

矿用防爆无轨胶轮车 AMT 换挡控制策略研究

康彦平

1. 中国煤炭科工集团太原研究院有限公司 山西 太原 030006

2. 山西天地煤机装备有限公司 山西 太原 030006

3. 煤矿采掘机械装备国家工程实验室 山西 太原 030032

摘要: 本文聚焦矿用防爆无轨胶轮车AMT换挡控制策略。分析了车辆工作特性与换挡需求,指出其换挡需兼顾动力、平顺、可靠与安全。剖析现有单参数、两参数策略的不足,提出改进策略,包括多参数融合换挡规律制定、换挡过程动态协调控制等。还阐述了换挡过程质量控制策略,涵盖评价指标及各部件控制。通过研究,提升车辆在井下复杂工况下的换挡性能与作业可靠性。

关键词: 矿用防爆无轨胶轮车; AMT; 换挡控制策略; 多参数融合; 动态协调控制

引言: 矿用防爆无轨胶轮车作为井下辅助运输核心装备,承担人员、物料及设备转运任务。其工作在井下特殊环境,具有空间狭窄、坡度起伏大、防爆要求高、工作负荷多变等特点,对AMT换挡控制提出特殊且复杂的要求。现有AMT换挡控制策略存在参数考虑不全面、换挡平顺性差、特殊工况适配性不足等问题,难以满足其作业需求,因此开展相关研究十分必要。

1 矿用防爆无轨胶轮车工作特性与AMT换挡需求分析

1.1 矿用防爆无轨胶轮车工作特性

矿用防爆无轨胶轮车是井下辅助运输的核心装备,主要承担人员、物料及设备转运任务,其工作特性与井下特殊环境高度适配,具有显著的工况特殊性。井下巷道空间狭窄、弯道多且坡度起伏大,路面多为碎石、泥泞等非铺装路面,行驶阻力波动剧烈,要求车辆具备强劲的动力输出和良好的低速行驶稳定性。同时,井下存在瓦斯、煤尘等易燃易爆气体,车辆需满足严格的防爆要求,核心部件需进行防爆密封设计,导致整车重量增加、动力传输损耗较大。该车工作负荷多变,空载、满载、重载工况频繁切换,起步、爬坡、转弯、制动等操作频繁,且作业时间长、连续运行强度大,对传动系统的可靠性、平顺性和耐久性提出极高要求。井下视线较差、信号传输受限,需车辆具备便捷的操作性能,减少驾驶员操作强度,避免因操作失误引发安全事故,这些工作特性直接决定了其AMT换挡控制的特殊性和复杂性。

1.2 换挡需求分析

结合矿用防爆无轨胶轮车的工作特性,其AMT换挡需求聚焦于动力性、平顺性、可靠性和安全性四大核心,同时需适配井下特殊工况。动力性需求方面,车辆起步、爬坡时需快速切换至低挡位,保证充足牵引力,避免动力

不足;高速行驶或空载时需切换至高挡位,提升行驶效率并降低燃油消耗,确保不同负荷下发动机始终工作在高效区间^[1]。平顺性需求方面,换挡过程中需减少动力中断时间,降低换挡冲击,避免因冲击过大导致车辆颠簸,影响井下人员乘坐舒适性和物料运输安全性。可靠性需求方面,井下环境恶劣,换挡系统需具备抗粉尘、抗振动、耐高低温能力,避免频繁故障影响作业进度。安全性需求方面,换挡过程需精准可控,防止误换挡、脱挡等情况发生,且在紧急制动、瓦斯报警等特殊场景下,需快速完成换挡避险,同时适配防爆要求,确保换挡过程中无电火花产生,保障井下作业安全。

2 现有AMT换挡控制策略分析

2.1 单参数换挡控制策略

单参数换挡控制策略是AMT最基础的控制方式,其核心是仅依据单一工况参数制定换挡规律,目前在矿用防爆无轨胶轮车中应用较少,主要分为以发动机转速和车速为单一参数两种类型。以发动机转速为参数的策略,预设固定的升挡、降挡转速阈值,当发动机转速达到升挡阈值时自动升挡,低于降挡阈值时自动降挡,控制逻辑简单、响应速度快,无需复杂的参数采集与计算,制造成本低,适用于负荷稳定、路况简单的场景。以车速为参数的策略,根据车速变化设定换挡阈值,车速达到对应挡位阈值时完成换挡,可保证车辆行驶速度与挡位的基本匹配^[2]。但该策略存在明显局限性,未考虑油门开度、车辆负荷、路面坡度等关键因素,在井下负荷多变、坡度起伏的工况下,易出现换挡时机不合理的问题,如重载爬坡时误升挡导致动力不足,空载行驶时误降挡增加燃油消耗,无法兼顾动力性与经济性。

2.2 两参数换挡控制策略

两参数换挡控制策略是目前矿用防爆无轨胶轮车AMT应用最广泛的控制方式,核心是结合发动机转速与油门开度两个关键参数,制定二维换挡规律,弥补了单参数策略的不足。该策略通过建立转速-油门开度二维换挡图谱,预设不同油门开度下的最佳升、降挡转速,TCU根据实时采集的两个参数,查询换挡图谱确定最佳换挡时机,实现挡位的动态调整。相较于单参数策略,其控制精度更高,能较好地兼顾车辆动力性与经济性,例如大油门加速时,延迟升挡转速,充分发挥发动机动力;小油门匀速行驶时,提前升挡,降低发动机转速,减少燃油消耗。但该策略仍存在适配性不足的问题,未考虑井下路面坡度、车辆负荷、环境温度等特殊因素,在重载爬坡、巷道转弯等复杂工况下,仍会出现换挡冲击过大、动力中断时间过长等问题,难以满足井下严苛的作业要求。

2.3 现有策略存在的问题总结

综合分析现有AMT换挡控制策略,结合矿用防爆无轨胶轮车的井下作业特性,其核心问题主要集中在四个方面。一是参数考虑不全面,单参数和两参数策略均未充分兼顾井下复杂工况因素,如路面坡度、车辆负荷、防爆要求、环境粉尘等,导致换挡时机与实际工况不匹配,影响动力性和经济性。二是换挡平顺性不佳,现有策略对换挡过程中离合器接合速度、发动机转速协调控制不足,动力中断时间较长,换挡冲击较大,易导致车辆颠簸,影响人员舒适性和物料运输安全。三是特殊工况适配性差,在井下陡坡、急弯、重载启动等特殊场景下,现有策略无法快速调整换挡逻辑,易出现动力不足、脱挡等故障,甚至影响作业安全。四是可靠性有待提升,现有策略对井下粉尘、振动、高低温等恶劣环境的适应性不足,控制算法易出现误判,执行机构动作精度下降,导致换挡故障频发,影响井下作业进度,同时未充分结合防爆要求优化换挡控制,存在安全隐患。

3 改进的AMT换挡控制策略研究

3.1 基于多参数融合的换挡规律制定

针对现有策略参数单一的问题,结合矿用防爆无轨胶轮车的工况特点,制定基于多参数融合的换挡规律,核心是整合发动机转速、油门开度、车辆负荷、路面坡度、环境温度等关键参数,构建多维度换挡决策模型。通过安装负荷传感器、坡度传感器等设备,实时采集各参数数据,利用模糊控制算法对参数进行加权处理,确定各参数在不同工况下的影响权重,例如重载、爬坡时,增加车辆负荷和坡度的权重,优先保证动力性;空载、匀速行驶时,增加车速和油门开度的权重,优先保证经济性。同时结合井下防爆要求,加入防爆状态监测参数,确保换挡过

程中执行机构动作平稳,无电火花产生。通过大量实车试验,标定不同工况下的换挡阈值,建立动态换挡图谱,实现换挡时机的精准控制,使车辆在各种工况下均能处于最佳运行状态,兼顾动力性、经济性和安全性^[1]。

3.2 换挡过程动态协调控制

为解决现有策略换挡平顺性差、动力中断时间长的问题,开展换挡过程动态协调控制研究,核心是实现离合器、选换挡执行机构与发动机的协同工作,缩短动力中断时间,降低换挡冲击。在换挡准备阶段,TCU根据当前工况参数,提前调整发动机转速,使其与目标挡位转速匹配,为换挡做好准备;离合器分离阶段,采用分段控制策略,初期快速分离,减少动力传输损耗,后期缓慢分离,避免冲击;选换挡执行阶段,优化执行机构动作速度,精准控制拨叉行程,缩短换挡时间,避免挡位卡滞;离合器接合阶段,采用模糊PID控制算法,根据发动机转速、车速偏差,动态调整接合速度,实现平稳接合,同时协调发动机喷油控制,调整输出转矩,确保动力平稳衔接。通过各部件的动态协调,将换挡动力中断时间控制在合理范围,显著提升换挡平顺性,减少对车辆传动系统的磨损。

3.3 特殊工况下的换挡控制策略

井下作业环境复杂,存在陡坡、急弯、重载启动、瓦斯报警等特殊工况,对AMT系统的适配性和安全性提出了极高要求。为此,需制定针对性的换挡控制策略。在重载启动工况下,车辆负荷大,采用低挡位起步,延迟升挡时机,可增大发动机输出转矩,为车辆提供充足动力。同时,精准控制离合器缓慢接合,避免因动力冲击导致离合器打滑,确保车辆平稳启动,减少对传动系统的损害。陡坡行驶时,启用坡度自适应控制,依据坡度大小灵活调整换挡阈值。上坡时禁止中途升挡,防止动力不足引发车辆溜坡;下坡则自动切换至低挡位,利用发动机制动,有效控制车速,提升行驶安全性。急弯行驶时,提前降低挡位以减小车速,保证车辆转向灵活性,避免在换挡过程中因动力中断或衔接不畅导致车辆失控。瓦斯报警等紧急工况下,迅速将挡位切换至空挡,降低发动机转速,切断动力传输。同时控制执行机构停止动作,防止产生电火花,避免引发瓦斯爆炸等严重事故,全方位保障井下作业安全。

4 AMT换挡过程质量控制策略

4.1 换挡过程品质评价指标

为量化AMT换挡过程质量,结合矿用防爆无轨胶轮车的作业要求,确定换挡冲击度、动力中断时间、换挡成功率、燃油消耗率四项核心评价指标,构建完整的换

挡品质评价体系。换挡冲击度是衡量换挡平顺性的关键指标,指换挡过程中车辆纵向加速度的变化率,需控制在合理范围,避免冲击过大影响舒适性和安全性;动力中断时间指离合器分离至重新接合的时间,直接影响车辆动力连续性,井下作业中需控制在最短,减少动力损耗;换挡成功率指正常完成换挡的次数与总换挡次数的比值,需达到99%以上,避免换挡故障影响作业进度;燃油消耗率指换挡过程中的单位里程燃油消耗量,需结合工况优化,在保证动力性的前提下降低油耗。通过实时监测四项指标,及时调整换挡控制参数,确保换挡品质满足井下作业要求,同时为后续控制策略优化提供数据支撑。

4.2 离合器控制策略

离合器控制是影响换挡品质的核心环节,针对矿用防爆无轨胶轮车的工况特点,制定分段式离合器控制策略,兼顾换挡速度与平顺性。离合器分离阶段分为快速分离段和缓慢分离段,快速分离段采用最大驱动力控制,快速切断动力传输,缩短分离时间;缓慢分离段根据发动机转速与车速偏差,动态调整分离速度,避免分离过快产生冲击。离合器接合阶段分为缓慢接合段、平稳接合段和快速接合段,缓慢接合段控制离合器缓慢接触,减少初始冲击;平稳接合段采用模糊PID控制,根据工况参数动态调整接合压力,确保动力平稳衔接;快速接合段在转速匹配后快速完成接合,缩短动力中断时间。同时加入离合器磨损监测功能,实时监测离合器磨损状态,调整控制参数,延长离合器使用寿命,适配井下长时间连续作业需求,同时确保离合器动作符合防爆要求,避免产生安全隐患。

4.3 选换挡执行机构控制

选换挡执行机构的动作精度直接影响换挡成功率和换挡速度,结合井下恶劣环境,制定精准化选换挡执行机构控制策略。采用电液式执行机构,优化液压控制系统,提升动作响应速度和精度,减少换挡卡滞现象;通过安装位移传感器,实时监测拨叉行程,采用闭环控制算法,精准控制拨叉位置,确保挡位切换准确无误。针对井下粉尘、振动等问题,对执行机构进行密封防护设计,提升环境适应性,同时优化控制算法,抑制振动干扰,避免执行机构误动作。另外,建立执行机构故障诊断

机制,实时监测执行机构工作状态,当出现动作异常、卡滞等问题时,及时发出报警信号,并切换至应急换挡模式,确保车辆正常行驶,减少井下作业中断,保障换挡过程的可靠性和安全性。

4.4 发动机协调控制

发动机协调控制是实现平稳换挡的关键,核心是通过TCU与发动机ECU的协同通讯,调整发动机转速和输出转矩,实现与挡位的精准匹配^[4]。换挡前,TCU根据目标挡位转速,向发动机ECU发送转速调整指令,控制发动机转速快速逼近目标转速,减少换挡时的转速差,降低换挡冲击;换挡过程中,当离合器分离后,控制发动机降低输出转矩,避免空转转速过高,同时减少燃油喷射量,降低能耗;离合器接合阶段,逐步增加发动机输出转矩,与离合器接合速度协同,确保动力平稳衔接,避免出现动力顿挫。针对井下不同工况,优化发动机协调控制参数,重载、爬坡时,适当提高发动机转速和转矩储备,保证动力输出;空载、匀速行驶时,降低发动机转速,提升燃油经济性。通过发动机与AMT的协同控制,进一步提升换挡品质和整车运行性能,适配井下复杂作业需求。

结束语

本文围绕矿用防爆无轨胶轮车AMT换挡控制策略展开研究,针对现有策略不足,提出多参数融合、动态协调控制等改进策略,并制定换挡过程质量控制策略。通过这些研究,有效提升了车辆在井下复杂工况下的换挡性能,兼顾了动力性、平顺性、可靠性与安全性。未来可进一步优化控制算法,提升系统智能化水平,以更好地适应井下作业需求。

参考文献

- [1]范江鹏.矿用防爆无轨胶轮车AMT换挡控制策略研究[J].煤矿机械,2025,46(6):85-89.
- [2]谷丽东,范江鹏.矿用防爆无轨胶轮车用AMT技术探讨[J].煤炭技术,2024,43(3):276-279.
- [3]孙宇,高玉波.特大型矿井防爆无轨胶轮车运输安全管理工艺研究[J].现代制造技术与装备,2024,60(10):152-154.
- [4]路超,张福生,潘学文.防爆无轨胶轮车传动形式现状与发展综述[J].工程机械,2022,53(4):96-100.