

火力发电厂燃煤锅炉优化燃烧技术研究

姚明振 丛伟地 孟庆辉

云南滇东雨汪能源有限公司 云南 曲靖 655507

【摘要】：燃煤锅炉是火力发电的核心设备，其燃烧效率与环保性能直接影响电厂的经济与环境效益。针对传统锅炉普遍存在的燃烧不充分、能耗高及污染物排放等问题，本文结合人工智能、大数据等新一代信息技术，系统研究了燃煤锅炉优化燃烧技术。重点剖析了智能感知、智能决策、精准控制及数据传输等关键技术体系，并结合应用案例分析了其在提效、降耗、减排、增强稳定性等方面的显著效果，最后对技术发展趋势进行展望，以期为火电行业的绿色、智能转型提供参考。

【关键词】：燃煤锅炉；优化燃烧技术；智能控制；节能减排；火力发电

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.059

引言

在我国推进“双碳”目标的背景下，火力发电行业正面临能源结构调整与绿色转型的双重挑战。虽然新能源发展迅速，但燃煤发电在保障电力稳定供应方面仍将长期发挥重要作用。燃煤锅炉作为电厂核心设备，其燃烧效果直接影响发电效率与排放水平。传统控制方法依赖人工经验与常规PID调节，难以适应煤质与负荷变化，导致煤耗偏高、污染物排放较多。近年来，人工智能、智能传感与精准控制等技术的发展，为锅炉燃烧优化提供了新路径。通过构建智能燃烧系统，可实现燃烧过程的实时监测、精准预测与动态调控，从而突破传统技术瓶颈。该技术不仅能提升燃烧效率、降低煤耗，还可有效减少污染物排放，推动火电行业实现低碳高效转型，对保障国家能源安全与高质量发展具有重要意义。

1 燃煤锅炉优化燃烧的关键技术

1.1 智能感知技术

智能感知技术是燃煤锅炉优化燃烧的基础，通过多维度、高精度传感网络实时采集燃烧过程中的关键参数。该技术融合多种传感器与数据融合算法，可在线监测煤质成分、给煤量、炉膛温度分布、烟气成分及设备状态等关键指标，并基于煤质与负荷预测模型实现超前调控，为智能决策与精准控制提供可靠数据支撑。

1.2 智能决策技术

智能决策技术是燃煤锅炉优化燃烧的核心，它基于大数据与人工智能算法，对感知数据进行深度挖掘，构建自学习、自适应的燃烧优化决策模型。该技术不仅能输出精准控制参数，实时应对煤质与负荷变化，还能实现设备故障诊断与寿命预测，并通过多目标协同优化，同步提升燃烧效率与降低污染物排放。

1.3 精准控制技术

精准控制技术是燃煤锅炉优化燃烧的执行核心，它基于智能决策的指令，通过分层闭环控制系统，实现对给煤、送风、引风及喷燃器等关键环节的精准、快速调控。该技术融合模型预测、自适应等先进算法，不仅能确保各子系统高精度稳定运行，还能协同应对煤质波动、负荷变化及结渣等问题，从而将整个燃烧系统动态维持在最优工况。

1.4 数据传输与网络技术

数据传输与网络技术是燃煤锅炉优化燃烧系统的支撑保障，通过构建分层（现场设备层、控制层、监控层）的高可靠通信网络，融合工业总线、工业以太网、光纤及5G技术，实现各环节数据与指令的高速、稳定传输。该网络具备强抗干扰能力与多重安全防护，并能与电厂其他系统交互，为整个优化系统的协同运行提供坚实基础。

2 燃煤锅炉优化燃烧技术应用案例分析

2.1 案例一：华能某电厂300MW燃煤锅炉优化改造

华能某电厂300MW机组配套燃煤锅炉为四角切圆燃烧锅炉，长期存在燃烧效率偏低、氮氧化物排放超标、变负荷适应性差等问题。为解决上述问题，该电厂采用基于人工智能的优化燃烧技术进行改造，构建了“智能感知-智能决策-精准控制”的一体化燃烧优化系统。

该系统的核心技术应用包括：在智能感知方面，安装煤质在线分析仪、炉膛温度场监测系统、多组分烟气分析仪等设备，实现22项关键参数的实时监测；智能决策方面，构建基于深度神经网络的燃烧优化模型，结合多目标强化学习算法，实现燃烧效率与污染物排放的协同优化；精准控制方面，采用模型预测控制与分区送风控制，优化给煤、送风、引风及喷燃器控制策略。

同时，该系统通过工业以太网与 5G 通信构建数据传输网络，实现现场设备与控制中心的实时交互，控制中心可远程监控燃烧过程并进行参数调整。改造实施后，该锅炉运行性能得到显著提升，具体成效如下表所示：

指标	改造前	改造后	变化率
锅炉效率	88.5%	91.8%	+3.3%
发电煤耗（g/kWh）	312	295	-5.45%
氮氧化物排放（mg/Nm ³ ）	450	370	-17.78%
二氧化硫排放（mg/Nm ³ ）	320	280	-12.5%
变负荷响应时间（min）	15	8	-46.67%
设备故障停机次数（次/年）	8	2	-75%

改造后，该电厂每年可节约标准煤约 1.2 万吨，减少氮氧化物排放约 800 吨、二氧化硫排放约 320 吨，新增经济效益约 800 万元，同时大幅提升了机组的运行稳定性与调峰能力，取得了显著的经济、社会与环境效益。

2.2 案例二：国电某电厂 660MW 超临界燃煤锅炉优化项目

国电某电厂 660MW 超临界燃煤锅炉采用对冲燃烧方式，投运后存在炉膛局部温度过高、受热面结渣严重、风机电耗偏高等问题，影响了机组的安全经济运行。为此，该电厂引入智能优化燃烧技术，结合数字孪生与智能诊断技术，对燃烧系统进行全面升级改造。

该项目的关键技术创新包括：构建锅炉数字孪生模型，通过实时采集炉膛温度、压力、流量等数据，实现燃烧过程的虚拟仿真与动态优化，提前预判结渣、超温等风险；采用 AI 视觉识别技术，通过炉膛内高清摄像机捕捉火焰形态、颜色等信息，结合图像识别算法判断燃烧均匀性，自动调整喷燃器摆角与送风配比；开发风机协同优化控制策略，基于引风机、送风机的运行特性与燃烧需求，通过模糊优化算法实现风机转速的最优匹配，降低风机电耗。

在数据传输方面，采用“工业以太网+5G 边缘计算”架构，实现监测数据的低时延处理与控制指令的快速下发，边缘计算节点处理时延 $\leq 5\text{ms}$ ，保障了数字孪生模型与物理系统的实时同步。改造后，该锅炉的运行状况得到显著改善：炉膛温度分布均匀性提升 40%，受热面结渣周期从原来的 30 天延长至 90 天，风机电耗降低 12%，锅炉效率提升 2.5%，发电煤耗下降 18g/kWh，每年可节约标准煤约 2.3 万吨，减少污染物排放约 1500 吨，同时降低了设备维护成本与劳动强度，为超临界燃煤锅炉的优化运行提供了成功范例。

3 燃煤锅炉优化燃烧技术应用效果总结

3.1 提升燃烧效率，降低发电煤耗

通过智能感知技术实现对煤质特性、燃烧工况的精准监测，智能决策模型根据实时数据动态优化燃烧参数，精准控制系统确保各项参数稳定在最优区间，有效解决了传统燃烧过程中煤质波动适应性差、参数匹配不精准等问题，显著提升了煤炭燃烧的充分性。从应用案例可以看出，采用优化燃烧技术后，锅炉效率普遍提升 2%-3.5%，发电煤耗下降 15-25g/kWh，大幅提高了煤炭资源利用率，降低了电厂的燃料成本，为电厂创造了显著的经济效益。

3.2 减少污染物排放，助力绿色转型

优化燃烧技术通过精准控制空燃比、调整燃烧区域温度、优化喷燃器布置等方式，从源头抑制污染物生成。同时，结合烟气处理系统的协同控制，实现了污染物排放的深度治理。应用实践表明，该技术可使氮氧化物排放降低 15%-20%，二氧化硫排放降低 10%-15%，颗粒物排放降低 8%-12%，有效缓解了火力发电对环境的压力，助力火力发电行业满足日益严格的环保标准，推动行业向绿色低碳转型。

3.3 增强运行稳定性，降低故障风险

智能感知系统对锅炉设备状态与燃烧工况进行实时监测，智能决策模型能够提前识别设备故障隐患与燃烧异常情况，并发出预警信号，为运维人员提供充足的处理时间。精准控制系统具备较强的鲁棒性，能够快速应对煤质波动、负荷变化等扰动，保持燃烧系统稳定运行。应用案例中，设备故障停机次数减少 60%以上，变负荷响应时间缩短 40%以上，显著提升了机组的运行稳定性与调峰能力，降低了非计划停机带来的经济损失。

3.4 降低劳动强度，提升运维水平

优化燃烧技术实现了燃烧过程的自动化与智能化控制，大量原本需要人工操作的调节工作由系统自动完成，如给煤量调节、送风量配比、喷燃器角度调整等，运维人员无需在高温、高噪的现场频繁操作，只需在控制中心进行远程监控与巡检，劳动强度大幅降低。同时，系统生成的燃烧数据报表、故障诊断报告等为运维工作提供了科学依据，帮助运维人员精准定位问题、制定维护计划，提升了运维工作的效率与科学性。

4 燃煤锅炉优化燃烧技术发展趋势

4.1 智能化与自主化水平持续提升

未来，人工智能技术将深度融入燃煤锅炉优化燃烧系统，智能感知技术将向多维度、高精度、自校准方向发展，新型传感器将实现对燃烧微观过程的精准捕获，如煤颗粒燃烧速率、炉膛内化学反应浓度等，为决策模型提供更丰富的数据支撑；智能决策技术将融合深度学习与因果推理算法，具备更强的复

杂工况处理能力与自主学习能力，能够自主识别新工况、新问题并生成优化方案；精准控制技术将向全自主控制方向发展，实现燃烧过程的无人化调控，结合设备健康管理系统，实现“预测-控制-维护”的全流程自主运行。

4.2 多技术深度融合成为核心方向

燃煤锅炉优化燃烧技术将与数字孪生、物联网、云计算、区块链等先进技术深度融合，构建更智能、更高效的燃烧优化生态系统。数字孪生技术将实现物理锅炉与虚拟模型的实时映射，通过虚拟仿真进行燃烧过程的离线优化与故障模拟推演，为实际运行提供最优控制策略；物联网技术将实现锅炉各设备、各系统的全面互联，构建设备-系统-电厂的三级感知网络，实现数据的全面共享与协同优化；云计算与大数据技术将为海量燃烧数据提供强大的存储与处理能力，挖掘不同电厂、不同工况下的燃烧优化规律，形成行业级的燃烧优化知识库；区块链技术将保障燃烧数据的真实性与安全性，为碳交易、环保监管提供可靠的数据支撑。

4.3 低碳化与清洁化成为重要导向

在“双碳”目标引领下，燃煤锅炉优化燃烧技术将更加注重低碳化与清洁化发展。一方面，通过优化燃烧工艺、提升燃烧效率，最大限度降低煤炭消耗，减少碳排放；另一方面，将与碳捕集、利用与封存（CCUS）技术深度协同，优化燃烧过程中的烟气成分与温度参数，为碳捕集提供更有利的工况条件，降低 CCUS 系统的能耗与成本。同时，针对新能源耦合发

电场景，开发适应生物质混燃、氢能掺烧等新型燃烧模式的优化技术，推动燃煤锅炉向化石能源+新能源耦合燃烧的方向转型，实现低碳清洁发电。

4.4 模块化与标准化推广应用

为加快优化燃烧技术的普及应用，未来将朝着模块化、标准化方向发展。将智能感知、智能决策、精准控制等核心技术集成化为标准化模块，开发适用于不同容量、不同燃烧方式燃煤锅炉的通用型与专用型优化燃烧系统，降低技术应用门槛。同时，建立统一的技术标准与数据接口规范，实现优化燃烧系统与电厂现有控制系统、管理系统的无缝对接，提高技术的兼容性与可扩展性。通过模块化设计与标准化推广，推动优化燃烧技术在中小型火力发电厂的广泛应用，助力整个行业的转型升级。

5 结论

综上，燃煤锅炉优化燃烧技术通过智能感知、决策、控制与数据传输等技术的协同应用，实现了燃烧过程的智能化与精准化，在提升效率、降低能耗和减少排放方面成效显著，已被多家电厂实践验证。未来，该技术将向更智能、更低碳的方向发展，推动无人化运行与模块化推广。这需要电厂、科研机构及政府部门协同合作，加大投入、完善标准与政策，从而加速技术落地，为火电行业绿色转型与“双碳”目标达成提供坚实支撑。

参考文献：

- [1] 王建国,李军,张宇.燃煤锅炉智能优化燃烧系统的设计与应用[J].中国电机工程学报,2023,43(12):4567-4576.
- [2] 刘志强,陈晨,王丽.基于深度学习的燃煤锅炉燃烧优化决策模型研究[J].动力工程学报,2024,44(3):289-296.
- [3] 张明,赵伟,李强.超临界燃煤锅炉数字孪生与优化燃烧技术应用[J].热力发电,2023,52(7):112-118.
- [4] 陈宇,周健,吴敏.燃煤锅炉污染物协同控制与燃烧优化技术研究[J].环境工程学报,2024,18(2):567-575.
- [5] 李红,孙强,马丽.基于 5G 与物联网的燃煤锅炉智能燃烧监测系统设计[J].仪器仪表学报,2023,44(5):134-142.