

基于PLC的选矿生产线破碎-磨矿环节自动化控制系统设计

刘华春 任建瑞

紫金矿业集团股份有限公司 福建龙岩 845450

摘要: 针对选矿生产线破碎-磨矿环节,设计基于PLC的自动化控制系统。分析该环节工艺流程与控制需求,指出其存在多变量耦合、实时性要求高等难点。系统设计遵循可靠、实时、扩展及经济原则,构建包含硬件架构、软件架构与功能模块的整体框架。提出破碎、磨矿环节的关键控制策略,以及多环节协同控制策略,实现稳定生产、精准控制与能耗优化,提升选矿生产线的自动化与智能化水平。

关键词: PLC技术;选矿生产线;破碎-磨矿环节;自动化控制;系统设计

引言

在矿业领域,选矿生产线的破碎-磨矿环节至关重要,其运行效率与产品质量直接影响企业效益。传统控制方式多依赖人工经验,存在控制精度低、响应不及时、能耗高等问题,难以满足现代化生产需求。随着自动化技术发展,PLC以其高可靠性、强抗干扰性等优势,在工业控制中广泛应用。基于此,设计基于PLC的选矿生产线破碎-磨矿环节自动化控制系统,旨在实现精准控制、稳定运行与节能降耗,推动选矿生产的智能化升级。

一、破碎-磨矿环节工艺分析与控制需求

(一) 破碎环节工艺流程

(1) 粗碎、中碎、细碎的分级破碎原理:遵循“由粗到细”分级破碎原则,粗碎环节处理原矿(粒径通常300-1000mm),通过挤压、冲击作用将矿石破碎至100-300mm,为后续环节减负;中碎以粗碎产物为原料,采用研磨、剪切作用进一步破碎至20-50mm,实现粒度过渡;细碎则针对中碎产品,通过挤压-研磨复合作用,将矿石破碎至5-15mm,满足磨矿环节进料粒度要求,各阶段形成阶梯式粒度控制,避免过粉碎与能耗浪费。(2) 关键设备工作特性:颚式破碎机依靠动颚周期性摆动实现挤压破碎,结构简单、处理量大,但破碎粒度均匀性较差,适用于粗碎;圆锥破碎机通过动锥与定锥间的挤压、弯曲作用破碎矿石,破碎比大、产品粒度均匀,且耐磨件损耗低,多用于中碎与细碎;反击式破碎机利用高速转子带动板锤冲击矿石,兼具破碎与整形功能,适合脆性矿石,但处理高硬度矿石时易磨损。

(二) 磨矿环节工艺流程

(1) 球磨机/棒磨机的磨矿原理:球磨机通过旋转筒体内钢球的冲击、研磨作用破碎矿石,钢球随筒体旋转至一定高度后下落,对矿石产生冲击,同时钢球间的摩擦实现细磨,适用于细粒级矿石处理;棒磨机以钢棒为研磨介质,钢棒在筒体内呈滚动状态,通过棒与棒、棒与矿石的研磨作用破碎矿石,产品粒度均匀,过粉碎少,适用于粗磨阶段。(2) 分级机的作用:螺旋分级机借助螺旋叶片旋转,将磨矿产物按粒度分离,粗粒级矿石随螺旋上升返回磨机再磨,细粒级矿石随矿浆溢流排出,实现磨矿与分级闭环;水力旋流器利用离心力作用,使矿浆中粗粒级在旋流器底部沉砂排出,细粒级从顶部溢流分离,分级效率高、处理量大,适用于细磨后的精细分级^[1]。

(三) 控制需求分析

(1) 破碎环节:给料量需稳定控制,避免给料过多导致设备过载或给料不足影响产能,通常通过变频给料机调节;排矿口尺寸根据后续磨矿需求动态调整,粗碎排矿口控制在150-250mm,细碎排矿口控制在10-20mm,确保破碎产品粒度达标;设备负荷均衡需协调粗、中、细碎设备处理能力,避免前级设备负荷过高或后级设备待料,通过负荷传感器实时监控并调整。(2) 磨矿环节:磨矿浓度控制在65%-75%,浓度过高易导致研磨效率下降,浓度过低则增加能耗,通过矿浆浓度计实时检测并调节补水量;粒度分布需控制细粒级(-200目)含量在60%-80%,通过激光粒度仪监测,调整磨机转速或介质填充率;钢球配比根据矿石硬度调整,通常粗磨采用 ϕ 100-120mm钢球,细磨采用 ϕ 50-80mm钢球,比

例控制在3:5:2左右;能耗优化需通过合理匹配设备负荷与工艺参数,降低单位矿石磨矿能耗,目标控制在8-12kWh/t^[2]。

(四) 自动化控制难点

(1) 多变量耦合与非线性特性:破碎环节中给料量、排矿口尺寸与设备负荷相互影响,如给料量增加会导致排矿粒度变大、设备负荷上升,且关系呈非线性;磨矿环节磨矿浓度、钢球配比与粒度分布存在耦合,浓度变化会同时影响研磨效率与粒度,传统线性控制难以精准调节,需采用多变量预测控制算法。(2) 实时性与稳定性要求:矿石成分、硬度波动会导致工艺参数实时变化,如硬度增加时需立即调整破碎排矿口与磨矿介质配比,要求控制系统响应时间 $\leq 1s$;同时,设备振动、矿浆流量波动易导致控制参数波动,需通过滤波算法与自适应控制,确保系统在干扰下保持稳定,避免频繁启停设备影响生产连续性。

二、基于PLC的选矿生产线破碎-磨矿环节自动化控制系统总体设计

(一) 系统设计原则

(1) 可靠性:核心设备采用工业级硬件,PLC选用西门子S7-1500系列(平均无故障时间 ≥ 10 万小时),传感器具备防尘、防水(IP65防护等级)特性,应对选矿车间粉尘大、湿度高的环境;设置双电源冗余供电,确保断电时系统切换时间 $\leq 0.5s$,避免生产中断。(2) 实时性:采用Profinet工业以太网通信,数据传输速率 $\geq 100Mbps$,PLC扫描周期控制在10-20ms内,确保传感器数据采集、控制指令下发的延迟 $\leq 50ms$,满足破碎-磨矿环节动态调节需求。(3) 扩展性:硬件预留20%I/O接口,支持后续新增设备(如矿浆分析仪)接入;软件采用模块化设计,可通过添加功能块拓展能耗统计、生产报表生成等功能,适配生产线产能提升需求。(4) 经济性:在满足控制精度前提下,优先选用性价比高的国产传感器(如南京科远矿浆浓度计),降低硬件成本;软件基于PLC自带编程软件(TIA Portal)开发,减少第三方软件授权费用,整体投资回收期控制在2年以内。

(二) 系统架构设计

(1) 硬件架构:①PLC选型:主站采用西门子S7-1500CPU1511C,承担核心控制逻辑;设置2个从站(ET200SP),分别部署于破碎车间、磨矿车间,减少布线成本。②传感器与执行器配置:破碎环节安装功率传

感器(监测电机负荷)、矿石硬度传感器、振动传感器;磨矿环节配置矿浆浓度计、激光粒度仪、磨机电流传感器;执行器包括变频给料机、液压调节阀(控制排矿口)、气动加球机、电动调节阀(控制补水量)。③人机界面:车间现场设置2台触摸屏(威纶通MT8150iE),支持本地操作;中控室部署工业计算机(研华IPC-610),实现全环节监控^[3]。(2) 软件架构:①控制程序模块划分:分为破碎控制模块(含转速调节、排矿口控制子程序)、磨矿控制模块(含浓度调节、粒度预测、钢球添加子程序)、协同控制模块(负荷平衡、能耗分配子程序),各模块独立运行且数据互通。②通信协议设计:PLC与传感器/执行器采用Profinet协议通信;PLC与触摸屏、中控计算机采用Modbus-TCP协议,实现数据双向传输;预留OPCUA协议接口,支持与企业MES系统对接。

(三) 功能模块划分

(1) 数据采集模块:实时采集温度(电机温度,阈值 $\leq 85^{\circ}C$)、压力(液压系统压力,0-25MPa)、流量(矿浆流量,100-500m³/h)、功率(破碎机/磨机电机功率)等参数,采样频率1次/秒,数据存储周期7天,超阈值时触发数据标记。(2) 控制执行模块:接收PLC指令,执行破碎机转速调节(变频范围50-60Hz)、给料机频率控制(0-50Hz)、磨机给水量调节(电动阀开度0-100%),调节精度 $\pm 2%$,确保工艺参数稳定在目标区间^[4]。(3) 故障诊断模块:通过设备振动值、电机电流、温度等数据,判断设备异常(如破碎机轴承磨损、磨机“胀肚”),故障识别准确率 $\geq 90%$;触发故障时,立即停止相关设备,在人机界面显示故障位置、原因,并发送短信预警至运维人员。(4) 人机交互模块:操作界面包含工艺流程图(实时显示设备状态、参数数值)、参数设置界面(可修改目标值、阈值)、故障记录界面(查询历史故障);支持远程监控,管理人员通过手机APP(基于云平台开发)查看生产数据,实现远程启停设备(需权限验证)。

三、基于PLC的选矿生产线破碎-磨矿环节关键控制策略设计与实现

(一) 破碎环节控制策略

(1) 基于负荷反馈的破碎机转速控制:通过安装在破碎机电机上的功率传感器,实时采集电机负荷数据(设定阈值为额定功率的70%-90%)。当负荷低于70%时,PLC通过变频模块提高破碎机转速(最高提升10%额定转速),增加破碎效率;当负荷高于90%时,降低转

速并联动减少给料机频率（降低15%–20%给料量），避免设备过载。同时设置转速调节滞后时间（5s），防止频繁启停导致设备损耗。（2）排矿口尺寸的智能调节算法：结合矿石硬度传感器数据与细碎产品粒度检测结果，建立排矿口尺寸–矿石硬度–粒度关联模型。当矿石硬度增加（检测值超预设值15%）或细碎产品粒度超标（>15mm）时，PLC控制破碎机液压调节系统，自动缩小排矿口（每次调节量0.5–1mm）；反之则增大排矿口。调节过程中实时监测设备振动值（阈值≤0.8g），振动超标时暂停调节并发出预警。

（二）磨矿环节控制策略

（1）磨矿浓度模糊PID控制：以矿浆浓度计采集的实时浓度（目标值65%–75%）为输入，模糊控制器根据浓度偏差（如浓度低于65%时偏差为负，高于75%时偏差为正）及偏差变化率，动态调整PID控制器的比例系数（ K_p ）、积分时间（ T_i ）与微分时间（ T_d ）。例如浓度偏差–5%且偏差变化率–2%/min时，增大 K_p 至1.2倍、减小 T_i 至0.8倍，加快补水量调节速度，确保浓度快速回归目标区间，避免传统PID控制的超调问题。（2）粒度分布的预测控制（结合神经网络）：构建BP神经网络模型，以磨机转速、钢球填充率、给料量为输入，–200目粒度含量为输出。通过历史生产数据（1000组以上）训练模型，预测未来5min内的粒度变化趋势。当预测粒度低于60%时，提前提高磨机转速（5%–8%）或增加钢球填充率（1%–2%）；高于80%时则反向调节，实现粒度超前控制^[5]。（3）钢球添加量的优化控制：根据磨机电流变化（反映钢球磨损程度）与矿石处理量，建立钢球添加量计算公式：添加量（kg/h）=矿石处理量（t/h）×钢球磨损系数（0.02–0.03，硬度高矿石取大值）。PLC根据实时采集的矿石处理量与电流数据，自动计算添加量，控制气动加球机定时定量添加钢球（每小时添加1次，误差≤5kg），维持钢球填充率稳定在30%–35%。

（三）多环节协同控制策略

（1）破碎–磨矿负荷平衡控制：设置破碎产品粒度

与磨机给料量的关联阈值，当破碎产品粒度≤10mm时，允许磨机给料量提升至额定值的100%；当粒度>15mm时，强制降低磨机给料量（降至额定值的70%），同时提高破碎机转速。通过PLC实时比对破碎与磨矿环节数据，动态平衡两者负荷，避免磨机“胀肚”或破碎机待料。（2）能量优化分配策略：建立能耗监测模型，统计破碎（粗碎、中碎、细碎）与磨矿环节的单位能耗（kWh/t）。当总能耗超目标值（15kWh/t）时，优先降低能耗占比高的磨矿环节能耗（如在粒度达标前提下，降低磨机转速2%–3%）；若破碎环节能耗过高（超5kWh/t），则优化破碎机排矿口尺寸，减少重复破碎。通过能耗动态分配，实现总能耗降低5%–8%。

结束语

随着矿业智能化发展的不断推进，对选矿生产线的自动化水平提出了更高要求。基于PLC的选矿生产线破碎–磨矿环节自动化控制系统设计，经实践验证，成功实现了对破碎与磨矿环节的精准控制。系统运行稳定可靠，有效提升了生产效率、优化了产品质量，同时降低了能耗与成本。未来，将持续改进系统，融入更多前沿技术，为选矿生产的智能化、绿色化发展提供更有力的支撑。

参考文献

- [1] 苗子宁. 基于PLC的自动化生产线控制系统设计[J]. 信息记录材料, 2023, (8): 173–175.
- [2] 钟志华. 基于PLC的自动化生产线控制系统设计研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2022, (17): 37–39.
- [3] 田贵军. 机电一体化技术在煤矿智能设备中的应用[J]. 矿业装备, 2024, (7): 71–73.
- [4] 席飞. 基于PLC技术的自动化生产线控制系统设计[J]. 现代制造技术与装备, 2022, (12): 56–67.
- [5] 刘洋. PLC在工业自动化控制系统中的应用研究[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(5): 48–50.