

机械电气安全控制系统设计研究

陈增祯 李玉发

招金矿业股份有限公司 山东 烟台 265400

摘要: 为提升工业场景中机械电气设备运行的安全性与可靠性,本文围绕机械电气安全控制系统的设计、验证及优化展开研究。先明确系统设计原则与目标,构建“感知-控制-执行-监控”四层架构,细化硬件、软件及安全防护模块设计要点;通过设定多维度性能指标,采用仿真测试与理论分析结合的方式开展性能验证及可靠性评估,针对现存问题提出针对性优化策略并验证效果。研究表明,所设计的系统可实现故障精准检测与快速响应,优化后在响应速度、抗干扰能力及运行稳定性上显著提升,为机械电气安全控制系统的工程设计提供理论支撑与技术参考。

关键词: 机械电气; 安全控制系统; 架构设计; 优化策略

引言:随着工业自动化水平的提升,机械电气设备在生产场景中的应用愈发广泛,设备联动复杂度同步增加,电气故障、机械误动作引发的安全风险备受关注。安全控制系统作为规避风险、保障设备稳定运行的核心载体,其设计的科学性直接影响生产安全与运行效率。当前,工业场景对系统的响应速度、抗干扰能力及适配性提出了更高要求,传统设计方案在多模块协同、故障容错等方面存在局限。本文基于故障安全理论与协同控制理论,构建标准化设计框架,通过性能验证与优化迭代,完善系统设计方案,为提升机械电气安全控制水平提供支撑。

1 机械电气安全控制系统的设计原则与目标

1.1 核心设计原则

安全性优先是设计核心准则,需建立故障导向安全机制,确保系统在组件失效、信号异常、回路故障等工况下,能自动快速切换至停机、断电、锁定等安全状态,从源头规避风险,优先保障人员人身安全与设备核心部件完好。可靠性原则要求系统适配高温、振动、电磁干扰、电压波动等复杂工业工况,通过选用耐温抗振、抗干扰能力强的元器件优化部件选型,搭配合理拓扑结构设计,大幅降低自身故障概率,提升长期连续运行的稳定性。经济性可扩展性原则需精准平衡设计成本与实用价值,在满足当前生产运行需求的基础上,科学预留标准化接口与功能扩展空间,无需大幅改造即可适配后续设备升级、产能提升与场景拓展。易操作性原则强调控制逻辑简化,设计清晰的运行状态标识与精准故障反馈机制,搭配简洁操作流程,便于运维人员快速定位问题、开展日常维护与检修。模块化原则需拆分系统核心功能模块,实现各模块独立设计、调试、校验与替换,既提升整体设计效率,又增强故障隔离能力,降低维护成本^[1]。

1.2 设计目标

核心目标聚焦故障精准防控,实现对过流、过压、机械限位异常、信号丢失、元件老化等各类隐患的实时动态检测,精准识别并定位隐患位置,快速触发针对性防护动作,立即执行切断电源、制动停机、回路锁定等操作,从源头杜绝风险扩散至设备核心部件与作业区域,最大限度减少人身伤害和设备损耗。性能目标需明确量化指标,故障响应时间严格控制在毫秒级,确保突发故障时可快速阻断危险蔓延;故障检测准确率不低于99%,规避漏检、误检导致的安全漏洞;平均无故障工作时间需满足工业连续运行需求,同时具备较强的电磁抗干扰能力,适配复杂工业环境中的电压波动、电磁辐射等干扰因素。适配目标追求通用化设计,兼容不同功率等级、控制逻辑的机械电气设备,通过模块化配置灵活调整,无需整体改造系统,替换功能模块即可适配机床、起重设备等多场景,提升复用性。功能目标涵盖基础控制、故障报警、状态监控等核心功能,支持多模块协同,实时反馈运行参数,同步完成故障记录与追溯,构建“检测-响应-监控-恢复”闭环控制体系,兼顾安全防护与运行管控需求。

2 机械电气安全控制系统的核心架构设计

2.1 系统整体架构规划

采用分层架构设计,构建感知层、控制层、执行层与监控层的四级协同体系,实现信号采集、逻辑处理、动作执行与状态反馈的闭环流转。架构设计遵循模块化与信号闭环传输原则,各层级通过标准化接口通信,具备独立运行与故障隔离能力,避免单一模块故障影响整体系统。感知层负责工况数据采集,为后续处理提供基础支撑;控制层作为核心枢纽,执行逻辑运算、故障判断与指令下发;执行层响应控制指令,完成启停、制动、

防护等动作；监控层实现状态可视化、参数配置与故障预警，形成全流程管控。该架构可实现各环节协同联动，提升系统运行效率与故障处理能力。

2.2 硬件系统设计

感知层选用高精度安全传感器，涵盖急停按钮、过载检测器、位置传感器及绝缘监测模块，确保信号采集的准确性与实时性，传感器需具备抗干扰能力，适配复杂工况。控制层采用安全PLC与冗余控制器组成核心控制单元，通过双机热备设计提升可靠性，避免单点故障导致系统失效，同时配置安全继电器，强化指令执行的安全性。执行层选用高性能接触器、断路器与制动装置，设计安全联动电路，确保控制指令快速响应，制动装置需具备紧急停机自锁功能，防止意外复位。辅助硬件包括绝缘防护组件、接地系统与抗干扰电路，优化线缆选型与布线设计，降低电磁干扰与漏电风险，提升系统硬件稳定性^[2]。

2.3 软件系统设计

软件整体流程采用结构化设计，涵盖初始化、信号采集、逻辑判断、指令执行、故障报警五大环节，初始化阶段完成硬件自检与参数配置，确保系统启动状态正常。核心安全逻辑设计采用故障树分析方法，构建联锁控制模型，明确各工况下的控制规则，实现机械动作与电气信号的协同联锁，优化紧急停机逻辑，缩短响应延迟。软件容错设计通过数据校验、逻辑冗余与故障自恢复机制，对采集数据进行有效性验证，避免误判，同时预留备用逻辑通道，确保单一逻辑失效时系统仍可维持基础安全功能。监控与报警模块支持状态实时显示，生成标准化故障代码，联动声光报警装置，同步记录故障信息，为运维提供数据支撑。

2.4 安全防护模块专项设计

电击防护采用多重防护机制，根据工况选用适配绝缘等级的组件，设计漏电检测电路，实时监测回路绝缘状态，漏电时快速切断电源，结合等电位联结技术，降低电击风险。机械联动防护通过门控联锁、限位保护等机制，实现机械动作与电气控制的精准协同，当防护门未闭合、部件运行超出安全范围时，触发停机指令，禁止危险动作启动。过载与短路防护配置智能过流、过压检测模块，设定分级防护阈值，轻微异常时发出预警，严重异常时立即切断回路，避免部件损毁与火灾风险。电磁防护通过屏蔽设计、滤波电路优化，降低外部电磁骚扰对系统的影响，同时控制内部信号发射，避免干扰周边设备运行^[3]。

3 系统性能验证与可靠性分析

3.1 性能验证指标与方案

核心验证指标包括动态响应性能、故障检测能力、抗干扰能力与可靠性指标，动态响应性能以故障触发至执行防护动作的时间为核心；故障检测能力通过模拟各类典型故障，统计检测准确率与漏检率；抗干扰能力测试涵盖电磁、电压波动等工况；可靠性指标以平均无故障工作时间与故障修复时间为核心。验证方案采用仿真测试与台架试验相结合的方式，仿真测试基于专业仿真工具构建系统模型，模拟正常工况与各类故障工况，设定多组测试参数；台架试验搭建硬件测试平台，还原工业实际工况，进行长期连续运行测试，记录各项性能数据，确保验证结果贴合实际应用场景。

3.2 仿真测试与结果分析

仿真测试选用工业控制专用仿真工具，构建系统整体模型，涵盖硬件拓扑与软件逻辑，设定过流、限位异常、信号中断等10类典型故障场景，每组场景重复测试50次。测试结果显示，系统平均故障响应时间为32毫秒，满足毫秒级响应要求；故障检测准确率为99.2%，仅在弱信号干扰下出现2次漏检，漏检率低于0.5%；在额定电磁干扰与电压波动范围内，系统运行稳定，无指令误执行现象。对比设计目标，响应速度与检测准确率达标，仅在弱干扰场景下存在优化空间，测试结果为后续系统优化提供了明确方向，同时验证了架构设计与核心逻辑的合理性。

3.3 可靠性与安全性分析

可靠性分析采用统计分析法与故障模式影响分析，通过台架试验获取连续运行数据，验证系统可满足工业长期运行需求。识别出信号采集模块、接线端子为薄弱环节，此类部件故障占比较高，主要受电磁干扰与接触不良影响。安全性分析从风险发生概率与后果严重程度出发，构建风险评估矩阵，对电击、机械伤害等潜在风险开展分级评估。结果表明，经专项防护设计优化后，高风险项全部消除，中风险项数量显著下降且可通过定期维护实现有效管控，系统整体安全水平符合工业应用规范，防护机制的有效性得到充分验证^[4]。

4 机械电气安全控制系统的优化策略

4.1 现存问题梳理

机械电气安全控制系统现存问题集中于硬件、软件及协同运行三大维度，各维度问题相互关联，易放大安全风险。（1）硬件层面，部分核心元件因长期服役存在明显老化损耗，在高负荷、高频启停工况下，接触器、继电器等关键部件触点磨损加剧、接触电阻增大，绝缘层出现龟裂、老化现象，不仅易引发接触不良、短路等

故障,还可能导致元件误动作,触发非预期停机,且部分元件选型缺乏针对性,与实际运行的高温、潮湿、强振动、电磁干扰等复杂工况适配度不足,抗干扰能力薄弱,在极端环境下易出现信号漂移、性能衰减,大幅降低系统运行稳定性。(2)软件层面,控制逻辑存在冗余代码与设计漏洞,部分程序运行效率低下,导致紧急停机、故障联锁等关键安全指令响应滞后,无法及时阻断危险事态发展;且系统缺乏自适应调整能力,难以根据设备运行负荷、工况变化动态优化控制参数,适配性较差。(3)协同运行层面,各子系统数据交互协议不统一,存在数据壁垒,监测模块与控制模块联动性不足,故障信号传递延迟、失真,易出现“监测失效-控制失准”的连锁问题;同时系统自我诊断功能薄弱,仅能识别显性故障,难以精准定位线路接触不良、元件隐性损耗等潜在问题,依赖人工排查,不仅效率低下,还增加了维护成本与安全隐患。

4.2 针对性优化方案

针对现存问题,从硬件升级、软件优化、协同联动三个维度制定优化方案。(1)硬件方面,优先替换老化损耗元件,选用耐磨损、抗干扰强的工业级核心部件,结合工况需求优化元件选型,对关键部位加装绝缘防护、散热降温装置,提升硬件抗恶劣环境能力;同时采用模块化硬件设计,简化接线结构,便于快速检修更换,降低故障扩散风险。(2)软件方面,重构控制逻辑架构,剔除冗余程序代码,强化紧急停机、故障联锁等核心指令的优先级,缩短响应延迟;引入自适应算法,让系统可根据设备运行参数动态调整控制策略,提升运行适配性;增加程序容错机制,避免单一逻辑错误导致系统瘫痪,并定期进行软件漏洞排查与升级。(3)协同联动方面,搭建统一数据交互平台,打通各子系统数据壁垒,实现监测、控制、诊断模块的实时数据共享;优化联动逻辑,确保监测信号触发后,控制模块可快速执行对应操作,形成“监测-判断-控制”闭环;增设智能诊断模块,通过数据分析精准定位隐性故障,提前发出预警。

4.3 优化后性能验证

通过多维度测试验证优化后系统的综合性能,确保

达到预期效果。(1)安全可靠验证方面,模拟短路、元件失效等极端故障场景,测试系统紧急停机、故障隔离等功能的执行效率,确认核心安全指令响应时间较优化前缩短30%以上,且能有效避免故障扩散;连续72小时满负荷运行测试,验证硬件稳定性,确保元件无异常损耗、绝缘性能达标。(2)运行稳定性验证方面,监测设备在不同工况下的运行参数,确认控制精度误差控制在允许范围,软件无卡顿、逻辑错乱等问题,子系统数据交互流畅,无延迟、丢失现象。(3)故障诊断验证方面,人为设置隐性故障,测试智能诊断模块的定位准确率,要求准确率不低于95%,预警信号及时且精准,为维护工作提供有效支撑。通过上述验证,全面评估系统优化效果,针对未达标的指标进行二次调整,确保优化后的安全控制系统具备更高的可靠性、稳定性和智能化水平^[5]。

结束语:本文构建了机械电气安全控制系统的设计、验证与优化框架,明确了核心设计原则与目标,设计四层协同架构,细化硬件、软件及安全防护模块要点,通过性能验证识别薄弱环节,提出针对性优化策略。研究表明,优化后的系统在响应速度、故障检测能力、可靠性等方面表现优异,可有效满足工业场景安全控制需求。本文研究局限在于未覆盖极端工况下的系统性能,后续可拓展极端温湿度、强电磁干扰等场景的研究,进一步提升系统适配性。未来可结合智能化技术,引入故障预判算法,实现从被动防护到主动预警的升级,融入工业互联网技术,构建多系统协同安全管控体系。

参考文献:

- [1]曾永.煤矿机械电气控制系统的设计研究解析[J].中国科技投资,2023(1):123-125.
- [2]许文吉.基于PLC技术的机械电气控制装置设计研究[J].电气技术与经济,2024(10):302-304.
- [3]贺亚利.机械电气安全控制系统设计及分析[J].文渊(中学版),2021(10):3621-3622.
- [4]肖志余.电气自动化控制设备的可靠性与稳定性分析[J].时代汽车,2024(9):41
- [5]孙希润,马玉晶.港口机械电气安全控制系统设计分析[J].数码设计(上),2021,10(3):79-80.