

锅炉设备智能化管理与数据分析技术

张霞龙, 郭忠恺, 张玉江

国家电投集团内蒙古能源有限公司, 内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/ME.2025090023

摘要 : 锅炉设备的智能化管理与数据分析技术是提升工业生产效率、安全性与经济性的关键。本文系统阐述了锅炉设备智能化管理的核心技术, 包括智能传感器、智能控制系统及智能化管理系统的架构与功能; 深入探讨了数据分析技术的全流程, 涵盖数据收集与整理、主流分析方法及其在故障预测与性能优化中的具体应用。同时, 本文分析了该技术在推广应用中面临的数据安全与隐私保护、技术集成难度以及专业人才短缺三大难题, 并针对性地提出了相应的解决策略。

关键词 : 锅炉设备; 智能化管理; 数据分析; 故障预测; 性能优化

Intelligent Management and Data Analysis Technology for Boiler Equipment

Zhang Xialong, Guo Zhongkai, Zhang Yujiang

State Power Investment Corporation Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Tongliao, Inner Mongolia 028000

Abstract : Intelligent management and data analysis technology for boiler equipment are critical to enhancing industrial production efficiency, safety, and economic performance. This paper systematically elaborates on the core technologies of intelligent boiler equipment management, including the architecture and functions of smart sensors, intelligent control systems, and intelligent management systems. It thoroughly explores the entire process of data analysis technology, covering data collection and organization, mainstream analytical methods, and their specific applications in fault prediction and performance optimization. Additionally, the paper analyzes three major challenges encountered in the widespread application of this technology: data security and privacy protection, technical integration difficulties, and a shortage of specialized personnel. Corresponding solution strategies are proposed to address these challenges.

Keywords : boiler equipment; intelligent management; data analysis; fault prediction; performance optimization

引言

随着工业4.0和智能制造的深入推进, 传统工业设备的管理模式正经历着深刻的变革。锅炉作为能源转换与工业生产中的核心设备, 其运行的安全性、稳定性和经济性直接关系到企业的生产效益与节能减排目标的实现。然而, 传统的锅炉管理方式多依赖于人工巡检和定期维护, 存在响应滞后、效率低下、资源浪费等问题, 已难以满足现代工业精细化、智能化发展的需求。

一、锅炉设备智能化管理技术

(一) 智能传感器技术

智能传感器是锅炉设备智能化管理的核心组成部分, 核心功能为实时监测温度、压力、流量等关键运行参数。其工作时, 先由内置敏感元件感知物理量并转化为电信号, 再通过高精度探测单元捕捉锅炉动态变化, 如炉膛燃烧温度分布、管道流体压力波动等。利用通讯模块建立设备层与监控层之间的交互, 将获取的设备信息发送到集中监控模块, 实现对设备质量的集中管理。数据库与远程计算机之间采用TCP/IP协议进行交互, 搭建起现场与远程监控的联系。当现场设备出现运行异常时, 会及时将故障特征发送到上位机端, 并且自动生

成历史记录并存储完善故障数据库, 利用WEB服务器和管理服务器为整个设备质量智能化管理提供顶层管理平台^[1]。

(二) 智能控制系统

智能控制系统是锅炉设备智能化管理的核心, 整体架构通常包含控制层、执行层和监测层。控制层负责接收传感器实时数据, 依据预设算法生成控制指令; 执行层通过调节阀门、变频器等设备落实调控操作; 监测层持续采集运行数据为系统提供反馈, 这种分层设计提升了系统模块化程度与可扩展性、维护便利性。其核心功能体现在精准调控与故障预警, 精准调控时可根据实时数据动态调整燃烧速率、蒸汽压力等参数以实现最优运行状态; 故障预警则通过综合分析历史与实时数据, 提前识别风险并

报警，为维护提供指导。智能控制算法在锅炉设备中应用广泛，主要有模糊控制、专家控制和神经网络控制等类型。模糊控制模仿人类思维，利用模糊推理管控复杂系统，适配锅炉的非线性与时滞特性，如燃烧控制中可依据炉膛温度和氧气浓度变化，自动调整燃料供给与送风量，提升效率并减少排放；专家控制结合专业数据库与推理机制模拟专家决策，某发电厂便通过该算法提取历史经验，解决了传统 PID 控制难以应对的复杂工况问题；神经网络控制凭借强大的非线性映射能力，对多维数据建模分析以实现高精度控制，例如通过训练模型预测热交换效率，为参数优化提供科学依据^[2]。

（三）智能化管理系统

智能化管理系统由现场信息采集、信息传递和信息分析处理三部分组成，各部分协同实现锅炉全方位管理。现场信息采集设备以智能传感器、监控摄像头为主，部署在锅炉关键部位，收集温度、压力、振动等实时数据，保障采集的全面性与准确性；信息传递设备通过工业以太网、无线局域网及 4G/5G 等有线或无线通信技术，将数据传输至中央管理系统；信息分析处理设备作为核心，由高性能服务器和专用软件构成，负责数据清洗、存储、分析并生成可视化报告，各部分通过标准化接口协议无缝连接，保障数据高效流转。该系统通过实时监管、故障诊断与维修指导优化锅炉管理：实时监管实现全天候参数监控，通过数据分析排查潜在问题，某企业借此实现燃烧效率在线监测，依优化建议调整参数后能源利用率提升 10% 以上；在故障诊断方面，利用机器学习算法分析历史故障数据建立预测模型，提前预警并支撑预防性维护；同时系统可按故障类型自动生成维修方案，通过移动端推送至维修人员，大幅缩短维修时间，综合提升了设备运行可靠性并节约维护成本。

二、锅炉设备数据分析技术

（一）数据收集与整理

数据收集是锅炉设备智能化管理和数据分析的基础环节，可通过传感器网络、监控系统及历史运行记录等多种手段，获取设备运行状态、环境参数及操作日志等全面数据。作为采集核心的智能传感器，会部署在炉膛、管道、热交换器等关键部位，实时监测温度、压力、流量、燃烧效率等关键参数；现代化监控系统集成 PLC 和 SCADA，实现运行数据的高频采集与远程传输。数据收集频率依据设备运行特点设定，高温高压环境下采集频率更高以保障数据时效与准确，收集范围除设备运行参数外，还涵盖气温、湿度等外部环境变量，为多维度分析提供支撑。数据整理与预处理是保障数据分析质量的关键，需对原始数据清洗、归一化和特征提取以消除噪声与冗余。原始数据因传感器故障或传输干扰可能存在缺失值、异常值、重复值，需用线性插值法填补缺失值，通过箱线图检测剔除异常值等统计学方法处理；归一化将不同量纲数据统一尺度，常用最小-最大归一化和 Z-score 标准化，可提升算法收敛速度与预测精度；特征提取通过降维保留代表性变量，主成分分析（PCA）已广泛应用于锅炉数据处理，能

有效降维并保留关键信息^[3]。

（二）数据分析方法

机器学习算法在锅炉设备数据分析中作用突出，尤其在故障预测和性能评估领域成效显著。决策树作为经典监督学习算法，以易解释、分类高效的特点用于运行状态分类，基于其构建的故障诊断模型可通过分析历史数据识别故障主因并生成决策规则；支持向量机（SVM）适用于小样本、非线性数据分类，在性能评估中表现优异，通过构建高维特征空间最优分类超平面，能精准区分运行状态实现故障预警；随机森林作为集成学习方法，结合多个决策树结果提升预测稳定性与准确性，已成功应用于燃烧效率预测和能耗优化，展现处理复杂非线性关系的优势。大数据挖掘技术为海量运行数据的价值提取提供支撑，通过关联规则挖掘、聚类分析、时序分析等方法挖掘潜在规律与故障模式^[4]。关联规则挖掘可揭示参数内在联系，如研究人员用 Apriori 算法挖掘出燃烧效率与供氧量的强关联，为燃烧优化提供依据；聚类分析通过数据分组识别运行模式，K-means 算法已用于区分高、低负荷运行模式；时序分析通过建模时间序列特征预测趋势，基于 ARIMA 模型的方法可预测管道磨损速率，为预防性维护提供科学支撑。

（三）数据分析结果应用

基于数据分析结果的设备故障预测与维护是提升锅炉设备可靠性的主要手段，通过对历史运行数据和实时监测数据的综合分析，可以建立精准的故障预测模型，从而实现设备故障的早期预警和预防性维护。例如，研究人员利用机器学习算法构建的锅炉管道泄漏预测模型，能够根据管道温度、压力和振动等参数的变化趋势，提前识别出潜在的泄漏风险，使维护人员能够在故障发生前采取更换老化管道或调整运行参数等措施，显著降低设备停机时间和维修成本。此外，数据分析结果还可用于优化维护计划，通过对设备运行状态和健康度的动态评估确定最佳维护时机和内容，基于大数据挖掘技术的维护策略能根据设备的实际使用情况动态调整维护周期和项目，提高维护效率并降低成本。同时，数据分析结果在锅炉设备性能优化方面也具有重要应用价值，通过对运行参数的深入分析，可识别影响设备性能的关键因素并制定优化策略以提高运行效率和降低能耗^[5]。例如，利用数据分析技术对锅炉燃烧过程进行优化，通过调整空气燃料比和燃烧温度，能显著提高燃烧效率并减少污染物排放。基于机器学习算法的性能评估模型还能实时监测设备运行状态，并根据实际工况动态调整运行参数，如基于模型预测控制（MPC）的燃烧优化方法，通过建立锅炉的动态数学模型预测不同运行参数下的燃烧效率并计算最优控制策略，实现精确调控。这种数据驱动的性能优化方法不仅提高了设备运行效率，还为节能减排目标的实现提供了技术支持。

三、智能化管理与数据分析技术应用面临的难题与解决策略

（一）数据安全与隐私保护

在锅炉设备智能化管理与数据分析技术的应用中，数据的安

全性和隐私保护成为亟待解决的重要问题。由于智能化管理系统通常依赖于传感器网络、云计算平台和大数据分析技术，这些技术涉及大量敏感信息的采集、存储和传输，例如在承压类设备智能化质量管理系统中，设备的运行参数、检验检测记录以及维护日志等数据均需要通过网络传输至中央服务器进行处理，这一过程使得数据面临泄露、篡改或非法访问的风险。特别是在工业物联网环境下，设备间的互联互通增加了攻击面，使系统更容易受到恶意攻击，而部分数据涉及企业的商业机密和技术专利，一旦发生泄露，不仅会影响企业正常运营，还可能导致严重的经济损失和法律责任。为保障数据的安全性与隐私性，可以采取多种技术手段和管理措施，其中加密技术是防止数据泄露和篡改的核心手段之一，通过对传输和存储的数据进行加密处理，如采用 AES 算法并结合 SSL/TLS 协议，可以有效降低数据被窃取或篡改的风险^[6]。同时，访问控制机制能够限制未经授权的用户对数据访问，通过设置多层次的权限管理体系，仅允许特定人员或部门访问相关数据，从而减少数据滥用的可能性。此外，数据备份策略也是保障数据安全的重要环节，定期对关键数据进行备份，并将备份文件存储在离线或异地环境中，可以在系统遭受攻击或故障时快速恢复数据，最大限度地减少损失。

(二) 技术集成难度

智能化管理与数据分析技术的应用涉及传感器技术、智能控制技术、数据分析技术以及工业互联网平台等多种技术的集成，然而，这些技术之间兼容性和接口标准不统一的问题成为技术集成的主要障碍。例如，在智能锅炉工业互联网平台的建设中，需要将已开发的炉膛三维可视化系统、故障预警及诊断系统、锅炉安全及寿命监测系统等整合至统一平台，但不同系统可能采用不同的通信协议和数据格式，导致数据交互困难。此外，硬件设备的多样性也增加了技术集成的复杂性，不同厂家生产的传感器和控制设备可能存在性能差异和接口不匹配的问题，进一步加剧了系统集成的难度。为应对这一难题，可以从技术标准制定、中间件技术应用以及跨学科团队合作等方面入手。制定统一的技术标准和规范是解决兼容性问题的关键，通过引入行业标准或开发企

业级标准，可以确保不同技术模块之间的无缝对接，例如在长征云工业互联网平台的应用中，通过统一数据采集和处理的标准，成功实现了多个智能锅炉系统的集成^[7]。中间件技术的应用能够有效简化系统集成过程，作为一座软件桥梁，中间件可以在不同系统之间提供标准化的接口，从而实现数据的高效交换和共享。

(三) 专业人才短缺

智能化管理与数据分析技术在锅炉设备领域的广泛应用对专业人才提出了更高要求，但目前相关专业人才的数量和质量尚无法满足行业需求。一方面，智能化管理系统的建设需要具备信息技术、自动化控制、机械工程等跨学科知识背景的复合型人才，然而当前高校教育体系中相关专业的课程设置较为分散，难以培养出符合行业实际需求的人才^[8]。另一方面，数据分析技术的应用需要掌握机器学习算法、大数据挖掘等前沿技术的专业人员，而这些技术的学习曲线陡峭，培养周期较长。此外，随着智能化技术的快速发展，现有从业人员的技术水平也面临更新换代的压力，进一步加剧了人才短缺的问题。为缓解专业人才短缺，可以从高校教育、企业内部培训和外部人才引进等方面采取综合措施^[9]。高校应加强对智能化管理和数据分析相关专业的建设，优化课程设置，增加实践教学环节，例如开设“工业互联网与智能设备管理”等相关专业课程，结合实际案例进行教学，以培养具备跨学科知识背景的复合型人才^[10]。企业内部应建立完善的培训体系，通过定期组织技术培训和技能考核，或与高校及科研机构合作开展专项培训项目，来提升现有员工的专业水平。

四、结束语

展望未来，随着5G、数字孪生、边缘计算等前沿技术的进一步成熟与融合，锅炉设备的智能化管理与数据分析将迈向更高水平。未来的研究将更加注重模型的实时性、自适应性和解释性，实现从“被动响应”到“主动预测”，再到“自主优化”的跨越。最终，通过构建更加安全、高效、智能的锅炉设备管理体系，将为我国工业的高质量发展和“双碳”战略目标的实现贡献关键力量。

参考文献

- [1] 张佳淇. 基于信息技术融合的承压类设备智能化质量管理系统设计 [J]. 机械研究与应用, 2023, 36(3):183–186.
- [2] 强亚斌, 黄苑平, 韩岗, 折鹏翔. 浅析某电厂锅炉智能化系统架构 [J]. 锅炉制造, 2023, (6):13–14.
- [3] 岳宝龙. 火力发电厂锅炉运行控制的节能对策研究 [J]. 电力系统装备, 2021, (13):116–117.
- [4] 李冰涛. 智能化发电厂锅炉运行监控系统的分析 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(3):316–317.
- [5] 王征宇. 基于节能视角下的锅炉经济运行途径分析 [J]. 质量与市场, 2020, (8):10–12.
- [6] 吴坡, 段松涛, 张江南, 贺勇, 朱峰. 数据驱动型实时燃烧优化控制架构及应用 [J]. 电力工程技术, 2021, 40(2):197–204.
- [7] 谷爱军, 刘斌, 王国栋. 火力发电厂智能发电发展方向及关键技术研究 [J]. 今日自动化, 2024, (1):21–23.
- [8] 张博, 胡曦, 崔捷. 超临界机组智慧锅炉的研究与应用 [J]. 锅炉技术, 2021, 52(4):61–64.
- [9] 杨天昱. 智能锅炉工业互联网平台建设 [J]. 锅炉制造, 2022, (6):57–58.
- [10] 张爱君. 基于燃气锅炉的热管理模式提升探究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(2):198–200.