

自动化控制技术在高温炼铁生产过程中的运用

臧延祥, 梁永杰

日照钢铁控股集团有限公司, 山东 日照 276808

DOI: 10.61369/VDE.2025180011

摘 要 : 伴随社会经济发展, 社会对钢铁需求量日益增加, 高温炼铁自动化已成为钢铁行业发展的一大趋势。在高温炼铁生产过程中, 如何科学地整合与运用先进传感器设备、神经网络算法、AI 专家决策系统等, 发挥自动化控制技术优势, 成为钢铁企业提高产品质量与产能的重要问题。本文简述自动化控制技术的运用方法, 围绕跨域技术融合、场景创新突破、未来技术重构三个方面, 探讨自动化控制技术在高温炼铁生产过程中的创新运用, 展望未来技术与突破, 以提升高温炼铁的自动化水平, 适应现代炼铁行业高质量发展需求。

关 键 词 : 自动化控制技术; 高温炼铁; 运用; 发展

Application of Automation Control Technology in the Production Process of Blast Furnace Ironmaking

Zang Yanxiang, Liang Yongjie

Rizhao Iron and Steel Holding Group Co., Ltd., Rizhao, Shandong 276808

Abstract : With the development of social economy, the social demand for iron and steel is increasing day by day, and the automation of blast furnace ironmaking has become a major trend in the development of the iron and steel industry. In the production process of blast furnace ironmaking, how to scientifically integrate and apply advanced sensor equipment, neural network algorithms, AI expert decision-making systems, etc., and give play to the advantages of automation control technology has become an important issue for iron and steel enterprises to improve product quality and production capacity. This paper briefly describes the application methods of automation control technology, discusses the innovative application of automation control technology in the production process of blast furnace ironmaking from three aspects: cross-domain technology integration, scenario innovation breakthrough, and future technology reconstruction, and looks forward to the future technological development and breakthroughs, so as to improve the automation level of blast furnace ironmaking and meet the needs of high-quality development of the modern ironmaking industry.

Keywords : automation control technology; blast furnace ironmaking; application; development

引言

根据工信部, 国家发改委, 生态环境部三部门联合印发的《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》, 要开展钢铁行业智能制造行动计划, 推进5G、工业互联网、人工智能、商用密码、数字孪生等技术在钢铁行业的应用, 在钢铁生产领域突破一批智能制造关键共性技术, 为钢铁工业向低碳化、智能化、高端化发展提供了导向^[1]。在此背景下, 结合新一代信息技术的方向, 探索自动化控制技术在高温炼铁中的创新应用与发展路径, 提高高温炼铁的自动化与智能化水平势在必行。

一、自动化控制技术在高温炼铁生产过程中的运用方法

(一) 高温设备炉顶供料系统:

采用 PLC 控制, 结合料位传感器实时监测料仓存量, 自动调节上料皮带速度与布料溜槽角度, 实现按配比精准供料, 避免料面波动。

(二) 高温炉的自动热风炉系统:

通过温度、压力传感器采集数据, 自动切换燃烧、送风周

期, 调控煤气与助燃风流量, 维持热风温度稳定, 提升热效率。

(三) 高温炉的炉体控制系统:

利用热电偶、雷达料位计等, 实时监控炉温、料位、炉体冷却水温, 自动调节冷却水量与喷煤量, 防止炉衬侵蚀, 保障炉况稳定^[2]。

(四) 高温炉的传动控制系统:

采用变频调速技术, 对高温炉卷扬机、除尘风机等设备进行速度闭环控制, 实现平稳启停与负荷调节, 减少机械损耗。

(五) 高温炉的自动监控系统:

依托 DCS 系统整合各子系统数据, 通过监控界面实时显示设

备状态与工艺参数，异常时自动报警并触发连锁保护，提升生产安全性^[9]。

二、自动化控制技术在高温炼铁生产中的创新运用

（一）跨域技术融合：打破“单一控制”局限，构建多维度智能调控体系

传统自动化控制多聚焦于单一环节（如配料、冶炼）的参数调节，而前沿应用通过融合 AI 大模型、数字孪生、边缘计算等跨域技术，实现“数据－模型－决策－执行”的全链条闭环创新，解决高温复杂工况下的动态优化难题^[4]。

1. AI 大模型驱动的“炉况预判－主动调控”模式

突破传统“反馈式调节”（即参数异常后再调整）的滞后性，基于高温全流程历史数据（原料成分、炉温、煤气成分、设备状态等）与实时数据，训练高温专属大模型（如基于 Transformer 架构的炉况预测模型），实现“提前预判－主动干预”^[5]。例如：模型可通过分析原料成分微小波动（如铁矿石硫含量波动 0.02%）与炉温变化的关联规律，提前 4-6 小时预判炉温可能下降 50℃，并自动生成调控方案——提前减少铁矿石给料量 3%、增加焦炭配比 1.5%，避免炉温波动影响铁水质量。相比传统控制，该模式将炉温波动幅度缩小至 ±20℃ 以内，铁水成分合格率提升至 99.5% 以上，且减少因参数异常导致的能耗浪费（单次异常调整可浪费煤气 1200m³）。

2. 数字孪生与物理高温的“虚实交互”调控

传统数字模型多用于静态模拟，而前沿应用构建“动态孪生高温”——通过在物理高温安装数千个高精度传感器（如光纤传感器监测炉衬应力、毫米波雷达监测料层分布），将炉内温度场、流场、化学反应场等动态数据实时映射至孪生模型，实现“虚拟仿真－优化验证－物理执行”的闭环^[6]。例如：当需调整布料制度以降低炉壁侵蚀时，先在孪生模型中模拟“溜槽倾斜角度从 15° 调整至 12°”的效果——观察炉内料层分布是否均匀、炉壁温度是否下降，验证方案可行后，再将参数下发至物理高温的自动化控制系统执行。该模式避免了传统“试错式调整”的风险（如不当布料可能导致炉况失常，恢复需 4-8 小时），使布料制度优化效率提升 60%，炉衬使用寿命延长 1-2 年。

3. 边缘计算赋能的“分布式实时控制”

针对高温上料、出铁等环节设备分散（如皮带输送机、开口机）、数据传输延迟的问题，将边缘计算节点部署于设备附近，实现“本地实时决策＋云端全局优化”^[7]。例如：上料系统的皮带输送机若出现跑偏（传统需依赖中央控制系统接收信号后调整，延迟约 0.5 秒），边缘节点可通过实时采集皮带跑偏传感器数据，在 0.05 秒内直接控制纠偏装置动作，避免皮带磨损或原料洒落；同时，边缘节点将设备状态数据上传至云端，用于全局设备健康管理。该模式使设备故障响应时间缩短 90%，皮带输送机故障率下降 40%，减少因设备故障导致的高温休风次数。

（二）场景创新突破：聚焦“低碳化、柔性化、高端化”需求，拓展控制边界

传统自动化控制以“稳定生产、提升产量”为核心目标，而新

颖应用围绕钢铁工业“双碳”目标、定制化生产需求，在低碳调控、柔性冶炼、高端铁水制备等场景实现突破，创造新的价值维度^[8]。

1. 低碳导向的“全流程能耗动态优化”控制

突破传统“单一环节节能”（如煤气回收）的局限，构建“高温－煤气柜－发电－炼钢”全流程能耗优化模型，通过自动化控制实现“碳足迹最小化”。例如：系统实时采集高温煤气产量、发电负荷、炼钢用能需求数据，动态调整煤气分配比例——当炼钢车间需增加加热用煤气时，自动减少煤气发电用量，同时通过 AI 模型预测后续 2 小时高温煤气产量，提前调整发电负荷，避免煤气放散（传统放散率约 5%，优化后可降至 1% 以下）；此外，针对“富氧冶炼”环节，系统通过分析氧气消耗与 CO₂ 排放的平衡关系，自动控制氧气纯度（如从 99.5% 调整至 99.2%）与用量，在保证冶炼效率的前提下，减少制氧能耗（每降低 0.1% 纯度，制氧能耗下降 0.8kWh/m³），实现“能耗－排放”双重优化。该模式可使高温综合能耗降低 8-12kgce/t（千克标准煤/吨铁），年减少 CO₂ 排放 1.2 万吨以上（按 3500m³ 高温产能计算）。

2. 柔性冶炼的“多品种铁水快速切换”控制

针对汽车板、硅钢等高端钢材对铁水成分的定制化需求（如汽车板用铁水需低硫 <0.015%、低磷 <0.012%，硅钢用铁水需高硅 2.0-3.0%），传统人工调整需 6-8 小时切换品种，且易导致铁水不合格^[9]。新颖应用通过“原料预配－工艺参数预调－成分实时校准”的自动化柔性控制体系，实现多品种铁水快速切换。例如：当需从“低硫铁水”切换至“高硅铁水”时，系统先根据目标成分自动生成原料预配方案——将铁矿石配比从 70% 降至 65%、焦炭配比从 25% 提升至 28%、增加硅石熔剂 3%，并提前在原料仓完成预混；同时，在冶炼过程中，通过激光诱导击穿光谱（LIBS）实时检测铁水成分（分析时间仅 10 秒，传统光谱仪需 30 秒），若硅含量低于目标值 0.2%，立即自动增加硅石给料量 0.8%，确保切换过程中首炉铁水即达标。该模式将品种切换时间缩短至 2-3 小时，定制化铁水合格率提升至 99%，满足高端钢材“小批量、多批次”的生产需求。

3. 设备健康的“预测性维护－寿命延长”控制

突破传统“故障后维修”或“定期维护”的局限，通过自动化控制与设备健康管理模型结合，实现“基于工况的预测性维护”，延长关键设备寿命^[10]。例如：针对高温炉缸耐火砖（传统寿命 3-5 年），系统通过分析炉缸温度场数据（每 10 秒采集一次）与耐火砖侵蚀速率的关联模型，预测耐火砖剩余寿命——当模型预判某区域耐火砖剩余寿命仅 6 个月时，自动调整该区域对应的布料制度（如增加焦炭布料量，减少高温铁水对炉壁的冲刷），同时生成维护计划（如 3 个月后进行局部喷补）；此外，针对卷扬机（上料核心设备），系统通过实时监测电机电流、钢丝绳张力的微小波动，预判轴承磨损程度，提前 1-2 个月发出维护预警，避免突发故障。该模式使高温关键设备（炉缸、卷扬机、风机）的平均寿命延长 20-30%，年减少设备维护成本 800-1200 万元。

（三）未来技术重构：从“控制”到“自治”，定义高温炼铁自动化新形态

随着技术迭代，自动化控制将逐步突破“人主导决策”的框

架，迈向“高炉自治”阶段，通过融合更前沿的技术（如量子计算、生物启发算法、泛在感知），重构高炉炼铁的控制逻辑与生产模式。

1. 量子计算赋能的“多目标全局优化”

高炉炼铁存在“产量－质量－能耗－排放”多目标优化的矛盾（如提升产量可能增加能耗，降低排放可能影响效率），传统算法（如遗传算法、粒子群算法）难以在短时间内找到最优解（复杂工况下计算需30-60分钟）。未来，量子计算可利用其并行计算能力，在10-20秒内求解多目标优化问题——例如：同时输入“铁水产量提升2%、焦比降低5kg/t、CO₂排放减少3%”的目标，量子算法可快速生成原料配比、风量、氧气用量的最优组合，并下发至自动化控制系统执行。该技术若落地，可使高炉多目标优化效率提升300%以上，打破传统“单目标优先”的局限，实现“全目标最优”。

2. 生物启发算法的“自适应炉况调控”

模拟生物“进化－适应”机制，开发高炉炉况自适应算法（如基于蚁群算法、免疫算法），使控制系统具备“自主学习、动态适应”能力。例如：当高炉遇到突发工况（如原料成分突变、设备临时故障），传统控制需依赖人工干预调整参数，而自适应算法可通过“模拟蚁群寻找食物路径”的逻辑——快速搜索历史相似工况的调控方案，结合实时数据调整参数（如原料突变时，自动增加熔剂用量以平衡成分），并在调控过程中持续学习优化（如记录本次调整效果，用于后续类似工况）。该模式可使高炉应对突发工况的响应时间缩短至1-2分钟，减少因人工干预不及时导致的炉况失常（传统人工干预需5-10分钟，易造成铁水不合格）。

3. 泛在感知下的“无传感器盲区”控制

突破传统“固定传感器监测”的局限，通过泛在感知技术（如无线传感网络、分布式光纤传感、无人机巡检）实现高炉全场景数据采集，消除监测盲区。例如：利用无人机搭载红外热像仪，定期对高炉炉顶、炉体外部进行巡检，补充固定传感器的监测死角（如炉顶边缘区域温度）；在高炉料仓内部部署无线传感节点，实时监测原料湿度、粒度的空间分布（传统仅能监测料仓出口处数据），避免因原料内部分布不均导致的配料误差；在煤气管道内壁铺设分布式光纤传感器，实时监测管道腐蚀情况（传统需停机检测）。泛在感知数据与自动化控制系统联动，可使高炉监测覆盖率从85%提升至99%以上，为精准控制提供更全面的数据支撑。

三、自动化控制技术创新应用的价值：从“效率提升”到“价值重构”

传统自动化控制的价值集中于“提升效率、降低成本”，而上述创新应用从三个维度重构高炉炼铁的价值：

（一）低碳价值：

通过全流程能耗优化、CO₂排放动态调控，助力钢铁企业实现“双碳”目标，例如某3500m³高炉应用“低碳化自动化控制体

系”后，年减少CO₂排放1.5万吨，获得地方政府低碳补贴约300万元；

（二）高端价值：

柔性冶炼控制满足高端钢材对铁水的定制化需求，使企业高端铁水产量占比从30%提升至60%，产品附加值增加200-300元/吨铁；

（三）韧性价值：

预测性维护与自适应调控提升高炉生产韧性，使高炉年休风时间从传统的80小时缩短至30小时以下，减少因休风导致的产量损失（每休风1小时，损失铁水约150吨）。

四、结束语

综上所述，自动化控制技术在高炉炼铁中的创新应用，已不再是“单一的自动控制系统应用”，而是通过跨域技术融合、场景创新突破、未来技术重构，实现“从控制到优化、从优化到自治”的升级。这些创新不仅解决了传统控制难以应对的复杂难题，更从低碳、高端、韧性三个维度为高炉炼铁创造新的价值，推动钢铁工业向“智能低碳”的新形态转型。未来，随着量子计算、泛在感知等技术的成熟，高炉炼铁有望实现“完全自治”——无需人工干预即可自主应对原料波动、设备故障、市场需求变化，成为钢铁工业智能制造的核心标杆。

参考文献

- [1] 切实把《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》落到实处[J]. 中国钢铁业, 2022, (02): 1.
- [2] 张岩. 炼铁高炉的电气自动化控制系统及仪表抗干扰措施研究[J]. 电子测试, 2020, (19): 101-103.
- [3] 袁峰. 高炉炼铁过程中电气设备自动化改造研究[J]. 冶金与材料, 2024, 44 (07): 19-21.
- [4] 黄伟. 高炉炼铁自动化控制系统的性能优化及实际应用[J]. 化工管理, 2024, (12): 137-140.
- [5] 郭文韬. 高炉炼铁布料和出渣设备优化改造实践[J]. 中国金属通报, 2024, (01): 144-146.
- [6] 刘嘉, 燕荣耀. 炼铁高炉炮泥填装自动化应用[J]. 冶金动力, 2023, (05): 78-80.
- [7] 郑正豪. 炼铁高炉喷煤自动控制系统的应用研究[J]. 山西冶金, 2023, 46 (07): 200-201+204.
- [8] 张文卿, 丁剑锋. 炼铁高炉电气自动化系统基本配置及其功能和优点分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2020, 10 (10): 69-70.
- [9] 方桂荣, 吴金龙. 炼铁高炉喷煤系统中阀门的自动化控制[J]. 机电工程技术, 2020, 49 (10): 158-161.
- [10] 蓝文韬. 高炉炼铁智能化的研究现状与展望分析[C]// 中国金属学会, 中国金属学会青年工作委员会. 第十二届中国金属学会青年学术年会暨首届“碳中和”冶金青年科学家沙龙论文集(一). 中南钢铁股份有限公司; , 2024: 120-121.