

WK-35电铲电气系统可靠性优化研究

童智超

国能北电胜利能源有限公司 内蒙古 锡林浩特 026000

摘要: 本文聚焦WK-35电铲电气系统可靠性优化。阐述了其电气系统结构、工作原理及现有可靠性问题,故障年均28次,变频驱动系统故障占比最高。介绍可靠性分析方法,包括建模理论、FMECA分析和数据驱动评估。随后诊断可靠性问题,识别出核心薄弱环节。最后从设计、维护、操作三个层面提出优化策略并实施,如元件选型改进、采用状态检修、规范操作流程等,以提升系统可靠性。

关键词: WK-35电铲; 电气系统; 可靠性优化

引言: 在矿山开采作业中, WK - 35电铲作为关键大型设备,其电气系统可靠性至关重要。然而当前该电铲电气系统存在诸多可靠性问题,故障频发,不仅影响作业效率,还增加了维护成本与安全风险。深入剖析其电气系统结构与工作原理,精准定位可靠性薄弱环节,并制定切实可行的优化策略,成为提升设备性能、保障矿山稳定生产的迫切需求。

1 WK-35 电铲电气系统结构与工作原理

1.1 电气系统总体架构

WK-35电铲电气系统采用分层分布式架构,以主控PLC为核心,涵盖动力供电、电机驱动、控制保护、监测显示四大模块。动力供电模块由高压开关柜、整流变压器组成,将6kV高压交流电整流为直流电供给驱动系统;电机驱动模块包含提升、推压、回转、行走四个子模块,通过变频调速器实现各执行机构的精准调速;控制保护模块集成PLC控制器及急停保护回路,实现系统逻辑控制与故障联锁保护;监测显示模块由人机交互界面和传感器网络构成,实时反馈电压、电流、温度等关键参数^[1]。各模块通过工业以太网和Profibus总线通信,形成“集中监控、分散控制”的架构,确保电铲作业时各机构协同运行。

1.2 关键子系统功能分析

WK - 35电铲电气系统关键子系统有变频驱动、PLC控制和监测保护子系统。变频驱动子系统用IGBT功率模块,针对不同工况优化控制策略,提升、推压机构恒转矩控制,行走机构矢量控制,回转机构位置闭环控制。PLC控制子系统用冗余S7 - 300系列控制器,存储作业逻辑程序,协调驱动单元动作。监测保护子系统通过传感器采集数据,参数超阈值时触发保护机制,切断回路并报警,保障系统安全。

1.3 现有可靠性问题统计

通过对3台WK-35电铲近3年运行数据统计,电气系统年均故障次数为28次,平均故障间隔时间(MTBF)为420小时。其中变频驱动系统故障占比最高,达45%,主要表现为IGBT模块击穿、电容鼓包等问题,年均故障12.6次;控制回路故障占比25%,集中在中间继电器触点烧蚀、PLC输入输出模块故障,年均故障7次;动力供电系统故障占比20%,以整流变压器绝缘老化、高压电缆接头过热为主,年均故障5.6次;监测传感器故障占比10%,多为温度传感器漂移、电流传感器失灵,年均故障2.8次。故障多发生在雨季和冬季,雨季因湿度大导致绝缘性能下降,冬季因低温造成元件性能不稳定,且故障修复平均时间(MTTR)达8.5小时,严重影响作业效率。

2 电气系统可靠性分析方法

2.1 可靠性建模理论

WK-35电铲电气系统可靠性建模采用故障树分析(FTA)和马尔可夫模型相结合的方法。故障树分析以“电气系统无法正常启动”为顶事件,向下分解中间事件和底事件,确定各元件故障的逻辑关系,通过计算最小割集和重要度,识别出IGBT模块、PLC控制器、整流变压器等关键失效元件。马尔可夫模型针对系统“正常运行-局部故障-完全失效”的状态转移过程,定义5种系统状态,根据历史故障数据确定状态转移率,建立状态转移矩阵,计算不同运行时间下的系统可靠度。结合故障模式的发生概率和影响程度,构建可靠性框图,将系统划分为串联和并联子系统,其中驱动系统为串联结构,控制回路采用并联冗余设计,通过框图计算系统整体可靠度指标^[2]。

2.2 故障模式影响与危害性分析(FMECA)

对WK-35电铲电气系统开展FMECA分析,先梳理各子系统元件清单,明确每个元件的功能的故障模式。以变频驱动子系统为例,识别出IGBT模块存在击穿、开

路、温升过高三种故障模式，针对每种模式分析影响：IGBT击穿会导致驱动回路短路，引发上级断路器跳闸，造成整个驱动系统停机；开路会使电机缺相运行，产生振动和异响，加速电机损坏。采用1-10分制对严重度（S）、发生概率（O）、探测度（D）评分，计算风险优先数（RPN），其中IGBT模块击穿的 $S = 9$ 、 $O = 6$ 、 $D = 3$ ， $RPN = 162$ ，列为高风险项。针对高风险故障模式，制定预防措施，如优化散热结构降低温升、增加在线监测装置提升探测能力，降低风险等级。

2.3 数据驱动的可靠性评估

数据驱动的可靠性评估以WK-35电铲电气系统历史故障数据、实时运行数据为基础，构建评估模型。首先通过数据采集系统收集3台设备3年的故障记录，包括故障时间、故障部位、故障原因、修复措施等信息，经清洗去除重复和异常数据，得到有效故障样本84个。然后采用统计分析方法，计算各子系统的故障频率、平均故障间隔时间、平均修复时间等可靠性指标，通过威布尔分布拟合故障间隔时间数据，确定分布参数，预测未来故障发生趋势。同时利用实时监测数据建立回归分析模型，以温度、电流等参数为自变量，系统可靠度为因变量，通过机器学习算法训练模型，实现对系统可靠性的实时评估和故障预警，评估准确率82%。

3 WK-35 电铲电气系统可靠性问题诊断

3.1 现场调研与故障数据统计

通过对设备进行检查、与操作人员访谈等方式收集信息。调研覆盖设备作业环境、操作流程、维护记录等方面，重点记录故障发生时的工况参数，如作业负荷、环境温度、粉尘浓度等。结合调研数据和设备运行台账，统计得到有效故障记录102条，按故障部位分类：变频器故障48条，占比47.1%；PLC控制柜故障25条，占比24.5%；高压供电回路故障18条，占比17.6%；传感器及监测回路故障11条，占比10.8%。按故障发生时段统计，上午8-10点和下午4-6点故障高发，分别占比28%和32%，此时间段为设备满负荷作业时段，负荷波动较大。

3.2 根因分析

3.2.1 环境因素（粉尘、振动、温度）

现场调研发现，矿山作业环境中的粉尘、振动、温度是导致电气系统故障的重要因素。作业现场粉尘浓度达 $5-8\text{mg}/\text{m}^3$ ，粉尘进入变频器和控制柜内部，附着在电路板和元件表面，造成散热不良和绝缘性能下降，近30%的IGBT模块故障和25%的继电器故障与粉尘堆积相关^[3]。电铲作业时的振动加速度达 $15\text{m}/\text{s}^2$ ，长期振动导致接线端子松动、插件接触不良，引发控制信号中断，此类故障

占控制回路故障的40%。夏季作业现场环境温度最高达 40°C ，变频器内部温度超过 65°C ，超出元件正常工作温度范围，导致电容老化速度加快，使用寿命缩短至设计寿命的60%；冬季最低温度达 -35°C ，电缆绝缘层变脆易开裂，引发短路故障，占供电回路故障的33%。

3.2.2 设计缺陷（元件选型、冗余设计不足）

电气系统设计存在的元件选型和冗余设计不足问题直接影响可靠性。元件选型方面，部分变频器驱动系统的IGBT模块选用普通工业级型号，额定温度为 125°C ，但现场实际运行温度常接近 130°C ，导致模块频繁击穿，此类故障占IGBT故障的60%；冗余设计不足主要体现在控制回路和供电回路，PLC控制器未采用双机热备设计，当主控制器故障时，系统直接停机，无备用回路切换，此类故障年均发生3次，每次造成8小时以上停机；高压供电回路未设置备用电缆，电缆故障时需整体更换，延长修复时间。

3.2.3 维护不当（检修周期不合理、备件质量）

现有维护工作存在的检修周期不合理和备件质量问题加剧了系统故障。检修周期方面，采用固定周期检修模式，变频器每6个月检修一次，但现场粉尘浓度高，3个月即可造成粉尘堆积，导致散热不良，未及时检修引发的故障占变频器故障的45%；整流变压器每1年绝缘测试一次，而部分老化较快的变压器6个月就出现绝缘下降，未提前检测导致变压器烧毁故障。备件质量方面，部分更换的继电器和电容为非原厂备件，继电器触点材质含银量不足，使用寿命仅为原厂产品的50%，导致触点烧蚀故障频发；电容耐压值偏差 $\pm 5\%$ ，超出设计要求的 $\pm 2\%$ ，在电压波动时易鼓包损坏，此类备件质量问题引发的故障占总故障的20%。

3.3 薄弱环节识别

结合故障统计和根因分析，识别出WK-35电铲电气系统3个核心薄弱环节。一是变频驱动子系统的IGBT模块及散热单元，该环节故障占比45%，受环境温度和粉尘影响显著，且元件选型未适配恶劣工况，是导致系统停机的首要因素。二是控制回路的中间继电器和PLC输入输出模块，继电器触点烧蚀、模块接口松动故障频发，占控制回路故障的60%，且无冗余设计，故障后直接影响系统逻辑控制。三是高压供电回路的电缆接头和整流变压器，电缆接头因振动和氧化导致接触不良，变压器因绝缘老化引发故障，占供电系统故障的70%，且检修周期不合理，无法及时发现潜在问题。

4 WK-35 电铲电气系统可靠性优化策略与实施

4.1 设计层优化

设计层优化重点针对元件选型和冗余设计进行改进。元件选型方面,将变频驱动系统的IGBT模块更换为耐温等级150℃的工业级加强型型号,适配现场高温环境;高压电缆选用耐寒耐油的交联聚乙烯绝缘电缆,适应高低温环境。冗余设计方面,PLC控制器采用双机热备设计,主控制器故障时自动切换至备用控制器,切换时间小于0.5秒;控制回路关键继电器采用双触点并联设计,单个触点故障时不影响回路通断;高压供电回路增加备用电缆,设置切换开关,电缆故障时可快速切换至备用回路。

4.2 维护层优化

维护层优化旨在以更科学、精准的方式保障设备稳定运行,采用状态检修模式替代传统固定周期检修,并借助在线监测系统提升维护精准度。为此,建立设备健康监测平台,在IGBT模块、整流变压器、电缆接头等关键部位,精心安装温度、振动、绝缘监测传感器。平台依据预设的阈值判断和趋势分析算法,对数据进行深度剖析,一旦发现异常,立即发出维护预警,为及时处理潜在问题争取宝贵时间。在检修周期制定上,推行差异化策略。针对变频柜,依据粉尘监测数据灵活调整检修间隔,当粉尘浓度高时,将检修间隔缩短至3个月,确保设备在恶劣环境下仍能稳定运行;浓度低时则延长至6个月,合理利用资源。整流变压器则根据绝缘监测数据,当绝缘值低于标准值80%时,立即安排检修,打破原1年固定周期的限制。备件管理方面,建立原厂备件库,对采购的备件进行严格入场检测,检测项目涵盖继电器触点电阻、电容耐压值等,从源头确保备件质量。建立备件生命周期管理台账,详细记录备件使用时间,提前更换接近使用寿命的备件,为设备稳定运行提供坚实保障。

4.3 操作层优化

操作层优化通过规范操作流程与加强人员培训,全方位提升系统可靠性。制定《WK-35电铲电气系统操作规范》,为不同工况下的操作提供明确标准。例如,在

铲斗满载时,明确禁止快速启动和急停,避免因负荷冲击导致电气元件损坏,有效延长设备使用寿命。规定开机前,操作人员需仔细检查控制柜通风情况、传感器状态等,确认一切正常后,方可启动设备,从细节处保障设备安全运行。开展操作人员和维修人员专项培训,培训内容丰富多彩,涵盖电气系统结构、故障判断方法、规范操作流程等^[4]。每月组织一次理论考试和实操考核,只有考核合格的人员才能上岗,确保操作人员具备扎实的专业知识和熟练的操作技能。建立操作质量考核机制,对违规操作导致故障的人员进行严肃追责,起到警示作用;对操作规范、设备运行稳定的人员给予奖励,激发员工积极性。另外,在操作室设置实时监测显示屏,让操作人员能够实时掌握系统运行参数,如电压、电流、温度等,一旦发现异常情况,可迅速采取措施,及时排除故障,保障设备稳定运行。

结束语

WK-35电铲电气系统可靠性优化研究意义重大。通过对系统结构、故障情况的深入分析,运用多种可靠性分析方法,精准定位了核心薄弱环节。从设计、维护、操作三个维度实施优化策略,能有效提升系统可靠性,减少故障发生,缩短修复时间,提高作业效率。后续需持续关注系统运行,根据实际情况进一步调整优化措施,为WK-35电铲稳定运行提供更有有力保障。

参考文献

- [1]徐志平.395B电铲直流母线过压或欠压故障分析[J].露天采矿技术,2021,31(9):69-71.
- [2]刘相群,吕延庆,罗华阳.WK-35电铲电气系统维修与保养[J].机械工业标准化与质量,2023(3):31-34,42.
- [3]高红兵.WK-35电铲电气控制系统抗干扰技术的实践与创新[J].工程建设与发展,2025,4(7):189-191.
- [4]王世龙,李飞,杨波,等.WK-35型电铲润滑系统故障分析及解决措施[J].设备管理与维修,2023(19):122-124.