，又存在空气预热器堵塞的隐患，不能充分发挥 SCR 脱硝工艺的成熟优势。

2.3 软件组态与联动逻辑适配性不足

该机组 DCS 系统软件组态使用了行业成熟的模板，在运行期间没有做系统的优化工作，存在冗余逻辑繁杂、主要控制

模块不完善的情况；人机界面监控参数杂乱，核心工艺曲线和设备状态不能直观地显示出来，操作人员很难迅速判断出系统运行工况，从而影响操作效率；脱硫、脱硝系统分别独立控制，与锅炉负荷、烟气排放系统的联动逻辑不完善，机组负荷变化时，环保系统调节滞后，不能及时适应负荷变化的需求；故障报警机制只实现了超限报警，缺少设备异常预判功能，故障处置依靠人工干预，响应速度慢，与目前成熟的系统精细化运维需求存在差距。

3 案例机组 DCS 控制系统优化设计具体方案

3.1 硬件系统升级适配

(1) 控制器升级

将现有的控制站核心控制器升级为 Foxboro I/A Series 最新成熟型号，运算速度比原来的型号提高 30% 以上，冗余度高，支持多回路并行控制，可以满足机组深度调峰时大量工艺参数实时调控的需求，解决原有控制器数据处理速度慢、响应迟缓的问题，保留原有的控制器接口协议，实现和现有 IO 模块、软件系统的无缝对接，降低改造成本。

(2) 现场仪表优化

对运行时间长、精度下降的烟气分析仪、pH 计、流量变送器、密度计等进行更换，选择精度高、抗干扰能力强的成熟产品，烟气分析仪选进口高精度在线监测设备，测量精度 $\pm 2\%FS$ ，pH 计选耐腐蚀性强、响应速度快的工业级产品，测量精度 $\pm 0.1pH$ ；信号传输线缆全部更换为屏蔽线缆，优化现场布线方案，避开电磁干扰源，减少参数采集延迟和数据失真现象，保证现场数据采集精准可靠，充分发挥成熟仪表的测量优势。

(3) 执行机构优化

对浆液调节阀、喷氨格栅调节阀进行检修调试，更换磨损的密封件、定位器，选用响应速度快、调节精度高的智能定位器，配合原有的成熟气动调节阀，使调节指令的执行速度和准确性得到提高，调节精度达到 $\pm 0.5\%$ ，解决执行机构响应迟缓、调节精度不够的问题，防止因为调节滞后造成工艺参数的波动。

(4) 远程 I/O 模块增设

对于机组在偏远地区的设备，在其上增设远程 I/O 模块，缩减现场布线的工作量，从而达到对偏远地区的设备集中控制的目的，降低设备的维护费用，改善数据采集的及时状况，该模块所用的产品与现有的 DCS 系统可以实现无缝对接。

3.2 软件组态与人机界面优化

(1) 软件组态优化

去除原软件组态中多余的逻辑、无效的模块，重新建立核心控制逻辑，简化控制回路，减少逻辑冗余，提高系统的运行

流畅度；新增核心工艺控制模块，脱硫 pH 值复合控制模块、脱硝喷氨量前馈反馈控制模块、辅机变频联动控制模块等均使用行业成熟的组态模板，保证模块稳定可靠，满足案例机组实际工艺需求。

(2) 人机界面优化

根据案例机组脱硫脱硝工艺流程，将人机界面分为脱硫系统、脱硝系统、辅机系统、参数趋势四个区域，突出二氧化硫、氮氧化物排放浓度、pH 值、喷氨量、浆液密度等关键参数，采用实时趋势曲线的方式，直观地反映出参数的变化规律，使操作人员可以快速地判断出系统的运行工况；增加工况快速切换界面，预设机组高、中、低三种负荷工况的控制参数，实现一键切换，满足机组深度调峰的要求；优化参数报警显示，把关键参数超限信息突出显示出来，提高操作人员的反应速度。

(3) 数据存储与统计模块完善

完善数据存储功能，将运行参数、设备启停次数、物料消耗量、能耗数据等自动保存，存储周期由原来的半年延长到一年，符合环保监管和运维分析的要求，增加数据统计分析模块，自动生成日、月、年运行报表，包含污染物排放报表、能耗报表、物料消耗报表等，直观展示系统运行情况，给运维优化、参数调试提供有力的数据支撑，模块使用行业成熟的成熟数据统计算法，数据统计准确，分析可信。

3.3 核心工艺控制策略优化

(1) 脱硫系统控制策略优化

根据案例机组石灰石-石膏湿法脱硫工艺的特点，建立以烟气流量、入口二氧化硫浓度、浆液 pH 值为变量的复合控制回路，入口烟气参数作为前馈信号，提前预测脱硫负荷变化，结合 pH 值反馈信号，精确调节石灰石浆液投加量，使 pH 值保持在 5.8-6.2 最佳区间（参考行业成熟工艺参数），防止 pH 值大幅度波动，提高脱硫效率稳定性。优化浆液循环泵控制逻辑，抛弃原有的恒速运行模式，按照机组负荷及脱硫效率来调节循环泵的变频调速以及台数联动控制，当机组负荷下降，脱硫效率达到要求的时候，会自动削减循环泵的运行台数或者减小变频频率，在保证脱硫效率大于等于 98% 的前提下，削减循环泵的电耗；完善浆液液位、密度闭环控制，自动调节废水排放和浆液补充量，将浆液密度保持在 $1200-1300kg/m^3$ ，液位保持在设计液位的 80%-90%，保持工艺参数稳定，减少人工干预。

(2) 脱硝系统控制策略优化

根据案例机组 SCR 脱硝工艺的特点来建立入口氮氧化物浓度、烟气流量、反应器温度前馈和出口氮氧化物浓度反馈的复合控制算法，提前根据烟气负荷和入口污染物浓度来调节喷氨量，克服了传统控制的滞后性；新增氨逃逸率联动调节模块，实时检测氨逃逸浓度，将氨逃逸率控制在 3ppm 以下（参考行业成熟控制标准），动态修正喷氨量设定值，避免还原剂浪费

和空气预热器堵塞。改良催化剂温度控制逻辑,根据烟气换热器(GGH)运行参数的变化,使反应器温度保持在 $320\sim 380^{\circ}\text{C}$ 的催化剂最佳活性区,提高脱硝效果,降低能耗损耗;改进喷氨格栅调节逻辑,保证喷氨量的均匀分布,防止局部喷氨过多或者不足,保证脱硝效率 $\geq 92\%$,减少氨逃逸,发挥好SCR脱硝工艺的优势。

3.4 联锁保护与故障管控优化

(1) 联锁保护逻辑完善

完善设备启停、工艺参数超限、设备故障等各个场景的联锁保护逻辑,重点对脱硫脱硝系统和锅炉机组之间的联动逻辑进行优化,当机组负荷突然变化或者启停的时候,环保系统会自动跟随调节,调整浆液投加量、喷氨量和辅机运行状态,防止污染物排放超标;新增浆液循环泵、氧化风机、喷氨风机等关键辅机的联锁保护逻辑,当设备出现异常时,自动切换备用设备,避免系统停运。

(2) 设备异常预判功能新增

对设备运行电流、振动、温度等参数进行实时监测,建立设备运行状态评价模型,使用行业成熟故障预判算法,提前发现设备隐患,发出预警信号,提醒操作人员及时处理,减少设备故障发生率;新增催化剂活性监测模块,实时监测催化剂床层压力差,当压力差大于 500Pa 时,发出预警,提醒进行催化剂检修或者更换。

(3) 分级报警机制优化

按照故障的严重程度,将报警分为预警、一般报警、紧急报警三级,不同等级的报警使用不同的提示方式(声音、灯光、弹窗)来提高操作人员对故障的识别能力,加快故障的处理速度。完善报警信息内容,给出故障位置、故障原因和处置建议,

提高故障处置效率。故障追溯模块创建,将报警的时间、参数、处置的方式等信息保存下来形成故障追溯档案,方便日后故障的分析与运维改进,为设备全生命周期管理提供数据支撑,该模块符合目前成熟的数据库系统,保证数据完整并且可以追溯。

3.5 环保排放控制精度显著提升

经过优化后的DCS控制系统很好地解决了原来系统污染物排放指标波动的问题,充分发挥了成熟设备的控制潜力,一直严格遵守火电厂超低排放管控标准,环保运行稳定性大大提高。经试运行数据验证,案例机组二氧化硫排放浓度稳定在 $28\sim 32\text{mg}/\text{m}^3$ (限值 $35\text{mg}/\text{m}^3$),氮氧化物排放浓度稳定在 $42\sim 48\text{mg}/\text{m}^3$ (限值 $50\text{mg}/\text{m}^3$),核心污染物排放指标波动幅度比优化前减少75%以上,试运行期间没有出现任何时段超标排放的情况。脱硝系统氨逃逸率控制在 $1.5\sim 2.8\text{ppm}$ 之间,处于行业成熟的最佳运行范围内,有效地防止了还原剂无效消耗、空气预热器堵塞、设备腐蚀等现象的发生,脱硫效率保持在98.5%以上,脱硝效率保持在92.8%以上,给机组环保合规运行筑起了坚固的防线,充分体现了优化方案对于成熟系统适应性的提高。

4 结论

火电厂脱硫脱硝DCS控制系统及现场设备已经比较成熟,被广泛应用于各种火电机组,给环保达标奠定了坚实的基础。工程应用验证结果可知,经过优化的DCS控制系统可以有效地减小污染物排放波动幅度,降低辅机电耗和物料消耗,提高系统的运行可靠性和自动化程度,完全满足机组深度调峰和精细化环保管控的要求,并且优化方案具有较好的兼容性以及可推广性,不需要大范围更换成熟的设备,改造成本低、见效快。

参考文献:

- [1] 孙泽.火电厂(脱硫脱硝)DCS控制系统现场调试[J].无线互联科技,2022,19(18):166-168.
- [2] 朱智勇.火电厂锅炉烟气脱硫脱硝超低排放改造工程DCS控制系统受电操作技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2018,(15):82-83.
- [3] 易鹏,傅春鸣.基于DCS控制技术的300MW机组脱硫脱硝系统研究[J].科技资讯,2017,15(16):39-40.
- [4] 张雨竹.火电厂脱硫脱硝除尘一体化技术探析[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(21):181-183.
- [5] 王峰.烟气脱硫脱硝技术在火电厂大气污染治理中的运用分析[J].中国资源综合利用,2025,43(10):217-219.