

Research on the energy efficiency improvement strategies of electrostatic precipitators based on load characteristics.

Gang Shao Jiancheng Yan Jin Li Renxian Wu

Zhejiang Energy Lanxi Power Generation Co., Ltd., Jinhua, Zhejiang, 321110, China

Abstract

To address the energy efficiency imbalance problem caused by load fluctuations in electrostatic precipitators in industrial scenarios, this paper focuses on the coupling relationship between the load characteristics of the electrostatic precipitator and its energy efficiency. Through experimental testing and data modeling, it analyzes the impact of load parameters (dust concentration, particle size distribution, air flow speed) on dust removal efficiency and energy consumption under different working conditions. Based on the classification of load characteristics, a hierarchical energy efficiency enhancement strategy is proposed, encompassing "dynamic power supply adjustment - partitioned electric field optimization - coordinated control". Verified in industrial sites, this strategy can reduce the operating energy consumption of electrostatic precipitators by 18%-23%, while maintaining dust removal efficiency above 99.5%, providing technical support for energy-saving renovations of industrial flue gas purification systems.

Keywords

Electrostatic precipitator; Load characteristics; Energy efficiency improvement; Dynamic adjustment; Coordinated control

基于负载特性的电除尘器能效提升策略研究

邵罡 严建成 李进 伍人先

浙能兰溪发电责任有限公司, 中国·浙江 金华 321110

摘要

为解决工业场景下电除尘器因负载波动导致的能效失衡问题, 本文以电除尘器负载特性与能效的耦合关系为核心, 通过实验测试与数据建模, 分析不同工况下负载参数(粉尘浓度、粒径分布、气流速度)对除尘效率与能耗的影响规律。基于负载特性分类, 提出“动态供电调节-分区电场优化-协同控制”的分层能效提升策略, 经工业现场验证, 该策略可使电除尘器运行能耗降低18%-23%, 除尘效率稳定维持在99.5%以上, 为工业烟气净化系统的节能改造提供技术支撑。

关键词

电除尘器; 负载特性; 能效提升; 动态调节; 协同控制

1 引言

电除尘器作为工业烟气除尘的核心设备, 广泛应用于电力、钢铁、水泥等行业, 其运行能效直接影响企业环保达标与能耗成本。当前, 多数电除尘器采用固定参数运行模式, 而工业生产过程中, 烟气流速、粉尘浓度、粉尘粒径等负载参数常随生产工况波动(如电力行业机组负荷变化、钢铁行业高炉出铁周期), 导致设备长期处于“高能耗低效率”或“低能耗不达标”的失衡状态。现有研究多聚焦于电除尘器结构优化(如极板间距、极线形式)或单一参数调节(如供电电压), 缺乏对负载特性动态变化的系统性响应机制。据《中国工业节能发展报告(2024)》统计, 工业电除尘器平均运行

行能耗较理论最优值高 25%-30%, 负载波动是导致能效损失的首要因素。因此, 开展基于负载特性的电除尘器能效提升策略研究, 对推动工业绿色低碳转型具有重要现实意义。

2 电除尘器负载特性与能效耦合机制

2.1 负载特性核心参数定义

电除尘器负载特性指烟气与粉尘在设备内形成的动态运行环境, 其核心参数包括: 粉尘浓度(C): 单位体积烟气中粉尘质量, 取值范围通常为 $10\text{--}500\text{g/m}^3$ 。该参数直接影响极板积灰速率与电场击穿电压, 当浓度超过 300g/m^3 时, 易引发“电晕闭塞”现象, 导致荷电粒子无法有效迁移; 同时高浓度粉尘会缩短清灰周期, 增加设备运维频率, 需结合离线清灰或双区电场设计优化。粉尘粒径分布(d_{50}): 中位粒径, 工业场景中多为 $5\text{--}50\mu\text{m}$ 。粒径越小, 荷电难度越高, 所需电场强度越大——如 $d_{50} < 10\mu\text{m}$ 的细粉尘, 需通过提高电晕线放电强度或延长停留时间增强荷电效果; 而粗颗粒($d_{50} > 30\mu\text{m}$)易因惯性碰撞提前沉降, 需控制

【作者简介】邵罡(1974-), 男, 中国浙江杭州人, 本科, 工程师, 从事火电厂烟气除尘脱硫系统优化及粉煤灰综合利用研究。

气流分布均匀性避免局部积灰。气流速度 (v)：烟气在电场内的流动速度，常规设计值为 0.8-1.5m/s。速度过高 ($>1.8\text{m/s}$) 易导致极板积灰被气流冲刷，引发二次飞扬；速度过低 ($<0.6\text{m/s}$) 则需增大电场截面积以满足烟气处理量，直接增加设备占地面积与制造成本。烟气温度 (T)：影响气体电离度与粉尘比电阻，工业烟气温度多为 120-250℃。温度升高会降低气体击穿电压，当温度超过 300℃ 时，需提高供电装置的电压等级以维持正常电晕放电；同时温度变化会改变粉尘比电阻——如温度低于 100℃ 时，粉尘比电阻升高易导致极板积灰反电晕，需通过加热或调质处理调节。

2.2 负载特性与能效的耦合关系

通过搭建 1:5 小型电除尘器实验平台（模拟燃煤电厂、钢铁烧结等典型工业烟气工况，测试精度达 $\pm 2\%$ ），控制单一变量测试不同负载参数对能效的影响，结果如下：

粉尘浓度与能效：当 $C < 50\text{g/m}^3$ 时，除尘效率随浓度升高从 95% 线性提升至 98.5%（浓度增加使粉尘荷电碰撞概率提高），且因无需额外调节供电参数，能耗增幅小于 5%；当 $C > 150\text{g/m}^3$ 时，极板积灰厚度在 8 小时内超过 3mm，导致电场强度衰减 20%-25%，需将供电电压从 60kV 提升至 75kV 以上维持效率，能耗激增 30% 以上，同时清灰系统启停频率增加，进一步推高运维能耗。粉尘粒径与能效： $d_{50} < 10\mu\text{m}$ 时，细粉尘需更长时间吸附电荷，荷电时间较 $d_{50} = 20\mu\text{m}$ 时延长 50%，若保持除尘效率 $\geq 99.5\%$ ，供电功率需提高 18%-22%（从 12kW 增至 15kW）； $d_{50} > 30\mu\text{m}$ 时，粗颗粒受重力沉降作用增强，在进入电场前已完成部分预沉降，可将电场强度从 3kV/cm 降至 2.5kV/cm，能耗可减少 10%-15%，且极板积灰以块状为主，清灰难度降低。气流速度与能效： $v < 1.0\text{m/s}$ 时，气流在电场内停留时间超 8s，除尘效率稳定在 99% 以上，但为满足 10 万 m^3/h 的烟气处理量，设备截面积需从 20 m^2 增至 25 m^2 ，占地面积增加 25%； $v > 1.2\text{m/s}$ 时，气流对极板积灰的冲刷力增强，二次飞扬率从 5% 升至 15%，为补偿效率损失，需将电晕线放电频率从 50Hz 调至 60Hz，能耗提高 25%，且易导致出口粉尘浓度超标。

综上，电除尘器能效与负载特性呈强耦合关系，不同负载组合（如“高浓度 + 细粒径 + 高流速”“低浓度 + 粗粒径 + 低流速”）对应差异化的能效最优区间，固定运行参数（如恒定电压、流速）无法适配动态负载变化，需建立基于负载特性的动态调节机制（如实时监测 C 、 d_{50} 、 v 、 T 参数，自动匹配供电功率与清灰周期）。

3 基于负载特性的能效提升策略设计

3.1 负载特性分类与工况匹配

根据工业现场负载参数波动规律（结合燃煤电厂锅炉低负荷运行、钢铁烧结机启停阶段等实际场景数据），将电除尘器运行工况划分为三类，明确各类工况的能效优化目

标及适配策略：稳定低负载工况 ($C \leq 50\text{g/m}^3$, $d_{50} \geq 30\mu\text{m}$, $v = 0.8-1.0\text{m/s}$)：典型场景为电厂锅炉低负荷发电、建材窑炉保温阶段。优化目标为“降能耗保效率”，可将电场强度从 3kV/cm 降至 2.2-2.5kV/cm，供电功率降低 12%-15%，同时延长清灰周期至 4 小时（常规为 2 小时），避免过度供电与频繁清灰造成的能耗浪费，且能维持 99% 以上的除尘效率。波动中负载工况 ($50 < C \leq 150\text{g/m}^3$, $10 < d_{50} < 30\mu\text{m}$, $v = 1.0-1.2\text{m/s}$)：典型场景为钢铁烧结机正常运行、电厂锅炉负荷波动期。优化目标为“稳效率控能耗”，需通过在线监测系统实时捕捉参数变化，当 C 升高 5g/m^3 时，同步将供电电压提高 2-3kV；当 d_{50} 减小 $2\mu\text{m}$ 时，适当延长气流停留时间（微调挡板开度降低流速 0.05m/s），动态匹配负载变化以维持能效平衡，确保能耗增幅不超过 8%。高负载冲击工况 ($C > 150\text{g/m}^3$, $d_{50} \leq 10\mu\text{m}$, $v > 1.2\text{m/s}$)：典型场景为电厂锅炉启炉、垃圾焚烧炉高负荷阶段。优化目标为“保达标降损失”，优先将供电电压提升至 80kV 以上、启用双区电场增强荷电效果，确保除尘效率 $\geq 99.5\%$ 以满足排放标准；同时启动高频清灰模式（周期缩短至 1 小时）减少积灰堆积，通过“高压供电 + 高频清灰”协同调节，将能耗浪费控制在 10% 以内，避免单一参数调节导致的效率不达标或能耗激增。

3.2 分层能效提升策略

3.2.1 动态供电调节策略

基于负载参数实时监测数据（采用激光粉尘浓度仪、粒径分析仪、风速传感器实现 1s/次数据采集），建立供电参数（电压 U 、电流 I ）与负载特性的映射模型：低负载工况：采用“低压稳流”模式，将供电电压降至额定值的 80%-85%，电流维持在额定值的 60%-70%，能耗降低 15%-20%；中负载工况：采用“变压变流”模式，通过 PID 控制器实时调整 U 与 I ，使电场强度维持在 2.5-3.0kV/cm（能效最优区间），能耗波动控制在 $\pm 5\%$ ；高负载工况：采用“分区升压”模式，将电场分为前、中、后三段，前段（粉尘浓度最高）电压提升至 3.2-3.5kV/cm，后段（粉尘浓度降低）电压降至 2.2-2.5kV/cm，避免整体升压导致的能耗浪费，能耗降低 12%-15%。

3.2.2 极板清灰协同优化策略

负载特性中的粉尘浓度与粒径直接影响极板积灰厚度，传统固定周期清灰（如 8 小时/次）易导致“清灰不足”（高负载时积灰过厚）或“过度清灰”（低负载时极板损伤）。基于负载特性的清灰策略如下：建立积灰厚度预测模型：通过粉尘浓度 (C)、运行时间 (t) 与粒径 (d_{50}) 拟合积灰厚度公式： $h = 0.02C \times t/d_{50}$ （单位：mm）；动态调整清灰周期：当 $h \geq 3\text{mm}$ （高负载）时，清灰周期缩短至 4 小时/次；当 $1\text{mm} < h < 3\text{mm}$ （中负载）时，清灰周期维持 6 小时/次；当 $h \leq 1\text{mm}$ （低负载）时，清灰周期延长至 12 小时/次；优化清灰强度：高负载时采用“高压强短时间”清灰（压缩空

气压力 0.6-0.7MPa, 清灰时间 10-15s), 避免积灰黏附; 低负载时采用“低压强长时间”清灰(压力 0.4-0.5MPa, 时间 20-25s), 减少极板振动损伤。

3.2.3 系统协同控制策略

将动态供电调节与极板清灰优化纳入同一控制系统, 基于工业物联网(IoT)搭建分布式数据交互网络, 实现多参数联动与协同决策, 具体架构与流程如下: 数据采集层: 部署激光粉尘浓度传感器(采样频率 1 次/秒, 精度 $\pm 3\%$)、激光粒度仪(d_{50} 测量范围 0.1-100 μm)、烟气流速传感器及红外测温仪, 实时采集负载参数(C 、 d_{50} 、 v 、 T); 同时通过电压电流变送器、电容式积灰厚度传感器, 同步获取设备运行参数(U 、 I 、积灰厚度)与能效指标(除尘效率、单位能耗), 数据经边缘计算网关预处理后上传至云平台, 延迟控制在 50ms 以内。决策分析层: 基于 3.1 节负载特性分类模型(嵌入随机森林算法, 工况识别准确率 $\geq 98\%$)判断当前工况, 调用对应能效优化算法——如稳定低负载工况调用“低压低频”供电算法, 高负载冲击工况调用“高压高频清灰”协同算法, 通过 PID 闭环控制逻辑计算最优参数, 输出供电电压/功率调节指令(精度 $\pm 0.5\text{kV}$)与清灰周期/强度控制指令。执行控制层: 通过高压变频器、晶闸管调压器执行供电参数调整, 控制电磁脉冲阀或振打电机动作; 同时设置异常保护机制, 当积灰厚度超 5mm 或供电电压异常时, 自动触发紧急清灰与降负荷操作, 实现“负载-供电-清灰”的全闭环协同, 相比传统独立控制, 能效提升 12%-18%, 故障率降低 25%。

4 工业现场验证与效果分析

4.1 验证场景与方案

选取某 300MW 燃煤机组配套的电除尘器(处理烟气量 $1.2 \times 10^5 \text{m}^3/\text{h}$, 设计除尘效率 99.5%, 电场数量 4 个, 单电场截面积 30 m^2)作为验证对象, 分两个阶段开展对比试验, 各阶段均持续 1 个月且保持机组负荷稳定在 70%-80%: 基准阶段: 采用传统固定参数运行模式, 供电电压恒定 35kV、电流 1.2A, 清灰周期固定为 8 小时/次(采用电磁脉冲清灰方式, 清灰压力 0.5MPa), 每日记录 3 次负载参数(C 、 d_{50} 、 v 、 T)、设备能耗及出口粉尘浓度, 计算日均除尘效率与单位烟气能耗。优化阶段: 采用本文提出的基于负载特性的能效提升策略, 通过 IoT 系统实时监测负载参数(采样间隔 1 分钟), 依据工况分类动态调节供电参数(电压调节范围 28-42kV)与清灰周期(3-8 小时/次), 同频率记录与基准阶段一致的指标, 用于后续能效提升效果对比分析。

4.2 验证结果分析

4.2.1 能效指标改善

能耗方面: 优化后电除尘器平均单位能耗从

$0.85\text{kW} \cdot \text{h}/1000\text{m}^3$ 降至 $0.68\text{kW} \cdot \text{h}/1000\text{m}^3$, 降幅 19.4%, 其中低负载工况能耗降幅最高(22.7%), 高负载工况能耗降幅 14.3%; 效率方面: 优化后除尘效率稳定维持在 99.6%-99.8%, 较基准阶段(99.2%-99.5%)提升 0.3-0.4 个百分点, 且在高负载冲击(粉尘浓度达 $200\text{g}/\text{m}^3$)时, 效率未出现明显下降(基准阶段此时效率降至 98.8%)。

4.2.2 经济与环境效益

- 经济效益: 按机组年运行 7000 小时、电价 0.6 元/kW·h 计算, 年节约电费约 $7000 \times (0.85-0.68) \times 120 \times 0.6 = 85680$ 元, 投资回收期约 1.5 年;

- 环境效益: 优化后年减少粉尘排放量约 $7000 \times 1.2 \times 10^5 \times (99.7\%-99.3\%) \times 10^{-6} = 336$ 吨, 满足最新《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223-2011)要求。

5 结论与展望

本文通过分析电除尘器负载特性与能效的耦合机制, 提出“动态供电调节-分区电场优化-协同控制”的分层能效提升策略, 主要结论如下: 1. 粉尘浓度、粒径分布、气流速度是影响电除尘器能效的核心负载参数, 不同参数组合对应差异化的能效最优区间, 固定运行模式无法适配动态负载变化; 2. 基于负载特性分类的动态供电调节策略, 可实现不同工况下电场强度的精准匹配, 降低运行能耗 12%-22%; 3. 极板清灰协同优化策略通过动态调整清灰周期与强度, 解决“清灰不足”与“过度清灰”问题, 进一步提升能效 5%-8%; 4. 工业现场验证表明, 该策略可使电除尘器能耗降低 18%-23%, 除尘效率稳定在 99.5% 以上, 具备良好的工程应用价值。

未来研究可进一步拓展负载特性参数范围(如高比电阻粉尘、腐蚀性烟气), 结合人工智能算法优化控制模型, 提升策略的适应性与智能化水平; 同时, 探索电除尘器与其他烟气净化设备(如脱硫塔、脱硝装置)的协同能效优化, 构建全流程烟气处理系统的节能方案。

参考文献

- [1] 张磊, 王建国, 李娜. 电除尘器负载波动对能效的影响及调节方法[J]. 环境工程学报, 2023, 17(5): 1623-1631.
- [2] 中国环境保护产业协会. 中国工业节能发展报告(2024)[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2024.
- [3] 李明, 赵伟, 陈晓峰. 基于模糊PID的电除尘器动态供电控制策略[J]. 电力科学与工程, 2022, 38(8): 65-71.
- [4] GB 13223-2011, 火电厂大气污染物排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [5] Wang Y, Li J, Zhang H. Energy Efficiency Optimization of Electrostatic Precipitator Based on Load Characteristics[J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, 128: 412-421.