

提升储备煤通廊控制系统可靠性的冗余设计与应用

张北灵

山西焦化集团有限公司 山西 临汾 041600

摘要: 随着煤炭产业规模不断扩大, 储备煤通廊控制系统的高效稳定运行至关重要。为提升其可靠性, 本文开展冗余设计研究与应用。从硬件层面构建双电源、双控制器冗余架构, 软件上采用多模块热备份策略, 同时强化通信冗余保障。经实践验证, 该冗余设计有效增强了系统抗干扰与容错能力, 大幅降低故障发生频率, 确保储备煤通廊控制稳定可靠。

关键词: 储备煤通廊控制系统; 可靠性; 冗余设计; 应用

引言: 在煤炭产业智能化升级的浪潮中, 储备煤通廊控制系统肩负着煤炭精准存储与高效输送的重任。但当前系统在复杂工况下, 常因单点故障引发连锁反应, 致使运行中断, 影响生产连续性。冗余设计凭借其增加备用、强化容错的优势, 成为提升系统可靠性的关键技术。基于此, 本文深入探讨冗余设计在储备煤通廊控制系统中的具体应用, 以保障系统稳定运行。

1 储备煤通廊控制系统需求分析

1.1 系统功能与运行环境

(1) 通廊核心功能: 煤炭输送需实现连续稳定传输, 输送速率适配前端采煤量与后端存储需求, 支持0-1500吨/小时无极调速; 分拣功能需精准识别煤炭粒度(如块煤、末煤), 通过智能分拣装置完成分类输送, 分拣准确率 $\geq 95\%$; 存储功能需实时监测煤仓料位, 结合进出煤量自动调控输送启停, 避免溢仓或空仓; 监控功能需覆盖通廊全链路, 实时采集设备运行参数(转速、温度、电流)、环境数据(粉尘浓度、温湿度)及煤炭流量, 画面刷新频率 ≥ 25 帧/秒, 异常情况自动弹窗报警。(2) 环境特点: 高温环境最高温度可达65℃, 且昼夜温差超30℃; 高湿环境相对湿度常维持在85%-95%, 雨季易出现凝露; 粉尘浓度最高达80mg/m³, 易附着设备表面影响散热与传感精度; 机械振动频率主要集中在5-20Hz, 振幅 ≤ 0.5 mm, 长期作用易导致部件松动^[1]。

1.2 可靠性需求指标

(1) 故障率要求: 除MTBF ≥ 5000 小时外, 关键设备(如输送带电机、分拣控制器)MTBF需 ≥ 8000 小时, 且单次故障维修时间 ≤ 2 小时。(2) 容错能力: 不仅单点故障不影响整体运行, 还需支持关键设备(如传感器、执行器)冗余切换, 切换时间 ≤ 0.5 秒, 确保输送流程无中断。(3) 恢复时间: 除系统自恢复时间 ≤ 10 秒外, 数据恢复需实现故障前1小时内数据无丢失, 且恢

复后系统参数与故障前一致性偏差 $\leq 1\%$ 。

1.3 现有系统可靠性瓶颈

(1) 硬件层面: 传感器(如料位传感器、温度传感器)平均寿命仅2000-3000小时, 受粉尘覆盖影响, 每月需校准2-3次; 执行器(如电动阀门、分选气缸)密封件易受高温高湿老化, 每季度更换率达30%。(2) 软件层面: 通信协议采用传统RS485, 抗干扰能力弱, 传输误码率达0.3%, 易导致数据丢包; 控制算法对负载波动适应性差, 当煤炭流量波动超20%时, 调节滞后时间 ≥ 5 秒, 易引发输送带过载。(3) 环境适应性: 电子元件(如PLC模块、变频器)在电磁干扰(如采煤机电磁辐射)环境下, 误动作率每月达2-3次; 温度漂移导致传感器测量误差随温度每升高10℃增加2%, 影响控制精度。

2 提升储备煤通廊控制系统可靠性的冗余设计技术方案

2.1 冗余设计原则

(1) 硬件冗余: 除关键部件双备份外, PLC选用同一品牌同型号产品, 确保硬件兼容性, 电源模块采用隔离式双备份设计, 当主电源故障时, 备用电源切换时间 ≤ 10 ms, 且双电源均具备过压、过流保护功能; 传感器与执行器针对高粉尘、高振动区域, 额外增设1套备用设备, 备用设备与主设备安装间距 ≥ 1 m, 避免同时受局部环境影响。(2) 软件冗余: 控制算法采用主备双线程并行计算, 主线程执行实时控制, 备线程同步运算并对比结果, 偏差超0.5%时触发自诊断; 开发故障自诊断模块, 实时监测软件运行状态, 涵盖内存溢出、程序死循环等12类常见故障, 诊断准确率 $\geq 98\%$, 故障确诊后自动切换至备用算法, 切换过程不中断控制输出。(3) 信息冗余: 除CAN总线+以太网双链路外, CAN总线采用差分信号传输, 抗干扰能力提升30%, 以太网选用工业级交换机, 支持链路聚合; 数据传输采用CRC32校验+奇偶校

验双重机制, 校验失败时自动触发重传, 重传次数 ≤ 3 次, 确保数据完整性^[2]。

2.2 关键模块冗余设计

2.2.1 控制层冗余

(1) 主从式PLC冗余架构中, 热备模式下主备PLC实时同步数据, 同步周期 $\leq 100\text{ms}$, 主PLC故障时备用PLC无扰切换, 切换时间 $< 50\text{ms}$, 适用于连续运行的输送环节; 冷备模式下备用PLC处于待机状态, 需人工触发切换, 切换时间 $\leq 30\text{s}$, 成本较热备低40%, 适用于非核心控制环节, 可根据通廊关键程度选择性部署。(2) 分布式控制单元(DCU)按通廊分段配置, 每段设置2台DCU, 分别接入主备PLC, DCU之间通过光纤通信, 传输速率 $\geq 100\text{Mbps}$, 当某台DCU故障时, 另一台DCU自动接管该段控制, 确保分段控制不中断。

2.2.2 通信层冗余

(1) 无线选用工业级4G/5G模块, 支持双SIM卡切换, 有线采用光纤+双绞线双链路, 光纤传输距离 $\leq 2\text{km}$, 双绞线传输距离 $\leq 100\text{m}$, 双通道实时并行传输数据, 当某一通道故障时, 另一通道自动升为主通道, 切换时间 $\leq 50\text{ms}$ 。(2) 数据帧采用冗余编码, 在原有数据帧基础上增加16位冗余字段, 错误重传机制设置重传优先级, 控制指令类数据重传优先级高于状态监测数据, 重传间隔 $\leq 50\text{ms}$, 确保关键控制指令优先送达^[3]。

2.2.3 执行层冗余

(1) 电机驱动器采用双电源独立供电, 两路电源分别来自不同变压器, 配备电流均衡控制器, 实时监测两路电流偏差, 偏差超5%时自动调节, 确保双电源负载均衡; 驱动器内部设置过温、过流保护模块, 保护响应时间 $\leq 1\text{ms}$, 避免电机损坏。(2) 阀门采用电动+气动双执行机构设计, 电动执行机构为主用, 气动执行机构为备用, 两者通过联动控制模块连接, 当电动执行机构故障时, 联动模块100ms内启动气动执行机构; 输送带设置双驱动电机, 分别由独立驱动器控制, 单电机故障时, 另一电机自动提升功率至120%, 维持输送带70%以上输送能力。

2.3 冗余系统同步与切换策略

(1) 心跳检测机制采用双向检测, 主备模块每10ms发送1次心跳信号, 包含模块运行状态、数据校验值等信息, 连续3次未收到心跳信号或校验失败, 判定为模块故障; 同时监测模块关键参数(如PLC运行温度、通信链路误码率), 参数超阈值时提前预警, 预警准确率 $\geq 95\%$ 。(2) 无扰切换技术通过预设状态同步机制, 主备模块实时同步控制参数、输出状态, 故障时直接调用同

步数据, 避免控制偏差; 切换过程采用“先通后断”策略, 先激活备用系统输出, 再切断故障系统输出, 确保切换延迟输送速率波动 $\leq 5\%$ 。(3) 仲裁逻辑设计采用主备优先级固定+故障降级机制, 正常情况下主模块优先主控, 备用模块仅监测; 当主模块故障切换至备用模块后, 若主模块修复, 需人工确认后备用模块降级为备机, 避免自动切换引发冲突; 同时设置仲裁器, 当多模块同时申请主控时, 根据模块健康度(如运行时长、故障次数)排序, 健康度高的模块优先获得主控权^[4]。

3 提升储备煤通廊控制系统可靠性的冗余控制系统实现与优化

3.1 硬件选型与集成

(1) 高可靠性工业控制器选用西门子S7-1500R系列, 该控制器支持热备冗余, 切换时间 $\leq 100\text{ms}$, 具备抗振动(10-150Hz, 50m/s^2)、抗高温(-25°C - 70°C)特性, 适配通廊恶劣环境; 同时集成PROFINET接口, 可无缝对接冗余通信链路, 满足控制层数据实时传输需求。

(2) 抗干扰传感器优先选用本安型温度/压力传感器, 如倍加福PT100本安型温度传感器, 测量范围 -50°C - 200°C , 精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 防护等级IP67, 能抵御粉尘侵蚀; 压力传感器选用罗斯蒙特3051S本安型产品, 具备抗电磁干扰能力, 在50Hz电磁环境下测量误差 $\leq 0.05\%$, 确保数据采集准确性。(3) 冗余电源模块采用“UPS+双路供电”架构, UPS选用山特C1K工业级产品, 后备时间 ≥ 15 分钟, 保障断电时系统持续运行; 双路供电分别接入厂区不同变电站, 通过电源切换模块(如施耐德ATS)实现自动切换, 切换时间 $\leq 5\text{ms}$, 避免单路供电故障导致系统停机。

3.2 软件算法优化

(1) 基于模糊控制的故障预测算法, 选取设备运行温度、振动频率、电流波动3个关键参数作为输入变量, 建立模糊规则库(包含50条核心规则), 通过模糊推理预测故障风险, 预测准确率 $\geq 92\%$, 提前1-2小时发出预警, 为维护争取时间。(2) 动态权重分配的冗余资源调度策略, 根据设备负载(如输送带煤量、电机功率)实时调整冗余资源权重, 负载超80%时, 提升执行层冗余资源优先级, 确保关键设备稳定运行; 负载低于30%时, 降低冗余资源占用率, 减少能耗, 能耗降低幅度可达15%。(3) 人机交互界面(HMI)采用WinCC组态软件设计冗余状态可视化界面, 以动态图标展示主备PLC、通信链路、执行机构运行状态, 红色表示故障、绿色表示正常、黄色表示预警; 同时增设冗余切换日志查询功能, 记录切换时间、原因、结果, 便于故障追溯^[5]。

3.3 可靠性仿真与测试

(1) 借助Unity3D搭建通廊数字孪生模型,还原长度500m、含3个煤仓的实际场景,通过导入粉尘浓度(0-100mg/m³)、振动频率(5-20Hz)等环境参数,模拟极端工况,仿真时长≥1000小时,验证冗余系统在恶劣环境下的运行稳定性。(2) 加速寿命测试(ALT)采用高温(80℃)、高湿(95%RH)、高振动(20Hz, 100m/s²)综合应力,对PLC、传感器等关键硬件进行1000小时测试,通过故障数据推算正常工况下寿命,验证硬件冗余模块寿命是否满足MTBF≥8000小时要求。(3) 故障注入测试(FIT)通过专用测试工具向系统注入通信中断、传感器失效、执行器故障等15类常见故障,每类故障注入次数≥50次,统计系统容错率与恢复时间,确保软件容错率≥98%,故障恢复时间≤10秒,符合可靠性指标。

4 提升储备煤通廊控制系统可靠性的冗余控制应用案例与效果分析

4.1 工程背景

(1) 某大型煤企为解决旗下主力矿区3条总长1200m的储备煤通廊控制系统不稳定问题,启动升级项目,项目涵盖控制层、通信层、执行层全链路冗余改造,选用西门子S7-1500RPLC、倍加福本安型传感器等设备,旨在提升系统抗恶劣环境能力与连续运行能力。(2) 原系统受粉尘、振动影响,月均故障3次,单次故障修复需4小时,月累计停机12小时,导致煤炭输送量减少约1.2万吨,直接经济损失超16万元,且故障时易引发煤仓溢仓或空仓,影响矿区整体储运节奏。

4.2 冗余系统部署方案

(1) 采用“试点→全线推广”分阶段实施计划,首月选取1条通廊中段500m区域作为试点,部署主从PLC热备、双链路通信等冗余方案,试运行1个月无故障后,第2-3月逐步向其余通廊及未改造区域推广,确保改造期间不中断煤炭输送。(2) 现场安装与调试关键点聚焦电磁兼容性处理,将PLC柜接地电阻控制在4Ω以内,传感器

线缆采用屏蔽层接地设计,调试时模拟50Hz电磁干扰环境,验证系统数据传输误码率≤0.01%,同时校准双执行机构同步精度,确保切换偏差≤0.5mm。

4.3 效果评估

(1) 可靠性指标显著提升,改造后系统月均故障降至0.6次,故障率下降80%,MTBF从原3000小时提升至8000小时,故障自恢复时间≤8秒,满足冗余设计预期。(2) 经济性分析显示,维护成本降低45%,月均维护费用从8万元降至4.4万元,且年减少停机时间110小时,对应多输送煤炭11万吨,年节约停机损失约200万元。(3) 社会效益突出,系统稳定运行减少煤炭储运中断风险,保障了冬季供暖季煤炭稳定供应,为区域能源供应链安全提供有力支撑,该方案已成为同类型煤企通廊改造的参考范例。

结束语

通过对提升储备煤通廊控制系统可靠性的冗余设计展开深入研究与实践应用,成功构建了涵盖硬件、软件及通信等多层面的冗余体系。实际应用效果表明,该设计显著增强了系统应对故障的能力,大幅降低了因设备故障导致的生产中断风险,有效保障了煤炭输送的稳定与高效。未来,将持续优化冗余设计,结合新技术,进一步提升系统可靠性,为煤炭产业高质量发展助力。

参考文献

- [1]黄耀华.基于智能化的电气自动化控制系统的设计和实现[J].现代工业经济和信息化,2023,13(06):341-343.
- [2]李晓杨.煤矿电气自动化控制系统的设计与优化[J].自动化应用,2023,64(09):45-47.
- [3]吴涛.矿山输配电线路的运行维护及管理措施探究[J].中国金属通报,2022(11):201-203.
- [4]张一.电气自动化控制系统的可靠性分析[J].广西农业机械化,2020,(01):32-34.
- [5]郭晓阳.电气自动化控制系统的可靠性探讨[J].内燃机与配件,2020,(05):188-189.