

# 基于数据驱动的SCR精准脱硝优化控制方案研究

周 娟

华电国际电力股份有限公司莱城发电厂 山东济南 271100

**摘 要:** 随着我国燃煤发电机组装机容量的持续增长,氮氧化物( $\text{NO}_x$ )排放引发的大气污染问题愈发突出,火电厂烟气脱硝成为环保治理的关键环节。选择性催化还原(SCR)脱硝技术因成熟高效被广泛应用,但传统控制模式存在时滞性、喷氨过量等弊端。本文提出基于数据驱动的SCR精准脱硝优化控制方案,依托DDOS过程优化控制平台,通过数据预处理、多维度建模预测与智能优化算法,实现SCR脱硝系统的精准调控。该方案可有效降低出口 $\text{NO}_x$ 浓度波动,减少氨水消耗量与氨逃逸,在满足环保标准(出口 $\text{NO}_x$ 小时均值低于 $50\text{mg}/\text{m}^3$ )的前提下,实现脱硝系统的节能降耗与稳定运行,为燃煤电厂脱硝系统的智能化升级提供了可落地的技术范式。

**关键词:** 数据驱动; SCR脱硝; 精准控制; 建模预测; 节能降耗

## 引言

近年来,我国电力工业飞速发展,燃煤发电机组总装机容量大幅提升,随之而来的烟气污染物排放问题成为生态环境治理的重点。氮氧化物作为主要大气污染物之一,其排放来源中燃煤电厂占比极高,不仅会造成酸雨、光化学烟雾等区域性环境问题,还会对人体呼吸系统与生态系统造成不可逆伤害<sup>[1]</sup>。因此国家对火电厂 $\text{NO}_x$ 排放制定了严格的管控标准,要求燃煤电厂烟气脱硝后 $\text{NO}_x$ 小时均值需低于 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 。为平衡能源发展与生态保护,烟气脱硝已成为火力发电流程中不可或缺的核心环节<sup>[2]</sup>。在各类脱硝技术中,选择性催化还原(SCR)技术凭借技术成熟度高、安装便捷、脱硝效率优异且无二次污染等优势,成为燃煤电厂的主流选择。SCR脱硝技术的核心原理是在 $200\text{--}450^\circ\text{C}$ 的温度条件下,借助铁、钒等碱金属催化剂,使喷入的氨气与烟气中 $\text{NO}_x$ 发生选择性反应,将其转化为无污染的氮气和水。但这一过程受锅炉负荷、烟气温度、氧量等多因素耦合影响,控制难度极大。

然而,传统SCR脱硝控制模式存在显著缺陷<sup>[3]</sup>。当前电厂普遍依赖连续排放监测系统(CEMS)监测 $\text{NO}_x$ 浓度,但该系统存在固有检测延时,通常需要数分钟才能输出检测结果,导致测量值与实际值偏差,无法实时反映SCR反应器入口 $\text{NO}_x$ 浓度变化,给喷氨控制带来极大困难。同时,锅炉负荷波动会引发入口 $\text{NO}_x$ 浓度大幅变化,而喷氨阀门开度调节与入口浓度波动间存在时滞性,为满足环保标准,电厂往往采取过量喷氨策略,这不仅造成氨水浪费、脱硝成本攀升,还会加剧氨逃逸问

题,进而导致空气预热器堵塞、腐蚀等设备故障,增加电厂运维成本。在此背景下,数据驱动技术与人工智能算法为SCR脱硝优化提供了新的解决方案。通过挖掘锅炉运行参数与 $\text{NO}_x$ 排放的关联规律,建立精准预测模型,可实现喷氨量的提前调控,从而破解传统控制的时滞难题,实现SCR脱硝系统的智能化、精准化运行。

## 一、SCR精准脱硝优化控制方案的技术体系

### (一) 设计原则

本方案的设计遵循五大核心原则,为系统稳定高效运行提供理论支撑:

1. 数据驱动原则: 依托工业大数据与先进数据分析技术,挖掘系统运行规律,指导控制策略制定,实现脱硝系统的自动化与智能化调控,避免依赖经验主义的粗放式控制。

2. 物理模型与数据驱动模型融合原则: 结合传统物理模型的机理优势与数据驱动模型的非线性特征学习能力,构建更精准、稳健的控制模型,提升系统适应能力。例如通过物理模型界定喷氨量的基础区间,再利用数据驱动模型实现区间内的精准微调。

3. 实时性与准确性平衡原则: 在实时控制中兼顾模型响应速度与预测精度,确保系统既能快速应对工况变化,又能维持控制的稳定性与可靠性。针对负荷突变等极端工况,模型可自动切换至快速响应模式,优先保障排放达标。

4. 可解释性与可调节性原则: 控制模型需具备清晰的工作逻辑,便于工程师进行故障诊断与调试;同时支

持参数灵活调整, 适配不同工况与生产环境, 例如可根据不同煤种的燃烧特性调整模型权重。

5. 持续改进与迭代优化原则: 通过实时数据采集与用户反馈, 持续优化控制模型与策略, 以适应技术与生产需求的动态变化, 构建全生命周期的优化体系。

## (二) DDOS 过程优化控制平台架构

数据驱动优化系统 (DDOS) 是本方案的核心载体, 该平台以人工智能算法库为核心, 兼具优化控制与设备健康管理双重功能, 其总体架构分为基础工具层与应用层:

1. 基础工具层: 涵盖平台管理、人工智能算法库、组态工具与数据可视化模块。平台管理负责变量配置、用户权限管控与运行记录存储; 人工智能算法库集成了统计算法、神经网络、深度学习等多元算法, 为预测与优化提供技术支撑; 组态工具可构建二维及三维数字孪生工厂模型, 实现脱硝流程的可视化监控; 数据可视化模块实现变量关系的图形化展示与全流程监控, 便于运维人员直观掌握系统状态。

2. 应用层: 支持调用行业成熟应用案例进行快速适配, 同时允许通过宿主语言开发自定义优化模块, 降低项目实施工作量。针对 SCR 脱硝场景, 平台已内置专用优化模块, 可直接对接电厂 DCS 系统。

DDOS 平台采用外挂运行模式, 部署于独立工控机, 通过 Modbus 或 OPC 协议与电厂原有 PLC、DCS 系统互联, 借助 SCADA 系统实现数据透传, 既保障了原有控制系统的独立性, 又实现了数据的高效交互, 避免对电厂现有生产系统造成干扰。

## 二、数据预处理与特征分析

### (一) 变量清单与数据采集

为实现 SCR 入口、出口  $\text{NO}_x$  浓度的精准建模与预测, 需采集多维度运行数据, 涵盖电网 AGC 指令、锅炉运行参数、SCR 反应器参数、烟囱排放参数及喷氨控制系统信号五大类, 具体变量包括实际负荷指令、给煤量、炉膛烟温、SCR 入口  $\text{NO}_x$  折算值、氨逃逸浓度等 26 项, 数据采集周期统一为 5 秒, 为模型训练提供充足且规范的数据基础。其中, 给煤量、一次风量等锅炉燃烧参数直接决定了  $\text{NO}_x$  的生成量, 是模型的核心输入变量。

### (二) 数据预处理方法

原始工业数据存在异常值、数据错位等问题, 需通过预处理提升数据质量:

1. 异常值处理: 采用 3 西格玛法与箱线图法识别并剔除异常数据。在 3 西格玛法中, 将超出  $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$  区间的数据判定为异常值 (该区间覆盖 99.74%

的正态分布数据); 箱线图法则通过  $Q1-1.5IQR$  与  $Q3+1.5IQR$  的阈值范围筛选异常点, 有效提升模型泛化能力。例如针对炉膛烟温的突变数据, 可通过该方法精准识别并剔除。

2. 滞后分析与数据对齐: 针对不同传感器的采集延时, 进行数据时间轴校准, 确保变量时序一致性。例如 CEMS 系统的  $\text{NO}_x$  浓度数据存在延时, 需根据历史数据测算延时时长并进行补偿。

3. 相关性与重要性分析: 通过相关性分析明确变量间关联程度, 基于最大相关最小冗余原则筛选特征; 重要性分析结果显示, 未校正总煤量 (权重 0.1376)、B 磨一次风量 (权重 0.1298)、锅炉尾部烟道氧量 (权重 0.1282) 是影响出口  $\text{NO}_x$  浓度的核心因素, 为后续建模提供特征优先级依据, 可优先针对这些变量进行精准监测与调控。

## 三、SCR 脱硝系统建模与预测

基于预处理后的历史数据, 构建多维度预测模型, 解决数据耦合、非线性、大滞后等问题, 实现  $\text{NO}_x$  浓度的精准预判<sup>[4]</sup>, 具体包括 5 类核心模型:

1. #2 炉反应器 A 入口  $\text{NO}_x$  浓度预测模型: 模型以机组负荷、给煤量、炉膛氧量等为输入, 预测值与实际值拟合度极高,  $R^2$  达 0.9942, 可精准捕捉入口  $\text{NO}_x$  浓度的动态变化, 为喷氨量的提前调节提供前置依据。

2. #2 炉反应器 A 出口  $\text{NO}_x$  浓度预测模型:  $R^2$  为 0.9857, 能有效预测喷氨反应后出口  $\text{NO}_x$  浓度, 为喷氨量调控提供直接依据, 可实时校验喷氨策略的合理性。

3. #2 炉反应器 B 入口  $\text{NO}_x$  浓度预测模型:  $R^2$  达 0.9504, 适配 B 侧反应器的工况特性, 保障双反应器协同控制, 避免单侧浓度超标。

4. #2 炉反应器 B 出口  $\text{NO}_x$  浓度预测模型:  $R^2$  为 0.9843, 具备优异的预测稳定性, 支撑双侧出口浓度的均衡管控, 确保总出口排放达标。

5. #2 脱硫出口  $\text{NO}_x$  浓度预测模型:  $R^2$  为 0.9418, 可预判总出口  $\text{NO}_x$  排放水平, 确保最终排放满足环保标准, 形成全流程的浓度预判体系。

上述模型均以锅炉运行关键参数为输入, 结合多时刻时序数据与预测误差反馈机制, 实现模型的动态修正, 适配变负荷工况下的浓度预测需求。例如当模型预测误差超过阈值时, 会自动将误差值纳入下一轮输入, 实现模型的自校准。

## 四、SCR 脱硝系统优化控制策略

### (一) 优化算法应用逻辑

本方案将喷氨阀门开度作为核心决策变量, 以出口

NO<sub>x</sub>浓度小时均值低于50mg/m<sup>3</sup>为核心目标,同时设置阀门开度(0-100%)、喷氨量(基于锅炉负荷的安全区间)等约束条件,构建闭环优化流程:首先通过入口NO<sub>x</sub>浓度预测模型预判浓度变化,结合AGC负荷调节指令提前感知工况波动;再依据出口NO<sub>x</sub>浓度设定值(43mg/m<sup>3</sup>),计算最优氨氮比例,输出喷氨阀门开度指令;最后通过控制效果反馈,实时调整模型参数,维持工况稳定。在负荷突变场景下,系统可提前5-10分钟预判NO<sub>x</sub>浓度变化趋势,提前调整喷氨阀门开度,避免传统控制中因时滞导致的浓度超标或过量喷氨问题。

## (二) 优化效果分析

测试数据显示,优化方案实现了显著的控制成效:

1.运行稳定性提升:优化前出口NO<sub>x</sub>浓度标准差为7.52,优化后降至2.63,浓度波动幅度大幅缩减,有效避免了超标风险,同时减少了因浓度波动导致的设备频繁调节损耗。

2.节能降耗成效显著:优化后出口NO<sub>x</sub>浓度均值稳定在43mg/m<sup>3</sup>(贴合环保设定值),相较于传统过量喷氨模式(均值35.54mg/m<sup>3</sup>),氨水消耗量显著降低,经测算平均节能率达8.17%,按单台300MW机组年耗氨水5000吨计算,每年可节省氨水约408.5吨,直接降低脱硝成本超百万元;同时氨逃逸水平同步下降,降低了设备腐蚀与二次污染风险,间接减少运维成本。

## 五、实施方案与项目规划

### (一) 通讯与SCADA调试方案

1.通讯系统调试:项目前期开展现场调研,明确控制系统类型、数据采集条件、通讯协议等关键信息,例如确认DCS系统的通讯接口与协议类型;随后部署工控机、通讯模块等硬件,通过MODBUS协议实现DDOS平台与DCS系统的无缝互联,保障数据双向传输,传输时延可控制在1秒以内。

2.SCADA调试:启动串口服务器并完成参数配置(波特率9600、数据位8、停止位1、无校验),新建数据变量并定义变量包,将SCADA变量与DCS端变量一一映射,通过连接测试验证数据采集的准确性与实时性,确保锅炉负荷、给煤量等核心参数无丢失、无延迟。

### (二) 安全运行调试

为保障系统安全,设置多重连锁机制:一是通讯故障连锁,通讯中断时自动切换至DCS手动控制,避免系

统失控;二是系统安全连锁,触发原系统安全保护时,即刻移交控制权,优先保障设备与人员安全;三是控制效果跟踪连锁,出现调控过快、波动过大等异常时,切换至手动模式,防止工况恶化。同时在调试阶段安排专人监控关键参数,确保系统平稳过渡。

### (三) 项目实施周期

项目全流程耗时约40天,分为项目准备(5天,现场调研与数据获取)、数据分析与系统集成(7天,预处理与建模)、硬件部署(2天)、算法软件部署(2天)、安全调试(7天)、系统上线(7天)、验收评估(10天)七个阶段,除现场调研与施工外,其余工作均可离线完成,最大限度降低对电厂正常生产的影响。项目验收阶段会通过168小时连续运行测试,验证系统的稳定性与优化效果,确保达到预期目标。

## 结论

基于数据驱动的SCR精准脱硝优化控制方案,通过DDOS平台整合数据预处理、多模型预测与智能优化技术,有效破解了传统SCR脱硝控制的时滞性与喷氨过量难题<sup>[5]</sup>。该方案不仅能稳定出口NO<sub>x</sub>浓度、满足环保标准,还可实现8.17%的氨水节能率,兼具环境效益与经济效益。未来可通过持续迭代算法模型、拓展设备健康管理功能(如预测催化剂失活周期),进一步提升系统的智能化水平,为燃煤电厂脱硝系统的高效低碳运行提供更全面的技术支撑,助力电力行业实现“双碳”目标。

## 参考文献

- [1]徐思林,陈祖云,钟芳权,等.燃煤电厂氮氧化物排放控制综述[J].硫酸工业,2024(6):7-11,15.
- [2]王竞.燃煤烟气脱硝技术的研究进展[J].环境与可持续发展,2018,43(4):144-147.
- [3]王迎春.基于LSTM算法的火电厂SCR烟气脱硝控制方法[J].节能,2024,43(8):97-99.
- [4]许涛.燃煤电厂SCR脱硝系统建模技术研究综述[J].中国高新科技,2024(12):63-64,84.
- [5]黄镇柯,金志远,朱恒毅,等.基于多层感知器神经网络的燃煤电站SCR脱硝系统建模[J].湖北电力,2022,46(3):100-105.