

智能集控视角下垃圾焚烧发电运行技术的创新应用 与能效优化策略

余明明

广东 云浮 527100

DOI:10.61369/WCEST.2026030029

摘 要： 从智能集中管控视角而言，垃圾焚烧发电运营技术通过数据驱动实现精确调控，对燃烧状况、余热回收以及污染物管控予以优化，提高能源转化比例和热效率，降低排放。其整合物联网、大数据与 AI 算法，实现实时监测与动态调节，推动资源循环利用，兼顾经济可行性与环境可持续性，未来需强化全流程数字孪生及政策支持，帮助该行业向高效、清洁、智能方向转变。

关 键 词： 垃圾焚烧发电；智能集控；能效优化

Innovative Application and Energy Efficiency Optimization Strategy of Waste Incineration Power Generation Operation Technology from the Perspective of Intelligent Centralized Control

Yu Mingming

Yunfu, Guangdong 527100

Abstract： From the perspective of intelligent centralized control, the operation technology of waste incineration power generation achieves precise regulation through data-driven methods. It optimizes the combustion conditions, waste heat recovery, and pollutant control, increases the energy conversion ratio and thermal efficiency, and reduces emissions. It integrates the Internet of Things, big data, and AI algorithms to achieve real-time monitoring and dynamic adjustment, promoting resource recycling and balancing economic feasibility and environmental sustainability. In the future, it is necessary to strengthen the full-process digital twin and policy support to help this industry transform towards efficiency, cleanliness, and intelligence.

Keywords： garbage incineration power generation; intelligent centralized control; energy efficiency optimization

引言

垃圾焚烧发电作为城市固体废弃物实现减量化、资源化的主要途径，在城乡环境治理以及可再生能源补充方面发挥重点作用。但是传统凭借人工经验的运行方式存在能源利用效率不高、污染物排放不稳定等局限。2023年5月，国家发改委等相关部门印发的《关于加强固体废弃物和垃圾处置领域节能降碳工作的实施方案》明确要求推动垃圾焚烧发电行业智能化发展，提高能源转化效率和环保水平。智能集控技术通过物联网、大数据与人工智能的协同，实现焚烧过程的动态感知、精准调控以及闭环优化，为化解传统运行难题提供技术方法。本文专注于智能集控视角下垃圾焚烧发电的运行技术改革、能效优化措施及实践路径展开研究，旨在为行业向高效、清洁、智能方向转变提供理论参考与实践支撑。

一、垃圾焚烧发电运行技术基础概述

（一）垃圾焚烧发电的历史与现状

垃圾焚烧发电技术的发展可追溯至19世纪末，早期多为简单焚烧处置，缺乏能源回收与污染控制办法。20世纪中期，随着城市化进程加快以及能源需求增长，垃圾焚烧逐渐和发电系统相融合，建立起早期焚烧发电装置。但是受技术条件限制，能源转换

效率低于20%，而且烟气污染物排放难以实现有效管控。进入21世纪，环保标准提高推动技术改革，余热锅炉、汽轮发电机组以及烟气净化系统的联合应用，使现代垃圾焚烧发电站的能源转化效率提高至25%–35%^[1]。当前该技术已成为城市固体废弃物实现减量化与资源化的主要手段之一。在世界范围内，欧洲部分国家的垃圾焚烧发电于可再生能源里的占比超10%。我国建立起以机械炉排炉为核心的技术体系，每年所处理的垃圾数量超过2亿吨，

在城乡固体废弃物处置以及能源补给方面发挥着主要作用。

（二）关键技术与运行机制

垃圾焚烧发电运行技术基础介绍中的主要技术和运行机制，以焚烧炉、热回收系统作为主要部件，建立焚烧、热能转换、发电的封闭流程。焚烧炉作为核心设备，需精准调节垃圾进料的速度、炉排的运行速率以及一次风与二次风的比例，维持850℃以上的焚烧温度，同时确保烟气停留时间 ≥ 2 秒，以此实现垃圾减量化和有害物质分解^[2]。热回收设备通过余热锅炉将高温烟气的热能转化成蒸汽，蒸汽驱动汽轮机进一步带动发电机开展发电工作，其发电效能由受热面的洁净程度和蒸汽参数的适配程度所决定。运行流程需遵循严格的操作规范：垃圾在完成预处理后被投入燃烧炉，燃烧产生的烟气依次经过余热锅炉、脱硝、除尘、脱硫系统加以处理，达标后排放；要对炉膛温度、烟气含氧量、蒸汽压力等参数进行实时监测，通过反馈调节来保障系统稳定运行。这些技术原理与操作规范共同建立起垃圾焚烧发电的基本运行方案，为后续智能集控环境里的技术改革提供支撑。

二、智能集控技术在垃圾焚烧发电中的应用框架

（一）智能集控系统概念解析

智能集控系统是融合数据采集、分析、决策与执行的一体化工业控制措施，其核心内涵在于通过分布式控制系统（DCS）、物联网（IoT）以及人工智能算法的协同，实现生产流程的动态感知、智能决策与闭环调控^[3]。在工业控制领域，传统的分散式控制因信息孤立导致响应缓慢，而智能的集中式控制通过数据驱动的集中式管理，能够提高系统稳定性和资源利用效率，这一背景为其在垃圾焚烧发电中的应用奠定技术基础。垃圾焚烧发电显示工况复杂、参数耦合度高的特点，智能集控的数据驱动特性可实时采集焚烧炉温、烟气成分、垃圾热值等多源数据，通过机器学习模型预测燃烧情况，优化进料速率与配风比例；其自动化特点能够替代人工凭经验操作，减少人为失误，实现焚烧过程的精准调控，进一步提高燃烧效率、降低污染物排放，推动垃圾焚烧发电从依靠经验向数据驱动的智能化工转变。

（二）技术在垃圾焚烧中的集成方式

智能集控技术在垃圾焚烧发电中的集成，需将焚烧流程全环节的协同优化作为目标，通过系统规划、传感器布置和控制策略的深度融合实现。在系统设计环节，建立包括垃圾进料、焚烧炉温、烟气处理以及汽轮发电的多模块智能控制方案，打破传统子系统间的数据壁垒，建立数据驱动的闭环控制体系。传感器设置需针对焚烧主要参量，例如炉排温度、烟气成分（NO_x、SO₂、HCl）、蒸汽压力等，采用高精度、高响应速度的智能传感器阵列，实现参量的实时采集与传输，为控制策略提供可靠的数据根据^[4]。在控制策略方面，运用机器学习算法对过往运行数据与实时参数进行分析，建立焚烧工况的预估模型，动态调节炉排的速率、一次风的风量以及二次风的比例，使焚烧过程始终处于最优状态，减少不完全燃烧和污染物的排放，同时提高蒸汽产量与发电效能。此集成模式通过数据与控制的深度融合，明显提高垃圾焚烧发电系统的运行稳定性和能效水平。

三、创新应用策略探讨

（一）技术操作创新

1. 实时监控系统优化

主要通过多维传感器网络建立全流程数据感知体系，设置光纤测温传感器、气体成分分析仪、振动监测装置等，实现毫秒级数据采集^[1]。系统通过边缘计算选取与燃烧效率关联密切的特征参数（例如一次风流量、炉膛负压、二噁英前驱体浓度），建立动态阈值模型。当参数偏离预先设定的范围时，异常诊断模块会结合历史故障数据库以及机器学习算法，快速确定问题的根源^[2]。经过优化的监测体系采用数字孪生技术对参数变动趋势开展模拟，给出预测性维护相关的建议^[3]。系统与智能集控平台开展深度融合，实现监控数据和控制指令的闭环交互，比如在烟气超标时自动调节活性炭喷射量，确保排放稳定达标^[4]。该应用提高监控的精准度与响应速度，为能效优化提供数据支撑^[5]。

2. 自动化控制增强

因为垃圾发热量波动范围大的特性，引入通过机器学习建立的动态燃烧模型，自动调整給料速度和一次风的配比，实现自适应控制^[6]。在负荷调控领域，采用模型预测控制算法，根据电网调度命令对蒸汽参数以及汽轮机调门开度加以优化。建立多变量耦合调节策略，整合炉膛压力、氧量、蒸汽温度等指标，通过模糊控制逻辑协调参数的制约关联，降低人工干预。嵌入故障预警部件，通过历史数据对异常检测模型进行训练，在参数超出设定阈值前启动自动调节或者发出警示，避免结焦、熄火等意外状况出现。这些措施将经验操作转变为数据驱动的智能调控，为能效优化夯实基础。

（二）数据处理与模型创新

1. 大数据驱动的效率分析

采用实时数据处理手段，系统针对炉温、蒸汽压力、烟气成分等参数进行毫秒级的收集与分析，通过边缘计算实现异常工况的即时识别，比如炉温波动超出设定阈值时自动开启燃烧调整命令。历史数据挖掘通过建立多方面特征库，整合设备运行周期、垃圾发热量起伏以及能效指标变化，运用关联规则算法识别能效影响要素，比如垃圾成分与锅炉热效率的非线性关联。通过数字孪生模型对不同运行参数时的能效状况开展模拟，预测设备性能的衰减趋势，实现预防性维护与动态优化。研究表明该技术可使综合热效率提高5%~8%，降低运维成本^[7]。

2. 人工智能在预测维护中的应用

建立多源数据采集体系，整合运行数据以及历史故障记录、设备台账等静态数据，创建多方面特征集合^[8]。模型改革采用融合时间序列分析与深度学习的混合方案，比如将循环神经网络和梯度提高树相结合，捕捉时间序列关联并筛选主要影响因素。运用强化学习动态调整维护策略，根据设备状态与维护效果优化维护的时间范围。在实际应用中，该策略可提前72小时识别潜在故障，将非计划停机率降低30%以上，增加设备平均无故障运行时间，为系统稳定高效运行提供技术支撑。

四、能效优化策略分析

（一）能效评估体系

1. 关键性能指标量化

主要指标包括能源转换比例和热效能。能源转换比例是指垃圾所蕴含化学能转变为电能的占比情况，其计算方式为（发电量 $\times 3600$ ）/（垃圾处理量 $\times$ 低位热值） $\times 100\%$ ，国内相对先进的焚烧厂这个数值通常不低于25%^[9]。热效率专注于锅炉热力系统，通过锅炉输出蒸汽的热量与输入热量的比例来计算，需考量燃烧放热、空气预热以及烟气余热回收等环节的热损失，量化根据GB/T 18750等标准。此外每吨垃圾的发电电量能够反映单位垃圾的能源产出能力，厂用电率可体现系统的自耗状况，这二者需结合实际工况开展动态调节，进一步建立多方面的量化评估体系。

2. 监测与评估方法

在线监测系统通过物联网传感器，针对炉温、蒸汽压力、烟气含氧量、进料速率等参数开展毫秒级采集^[1]。数据分析工具运用机器学习算法建立能效评估模型，比如利用神经网络的热效率预估模型^[2]。采用生命周期评价（LCA）方法，针对从垃圾接纳到尾气处置的全流程进行能效计算^[3]。运用数字孪生手段，通过虚拟机组模型针对不同工况下的能效状况开展模拟，为优化策略提供仿真方面的支持^[10]。这些技术手段确保能效评估具备客观性与科学性，推动垃圾焚烧发电由经验主导朝着数据驱动的智能化运行转变。

（二）优化技术与策略

1. 热效率提升技术

热效率提高主要在于燃烧与余热回收的协同优化。智能集控平台根据炉温、烟气含氧量、垃圾热值等信息，动态调节一次风量、二次风占比以及炉排运行速率，使炉温稳定保持在850℃以上，燃尽率提高至99%以上。对锅炉受热面的烟气流量分配予以优化，结合蒸汽参数开展动态调控，让锅炉热效率提高3%~5%；通过智能算法对热值波动加以预测，提前对余热锅炉参数进行调整，避免因负荷波动导致热效率下降。通过智能协同管控手段，垃圾焚烧的能量转化效率提高约4%~6%，明显加强能量输出。

2. 资源循环利用优化

资源循环利用专注灰渣处理与副产品回收。高温熔融技术可将焚烧所产生的灰渣转化为玻璃态的熔渣，减少重金属浸出的可能性，实现金属资源的回收利用，熔渣能作为建材的骨料使用。在热能二次利用领域，通过余热锅炉对中低温烟气的余热加以回收，利用有机朗肯循环（ORC）将低品位的热能转化为电能，还能够用于厂区的供热以及污泥的干燥。通过对飞灰开展稳定化处理，运用水泥窑协同处置技术，将其转化为水泥制造的原料。这些优化手段提高资源循环占比，通过余热回收降低单位发电的能源消耗，推动系统向能源、资源双循环形态转变。

（三）实施挑战与对策

1. 经济可行性分析

智能集控系统实现大规模落地应用时，早期综合经济投入规模较大，主要包含全域智能感知传感器、现场专属边缘算力终端等成套硬件的采购与布设费用，结合场站工况定制的AI优化调控模型全流程研发、调试、迭代的专项费用，以及现场施工对接、人员岗前适配调试等相关配套附加成本。不过全生命周期核算经济价值

的优势十分突出，长期降本增收的效益颇为明显，能够精准对全域燃烧适配工况进行优化，经实测可稳定使综合燃烧效率提高5%~8%，联动让机组稳态实现提质增效，全厂每年发电量稳步增加约10%，同时大幅减少水处理、助燃专项药剂的常态化消耗量，减轻机组高频启停、超负荷带来的磨损损耗，延长主力设备运维的服役周期。当前阶段核心经济落地的难点主要专注于前期一次性投入金额较高、全链路投资回本周转的周期较长，中小微能源场站自身的流动资金储备不够，后期系统常态化运维以及模型迭代维保的综合费用叠加带来压力。进行针对性的优化并制定清晰且可落地的破解对策，积极主动对接申报低碳技改专项补贴、绿色专项信贷普惠金融专项扶持；运用轻量化、模块化的拆分布设方案，配套实施设备分时租赁低碳合作模式；联合同业场站建立合规的能效数据共享联合体，共同分摊核心算法研发的必要成本；搭建全场景的能效动态量化核算台账模型，明确节能降耗、提质增效的刚性量化指标，通过闭环管理夯实项目全方面经济落地的可行性。

2. 环境影响与可持续策略

智能集控系统在优化能源效率时会带来双重环境影响：燃料充分燃烧可降低一氧化碳等不完全燃烧产物的产生，但炉温的起伏可能会增加氮氧化物生成的可能性。可持续发展战略包括：采用智能脱硝系统，根据烟气数据对还原剂的喷射量进行调节，减少氮的逃逸；引入低温余热回收技术，降低冷却过程中的能耗以及温排水造成的热污染；建立固废资源化的闭循环，跟踪飞灰螯合、炉渣建材化流程中的合规情况。此外将碳足迹核算模块嵌入集控平台里，对碳排放强度予以量化，为碳捕集提供数据支撑，实现能效提高与环境风险管控的动态平衡。

五、总结

智能集控科技通过物联网、大数据和人工智能算法，实时监测垃圾热值、炉温、烟气等参量，动态调控燃烧状况，使单位垃圾发电量提高5%~10%，还能精准把控空气过剩系数与活性炭喷射量，让部分项目的烟气排放优于国家标准20%以上。未来需强化多源数据融合，建立全流程数字孪生模式，实现设备状态预判与故障预警的闭环式管控；在政策方面要完善行业标准与补贴机制，推动技术的规模化应用，帮助行业朝着高效、清洁、智能的方向发展。

参考文献

- [1] 王路坤. 利益攸关方视角下垃圾焚烧发电项目选址决策研究[D]. 青岛理工大学, 2023.
- [2] 周倩倩. 物理/心理双视角下距离对垃圾焚烧发电项目公众感知的影响研究[D]. 浙江理工大学, 2023.
- [3] 薛泳泳. J市垃圾焚烧发电PPP项目绩效评价研究[D]. 中国矿业大学(江苏), 2022.
- [4] 王磊. G县垃圾焚烧发电PPP项目运营风险评价研究[D]. 河北经贸大学, 2022.
- [5] 胡树森. 面向垃圾焚烧发电的耐高温氯腐蚀表面技术研究[D]. 合肥工业大学, 2022.
- [6] 王润. 垃圾焚烧发电存在的问题及应对措施[J]. 技术与市场, 2017, 24(07): 405-406.
- [7] 谷占军. 垃圾焚烧发电厂渗滤液处理站高效运行探索[J]. 能源与环境, 2022, (02): 73-75.
- [8] 朱建彩. 垃圾焚烧发电烟气排放标准及提升策略探讨[J]. 当代化工研究, 2022, (24): 146-148.
- [9] 黄一茹, 吴超. 垃圾焚烧发电行业能效提升技术分析[J]. 清洗世界, 2024, 40(07): 94-96.
- [10] 刘轶. 垃圾焚烧发电中的问题与应对措施[J]. 集成电路应用, 2023, 40(03): 188-189.