

Research and Implementation of Intelligent Operation and Maintenance Control System for Ball Mill and Crusher Based on PLC

Yanbo Zhao

Luoyang Kawen Automation Equipment Co., Ltd., Luoyang, Henan, 471000, China

Abstract

This study focuses on the high-load operating conditions of ball mills and crushers in industrial production and develops an intelligent operation and maintenance system based on PLC control technology. The system enables real-time perception of equipment status, identification of operating conditions, and coordinated regulation across units. By continuously collecting key parameters and performing logical assessments, the system can issue early warnings at the onset of abnormal trends and automatically execute safety interlocks when necessary, thereby reducing downtime caused by equipment failures. The research establishes a systematic framework covering control architecture design, signal interface configuration, and data-processing procedures, promoting a shift in equipment maintenance from experience-based management to a data-driven mode.

Keywords

PLC; ball mill; crusher; intelligent operation and maintenance; control system

基于 PLC 的球磨机与破碎机智能运维控制系统研究与实现

赵彦波

洛阳卡文自动化设备有限公司, 中国·河南 洛阳 471000

摘 要

本研究围绕球磨机与破碎机在工业生产中的高负荷运行场景, 依托PLC控制技术构建智能运维系统, 实现设备运行状态的实时感知、工况识别与联动调控。通过对关键参数进行连续采集与逻辑判断, 系统能够在异常趋势初现时完成预警提示, 并在必要情况下自动执行安全联锁操作, 从而减少设备故障造成的停机损失。研究在控制架构设计、信号接口配置与数据处理流程方面进行了系统化构建, 使运维由经验依赖向数据驱动转变。

关键词

PLC; 球磨机; 破碎机; 智能运维; 控制系统

1 引言

球磨机与破碎机是矿物加工系统的核心设备, 其运行状态直接关系到整条选矿生产线的能耗水平、产能规模与设备寿命。然而, 受长期高强度运转、物料冲击载荷变化以及工况波动影响, 两类设备在生产中普遍存在故障频发、参数波动明显、维护周期难以精准判断等问题。传统依赖人工巡检的方式无法实现及时响应, 容易形成滞后性维护, 导致停机风险增加。随着自动化水平的不断提高, 基于 PLC 的控制方式因其稳定性强、反应速度快、易于集成多源信号而被广泛应用于复杂工况场景。将 PLC 控制技术与智能运维理念结合, 可在保障安全的前提下实现设备工况的实时监测、

精准调整与趋势研判, 从而显著提升系统运行的可靠性。

2 基于 PLC 的球磨机与破碎机智能运维需求分析

2.1 矿山破碎—磨矿工艺运行特性与运维痛点剖析

破碎—磨矿系统在连续、高负荷、强扰动的环境下运行, 物料性质在不同环节呈现显著变化, 使球磨机和破碎机的负载呈现周期性波动。设备在大量物料冲击下出现转矩变化、电流脉动、振动幅值偏移等情况, 使运行稳定性高度依赖对实时参数的监测。人工巡检对瞬态变化难以及时识别, 尤其在给料量不稳定、物料湿度偏高、衬板磨损加重时, 设备常出现局部过载、堵料或磨矿效率下降等现象。破碎段与磨矿段在控制逻辑上缺乏动态协同时, 会导致物料供给不均衡, 使能耗显著增加, 磨矿粒度波动加剧, 产能水平受影响。现场环境粉尘多、湿度大、机械冲击强, 使设备部件的疲劳损

【作者简介】赵彦波(1988—), 男, 本科, 工程师, 从事电气电力拖动与自动化控制研究。

伤更难预测,进一步加大运维压力。构建实时监测、动态调节和趋势分析能力的智能化平台,成为提升系统稳定性和减少停机风险的重要手段。

2.2 球磨机与破碎机关键设备故障模式与风险特征

球磨机常见的风险包括主轴承温度异常上升、润滑油系统油压不足、筒体振动幅值变动、钢球冲击分布不均导致的噪声突变、给料失衡引起的胀肚现象等。破碎机则易出现物料堵塞、偏心轴发热、动颚或转子的冲击载荷升高、电机电流长期处于高位、破碎腔磨损改变粒度分布等问题。这些故障具有隐蔽发生、快速恶化的特点,早期表现为轻微参数偏移,例如温升速率加快、电流纹波变化、振动频谱结构出现新的特征峰等,人工巡查难以进行准确判断。在粉尘、湿度和机械冲击较强的运行环境中,轴承、联轴器和传动部件的失效概率进一步提升,使风险链条更加复杂。通过 PLC 对关键参数进行高频采集和逻辑过滤,可对故障模式进行量化识别,实现对不同风险类型的快速响应,为构建稳定可靠的运维体系提供基础条件^[1]。

3 基于 PLC 的主站架构的控制逻辑设计与系统建模

3.1 球磨机与破碎机运行参数的信号采集与接口设计

信号采集体系依托 PLC 主站及其扩展模块构建,通过模拟量、数字量和通信量模块形成完整的数据通道。球磨机的主轴承温度、润滑油压、筒体振动、电机电流、给料量等信号通过标准工业信号格式输入模拟量端口,破碎机的腔体料位、动颚振动、偏心轴温度、电机负载等信号以相同方式接入。为提升数据稳定性,采集回路采用屏蔽电缆、隔离放大器和独立接地结构,降低粉尘、湿度与电磁干扰的影响。对高速变化的振动与电流信号采用高速采集模块,以捕捉瞬态冲击事件。在接口设计中,通过 modbus、profibus 或 ethernet/ip 实现 PLC 与上位机的通信,使破碎段与磨矿段能够共享参数,实现设备间数据互联。采集体系为逻辑判断、参数分析和连锁控制提供基础支撑。

3.2 PLC 控制逻辑的顺序流程设计与工况建模

控制逻辑采用顺序功能图、梯形图和结构化文本组合构建,使破碎—磨矿系统能够依据工况自动执行启动、运行、负荷调节和停机保护。流程从破碎机的预启动检测开始,PLC 按照润滑压力、冷却水流量、电机状态与安全条件进行确认,条件满足后进入启动延时阶段。破碎机稳定运行后,PLC 发出球磨机启动指令,并在速度、电流和油压达到设定范围后切换至正常磨矿模式。在工况建模方面,以电机负载趋势、振动特征变化、物料料位波动和电流频谱构建运行模型,使系统能够识别物料是否供给不足、冲击是否异常或磨矿效率是否下降。逻辑模块依据模型输出自动调整给料速度、阀门开度和运行模式,实现破碎段与磨矿段的闭环联动,使系统能够在动态负荷下保持稳定运行。

3.3 安全连锁机制与保护策略的控制结构

安全连锁体系以 PLC 的实时运算能力为基础,通过多级触发结构确保破碎机与球磨机在异常条件下能够及时进入保护状态。主轴承温度、电机电流、振动幅值、润滑油压、料位等关键参数作为连锁判定依据,任何单项指标超过阈值时,PLC 立即执行减载、紧急停机或禁止启动指令,避免故障扩大。保护策略采用提前识别模式,通过温升变化速率、振动特征位移、电流波动幅度等趋势参数进行早期触发,使系统在异常发展前完成控制响应。控制结构包括硬件级急停回路、PLC 级逻辑连锁、上位机报警三级体系,使保护动作在不同层级具有可靠性和冗余能力。润滑、冷却和给料系统均纳入连锁链路,在任何关键参数异常时自动进入安全模式,通过断电保持与抗干扰机制确保在突发情况或外界干扰下仍能维持必要的保护功能。

4 智能运维平台的关键技术集成与系统实现路径

4.1 设备状态监测、阈值判定与工况识别策略

设备状态监测模块以连续采集的温度、压力、电流、振动、速度和料位等关键参数为基础,通过多源数据融合构建特征序列,并在 PLC 中完成实时计算。阈值判定策略采用静态阈值与动态阈值并行方式,通过设定基础报警线并结合参数的变化速率、波动幅度和频谱特征建立动态判断基准,使系统能够在工况早期偏离时作出响应。工况识别依托特征提取和逻辑判断机制,以物料量波动、电机负载曲线形态、振动频率结构和油压变化趋势构建判断模型,用于区分正常磨矿、轻载、重载、冲击波动、堵料等典型状态。识别模型通过 PLC 的高速运算单元实时执行逻辑,确保每秒内能够完成多轮计算。模块化识别方式支撑破碎段与磨矿段在不同负荷下实现联动调节,使系统在复杂工况中保持稳定运行能力。

4.2 智能运维数据处理模块的构成与控制界面设计

数据处理模块由采集层、分析层、呈现层构成。采集层将来自振动探头、油温传感器、电流互感器、料位计和压力传感器的信号持续输入 PLC 主站。分析层通过参数趋势建模、波动窗口计算、负荷曲线匹配和状态特征比对形成运行诊断结果,并以毫秒级周期刷新,满足高动态工况需求。数据处理结果经通信模块发送至上位机,实现界面可视化呈现。控制界面采用工况总览、关键参数曲线、报警清单、运行记录和执行指令五类功能窗口,界面布局以流程图形式呈现破碎机、球磨机、给料系统和润滑系统的实时状态,使操作人员能够在单页内掌握完整运行链路。界面中设置参数趋势折线、振动频谱图、负荷分析曲线等展示模块,通过颜色变化和动态标识帮助判断运行安全性,同时支持手动介入与自动调整的双重操作方式,使系统具备良好的人机交互能力。

4.3 远程监控、预警联动与自动化调度实现

远程监控依托工业以太网和安全通信协议实现生产现场与管理中心的实时互联,将关键运行参数、趋势结果、报警信息和控制指令在多终端间同步。预警联动机制以参数阈值、变化速率和频谱特征作为触发条件,通过 PLC 完成早期预警、中级报警和强制联锁的多级处理,使轻微异常由系统自动调节,重度异常触发停机保护。预警信息通过蜂鸣提示、界面弹窗和短信推送等方式传递,确保运维人员及时处理。自动化调度模块依据破碎段和磨矿段的实时负荷,采用动态给料策略、转速调节策略和阀门控制策略,使系统在不同产能需求下自行匹配运行模式。例如,在负荷超过安全区间时自动执行减载,在空载或轻载时逐步提高给料量,使产能保持在目标区间。自动调度模块还支持与能源管理系统联动,实现电能利用的优化配置,为整体生产链提升效率提供条件^[2]。

5 PLC 系统在球磨机与破碎机智能运维中的应用成效评估

5.1 运行稳定性、能耗水平与产能提升效果对比

应用系统后,球磨机主机电流波动幅度从原先的 15% 降低至 6%,振动峰值降低 0.8 毫米每秒,主轴承温度波动范围降低 3 度,稳定性明显增强。在能耗方面,球磨机单位磨矿能耗从每吨电耗 19 千瓦时下降至 16 千瓦时,破碎机单位能耗从每吨电耗 5.4 千瓦时下降至 4.3 千瓦时,整体能耗下降幅度达到 17%。产能提升效果明显,磨矿处理量从每小时 62 吨提高至 71 吨,破碎能力从每小时 85 吨提升至 94 吨,总体产能增长约 14%。运行后的变负载时长减少 26%,冲击工况出现频率下降 42%,系统在高负荷条件下的稳定性得到充分验证,通过参数改善形成更高效率和更低能耗的运行状态。

5.2 设备故障率、维护周期与停机时长的变化分析

系统投入使用后,球磨机年度故障次数从 16 次下降到 7 次,破碎机故障次数从 21 次降低到 9 次,总故障率下降约 58%。润滑系统报警事件减少 11 次,轴承温升异常减少 8 次,堵料事件从每月 3 次减少到每月 1 次。维护周期明显延长,球磨机大修周期从原先的 9 个月延长到 13 个月,破碎机关键部件更换周期从 6 个月延长到 10 个月。停机时长大幅下降,年度计划外停机时间从总计 129 小时减少到

54 小时,缩短比例达到 58%。设备可开机率从 82% 提高到 94%,整体可利用系数显著提升。维修工时减少约 170 小时,备件消耗量减少约 22%,系统在减少异常、压缩维护成本和延长设备寿命方面展现出明显成效,为生产连续性提供强力支撑^[3]。

5.3 系统综合性能、可靠性与扩展性的验证

系统运行半年后,各项综合指标保持稳定。逻辑指令响应时间稳定在 30 毫秒以内,通信延迟维持在 10 毫秒左右,数据完整率保持在 99% 以上。联锁动作可靠度经过 320 次异常测试均未出现误动作或漏动作,保护成功率达到 100%。系统在环境温度 40 度、湿度 85% 和粉尘浓度较高的条件下连续运行 90 天未发生通信中断或参数丢失,体现出较高抗干扰能力。扩展性方面,通过新增 4 路振动信号和 2 路温度信号后,PLC 资源占用率由 62% 提升至 71%,仍具备预留空间,说明系统可支持后续功能扩展。在多工序联动测试中,破碎段与磨矿段的负荷耦合度提升 22%,运行匹配度提高 18%,系统可在不同产能需求下保持高效协同,系统在稳定性、保护性、可管理性和扩展性方面达到预期目标^[4]。

6 结语

基于 PLC 的球磨机与破碎机智能运维控制系统的研究成果表明,将实时监测、工况识别、逻辑调控与安全联锁深度融合,可显著改善破碎—磨矿生产链的运行质量与管理水平。在连续高负荷的工业环境中,系统以稳定的数据采集能力、快速的逻辑执行能力和可靠的保护机制,实现了设备状态的精准感知与动态调节,为减少故障、降低能耗和提升产能提供了有效支撑。通过智能化运维方式,设备运行由经验式管理向数据驱动管理转变,生产系统的可控性、可预测性和安全性得到全面强化。

参考文献

- [1] 张明明.基于PLC技术的选矿厂溢流型球磨分级自动化协调控制系统[J].自动化应用,2025,66(03):56-58+62.
- [2] 吴鹏.球磨机模块化包绕直驱永磁电机容错性研究[D].导师:厉伟.沈阳工业大学,2023.
- [3] 刘德杰,周秀梅.球磨机全自动化运行设计研究[J].现代制造技术与装备,2023,59(02):205-209.
- [4] 冯聪聪,姜晓彤,黄海河,李强.球磨机控制系统的设计与研究[J].现代制造技术与装备,2022,58(08):18-25+30.