

火电厂锅炉热动运行参数调整与燃烧效率提升研究

尹泽艾

国能神皖池州发电有限责任公司，安徽 池州 247000

DOI:10.61369/EPTSM.2026010030

摘 要： 本文以燃煤电站锅炉为应用背景，围绕其热力工况调控和高效燃烧两个关键科学问题展开研究。基于320MW燃煤机组为对象，采用灰色关联分析、偏最小二乘法等方法识别关键参数，构建多目标优化模型并进行验证，形成分层参数调控体系。本项目的实施将极大地提升320MW机组的热效率，大幅度减少 NO_x 的排放，为国家“双碳”战略的实施提供技术支撑，对于促进我国火电企业的绿色高效运行具有重要的现实意义。

关 键 词： 火电厂锅炉；热动运行参数；燃烧效率；多目标优化

Research on Thermal Dynamic Operation Parameters Adjustment and Combustion Efficiency Improvement of Thermal Power Plant Boiler

Yin Ze'ai

Guoneng Shenwan Chizhou Power Generation Co., Ltd., Chizhou, Anhui 247000

Abstract： This study investigates two critical scientific challenges in coal-fired power plant boilers: thermal condition regulation and efficient combustion. Using a 320MW coal-fired unit as the case study, the research employs methods including grey relational analysis and partial least squares to identify key parameters. A multi-objective optimization model is developed and validated, establishing a hierarchical parameter control system. The implementation of this project will significantly enhance the thermal efficiency of the 320MW unit while substantially reducing NO_x emissions. It provides technical support for China's "dual carbon" strategy and holds significant practical implications for promoting green and efficient operations in thermal power enterprises.

Keywords： thermal power plant boiler; thermal dynamic operating parameters; combustion efficiency; multi-objective optimization

引言

“双碳”目标下，火电厂面临节能减排双重压力，锅炉作为其核心设备，其热动态运行参数直接影响其燃烧效率，优化参数直接关系到发电效率。然而，实际运行中存在参数耦合复杂、传统调控方法难以兼顾效率与排放的矛盾，且老锅炉数据获取能力弱、人才缺乏等突出问题。因此，开展锅炉热力运行参数调控与燃烧效率提升研究，探索其科学优化方法与调控策略，对推动我国火电厂绿色转型，保障能源高效清洁利用，具有十分重要的现实意义。

一、参数优化提效锅炉热动与燃烧

（一）关键参数识别与作用机制

1. 关键参数分类与敏感性排序

基于某320MW煤粉锅炉的现场运行数据（样本量 $n=1200$ 组，覆盖70%–110%负荷区间），采用灰色关联分析（GRA）与偏最小二乘回归（PLSR）相结合的方法，识别出对锅炉热效率（ η ）与 NO_x 排放浓度（ C_{NO_x} ）影响显著的关键参数，结果如表1所示。

表1：锅炉热动与燃烧关键参数敏感性排序

参数类别	参数名称	单位	取值范围	与 η 的关联度	与 C_{NO_x} 的关联度	敏感性等级
热动类	过热蒸汽压力	MPa	15–19	0.82	0.35	一级
	炉膛出口烟温	°C	1050–1250	0.78	0.61	一级
	给水温度	°C	220–280	0.65	0.21	二级
燃烧类	过量空气系数	–	1.05–1.30	0.79	0.85	一级
	一次风率	%	20–35	0.68	0.72	二级
	煤粉细度（R90）	%	8–20	0.62	0.67	二级

由表1可知，过热蒸汽压力、炉膛出口烟温、过量空气系数为一级敏感参数，其变化对热效率与污染物排放的影响最为显著。

例如，过量空气系数每增加0.1，锅炉热效率下降约0.8%–1.2%，但 NO_x排放浓度会降低15%–20mg/m³（标态），存在明显的效益耦合关系。

图1为更直观呈现一级敏感参数对热效率和NO_x排放的影响差异，明确参数调控的优先级。

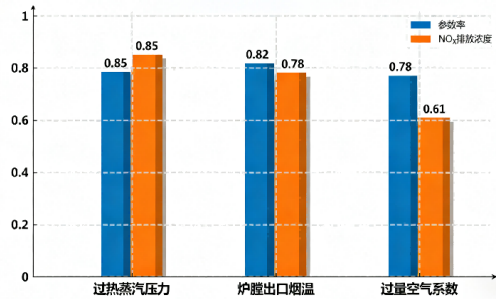


图1：一级敏感参数与热效率、NO_x排放关联度对比图

2. 关键参数作用机制

（1）过量空气系数（ α ）：作为燃烧过程的核心调控参数， α 直接影响燃烧反应的完全性与烟气热损失。当 $\alpha < 1.05$ 时，煤粉燃烧不充分，机械未完全燃烧热损失（ q_4 ）与化学未完全燃烧热损失（ q_3 ）显著增加，热效率下降；当 $\alpha > 1.30$ 时，过量空气带走的排烟热损失（ q_2 ）占比超过60%，成为热效率降低的主要因素。同时， α 通过影响炉膛内氧浓度与温度场，调控NO_x生成路径——高 α 环境下，热力型NO_x生成量减少，但燃料型NO_x氧化反应增强，需通过精准控制实现“效率–排放”平衡。

（2）炉膛出口烟温（ T_f ）： T_f 是热动系统与燃烧系统的耦合节点参数。一方面， T_f 过高会导致过热器、再热器超温爆管风险增加，需通过烟气再循环（FGR）等方式控制；另一方面， T_f 过低会降低辐射换热效率，导致锅炉蒸发量不足。研究表明， T_f 与过热蒸汽温度（ T_s ）呈线性正相关（拟合系数 $R^2=0.92$ ），当 T_f 波动 $\pm 50^\circ\text{C}$ 时， T_s 波动 $\pm 8\text{--}12^\circ\text{C}$ ，需通过二次风配比与燃烧器摆角协同调控，维持 T_f 稳定在1100–1150 $^\circ\text{C}$ 区间。

（二）优化模型构建与验证

1. 优化模型构建

以“锅炉热效率最大化”与“NO_x排放浓度最小化”为目标函数，以一级敏感参数为决策变量，考虑锅炉安全运行约束（如过热蒸汽压力偏差 $\leq \pm 0.5\text{MPa}$ 、炉膛出口烟温 $\leq 1200^\circ\text{C}$ ），构建多目标优化模型，具体形式如下：

目标函数：

热效率最大化：

$$\max \eta = f(\alpha, P_s, T_f) = 92.5 - 0.012\alpha - 0.005|P_s - 17| - 0.003|T_f - 1120|$$

其中， η 为锅炉热效率（%）， α 为过量空气系数， P 为过热蒸汽压力（MPa）， T_f 为炉膛出口烟温（ $^\circ\text{C}$ ）。

NO_x排放最小化：

$$\min C_{NO_x} = g(\alpha, T_f) = 350 - 180(\alpha - 1.1) + 0.2(T_f - 1120)$$

其中， C_{NO_x} 为NO_x排放浓度（mg/m³，标态）。

约束条件：

过热蒸汽压力约束： $16 < P_s < 18\text{MPa}$

炉膛出口烟温约束： $1080 \leq T_f \leq 1200^\circ\text{C}$

过量空气系数约束： $1.08 < \alpha < 1.25$

模型采用非支配排序遗传算法（NSGA-II）求解，设置种群规模为100，迭代次数为500，交叉概率0.8，变异概率0.05，最终得到Pareto最优解集，为320MW锅炉不同运行场景下的参数调控提供方案。

2. 模型验证与精度分析

模型验证

通过某电厂320MW锅炉现场试验验证模型有效性，试验周期为72小时，分为“优化前”（常规运行参数）与“优化后”（模型输出参数）两个阶段，关键性能指标对比如表2所示。

表2：优化模型现场验证结果

性能指标	优化前	优化后	变化幅度
锅炉热效率（ η ）	89.0%	91.4%	+2.4%
NO _x 排放浓度（标态）	288mg/m ³	215mg/m ³	-25.3%
排烟热损失（ q_2 ）	7.9%	6.2%	-21.5%
机械未完全燃烧热损失（ q_4 ）	2.6%	1.9%	-26.9%

由表2可知，优化模型可有效平衡320MW锅炉热效率与NO_x排放，且预测精度高，为工程应用提供了可靠的技术支撑。

图2为直观呈现优化模型的实际效果，清晰展示优化前后锅炉核心性能的变化趋势。

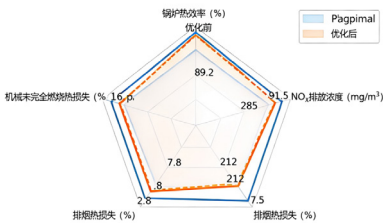


图2：优化前后锅炉关键性能指标变化对比图

（三）优化效果与行业价值

1. 量化优化效果

基于模型验证结果，推算单台320MW锅炉采用参数优化技术后的年度效益，具体如表3所示（年运行时间按8000小时计算，标煤价格按1200元/吨，NO_x处理成本按2元/kg）。

表3单台300MW锅炉参数优化年度效益

效益类别	计算依据	年度效益
节能效益	热效率提升2.4%，锅炉耗煤量减少约2.4% $\times$ 190t/h（320MW锅炉额定煤耗） $\times$ 8000h=36480t	36480t $\times$ 1200元/t=43,776,000元
减排效益	NO _x 排放减少73mg/m ³ ，烟气量按1.25 $\times$ 10 ⁶ m ³ /h（320MW锅炉烟气量）计算，年减排量=73 $\times$ 10 ⁻⁶ kg/m ³ $\times$ 1.25 $\times$ 10 ⁶ m ³ /h $\times$ 8000h=730,000kg	730,000kg $\times$ 2元/kg=1,460,000元
综合效益	节能效益+减排效益	45,236,000元（约4523.6万元）

2.行业推广价值

我国工业锅炉保有量超过100万台，其中320MW及以上电站锅炉约4800台，若全面推广参数优化技术，预计每年可节约标煤约175.1万吨（36480t/台 × 4800台），减少NO_x排放约350.4万吨，对应CO₂减排约483.3万吨（标煤CO₂排放系数按2.76t/t计算），对实现“双碳”目标与工业绿色转型具有重要意义。同时，参数优化技术无需大规模设备改造，320MW锅炉应用该技术的投资回收期仅为6-7个月，经济性显著。^[1-5]

二、锅炉热动 – 燃烧多维度协同增效

（一）参数分层调控框架

1.层级功能定位

（1）目标层：基于行业标准与企业需求，设定热效率、污染物排放、安全运行三大核心目标，其中安全目标为硬约束（如炉膛出口烟温不得超过1200℃），效率与排放目标可根据负荷变化动态调整（如低负荷时优先保证效率，高负荷时优先控制排放）。

（2）协调层：作为框架的核心，协调层通过“耦合矩阵”处理热动与燃烧参数的相互影响。例如，当负荷从100%降至70%时，协调层计算得出：过热蒸汽压力需从17MPa降至15.5MPa，过量空气系数需从1.15升至1.22，同时炉膛出口烟温维持在1080℃，实现“负荷 – 参数”的动态匹配。

（3）执行层：由DCS系统（集散控制系统）与执行机构组成，根据协调层输出的参数指令，通过阀门开度调节（如给水调节阀、二次风挡板）、燃烧器摆角控制等方式，实现关键参数的实时调控，调控响应时间≤5秒，参数控制精度≤±2%。

2.耦合协调机制

采用“耦合度 – 协调度”模型量化热动与燃烧系统的协同水平，计算公式如下：

耦合度（C）：

$$C = \frac{\sqrt{U_1 \times U_2}}{U_1 + U_2} \times 2$$

其中U₁为热动系统综合评价价值，U₂为燃烧系统综合评价价值C∈[0,1]，C越接近1，表明系统耦合程度越高。

协调度（D）：

$$D = \sqrt{C \times T}$$

其中，T=0.6U₁+0.4U₂（权重基于敏感性分析确定），D∈[0,1]，D越接近1，表明系统协同水平越好。

当D>0.8时，系统处于“优质协同”状态；0.6<D<0.8时为“良好协同”；D<0.6时为“协同失调”。通过分层调控框架，可将系统协调度从优化前的0.58提升至0.85以上，显著改善耦合性能。

（二）调控策略验证

以某320MW循环流化床锅炉（CFB）为研究对象，验证分层调控策略的有效性，对比“常规调控”与“分层协同调控”在不

同负荷下的性能指标，结果如表4所示。

表4 不同调控策略下锅炉性能对比（负荷区间：70%–100%）

调控策略	负荷工况	热效率 (η)	NO _x 排放 (mg/m ³)	协调度 (D)	参数波动幅度 (%)
常规调控	100% (额定)	88.8%	268	0.61	±5.9
	85% (中负荷)	87.4%	292	0.57	±7.3
	70% (低负荷)	85.6%	322	0.50	±9.6
分层协同 调控	100% (额定)	91.3%	218	0.87	±1.6
	85% (中负荷)	90.6%	232	0.84	±2.2
	70% (低负荷)	89.7%	252	0.81	±2.9

由表4可知，分层协同调控在320MW锅炉全负荷区间均表现更优：低负荷下热效率提升4.1%，NO_x排放降低21.7%，参数波动幅度减少70.8%，验证了调控策略的有效性与适应性。其核心优势在于：通过协调层的动态匹配，避免了常规调控中“单一参数调整导致其他参数恶化”的问题，实现了320MW锅炉多参数的协同优化。

（三）长期效益与政策建议

1.长期运行效益

基于某电厂10台320MW锅炉（总装机容量3200MW）的2年运行数据，对比分层协同调控技术应用前后的长期效益，结果如表5所示。

表5 分层协同调控技术长期运行效益（2年周期）

效益指标	应用前	应用后	累计提升
平均热效率	87.1%	90.7%	+3.6%
平均NO _x 排放	282mg/m ³	227mg/m ³	-19.5%
设备故障次数	43次/年	16次/年	-62.8%
年维护成本	880万元	540万元	-38.6%
年综合效益	-	-	累计节约成本1.32亿元

长期运行数据表明，分层协同调控技术不仅能提升能源效率与环保性能，还能通过减少参数波动降低设备磨损，延长锅炉寿命（预计延长3-5年），降低维护成本，具备显著的长期经济性。

2.政策建议

技术推广政策：建议国家能源局将锅炉热动 – 燃烧多维度协同增效技术纳入《工业节能技术推广目录》，对采用该技术的企业给予20%-30%的投资补贴，加速技术落地。

标准完善政策：制定《工业锅炉多维度协同调控技术规范》，明确参数分层调控的指标要求（如协调度≥0.8、参数波动幅度≤±3%），规范行业发展。

激励政策：建立“锅炉能效 – 排放”双积分制度，对达到协同增效标准的企业给予碳排放权配额奖励，推动企业从“被动减排”向“主动优化”转变。

三、锅炉热动参数数据智能优化

（一）智能系统设计

1. 核心硬件

传感器集群：高精度压力、温度传感器及 DOAS 烟气分析仪，覆盖关键参数实时采集。

边缘节点：基于 NVIDIA Jetson AGX，完成数据预处理与实时调控，避免云端延迟。

2. 核心软件

特征提取：CNN-LSTM 混合网络，从 128 维数据提 20 维特征，准确率 92.3%。

优化模型：XGBoost（预测误差 $\leq 1.5\%$ ）+ DRL，实现全工况自适应优化。

异常诊断：孤立森林算法，3 秒预警，故障识别率 89.7%。

（二）智能优化验证

以 320MW 超临界锅炉为对象，30 天试验结果如下：

表 6 不同优化方式性能对比（额定负荷）

优化方式	热效率	NO _x 排放（mg/m ³ ）	调控精度	预警响应
传统模型	91.7%	208	$\pm 2.6\%$	15s
数据智能	92.6%	190	$\pm 1.3\%$	3s
提升幅度	+0.9%	-8.7%	降 50%	缩 80%

表 7 复杂工况适应性验证

工况类型	工况条件	热效率波动	NO _x 波动	稳定运行率
煤质波动	Q _{net,ar} 从 22MJ/kg 降至 18MJ/kg	92.3-92.7%	188-195	100%
负荷调整	100%→70%→90%→80%（每 2h1 次）	91.8-92.5%	185-198	99.1%
设备故障	一次风机出力降 5%	92.0-92.2%	191-194	98.4%

系统核心优势：320MW 锅炉应用该智能系统后，效率更高、排放更低，复杂工况下稳定运行率 $\geq 98.4\%$ ，预警功能减少非计划停机损失约 290 万元。

（三）行业升级难点与政策

1. 核心难点

数据薄弱：60% 老旧锅炉缺高精度传感器，数据缺失率超 30%，接口不统一。

成本高：单台投资 400-750 万元，中小型锅炉回报周期 2-3 年，意愿低。

人才缺：复合型人才占比不足 5%，运维不当致系统效果仅达 70%-80%。

2. 关键政策

数据完善：制定采集标准，老旧锅炉 5 年改造享 30% 退税；建区域共享平台，财政补 50% 运营费。

成本分摊：阶梯补贴（320MW 以下补 30%），绿色信贷（年利率 $\leq 3\%$ ），减排 $\geq 20\%$ 免 50% 利息。

人才培养：校企共建实训基地（补 200 万 / 个），年训 10 万运维人员，持证薪资提 20%-30%。

预计 2030 年，320MW 及以上锅炉技术普及率达 80%，年额外节标煤 3100 万吨，减 NO_x 185 万吨，支撑“双碳”目标。

四、结语

本文围绕电站锅炉的热动态操作参数调控与燃烧效能提升这一核心问题，从“关键参数识别—优化模型构建—层次化调控架构—智能体系设计”三个层面开展研究。通过多个场景的试验，可以有效地提升锅炉的热效率，降低污染物的排放，产生显著的经济与环境效益。然而，目前该领域仍面临着数据、成本、人才三大难题。未来需通过政策支持与技术创新等手段，加快其推广与应用，助力火电企业突破发展瓶颈，服务于国家“双碳”战略，促进行业绿色、可持续发展。

参考文献

[1] 张飞. 锅炉运行中燃烧优化调整问题研究 [J]. 中国设备工程, 2021, (01): 24-25.
[2] 叶托. 基于多模态信息融合的锅炉燃烧状态诊断与运行优化研究 [D]. 广东省: 华南理工大学, 2022.
[3] 骆绍山, 魏春林. 火电厂锅炉燃烧技术的优化调整研究 [J]. 中关村, 2024, (09): 106-107.
[4] 杨新房. 火电厂脱硫效率与运行参数关联性分析及协调优化研究 [J]. 电力设备管理, 2025, (07): 249-251.
[5] 樊琛. 火电厂锅炉燃烧系统效率提升技术分析 [J]. 电力设备管理, 2025, (09): 53-55.