

矿山金属冶炼中非标自动化机械设备的设计

赵雨佳

湖北金格实业发展有限公司 湖北 黄石 435000

摘要: 矿山金属冶炼对非标自动化设备提出极端工况适应性、连续作业稳定性等需求。本文围绕设计原则展开,涵盖定制化、可靠性、人机协同及绿色制造理念,阐述机械结构、传动系统等核心子系统设计方法,分析多物理场耦合、动态响应优化等关键技术挑战,并提出材料优化、惯量匹配等解决方案。通过机械、控制与材料科学的交叉融合,提升设备性能与工艺适配性,推动矿山金属冶炼向智能化、高效化方向发展。

关键词: 矿山金属冶炼; 非标自动化; 设备设计; 动态响应; 协同控制

引言: 矿山金属冶炼是工业体系的核心环节,其工艺链条涵盖矿石富集、选矿、冶炼及辅助加工等复杂流程,涉及高温、腐蚀、高精度分离等极端工况。传统标准化设备难以满足工艺对设备功能、稳定性及动态响应的严苛要求,非标自动化设备成为提升生产效率与产品质量的关键。通过定制化机械结构、冗余传动系统及智能控制算法的协同设计,可实现设备对工艺参数的精准匹配与长周期稳定运行,为冶炼行业技术升级提供硬件支撑。

1 矿山金属冶炼工艺流程分析

1.1 核心工艺环节

矿山金属冶炼的完整链条始于矿石富集,这一环节通过3级破碎实现粒度控制,经振动筛分分离合格粒级,再通过球磨机研磨至5-50微米粉末,为后续选矿创造条件^[1]。选矿过程融合重力分选、磁力分离与浮选技术,利用矿物密度、磁性及表面化学性质差异实现高效分离。冶炼阶段则针对铜金属的特点,主要分为火法冶炼和电解精炼两大核心工艺:火法冶炼通常包括造锍熔炼(如闪速熔炼、诺兰达法)、铜锍吹炼(将铜锍转化为粗铜)和阳极精炼(粗铜精炼成阳极铜),熔炼炉温度可达1200-1350°C;电解精炼则是通过电化学反应进一步去除杂质,获得纯度高达99.99%以上的阴极铜。辅助工艺中,烧结与焙烧技术将细粒含铜物料进行预处理,为熔炼提供合适的原料;铸造工艺将熔融的阳极铜浇铸成阳极板;压延或拉拔等后续加工环节将电解铜或铜合金进一步加工成板材、管材、线材等最终产品,完成铜金属的最终成型。

1.2 工艺对设备的功能需求

冶炼设备需具备极端工况适应性,在高温环境下保持结构强度,例如熔炼炉炉衬需耐受1300°C以上热冲击,电解槽需抵抗pH值1-2的强酸性电解液腐蚀。连续作业稳定

性要求设备具备长周期运行能力,转炉吹炼或倾动机构需实现每分钟精准定位,阳极精炼搅拌系统需保持工艺所需的特定转速。物料处理精度直接影响产品质量,浮选机需通过调整充气量与搅拌强度实现铜矿物与脉石的高效分离,电解过程的极距与电流密度控制需实时响应,以保证阴极铜纯度。动态响应能力体现为设备对工艺参数变化的快速调整,例如熔炼炉喷煤或喷枪系统需根据炉内状态调节供给量,电解整流系统需在电压波动时维持电流稳定输出。这些需求共同构成非标自动化设备设计的核心挑战,推动机械结构、控制算法与材料科学的交叉融合。

2 非标自动化机械设备设计原则

2.1 定制化设计导向

非标自动化设备的核心价值在于精准匹配矿山金属冶炼的特殊需求。功能模块划分需以工艺流程为基准,将破碎、筛分、冶炼等环节的设备功能进行解构,形成独立且可组合的单元。例如,针对高温冶炼区域,可设计耐热型物料输送模块,其耐温等级需达到800-1000°C;在腐蚀性工段,则采用防腐蚀分选模块,表面涂层厚度控制在200-300微米^[2]。空间布局优化需综合考虑物料流向、设备维护路径及安全间距,通过三维建模技术模拟设备安装场景,避免干涉并提升作业效率,典型布局中设备间距需保持1.5-2米。模块间接口应采用标准化设计,支持快速拆装与功能扩展,为后续工艺升级预留调整空间,接口尺寸公差控制在±0.05毫米。

2.2 可靠性优先原则

极端工况下,设备可靠性直接决定生产连续性。传动系统作为动力传输核心,需配置双电机或联轴器冗余结构,当主驱动单元故障时,备用单元可在10-20秒内自动切入,避免停机。液压与气动单元需采用双回路设计,压力源与执行元件独立布局,防止单点泄漏导致系统瘫痪,单回

路压力范围设定为10–20兆帕。故障自诊断机制通过集成多类型传感器,实时监测振动、温度、压力等参数,结合预设阈值触发预警,振动监测阈值设定为5–10毫米/秒²。容错控制策略则利用PLC逻辑编程,在检测到异常时自动调整运行模式,例如降低转速20–30%或切换备用工艺路线,确保设备在非理想状态下仍能维持基本功能。

2.3 人机协同设计

操作界面设计需遵循人体工程学原则,将控制按钮、显示屏等元件布置在最佳操作区域内,减少人员移动距离,典型操作半径控制在0.5–0.8米。触控屏界面采用分层菜单结构,核心功能一键直达,辅助功能通过二级菜单调用,降低误操作风险,菜单层级不超过3级。维护便捷性通过模块化结构实现,将设备划分为多个独立单元,每个单元配备快速连接接口,维修时无需整体拆卸,单模块更换时间控制在30–60分钟。快速换件设计采用标准化紧固件与定位销,使关键部件更换时间缩短,提升设备可用率^[3]。

2.4 绿色制造理念

节能设计从动力系统匹配入手,根据负载特性选择变频器或伺服驱动器,通过调节输出功率避免能源浪费,变频器调速范围设定为50–1500转/分钟。余热回收装置将高温烟气中的热能转化为蒸汽或热水,用于预热物料或供暖,热能回收效率可达60–70%,降低辅助能源消耗。环保材料选用聚焦于减少有害物质排放,设备外壳采用可回收金属材料,回收率不低于95%,表面处理工艺避免使用含铬、铅等重金属的涂料。密封结构优化防止粉尘泄漏,配合高效除尘系统,确保作业环境粉尘浓度低于10毫克/立方米,符合环保标准。

3 核心子系统设计方法

3.1 机械结构设计

结构强度计算需结合设备实际工况,通过有限元分析模拟极端载荷下的应力分布,识别高应力区域并优化截面形状或增加加强筋,典型加强筋厚度设定为10–20毫米^{^33^}。针对矿山环境中的冲击载荷,可对关键承力部件进行拓扑优化,在保证刚度的前提下减轻重量15–25%。材料选型需匹配工艺特性,高耐磨合金用于频繁接触矿石的部件,如破碎机锤头或输送机刮板,硬度需达到HRC55–60;耐腐蚀涂层则应用于接触酸性溶液或高温熔体的区域,如转炉内衬、电解槽或烟气处理管道,涂层寿命不低于5年。模块化设计通过功能单元标准化实现快速重组,例如将熔炼系统的上料、熔炼、出铜/渣模块设计为独立单元,各模块接口采用统一规格,支持根据生产线布局灵活拼接,模块组合方式可达10种以上。

3.2 传动系统设计

动力传输路径规划需权衡效率与可靠性。齿轮传动适用于高扭矩、低速场景,如转炉倾动或大型熔炼炉的驱动,通过优化齿形参数降低噪声与磨损,齿轮模数设定为3–8毫米;链条传动在长距离输送或特定搅拌装置中更具优势,但需定期张紧以防止跳齿,张紧力控制在500–1000牛;皮带传动则用于轻载或需要缓冲的场合,如部分给料系统。精密控制技术通过伺服电机与变频调速的协同实现,伺服电机提供高响应速度与定位精度,定位精度可达±0.01毫米,变频调速则用于调节主驱动转速,调速范围设定为10:1,二者通过总线通信同步,确保多轴运动协调性。例如在电解铜生产线的阴极剥离或阳极整形环节,伺服电机控制机械手的定位与抓取动作,变频电机调整输送链速度,二者动态匹配以保证生产节拍与产品质量。

3.3 液压与气动系统设计

压力稳定性控制依赖蓄能器配置与补偿算法。蓄能器通过储存与释放液压能平抑压力波动,其容量需根据系统最大流量波动计算,典型容量设定为10–50升,安装位置应靠近执行元件以缩短响应时间,响应时间控制在0.1–0.5秒。压力补偿算法通过实时监测负载变化调整泵输出,例如在轧机压下系统中,根据板材厚度变化动态调节液压缸压力,压力调节范围设定为5–30兆帕,避免过压或欠压。管路布局优化需减少压降与泄漏风险,主管路采用大直径管道降低流速,流速控制在2–5米/秒,分支管路按流量需求逐级缩径;弯头与接头处使用光滑过渡结构,避免湍流产生;密封件选用耐高压、抗老化材质,定期检测并更换老化部件,密封件更换周期设定为1–2年。

3.4 控制系统架构

分层控制逻辑通过现场层、监控层与管理层的交互实现数据流通。现场层以PLC为核心,直接控制设备启停、速度调节、温度控制等基础功能,通过IO模块采集传感器信号并执行逻辑运算,IO点数配置为100–500点;监控层基于SCADA系统构建可视化界面,实时显示设备状态、工艺参数(如熔炼温度、电解电流效率、烟气成分)及报警信息,支持历史数据查询与趋势分析,数据存储周期设定为1–3年;管理层通过MES系统整合生产计划、质量管理与能源调度,根据订单需求自动生成设备运行指令,指令生成周期控制在5–10分钟。智能算法集成提升系统自主性,自适应控制算法根据原料成分或环境变化自动调整工艺参数,例如在熔炼过程中根据原料品位与温度动态调节燃料与空气配比,或在电解过程中

根据电解液成分调整电流密度；预测性维护算法通过分析振动、温度、电流等数据预测设备故障，提前安排检修以减少非计划停机。

4 关键技术挑战与解决方案

4.1 多物理场耦合问题

在矿山铜冶炼的非标自动化设备中，热-力-流耦合环境对结构稳定性构成显著挑战。高温工况下，熔炼炉、转炉等设备内材料因热膨胀产生附加应力，与机械载荷叠加后可能导致结构变形超出允许范围，典型变形量需控制在 ± 1 毫米内^[4]。解决方案需从材料与结构两方面入手，选用低热膨胀系数合金或复合材料降低热变形量，热膨胀系数控制在 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 以下，通过拓扑优化调整关键部件的几何形状，使应力分布更均匀，应力集中系数降低30-50%。对于高温熔体流动或烟气冲刷引发的振动，可在结构表面增设阻尼层或加强筋，阻尼层厚度设定为2-5毫米，提升抗振能力，振动加速度降低40-60%。电磁干扰对传感器精度的抑制需结合硬件与软件措施，硬件层面采用屏蔽电缆、双绞线传输信号，屏蔽层接地电阻控制在0.1-1欧姆，并优化设备接地设计；软件层面则通过数字滤波算法消除噪声，例如在温度测量中引入滑动平均滤波，滤波窗口设定为5-10个采样点，抑制高频干扰对数据准确性的影响。

4.2 动态响应优化

高速运动部件的惯性匹配设计直接影响系统响应速度与稳定性。传动系统中，电机转子惯量与负载惯量的比值需控制在0.5-2范围内，避免因惯量不匹配导致启动延迟或制动冲击。可通过增加减速比或选用低惯量电机优化匹配关系，减速比设定为5-20，或在机械结构中采用轻量化设计减少负载惯量，负载质量减轻20-30%。实时数据采集与处理延迟的补偿需从硬件与算法协同改进，硬件层面选用高速ADC芯片提升采样频率，采样频率设定为1000-5000次/秒，缩短信号转换时间；算法层面则采用预测控制策略，根据历史数据与当前趋势预估未来状态，提前调整控制参数^[44]。例如在铜电解精炼的电流密度控制中，通过建立动态模型预测电解液成分变化对

电流效率的影响，模型更新周期设定为10-50毫秒，在延迟发生前调整整流器输出，确保阴极铜质量。

4.3 跨系统协同控制

多设备联动时的时序同步机制需解决时间基准统一问题。可通过主从控制模式实现同步，指定一台设备作为主站，其他设备作为从站，主站通过脉冲信号或通信协议向从站发送同步指令，同步周期设定为10-100毫秒，确保所有设备按统一节奏运行。对于复杂生产线，可采用分布式时钟同步技术，如IEEE1588协议，通过网络传输时间戳实现微秒级同步精度，同步误差控制在 ± 1 微秒内。异构协议通信的兼容性设计需解决不同系统间的数据格式与传输速率差异。可通过协议转换网关实现Modbus与Profinet等协议的互译，网关内部集成协议解析与封装模块，将一种协议的数据帧转换为另一种协议的可识别格式，数据转换延迟控制在1-5毫秒。对于实时性要求高的场景，可采用边缘计算技术，在网关侧完成部分数据处理，减少核心控制系统的负载，提升通信效率。

结束语

矿山金属冶炼非标自动化机械设备设计是复杂且系统的工程。通过遵循定制化、可靠性优先、人机协同及绿色制造等设计原则，运用科学的核心子系统设计方法，并有效应对多物理场耦合、动态响应优化、跨系统协同控制等关键技术挑战，可实现设备的高性能与稳定性。这不仅有助于提升矿山金属冶炼的生产效率与产品质量，还能降低能耗与成本，推动行业向智能化、绿色化方向发展，增强企业在市场中的竞争力。

参考文献

- [1]丁少忠.矿山金属冶炼中非标自动化机械设备的设计[J].模具制造,2025,25(8):213-215.
- [2]李泳霄,周泉锦,胡亮亮.矿山机械电气设备自动化调度技术分析[J].中国金属通报,2024(2):101-103.
- [3]冯文博.自动化控制在矿山机械设备设计与制造中的运用探析[J].中国金属通报,2025(8):104-106.
- [4]马金亮.电气自动化控制对矿山机械设备的影响探究[J].中国金属通报,2023(1):74-76.