

脱硝系统喷氨流量自动调节控制策略研究

方波

国电投远达催化剂有限公司 重庆 南岸 400000

【摘要】：精准的喷氨流量自动调节是保障脱硝系统高效运行与烟气达标排放的核心环节，合理的控制策略可有效平衡脱硝效率与氨逃逸风险。针对脱硝系统运行中负荷波动、烟气成分变化等干扰因素导致的喷氨调节精度不足问题，聚焦自动调节控制策略的优化方向，探讨基于烟气参数反馈、系统动态特性匹配的控制逻辑构建路径，阐述控制策略在提升调节响应速度、稳定脱硝效果方面的作用，为脱硝系统喷氨流量控制的精准化升级提供理论参考。

【关键词】：脱硝系统；喷氨流量；自动调节；控制策略；精准控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.001

引言

工业烟气脱硝是控制氮氧化物排放、守护生态环境的关键技术手段，喷氨流量的调节精度直接决定脱硝系统的运行效能与环保效益。脱硝过程中，烟气负荷波动、原烟气氮氧化物浓度变化、反应器内催化效率衰减等复杂工况，易导致喷氨量与实际需求不匹配，引发脱硝效率下降或氨逃逸超标等问题，制约系统稳定运行。精准高效的喷氨流量自动调节控制，成为破解上述难题、提升脱硝系统整体运行水平的关键突破点。明确喷氨流量自动调节的核心需求，探索科学可行的控制策略，能够为复杂工况下脱硝系统的稳定运行提供支撑，衔接控制策略的理论构建与实际应用，推动脱硝技术的优化升级。

1 脱硝系统喷氨流量调节的核心需求与工况特性分析

喷氨流量调节核心目标是精准平衡氮氧化物去除效率与氨逃逸量，保障系统经济稳定运行，既要确保烟气达标排放，也要避免过量喷氨引发设备故障。脱硝系统工况受主机负荷、燃料品质等影响呈动态波动，催化剂活性衰减及烟气杂质还会干扰调节精度，增加调节难度^[1]。当前调节方式存在明显不足，传统固定比例调节未考虑多变量影响，简易自动调节反馈滞后，缺乏差异化调节逻辑，难以适配复杂工况，在适应性、精准性和响应速度上存在短板。

2 喷氨流量自动调节控制的核心理论与逻辑构建

2.1 自动调节控制的核心理论基础

喷氨流量自动调节控制以自动控制理论为核心支撑，涵盖反馈控制、前馈控制、模糊控制等多种理论应用。反馈控制理论通过实时采集脱硝出口氮氧化物浓度、氨逃逸量等关键参数，与设定值进行对比分析，计算偏差并驱动执行机构调整喷氨流量，形成闭环控制回路，确保调节效果精准匹配控制目标。前馈控制理论则针对负荷波动、原烟气氮氧化物浓度变化等可预测干扰因素，锅炉氧量、磨粉机启/停时刻等关键参数作为前馈信号，提前根据相关参数变化趋势调整喷氨量，有效降低干扰因素对调节效果的影响，弥补反馈控制的滞后性缺陷。模糊

控制理论适用于脱硝系统这类具有非线性、大滞后、参数耦合特性的复杂系统，具体通过梳理资深运维人员的实操经验，提炼不同工况下“烟气参数偏差-喷氨调节量”的对应规则，构建包含输入量模糊化、模糊推理、输出量清晰化的完整模糊控制模块，例如将原烟气 NO_x 浓度偏差 ($-200\sim+200\text{ mg/Nm}^3$) 和烟气流量偏差 ($-100000\sim+100000\text{ Nm}^3/\text{h}$) 划分为“负大、负中、负小、零、正小、正中、正大”7个模糊子集，基于模糊规则库输出喷氨流量调节量的模糊值，再通过重心法将其清晰化为具体执行值；同时，在模糊控制逻辑中纳入尿素水解制氨的浓度参数影响因子，当尿素浓度低于30%时，适当增大喷氨调节量补偿反应速率下降，当浓度高于55%时则降低调节幅度避免氨逃逸激增，且增设传感器数据有效性判断环节，通过相邻时刻数据差值突变检测（如瞬时变化量超过阈值50%）和历史均值比对，识别传感器失真情况并启动备用数据插值算法，保障控制逻辑输入的可靠性，实现对复杂工况下喷氨流量的灵活调节，提升系统对不确定性因素的适应能力。

2.2 自动调节控制逻辑的构建框架

喷氨流量自动调节控制逻辑的构建需围绕“参数采集-信号处理-策略决策-执行调节”的核心框架展开，确保各环节协同衔接。参数采集环节需选取关键表征参数，包括原烟气流量、原烟气氮氧化物浓度、脱硝出口氮氧化物浓度、氨逃逸量、反应器进出口温度等，通过高精度传感器实现参数的实时、稳定采集，为调节决策提供可靠数据支撑。信号处理环节对采集到的参数进行滤波、校正处理，去除粉尘、电磁干扰导致的信号噪声，修正传感器误差，确保参数数据的准确性^[2]。策略决策环节基于预设控制逻辑，结合处理后的参数数据进行分析计算，确定最优喷氨流量调节量。执行调节环节通过高精度执行机构将调节指令转化为实际喷氨流量调整，同时实时反馈调节效果，形成完整的控制闭环。

2.3 控制参数的选取与优先级排序

控制参数的科学选取与优先级排序是保障自动调节精度的关键前提，需结合脱硝反应机理与系统运行特性确定核心参

数及关联参数。核心控制参数包括脱硝出口氮氧化物浓度和氨逃逸量，二者直接反映脱硝效果与系统运行安全性，作为调节决策的首要依据，优先级最高，通过实时监测数据与设定阈值的偏差驱动核心调节动作。关联控制参数涵盖原烟气流量、原烟气氮氧化物浓度、反应器温度、催化剂运行时间等，其中原烟气流量和氮氧化物浓度用于预判喷氨需求的基础变化趋势，为前馈调节提供依据；反应器温度对脱硝反应的影响具体表现为：当温度处于 280~320℃ 区间时，脱硝反应速率随温度升高线性提升，每升高 10℃ 反应速率提升 8%~10%，此时可适当降低喷氨量；当温度升至 320~380℃ 时，反应速率达到峰值且稳定性最佳，喷氨量可维持在基准值；当温度超过 380℃ 时，催化剂活性开始衰减，反应速率逐渐下降，需逐步增加喷氨量以补偿效率损失，同时需避免温度超过 420℃ 导致催化剂永久性损坏；催化剂运行时间用于评估催化效率衰减程度，为调节策略的动态适配提供参考，此类关联参数优先级次于核心参数，用于优化调节精度与适应性。

3 喷氨流量自动调节控制策略的优化设计

3.1 前馈-反馈复合控制策略设计

前馈-反馈复合控制策略通过整合前馈控制的前瞻性与反馈控制的精准性，有效提升复杂工况下的喷氨调节效果。该策略将原烟气流量、原烟气氮氧化物浓度等可预测参数作为前馈信号，基于脱硝反应化学计量关系，提前计算基础喷氨流量，实现对工况波动的预判性调节，降低主要干扰因素对系统的影响。将脱硝出口氮氧化物浓度和氨逃逸量作为反馈信号，实时检测调节效果与设定目标的偏差，通过 PID 控制器对前馈调节后的喷氨流量进行精细修正，弥补前馈调节中因参数测量误差、反应条件变化导致的调节偏差，形成“预判调节+精准修正”的复合控制模式，提升调节精度与响应速度。如图 1:



图 1 脱硝系统尿素水解喷氨装置实景图

3.2 基于工况分区的差异化控制策略

基于工况分区的差异化控制策略依据脱硝系统运行负荷、烟气参数等关键指标，将运行工况划分为低负荷（≤50%额定

负荷）、额定负荷（50%~100%额定负荷）、高负荷（>100%额定负荷，最大 110%）及烟气参数突变（NO_x浓度变化速率≥100 mg/Nm³·min 或负荷变化速率≥10%额定负荷/min）等不同区域，针对各区域的工况特性构建差异化调节逻辑^[3]。在低负荷工况下，基于 330MW 机组烟气流量小（≤500000 Nm³/h）、温度较低（280~320℃），脱硝反应速率较慢，易出现氨逃逸偏高问题，调节逻辑侧重降低喷氨流量调节幅度（单次调节幅度≤0.5 m³/h），延长调节周期（调节周期≥10 s），避免频繁调节导致的系统不稳定；在额定负荷工况下，基于 330MW 机组工况相对稳定，调节逻辑以精准控制为核心，采用常规 PID 调节参数（K_p=1.0, Ti=10 s, Td=2 s），确保氮氧化物排放与氨逃逸量双达标；在高负荷工况下，基于 330MW 机组烟气流量大（>800000 Nm³/h）、氮氧化物生成量多（>600 mg/Nm³），调节逻辑侧重提升响应速度（闭环响应时间≤3 s），加大调节幅度（单次调节幅度可达 1~2 m³/h），同时强化氨逃逸监测（采样频率提升至 20 Hz），防止因喷氨不足导致脱硝不达标；在烟气参数突变工况下，启动快速响应机制，暂时调整调节参数（K_p 提升至 1.8, Ti 缩短至 5 s），优先保障系统运行稳定，待工况平稳后恢复常规调节逻辑。

3.3 融合催化效率衰减的自适应控制策略

融合催化效率衰减的自适应控制策略通过实时评估催化剂活性状态，动态调整喷氨调节逻辑，弥补催化效率衰减对脱硝效果的影响。该策略通过采集催化剂运行时间、反应器进出口氮氧化物浓度差值、烟气温度等参数，构建催化效率评估模型，实时计算当前催化效率值。当检测到催化效率下降时，调节策略自动修正喷氨流量计算系数，在保证脱硝出口氮氧化物浓度达标的前提下，适当增加喷氨量，同时严格控制氨逃逸量不超过阈值。通过长期运行数据积累，建立催化效率衰减趋势预测模型，提前预判催化效率变化方向，主动调整调节参数，实现对催化效率衰减的前瞻性适应，避免因催化效率突然下降导致的脱硝效率波动，保障系统长期稳定运行。

4 喷氨流量自动调节控制策略的实施保障措施

4.1 高精度检测系统的搭建与校准

高精度检测系统是自动调节控制策略有效实施的基础保障，需针对关键控制参数搭建全方位、高精度的检测网络。在检测设备选型上，选用响应速度快（响应时间≤1 s）、测量精度高、抗干扰能力强的氮氧化物传感器、氨逃逸传感器、烟气流量传感器等设备，确保参数采集的准确性与实时性。在传感器安装布局上，将原烟气参数传感器安装在脱硝反应器入口前端 1~2 m 处，保证采集到的原烟气数据能及时为前馈调节提供支撑；将出口氮氧化物和氨逃逸传感器安装在反应器出口后端 3~5 m 处，确保能真实反映脱硝效果。建立定期校准机制，每月对传感器进行零点校准，每季度进行量程校准（选用标准气

体浓度: NO_x 50 mg/Nm^3 、100 mg/Nm^3 ; NH_3 3 ppm、5 ppm), 及时更换老化、损坏的传感器(使用寿命超过 20000 h 的传感器强制更换), 消除检测误差对调节策略实施效果的影响, 为控制策略的精准决策提供可靠数据保障。

4.2 执行机构的优化选型与协同调试

执行机构的性能直接决定喷氨流量调节指令的执行效果, 需结合控制策略要求进行优化选型与协同调试。在执行机构选型上, 选用调节精度高(调节精度 $\leq 0.1\%$ 额定流量)、响应速度快(全行程响应时间 ≤ 2 s)、稳定性强的电动调节阀作为喷氨流量执行元件, 确保能精准响应控制系统发出的调节指令, 实现喷氨流量的连续、平稳调节^[4]。针对不同工况下的调节需求, 选取具有合适调节范围(0~50 m^3/h)和流量特性的调节阀, 保障在低流量(≤ 10 m^3/h)、高流量(> 30 m^3/h)等不同工况下均能具备良好的调节性能。在协同调试环节, 将执行机构与控制系统进行联动调试, 优化调节阀的开度-流量特性曲线(通过多点标定修正非线性误差, 修正后误差 $\leq 2\%$), 修正执行机构的响应延迟时间(将延迟时间从 0.8 s 修正至 0.3 s 以内), 确保调节指令发出后, 执行机构能快速、准确地完成喷氨流量调整, 实现控制系统与执行机构的高效协同, 提升整体调节效果。

5 喷氨流量自动调节控制策略的应用效能提升路径

5.1 基于运行数据的策略迭代优化

基于运行数据的策略迭代优化是提升控制策略应用效能的重要路径, 通过积累脱硝系统长期运行数据, 挖掘数据背后的工况变化规律与调节效果关联关系, 为控制策略的持续优化提供依据。建立运行数据采集与分析平台, 实时采集喷氨流量、烟气参数、脱硝效果、设备运行状态等全量数据, 通过数据挖掘技术分析不同工况下控制参数与调节效果的匹配度, 识别现有控制策略的优化空间。针对数据反映出的调节偏差较大、响应不及时等问题, 调整控制算法参数、优化工况分区边界、完善自适应调节逻辑, 完成控制策略的迭代升级。通过数据对比分析, 验证迭代后控制策略的应用效果, 形成“数据采集-分析优化-效果验证”的闭环迭代机制, 持续提升控制策略的适配性与调节精度。

参考文献:

- [1] 费雪英, 饶锐, 章利华, 等. 六级预热器脱硝系统改造[J]. 水泥技术, 2025, (06): 74-78.
- [2] 徐伟朝. 深度调峰背景下脱硝系统运行稳定性挑战与应对措施[C]//郑州市社会学学会. 2025 年社会学研讨会人文与发展分论坛论文集(下册). 国能宁东第一发电有限公司, 2025: 141-142.
- [3] 王耀挺, 李健, 杜宝仓, 等. 基于 T-S 模糊神经网络的 SCR 脱硝系统建模[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(09): 7-11+18.
- [4] 赵征, 钟尚峰, 梁磊. 垃圾焚烧炉 SNCR 脱硝系统 NO_x 排放浓度优化控制[J]. 电力科学与工程, 2025, 41(11): 45-53.
- [5] 曹美杰, 王涛, 么颖林, 等. 锅炉烟气脱硝精准喷氨控制系统设计及应用[J]. 冶金动力, 2025, (04): 73-78.

5.2 多系统协同运行的效能整合

多系统协同运行的效能整合通过打通喷氨调节系统与主机燃烧系统、烟气处理其他系统的协同链路, 实现整体运行效能的提升。将喷氨调节系统与主机燃烧系统进行联动, 实时获取燃烧工况参数, 提前预判因燃烧调整导致的氮氧化物生成量变化, 优化喷氨调节的前馈控制逻辑, 实现喷氨调节与燃烧工况的精准匹配^[5]。加强与除尘、脱硫等其他烟气处理系统的协同, 根据除尘系统的粉尘去除效果、脱硫系统的运行状态, 调整喷氨调节参数, 避免不同系统运行相互干扰。通过构建多系统协同控制平台, 实现各系统运行参数的共享与联动调节, 整合各系统效能, 形成烟气处理全流程的优化运行模式, 在保障脱硝效果的提升整体烟气处理系统的运行经济性与稳定性。

5.3 典型应用案例

某 330MW 火电企业 6 号机组原脱硝喷氨系统采用传统 PID 控制, 存在调节延迟、工况适应性差等问题, 氨逃逸量波动较大。为提升效能, 采用优化控制策略进行改造: 搭建运行数据采集平台, 嵌入前馈-反馈复合控制与工况分区调节算法, 同时打通与主机燃烧系统的协同链路, 实现多系统参数共享联动。改造后, 控制系统自动化投入率超 99%, 在保证氮氧化物排放稳定达标(≤ 50 mg/Nm^3)的前提下, 氨逃逸浓度降低 30%, 液氨单耗下降 15%, 年节约脱硝剂成本超 80 万元, 验证了优化控制策略及效能提升路径的可行性与实用性。

6 结语

本文围绕脱硝系统喷氨流量自动调节控制策略展开研究, 明确了调节核心需求与工况特性, 构建了多维度优化控制策略, 提出了实施保障措施与效能提升路径。研究表明, 科学的自动调节控制策略可有效提升喷氨调节精度, 平衡脱硝效率与氨逃逸风险。后续需持续依托运行数据推动策略迭代, 强化多系统协同与运维适配, 进一步发挥控制策略在脱硝系统高效运行中的支撑作用, 为氮氧化物精准减排提供更可靠的技术保障。该研究成果通过提升脱硝系统运行效能, 有效降低氮氧化物排放总量, 为大气污染防治、生态环境质量改善提供了重要技术支撑, 具有显著的环境保护价值。