

砖瓦窑余热发电节能技术的智能控制策略与实现路径

黄玉婷 樊明哲

(泸州职业技术学院 646000)

【摘要】砖瓦窑余热发电技术回收利用生产余热，提高能源效率，减少环境污染。然而，传统控制手段单一，精度不足。本研究通过智能控制策略，运用先进传感器、数学模型和算法，提高余热利用效率。介绍了砖瓦窑生产工艺、余热发电系统构成与工作流程，以及智能控制策略的关键技术，包括智能传感技术、智能控制算法和自动化执行机构。探讨了智能控制策略的实现路径，分析了存在的问题，并提出采用高性能传感器、优化智能控制算法、推动标准化与模块化设计等解决方案。

【关键词】砖瓦窑；余热发电；节能技术；智能控制；余热回收；能源效率

1. 引言

在全球气候变化和节能减排的背景下，砖瓦窑余热发电技术成为关键。该技术回收利用生产余热转化为电能，提高能源效率，减少环境污染，推动产业绿色发展^[1]。然而，传统余热发电系统控制手段单一，精度不足，影响余热利用效率。智能控制策略借助先进传感器、数学模型和算法，实现实时监测与调控，挖掘余热资源价值。本研究旨在通过智能控制策略，提高余热利用效率，降低生产成本，增强稳定性，助力产业转型升级。

2. 砖瓦窑余热发电系统概述

2.1 砖瓦窑生产工艺与余热产生

砖瓦窑生产工艺复杂，包括原料处理、砖坯成型和高温烧制等环节。原料处理阶段，破碎、筛分等设备运行产生低品位热能。砖坯成型时，机械能部分转化为 30-50℃ 热能。烧制阶段为核心，燃料燃烧释放 800-1200℃ 高温，产生大量高温烟气。冷却过程中，砖瓦释放 300-600℃ 显热^[2]。窑体长时间运行，通过热传导向外界散热。通过合理设计隔热保温与热量回收装置，原料处理与成型阶段低品位热、烧制与冷却阶段的高品位热、窑体散热均可回收，用于预热助燃空气或满足其他低品位热需求，提升能源利用效率。

2.2 余热发电系统构成与工作流程

余热发电系统由余热锅炉、汽轮机、发电机、凝汽器等构成。余热锅炉回收砖瓦窑高温烟气及冷却空气余热，分为烟道式与水管式，内部包括省煤器、蒸发器、过热器及汽包，给水升温至高温高压蒸汽。汽轮机将蒸汽热能转为机械能，分为冲动式与反动式，多级串联提高能量转换效率^[3]。发电机将机械能转为电能，采用三相交流同步发电机，配励磁系统与冷却系统，确保稳定运行。凝汽器冷凝汽轮机乏汽为凝

结水，循环利用，创造低背压环境，提高汽轮机效率。整个系统流程协同工作，实现砖瓦窑余热高效转化为电能，为生产与电网供电，辅助设备确保系统稳定运行。

3. 智能控制策略的关键技术

3.1 智能传感技术

3.1.1 温度传感器

在砖瓦窑余热发电系统中，温度传感器精准测量窑内、余热锅炉及蒸汽管道温度，确保系统稳定运行。铂铑热电偶适用于窑内高温测量（上限 1800℃，精度±0.5℃），K 型热电偶与铂电阻组合监测锅炉受热面温度变化（K 型热电偶测量范围 300-450℃，精度±1.5℃；铂电阻 100-300℃，精度±0.1℃），铠装热电阻精确测量蒸汽管道温度（精度±0.2℃）。这些传感器为智能控制提供可靠数据，保障系统高效运行。

3.1.2 压力传感器

压力传感器确保砖瓦窑余热发电系统压力稳定。电容式压力传感器测量锅炉蒸汽压力（0.5-4.0MPa，精度±0.05MPa），压阻式传感器监测汽轮机进排气压力（进气 0.8-3.5MPa，排气 3-10kPa，精度±0.05MPa/±0.1kPa），真空压力传感器控制凝汽器内压力（精度±0.01kPa）。这些传感器实时守护系统压力稳定，保障安全运行。

3.1.3 流量传感器

流量传感器精准监测余热介质、冷却水及蒸汽流量，是系统高效运行的关键。涡街流量传感器测量余热烟气流量（10000-50000Nm³/h，精度±1.0%FS），电磁流量传感器监测冷却水量（100-500m³/h，精度±0.5%FS），差压式传感器结合节流装置测量蒸汽流量（精度±0.5%FS）。这些传感器精准掌控流量平衡，为智能控制提供关键数据。

3.2 智能控制算法

模糊控制算法在砖瓦窑余热发电系统中展现出卓越适应性。通过将精确温度转化为模糊语言变量，并依据专家经验构建规则库，系统能精准调控窑温。这种方式无需精确数学模型，有效应对复杂工况，显著提升系统自适应能力与抗干扰性能，确保烧制过程稳定与产品质量一致，为余热发电提供稳定热源。

神经网络控制算法利用多层神经元网络对输入输出数据进行深度学习，构建系统模型，实现超前控制。在砖瓦窑余热发电中，该算法通过学习历史数据，预测系统行为，如发电功率变化，提前调整控制参数，确保电力输出稳定高效，提升系统对复杂工况的适应能力与运行经济性，通常可实现发电效率显著提升。

3.3 自动化执行机构

调节阀在砖瓦窑余热发电系统中精准调节流体流量，实现能量合理分配与系统参数稳定。电动调节阀以电力驱动，高精度定位，宽泛调节范围，远程控制能力强，适合复杂场景。气动调节阀动作迅速，可靠性高，在紧急工况下表现出色。合理选型配置调节阀，确保系统高效、稳定、安全运行。

变频器在砖瓦窑余热发电系统中节能增效，尤其在风机、水泵等设备控制方面。通过改变电机供电频率，实现转速实时连续调节，使输出流量与系统负荷需求匹配，大幅降低能耗。以引风机为例，变频器依据指令动态调速，节能 30%-50%，提升企业经济效益，提升能源利用效率与运行稳定性。

4. 智能控制策略的实现路径

4.1 数据采集与传输

4.1.1 传感器布局优化

在砖瓦窑余热发电系统中，传感器布局优化是智能控制的基础。窑内依据燃烧与冷却区域特性，合理分布温度传感器，如铂铑热电偶（测量范围 800-1200℃）与 K 型热电偶（±1.5℃精度），以及压力传感器（±0.05MPa 精度），实现全方位监测。余热锅炉区域，围绕受热面布置高精度的铂电阻温度传感器（±0.1℃精度）、差压式流量传感器（±0.5%FS 精度）等，确保蒸汽品质。烟气管道中，涡街流量传感器（±1.0%FS 精度）与铠装热电阻温度传感器（±0.2℃精度）精准测量烟气流量与温度，优化热量回收。如此布局，构建起全面、精准的“数据感知网络”，为智能控制提供坚实数据支撑。

4.1.2 数据传输网络构建

数据传输网络是砖瓦窑余热发电系统智能控制的关键。

有线传输，如工业以太网（高达 1000Mbps）与现场总线技术（PROFIBUS、MODBUS 等），以其稳定可靠、抗干扰能力强，在关键控制环节广泛应用。无线传输，如 Wi-Fi、ZigBee、4G/5G 技术，以灵活便捷、成本低廉，在边缘区域、移动设备监测中发挥重要作用。混合架构模式融合有线与无线优势，确保数据传输的高速、稳定与可靠。屏蔽电缆、光纤等传输介质及完善的接地、防雷措施，增强抗干扰能力。无线传输优化频段选择、加强信号强度与加密传输，全方位保障网络高效稳定运行，为智能控制策略实施奠定坚实基础。

4.2 控制系统架构设计

4.2.1 集中式控制系统

集中式控制系统在小型砖瓦厂余热发电中曾广泛应用。它高度集成控制功能于中央控制器，如工业控制计算机，接收并处理来自多个传感器的数据，通过预设算法快速生成控制指令，确保系统协调运作。例如，小型砖瓦厂日产 5 万块标砖，余热发电 500kW，系统能实时调整助燃空气与燃料供给，稳定窑温，保障发电效率。但随着规模扩大与复杂度提升，集中式系统面临可靠性挑战，中央控制器负担重，易导致控制延迟，难以满足高效稳定运行要求。

4.2.2 分布式控制系统

分布式控制系统将砖瓦窑余热发电系统划分为多个独立子系统，各配专属控制器，实现局部自主控制，并通过通信网络实现全局协同。如大型砖瓦厂，余热发电超 5MW，分布式系统灵活应对复杂工况，降低复杂度，提升可靠性。子系统故障不影响全局，便于扩展升级，满足大型复杂系统需求。

4.2.3 混合式控制系统

混合式控制系统融合集中式与分布式优势，适用于规模适中、工艺复杂且余热利用多样的砖瓦企业。如中型砖瓦企业，拥有两条不同规格隧道窑，混合式架构在窑炉与余热锅炉环节采用分布式控制，确保烧制质量与余热回收；在发电与电力分配环节设立集中式监控中心，优化资源配置。这种架构实现资源优化配置，提升系统效率与稳定性，降低生产成本，为企业赢得竞争优势。例如，通过优化余热分配，实现能源梯级利用，最大化效益产出。

4.3 人机交互界面设计

4.3.1 监控界面功能实现

监控界面在砖瓦窑余热发电系统中至关重要，实时展示窑内温度、压力，余热锅炉蒸汽参数，汽轮机转速及发电机电气参数等，布局合理，便于快速查看。趋势曲线动态绘制，记录关键参数变化，预测未来趋势，为优化调整提供指导。

即时报警功能,当参数异常时,通过弹窗、闪烁图标及声光报警即时通知,列出报警详情及建议,确保系统安全。例如,蒸汽压力过高或发电机温度异常时,系统立即报警,辅助操作人员迅速决策,保障系统稳定运行。

4.3.2 操作界面便捷性设计

操作界面设计注重便捷性与易用性,一键启停功能简化系统启动与停止流程,依据预设逻辑自动完成复杂操作,降低误操作风险。参数设定便捷,通过输入框、下拉菜单与滑块控件,操作人员可轻松调整关键参数,系统实时显示调整范围与对比值,确保合理安全。远程调控功能打破物理距离限制,借助通信技术,实现随时随地监控与操控,提升应急响应效率。如远程关闭调节阀、调整变频器频率等,及时应对紧急情况,确保系统安全稳定运行。

5. 砖瓦窑余热发电节能技术的智能控制存在的问题

5.1 复杂工况下的传感器精度与稳定性问题

砖瓦窑余热发电系统的工作环境通常较为恶劣,存在高温、高湿、粉尘多等不利因素,这些因素对传感器的精度和稳定性构成了严峻挑战。在高温环境下,传感器的敏感元件容易老化,导致测量精度下降,甚至发生数据漂移。同时,粉尘的堆积也可能影响传感器的正常工作,造成测量误差。这些问题不仅影响了智能控制系统的决策准确性,还可能导致能源浪费和安全隐患。

5.2 智能控制算法对复杂工况的适应性不足

砖瓦窑的生产过程具有高度的复杂性和不确定性,如原料成分、烧制工艺、环境温度等因素的变化都可能对余热发电效率产生影响。然而,现有的智能控制算法往往难以完全适应这种复杂多变的工况,导致控制效果不佳,甚至可能引发系统的不稳定。

5.3 系统集成与通信协议的兼容性难题

砖瓦窑余热发电系统通常包含多个子系统和设备,这些子系统和设备可能来自不同的供应商,使用不同的通信协议和数据格式。这导致了系统集成时的兼容性问题,使得各子系统之间的数据交换和协同工作变得困难。

6. 砖瓦窑余热发电节能技术的智能控制实现路径

6.1 采用高性能传感器与加强维护

针对上述问题,应选用耐高温、耐腐蚀、高精度且稳定性好的传感器,并对其进行定期维护和校准。此外,可以在传感器外部增加防护装置,如防尘罩、散热片等,以减少环境对传感器的影响。同时,建立传感器故障预警机制,一旦发现传感器性能下降或异常,立即进行更换或维修,确保智

能控制系统的

6.2 优化智能控制算法

为了提高智能控制算法对复杂工况的适应性,可以引入先进的控制理论和算法,如自适应控制、模糊控制、神经网络控制等。这些算法能够根据工况的变化自动调整控制策略,实现对系统的精准控制。同时,还可以通过仿真实验和现场测试,对算法进行不断的优化和改进,以提高其在实际应用中的效果。

6.3 推动标准化与模块化设计

为了解决系统集成与通信协议的兼容性问题,应积极推动标准化和模块化设计。通过制定统一的通信协议和数据格式标准,可以确保不同供应商的设备能够无缝对接和协同工作。同时,采用模块化设计可以将整个系统划分为多个独立的模块,每个模块都具有明确的功能和接口,便于系统的集成和调试。此外,还可以建立统一的系统集成平台,实现各子系统之间的数据共享和协同控制,提高系统的整体性能和可靠性。

结论

本研究为砖瓦窑余热发电技术的智能控制提供了理论支持和技术路径。通过智能控制策略,提高了余热利用效率,降低了生产成本,增强了系统稳定性。针对存在的传感器精度与稳定性问题、算法适应性不足以及系统集成与通信协议兼容性难题,提出了相应的解决策略。未来,随着技术的不断进步和应用的深入,砖瓦窑余热发电技术的智能控制将实现更加高效、稳定和可持续发展。

参考文献:

- [1]李清临,孙卓.多学科视角下的周代砖瓦窑工艺技术与交流研究[J].江汉考古,2024,(05):96-106.
- [2]黄芳,韩朋军,程嗣恒,等.砖瓦窑行业二氧化硫减排及控制技术[J].广州化工,2023,51(01):176-178.
- [3]唐诗富.砖瓦窑烟气除尘脱硫脱硝一体化工艺技术研发及示范工程.四川省,攀枝花市蓝鼎环保科技有限公司,2021-09-02.

基金项目:本文系智能控制与电子器件应用技术泸州市重点实验室开放基金资助项目(项目编号:ZK202304)

作者简介1:王玉婷(1993-),女,汉,四川自贡人,硕士,助教,研究方向:思想政治,电子信息工程;

作者简介2:樊明哲(1982-),女,汉,天津宝坻人,硕士,副教授,研究方向:高职教育、电子与通信工程技术研究。