

火电厂脱硝系统精准喷氨控制优化研究

曾燕娥

福建华电可门发电有限公司，福建省福州市，350000；

摘要：控制火电厂氮氧化物的排放是达到超低排放标准的关键步骤。针对传统喷氨控制存在响应迟滞，分布不均以及能耗较高等问题，搭建了一种基于 NOx 分区检测及智能算法的精准喷氨控制系统。系统采用多点测量，预测控制和自适应优化等方法，使喷氨总量和空间分布达到动态匹配。某电厂 3 号机组工程验证显示，该系统能够显著减少 NOx 的波动和氨的逃逸，同时脱硝效率也得到了显著的提升，为燃煤机组的智能化和节能化运行提供了重要的技术支持。

关键词：火电厂；脱硝系统；精准喷氨；智能控制

DOI: 10.69979/3041-0673.26.02.046

引言

随着燃煤电厂环保标准的持续提高，传统脱硝系统在复杂工况下暴露出响应迟缓与调节精度不足的问题。精准喷氨控制是集智能检测和动态优化于一体的新控制策略，可实现不同负荷下喷氨量和 NOx 浓度协同调节。在某电厂 3 号机组上进行工程应用，结果表明，该项技术在提高烟气分布和反应均衡的同时，显著减少了能耗和氨逃逸。文章基于工程实践，系统阐述了系统设计、算法优化及运行验证过程，为业界智能化控制的实现提供了理论与实践参考。

1 研究背景与研究思路概述

1.1 火电厂脱硝系统的现状与发展需求

火电机组是中国能源结构的主体，火电机组排放控制水平的高低直接关系到大气污染治理的进程。氮氧化物在火力发电厂排放的烟气中是主要的污染来源，对生态平衡和人们的健康构成了潜在风险。为了达到超低的排放标准，各个行业普遍选择使用选择性催化还原 (SCR) 技术。这种技术是通过向高温烟气中喷射氨气，使其与 NOx 进行反应，生成氮气和水，进而有效地减少排放。但常规喷氨系统主要依靠 PID 控制以及经验曲线进行控制，具有调节滞后，反应缓慢的特点，负荷波动、煤质差异以及流场不均匀容易造成脱硝效率降低以及氨逃逸加剧，甚至诱发空预器堵塞和催化剂中毒事故 [1]。精准喷氨控制技术采用多点分区检测及智能优化算法实现了喷氨量和反应需求之间的动态匹配，在确保排放合格的前提下减少能耗及副反应的发生，为火电机组

节能减排开辟了一条新途径。

1.2 研究目的与主要研究内容

本项研究以某电厂的 3 号机组作为研究对象，构建了一个基于实时分区检测和智能控制算法的高精度喷氨控制系统，探索出了一条高效、稳定、经济地运行的装置工程化实施之路。研究对象包括多维度数据采集体系的建立，喷氨分配策略的优化，预测控制模型的搭建和运行效果的验证等。内容涉及系统结构设计、测量技术改进、算法构建和硬件集成等方面。该工程在原 DCS 中加入了优化控制服务器，分区测量模块和通信接口等设备，以实现对机组运行参数，NOx 浓度以及喷氨阀门情况等信息的实时传送。控制算法结合历史数据与当前工况，建立喷氨总量与分区均衡的控制模型。系统具备自动校正、动态响应及自学习功能，能在不同运行条件下维持 NOx 浓度稳定并有效降低氨逃逸。研究内容贯穿于整个脱氮系统的运行过程中，由结构改造至控制逻辑优化形成了一整套技术链路，从而为火电厂脱氮控制智能化打下了基础 [2]。

1.3 研究思路与创新点

研究从工程实践出发，将过程建模和智能控制的思想相结合，搭建了火电厂脱氮系统精准喷氨的控制架构。总的思路是问题导向，数据驱动达到系统优化的目的。研究将基于稀释采样和化学发光法分析相结合的 NOx 分区检测技术引入到测量层，使得脱硝出口 NOx 浓度的监测更准确；控制层设置喷氨总量和分区联动算法以达到空间分布调节和流量协调；系统层采用工控服务器和 DCS 通讯的方式进行实时数据交互和控制信号的传

输。创新点体现在三个方面，采用多点分区测量与动态补偿方法，显著提升浓度场识别精度；介绍了预测控制和均衡优化算法对传统 PID 的延迟进行了改善；构造了无扰切换逻辑以实现手动、自动和优化模式之间的光滑切换。

2 火电厂脱硝系统运行特性与问题分析

2.1 SCR 脱硝系统工艺原理与运行特征

SCR 系统在火力发电厂中主要负责氮氧化物的控制，其工作原理是通过氨气或尿素在催化剂的作用下与烟气中的 NOx 进行反应，从而生成氮气和水。某电厂的 3 号机组使用了与超临界锅炉相匹配的 SCR 脱硝设备，其布局采用了“2+1”的双反应器设计，其中两层催化剂并行工作，而一层则作为备用。在系统设计中，入口的 NOx 浓度被设定为 320mg/m³，而出口的浓度则被限制在 50mg/m³ 以下。通过稀释风机将氨气和空气混合成低浓度的混合气体并通过喷氨格栅喷入烟道。稀释风机按一用一备设置，保证不同负荷下的供氨能力。反应器运行效率受到烟气温度、流速，入口浓度等因素的影响而呈现非线性，滞后性等特点。催化剂活性随着使用周期的衰减而使得反应速率逐渐下降^[3]。流场的不均匀导致了不同地区反应强度的差别和 NOx 在出口处的浓度不均匀分布。

2.2 喷氨系统控制机制与关键影响因素

喷氨系统主要由供氨装置、混合风机、喷射格栅、气动阀门和监测仪表等组成，SCR 脱氮系统中最核心的调节环节。在系统运行过程中，氨气经稀释和分配后通过多支管向烟气通道内喷射，喷氨量在不同区域的合理配置决定了氨的反应效率。该控制机制依靠流量测量，阀门执行和反馈信号闭环调节来实现对喷氨和 NOx 浓度同步控制。影响喷氨准确性的主要因素有负荷变化、烟气温度、流场结构、催化剂活性和入口 NOx 起伏等。当负荷发生波动时，会导致烟气的流量发生改变，从而影响反应器内部的物理环境；当催化剂的性能下降时，反应的速度也会受到影响，因此需要对喷氨的比例进行动态调节。流场偏差造成局部反应不均匀，出现过喷和欠喷。传统的控制方式很难做到多变量情况下的同步调节。精准喷氨系统采用分区测量及算法优化相结合的方

法，各喷射区单独控制并实时校正阀门开度使得喷氨流量符合 NOx 的分布规律，显著改善了反应的均匀性及脱硝效率^[4]。

2.3 传统控制模式存在的主要问题与改进必要性

传统的 SCR 喷氨控制系统通常采用固定比例或者 PID 调节方式，其调节参数主要依靠人工经验进行设置，不能对复杂的工况变化做出及时的反应。当系统受到负荷急剧上升和下降，煤质波动或者烟气扰动等因素的影响时易产生控制偏差。由于 PID 算法是建立在线性假设的基础上，SCR 过程是一个强非线性的响应，因此控制精度有限。喷氨信号对 NOx 浓度的反馈会有几分钟的时延，使系统响应出现滞后性，从而导致系统脱硝效率降低，氨逃逸增加。有些机组在长时间的运行过程中，由于氨气喷射不均匀，导致催化剂出现局部中毒或阻塞，从而增加了维护的成本。传统系统中总量控制忽略了空间分布特性而无法正确体现各分区响应的差异性。随着环保标准的提高，原控制策略已经很难满足低排放和高稳定性双重需求，实现分区检测、动态优化、智能预测等精准喷氨控制，已成为技术升级的方向^[5]。

3 精准喷氨控制优化设计与实现

3.1 系统总体架构与控制思路

精准喷氨控制系统旨在实现脱硝过程的动态协调与高精度控制。某电厂的 3 号机组在原有的 DCS 控制系统上加入了优化控制服务器，并通过 MODBUS 通信与机组的实时数据进行了连接。系统整体架构包括 NOx 分区测量装置、喷氨控制阀组、数据采集与传输模块，优化算法服务器以及人机交互界面。每个分区内设置有独立喷氨支管和调节阀并结合实时浓度反馈信号完成喷氨量准确调节。所述优化控制服务器根据所述脱氮系统的运行模型对所述进口 NOx、O₂ 浓度及锅炉负荷的多项参数信息进行解析，以产生喷氨总量及分区分配指令。该系统支持手动、自动以及优化三种操作模式，并在切换时使用信号追踪逻辑，以防止输出的突然变化。控制思路是以预测计算为主线，通过学习历史数据建立系统响应模型从而预先调节喷氨量来适应烟气的变化，达到无扰动稳定控制的目的。



图1 喷氨管路改造图

3.2 NOx 分区测量与喷氨流量控制策略优化

NOx 分区测量系统为精准喷氨控制提供了依据。该检测系统在脱硝出口的 A、B 侧斜烟道中设置了 12 个采样点，并通过稀释采样和化学发光技术来实时分区检测 NOx 的浓度。该设备包括取样枪、干燥机、气源柜以及分析仪，信号传输到控制柜，通过通信模块上传到优化服务器。服务器根据所述测量结果和机组负荷计算所述喷氨分配程序，并控制所述阀门的开度以使得氨气喷射量和烟气浓度相匹配。该流量调节阀由 V 型球阀和 Fisher 定位器相结合而成，具有高线性度、灵敏响应的特点。该控制策略将历史数据和实时偏差相结合，采用递推算法对喷氨指令进行动态修正，通过反馈环节对比预测和实际浓度的差异以达到不断优化的目的。经过实际测试，发现分区测量的误差不超过 2%，阀门的反应时间不会超过 1 秒，NOx 的排放量始终保持在 50mg/m³ 以下，这提高了脱硝的效率。

3.3 智能喷氨均衡控制算法与无扰切换逻辑设计

喷氨均衡控制算法是以多变量动态预测原理为基础，通过构造喷氨扩散模型和催化剂性能场模型来达到分区协调的目的。该算法的核心是计算每个喷氨分区阀门开度和 NOx 浓度的变化映射关系，并通过历史数据构造预测矩阵来推断未来浓度的变化趋势。系统地比较了各个分区的浓度偏差并计算了喷氨流量的修正系数，使得氨气和 NOx 在反应区的混合更均匀。控制服务器将阀门调节指令通过 4~20mA 的信号传送给 DCS，DCS 执行该动作后进行状态反馈。无扰切换逻辑确保了不同控制模式间的平滑输出，信号跟踪模块实现了模式转换过程中阀门状态的同步记录，避免了由于切换引起的瞬态波动。该系统具有自学习的能力，能够根据运行结果对算法的权重进行自动调节，从而提高了预测精度。根据实际运行的数据，这种算法成功地控制了 NOx 的浓度波动，使得出口浓度的分布更为均匀，提高了大约 25%，同时脱硝的效率也保持在 85% 或更高，氨逃逸稳定在 3ppm 以下，系统具有较好的适应性和可靠性。

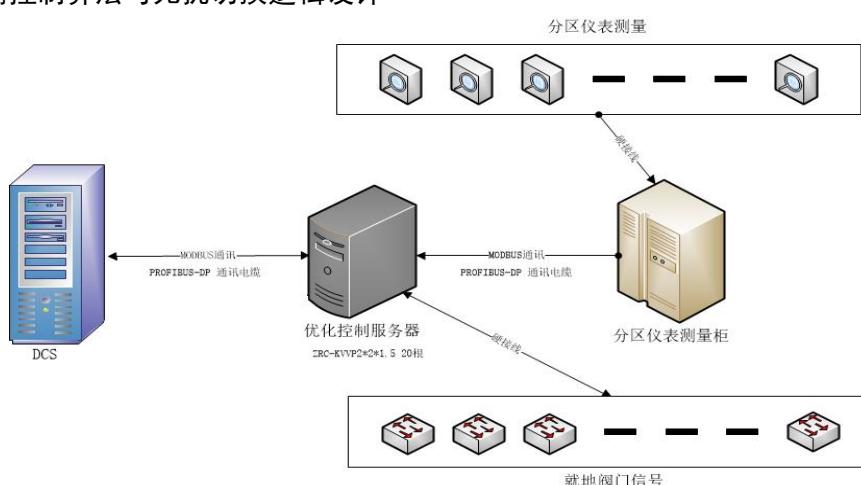


图2 脱硝喷氨优化系统总图

4 系统运行验证与保障措施

4.1 工程实施与调试结果分析

项目建设严格按照电力行业的建设和验收标准进行。项目内容涉及喷氨格栅分区流量控制阀的改造，NOx 分区测量系统的搭建，优化服务器和通信接口的配

置及 DCS 画面优化等。施工阶段按专业分工同步进行，完成管道焊接、电缆敷设、仪表安装及系统接线等工作。在冷态调试阶段，对控制逻辑，通信链路和信号完整性进行了验证，保证了系统有投入的条件。机组着火后热态调试检查喷氨阀的动作情况，浓度反馈的准确性和服务器计算的稳定性。经过测试，发现通信的延迟时间少于 1 秒，阀门的开度误差不超过 2%，整个系统的反应非常稳定。该机组在各种负荷条件下都能稳定运行，其出口的 NO_x 浓度约为 45mg/m³，氨的逃逸浓度不会超过 3ppm，而脱硝的效率始终保持在 85% 或更高。

4.2 运行优化效果与性能提升评估

该系统的投入使用显著提高了装置的性能。通过实施分区测量和智能控制策略，观察到出口 NO_x 的波动范围有了显著的减少，同时浓度的稳定性也提高了大约 40%。降低约一半，达到了同等脱硝效率时还原剂消耗量的降低和操作经济性的改善。氨逃逸减少到 3ppm 以内，空预器堵塞的危险明显缓解。该优化算法在负荷变化的情况下预先调节喷氨比例以保持反应器内部平衡。该控制系统抗扰能力强，调节时间减少了将近一半，催化剂反应面上的负荷分布更加均匀。运行监测结果表明，系统长期稳定运行，脱硝效率和氨利用率均处于较高水平。自动控制模式降低人工干预程度，增加运行安全性和可控性，显示精准喷氨技术在经济和环保两方面的优势。

4.3 安全管理、环境保护及运行维护保障

在工程实施的整个过程中，构建系统化的安全和环境管理体系。安全组织架构确定了项目经理，安全员和现场负责人的责任，实施高处作业、动火、提升和临时用电的专项管控。对全体施工人员进行安全培训和资格审查后，关键岗位持证上岗。施工现场设置防护设施、警示标识等，对危险源进行分级管理。在环境管理上采用封闭施工，喷雾降尘及噪声控制等措施，并在焊接和

切割区域安装防火隔离带。对施工废弃物进行分类收集和规范处理，对危险废物按环保要求进行集中处理。该系统在运行阶段设计了密封气路和防泄漏，氨气经过净化和烘干后投入使用，避免二次污染。维护体系制定了定期巡检和设备校验的制度，实现了传感器，阀门和服务器的周期检测和软件更新等功能，保障了系统的平稳运行。

5 结论

精准喷氨控制技术引入分区检测，预测控制和智能算法等技术，打破了常规 PID 模式对非线性和强耦合系统的限制。系统的脱硝效率，响应速度和稳定性等都显示了明显的优越性。分区测量增强空间识别的准确性，智能算法动态平衡喷氨分配，使得出口 NO_x 浓度维持在较低水平波动且氨逃逸浓度不断下降。该系统工作稳定、具有自学习和无扰切换能力、长期维护成本大大降低。福建华电可门发电有限公司实践成果证明，该项技术具有工程可行性和推广应用价值。本研究在促进火电厂脱氮系统技术升级的同时，还为建设脱氮高效能源系统提供可复制解决方案。

参考文献

- [1] 龙伟荣. 火电厂脱硝系统分区控制精准喷氨优化改造 [J]. 电力设备管理, 2025, (03): 242-244.
- [2] 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.
- [3] 卜钰. 火电厂脱硝精准喷氨系统的运行分析及优化 [J]. 机电信息, 2022, (24): 22-26.
- [4] 于子龙, 由文江, 马鸣鹤. 火电厂脱硝系统分区控制精准喷氨优化改造 [J]. 电力设备管理, 2021, (09): 163-164+175.
- [5] 张斌, 高泽明, 闫宗良. 火电厂脱硝系统精准喷氨技术的研究与应用 [J]. 自动化应用, 2021, (07): 110-112.