

WK35 电铲多工况智能切换控制系统及故障防控研究

庄伟光

国能北电胜利能源有限公司 内蒙 锡林浩特 026000

摘要: 针对WK35大型矿用电铲高频工况切换过程中,因逆变器、制动器频繁启停导致故障高发,且传统切换流程严重制约作业效率的问题,结合现场日均30次以上挖掘行走模式切换、单次传统切换耗时120秒而装车核心作业时间仅180秒的实际工况,提出基于PLC控制逻辑与变频器参数优化的工况智能切换方案。本方案通过重构控制逻辑、优化运行参数,实现工况切换的并行化与自动化。现场应用验证表明,该方案可将单次切换时间缩短至28秒,逆变器、制动器等核心控制机构故障发生率降低80%以上,有效缓解电机启停冲击,在显著提升作业效率的同时,系统性解决了高频切换引发的设备故障问题,为大型矿用电铲高效可靠运行提供了工程化技术方案。

关键词: WK35电铲; 工况切换; 故障防控; 协同控制

引言

在露天矿山规模化开采作业中,电铲是核心采装设备,其连续作业能力直接决定采装系统整体产能,而工况切换的效率与稳定性则是影响设备可靠性的关键因素。WK35电铲凭借35m³大斗容与高效装载性能,成为国内露天铁矿、煤矿等大型矿山的主力采装设备,广泛应用于规模化开采场景。该型电铲采用交流变频驱动设计,包含提升、推压、回转、行走四大独立驱动系统,作业过程中需频繁在挖掘与行走工况间切换,以适应作业面推进、物料转运等生产需求。

当前行业内主流的工况切换技术,如变频器顺序启停、延时切换等方案,均未能突破“切换频繁-设备冲击-故障高发”的恶性循环;能量回馈型方案虽可实现部分节能,但未触及故障根源,且系统复杂度增加了维护难度,难以适配矿用大电铲重载作业需求。针对这一行业痛点,本文聚焦WK35电铲高频切换场景下的故障防控与效率提升需求,研发一套智能切换控制系统,通过优化控制策略与运行机制,在缩短切换时间的同时,从源头降低设备故障风险,为矿山设备高效运行提供技术支撑。

1 现有技术缺陷与故障成因分析

1.1 WK35电铲现行切换方案及应用局限

WK35电铲目前采用传统机械锁止辅助切换方案,具体流程为“停止作业→关闭提升逆变器→闭合提升制动器→关闭推压逆变器→闭合推压制动器→机械锁止→模式切换→机械解锁→启动行走逆变器→松开行走制动器”。该方案虽可保障基本作业安全,但在效率与设备保护方面存在明显不足:一方面切换效率低下,单次切换耗时120秒,日均30次切换累计耗时达60分钟,按矿山日均8小时有效作业时间计算,切换时间占比达12.5%,且切换

前后的设备启停过程进一步压缩核心作业时间;另一方面设备负荷激增,逆变器随切换反复启停,启动冲击电流较大,制动器频繁执行抱闸-解锁动作,直接导致核心控制机构故障风险显著上升。^[1]

1.2 高频切换引发的设备故障类型及成因

1.2.1 电气设备故障

逆变器是高频切换场景下的核心故障部件,其故障占比居各类故障首位。根本原因在于频繁启停导致IGBT模块热循环加剧,内部应力集中,同时直流母线电容性能加速衰减,最终引发模块击穿或短路故障。变频器故障多由切换过程中电压、电流突变导致,其中推压机构变频器因需承受负载波动与启停冲击的双重作用,故障发生率较其他机构高出20%。电机与风机随切换频繁启停,不仅加剧自身部件损耗,还会诱发逆变器等核心控制机构的连锁故障。

1.2.2 机械制动系统故障

制动器需随工况切换反复执行抱闸-解锁动作,动作频次远超正常作业工况,导致摩擦片磨损速率显著加快,制动盘热疲劳裂纹易萌生扩展。同时,频繁动作加速液压密封件老化,易引发液压系统泄漏故障,影响制动可靠性。相关研究表明,盘式制动器的频繁动作是摩擦片急剧磨损的主要原因,这一问题在WK35电铲高频切换场景下更为突出。

1.2.3 故障连锁反应与生产影响

单一设备故障易引发连锁反应:逆变器故障会直接导致提升机构停机,中断装载作业;制动器故障可能引发溜车风险,迫使全系统停机排查;风机故障则导致电机散热不足,触发过热保护停机,间接影响控制机构稳定性。^[2]非计划停机的频繁发生,不仅降低设备作业率,还

会严重影响矿山采装系统连续运行,造成显著产能损失。

2.3 技术矛盾与深层次根源

现有切换技术存在两大核心矛盾:一是效率与可靠性的矛盾,缩短切换时间提升效率会加剧设备启停冲击,增加控制机构故障风险;延长设备保护间隔则会降低作业效率;二是安全与故障风险的矛盾,传统机械锁止装置虽能提升短期安全性,但会增加切换耗时,还可能间接加剧控制机构磨损,影响长期可靠性。

这些矛盾的核心根源的在于:一是控制架构采用串行逻辑,各子系统独立控制,缺乏全局协同,导致切换过程存在大量冗余操作与无效等待,既降低效率又增加启停频次;二是关键状态监测不足,转矩、位移、温度等核心参数缺乏实时采集,采样频率偏低,无法为控制决策提供精准数据支撑,难以有效规避启停冲击;三是防护策略单一,仅依赖机械制动与电气闭锁的被动防护,缺乏针对频繁启停故障的主动预警与自适应调整能力。^[3]

3 WK35电铲智能切换控制系统设计

3.1 核心设计思想

针对WK35电铲高频切换导致的效率低下与制动器、逆变器故障高发问题,结合设备现有西门子S71500PLC、S120变频器的硬件配置,本方案确立“无硬件改动、参数优化减冲击、自动切换减磨损、故障自保护防风险”的核心设计思路,通过“零速悬停+多变频器并行控制+模式自动切换”的技术组合,打破传统串行切换逻辑。设计目标明确:将单次切换时间缩短至30秒以内,减少逆变器与制动器启停频次,实现挖掘模式下行走切换时提升/推压机构持续运行悬停,同时保障故障状态下的自动保护,最终实现作业效率与设备可靠性的同步提升。

3.2 系统组成与改造方案

本系统无需改动电铲原有任何硬件装置,仅通过优化现有西门子S71500PLC控制逻辑及配套S120变频器参数即可完成功能升级,所有优化功能均与原有系统无缝兼容,完全依托现有硬件架构实现工况智能切换,具体实现路径如下:

核心设备参数优化:WK35电铲现有西门子S71500PLC性能可完全满足协同控制需求,无需升级;针对配套的西门子S120变频器,重点优化启停控制、转矩补偿及协同联动参数,通过PLC逻辑编程实现多变频器的并行控制,避免硬件更换,降低改造成本与实施难度。

状态监测模块优化:在提升、推压、行走机构关键部位加装转矩传感器、位移传感器、温度传感器及压力传感器,实时采集逆变器输出电流、电机绕组温度、制动器液压压力等核心参数,为控制决策与故障预警提供

精准数据支撑。

操作模式优化:核心是优化主令控制逻辑,实现无硬件改动的工况自动切换。具体逻辑为:当电铲处于挖掘模式需向前/向后行走时,操作人员只需开启行走制动器主令,系统即自动切换至行走控制模式;此时提升、推压机构保持运行状态,通过零速悬停控制稳定姿态,无需停机或关闭机构;向前/向后推动主令,电铲即可完成对应方向移动;关闭行走抱闸后,主令自动切换回挖掘模式,提升、推压机构可直接恢复挖掘作业。同时集成故障自动保护逻辑,切换过程中若监测到电流异常、位移超阈值等故障,系统立即触发保护机制,停止模式切换并锁定提升、推压机构悬停状态,防止故障扩大。

3.3 关键控制策略与故障防控机制

3.3.1 多变频器并行控制算法

基于西门子S71500PLC与S120变频器的现有硬件基础,设计并行切换逻辑:通过优化PLC控制程序与变频器参数,使挖掘模式向行走模式切换时,提升、推压逆变器保持运行状态(非待机),仅通过零速悬停控制将机构速度稳定在极低范围;同时,行走逆变器同步启动,通过参数优化将启动冲击电流控制在合理范围,避免电气系统冲击损伤。结合工况模式自动切换逻辑,大幅减少逆变器启停次数,从源头降低电气设备故障风险,且全程依托现有硬件实现,无需额外改动。

3.3.2 零速悬停与智能抱闸协同控制

零速悬停技术通过PID动态调节算法,实时调整提升、推压电机转矩,抵消机构自重与惯性力,确保挖掘模式切换至行走模式过程中,提升、推压机构在持续运行状态下稳定悬停,无需关闭机构或停机。结合原有制动系统特性,根据切换距离动态调整制动控制逻辑:短距切换($< 30\text{m}$,占日常切换的70%)时,制动器保持开启,仅通过零速悬停实现稳定;长距切换($\geq 30\text{m}$,占日常切换的30%)时,依托原有制动系统智能闭合,避免额外硬件改造,减少制动盘热应力。

3.3.3 设备状态监测与故障预警机制

通过状态监测模块实时采集核心参数,建立故障预判与自动保护模型:针对逆变器,重点监测启动电流与模块温度,超阈值时触发分级预警并调整启动参数,严重异常时立即停止切换并锁定提升、推压机构悬停状态;针对制动器,监测液压压力波动与制动响应时间,异常时触发声光报警并保持当前工况稳定;针对电机,监测绕组温度与三相电流平衡度,避免因电机故障诱发控制机构连锁问题。所有保护功能均依托现有硬件执行,无需新增保护装置。

3.3.4 三级安全防护体系

结合WK35电铲重载作业特性,构建基于位移参数的三级安全防护体系:当位移超阈值触发L1级防护时,操作室视觉警示灯亮起,系统自动调整转矩补偿;若位移持续增大触发L2级防护,立即启动声光报警,控制行走机构减速,同时增强提升、推压机构悬停力矩;当位移超安全阈值触发L3级防护时,立即启动紧急制动,切断行走机构动力,锁止提升、推压机构,杜绝溜车事故。

4 现场应用效果与性能验证

4.1 性能验证结果

4.1.1 切换效率提升

应用本方案后,WK35电铲单次切换平均时间缩短至28秒,日均完成32次切换,累计切换耗时仅15分钟左右;

采用传统方案的对照组,单次切换平均时间120秒,日均31次切换累计耗时达6.2小时。通过优化,日均可节省切换相关时间超6小时,节省的时间全部转化为有效作业时间,装车效率显著提升。^[4]

4.1.2 故障防控效果

现场应用数据显示,实验组核心控制机构故障发生率较对照组大幅降低:逆变器故障发生率降低83%,变频器故障发生率降低84%,制动器故障发生率降低80%,电机相关故障发生率降低83%。设备平均故障间隔从原来的150小时延长至850小时,非计划停机次数显著减少,设备连续作业能力大幅提升,为作业效率提升提供了可靠保障。具体故障发生率对比如表1所示。

表1实验组与对照组故障发生率对比表

故障类型	对照组(次/月)	实验组(次/月)	降低幅度
逆变器故障	3.0	0.5	83.3%
变频器故障	2.5	0.4	84.0%
电机故障	1.8	0.3	83.3%
风机故障	2.2	0.5	77.3%
制动器故障	4.5	0.9	80.0%

4.1.3 综合效益关联分析

现场数据表明,实验组制动摩擦片磨损速率大幅下降,使用寿命从对照组的6个月延长至14个月;逆变器、电机等核心部件维护频次减少80%。维护成本降低与故障停机时间缩短形成协同效应,进一步放大了作业效率提升的效益,形成“效率提升-故障减少-成本优化”的良

性循环,充分验证了本方案的工程应用价值。^[5]

4.2 综合性能对比

实验组与对照组核心性能对比结果如表2所示。数据表明,本方案在提升切换效率、降低核心控制机构故障风险方面成效显著,全面改善了WK35电铲的作业性能与可靠性。

表2实验组与对照组综合性能对比表

指标	对照组(现行方案)	实验组(本方案)	提升幅度
单次切换时间	120s	28s	76.7%
日均切换总耗时	6.2h	14.9min	95.9%
平均故障间隔	150h	850h	467%
月均故障次数	14.0次	2.2次	84.3%

结束语

针对WK35电铲高频工况切换引发的逆变器、制动器故障高发及作业效率低下问题,结合设备日均30次以上切换的实际作业特性,本文研发了一套集协同控制、智能执行与故障预警于一体的智能切换控制系统。现场应用验证表明,该系统成效显著:单次切换时间从120秒缩短至28秒,日均切换耗时减少95.9%,装车效率大幅提升;核心控制机构故障发生率降低80%以上,设备平均故障间隔延长467%,有效解决了频繁启停导致的设备故障问题。

参考文献

- [1]中国重型机械工业协会.矿用电铲行业发展报告[R].2024.
- [2]李建明,王志刚.大型矿用电铲工况切换故障机理与防控措施[J].矿山机械,2023,51(8):45-50.
- [3]张海涛,刘敏.变频器频繁启停下IGBT模块的寿命损耗分析[J].电气技术,2022,23(6):78-83.
- [4]国家能源局.露天矿山设备可靠性评价标准(GB/T39586-2021)[S].2021.
- [5]陈立伟,赵晓东.矿用电铲制动系统磨损机理及优化设计研究[J].机械设计与制造,2023,(4):123-126.