

机械自动化技术在冶金中的应用研究

吴 伟

中色（宁夏）东方集团有限公司 宁夏 石嘴山 753000

摘 要：随着工业4.0与智能制造的深度推进，机械自动化技术已成为冶金行业转型升级的核心驱动力。本文以冶金生产全流程为研究对象，系统剖析了机械自动化技术在原料处理、炼铁、炼钢、轧制等关键环节的应用模式，结合典型案例，揭示了PLC控制、数字孪生、智能机器人等技术的融合创新路径。研究表明，机械自动化技术使冶金生产效率提升，能耗降低，但存在工艺适配性不足、数据孤岛等问题。

关键词：机械自动化；冶金工业；智能控制；数字孪生；工艺优化

1 引言

传统冶金生产依赖人工经验与机械控制，存在能耗高、污染重、产品质量波动大等弊端。机械自动化技术通过集成传感器、执行器与智能算法，实现了生产流程的精准感知与动态优化，成为破解行业痛点的关键路径。据统计，2024年全球冶金自动化市场规模达1457亿美元，中国占比超30%。然而，国内冶金企业自动化水平参差不齐，高端装备国产化率不足40%，核心控制系统仍依赖进口。本文从技术原理、应用场景、创新案例三个维度展开研究，旨在为冶金行业智能化转型提供理论支撑与实践参考。

2 机械自动化技术体系构建

2.1 技术架构

冶金机械自动化系统采用分层递阶控制架构，含设备、控制、管理、决策四层。设备层集成多种传感器，实时采集关键参数；控制层基于PLC、DCS等控制器，负责逻辑与运动控制，接收数据并发出指令；管理层通过MES系统集成生产计划等功能，实现信息共享协同；决策层依托大数据与AI算法，深度挖掘数据，优化工艺与资源配置。此架构层次分明、功能明确，易于维护扩展，能满足冶金生产复杂需求^[1]。

2.2 核心技术矩阵

表1 机械自动化技术体系核心技术

技术类别	代表技术	应用场景	技术指标
感知技术	多光谱成像、激光雷达	炉内温度场监测、板形检测	测量精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，响应时间 $< 10\text{ms}$
控制技术	模型预测控制（MPC）	高炉冶炼、连铸连轧	控制周期 $\leq 50\text{ms}$ ，稳态误差 $< 0.5\%$
执行技术	伺服电机、液压伺服系统	轧机压下、转炉倾动	定位精度 $\pm 0.01\text{mm}$ ，重复性 $\pm 0.005\text{mm}$
智能技术	数字孪生、强化学习	工艺优化、故障预测	模型更新周期 $< 1\text{min}$ ，预测准确率 $> 95\%$

3 典型应用场景分析——以铜、银冶炼为例

3.1 铜冶炼：全流程智能化控制与绿色生产

3.1.1 闪速熔炼智能控制：从“经验驱动”到“数据驱动”

闪速熔炼是铜冶炼核心环节，传统依赖人工经验调节氧气、燃料比例，易造成能耗浪费与产品质量波动。当前，通过在熔炼炉内布置高温耐腐蚀传感器，实时采集温度、压力、氧气浓度、二氧化硫浓度等关键参数，采样频率达1次/秒；结合模型预测控制（MPC），基于历史数据建立动态模型，预测未来参数变化趋势，自动调整氧气喷枪流量、燃料供给量；智能加料系统则通过在线成分分析仪快速测定精矿元素含量，结合物料平衡模型自动计算配比，确保原料成分稳定^[2]。例如，江西铜业贵溪冶炼厂引入该系统后，精矿配比误差从 $\pm 2\%$ 降至

$\pm 0.5\%$ ，熔炼效率提升15%；智利埃斯康迪达铜矿冶炼厂采用西门子SIMATIC PCS 7控制系统后，单位产品能耗降低，年节约能源成本超2000万美元，铜铼品位波动范围缩小，为后续吹炼环节提供了更稳定的原料。

3.1.2 电解精炼自动化：从“人工干预”到“无人化操作”

电解精炼是铜纯化的关键步骤，传统依赖人工检测电解液成分、调整电流密度，易导致产品质量不稳定。当前，通过在电解槽内布置电位滴定仪与离子选择性电极，实时监测电解液中铜、硫酸、氯离子等浓度，自动调节加酸量与循环流量；基于电解液成分与阴极板厚度数据，通过PID算法实时调整电流密度，避免边缘烧蚀；采用ABB或KUKA工业机器人完成阴极板吊装、清洗、剥离等高危作业，配备力传感器与视觉识别系统，精准

定位并控制抓取力度。例如,江西铜业贵溪冶炼厂引入法国美卓奥图泰的电解自动化系统后,阴极铜合格率提升,年减少返工铜量超1200吨;机器人替代人工后,单条电解线作业人员大幅减少,年节约人力成本超300万元。

3.1.3 智能物流与环保协同:从“孤立系统”到“全链路优化”

铜冶炼涉及原料、中间产品、成品的频繁转运,传统物流依赖人工调度,易导致库存积压与运输损耗;同时,环保环节需严格监控排放指标。当前,通过自动化立体仓库与AGV系统协同,实现原料、中间产品、成品的自动入库、存储与出库,AGV采用激光导航技术,运输效率比人工叉车提升40%;在制酸装置中布置SO₂浓度分析仪与转化率在线监测仪,结合催化反应动力学模型,自动调节转化器温度与氧气量,确保SO₂转化率超99.5%;通过pH计、电导率仪实时监测废水水质,结合加药模型自动投加试剂,使出水pH稳定在6-9之间,循环水利用率达98%以上。例如,智利埃斯康迪达铜矿冶炼厂采用罗克韦尔自动化PlantPAx系统后,物流调度效率提升50%,库存周转率增加;烟气制酸装置年减少SO₂排放量超2000吨,满足智利最严格的环保标准。

3.2 银冶炼:高精度控制与安全保障并重

3.2.1 银熔炼非接触式测量与控制:突破高温环境限制

银熔体温度极高,传统接触式测温易失效且污染熔体,而自动化技术通过非接触式测量与智能控制解决了这一难题。激光测温仪利用CO₂或光纤激光器,通过测量反射激光计算温度,精度达±1℃,响应迅速;红外热像仪布置在熔炼炉观察孔,实时生成温度场分布图,识别局部异常区域,并自动调整氧气喷枪流量以促进反应均匀性;温度预测模型则基于历史数据,提前预判温度波动趋势,自动调节燃料和氧气量,避免熔体凝固。河南豫光金铅引入德国布鲁克激光测温系统后,温度波动范围大幅缩小,银回收率显著提升,年增加银产量超20吨。

3.2.2 银精炼成分在线分析与闭环控制:从“离线检测”到“实时优化”

银精炼需去除多种杂质,传统工艺依赖人工取样送检,周期长且易导致质量波动。自动化技术通过在线分析仪与闭环控制,实现了精炼过程的实时优化。光谱分析仪采用ICP-OES或XRF技术,实时监测熔体中多种元素含量,检测限低且分析迅速;电位滴定仪则通过自动滴定和银离子选择性电极,监测关键离子浓度,并自动调节试剂投加量;闭环控制算法基于成分分析结果,动态调整试剂流量与反应时间,确保杂质高效去除。加拿大

霍姆斯特克银矿采用美国热电在线分析系统后,精炼周期缩短,产品纯度提升,年节约试剂成本超50万美元。

3.2.3 安全保障子系统与冗余设计:从“被动响应”到“主动防御”

银冶炼涉及多种危险因素,传统安全系统响应慢且依赖人工操作。自动化技术通过安全仪表系统(SIS)与冗余设计,实现了风险的主动防控。SIS系统采用高安全等级控制器,实时监测炉体压力、氢气浓度、氯气泄漏等参数,超限时自动触发紧急停机、通风联锁或灭火装置,响应时间极短;关键设备采用双机热备或三重化冗余配置,确保单点故障不影响整体运行;虚拟现实(VR)培训系统则模拟事故场景,提升操作人员应急处置能力。加拿大霍姆斯特克银矿采用霍尼韦尔安全系统后,安全事故率大幅下降,设备非计划停机时间减少,满足严格的安全法规要求,同时河南豫光金铅引入VR培训后,员工应急响应时间缩短,年减少安全事故损失显著。

4 技术创新与实践案例

4.1 数字孪生驱动的工艺优化

河钢集团唐钢新区建设了国内首个冶金数字孪生工厂,为冶金工艺的优化提供了全新的思路和方法。在虚拟建模方面,基于Unity3D引擎构建了1:1的数字高炉,将高炉的物理结构、设备布局和生产流程等详细信息在虚拟环境中进行还原。同时,集成了2000多个传感器的数据,使数字高炉能够实时反映实际高炉的运行状态。在仿真分析方面,通过ANSYS Fluent模拟炉内气流分布,深入研究气流对炉内温度场、浓度场和化学反应的影响。根据模拟结果,优化布袋除尘器的结构,调整进气口和出气口的位置和尺寸,使排放浓度降低了15%,有效减少了环境污染^[3]。在预测维护方面,利用LSTM神经网络分析设备振动信号。LSTM神经网络具有强大的时间序列数据处理能力,能够对设备振动信号进行深度挖掘和分析,提取设备故障的特征信息。通过建立设备故障预测模型,提前72小时预警轴承故障,为企业安排设备检修提供了充足的时间,使非计划停机减少了40%,提高了生产设备的可靠性和利用率。

4.2 智能机器人的深度应用

江西铜业(或某银业企业)在阴极铜(或银锭)生产精炼车间广泛应用智能机器人,推动生产自动化与智能化升级。表面检测机器人搭载线阵CCD相机与深度学习算法,线阵CCD相机凭借高分辨率和高扫描速度,实时获取阴极铜(或银锭)表面图像;深度学习算法经海量缺陷图像训练,构建识别模型,可精准识别表面划痕、凹坑、夹杂等缺陷,识别准确率达99.2%,检测速度

可达20m/s（银锭可依实际调整），保障了产品质量。自动贴标机器人借助视觉定位与力控技术，视觉定位系统快速精确定位阴极铜（或银锭）及标签位置，力控技术依标签材质和要求调整粘贴力度，使标签粘贴牢固、位置误差小于 $\pm 0.5\text{mm}$ ，效率较人工提升3倍，提升包装规范与美观度。拆捆带机器人采用六轴机械臂与激光切割头组合，六轴机械臂灵活适应不同规格钢卷（或银卷）拆捆需求，激光切割头切割速度快、精度高，能在不损伤表面时快速切断捆带，单卷拆捆时间缩至45秒，降低工人劳动强度，提高生产效率与工作安全性。这些智能机器人的深度应用，为江西铜业（或某银业企业）的生产带来了显著变革，提升了整体竞争力。

4.3 5G+工业互联网融合创新

湖南华菱涟钢建成5G专网覆盖的全连接工厂，推动了冶金生产与信息技术的深度融合。在AGV智能调度方面，基于5G低时延特性，实现了30台AGV的协同作业。5G网络的低时延特性使得AGV能够实时接收调度指令，并根据周围环境和其他AGV的位置信息，自动调整行驶路线和速度，避免了碰撞和拥堵，物流效率提升了35%。在AR远程协作方面，通过Hololens设备与专家系统联动，实现了远程故障诊断和维修指导。当生产设备出现故障时，现场操作人员可以通过Hololens设备将故障现场的实时画面传输给专家；专家可以根据画面信息和设备运行数据，快速诊断故障原因，并通过AR技术在操作人员的视野中标注维修步骤和注意事项，指导操作人员进行维修，故障排除时间缩短了60%，提高了设备维修效率和质量。在能耗大数据平台方面，集成了20000多个监测点，实时采集生产过程中的能源消耗数据。通过对这些数据的分析和挖掘，建立能源消耗模型，动态优化能源配置，根据生产需求和设备运行状态，合理调整能源供应，吨钢综合能耗降至540kgce，实现了能源的高效利用和节能减排目标。

5 挑战与对策

5.1 技术瓶颈

一是工艺适配性不足，现有自动化系统多针对标准化流程，难以适应小批量、多品种生产需求，工艺切换和参数调整受限，导致生产效率低、产品质量不稳定。二是数据孤岛现象严重，设备层与管理层数据格式不统一，难以共享交互，影响大数据分析效能，无法挖掘数据潜在价值，降低生产决策的科学性与精准性^[4]。三是安全风险加剧，工业控制系统网络化提升，面临APT攻击、数据泄露等新型威胁，系统遭攻击或致生产中中断等严重后果，给企业带来巨大损失。

5.2 发展对策

针对挑战，需采取有效对策。构建柔性自动化体系，开发模块化、可重构装备，实现快速换型与工艺调整，如设计可更换轧辊模块。推进数据治理标准化，制定行业数据字典与接口规范，建立企业级数据中台，实现数据共享交互。强化工业安全防护，部署零信任架构与AI威胁检测系统，构建“纵深防御+主动免疫”体系，严格验证访问请求，实时监测系统状态，及时发现预警潜在威胁，保障系统安全可靠运行。

结语

机械自动化技术已成为冶金行业高质量发展的核心引擎。通过典型案例可见，自动化改造可使生产效率提升，运营成本降低，产品质量稳定性显著增强。未来需聚焦技术融合创新与生态体系构建，推动冶金自动化向智能化、绿色化、服务化方向演进，为全球冶金工业转型升级提供“中国方案”。

参考文献

- [1]宋兰,张志男,吕兴园.机械自动化技术在冶金中的应用研究[J].科技资讯,2025,23(06):122-124.
- [2]李靖康.机械自动化技术在冶金中的应用[J].冶金与材料,2022,42(06):86-88.
- [3]李靖康.试论机械自动化技术在冶金工程中的应用[J].冶金与材料,2022,42(06):98-100.
- [4]郭强.机械自动化技术在冶金生产中的应用[J].冶金管理,2021,(11):42-43.