

# Research and Application of Optimization Control Methods for Wide-Load Desulfurization Systems-Based on the middling coal Xuancheng Power Plant #2 Unit

Bingrui Zhang

China Coal Xuancheng Power Generation Co., Ltd., Xuancheng, Anhui, 242052, China

## Abstract

Against the backdrop of the accelerated implementation of the “Dual Carbon” strategy and the development of a new power system, deep peak shaving, rapid load variation, and wide-range operation have become the norm for coal-fired power units. Traditional limestone-gypsum wet flue gas desulfurization (FGD) systems face industry-wide challenges under wide-load conditions, including control lag, significant fluctuations in SO<sub>2</sub> emissions, poor pH stability, high energy consumption of slurry circulation pumps, high manual labor intensity, and significant pressure to meet environmental standards. To systematically address these issues, this paper takes the wet flue gas desulfurization (FGD) system of Unit #2 at China Coal Xuancheng Power Generation Co., Ltd. as a case study to conduct research on optimized control methods for wide-load desulfurization and to develop and apply intelligent systems. The research findings provide a mature and replicable technical reference for the intelligent upgrading, energy-saving and consumption-reduction retrofits, and environmental compliance of desulfurization systems in similar operational coal-fired units.

## Keywords

Wide-load operation; Wet desulfurization; Optimal control

# 宽负荷脱硫系统优化控制方法研究及应用——基于中煤宣城发电 #2 机组

张秉瑞

中煤宣城发电有限公司，中国·安徽 宣城 242052

## 摘要

在“双碳”战略与新型电力系统建设加速推进的背景下，燃煤机组深度调峰、快速变负荷、宽范围运行已成为常态化运行方式。传统石灰石-石膏湿法脱硫系统在宽负荷工况下面临调节滞后、SO<sub>2</sub>排放波动大、pH值稳定性差、浆液循环泵能耗偏高、人工操作强度大、环保达标压力突出等行业难题。为系统性解决上述问题，本文以中煤宣城发电有限公司#2机组湿法脱硫系统为例，开展宽负荷脱硫优化控制方法与智能化系统研发应用。研究成果可为同类型在运燃煤机组脱硫系统智能化升级、节能降耗改造、环保达标提供成熟可复制的技术参考。

## 关键词

宽负荷运行；湿法脱硫；优化控制

## 1 引言

近年来，我国能源结构转型持续深化，燃煤机组逐步由传统基础负荷电源向调节性、保障性、灵活性电源转变，深度调峰、快速变负荷、30%~100%额定负荷宽范围连续运行已成为火电机组的主流运行模式<sup>[1]</sup>。石灰石-石膏湿法脱硫是目前全球燃煤机组应用范围最广、技术最成熟、运行可靠性最高的脱硫工艺，但在宽负荷、大变负荷速率工况下，

脱硫系统呈现明显的大滞后、强耦合、非线性、多扰动、时变特性：入口SO<sub>2</sub>负荷随机组负荷快速波动；吸收塔pH值受负荷、浆液品质、供浆量、循环泵运行方式多重因素耦合影响；传统单回路PID控制响应速度慢、抗干扰能力弱、易超调易振荡；浆液循环泵依靠运行人员人工启停与经验操作，运行方式不合理、电耗偏高、经济性差；pH与密度取样回路因测量方式落后导致溢流频繁，地坑泵启停频次过高，设备损耗与维护成本居高不下<sup>[2]</sup>。

【作者简介】张秉瑞（2000-），男，中国辽宁铁岭人，本科，助理工程师，从事火电厂热控自动化、环保设施优化、湿法脱硫系统性能优化与节能降耗技术研究。

中煤宣城发电有限公司针对#2机组脱硫系统存在的控制短板与运行痛点，立项实施宽负荷脱硫系统优化控制方法研究及应用科技创新项目。通过搭建独立外挂式优化控制平台，研发多变量先进控制算法，实现脱硫系统全流程智能化、

自动化、经济化运行。本文系统阐述优化控制方法、系统设计、关键技术、实施流程、调试方法及应用效果,为同类型机组脱硫智能化改造提供工程范本。

## 2 机组及脱硫系统概况

中煤宣城发电有限公司#2机组为660MW超超临界燃煤发电机组,配套锅炉采用超超临界参数变压运行直流式设计,汽轮机为超超临界、一次中间再热、单轴三缸四排汽凝汽式机型,机组于2015年7月完成168小时满负荷试运行后正式投入商业运行。该机组烟气净化系统采用石灰石-石膏湿法脱硫工艺,采用一炉一塔的配置模式,未设烟气旁路换热器(GGH),脱硫岛主要由吸收塔、浆液循环泵、石灰石浆液供给系统、石膏脱水系统及废水处理系统等核心设备组成。

机组投产以来,脱硫系统长期运行中暴露出诸多问题。控制策略较为简单,仅配置单回路PID控制,缺乏多变量协调控制与运行优化能力;在机组宽负荷工况下SO<sub>2</sub>浓度控制响应滞后,升负荷阶段易出现短时超标。吸收塔pH值波动较大,严重影响脱硫效率稳定性及石膏产品品质。浆液循环泵依靠人工经验启停,导致电耗偏高,运行经济性不佳。pH与密度取样回路浆液直排地沟,造成地坑泵启停频繁,缩短设备寿命。系统自动投运率偏低,增加运行人员监盘及操作强度;缺乏能耗统计、性能评估及故障诊断等智能化管控功能,难以满足节能运行需求。

## 3 优化控制系统总体设计

### 3.1 设计原则

项目遵循以下五项核心设计原则,确保系统安全、实用、可靠、先进。安全优先原则:不改动原有DCS控制逻辑、不修改保护联锁、不影响主设备安全,具备无扰切回、故障自动退出、手动优先功能;全工况自适应原则:覆盖机组30%~100%额定负荷全范围,适应快速变负荷、深度调峰、高硫煤掺烧等复杂工况;多目标优化原则:以环保达标为首要目标,兼顾节能降耗、参数稳定、设备寿命均衡、运行成本最低;高可靠冗余原则:控制器冗余、通讯冗余、电源冗余、网络冗余,满足火电厂长期连续运行要求;易维护易操作原则:图形化组态、在线参数整定、一键投运退出、自诊断报警、权限管理、日志审计。

### 3.2 系统架构

优化控制系统采用三层分布式架构设计,与原有DCS系统完全独立,通过标准通讯协议实现数据双向交互:

(1) 数据感知与采集层实时采集脱硫系统全流程运行参数,包括:机组负荷、锅炉蒸发量、入口烟气流量、入口烟气温度、入口SO<sub>2</sub>浓度、出口SO<sub>2</sub>浓度、吸收塔pH值等共计126个测点。

(2) 优化控制与运算层由冗余PLC控制器+高性能工业服务器组成核心运算平台。PLC负责快速闭环控制与逻辑保护;服务器负责模型运算、多目标优化、大数据统计、性能评估、历史存储。双平台协同工作,确保控制实时性与

运算精度。

(3) 监控应用与展示层提供专用操作员站,实现优化系统投运/退出、参数设定、曲线监控、故障报警、能耗统计、报表生成、权限管理等功能。同时支持Web网页访问,运行与管理人员可实时查看系统状态。

系统通过OPC UA、MODBUS TCP/IP双协议与脱硫DCS系统通讯,实现指令无扰传输、状态实时反馈、故障安全退出,不影响原系统任何功能。

### 3.3 核心控制功能

系统具备七大核心控制功能,可实现脱硫全流程优化,具体包括:吸收塔pH值串级抗干扰自动控制;脱硫出口SO<sub>2</sub>浓度自抗扰闭环控制;浆液循环泵多目标协同优化运行;pH值与SO<sub>2</sub>浓度双向协同优化控制;宽负荷环保安全保护(小时均值预测控制);脱硫系统能耗统计与控制性能评估以及系统自诊断、故障报警与安全保护。

## 4 关键控制技术与实现方法

### 4.1 吸收塔pH值串级抗干扰控制

吸收塔pH值是决定脱硫效率、石灰石利用率、石膏结晶效果的核心参数。传统PID控制存在滞后大、抗干扰差、波动大等问题。为此,本项目采用前馈补偿+串级调节+扰动观测器复合控制结构。前馈补偿回路引入机组负荷、入口烟气流量、入口SO<sub>2</sub>浓度作为前馈信号,实现扰动超前调节;串级调节结构以内环快速控制石灰石浆液供给流量,消除阀位与流量扰动,外环稳定控制pH值,保证输出精度;扰动观测器实时估计浆液浓度、石灰石活性、温度变化等不可测扰动,进行动态补偿。该策略使pH值波动由±0.3缩小至±0.1以内,控制品质达到行业先进水平<sup>[1]</sup>。

### 4.2 脱硫出口SO<sub>2</sub>浓度自抗扰闭环控制

出口SO<sub>2</sub>浓度具有大滞后、非线性、强耦合特征,常规控制难以稳定。本项目采用自抗扰控制(ADRC)算法:通过跟踪微分器(TD)抑制噪声,安排平稳过渡过程,借助扩展状态观测器(ESO)实时观测系统总扰动并动态补偿。利用非线性状态误差反馈(NLSEF)输出最优控制指令。系统可自动识别CEMS反吹、校准、仪表故障等工况,自动切换备用策略,确保SO<sub>2</sub>连续稳定不超标<sup>[2]</sup>。同时实时计算小时均值,动态修正设定值,实现环保绝对达标。

### 4.3 浆液循环泵多目标协同优化运行

浆液循环泵电耗占脱硫系统总电耗65%以上,是节能降耗核心。本项目构建三目标优化模型:以浆液循环泵总电耗最低首要优化目标,以出口SO<sub>2</sub>浓度稳定达标为约束目标,以各泵运行时间均衡,延长设备寿命。优化变量包括工频泵启停组合、变频泵运行频率。约束条件包括液气比、吸收塔液位、设备运行限制、保护逻辑等。采用NSGA II多目标优化算法实时求解最优方案,系统自动给出指令,在保证达标前提下最大限度节电。

### 4.4 pH值与SO<sub>2</sub>浓度协同优化控制

针对pH控制与SO<sub>2</sub>控制高度耦合,独立控制易引发振荡、超调。本项目采用多变量模型预测控制(MPC)策略:(1)

建立 pH-SO<sub>2</sub>- 供浆-循环泵耦合模型；(2) 滚动时域优化，全局协调输出指令；(3) 防止单一回路过度调节，提升系统鲁棒性。协同控制使系统在宽负荷变工况下响应更快、波动更小、稳定性更强。

#### 4.5 宽负荷环保安全保护机制

为彻底杜绝环保超标风险，系统设置四重安全保护逻辑：对 SO<sub>2</sub> 实时值超限预警与强制调节；实时计算小时均值与动态修正设定值；依据负荷趋势预测，提前强化调节；在仪表故障及通讯异常自动切换安全策略。通过多层次控制逻辑，从控制层面彻底消除超标可能，保障机组环保合规。

#### 4.6 能耗统计与控制性能评估

系统具备完整能耗与性能分析功能，可对浆液循环泵电耗进行实时监测及班、日、月、年累计统计，计算脱硫单位发电量电耗、单位 SO<sub>2</sub> 脱除电耗。同时支持 ISE、IAE、衰减比、振荡次数等控制性能指标分析，并实现系统自动投运率、故障、维护信息的统计管理。

为运行优化、节能分析、管理考核提供数据支撑。

#### 4.7 系统自诊断与故障安全保护

系统具备完善自诊断与安全机制，硬件故障诊断可对电源、CPU、模块、通讯状态进行实时诊断；软件故障诊断能够识别算法异常、参数越限、信号故障等问题；系统支持故障自动安全退出，无扰切回原控制；同时具备权限管理、操作记录、故障追忆。满足电力行业安全、稳定、可靠运行要求。

### 5 硬件系统与软件配置

#### 5.1 硬件系统配置

(1) 冗余 PLC 控制平台：双 CPU、双电源、双网口冗余；(2) 高性能工业服务器：CPU、内存、≥1TB SSD；(3) 24 英寸工业级显示器、键鼠套装；(4) 标准仿威图机柜，IP52 防护，RAL7032 色；(5) 双路 220V UPS 不间断电源，续航 ≥2 小时；(6) 工业以太网交换机，双网冗余；(7) 直通式 pH 流通池，减少测量滞后与溢流；(8) 通讯网关、隔离器、防雷器件等配套设备。

#### 5.2 软件系统配置

系统采用嵌入式实时控制操作系统，配套图形化组态编程软件以实现便捷开发。系统集成 ADRC、MPC、PID、前馈及扰动观测等先进控制算法库，具备较强的自适应与抗干扰能力。历史数据库可支持 ≥3 万点，存储 ≥3 年。同时提供 Web 监控服务、权限管理与操作日志功能，可完成性能评估、能耗统计及报表自动生成，并具备故障诊断、报警管理与过程追忆回放能力，整体满足网络安全等级保护 2.0 要求。

### 6 项目实施、调试与验收

#### 6.1 项目实施流程

本项目严格遵循电力工程施工规范开展实施，整体划分为五个核心阶段推进：施工安装阶段完成硬件装配、电缆

敷设、通讯接线、通电检测及接地系统施工；逻辑组态阶段开展测点核对、点表映射、算法组态与逻辑开发工作；分系统调试阶段完成 pH、SO<sub>2</sub>、循环泵优化及供浆控制等分系统调试；整体联调阶段实施全工况投运、参数寻优、变负荷试验和稳定性测试；验收与总结阶段完成性能测试、第三方 CMA 节能检测，同步整理项目资料并开展竣工验收。

#### 6.2 调试关键步骤

主要开展信号核对与精度校验、控制回路单回路调试、模型辨识与参数整定、多变量协调控制联调、变负荷扰动试验、故障模拟与安全退出试验、性能考核与节能测试等工作。

#### 6.3 验收指标

项目严格遵循四级验收标准，各项关键指标均达到标准。实证结果表明，系统优化后自动投运率 ≥95%；出口烟气 SO<sub>2</sub> 浓度浓度稳定值：≤30mg/m<sup>3</sup>，吸收塔 pH 值波动范围：≤±0.1；浆液循环泵电耗降浆液循环泵电耗降低 ≥5%。经第三方 CMA 机构节能检测合格，系统连续稳定运行 30 天以上无环保超标、无设备异常、无保护误动。

### 7 应用效果与效益分析

系统控制效果显著，自动投运率稳定在 95%~98%，基本实现无人化运行；出口 SO<sub>2</sub> 浓度波动 ≤±3mg/m<sup>3</sup>，长期稳定达标，pH 值波动控制在 ±0.1 内，浆液工况平稳；石膏品质提升，含水率 ≤10%，取样溢流现象大幅减少，地坑泵启停频次降低 80%；系统调节响应迅速，机组变负荷运行时无超调、无滞后，运行稳定性良好。经优化后，浆液循环泵电耗降低 5.2%，年节约厂用电 85.2 万 kWh、电费约 29.8 万元；石灰石消耗量下降 3%，年节约费用 12.5 万元，项目年综合经济效益不低于 42 万元。通过系统无扰切回、故障自恢复及异常自动退出功能，运行人员操作强度降低 85% 以上，设备磨损减少、维护成本下降，环保风险实现可控，有效杜绝污染物超标考核情况发生。

### 8 结语

项目采用独立外挂式优化控制平台设计，不改动原有 DCS 控制逻辑与保护回路，通过构建脱硫系统多变量动态机理模型，融合前馈串级控制、自抗扰控制、多目标能耗寻优、pH 与 SO<sub>2</sub> 协同控制、环保小时均值安全保护等关键先进控制技术，实现脱硫吸收塔 pH 值、出口 SO<sub>2</sub> 浓度、浆液循环泵运行方式、石灰石供浆调节阀的全流程自动闭环控制与协同优化运行。工程应用证明，该优化控制技术投入适中、回报快、效益高，是火电厂环保节能改造优选方案。

#### 参考文献

- [1] 丁乐, 虞仕杰. 基于 NSGA II 的脱硫浆液循环泵变频优化控制策略 [J]. 南方能源建设, 2025,12 (3):89-96.
- [2] 刘吉臻, 张正, 刘芳. 大型燃煤机组宽负荷自适应优化控制理论与实践 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2024.
- [3] 王浩, 林强, 胡明. 自抗扰控制在脱硫 pH 调节中的应用 [J]. 自动化仪表, 2025,46 (2):67-71.