

Research on the Application of Intelligent Control in Energy Saving and Efficiency Improvement of Electrostatic Precipitators

Jiancheng Yan Gang Shao Jianwei Huang Jin Li

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

Abstract

In response to the issues of ‘high energy consumption and significant efficiency fluctuations’ under the traditional fixed control mode of industrial electrostatic precipitators, this paper systematically investigates the application pathways of fuzzy PID control, neural network predictive control, and deep learning optimization control, leveraging the adaptive and precise regulation advantages of intelligent control technology. By constructing an industrial-grade experimental platform, a comparative analysis of different intelligent control strategies on power supply parameters, ash cleaning rhythm, and airflow field distribution is performed. The results indicate that the electrostatic precipitator using deep learning optimization control reduces unit energy consumption by 24.3%-28.7% compared to traditional control, maintains a dust removal efficiency stable at over 99.6%, and shortens the response delay to load fluctuations to less than 0.5 seconds. This research provides technical reference for the intelligent upgrading of industrial flue gas purification equipment and aids enterprises in achieving the dual goals of environmental compliance and energy saving.

Keywords

intelligent control; electrostatic precipitator; energy saving and efficiency improvement; deep learning; fuzzy PID

智能控制在电除尘器节能提效中的应用研究

严建成 邵罡 黄建伟 李进

浙能兰溪发电责任有限公司，中国·浙江 金华 321110

摘要

针对工业电除尘器传统固定控制模式下“能耗高、效率波动大”的问题，本文结合智能控制技术的自适应、精准调控优势，系统研究模糊PID控制、神经网络预测控制、深度学习优化控制在电除尘器运行中的应用路径。通过搭建工业级实验平台，对比分析不同智能控制策略对供电参数、清灰节奏、气流场分布的调控效果，结果表明：采用深度学习优化控制的电除尘器，单位能耗较传统控制降低24.3%-28.7%，除尘效率稳定维持在99.6%以上，且对负载波动的响应延迟缩短至0.5s以内。该研究为工业烟气净化设备的智能化升级提供技术参考，助力企业实现环保达标与节能降耗的双重目标。

关键词

智能控制；电除尘器；节能提效；深度学习；模糊PID

1 引言

电除尘器作为电力、钢铁、水泥等行业烟气除尘的核心设备，其运行性能直接关系到企业污染物排放达标率与能源消耗成本。当前，我国工业电除尘器普遍采用“固定电压-定时清灰”的传统控制模式，难以适配生产过程中烟气量、粉尘浓度、粒径分布等负载参数的动态变化——当负载激增时，易出现除尘效率骤降、排放超标的问题；当负载平稳时，又因过度供电、频繁清灰造成能源浪费。据《中国工业环保

发展报告（2024）》统计，传统控制模式下的电除尘器平均能耗比理论最优值高30%-35%，且约20%的设备存在效率波动超1%的问题。智能控制技术凭借其非线性调控、多参数协同优化、动态自适应等特性，为解决电除尘器能效失衡问题提供了新路径。近年来，模糊控制、神经网络、深度学习等技术逐步在工业设备控制中应用，但针对电除尘器负载特性与智能控制算法的适配性研究仍较薄弱。本文围绕电除尘器“节能”与“提效”双目标，设计三类智能控制方案并开展工业验证，旨在为电除尘器智能化改造提供切实可行的技术方案。

【作者简介】严建成（1975-），男，中国浙江金华人，本科，高级工程师，从事火电厂烟气除灰脱硫系统优化及粉煤灰综合利用研究。

2 电除尘器传统控制模式的局限性

2.1 供电控制的局限性

传统电除尘器采用固定电压供电模式，供电参数(电压、电流)仅根据设备设计工况(通常为额定负载下的粉尘浓度 $100\text{-}150\text{g/m}^3$ 、粒径 $d_{50}=20\mu\text{m}$)设定，无法随实时负载动态调整，在负载波动场景下易出现“过供”或“欠供”问题：

高负载欠供问题：当工业生产负荷提升(如燃煤机组从70%升至100%)，烟气中粉尘浓度从 50g/m^3 骤升至 200g/m^3 时，极板积灰速率从 0.5mm/h 加快至 1.8mm/h ，2小时内积灰厚度即可达 3.6mm 。固定 35kV 供电电压无法补偿积灰导致的电场强度衰减(从 3.2kV/cm 降至 2.5kV/cm)，粉尘荷电效率下降18%-22%，最终除尘效率从设计值99.5%降至98.2%以下，部分工况甚至低于97%，不符合GB 13223-2011《火电厂大气污染物排放标准》中粉尘排放浓度 $\leq 20\text{mg/m}^3$ 的要求。**低负载过供问题：**当生产负荷降低(如机组夜间调峰至50%)，粉尘浓度从 100g/m^3 降至 30g/m^3 时，固定电压仍维持 35kV 高值，此时电场内粉尘粒子稀疏，荷电粒子碰撞概率降低，多余电能无法转化为除尘效率提升，反而导致单位能耗从 $0.8\text{kW}\cdot\text{h}/1000\text{m}^3$ 升至 $1.05\text{kW}\cdot\text{h}/1000\text{m}^3$ ，能耗浪费达25%。以某300MW机组为例，年运行7000小时，仅低负载工况下的无效能耗就达 $(1.05-0.8)\times 1.2\times 10^5 \times 10^{-3} \times 7000=21$ 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，折合标准煤约70吨。**电压调节滞后性：**传统供电系统依赖人工巡检调整，当负载参数(如烟气温度从 180°C 升至 240°C)变化时，气体击穿电压下降，需降低供电电压避免电场击穿，但人工发现并调整的滞后时间通常超过1小时，期间易出现频繁闪络，不仅影响除尘效率，还会缩短高压硅整流变压器的使用寿命(闪络次数超50次/小时，设备寿命缩短30%)。

2.2 清灰控制的局限性

传统清灰采用“一刀切”的定时控制模式(如固定8小时/次)，未结合粉尘浓度、粒径分布等负载参数对积灰速率的影响，导致清灰时机与实际积灰需求严重不匹配，存在“清灰不足”或“过度清灰”两类问题：**高负载清灰不足：**在高负载工况(如钢铁烧结机满负荷运行，粉尘浓度 180g/m^3 、 $d_{50}=8\mu\text{m}$)下，细粉尘易吸附在极板表面形成致密灰层，积灰速率达 0.6mm/h ，8小时积灰厚度可达 5mm 。此时电场击穿电压从 60kV 下降30%至 42kV ，为维持除尘效率，需将供电电压从 35kV 强行提升至 45kV ，导致供电能耗增加30%，同时灰层过厚易引发“反电晕”现象，进一步降低荷电效率，形成“能耗升高-效率下降”的恶性循环。某钢厂案例显示，此类工况下传统定时清灰模式会导致出口粉尘浓度超 30mg/m^3 ，每月需额外支付环保罚款约5万元。**低负载过度清灰：**在低负载工况(如电厂锅炉低负荷运行，粉尘浓度 40g/m^3 、 $d_{50}=35\mu\text{m}$)下，粗粉尘易脱落，积灰速率仅 0.125mm/h ，8小时积灰厚度仅 1mm ，远未达到影响电场性能的临界厚度(3mm)。此时定时清灰会导致极板频繁振动(电磁脉冲阀单次动作冲击力达 0.8MPa)，极板变形

概率增加，使用寿命缩短15%-20%(从设计10年降至8-8.5年)；同时压缩空气消耗量达 $0.3\text{m}^3/\text{次}$ ，过度清灰导致压缩空气浪费达40%，以某机组4个电场、每日3次清灰计算，年浪费压缩空气约 $4\times 3\times 0.3\times 365=1314\text{m}^3$ ，折合电费约2.6万元。**清灰方式单一性：**传统清灰仅采用单一的电磁脉冲或机械振打方式，未根据粉尘黏性调整清灰强度。如处理高黏性粉尘(如垃圾焚烧烟气中的飞灰)时，定时振打无法彻底清除黏附灰层，灰层逐渐增厚；而处理低黏性粉尘时，强振打会导致大量二次扬尘，瞬时效率下降5%-8%。

2.3 系统协同性的局限性

传统电除尘器的供电控制、清灰控制、气流调节系统各自独立运行，由不同控制柜分别控制，缺乏数据交互与协同决策机制，导致各子系统动作冲突或响应不同步，严重影响整体能效与稳定性：**清灰与供电的协同缺失：**清灰过程中(尤其是机械振打清灰)，极板振动会导致表面积灰脱落，产生瞬时二次扬尘(扬尘浓度可达正常工况的3-5倍)，此时若供电参数未同步调整(如提高电压增强荷电能力)，除尘效率会出现1.5%-2%的瞬时下降，持续时间约5-10分钟。某电厂监测数据显示，每日3次清灰导致的瞬时效率不达标累计时长超30分钟，日均除尘效率被拉低0.3%-0.5%。**气流调节与电场控制的协同缺失：**当烟气流量波动(如机组负荷变化导致气流速度从 1.0m/s 升至 1.3m/s)时，传统控制仅通过调节烟道挡板改变流速，无法联动调整电场分区参数(如前区电场提高电压、后区电场延长停留时间)。流速升高会导致粉尘在电场内停留时间从8s缩短至6.2s，荷电不充分，局部除尘效率偏差超2.5%，出口粉尘浓度出现波动，难以稳定达标。**数据孤岛导致决策滞后：**供电、清灰、气流调节系统的运行数据分别存储在各自的本地控制器中，未实现集中采集与分析。当出现异常工况(如粉尘浓度骤升+气流速度波动)时，操作人员需逐一查看各系统数据，判断故障原因的时间超过30分钟，无法及时采取协同调控措施，导致设备长期处于低效运行状态，平均能效比现代协同控制系统低12%-15%。

缺乏负载预测性调控：传统控制仅能被动响应已发生的负载变化，无法基于历史数据(如每日9-11点生产负荷高峰导致负载升高)进行预测性调控。在负载变化前未提前调整供电与清灰参数，导致设备在负载波动初期出现1-2小时的能效低谷，进一步增加了整体能耗与排放风险。

3 智能控制在电除尘器中的应用方案设计

3.1 模糊PID复合供电控制方案

针对传统PID控制对非线性负载适应性差的问题，融合模糊控制的非线性决策优势，设计模糊PID复合控制方案：1. 参数监测层：通过激光粉尘浓度仪、粒径分析仪实时采集负载参数(粉尘浓度C、中位粒径 d_{50} 、气流速度v)，采样频率1次/s；2. 模糊决策层：建立负载参数与PID参数(比例系数Kp、积分系数Ki、微分系数Kd)的模糊规则库，例如：

当 $C > 150 \text{ g/m}^3$ 、 $d_{50} < 10 \mu\text{m}$ 时，判定为“高负载难处理”工况，输出 $K_p=1.2$ 、 $K_i=0.8$ 、 $K_d=0.5$ ，增强 PID 调节灵敏度；当 $C < 50 \text{ g/m}^3$ 、 $d_{50} > 30 \mu\text{m}$ 时，判定为“低负载易处理”工况，输出 $K_p=0.8$ 、 $K_i=1.2$ 、 $K_d=0.3$ ，降低调节强度以节能；3. 执行控制层：根据模糊决策输出的 PID 参数，实时调整供电电压（范围 25-40kV）与电流（范围 0.8-1.5A），确保电场强度维持在 2.8-3.2kV/cm 的能效最优区间。

3.2 神经网络预测清灰控制方案

针对定时清灰无法匹配积灰速率的问题，采用 BP 神经网络构建积灰厚度预测模型，实现动态清灰控制：1. 样本采集：采集不同负载工况下 ($C: 30-200 \text{ g/m}^3$, $d_{50}: 5-50 \mu\text{m}$, $v: 0.8-1.5 \text{ m/s}$) 的积灰厚度数据，共获取 5000 组样本，分为训练集 (80%) 与测试集 (20%)；2. 模型构建：以 C 、 d_{50} 、 v 、运行时间 t 为输入层，积灰厚度 h 为输出层，构建 3 层 BP 神经网络（输入层 4 神经元，隐藏层 12 神经元，输出层 1 神经元），训练后模型预测误差 $<5\%$ ；3. 清灰决策：设定积灰厚度阈值（3mm 为临界值），当模型预测 $h \geq 3 \text{ mm}$ 时，触发清灰指令；同时根据 h 值调整清灰强度（ $h=3-4 \text{ mm}$ 时，压缩空气压力 0.6MPa； $h>4 \text{ mm}$ 时，压力 0.7MPa）。

3.3 深度学习系统协同控制方案

针对系统协同性不足的问题，采用 CNN-LSTM（卷积神经网络 - 长短期记忆网络）融合模型，实现多参数协同优化：1. 数据融合层：采集负载参数 (C 、 d_{50} 、 v 、烟气温度 T)、设备运行参数（供电 U/I 、积灰厚度 h 、清灰状态）、能效指标（除尘效率 η 、单位能耗 P ），构建多维数据集；2. 模型训练层：利用 CNN 提取负载参数与能效指标的空间关联特征，通过 LSTM 学习参数变化的时间序列规律，建立“负载 - 运行参数 - 能效”的映射模型，模型拟合度 $R^2 > 0.98$ ；3. 协同决策层：根据模型输出，同步优化供电参数、清灰周期、气流调节阀门开度，例如：清灰前 10s，自动将供电电压提高 5%，抵消二次扬尘影响；气流速度升高 0.2m/s 时，自动将后段电场电压提高 8%，维持整体除尘效率。

4 工业验证与效果分析

4.1 验证条件与方案

选取某 $2 \times 600 \text{ MW}$ 燃煤机组配套的电除尘器（处理烟气量 $2.4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ ，设计效率 99.5%）为验证对象，设置 4 组对照实验，每组运行周期 15 天：

对照组：传统固定控制模式；

实验组 1：模糊 PID 复合供电控制；

实验组 2：神经网络预测清灰控制；

实验组 3：深度学习系统协同控制。

4.2 验证结果分析

4.2.1 能耗优化效果

对照组：平均单位能耗 $0.92 \text{ kW} \cdot \text{h}/1000 \text{ m}^3$ ；

实验组 1：能耗降至 $0.75 \text{ kW} \cdot \text{h}/1000 \text{ m}^3$ ，降幅 18.5%；

实验组 2：能耗降至 $0.72 \text{ kW} \cdot \text{h}/1000 \text{ m}^3$ ，降幅 21.7%；

实验组 3：能耗降至 $0.66 \text{ kW} \cdot \text{h}/1000 \text{ m}^3$ ，降幅 28.3%。

4.2.2 效率提升效果

对照组：除尘效率波动范围 98.1%-99.5%，平均 98.8%；

实验组 1：效率波动范围 99.2%-99.6%，平均 99.4%；

实验组 2：效率波动范围 99.3%-99.7%，平均 99.5%；

实验组 3：效率波动范围 99.5%-99.8%，平均 99.7%。

4.2.3 响应性能效果

对照组：负载波动后，效率恢复至 99.5% 以上需 30s；

实验组 1：恢复时间缩短至 10s；实验组 2：恢复时间缩短至 8s；

实验组 3：恢复时间缩短至 0.5s，实现负载波动的实时响应。

4.3 经济与环境效益

经济效益：按机组年运行 7000 小时、电价 0.65 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ 计算，实验组 3 年节约电费约 $7000 \times (0.92-0.66) \times 240 \times 0.65 = 288240$ 元，智能控制系统投资回收期约 1.2 年；环境效益：实验组 3 年减少粉尘排放量约 $7000 \times 2.4 \times 10^5 \times (99.7\%-98.8\%) \times 10^{-6} = 1425.6$ 吨，远低于《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传统控制模式的局限性，设计并验证了三类智能控制方案，主要结论如下：1. 模糊 PID 复合供电控制可有效适配负载非线性变化，较传统控制降低能耗 18.5%，效率提升 0.6 个百分点；2. 神经网络预测清灰控制通过精准预测积灰厚度，解决“过度清灰”与“清灰不足”问题，能耗降幅达 21.7%，极板寿命延长 15%；3. 深度学习系统协同控制实现多参数联动优化，能耗降幅最高 (28.3%)，效率稳定性最优 (波动 $<0.3\%$)，是当前电除尘器智能化改造的最优方案。

未来研究可进一步拓展两方面内容：一是融合数字孪生技术，构建电除尘器全生命周期数字模型，实现预测性维护与动态优化；二是探索多设备协同控制，将电除尘器与脱硫、脱硝设备纳入统一智能控制系统，实现全流程烟气处理的能效最优。

参考文献

- [1] 中国环境保护产业协会. 中国工业环保发展报告 (2024) [M]. 北京: 中国环境出版集团, 2024.
- [2] 刘强, 张敏, 王浩. 模糊 PID 控制在电除尘器供电系统中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6): 189-195.
- [3] 陈明, 李雪, 赵阳. 基于 BP 神经网络的电除尘器清灰优化控制 [J]. 环境工程学报, 2022, 16(10): 3345-3352.
- [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] Li W, Zhang Y, Chen H. Deep Learning-Based Collaborative Control for Energy Saving and Efficiency Improvement of Electrostatic Precipitators[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(8): 8976-8985.