

基于快速测量与协同控制的 SCR 脱硝优化系统研究

丁越

伊犁新天煤化工有限责任公司 835000

DOI:10.12238/ems.v7i9.15225

[摘要] 燃煤机组烟气脱硝是实现超低排放标准的关键环节, 其中选择性催化还原 (SCR) 技术应用广泛。然而, 传统 SCR 系统普遍存在喷氨不均、NO_x 测量滞后、氨逃逸率高等问题, 直接影响机组环保指标与设备运行安全。文章围绕伊犁新天煤化工有限责任公司#1 炉实际情况, 研究并实施了一套基于快速测量与协同控制的 SCR 脱硝优化系统。系统通过引入电化学原理 NO_x 快速测量装置, 结合分区均衡控制算法与喷氨等摩尔比协同控制策略, 实现了 SCR 系统脱硝效率与运行稳定性的全面提升。实际应用结果表明, 该系统有效降低了出口 NO_x 波动幅度与氨逃逸率, 提升了喷氨控制的自动化水平和响应速度, 并具有良好的推广价值。

[关键词] SCR 脱硝; NO_x 快速测量; 协同控制; 喷氨均衡; 氨逃逸; 超低排放

近年来, 随着国家对燃煤电厂超低排放标准的持续推进, 燃煤机组烟气脱硝系统的优化成为行业关注重点。传统 SCR 脱硝系统虽然具备较高的 NO_x 去除效率, 但在实际运行中, 因工况变化频繁、测量系统响应滞后以及喷氨分布不均等因素, 常常出现氨逃逸量过大、空预器堵塞、催化剂寿命缩短等问题。这不仅增加了设备维护成本, 还可能导致环保排放指标波动。伊犁新天煤化工有限责任公司在长期运行过程中也面临类似困扰, 尤其是在低甲酸性气体掺烧等特殊工况下, SCR 系统控制精度不足的矛盾更加突出。因此, 结合快速测量技术与智能控制策略, 对 SCR 系统进行针对性的优化改造, 已成为保障机组安全稳定、经济环保运行的重要需求。

一、SCR 脱硝系统现状与存在问题分析

(一) SCR 脱硝系统工作原理简述

选择性催化还原 (SCR) 技术通过向烟气中喷入氨基还原剂 (如氨水或尿素), 在催化剂作用下将 NO_x 转化为 N₂ 和 H₂O, 降低氮氧化物排放浓度。系统主要由喷氨格栅 (AIG)、混合器、SCR 反应器、催化剂层、NO_x 分析仪、空预器等构成。脱硝效果取决于氨氮摩尔比、催化剂活性、烟气温度和流场分布等因素, 理论氨氮摩尔比控制在 0.9~1.1 较为合理。除此之外, 催化剂材质和层数、烟气含氧量、含尘浓度以及喷氨系统的调节灵敏度, 都会对 SCR 系统的实际脱硝效率产生显著影响, 对系统能耗和运行成本也具有直接关系^[1]。特别是在超低排放工况下, 要求 SCR 系统在较低温度区间 (如

280~320℃) 依然保持高活性, 同时避免副反应生成副产物, 保障整体环保达标与经济运行双重目标。

(二) 燃煤机组 SCR 系统存在的主要问题

首先, 喷氨均匀性不足是核心问题。喷氨格栅开度固定或按经验设定, 无法动态适应负荷变化与烟气组分波动, 导致局部 NH₃ 过量或不足。其次, 控制品质不高。传统系统主要依赖烟囱出口 NO_x 反馈, 控制回路存在 4~6 分钟的纯滞后, 工况波动时操作人员普遍采用提前、过量喷氨方式以避免排放超标, 直接引发氨逃逸问题^[2]。第三, 测量系统滞后严重, 尤其是 SCR 入口 NO_x 依赖常规 CEMS 分析仪, 响应时间普遍在 120 秒以上, 且测量单点布置无法反映整体流场与组分变化。此外, 长期运行下, NO_x 分析探头易结晶堵塞, 造成维护量大。最后, 控制依赖人工经验, 操作强度高, 调节频繁, 难以实现系统最优运行。

(三) 问题带来的实际影响

首先, 氨逃逸率增高导致 SCR 催化剂表面发生中毒反应, 加速活性损失, 催化剂实际使用寿命由设计的 24 个月普遍缩短至 18 个月以内, 增加更换频次和备品备件成本。其次, 因喷氨不均引发的氨逃逸与 NH₄HSO₄ 沉积, 使空预器低温段频繁发生堵塞, 尤其在锅炉低负荷运行或启停频繁阶段更为明显, 严重影响机组负荷调节能力和整体热效率。第三, NO_x 排放波动幅度过大, 增加环保监管超标风险, 不仅可能引发环保处罚, 也影响企业社会形象。以伊犁新天煤化工有限责任公司

司为例,系统改造前烟囱出口 NO_x 浓度波动范围普遍在 25~55 mg/m³ 之间,远高于行业推荐波动值不超过 ±10 mg/m³ 的标准,同时氨逃逸率最高达到 6% 以上,超过常规设计指标 2%~3% 一倍以上,造成明显的经济损失与运行负担。

二、基于快速测量与协同控制的 SCR 脱硝优化系统设计

(一) 系统总体架构

系统整体由 NO_x 快速测量系统、喷氨协同控制系统、人机交互界面三部分组成。硬件配置包括国产化 NO_x 电化学分析仪、PLC 控制系统、工业级触摸屏与工业服务器,核心控制设备选用西门子 S7-1500 系列 PLC,具有高可靠性和强大的数据处理能力。软件平台采用定制 DCS 控制逻辑与自学习算法模块,兼容现有控制系统,实现无缝集成。系统内部数据流向明确:SCR 入口 NO_x 实时测量值输入至 PLC 控制系统,经过数据预处理后传入协同控制系统运算模块,再输出至 AIG 调阀动作单元进行开度调整,同时实时接收 SCR 出口 NO_x 反馈修正信号,形成前馈+反馈双闭环控制。这种结构能够兼顾控制速度与稳定性,适应负荷快速变化下的脱硝调节需求,并具备良好的可扩展性和后期升级空间。通过模块化设计,系统还支持在线热备份与冗余配置,便于后续功能扩展或多机组集中控制,提升系统整体运行的灵活性和可靠性。

(二) NO_x 快速测量系统设计与实现

NO_x 快速测量系统采用 NDX-800 型国产电化学 NO_x 分析仪,每套最多支持 8 个测点,采用独立采样探头和主控单元分体式结构,便于维护和更换。探头选用 316L 不锈钢材质,内壁特殊涂层防止高温腐蚀和颗粒附着,设计耐温达 350℃。内部集成温度补偿、湿度修正模块,并具备氮气反吹除尘装置,有效延长探头使用寿命。系统响应时间不超过 20 秒,测量范围 0~1000 mg/m³,精度优于 ±2%,满量程线性误差低于 1%。为避免因单点漂移或异常值干扰整体控制效果,系统采用多点冗余测技术,每两个测点构成一组进行数据交叉验证,结合中值滤波与分区堆栈算法对实时数据进行预处理。氮气平衡吹扫装置设置双路阀组,既保证吹扫效果,又降低气耗,并实现自动定时吹扫和异常触发吹扫功能。系统与主 DCS 之间采用 Modbus TCP 通信,刷新频率 1 秒以内,较传统 CEMS 系统响应速度提高 80% 以上,满足动态负荷变化下喷氨控制

的实时性要求,有效支撑协同优化控制策略的实施与应用。

(三) 喷氨协同控制系统设计

喷氨协同控制系统由三层控制单元构成。第一层为智能前馈预测控制器,其核心算法基于快速 NO_x 直测值、锅炉负荷 BID、给煤机启停信号、入炉煤质化验数据、氨水浓度值等多项参数综合判断,通过历史大数据模型与实时工况拟合,自动预测合理喷氨量。预测误差控制在 ±8% 以内,响应时间 30 秒内,并具备自动补偿功能以适应负荷突变^[3]。第二层为等摩尔比控制器,基于 PID+人工神经网络混合算法,实现对氨空混合器 A 侧和 B 侧氨量的精确动态调整。每侧设有 12 组喷氨格栅调节阀,最小调节单元 10%,调节阀选用气动薄膜型控制阀,行程精度优于 1%,具备自动校准与阀位反馈功能。第三层为 AIG 喷氨格栅分区均衡控制,以 SCR 出口 8 个测点 NO_x 浓度为主要反馈依据,建立喷氨格栅开度—NO_x 浓度—氨氮摩尔比三者之间的实时动态数学模型。算法采用自学习+模糊控制技术,通过设定目标不平衡度值(一般为 ±5%),动态微调各分区阀门开度,提升分区浓度一致性和脱硝效率。控制系统内部设置报警与保护逻辑,任意一路 NO_x 测量异常时自动切换至安全运行模式,并允许人工干预,确保运行安全性和系统连续稳定运行。

(四) 系统实施过程与部署

系统实施分为硬件安装、软件部署、数据对接和控制逻辑测试四大阶段。硬件安装方面,SCR 烟道探头开孔采用低温封闭冷切割方式,使用专业钻孔机和冷切割设备,避免传统热切割引起的烟道负压波动及安全隐患^[4]。NO_x 分析仪与 PLC 系统通过屏蔽工业以太网电缆连接,通讯协议为标准 Modbus TCP,数据更新周期 ≤1 秒。软件部署完成后,通过与原有 DCS 系统的数据对接,保留传统手动调节界面的同时增加“自动-手动”一键切换功能,防止异常状态下操作失控。系统上线前,安排不少于 72 小时的全工况联动试验,涵盖锅炉负荷 30% 至 100% 运行范围。试验期间重点监测控制响应时滞、喷氨调整精度、NO_x 浓度波动情况及系统故障响应能力。投运完成后,系统每日自动生成运行报表并上传至主控室数据库,便于后期优化与追溯分析。运行人员根据实际情况反馈,结合操作手册进行培训,确保系统维护与操作符合规范

要求。

三、应用效果分析与推广价值

(一) 实际应用效果评估

伊犁新天煤化工#1 炉实际投运数据显示: 脱硝系统出口 NO_x 浓度波动范围收窄至 $30\sim 40\text{ mg/m}^3$, 较改造前降低约 35%, 长期保持在环保排放限值以下, 波动性明显减小; 氨逃逸率由改造前的 6% 下降至 2% 以下, 有效控制在行业推荐范围内。喷氨消耗量方面, 整体减少约 12%, 不仅降低氨水采购成本, 也减少了喷氨设备的磨损负荷。设备检修周期由原本每月一次延长至三个月一次, 减少了计划外停机次数和维护成本。特别是在负荷波动较大的情况下, 系统能够在 30 秒内完成喷氨量自动调整, 大幅减少人工干预, 实现快速响应与动态适应。运行人员反馈方面, 控制操作频次由原来平均每日 15 次降至 3 次, 大幅减轻劳动强度, 提高了运行操作的标准化与一致性。催化剂检查数据显示使用寿命预计延长 30%, 预计每套催化剂更换周期可从 18 个月恢复至 24 个月以上, 具备明显的实质性经济效益和设备运行安全优势。

(二) 优化系统的经济与环保价值

以年运行 8000 小时、锅炉负荷 300 t/h 为基准测算, 系统投运后预计每年节约氨水用量约 240 吨, 按市场价估算直接节约成本约 48 万元。同时, 由于氨逃逸减少和喷氨系统工作量降低, 下游设备如空预器、烟道等的维护费用也明显下降, 预计年度综合效益超过 80 万元以上。除此之外, 催化剂更换周期延长也进一步降低了长期运营费用。环保方面, 系统能够稳定满足 $\text{NO}_x \leq 35\text{ mg/m}^3$ 的超低排放标准, 有效减少氨逃逸对大气环境的二次污染问题, 特别是在区域大气污染防治政策趋严的背景下, 具有积极的社会效益与政策响应价值。此外, 通过优化系统运行, 降低能源消耗和辅助材料消耗, 实现节能降耗与绿色生产, 符合煤化工行业高质量发展方向。

(三) 推广应用前景与建议

该系统适用于 600MW 及以下燃煤机组及大型煤化工企业自备电厂, 尤其适合已完成超低排放改造但仍存在喷氨控制波动和氨逃逸超标问题的机组。推广过程中应重点关注两方面: 一是提升设备国产化比例。目前 NO_x 分析仪、多点测量

探头及 PLC 已实现国产替代, 但部分高端传感器和算法模块仍依赖进口。加大国产化研发投入, 有助于降低改造成本, 提高系统推广的经济性和适应性^[5]。二是推动标准化软件开发与兼容性优化, 确保系统与西门子 PCS7、和利时 APC、ABB 800xA 等主流 DCS 平台无缝对接, 方便用户快速部署应用。此外, 建议政策层面支持大型电厂和煤化工企业实施 SCR 系统智能化升级, 将其纳入节能环保技改范围, 通过绿色低碳专项资金或奖励政策给予扶持。行业层面应同步完善技术标准和指南, 明确不同机组规模下系统配置、控制指标和验收要求, 为系统推广提供明确依据, 进一步推动燃煤机组整体环保水平和经济效益提升。

总结:

基于快速测量与协同控制的 SCR 脱硝优化系统, 通过引入多点 NO_x 快速测量技术与分区喷氨协同控制策略, 有效解决了燃煤机组 SCR 系统喷氨不均、测量滞后、氨逃逸率高等突出问题。实际应用结果表明, 该系统显著降低了 NO_x 排放波动, 氨水消耗量与设备维护成本也大幅减少, 同时提高了运行人员操作自动化水平与设备运行可靠性。系统具有良好的适用性和推广价值, 特别适合 600MW 及以下燃煤机组和大型煤化工企业自备电厂。随着环保政策日趋严格, 推动 SCR 脱硝系统智能化升级已成为行业发展的必然趋势。未来应进一步完善国产化设备配套与控制算法优化, 持续提升系统经济性与运行效益。和能源利用效率优化。

[参考文献]

- [1] 王志峰, 杨军, 田爱军, 等. SCR 脱硝系统催化剂防堵治理研究[J]. 电力设备管理, 2024, (20): 257-259.
- [2] 李晓力. 燃煤锅炉 SCR 智能分区喷氨控制技术研究及应用[J]. 电子元件与信息技术, 2024, 8 (10): 8-10.
- [3] 柴飞虎. 火电厂脱硝系统分区测量与优化控制应用分析[J]. 能源与节能, 2024, (10): 6-10.
- [4] 李冬梅, 古栖铭, 杨军. 火电厂脱硝系统精准喷氨控制的优化研究与实践[J]. 自动化应用, 2024, 65 (16): 43-45.
- [5] 李冬梅, 古栖铭, 杨军. 火电厂脱硝系统精准喷氨控制的优化研究与实践[J]. 自动化应用, 2024, 65 (16): 43-45.