科技成果评价报告

成果名称：#2 机组 NOx 全截面测量的 SCR 脱硝喷氨系统控制技术的研究与应用

完成单位：晋控电力山西长治发电有限责任公司（盖章）

评价日期：2026 年 03 月 04 日

一、成果简介

（一）本项目研究内容：

喷氨系统分区改造方式；多点测量系统测点分区布置方式；开发NO_X/O_2多点测量系统；开发总量与分区协同控制策略。

（二）技术难点：

本项目的难点在于解决喷氨系统总供氨量调整快速响应性、分区调平中出口分区NO_X/O_2测量数据与入口分区喷氨量调整的同时性，即喷氨系统能实时跟踪、随动控制，实现快速调整喷氨总量及每个分区供氨量，去应对NO_X浓度场变化。

（三）先进性、创新性：

1、创新性地采用陶瓷半导体传感器测量技术，实现了原位采样分析，保证了数据采集的实时性。

2、开发全新取样技术，保证了传感器的稳定运行。

3、采用多点原位同步取样测量，实现数据采集的同源性。

4、开发了基于脱硝反应原理氨氮摩尔比的前馈串级调节技术，保证了脱硝系统喷氨的动态精准控制。

（四）技术路线、方案和效果：

1、技术路线

#2 机组NO_X全截面测量的 SCR 脱硝喷氨系统控制技术主要采用“烟气流场优化改造+喷氨管道分区改造+NO_X/O_2总量及分区测量+喷氨总量控制+喷氨分区调平控制”方案，即通过喷氨格栅分区改造、脱硝入口NO_X/O_2总量及出口NO_X/O_2分区测量、控制策略逻辑改进，实现动态控制和精细化喷氨，达到脱硝动态调节喷氨实现降耗的目的。

2、技术方案

（1）烟气流场优化改造通过计算机模拟手段，根据实际工程的几何形状和实际脱硝工程的设计参数，构建流体动力学模型，对原有烟气装置进行流场模拟试验，获得烟气流场的优化设计方案；

（2）对喷氨管道进行分区，设分区自动调节阀，实现喷氨装置的分区喷氨控制；

（3）脱硝入口及出口增设分区NO_X/O_2原位式快速测量仪表，测量脱硝

系统入出口 NO_X/O_2 实时数据；

（4）优化喷氨自动控制逻辑，改为采用嵌入式供氨量动态氨氮摩尔控制技术，控制系统透明的植入 DCS 控制系统。

3、预期效果

在一次设备具有调节余量且无缺陷、催化剂活性满足要求的前提下，按小时均值计算，改造后 SCR 出口 NO_X 分布均匀性均较大幅提高，控制排放参数、指标明显提升。如：脱硝系统出口氨逃逸稳定＜3ppm，SCR 正常投运情况下系统自动投入率可≥98%，总喷氨量相对改造前降低≥10%。

（五）经济效益：

1、经济效益

（1）实施后脱硝系统实现按需喷氨，可节省还原剂费用；

（2）实施后减少氨逃逸，有效减轻硫酸氢氨的形成，避免空预器堵塞造成的机组压阻升高，节省引风机的电耗费用，同时可减少空预器检修费用。

（3）实施后无需定期进行喷氨优化调整，节省每年喷氨调平费用。

（4）促进氨氮有效混合，减少硫酸氢氨腐蚀造成的催化剂失活和堵塞，延长催化剂使用寿命，节省催化剂更换费用。

2、社会效益

脱硝装置氨氮摩尔比分布若存在问题，必然导致氨逃逸增加等情况出现，降低了机组脱硝装置可靠性、增加了更换催化剂频率、导致下游设备堵塞、引风机电耗增加等。进行喷氨系统控制技术改造后，不但节约了还原剂的耗量，同时减少了氨逃逸对环境的污染。

（六）推广性：

本项目对#2 机组 NO_X 全截面测量的SCR脱硝喷氨系统控制技术开展课题研究应用，针对 SCR 脱硝喷氨工艺，推广分区域精准喷氨智能控制技术，有效后可推广至电厂其他机组。

二、主要创新点与内涵

1、概述

晋控电力山西长治发电有限公司#2 机组目前的 SCR 脱硝喷氨系统设计仅自动控制喷氨总量，但 SCR 入口 NO_X 浓度分布规律受机组负荷、燃烧方式、入炉煤质等的影响较大，难以保证进入 SCR 反应器的氨浓度分布与 NO_X 浓度分布相匹配（即难以保证 SCR 入口的氨氮摩尔比均匀）。

为保证 NOx 排放指标满足要求，SCR 出口势必存在局部 NO_X 偏低区域和氨逃逸率超标区域，局部氨逃逸超标可能导致空预器阻力攀升、三大风机电耗上升、排烟温度上升等问题，堵灰严重时还可能造成风机失速或喘振、炉膛负压波动甚至被迫停机冲洗等影响。此外，过大的氨逃逸率还易造成电除尘极线积灰，影响除尘效果。研究还表明，局部喷氨过量，易导致催化剂微孔堵塞，影响催化剂使用寿命。

上述问题在行业内超低排放、深度调峰、宽负荷脱硝等背景下变得尤为突出。同时，由于环保要求重污染天气特殊管控，更容易出现局部氨逃逸超标情况。脱硝系统现设置一台 SCR 反应器，喷氨层烟道为 8.8m×14m 的大截面积，在仅通过总量控制的情况下，很难实现 NO_X 浓度和氨浓度的均匀配比。

为此，为提高 NO_X 排放的稳定性、减小氨逃逸率，提高机组喷氨控制质量势在必行。机组脱硝 NO_X 与氨逃逸全截面测量 SCR 喷氨控制技术研究与应用是在目前脱硝系统的测量基础上，通过全面升级脱硝系统 NO_X 与氨逃逸的测量系统及喷氨控制逻辑的优化，提高 NO_X 排放的稳定性、减小氨逃逸率，提高机组喷氨控制质量。该系统可实现 SCR 入口全截面 NO_X 浓度、SCR 出口 $NO_X/NH_3/O_2$ 的全断面测量，SCR 入口喷氨的分区均衡控制等，全面提升喷氨控制的品质，减小氨逃逸对机组的不利影响。实施 SCR 喷氨控制系统改造，可有效预防因氨逃逸造成的空预器堵塞问题，也有利于更好控制 SCR 出口 NO_X 排放浓度，可长期维护机组运行的经济性和安全性，提高机组的综合竞争力。

2 技术方案、预期效果

2.1 技术方案的选定

现有常规 SCR 系统的喷氨及混合技术，要求 SCR 入口 NO_X 分布均匀且稳定，根据 SCR 入口 NO_X 分布相应调节喷氨格栅各支管各手动调节阀开度，控制各分区喷入还原剂的量。这种方式的不足在于：

对于 SCR 入口 NO_X 浓度比较常见的±30mg/m3 的变化，当出口 NO_X 控制在 100mg/m^3 时这种问题不太显著；在超低排放情况下，出口 NO_X 通常控制在 50mg/m^3 以内，SCR 入口 NO_X 浓度分布不均这个问题变得比较突出。

机组现有喷氨格栅各支管阀门为手动阀门，在进行喷氨调整试验后，一般不再进行调整，因此脱硝装置入口烟道各位置相对喷氨量固定。当锅炉工况变化时，SCR 入口 NO_X 浓度分布发生变化，而喷氨格栅各位置相对喷氨量固定，必然会存在喷氨不均匀的现象，导致脱硝装置出口部分位置 NO_X 浓度过低/过高等现象，造成局部氨逃逸过高或 NOx 排放值偏高的情况。

由于脱硝装置 CEMS 采样的滞后及喷氨控制的延迟，会导致喷氨量无法及时跟随工况变化进行调整。超低排放改造后，对脱硝装置出口 NO_X 浓度的控制稳定性要求更高，需对脱硝喷氨控制进行优化，减小因工况、煤质等变化导致脱硝装置出口 NO_X 浓度的波动。

随着超低排放标准的全面推广，机组 SCR 脱硝效率往往超过 90%，氨氮比平均值超过 0.9，当入口 NO_X 浓度波动时，常规 SCR 的催化剂上游截面处的氨氮比超过 1.0 的位置将大为增加，这些位置的氨将大量逃逸，造成空预器严重堵塞；而氨氮比低于平均值的位置，脱硝效率不能达标。在已进行了超低排放改造的锅炉中，这种问题比较普遍。

喷氨优化改造主要采用“CFD 流场数值模拟+分区改造+分区测量+总量控制+分区调平”方案，即通过喷氨格栅分区改造、脱硝出口分区测量、控制策略逻辑改进，配套反应器进、出口在线检测仪表实现动态控制和精准喷氨，达到脱硝动态调节喷氨实现降耗的目的。

2.1.1 基于 NO_X/O_2 多点原位式同测技术+DCS 嵌入式精准喷氨总量控制及分区域调平控制技术

1）CFD 流场数值模拟及喷氨格栅分区改造

充分考虑和分析本工程实际工况,需对原结构的 CFD 校核计算分析，系统改造前，在锅炉高、中、低负荷工况下进行脱硝反应器出、入口做摸底试验，依据试验检测数据建立 CFD 模型，反复模拟和优化，出具流场报告和 SCR 进、出口 NO_X 均匀性摸底试验报告（CMA 资质的检验检测机构），为脱硝系统是否流场优化改造提供依据，同时为脱硝出口分区测量与入口喷氨分区调整的对应关系提供理论指导。

2）脱硝入口 NO_X 总量测量及出口分区 NO_X 测量

在 SCR 进出口设置多点原位式在线烟气监测系统；系统采用多点原位式在线同测技术，可同时测量 NO_X、O_2，NO_X/O_2 分析仪直接安装于烟道上，原位式在线取样、分析，反应器入口设置 4 个 NO_X/O_2 测点，用于脱硝入口 NO_X/O_2 总量测量；出口设置 12 个 NO_X/O_2 测点，每个测量分区设置 2 个测点，测点前后墙对穿布置；各测点在任何工况下均在线同时测量，互不干扰，相互独立完成烟气采样、分析，从烟气采样、分析、到数据上传至 DCS 显示总时间小于 3s，各测点同时在线取样、测量同一时间点的烟气参数，同时输出监测数据，可有效保证整套系统监测数据实时性、同源性；对比抽取式 CEMS 或轮巡取样+CEMS 系统监测仪表，测量时间至少提前 45-100s。

脱硝出口分区测量采用多点原位式测量技术，特点是多点同测，实时反馈，系统系统的快速响应、检测实时性、检测数据同源性、随动性强等特点，系统借助多点原位式实时在线烟气监测系统，可为 SCR 分区喷氨自动控制及喷氨总量自动系统优化控制的实现提供工必要条件。

3）控制逻辑

精准喷氨总量控制软件及分区域调平控制软件透明植入 DCS，精准喷氨控制系统采用喷氨总量优化控制+SCR 分区调平控制两级协调配合控制方式，做到脱硝精准喷氨控制系统实时、快速调整整个 SCR 脱硝系

统供氨量。

总量自动控制方案采用基于脱硝反应原理（氨氮摩尔比）的控制理念。具体控制方法为前馈串级调节，系统引入锅炉负荷、脱硝进出口多点原位式在线烟气测量装置检测数据等参数，对脱硝 SCR 系统总体工况进行预测和反馈，主调节输出数据和控制器采集的相关数据运算后得出副调节的给定值（即供氨量），副调节给定值为供氨流量调节信号，实现脱硝 SCR 系统供氨量动态氨氮摩尔比控制。

在每个控制分区出口设置 2 个原位式在线烟气测量装置独立分析测量单元,用于测量各分区出口的 NOx/O2 浓度,系统借助脱硝出口 NO_X/O_2 浓度、红线目标值等数据，确定各分区喷氨偏差调节目标，实现脱硝系统每个分区喷氨量快速调整。

2.2 项目研究内容

2.2.1 研究设计喷氨系统分区改造方式；

2.2.2 研究设计多点测量系统测点分区布置方式；

2.2.3 研究开发 NO_X/O_2 多点测量系统；

2.2.4 研究开发总量与分区协同控制策略。

2.3 技术难点

本项目的难点在于解决喷氨系统总供氨量调整快速响应性、分区调平中出口分区 NO_X/O_2 测量数据与入口分区喷氨量调整的同时性，即喷氨系统能实时跟踪、随动控制，实现快速调整喷氨总量及每个分区供氨量，去应对 NO_X 浓度场变化。

2.4 先进性、创新性

2.4.1 创新性地采用陶瓷半导体传感器测量技术，实现了原位采样分析，保证了数据采集的实时性。

2.4.2 开发全新取样技术，保证了传感器的稳定运行。

2.4.3 采用多点原位同步取样测量，实现数据采集的同源性。

2.4.4 开发了基于脱硝反应原理氨氮摩尔比的前馈串级调节技术，保证了脱硝系统喷氨的动态精准控制。

2.4 技术路线、方案

2.4.1 技术路线

#2 机组 NO_X 全截面测量的 SCR 脱硝喷氨系统控制技术主要采用“烟气流场优化改造+喷氨管道分区改造+NO_X/O_2 总量及分区测量+喷氨总量控制+喷氨分区调平控制”方案，即通过喷氨格栅分区改造、脱硝入口 NO_X/O_2 总量及出口 NO_X/O_2 分区测量、控制策略逻辑改进，实现动态控制和精细化喷氨，达到脱硝动态调节喷氨实现降耗的目的。

2.4.2 实施方案

（1）烟气流场优化改造通过计算机模拟手段，根据实际工程的几何形状和实际脱硝工程的设计参数，构建流体动力学模型，对原有烟气装置进行流场模拟试验，获得烟气流场的优化设计方案；

（2）对喷氨管道进行分区，设分区自动调节阀，实现喷氨装置的分区喷氨控制；

（3）脱硝入口及出口增设分区 NO_X/O_2 原位式快速测量仪表，测量脱硝系统入出口 NO_X/O_2 实时数据；

（4）优化喷氨自动控制逻辑，改为采用嵌入式供氨量动态氨氮摩尔控制技术，控制系统透明的植入 DCS 控制系统。

2.5 预期效果

在一次设备具有调节余量且无缺陷、催化剂活性满足要求的前提下，按小时均值计算，改造后 SCR 出口 NO_X 分布均匀性预期可以达到如下效果：

1）SCR 出口各分区 NO_X 浓度分布相对标准偏差 CV<15%。

2）稳定工况 SCR 出口任一分区 NO_X 浓度与该烟道平均 NO_X 浓度平均值的偏差不超过±8mg/m^3；

3）稳定工况烟囱入口 NO_X 浓度与 SCR 出口 NO_X 浓度平均值偏差≤±5mg/m³；

4）稳定工况烟囱入口 NO_X 浓度波动范围≤±6 mg/m³；

5）动态运行工况烟囱入口 NOx 浓度波动范围≤±10 mg/m³；

6）有效控制氨逃逸峰值和平均氨逃逸率，脱硝系统出口氨逃逸＜3ppm。

7）SCR 正常投运情况下，系统自动投入率≥98%。

8）总喷氨量：相对改造前降低≥10%。

9）脱硝入口 NO_X 浓度不大于 350mg/Nm³、脱硝效率不小于 91.4%情况下，氨氮摩尔比不大于 0.932。

3 主要创新点与内涵

3.1、创新性地采用陶瓷半导体传感器测量技术，实现了原位采样分析，保证了数据采集的实时性。

利用技术成熟、轻量化的陶瓷半导体传感器测量技术，研发了基于原位 NOx/O2 在线数据采集系统，解决了现有 CEMS 仪表数据滞后的问题。取样分析单元由采样装置和陶瓷半导体传感器两部分组成。采样装置安装在烟道壁上，保证了数据采集的实时性。从烟气采样、分析、到数据上传至 DCS 显示总时间小于 3s。

NO_X/O_2 陶瓷半导体传感器，具有技术成熟、原理可靠、结构简单、测量快速、成本低廉等特点，且由于无需对被测介质进行复杂预处理，采样分析单元可直接就地安装于烟道壁，被测介质无需长距离输送，能实时快速采集数据。

3.2、开发全新取样技术，保证了传感器的稳定运行。

NO_X/O_2 陶瓷半导体传感器使用的工况条件与 SCR 脱硝烟气测量的工况差异较大。本技术创新性地研发了喷射引流+热扩散取样技术、高温密封技术及取样装置温控技术，解决了温度波动、堵塞、磨损等关键技术难题，保证了 NO_X/O_2 陶瓷半导体传感器的长周期稳定运行。

3.3、采用多点原位同步取样测量，实现数据采集的同源性。

由于CEMS仪表造价昂贵，在进行多点分区测量时，为降低成本，一般只配置一个测量分析单元，对多个采样点进行轮巡采样，每次只能测量一个点的NO_X含量，这种方式除了会进一步增加测量数据的滞后时间（检测一个轮回需要6~15分钟）外，其所测量的也不是同一时间、同一截面的烟气数据，无法保证数据的同源性，将大大降低系统的控制精度及自动投入率。

本项目采用多点原位式同测技术，同一烟道多个仪表安装在烟道同一截面内，出口原位式测量仪表与喷氨分区数量一一对应设置，各仪表互不干扰，同时取样、同步测量、同步输出数据，从烟气采样、分析、到数据上传至DCS显示总时间小于3s，保证数据测量的快速性、实时性及同源性,解决单点CEMS或多点轮巡CEMS仪表数据传输滞后性问题。

3.4、开发了基于脱硝反应原理氨氮摩尔比的前馈串级调节技术，保证了脱硝系统喷氨的动态精准控制。

脱硝系统入口的NO_X总量由烟气量和氮氧化物浓度决定其数量级，采用原位式NO_X分析仪可以实时测量NO_X浓度，通过烟气量和NO_X浓度即可计算出实时NO_X总量大小和变化趋势，NO_X总量是随烟气量和NO_X浓度变化的变量，而脱硝出口NO_X浓度设定值为定值，故脱硝实际的氨氮摩尔比应根据实际的NO_X总量的变化趋势和变化量及时调整，否则会因供氨量不能跟随污染物总量变化，引起超喷或欠喷，造成氨逃逸或NO_X排放超标。基于脱硝原理的氨氮摩尔比的控制技术，是最为简单且可靠的脱硝喷氨系统控制逻辑。

三、实施应用情况

创新项目成果实施应用情况：

通过前期的调研、研讨，确定技术路线，筛选方案，有效的利用#2锅炉等级检修对NO_X全截面测量的SCR脱硝喷氨系统控制技术进行实施，在设计、施工、设备供货、安装过程中，相关管理人员严把质量关，确保了项目的顺利实施。

相关节点：

1）2022年 2月,项目起动； 2）2022年 3月,项目前期调研；

3）2022年4月,确定技术路线；4）2022年5月，确定技术方案；

5）2022年7-8月，项目方案确定，招标，签订合同，备货；

6）2022年10月，系统安装、调试及投运；

7）2023年03月，项目验收。

试验工况下，机组负荷750MW时，实测脱硝入口 NO_X浓度566.5mg/Nm^3，脱硝入口流速11.24m/s，出口NOx浓度 23.75mg/Nm3，脱硝出口流速 9.73m/s，对应脱硝效率 91.5%，满足脱硝出口 NO_X浓度≤30mg/Nm^{3}保证值要求。实现脱硝系统多分区NO_X/O_2在线快速测量；实现脱硝喷氨系统动态氨氮摩尔比调节及六分区精准喷氨控制，从而提高系统自动投入率及脱硝喷氨系统负荷跟踪效果。与#1机组相比，在同等条件下，节约尿素约14%左右。

基于本次项目实施发表论文三篇：

（1）论文-燃煤电厂SCR烟气脱硝效率影响因素研究；

（2）论文-可再生SCR催化剂在烟气脱硝优化改造中的应用；

（3）论文-燃煤电厂脱硝反应用低温SCR催化剂的制备及性能评价；

本项目的实施及应用，产生较大的经济效益，设备自动投入率高，降低了人员的操作，提高了脱硝系统的安全可靠性。同时减少氨耗量、降低氨逃逸减少雾霾污染，提高空气质量，为国家节能减排事业做出贡献。具有较好的经济以及社会效益。

四、经济效益

*经济效益	约： 290 万元/年		单位：万元
*成果总投资额	286.71	*回收期（年）	约 0.99

经济效益的有关说明：

经济效益的有关说明及各栏目的计算依据（以工程投产之日起计）：

1、免去喷氨优化试验的费用

因本项目实施后可在线调整各分区喷氨量，使氨氮摩尔比动态保持高度均匀性，故本项目实施后可不必再进行喷氨优化调整试验。目前每年约需要做 1 次试验，试验费用约 16 万元。

2、减少还原剂用量费用

本项目实施后可在线调整各分区喷氨量，使氨氮摩尔比动态保持高度均匀性，故改造前后相比，尿素耗量由原来的 11Kg/万 KWh 降低至 8Kg/万 KWh（按非供热期数据），节省近 27%还原剂用量，远超预期效果降低 10%(尿素采购费用约 0.22 万元/吨)。

(1)#2 机组 2023 年合计发电量为 46.3 亿 KWh，节约还原剂费用：

（11-8）*（46.3 亿 KWh/10000）/1000*0.22 万元=306 万元。

(2) #2 机组 2024 年合计发电量为 43.2 亿 KWh，节约还原剂费用：

（11-8）*（43.2 亿 KWh/10000）/1000*0.22 万元=285 万元。

(3) #2 机组 2025 年合计发电量为 35.0 亿 KWh，节约还原剂费用：

（11-8）*（35.0 亿 KWh/10000）/1000*0.22 万元=231 万元。

3、近 3 年每年合计节约费用：

2023 年：16+306=322 万元。

2024 年：16+285=301 万元。

2025 年：16+231=247 万元。

以近 3 年计算，节约费用平均约为 290 万元/年。

五、社会效益与间接经济效益

社会效益与间接经济效益：

项目的实施对企业的生产、经营、环保各方面都起到了很好的作用。在减少污染的同时，减少氨耗量、降低氨逃逸，避开空预器堵塞、引风机出力不足等问题，自动投入率高，大大降低了运行人员的操作，确保机组安全稳定经济运行。

根据相关研究表明，NO_X 是生成酸雨的主要污染物之一，NO_X、NH_3 都是生成 PM2.5 导致雾霾形成的主要污染物之一，酸雨和雾霾对人们的身体健康和正常的社会生产生活带来了严重危害。因此，优化喷氨可进一步提高 SCR 脱硝效率，帮助燃煤机组达到“洁净排放”的目标，同时有效预防氨逃逸造成的二次污染，减少雾霾污染，提高空气质量，为国家节能减排事业做出贡献，社会效益显著。

六、评价意见

该项目采用数据建模设计优化了流场，同时对#2 锅炉 SCR 入口导流板进行相应优化，并对喷氨支管进行调整，反应器出入口烟道分别设置 12\4 套原位式 NOx/O2 测量系统，实现与喷氨 6 个分区一一对应，通过分区域自动喷氨控制，可实现机组全负荷过程 SCR 脱硝精准喷氨控制，尿素单耗明显降低，具有一定推广价值。
评价组织部门意见： 项目达到了预期效果。 （盖章） 国能龙威山西电力股份有限公司 科技信息中心