

DOI: 10.19666/j.rlfed.202412256

基于数据提质的电站锅炉脱硝运行优化 技术研究及应用

姜龙¹, 李金晶¹, 姚宣², 黄中³, 杨雪婷¹, 诸育枫⁴,
宋云畅¹, 李媛园¹

(1.华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045;

2.国能龙源环保有限公司, 北京 100036;

3.清华大学能源与动力工程系, 北京 100084;

4.上海锅炉厂有限公司, 上海 200245)

[摘要] 数据品质是影响脱硝运行优化模型应用效果的关键因素。针对脱硝运行监测参数的滞后性、代表性差等问题, 开发了适用于实时性能监测的脱硝性能参数降维技术, 设定可反映脱硝系统自身脱硝能力的还原剂利用率作为脱硝运行状态的监测评价参数, 提高数据生成的效率, 以此建立可消除调整延迟性的脱硝系统运行优化方式, 构建脱硝系统运行典型异常的识别技术, 指导脱硝系统的经济、安全、稳定、达标运行。该技术在某1000 MW燃煤机组不同负荷工况下进行整体实施应用, 结果表明: 采用还原剂利用率指导脱硝系统运行, 可降低尿素溶液单耗1.5%~8.4%, 降低脱硝出口处氨逃逸量10.7%~27.0%, 且均满足氨逃逸率一般控制值; 机组NO_x质量浓度变化幅度由原先的44.5~58.3 mg/m³缩小到9.2~10.6 mg/m³, 分布偏差由59.2%~75.2%显著减少到21.4%~25.1%, 更有利于机组的脱硝过程实现自动、稳定控制。

[关键词] 烟气脱硝; 优化运行; 数据提质; 状态感知; 智能诊断

[引用本文格式] 姜龙, 李金晶, 姚宣, 等. 基于数据提质的电站锅炉脱硝运行优化技术研究及应用[J]. 热力发电, 2025, 54(10): 149-156. JIANG Long, LI Jinjing, YAO Xuan, et al. Research and application of data-based optimization technology for operation of denitrification system in utility boilers[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(10): 149-156.

Research and application of data-based optimization technology for operation of denitrification system in utility boilers

JIANG Long¹, LI Jinjing¹, YAO Xuan², HUANG Zhong³, YANG Xueting¹, ZHU Yufeng⁴,
SONG Yunchang¹, LI Yuanyuan¹

(1.North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China;

2.China Energy Longyuan Environmental Protection Co., Ltd., Beijing 100036, China;

3.Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4.Shanghai Boiler Works Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

Abstract: Data quality is a key factor affecting the application effectiveness of optimization models of denitrification system operation. In response to the problems of lagging and poor representativeness of monitoring parameters in denitrification system operation, a denitrification performance parameter dimension reduction technology suitable for real-time performance monitoring is developed. The utilization rate of reducing agents that can reflect the denitrification ability of the denitrification system itself is set as the monitoring and evaluation parameter for denitrification system operation status, to improve the efficiency of data generation. Based on this, an

收稿日期: 2024-12-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4100303)

Supported by: National Key Research and Development Program (2022YFB4100303)

第一作者简介: 姜龙(1988), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电站锅炉大气污染物治理及环保设施优化技术, kavaykiky@163.com.

通信作者简介: 李金晶(1983), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为电站锅炉试验科学与技术, Liao@139.com.

optimization method for denitrification system operation that can eliminate adjustment delays is established, and an identification technology for typical abnormalities in denitrification system operation is constructed to guide the economic, safe, stable, and standard operation of the denitrification system. This technology has been implemented and applied in a 1 000 MW coal-fired unit at different loads. The results show that, the denitrification system operation guided by the utilization rate of reducing agents reduces the unit consumption of urea solution by 1.5%~8.4% and the ammonia escape at the denitrification system outlet by 10.7%~27.0%, and all of the ammonia escape at different loads meets the general control value of ammonia escape rate. The variation range of NO_x emission mass concentration in the exhaust reduces from 44.5~58.3 mg/m^3 to 9.2~10.6 mg/m^3 , and the distribution deviation significantly decreases from 59.2%~75.2% to 21.4%~25.1%, which is more conducive to the automatic and stable control of the denitrification system.

Key words: flue gas denitrification; optimization operation; data quality improvement; state perception; intelligent diagnosis

随着新型电力系统的建设, 煤电机组的功能定位正在由发电主力向电力保供和辅助服务的主力转变^[1-2]。在燃煤机组灵活性调节下, 机组负荷频繁快速变化、深度调峰低负荷运行对燃煤机组的环保设施安全运行及环保达标排放产生了较大影响^[3-4]。烟气脱硝系统可实现燃煤机组烟气中氮氧化物 (NO_x) 去除, 我国 95% 以上的燃煤电厂采用选择性催化还原 (SCR) 技术脱除锅炉尾部烟气中的 NO_x ^[5-6]。由于严重依赖专家人力投入, 传统脱硝喷氨离线运行优化调整试验技术已经远远不能满足数千台煤电机组的庞大需求, 数智化是推动高附加值运行优化服务普及的最可行路径。制约数据模型应用效果的关键因素不是数据的量, 而是数据的质, 具体需要解决下列关键问题^[7-8]: 1) 哪些数据能直接、快速反映设备性能状态; 2) 怎样高效地生成优质数据; 3) 如何运用更少的算力提取出数据中蕴含的规律。

在实际的脱硝系统运行控制中, 一般直接选用脱硝反应器出口 NO_x 质量浓度值或烟囱入口 NO_x 质量浓度值作为指导运行的监测参数, 但运行中还有众多因素影响脱硝自动控制的投入率及 NO_x 质量浓度的控制效果。这些因素包括: 1) 由于脱硝反应器出口 NO_x 质量浓度分布不均匀, NO_x 在线测点安装数量少且安装位置不具有代表性, 脱硝系统烟道内流场紊乱, 在线仪表测量存在偏差等原因, 造成实际供氨量与理论供氨量间存在偏差, 引起 NO_x 质量浓度超标或氨逃逸量超标^[9-11]; 2) 由于烟囱入口 NO_x 质量浓度值与脱硝反应器中的脱硝反应存在时间延迟, 造成脱硝处喷氨的调整并不能实时有效反映到总排口处的 NO_x 质量浓度^[12-14]。大量现场监测试验表明, 脱硝反应器入口烟气参数的分布均匀性往往较出口高, 且不存在时间延迟^[15-16]。

脱硝系统生成数据的来源主要分为在线运行

数据和离线试验数据。为了提高采集运行数据的质量: 针对在线运行数据, 研究人员在数据品质辨识上开展了大量工作, 并开发了专门的数据清洗技术, 但现有技术无法提高历史运行数据的工况代表性^[17-18]; 传统离线调整优化试验虽然在提高工况代表性上有天然优势, 但试验量及投入的人力物力较大^[19-20]。造成上述途径中收集数据量与工况代表性之间矛盾的原因, 是现有工况划分的方法 (正交试验方法、遍历随机组合等) 是建立在各监测参数彼此无关的前提之下。因此, 兼顾工况代表性和试验效率的关键是, 对各脱硝调节量之间关系的深入认知, 特别是当调节量彼此相关时, 要在确保试验工况代表性的前提下, 运用技术手段减少工况数量, 即实施数据降维。数据分析是将高品质数据加工成运行规律的技术。现有根据运行数据搭建的脱硝智慧算法或模型, 大多应用在基于先进控制技术开发的智慧脱硝控制系统^[21-22]或 NO_x 排放质量浓度预测模型^[23], 实现脱硝达标、精准喷氨, 而在脱硝二次评价参数开发及系统故障分析等领域的研究较少。

本研究从兼顾燃煤电站脱硝系统的运行性能监测和调整实时选取脱硝系统入口烟气参数方面进行参数降维, 设定可反映脱硝系统自身脱硝能力的还原剂利用率作为脱硝运行状态的监测评价参数, 提高数据生成的效率; 并以此建立可消除调整延迟性的脱硝系统运行优化方式, 构建脱硝运行典型异常的识别技术, 指导脱硝系统的经济、安全、稳定、达标运行, 最终在西北地区某 1 000 MW 燃煤机组得到应用。

1 试验及方法

1.1 研究对象

研究对象为某 1 000 MW 燃煤机组, 锅炉为高效超超临界参数变压运行直流炉, 一次中间再热、

单炉膛、平衡通风、固态排渣、露天布置、全钢构架，锅炉采用Ⅱ型布置，前后墙对冲燃烧方式。脱硝系统采用选择性催化还原（SCR）技术，反应器和催化剂采用“2+1”层布置，即安装 2 层催化剂，预留 1 层布置的空间，催化剂采用蜂窝式，通过声波吹灰。SCR 反应器设计成烟气竖直向下流动，反应器入口设有气流均布装置，在反应器入口及出口段设有导流板。采用尿素热解制备脱硝还原剂，尿素溶液经由尿素溶液输送泵、计量与分配装置、雾化喷嘴等进入绝热分解器内分解，生成 NH_3 、 H_2O 和 CO_2 ，分解产物与热一次风混合均匀并喷入脱硝系统。该机组于 2023 年 11 月进行机组 A 级检修，并更换了 3 层脱硝催化剂中的失效部分。

1.2 脱硝状态参数设定

影响脱硝效率的主要因素为：1) 需要脱除的 NO_x 量；2) 脱硝催化剂性能；3) 脱硝还原剂用量；4) 氨氮混合均匀性。最后 2 项为被动的运行调节参量，无法作为工况划分的依据。选定系统出力 Q_{dn} （脱硝系统在单位时间内需要脱除的 NO_x 总量）与脱硝系统进口烟气温度的（会影响脱硝催化剂性能）作为脱硝运行工况的划分参数。

在锅炉正常运行期间，由烟气发生装置的历史运行数据确定系统出力 Q_{dn} 与进口温度的试验范围。 Q_{dn} 范围应包含脱硝系统正常运行已经历的最大值 $Q_{\text{dn,max}}$ 和最小值 $Q_{\text{dn,min}}$ 。脱硝进口温度的范围应包含脱硝系统正常运行已经历的最大值 $T_{\text{fg,max}}$ 和最小值 $T_{\text{fg,min}}$ 。

$$Q_{\text{dn}} = (c_1(\text{NO}_x) - c_2(\text{NO}_x)) \times V_{\text{fg}} \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中： Q_{dn} 为系统出力， kg/h ； $c_1(\text{NO}_x)$ 和 $c_2(\text{NO}_x)$ 分别为脱硝系统进、出口烟气中 NO_x 质量浓度， mg/m^3 ； V_{fg} 为脱硝进口烟气流量， km^3/h 。

设定系统出力 Q_{dn} 与进口温度 T_{fg} 的可能组合：在系统出力试验范围内设定 m 个水平， $m \geq 5$ ；在进口温度试验范围内设定 n 个水平， $n \geq 3$ ；系统出力与进口温度的理论组合有 $m \times n$ 种，基于烟气发生装置的历史运行数据剔除其中不可能发生的组合。对设定的组合开展在线试验，获得不同组合下可反映脱硝系统固有脱硝能力的还原剂利用率，即实际用于脱除系统进口烟气中 NO_x 的还原剂在投入还原剂总量中的占比。还原剂利用率除受进口温度影响外，还与催化剂的活性和局部喷氨量与进口烟气中 NO_x 的匹配程度有关，其计算公式如下：

$$\eta_{\text{dn}} = \frac{Q_{\text{dn}} \times R_{\text{A-N}}}{Q_{\text{A}} \times \frac{x_{\text{A}}}{100}} \times 100\% \quad (2)$$

式中： η_{dn} 为还原剂利用率，%； $R_{\text{A-N}}$ 为脱硝反应的理论氨氮摩尔比，无量纲定值； Q_{A} 为实时运行喷氨量， kg/h ； x_{A} 为还原剂纯度，%，来自日常化验数据。

利用在线试验获得脱硝系统出力、脱硝进口温度和还原剂利用率等数据建立特征数据库，作为表征在接下来未发生燃烧调整、脱硝优化改造等工作时期内的脱硝系统状态。利用曲面拟合函数对在线试验获得的离散还原剂利用率矩阵进行拟合，得到连续工况下的还原剂利用率值及拟合公式，用于指导脱硝系统优化运行。对所建拟合公式分别进行拟合性能（ R_{adj}^2 ）及稳健性能（ q^2 ）评价，确保所建模型的有效性^[24]。

1.3 脱硝系统运行优化方法

对于任一运行工况，首先按下式进行理论喷氨量的核算：

$$Q_{\text{A}}^* = \frac{Q_{\text{dn}} \times R_{\text{A-N}}}{\frac{\eta_{\text{dn}}}{100} \times \frac{x_{\text{A}}}{100}} \quad (3)$$

式中： Q_{A}^* 为理论喷氨量， kg/h 。

进一步考虑实际还原剂利用率相对于所建矩阵记录数值的偏离，确定最终的喷氨量目标值 Q_{A} ：1) 测试理论喷氨量条件下脱硝/脱硫系统出口烟气中的 NO_x 质量浓度；2) 将脱硝/脱硫系统出口烟气中的 NO_x 实际质量浓度与期望值比较；3) 当两者差距的绝对值小于等于 $0.1 c_2^*(\text{NO}_x)$ 时，保持当前的喷氨调门开度，即无反馈信号；4) 当两者差距的绝对值大于 $0.1 c_2^*(\text{NO}_x)$ 时，在理论喷氨量基础上需叠加 1 个修正值，以确定喷氨量目标值，计算公式如下：

$$Q_{\text{A}} = Q_{\text{A}}^* \times \frac{c_1(\text{NO}_x) - c_2^*(\text{NO}_x)}{c_1(\text{NO}_x) - c_2(\text{NO}_x)} \quad (4)$$

式中： $c_2^*(\text{NO}_x)$ 为脱硝/脱硫系统出口烟气中 NO_x 质量浓度控制值， mg/m^3 。

根据喷氨量实际值与目标值的差异，调整喷氨调门开度：当实际值低于目标值，则开大喷氨调门；当实际值高于目标值，则关小喷氨调门。具体脱硝运行优化技术方案如图 1 所示。

1) 喷氨量异常发生后开展在线试验，获得 l ($l \geq 2$) 个系统出力 Q_{dn} 、进口温度 T_{fg} 组合和对应的实际还原剂利用率 η_{dn} ，记录数据集 $(Q_{\text{dn},1}, T_{\text{fg},1}, \eta_{\text{dn},1})$ 、 $(Q_{\text{dn},2}, T_{\text{fg},2}, \eta_{\text{dn},2})$ 、 \dots 、 $(Q_{\text{dn},l}, T_{\text{fg},l}, \eta_{\text{dn},l})$ 。

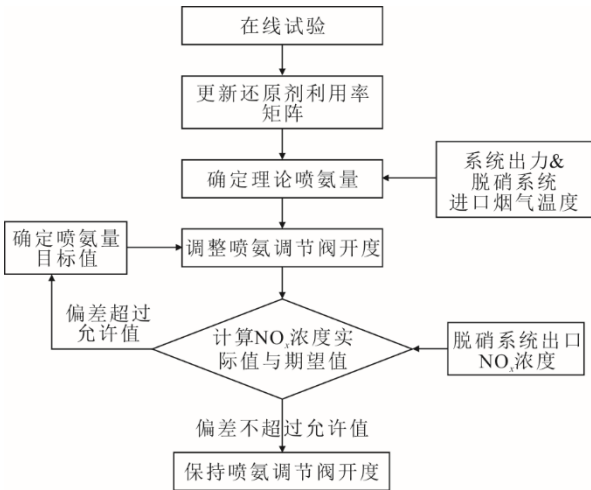


图1 脱硝运行优化技术方案

Fig.1 Technical scheme for optimization of denitrification system operation

2) 确定获得在线试验各工况点 $(Q_{dn,i}, T_{fg,i})$ 在还原剂利用率矩阵中的位置, 如下所示。

$$\begin{bmatrix} Q_{dn,a}, T_{fg,b} & & Q_{dn,a}, T_{fg,a} \\ & Q_{dn,i}, T_{fg,i} & \\ Q_{dn,b}, T_{fg,b} & & Q_{dn,b}, T_{fg,a} \end{bmatrix} \quad (5)$$

矩阵中相邻4个元素 $(Q_{dn,a}, T_{fg,b})$ 、 $(Q_{dn,a}, T_{fg,a})$ 、 $(Q_{dn,b}, T_{fg,b})$ 、 $(Q_{dn,b}, T_{fg,a})$ 同时满足式(6)中2个条件时, 可以确定在线试验工况点在这4个元素界定的范围中。

$$\begin{cases} Q_{dn,b} \leq Q_{dn,i} \leq Q_{dn,a} \\ T_{fg,b} \leq T_{fg,i} \leq T_{fg,a} \end{cases} \quad (6)$$

3) 根据还原剂利用率矩阵, 分别计算在线工况 $(Q_{dn,1}, T_{fg,1})$ 、 $(Q_{dn,2}, T_{fg,2})$ 、...、 $(Q_{dn,l}, T_{fg,l})$ 对应的还原剂利用率特征值 $\eta_{dn,1}^*$ 、 $\eta_{dn,2}^*$ 、...、 $\eta_{dn,l}^*$:

$$\eta_{dn,ta}^* = \eta_{dn,aa} - \frac{Q_{dn,a} - Q_{dn,i}}{Q_{dn,a} - Q_{dn,b}} \times (\eta_{dn,aa} - \eta_{dn,ba}) \quad (7)$$

$$\eta_{dn,tb}^* = \eta_{dn,bb} + \frac{Q_{dn,i} - Q_{dn,b}}{Q_{dn,a} - Q_{dn,b}} \times (\eta_{dn,ab} - \eta_{dn,bb}) \quad (8)$$

$$\eta_{dn,i}^* = \eta_{dn,ta}^* - \frac{T_{fg,a} - T_{fg,i}}{T_{fg,a} - T_{fg,b}} \times (\eta_{dn,ta}^* - \eta_{dn,tb}^*) \quad (9)$$

式中: $\eta_{dn,i}^*$ 为在线试验工况 $(Q_{dn,i}, T_{fg,i})$ 对应的还原剂利用率特征值, %; $i=1, 2, \dots, l$; $\eta_{dn,ab}$ 为还原剂利用率矩阵中 $(Q_{dn,a}, T_{fg,b})$ 元素对应的还原剂利用率, %; $\eta_{dn,aa}$ 、 $\eta_{dn,ba}$ 、 $\eta_{dn,bb}$ 等依此类推。

4) 计算 $\eta_{dn,i}$ 和 $\eta_{dn,i}^*$ 的相对偏差, 定义相对偏差为:

$$\Delta_i = \frac{\eta_{dn,i} - \eta_{dn,i}^*}{\eta_{dn,i}^*} \times 100\% \quad (10)$$

式中: Δ_i 为在线试验工况 $(Q_{dn,i}, T_{fg,i})$ 的还原剂利用率相对偏差, %, $i=1, 2, \dots, l$ 。

5) 如果喷氨量异常发生后, 所有在线试验工况的 Δ_i 均满足 $\Delta_i < -5\%$, 则计算 Δ_i 的均方根误差 R 。

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (\Delta_i - \bar{\Delta}_i)^2}{l \bar{\Delta}_i^2}} \times 100\% \quad (11)$$

式中: R 为 Δ_i 的均方根误差, %; $\bar{\Delta}_i$ 为喷氨量异常发生后所有在线试验工况的 Δ_i 均值, %。

$$\bar{\Delta}_i = \frac{\sum_{i=1}^l \Delta_i}{l} \quad (12)$$

若 $R \leq 5\%$, 喷氨量异常的原因诊断为“催化剂性能下降”; 此外, 喷氨量异常的原因诊断为“入口烟气中 NO_x 与还原剂混合不足”。图2为喷氨异常智能诊断流程示意。

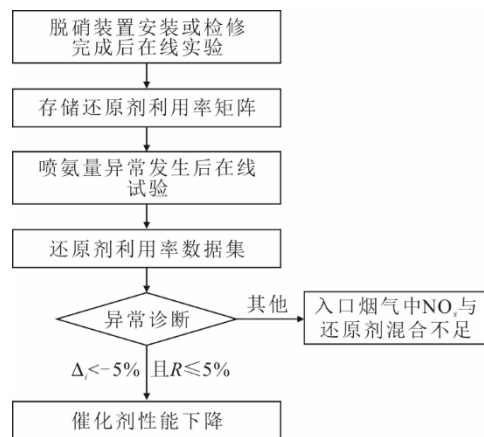


图2 喷氨异常智能诊断流程示意

Fig.2 Schematic diagram of intelligent diagnosis for abnormal ammonia spray

2 结果与讨论

2.1 优化调整后还原剂利用率矩阵

在机组稳定工况下对脱硝系统优化各在线监测参数参照《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB/T 16157—1996)进行手动试验比对(表1)。所用各参数试验实测均值与试验期间表盘运行均值间相对偏差均小于5%, 表明在线监测运行数据具有准确性和有效性。

调取所选定的1000 MW燃煤机组自上次检修期后的历史运行数据, 依据系统出力及进口烟温的历史运行最大、最小值, 对脱硝系统的A、B2个反应器均设定250、300、350、400、450、500 kg/h共6个系统出力, 310、320、330、340、350、360 °C共6个进口烟温。结合机组历史数据剔除不合理组

合方式，获得 2 个脱硝反应器还原剂利用率矩阵如表 2、表 3 所示。该机组脱硝系统 2 个反应器随着系统出力的升高，均表现出还原剂利用率下降的趋势，这主要是由于随着负荷的升高，反应器内部 NO_x 分布偏差变大引起的。

表 1 在线监测参数比对

Tab.1 Comparison of online monitoring parameters

反应器	参数	实测均值	表盘均值	相对偏差
A	进口烟温/℃	345.2	343.9	0.38%
	进口 NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)	240.1	229.7	4.53%
	出口 NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)	35.9	37.2	3.49%
	进口烟气流量/(km ³ ·h ⁻¹)	1 615	1658	2.59%
B	进口烟温/℃	348.9	347.3	0.46%
	进口 NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)	253.8	246.2	3.09%
	出口 NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)	37.3	38.1	2.10%
	进口烟气流量/(km ³ ·h ⁻¹)	1 698	1 743	2.58%

表 2 脱硝系统 A 反应器还原剂利用率矩阵 单位：%

Tab.2 Reducing agent utilization rate matrix of reactor A in the denitrification system

系统出力/(kg·h ⁻¹)	进口烟温/℃					
	310	320	330	340	350	360
250	97.1	97.5	96.9			
300	95.2	96.2	93.2	88.1		
350			89.2	85.1	84.8	
400				82.7	81.9	82.9
450					82.2	79.3
500						80.2

表 3 脱硝系统 B 反应器还原剂利用率矩阵 单位：%

Tab.3 Reducing agent utilization rate matrix of reactor B in the denitrification system

系统出力/(kg·h ⁻¹)	进口烟温/℃					
	310	320	330	340	350	360
250	93.4	95.0	95.2			
300	92.7	94.2	91.2	85.2		
350			86.2	84.1	82.1	
400				82.1	83.3	82.3
450					78.2	79.2
500						80.7

根据表 2—表 3 中的还原剂利用率离散点，绘制出各脱硝反应器全工况下的利用率分布曲线（图 3、图 4）及分布公式，并编入机组脱硝各反应器的自动控制系统中。

对于 A 反应器，公式拟合系数 R_{adj}^2 为 0.948，满足拟合显著性不小于 90% 的一般性要求；公式稳健性指标 q^2 为 0.767，满足其大于 0.5 的一般性要求^[25-28]。

$$\eta_{dn} = 438.50 + 0.326\ 68 \times Q_{dn} - 2.207\ 19 \times T_{fg} + 0.000\ 4 \times Q_{dn} \times Q_{dn} + 0.004\ 1 \times T_{fg} \times T_{fg} - 0.002 \times Q_{dn} \times T_{fg} \quad (13)$$

对于 B 反应器，公式拟合系数 R_{adj}^2 为 0.976，满足拟合显著性不小于 90% 的一般性要求；公式稳健性指标 q^2 为 0.718，满足其大于 0.5 的一般性要求。

$$\eta_{dn} = 333.98 + 0.021\ 81 \times Q_{dn} - 1.337\ 64 \times T_{fg} + 3.103\ 6 \times Q_{dn} \times Q_{dn} + 0.002\ 3 \times T_{fg} \times T_{fg} - 8.965 \times Q_{dn} \times T_{fg} \quad (14)$$

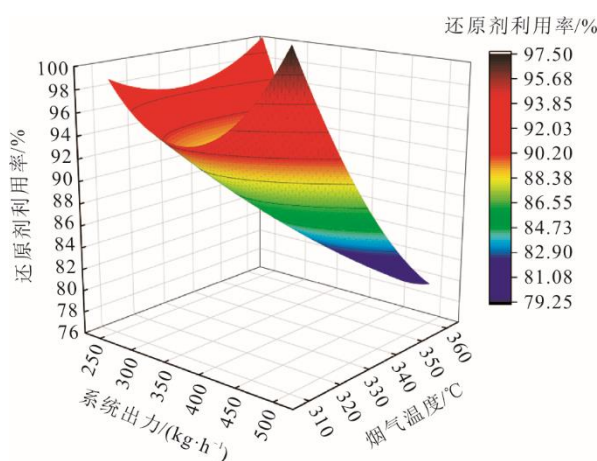


图 3 全工况下脱硝系统 A 反应器还原剂利用率分布
Fig.3 Distribution of reducing agent utilization rate of reactor A in the denitrification system under full operation conditions

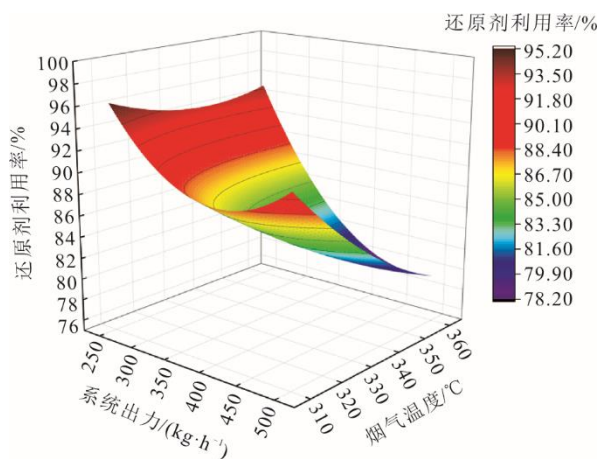


图 4 全工况下脱硝系统 B 反应器还原剂利用率分布
Fig.4 Distribution of reducing agent utilization rate of reactor B in the denitrification system under full operation conditions

2.2 优化前、后脱硝系统运行情况对比

利用 1.3 节中脱硝运行优化方法，并结合上述绘制的各反应器全工况下还原剂利用率分布曲线图，核算得到实时运行的喷氨量，指导脱硝系统的

优化运行,分别从供氨经济性、机组 NO_x 排放质量浓度均匀性对优化技术进行应用效果评价。

2.2.1 供氨经济性

将优化运行前、后该机组在 1000、750、500 MW 典型负荷下的脱硝系统脱除单位质量 NO_x 消耗的尿素溶液量(单耗)及氨逃逸率如图 5 所示。由图 5

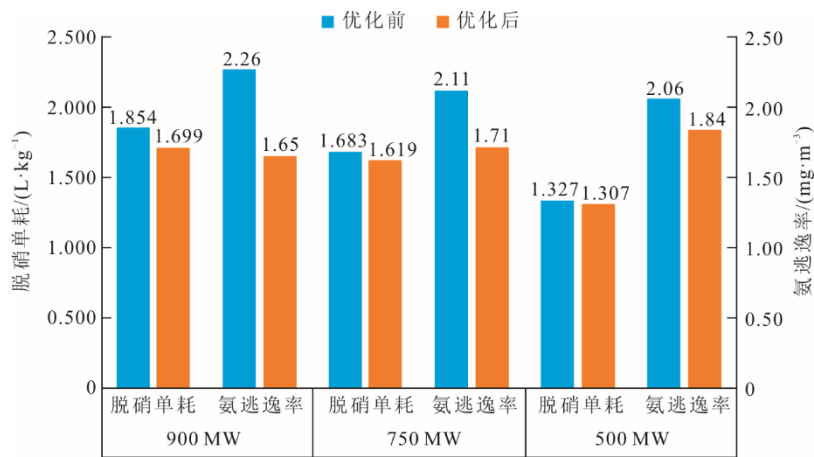


图 5 优化前、后脱硝系统供氨经济性对比

Fig.5 Economic comparison of ammonia supply in the denitrification system before and after optimization

2.2.2 机组 NO_x 排放质量浓度

对优化前、后各连续 30 天内的机组运行数据统计 NO_x 质量浓度及计算方差,测试结果如表 4。由表 4 可知:优化运行后,3 个不同负荷段下机组 NO_x 质量浓度的最大、最小值的差值分别由原先的 52.9、44.5、58.3 mg/m^3 ,缩小到 10.1、9.6、10.6 mg/m^3 , NO_x 排放质量浓度波动性得到显著改善;优化运行后,各负荷段机组 NO_x 质量浓度均值分别为 34.1、36.1、35.2 mg/m^3 ,均更贴近 NO_x 排放质量浓度控制值 (35.0 mg/m^3);优化运行后,各负荷段机组 NO_x 排放质量浓度分布偏差分别由 75.2%、59.2%、62.3%,显著减少到 25.1%、22.8%、21.4%,更有利于机组脱硝系统自动、稳定控制。

表 4 优化前、后机组 NO_x 排放质量浓度均匀性对比
Tab.4 Comparison of NO_x emission mass concentration uniformity before and after optimization

项目	750~1000 MW		500~750 MW		500 MW 以下	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
最大值/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	63.2	40.2	58.7	38.9	66.2	39.3
最小值/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	10.3	30.1	14.2	29.3	7.9	28.7
平均值/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	43.1	34.1	38.3	36.1	36.8	35.2
偏差/%	75.2	25.1	59.2	22.8	62.3	21.4

可见:在 1000、750、500 MW 负荷下,优化后机组脱硝系统单耗分别平均下降了 0.155 L/h (幅度 8.4%)、0.064 L/h (幅度 3.8%)、0.020 L/kg (幅度 1.5%),尿素溶液用量减少约 69.2、21.1、4.7 L/h,且负荷越高,单耗下降幅度越大;机组脱硝系统出口处氨逃逸量分别下降了 0.61、0.40、0.22 mg/m^3 ,均满足氨逃逸量一般控制值 (2.28 mg/m^3)。

2.3 脱硝系统运行异常识别

随机读取该机组脱硝 A 反应器检修前历史数据中 3 组不同稳态运行工况下机组运行数据,获得数据集(315 kg/h, 349 °C, 78.8%)、(245 kg/h, 325 °C, 83.9%)和(140 kg/h, 295 °C, 90.8%)。依据 1.4 节运行异常识别技术进行分析,得到的 3 次在线试验还原剂利用率相对偏差 Δ_i 均满足 $\Delta_i < -5\%$,并且 Δ_i 的均方根误差 R 为 0.58% (见表 5),故检修前影响脱硝效率的主要原因是催化剂性能下降。

表 5 脱硝系统运行异常识别分析
Tab.5 Identification and analysis of abnormal operation of the denitrification system

参数	工况 1	工况 2	工况 3
系统出力/($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	415.0	345.0	270.0
烟气温度/°C	349.0	335.0	318.0
还原剂利用率/%	78.8	83.9	90.8
还原剂利用率特征值/%	82.4	88.4	96.9
还原剂利用率相对偏差/%	-5.37	-5.30	-5.31
均方根误差/%	0.58		

3 结 论

本文从兼顾燃煤电站脱硝系统的运行性能监测和调整实时选取脱硝系统入口烟气参数方面进行参数降维,以还原剂利用率作为脱硝运行状态的监测

评价参数,提高了数据生成的效率,并以此建立了可消除调整延迟性的脱硝系统运行优化方式,构建了脱硝系统运行典型异常的识别技术,最后在西北地区某1 000 MW燃煤机组应用,得到如下结论。

1) 不同负荷下,脱硝系统运行优化降低了脱硝系统尿素溶液单耗1.5%~8.4%,降低了脱硝系统出口处氨逃逸10.7%~27.0%,且均满足氨逃逸率控制值。

2) 不同负荷下,机组NO_x排放质量浓度变化幅度由原先的44.5~58.3 mg/m³缩小到9.6~10.6 mg/m³,分布偏差由59.2%~75.2%显著减少到21.4%~25.1%,机组整体NO_x排放质量浓度波动性得到显著改善。机组NO_x排放质量浓度较优化前更贴近控制值(35 mg/m³),更有利于机组脱硝系统自动、稳定控制。

3) 脱硝系统运行异常识别技术可识别出该机组检修前存在的供氨异常现象及原因,可用于指导脱硝系统的运维及检修。

[参考文献]

- [1] 杨勇平,陈衡,郝俊红,等. “双碳”目标下我国燃煤发电转型升级发展路径[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6900-6909.
YANG Yongping, CHEN Heng, HAO Junhong, et al. Development pathways for the transformation and upgrading of China's coal-fired power generation under the goals of carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6900-6909.
- [2] 王庆华,刘吉臻,樊欢豹,等. 支撑我国能源转型的灵活燃煤发电新技术:锅炉系统及汽轮发电机系统[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7136-7166.
WANG Qinghua, LIU Jizhen, FAN Huanbao, et al. Novel technologies of flexible coal-fired power generation to support China energy transition: boiler system and turbine generator system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7136-7166.
- [3] 陈秀芳,阎寒冰. 低温烟气脱硝技术在火电机组灵活性改造中的应用[J]. 应用化工, 2019, 48(12): 3027-3031.
CHEN Xiufang, YAN Hanbing. Application of low temperature flue gas denitration technology in flexibility reconstruction of thermal power units[J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(12): 3027-3031.
- [4] 陈辉,张佳佳,戴维葆,等. 330 MW 机组 SCR 脱硝系统灵活性优化改造技术研究[J]. 电站系统工程, 2020, 36(4): 12-16.
CHEN Hui, ZHANG Jiajia, DAI Weibao, et al. Research on flexibility optimal transformation technology of SCR system of 330 MW unit[J]. Power System Engineering, 2020, 36(4): 12-16.
- [5] 卢志民,李博航,唐雯,等. 燃煤电厂 SCR 脱硝系统喷氨优化模拟[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(8): 62-70.
LU Zhimin, LI Bohang, TANG Wen, et al. Optimization simulation of ammonia injection in SCR deNO_x system of coal-fired power plant[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(8): 62-70.
- [6] 张媛媛,曲江源,张锴. 燃煤机组 SCR 烟气脱硝系统流场均布一体化建模与性能优化[J]. 热力发电, 2023, 52(8): 146-155.
ZHANG Yuanyuan, QU Jiangyuan, ZHANG Kai. Integrated modeling and performance optimization of flow field homogenization in SCR denitrification system of coal-fired unit[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(8): 146-155.
- [7] 沈颖,孙继欣,陈炜琦. 面向有源配电网的业务驱动的数字孪生数据质量模型研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2024, 50(2): 144-152.
SHEN Ying, SUN Jixin, CHEN Weiqi. Business-driven digital twin data quality model for active distribution networks[J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2024, 50(2): 144-152.
- [8] 潘旭,王金丽,赵晓龙,等. 智能配电网多维数据质量评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1375-1384.
PAN Xu, WANG Jinli, ZHAO Xiaolong, et al. Multi-dimensional data quality evaluation method for intelligent distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1375-1384.
- [9] 刘一帆,董建宁,田煜昆,等. 大型火电机组 SCR 烟气脱硝全流场数值模拟分析与优化[J]. 热力发电, 2022, 51(9): 103-110.
LIU Yifan, DONG Jianning, TIAN Yukun, et al. Numerical simulation and optimization for SCR flue gas denitration full flow field of large thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9): 103-110.
- [10] OFOLI A R. Experimental demonstration of ammonia storage and slip modeling with control for an SCR after treatment system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4): 2342-2348.
- [11] 何陆灿,葛铭,陈国庆,等. 火电厂 SCR 脱硝系统喷氨优化调整[J]. 热力发电, 2019, 48(11): 129-134.
HE Lucan, GE Ming, CHEN Guoqing, et al. Optimization of ammonia-injection in SCR denitrification system of coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(11): 129-134.
- [12] TANG Z, WANG S, LI Y. Dynamic NO_x emission concentration prediction based on the combined feature selection algorithm and deep neural network[J]. Energy, 2024, 292: 1-13.
- [13] 曲立涛,李超,王德鑫,等. SCR 脱硝超低排放 NO_x 均匀性优化及安全策略分析[J]. 中国电力, 2019, 52(7): 161-167.
QU Litao, LI Chao, WANG Dexin, et al. Optimization on the ultra-low NO_x emission uniformity and analysis on the safety strategy of SCR denitration system[J]. Electric Power, 2019, 52(7): 161-167.
- [14] 高常乐,司凤琪,任少君,等. 基于 LSTM 的烟气 NO_x 浓度动态软测量模型[J]. 热能动力工程, 2020, 35(3): 98-104.
GAO Changle, SI Fengqi, REN Shaojun, et al. Dynamic Soft sensing model of NO_x concentration in flue gas based on LSTM[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 98-104.
- [15] 郭瑞君,周磊,张国斌,等. 基于 SCR 入口 NO_x 浓度和烟气流量预测的脱硝控制系统[J]. 热能动力工程, 2020, 35(9): 141-147.

- GUO Ruijun, ZHOU Lei, ZHANG Guobin, et al. Denitration control system based on SCR inlet NO_x concentration and flue gas flow prediction[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(9): 141-147.
- [16] 尹贵豪, 赵中阳, 李钦武, 等. 基于入口 NO_x 质量浓度修正的脱硝系统多模型预测控制策略及其应用案例[J]. 环境工程学报, 2022, 16(6): 1879-1891.
YIN Guihao, ZHAO Zhongyang, LI Qinwu, et al. Multi-model predictive control of denitrification system based on modification of inlet NO_x mass concentration and its application case[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(6): 1879-1891.
- [17] 周伊, 肖先勇, 赵清华, 等. 基于组合数据清洗与改进注意力机制的光伏发电功率预测[J]. 供用电, 2024, 41(10): 31-37.
ZHOU Yin, XIAO Xianyong, ZHAO Qinghua, et al. Photovoltaic power forecasting based on combined data cleaning and improved attention mechanism[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(10): 31-37.
- [18] 魏金萧, 周步祥, 张冰. 综合数据清洗及无监督学习技术的电力设备状态评估[J]. 水电能源科学, 2016, 34(9): 210-214.
WEI Jinxiao, ZHOU Buxiang, ZHANG Bing. State evaluation of power equipment based on comprehensive data cleaning and unsupervised learning[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(9): 210-214.
- [19] 喻小伟, 马俊飞, 王东, 等. SCR 脱硝装置喷氨优化调整试验研究[J]. 锅炉技术, 2024, 55(5): 79-84.
YU Xiaowei, MA Junfei, WANG Dong, et al. Research for optimized adjustment tests of ammonia injection in SCR denitrification system[J]. Boiler Technology, 2024, 55(5): 79-84.
- [20] RAZA H, KIM Y, LIM O, et al. Improvement of de- NO_x performance of a SCR system by dual-point ammonia injection in a diesel engine[J]. International Journal of Automotive Technology, 2024, 25(6):1263-1271.
- [21] 肖平, 吕海生, 李强, 等. 正交试验方法在 CFB 锅炉燃烧调整试验中的应用[J]. 热力发电, 2009, 38(11): 61-69.
XIAO Ping, LYU Haisheng, LI Qiang, et al. Orthogonal test method and its application in combustion adjusting test of CFB boilers[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(11): 61-69.
- [22] 周长鑫, 刘建全, 武振新, 等. 基于正交试验法的 700 °C 四角切圆燃煤锅炉热偏差数值模拟研究[J]. 热力发电, 2022, 51(2): 150-156.
ZHOU Changxin, LIU Jianquan, WU Zhenxin, et al. Numerical simulation of thermal deviation of 700 °C tangentially fired boiler based on orthogonal test method[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(2): 150-156.
- [23] 武宝会, 李刚, 薛大禹, 等. SCR Control+脱硝控制系统研究及其在 660 MW 机组的应用[J]. 中国电力, 2017, 50(11): 175-179.
WU Baohui, LI Gang, XUE Dayu, et al. Study on SCR control + denitrification injection control system and its application in a 660 MW unit[J]. Electric Power, 2017, 50(11): 175-179.
- [24] 吴鸣浩, 孟祥明, 柯金火, 等. 一种在线优化精准脱硝控制系统设计及应用[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(11): 53-55.
WU Minghao, MENG Xiangming, KE Jinhua, et al. Design and application of online optimization precise denitration control system[J]. Techniques of Automation and Applications, 2023, 42(11): 53-55.
- [25] 李影, 卓建坤, 吴逸凡, 等. 可解释的变负荷下燃煤机组 SCR 反应器入口 NO_x 质量浓度预测模型[J]. 热力发电, 2024, 53(7): 119-128.
LI Ying, ZHUO Jiankun, WU Yifan, et al. Interpretable prediction model for NO_x mass concentration at SCR reactor inlet in coal-fired power plants under flexible operating conditions[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(7): 119-128.
- [26] AN B, TANG M, QIU J. Dynamic NO_x prediction model for SCR denitrification outlet of coal-fired power plants based on hybrid data-driven and model ensemble[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2023, 62(36): 14286-14299.
- [27] JIANG L, QIU Y L, LI Y. Effect analysis of quantum chemical descriptors and substituent characteristics on Henry's law constants of polybrominated diphenyl ethers at different temperatures[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 145(11): 176-183.
- [28] TOROPOVA A P, TOROPOV A A, VESELINOV I B, et al. QSAR models for HEPT derivatives as NNRTI inhibitors based on Monte Carlo method[J]. European Journal of Medicinal Chemistry, 2014, 77: 298-305.

(责任编辑 杨嘉蕾)