

基于大数据的铸造生产能耗智能监控与节能优化

刘洪山, 刘文阔

(山东山诚机械科技股份有限公司, 山东 济南 250200)

摘要 铸造行业作为高能耗传统制造业, 能耗管控水平直接影响企业生产成本与行业绿色转型。当前铸造生产能耗监控存在数据碎片化、管控滞后、优化缺乏精准支撑等问题, 制约节能降耗成效。本研究结合大数据技术海量数据处理与分析优势, 构建铸造生产能耗智能监控与节能优化体系, 旨在实现能耗数据实时采集、精准分析、异常预警及优化策略动态输出。通过实际应用验证, 该体系可有效提升能耗监控精度, 降低生产能耗, 为铸造行业绿色低碳发展提供技术支持, 具有重要的工程应用价值与推广前景。

关键词 大数据; 铸造生产; 能耗监控; 节能优化; 智能管控

中图分类号: TP3; TG2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.026

0 引言

铸造生产涵盖熔化、造型、浇注、清理等多道工序, 工序关联性强、能耗环节复杂, 电能、焦炭、柴油等能源消耗占企业生产成本比重较高。当前我国铸造行业仍存在能耗管控粗放、数据采集不全面、优化措施缺乏科学性等问题, 不仅增加企业生产成本, 还与绿色制造业发展要求存在差距。大数据技术可实现多源能耗数据的整合与深度挖掘, 打破传统监控模式的局限^[1]。开展基于大数据的铸造生产能耗智能监控与节能优化研究, 破解能耗管控难点, 推动铸造行业节能降耗、提质增效, 助力制造业绿色转型, 符合国家产业升级与双碳战略要求。

1 铸造生产能耗相关理论及技术发展

1.1 铸造生产能耗理论基础

铸造生产能耗涵盖熔化、造型等核心工序的能源消耗, 其消耗水平受原材料特性、设备参数、工艺规程及环境因素综合影响, 表现出非线性、波动性与强关联性。铸造生产能耗理论以能量守恒定律为基础, 结合工艺机理, 解析工序内能量的输入、转化与损失路径, 识别关键能耗节点。不同工艺能耗差异显著, 如砂型铸造能耗普遍高于精密铸造, 电弧炉熔化能耗通常大于中频感应炉。该理论基础为设定能耗监控指标与明确优化路径提供了根本依据。

1.2 大数据技术核心理论

大数据技术围绕数据生命周期构建, 包含采集、存储、处理与挖掘四个关键环节, 具有数据体量巨大、增长迅速、类型多样及价值密度低的特点。数据采集技术能够实时获取设备传感器、生产系统及能源计量仪表的多源异构数据。分布式存储架构保障了TB至PB级数据的安全存放与高效访问。数据处理通过清洗、转换与集成提升数据质量。数据挖掘运用机器学习等算法, 从海量数据中发现隐含关联与模式^[2], 其核心目标是将原始数据资源转化为支持决策的有效信息, 为能耗分析提供支撑。

1.3 智能监控技术发展现状

智能监控技术集成传感器、物联网及数据传输智能分析, 实现生产过程实时监测和异常诊断预警。铸造领域传统监控依赖人工巡检单点计量, 存在实时性差、数据不准、响应延迟等问题。当前技术正向一体化精准化智能化演进, 借助无线传感器网络边缘计算相结合方式, 实现能耗数据实时采集、远程监控、现场智能分析^[3], 这种模式传输延迟降低, 异常波动捕捉能力提升, 能耗监控被动处置转向主动管理推动。

2 基于大数据的铸造生产能耗智能监控体系构建

2.1 监控体系总体架构设计

结合铸造工艺特点大数据技术, 构建四层架构能耗智能监控体系, 体系包含数据采集层、数据传输层、

作者简介: 刘洪山(1967-), 男, 专科, 研究方向: 铸造智能生产。

数据处理层、监控应用层，数据采集层全面捕捉能耗数据构成体系基础，数据传输层保障数据高效安全流动，数据处理层完成数据提纯价值挖掘，监控应用层向用户提供可视化监控异常预警等功能。体系采用模块化可扩展性设计，能够根据企业生产规模工艺类型灵活调整，适配砂型铸造、精密铸造等多种模式，传统监控系统兼容性、扩展性不足问题得到有效解决。

2.2 多源能耗数据采集系统设计

数据采集系统围绕铸造能耗关键环节，建立了多源数据采集网络。网络采集对象涵盖三类数据：能源

消耗数据，如电能、焦炭、柴油的瞬时与累计消耗；设备运行数据，包括中频感应炉、造型机等设备的核心运行参数；工艺参数数据，如熔化温度与砂型含水率。系统采用智能传感器、电表、流量计等设备。采样频率固定为 1 次 / 分钟，采集精度满足电能 ±0.5 级、温度 ±1 °C、流量 ±0.2% 的要求。系统兼容有线与无线传输，无线传输采用 Long Range 技术，有效传输距离 1 000 m，传输延迟不大于 500 ms^[4]。采集系统的核心采集参数与精度指标如表 1 所示。

表 1 系统展示了数据采集系统的三类数据、采集参

表 1 多源能耗数据采集系统核心参数表

采集类别	采集参数	采集设备	采集精度
能源消耗数据	电能、焦炭、柴油消耗	智能电表、流量计	±0.5 级、±0.2%
设备运行数据	功率、温度、转速	智能传感器	±1 °C、±0.3%
工艺参数数据	熔化温度、砂型含水率	温度传感器、湿度传感器	±1 °C、±0.5%

数、设备与精度。能源消耗数据通过智能电表和流量计采集电能、焦炭及柴油消耗量，精度分别达到 ±0.5 级与 ±0.2%。设备运行数据由智能传感器获取功率、温度、转速等参数，温度采集精度为 ±1 °C，其他参数精度为 ±0.3%。工艺参数数据使用温度与湿度传感器监测熔化温度及砂型含水率，精度分别为 ±1 °C 与 ±0.5%。表格内容明确了系统对不同类型数据的采集方式与质量要求，为后续分析与优化提供了准确的数据基础。

2.3 大数据处理与监控模块开发

数据处理模块融合边缘计算与云计算进行协同工作。边缘计算节点部署于车间现场，对原始数据执行清洗、去噪与格式转换，数据清洗准确率不低于 99.5%。处理后的数据被上传至云计算平台。该平台采用 Hadoop 分布式存储架构，存储容量可扩展至 PB 级。数据挖掘使用随机森林算法构建关联分析模型，模型拟合度达到或超过 0.92，以揭示设备参数、工艺参数与能耗间的内在联系。监控模块采用 B/S 架构，集成数据可视化、异常预警及数据查询功能，支持电脑与手机终端访问。系统异常预警响应时间小于等于 30 秒，预警准确率不低于 98%^[5]，从而实现了对能耗的全方位智能监控。

3 铸造生产能耗节能优化模型构建与实现

3.1 能耗优化目标与约束条件确定

能耗优化以降低铸造生产总能耗、提升能源利用效率为核心目标，同时兼顾产品质量、生产效率，确保优化策略具有实际可操作性。优化目标量化为：在保证铸件合格率 ≥ 99%、生产效率不降低的前提下，将铸造

生产总能耗降低 8% 以上，核心工序熔化能耗降低 10% 以上。约束条件基于铸造生产工艺要求、设备运行极限与安全生产标准确定，包括设备运行参数约束（中频感应炉功率 300 ~ 500 kW、熔化温度 1 450 ~ 1 550 °C）、工艺参数约束（砂型含水率 3% ~ 5%、浇注温度 1 380 ~ 1 480 °C）、能源供应约束（各类能源供应稳定，波动幅度 ≤ 5%）。约束条件的设定既避免过度优化导致产品质量下降^[6]，又确保优化策略符合企业实际生产能力，具备可实施性。

3.2 基于大数据的能耗优化模型构建

融合铸造能耗特性与数据挖掘结论，建立了多目标能耗优化模型。该模型以处理后的设备运行参数、工艺参数及能源消耗参数为输入，输出优化后的设备参数、工艺调整方案与预期节能值。模型中引入了能耗损耗系数，用以量化各环节损耗，重点关注熔化电耗与造型焦耗。模型求解采用改进粒子群算法，通过动态调整惯性权重和学习因子，有效规避局部最优解问题。算法收敛速度提升超过 20%，求解精度提升超过 15%。为验证模型效果，选取某企业连续 3 个月生产数据进行对比分析，具体数据如表 2 所示。

表 2 展示了应用优化模型后各工序的单位产品能耗变化。熔化工序能耗由 580 kW·h/t 降至 515 kW·h/t，降幅达 11.2%。造型工序能耗从 120 kW·h/t 降至 110 kW·h/t，降低 8.3%。浇注工序能耗从 65 kW·h/t 降至 60 kW·h/t，降低 7.7%。清理工序能耗从 45 kW·h/t 降至 42 kW·h/t，降低 6.7%。经过综合优化，生产总工序能耗由 810 kW·h/t 降至 727 kW·h/t，整体能耗降低率达到 10.2%。数据证明，优化模型对能耗较高的

表2 关键工序优化前后能耗对比表

生产工序	优化前能耗 (kW·h/t)	优化后能耗 (kW·h/t)	能耗降低率 (%)
熔化工序	580	515	11.2
造型工序	120	110	8.3
浇注工序	65	60	7.7
清理工序	45	42	6.7
总工序	810	727	10.2

熔化工序改进效果最为显著，同时实现了全流程能耗的普遍降低。

3.3 优化模型验证与参数调整

在中型灰铸铁件生产企业的模型验证中，采用中频感应炉与砂型造型工艺，日均产量 50 t。为期三个月的验证期内，实时采集多源数据进行分析。优化后，生产单吨铸件的综合能耗显著下降，能耗降低率达到 10.2%，预计月均节约能源费用 8.6 万元。铸件合格率得到提升，生产效率保持稳定。设备故障率下降，运行稳定性改善。针对验证中的局部能耗波动，结合数据挖掘结果对模型参数进行了校准，包括调整惯性权重范围与修正工艺参数约束阈值^[7]。参数调整后，模型预警准确率提高，能耗优化的稳定性进一步增强。

4 铸造生产能耗智能监控与节能优化系统应用效果

4.1 系统应用架构与实施流程

基于试点企业条件，搭建了铸造能耗智能监控与优化系统。系统以四层架构为框架，集成了企业现有的生产管理与能源计量系统。实施过程分为四个有序步骤。第一步，部署设备并完成数据对接，安装智能传感器及采集终端，实现与原有设备和系统的联通。第二步，调试系统并校准模型，确保数据采集精度与模型参数准确，保障运行稳定。第三步，进行为期一个月的试运行，持续监测系统状态并处理问题以优化性能。第四步，系统转入正式运行，全面投入使用，同时建立常态化能耗监控、优化及定期数据复盘与调整的闭环管理机制。

4.2 系统应用效果量化分析

系统正式运行 3 个月后，对应用效果进行量化评估。评估涵盖能耗、质量、经济及设备四类核心指标。能耗指标显示，生产总能耗降低 10.2%，熔化工序能耗降低 11.2%，造型工序能耗降低 8.3%。单位产品能耗从 810 kW·h/t 降至 727 kW·h/t^[8]，其节能率超过行业平均水平约 6%。质量指标方面，铸件合格率从 99.1% 提升至 99.5%，废品率相应从 0.9% 降至 0.5%。经济指标统计显示，月均节约电能 12.9 万 kW·h，节省焦炭

15 t、柴油 8 t，折算月均节约能源费用 8.6 万元，年节约费用约 103.2 万元，投资回报周期约为 18 个月。设备指标改善表现为，设备运行效率从 82% 提升至 88%，故障率从 3.2% 下降至 1.8%，月度维护成本平均减少 1.2 万元。系统应用展现出显著的综合效益。

5 结束语

本研究针对铸造能耗管理粗放问题，完成了智能监控与节能优化探索。工作构建了包含四层架构的监控体系与多目标能耗优化模型。试点应用验证了体系的科学有效。研究突破了多源数据整合、异常识别与精准优化等关键技术，实现了能耗的实时监控、预警与动态调控。实践表明，成果有助于降低总能耗，提升设备稳定性与产品质量，助力企业降本增效。当前模型对复杂工况的适应性存在局限。后续将通过融合深度学习技术改进模型，扩大试点范围并完善系统功能，以推动成果在铸造行业的广泛应用，促进其绿色低碳发展。

参考文献:

- [1] 宰红斌, 蒋涛, 李海峰, 等. 铸造车间双目协同云台智能监控应用探究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(09): 1307-1308.
- [2] 刘旭东, 乃晓文, 马娅玲. 铸造产品的智能制造软件平台 [J]. 现代铸铁, 2022, 42(05): 58-62.
- [3] 吕婷. 基于无线传感网络的铸造车间监控系统研究 [J]. 齐齐哈尔大学学报 (自然科学版), 2020, 36(06): 34-38, 49.
- [4] 马一波, 艾立明, 杨林, 等. 铸造企业实现节能降耗的管理方法 [J]. 铸造设备与工艺, 2024(01): 47-50.
- [5] 侯守伟. 自动化物流信息管理系统在数字化铸造车间的应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(03): 436-437.
- [6] 王啸龙. 基于镂空砂型的铸件凝固监测与控制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2024.
- [7] 裴小龙. 数据驱动调压铸造工艺智能设计及优化 [D]. 太原: 中北大学, 2025.
- [8] 黄力彦, 陈玲, 杨会军. 河北省铸造行业节能降碳研究 [J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(03): 121-123.