

纯电矿卡在抽水蓄能电站的应用与改造技术

安孟召¹ 吴琳晗¹ 王利楠¹ 李希稷² 杨看迪²

1. 中国水利水电第六工程局有限公司山东潍坊抽水蓄能电站水库工程项目部 山东潍坊 262600

2. 山东潍坊抽水蓄能有限公司 山东潍坊 262600

摘要: 通过纯电矿卡的引进和改造,并在山东潍坊抽水蓄能电站项目进行了两年年多的应用实践。17辆纯电矿卡累计完成了680万方土石方运输任务,每方土石方的运输电耗仅0.346kWh,成本只有燃油车的4.4%。纯电动矿卡针对潍坊抽蓄上水库的运行场景通过“一矿一策”精准识别路况,前期采集分析挖填主要施工道路参数,对坡长、坡度、转弯半径等实际情况进行匹配,从制动系统、电能回馈控制程序、承载系统等车辆自身属性进行优化改进;通过宇通纯电动矿卡使用,电站项目两年来减少柴油消耗598.4万升、减少二氧化碳排放15737.92吨,减少碳排放4290.53吨,相当于植树造林643.55亩,体现了先进绿色设备带来的生态、经济和社会效益,为抽水蓄能电站项目摸索出了切实可行的绿色方案。

关键词: 纯电矿卡;抽水蓄能;设备改造;绿色环保

引言

四川恒峰建设为积极推动国家绿色能源建设,在山东潍坊抽水蓄能电站项目中,选购了17辆宇通纯电动矿卡,用于土石方运输,大坝填筑碾压一体化施工。这批车辆由郑州宇通矿用装备有限公司开发生产,搭载了获得国家科学进步二等奖的新能源睿控技术,配备了宇通先进的专用电池、双电机、双控制器及自动档变速箱。自2022年5月正式投入运营,迄今已经连续稳定运行了

两年多时间。截至目前,上水库挖填运输工程零事故,大坝提前17个月封顶,大幅提升了潍坊电站机械化、绿色化施工水平。

一、纯电动矿卡应用技术

潍坊电站上水库工程投入使用的纯电动矿卡作为主要运输设备,通过各关键零部件的试验验证、各系统的合理匹配和监控预警功能的使用充分保证车辆的运行安全,为项目的稳定运营提供有力保障;依托宇通集团强大的新能源技术、智能辅助驾驶技术、创新能力及先进的智能制造能力。

(一) 电池防护等级

选用高安全性的电池,电池包经过142小时的振动+高低温循环+高湿+充放电循环的四项综合验证后,防护等级仍可达到IP68+IP6K9K。电池高防护等级保证车辆在雨天行驶、通过低洼水坑,电池箱内不进水,高度适配抽水蓄能电站道路条件差等特点,保证运营安全性和可靠性,提升车辆出勤率。

(二) 电机防护等级

采用静密封和动密封相结合的防护设计方案,优选高防护等级高低压接插件,使电驱动系统防护等级达到IP68及IP6K9K要求。增强了电机对极端雨水天气的适应能力,可承受高压水枪清洗,保持电机良好的绝缘性,使车辆长期可靠运行。

基金信息: 山东潍坊抽水蓄能有限公司《潍坊公司2024至2025年群众性创新及专利管理》基金资助项目(SGXKJ-2024-057);山东潍坊抽水蓄能有限公司群众性创新研究项目(SDWFKJ-2024-01)。

作者简介:

安孟召(1994—),男,工程师,主要研究方向:水利水电工程施工;

吴琳晗(1991—),女,工程师,主要研究方向:水利水电工程施工;

王利楠(1989.08—),男,工程师,主要研究方向:水利水电工程施工;

李希稷(1996—),男,工程师,主要研究方向:水利水电工程管理,水工结构材料,再生骨料透水混凝土等;

杨看迪(1992—),男,工程师,主要研究方向:水利水电工程管理。

(三) 电控防护等级

集成电机控制器防护等级达到IP68及IP6K9K要求雨季道路积水情况下车辆能够正常出勤,提升车辆出勤率。集成电机控制器电磁兼容达到CISPR25标准中CLASS 5的限值要求,达到国际标准最高发射等级限值要求,对其他车载电器设备干扰更低,提高整车运行可靠性、安全性。

(四) 电池系统24h全时域监控技术

电池24h全时域监控功能,实现全时域内电池信息的有效监控和安全评估,出现异常及时报警,为车辆安全运行保驾护航。

(五) 低压双路供电

双电源供电就是除外部蓄电池供电外,在集成电机控制器内部增加了一个电器件,它可以在外部供电异常时,自给自足给控制器提供24V低压供电,确保控制器不会因低压供电异常出现安全问题。能够保证电机、转向、空压机等系统正常工作,提升整车运营安全性。

(六) 制动、转向系统

三重制动系统+双重转向系统。采用机械制动+电制动+应急辅助制动(电涡流缓速器)的三重制动系统,满足10%重载下坡,25kph匀速缓行能力,制动性能提升25%,刹车片磨损降低55%;电动全液压转向+应急转向的双重转向系统,工地专用电机转向泵,可在-40℃~85℃环境温度下正常工作,质量可靠,采用全液压电助力系统;标配24V低压辅助转向,实现车辆转向双保险,出现突发事件时保证整车仍具有转向功能。满足抽水蓄能电站长下坡、陡下坡等工况。

二、工程应用技术改进

我国抽水蓄能电站建设较矿山工程普遍有工期短,地形复杂,工况变化多等特点,反映在挖填运输上有着快节奏、高效率、强安全的特征,因此对抽水蓄能领域应用的纯电矿卡有更高的性能要求。

(一) 制动系统改进

车辆入场前以及试运行阶段,整车厂结合潍坊抽水蓄能挖填运输长下坡工况场景,通过多次的路谱采集对比结果,明确了各线路工况的振动数据以及司机驾驶习惯。基于此,针对电池高SOC场景,即电池限制回收,电制动无法有效工作、重载下司机注意力不集中场景等极端工况,重点优化了车辆安全制动策略。定向开发了电制动、电涡流缓速制动、气制动的三重制动安全功能,且配置制动安全智能控制技术,实现了车辆能在电池

SOC>95%、重载下司机注意力不集中、误操作导致车速过快等情况时,电涡流主动介入,帮助司机将车速控制在安全范围内,最大限度保证车辆安全。

(二) 控制程序改进

作为关键部件之一,驱动电机的运行特性大大影响电动车和混合动力车的行驶性能。永磁同步电机具有功率密度大、运行效率高、控制器成本低等优点,广泛应用于新能源汽车领域。针对电机在低转速下回收效率低甚至不能回收的问题。四轮轮毂电机驱动的电动汽车,分析了表贴式永磁同步电机的制动特性,并给出了能量回馈状态的切换条件。为确保节能最大化,投入试用车对潍坊电站上水库临时道路工况进行采集分析,结合设备厂家制定定制化控制策略,优化驱动和能耗,使车辆处于最佳的运营状态。

1. 制动回馈能量最优控制策略

当电机进行再生制动时,可通过控制电流指令 i_d 和 i_q 使其处于回馈制动状态,当电机转速一定,合理控制电流指令可使该转速下输入功率最小,即向电池回馈的能量最大,以实现最优的制动回收能量。针对内置式PMSM,解析需求制动转矩与控制电流 i_d 、 i_q 间的关系,得到 i_d 、 i_q 随转矩和转速的变化曲面,采用Matlab软件计算电机进入回馈制动状态和回馈能量最优时的转矩—转速曲线,并据此制定了回馈能量最优的制动控制策略。

2. 基于最优回馈转矩曲线的制动控制策略

根据现场运行工况对后台运行数据进行实时分析优化,升级整车控制程序,使车辆在该工况下行驶达到最佳效果。如通过提升不同坡度下的电制动扭矩、重新标定制动回收扭矩曲线、使用高强度主减等方式,将能量回收效果提升至10%以上。

基于抽水蓄能电站水库挖填运输道路随工程进展不断变化的特点,当车辆运营路线变动、转场时,车队管理方结合矿卡整车厂重新共识了动力性、经济性、运营排班情况,综合标定控制策略,并对司机开展安全驾驶要求、节能技巧等专项培训,保障车辆安全、节能、可靠运营。

(三) 承载系统优化

1. 定制加强型刚性车架

抽水蓄能临时路面硬化强度不高,耐久性较差,存在坑洼颠簸路段,潍坊电站矿用车架结构采用刚性大梁,耐冲击性强。采用边梁式、大截面、宽体箱型结构,由两根相互平行的纵梁和五根横梁,全焊接而成,其纵

梁和横梁均采用箱型焊接结构，关键焊缝全熔透焊接，100%探伤，保证抗疲劳性能。车架材料选用高强度汽车大梁专用钢，这种钢材具有承载量大、耐冲击性强及较高的强度和刚度等优点，保证具有足够的强度、耐磨和刚度、耐冲击、不变形以及适合低温条件下作业，设计寿命10年以上，提高车辆底盘和零部件的使用寿命，维修更方便。

根据CAE分析结果，车架受力均在120MPa以下，实际车架能承受应力在450MPa以上，安全系数大于3.5，较柔性主副梁（竞品结构）强度要高2倍，确保车架能够满足车辆全生命周期使用。车架及车厢整体结构改进，车架整体强度提升了40%，同时降低了厢体翻转座处的故障率，提高车辆的可靠性。

2. 高强度整体框架结构车厢

根据抽水蓄能电站水库工程工况，匹配高强度整体框架结构车厢，高强度NM400耐磨板制作，底厢为纵梁+横梁+加强件结构。车厢整体结构进行改进，车架整体强度提升了40%，同时降低了厢体翻转座处的故障率，在装料时减小冲击变形，使用过程中防止货箱不耐磨等开裂问题，提高车辆的可靠性。同时车厢底部铺高分子聚氨酯板，降低底板的摩擦系数，便于物料的卸料。关键总成设计寿命>8年，可靠耐久。结合抽水蓄能电站水库挖填临时道路路况标准不高，坡度大等特点，完成三高试验、长距离重载下坡等1.5万公里极限工况考验。对于抽水蓄能挖填临时道路颠簸路段，采用箱型整体焊接车架，承载量大、耐冲击性强、强度及刚度高，全生命周期内满足大坝填筑运输工况需求。其举升系统采用行业领先的矿用专用大缸径举升系统，举升点高，举升过程平衡，保证质量稳定。

（四）充电桩、修理厂前瞻性匹配

鉴于此项目为百吨级纯电矿卡在抽蓄场景下的首次行业大批量应用，我们结合设备厂家，在国标及行业通用充电场站解决方案的基础上，进行了多项关键技术的改进和适配，涉及充电桩前瞻性匹配、充电模式及充电功率分配模式匹配、全方位充电安全防护等多项关键技术，依托新能源车充电运营管理平台（含手机端智能管理APP以及PC端智能监控管理平台）进行实施监控，支撑运营方实现多维度、多场景、多层次的智能化充电管理。

联合厂家将车辆数据接入宇通安睿通远程监控系统，实现对车辆运营数据、故障信息、充电情况等数据的24h

监控，帮助项目成员实现对车辆运营状态的实时了解。

开发司机驾驶行为分析功能，从安全驾驶、能耗情况等方面对司机驾驶行为进行分析，帮助管理者动态识别司机危险驾驶行为、并给出安全节能的驾驶行为建议，帮助车队运营管理规范化、高效化。

在EL500平台搭建占地1500m²钢结构车间作为电动矿卡的维修、保养、调度指挥办公场地，基于安睿通平台对车辆的24h监控，搭建故障预警及快速响应机制，当识别到车辆有故障风险时，根据项目组提前制定的分级预警及处置策略，平台按照重要紧急程度，给予售后及车队管理者预警提醒、停车检查、紧急安全响应等提醒，确保风险及时消除、故障得到快速解决，帮助车队实现安全可靠运营。

三、运行总结

（一）运量与能耗成本分析

土石方运输的往返运距平均约1.5公里，海拔落差约平均150米，平均坡度约10%。纯电动车辆在下坡时，可以利用电机的反拖力进行制动，在不消耗刹车片的同时，回收可观的电能，因此可以大大节约能量消耗。

（二）纯电动矿卡经济分析

在本项目土石方运输的作业路线上，满载约34方的车辆下坡时，势能转换为机械能并通过电机发电，发出来的电经过交流-直流变换后储存进了动力电池。这个过程称为“能量回馈”，它同时又实现了车辆的制动，几乎完全避免了刹车片的损耗。按照单程1.5km，重载下工况可得出坡度和电耗的关联关系，当坡度6%左右的时候，综合电耗小于5kWh，当坡度大于9%时，可达到电平衡状态。

以某一趟运输为例，空车从卸料点到上料点上坡，消耗了15.6度电；满载后从上料点回到卸料点，电池电量增加了10.8度电。这一次往返一趟里程3KM，耗电4.7度。

这个过程可以理解为工地势能被转换成了电能，用于运输过程的能耗。由于工地的势能是来自于大自然，因此这部分回馈的电能属于零碳的“绿电”。

（三）纯电动矿卡环保性分析

在减排方面，纯电动矿卡依靠电力驱动，17辆车一年运输446万方土石方，每年可实现节油392.48万升，为用户节省燃料费2551.12万元（0#柴油按6.5元/升计算），减少二氧化碳排放10322.22吨，减少碳排放2814.08吨，相当于植树造林422.09亩，节能减排效益显著。

结束语

创建绿色工地是新形势下保证矿业可持续健康发展的必由之路,绿色工地建设是资源开发利用与经济社会发展、生态环境保护相协调的重要举措。山东潍坊抽水蓄能电站积极推进绿色工地建设目标,遵循科技进步、改进运输工艺,结合工地特点,不断提高能源利用水平和环境保护水平。

纯电动矿车的投运响应了国家“两山文化”的理念,以发展绿色运输,以资源合理利用、节能减排、保护生态环境和促进工地和谐为主要目标,以开采方式科学化、资源利用高效化、企业管理规范化、生产工艺环保化、施工环境生态化为基本要求,将绿色运输理念贯穿于山东临朐县抽水蓄能电站项目开发利用全过程;因地制宜

推行循环经济发展模式,实现资源开发的经济效益、生态效益和社会效益协调统一,为转变单纯以消耗资源、破坏生态为代价的开发利用方式提供了现实途径,为抽水蓄能电站项目摸索出了切实可行的绿色方案。

参考文献

[1] 吴小锋,李刚,马圣恒,等.抽水蓄能电站监控系统国产化改造方案研究[J].中国农村水利水电,2022,(6):202-206.

[2] 刘洋洋.A抽水蓄能电站智能化改造实施规划研究[J].中国科技投资,2022,(35):132-134.

[3] 龚翔峰,杨海学,司红建.抽水蓄能电站机组保护国产化改造[J].江苏电机工程,2012,31(2):33-36.