

引用格式:胡达涛,习泳,马宁. 无人驾驶电动自卸卡车在露天矿山的应用分析[J]. 有色设备,2024,38(4):21-26.

HU Datao, XI Yong, MA Ning. Application analysis of driverless electric dump truck in open pit mine[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(4): 21-26.

无人驾驶电动自卸卡车在露天矿山的应用分析

胡达涛, 习泳, 马宁

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 自卸卡车是矿山矿岩运输的主要工具,在露天矿山生产中发挥着重要作用。近几年来,矿山对节能、减排和智能技术的考核指标也越来越严格。随着电池技术和无人驾驶技术的快速发展,无人电动卡车在矿山领域也开展了实验和应用。本文对无人驾驶电动自卸卡车在露天矿山的应用开展了实践调查和现状分析,列举应用实例说明了无人驾驶电动自卸卡车相比传统燃油自卸卡车在矿山应用具有的优势和经济价值,梳理了无人驾驶自卸卡车的应用情况,为无人驾驶电动自卸卡车技术的相关研究和应用提供参考。

[关键词] 无人驾驶; 电动自卸卡车; 露天矿山; 节能; 安全; 智能矿山

[中图分类号] TD57 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)04-0021-06

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.04.004

0 前言

自卸卡车是矿山矿岩运输的主要工具,在露天矿山生产中发挥着重要作用。目前露天矿山人工驾驶的自卸卡车多采用柴油为动力燃料,柴油燃烧会产生大量的尾气,对环境产生污染,且存在疲劳驾驶、事故风险高等问题。

近几年来矿山对节能、减排和智能技术的考核指标也越来越明确。自然资源部、生态环境部、财政部等单位关于进一步加强绿色矿山建设的通知(自然资规[2024]1号)中明确,到2028年底,绿色矿山建设工作机制更加完善,持证在产的90%大型矿山、80%中型矿山要达到绿色矿山标准要求^[1]。国家矿山安全监察局、应急管理部等单位印发的《关于深入推进矿山智能化建设促进矿山安全发展的指导意见》(矿安[2024]42号)中要求,到2026年,煤矿、非煤矿山危险繁重岗位作业智能装备或机器人替代率分别不低于30%、20%,打造一批单班作业人员不超50人的智能化矿山。到2030年,建立完备的矿山智能化技术、装备、管理体系,实现矿山数据深度融合、共享应用,推动矿山开采作业少人化、

无人化,有效防控重大安全风险,矿山本质安全水平大幅提升^[2-5]。

随着矿山企业对安全、环保要求日益的提高,燃油价格的上涨,人工、汽车运输成本上升,矿山的运营成本也越来越高。电动自卸卡车技术的出现,在节能减排的方面做出了巨大贡献,极大地改善了矿山工作环境。无人驾驶技术的发展对于降低人力资源负荷、解决恶劣环境中作业、保障生命安全具有重要意义。当前矿山在远程遥控铲运机、远程遥控挖掘机、无人驾驶电动自卸卡车和无人驾驶有轨电机车方面均有应用实例,其中中国恩菲公司在无人驾驶电机车方面技术成熟,在多个矿山成功应用了无人驾驶电机车运输矿石。本文通过对比无人驾驶电动自卸卡车和传统燃油自卸卡车,确定无人驾驶电动自卸卡车的优势和经济价值,为无人驾驶电动自卸卡车技术的研发和应用提供借鉴。

1 无人驾驶电动自卸卡车的介绍

无人驾驶电动自卸卡车主要由非公路自卸卡车、充电电池和无人驾驶系统组成。无人驾驶电动自卸卡车通过车载终端、无线通讯网络与调度控制中心平台(或中央计算机系统)实时通讯,完成平台发出的指令。无人驾驶系统主要包括感知技术、定位与导航技术、决策与控制技术、通信与协同技

[收稿日期] 2024-05-12

[第一作者] 胡达涛(1984—),男,湖北潜江人,高级工程师,硕士,主要从事采矿设计与咨询工作。

术^[6-9]。

1) 感知技术。感知技术是无人驾驶卡车的基础,通过感知技术无人驾驶卡车可以实时获取周围环境信息,传至车量计算分析系统为决策提供数据支持。感知系统主要由摄像头、车载激光雷达、毫米波雷达等传感器实现外部信息数据获取的功能。

2) 定位与导航技术。定位与导航技术在无人驾驶卡车中起到关键作用,精确地定位信息,可以提高自动驾驶车辆的安全性和稳定性。通过定位与导航技术,无人驾驶卡车可以实现精确的路径规划和自主导航。该技术主要包括卫星定位、惯性导航、地图匹配等。

3) 决策与控制技术。决策与控制技术是无人驾驶卡车的核心,主要包括环境感知、行为决策和车辆控制等方面。通过决策与控制技术,无人驾驶卡车可以实现自主行驶、避障、车道保持等功能。

4) 通信与协同技术。通信与协同技术在无人驾驶卡车中主要应用于车辆之间、车辆与基础设施之间的信息交互。通过车联网技术,无人驾驶卡车可以实现车辆自主编队、交通信号协同等功能,提高车辆运输效率。

2 无人驾驶电动自卸卡车的优势

传统燃油自卸卡车采用柴油机为动力,技术成熟;新能源电动自卸卡车采用电力为动力,为近些年的新技术。2 种类型的卡车各自的优势与缺点见表 1。从表 1 中可以看出,无人驾驶电动自卸卡车除了前期投资高外,优点较传统燃油车多,优势明显,更符合当今社会在节能、减排、安全环保方面的需求。

2.1 无人驾驶电动自卸卡车的主要优点

1) 节能减排。电动机没有传统内燃机的热损失和机械损耗,将电能直接转换为机械能,能量转换率能达到 90% 左右。自卸卡车通常采用的柴油机内燃机转换效率一般在 30% ~ 40%。因此,采用电动自卸卡车能够增强能量的利用率,起到节能的作用。此外,电动自卸卡车采用电能驱动电动机,不会产生汽车尾气,对改善矿山空气质量和减少环境污染有着非常重要的作用。

2) 保障人员安全。无人驾驶最大的优势是极

表 1 传统燃油车与无人驾驶电动车的比较^[10-11]

Table 1 Comparison between traditional fuel vehicles and autonomous electric vehicles^[10-11]

项目	优点	缺点
燃油自卸卡车	价格低,投资低;	需要驾驶员;
	技术成熟、性能稳定;	排放尾气;
	加油速度快	保养成本高;
		运输成本高;
		燃油转换率低,能耗高;
		噪声大
无人电动自卸卡车	无驾驶人员,安全性高;	价格高,投资高;
	无尾气,零排放;	故障率多一些;
	保养成本低;	充电速度慢
	运输成本低;	
	电能转换率高,能耗低;	
	噪声小	

大地减少了驾驶人员,车辆上无需配置驾驶员,只需要配置少量的车辆维护人员。在矿山作业环境中,清理矿山滑移面区域、地下采空区不明显区域上方运输矿岩、极端天气下作业都会给设备及人员带来潜在的危险和伤害,采用无人驾驶卡车能够避免人员直接处于危险环境中作业,保障人员安全,降低伤亡率。

3) 降低驾驶人员劳动强度。矿山自卸卡车驾驶员工作强度高,通常每班开车时间 8 ~ 12 h。采用无人驾驶技术后,驾驶人员由传统的在卡车上持续高强度工作转换成在办公室监控,根据需要遥控故障车辆或者现场故障排产作业,极大地降低了驾驶员的工作强度,使驾驶工作更轻松。

4) 增加有效作业天数,增产提效。在极端天气情况下,比如大雾天气、沙尘天气,无人驾驶卡车通过感知系统运行,能够避免碰撞事故的发生,保障正常生产,增加企业的生产作业天数,提高企业矿石生产量。而在传统的人工驾驶卡车运输条件下,为保障人员和设备安全需要停止作业。

5) 车辆运行更加规范、反应速度更快。露天矿无人驾驶通过感知周围环境,自动控制车辆的速度和转向,保证车辆安全、行驶可靠。汽车根据程序中规划好的线路和运行规则无条件地执行,使驾驶行

为更加规范,无人驾驶车辆的智能启停程序比人工反应速度更加快捷^[9,12]。

2.2 无人驾驶电动卡车与传统燃油自卸卡车应用对比

无人驾驶电动自卸卡车可以降低人为因素导致的卡车出勤率降低问题,提高卡车的运输效率。目前无人驾驶电动卡车已实现全天候运行(除加油或者换电时间外)。本次通过两个矿山的运营场景来说明无人驾驶电动卡车在生产运营成本方面的优势。

2.2.1 场景 1——单台载重 90 t 级电动卡车与传统燃油卡车比较

矿山采用额定载重 90 t 级的矿用自卸卡车运输矿石,重车下行,运输距离在 3 km 内,采用传统的柴油车和纯电动卡车运行数据对比情况见表 2。

表 2 卡车综合成本比较

Table 2 Comparison of between traditional fuel vehicles and autonomous electric vehicles on comprehensive cost

项目	柴油车	纯电卡车
油价/(元·kg ⁻¹)	7.59	0.634
油耗/(kg·t ⁻¹)	0.117	0.247
吨成本/(元·t ⁻¹)	0.89	0.156
耗油量/(kg·h ⁻¹)	29.72	60.939
成本/(kg·h ⁻¹)	225.57	38.60
保养件、润滑油	发动机/(元·h ⁻¹)	9.76
	变速箱/(元·h ⁻¹)	1.79
	发动机/(元·h ⁻¹)	20.93
周期性大修更换	变速箱/(元·h ⁻¹)	19.27
	电池/(元·h ⁻¹)	55.81
小计/(元·h ⁻¹)	277.3	94.4
差值/(元·h ⁻¹)	182.9	

按每年运行 5 500 h 计算,采用电车每年可节省费用 1 005 950 元。

2 种自卸卡车的年度二氧化碳(CO₂)和碳排放量见表 3。

采用电动卡车每年可减少排放 CO₂259 618 kg,减少碳排放 70 796 kg,碳排放的降低能有效地降低企业碳排放指标。

表 3 二氧化碳(CO₂)和碳排放量比较

Table 3 Comparison on carbon dioxide(CO₂) and carbon emission

项目	CO ₂ /kg	碳/kg
电	334 159	91 165
柴油	593 777	161 961
差值	259 618	70 796

2.2.2 场景 2——无人驾驶电动卡车运营模式与传统燃油卡车运营模式对比

某南方水泥矿山采用额定载重 70 t 级的矿用电动自卸卡车运输矿石,年运输总量 3 000 万 t,卡车数量 45 台,重车下行,运输距离在 1.5 km 内,采用无人驾驶纯电动卡车运行数据与传统有人驾驶卡车对比情况见表 4(参考运营单位数据)。

该场景下采用无人驾驶电动自卸卡车较传统的有人驾驶燃油自卸卡车每年节省 1 132 万元左右,5 年可节省费用 5 600 万元左右。

2.2.3 小结

通过场景 1、场景 2 分析可以看出,无人驾驶电动卡车在成本降低和碳排量降低方面均有显著的效果。

无人驾驶电动自卸卡车的效率和电耗受地形和冷热环境影响较大,重车下坡情况下单次换电时间长达 18 h,重车上坡的寒冷地带电车单次换电时间较短,在 2~3 h。自卸卡车的电池单次运行时间越短,换电或充电越频繁,汽车的有效运行时间越短,运行效率会打折扣。因此,不同的矿区环境应综合分析电车的运行效率、电力成本及运行成本,因地制宜地采用适合的运输方案。

3 无人驾驶自卸卡车技术在部分矿山的应用情况

为了更清晰地了解无人驾驶卡车的运行情况,对部分矿山实施无人驾驶技术的情况作初步统计,统计结果见表 5。

表 5 中华润水泥 B 矿山实现了全矿区运输卡车无人化,该矿山采用无人驾驶电动卡车取得了较好的经济效益和社会影响力。国家能源集团宝日希勒煤矿、中国黄金乌努格土山铜矿、紫金矿业驱龙铜矿、中国华能集团伊敏煤矿为无人驾驶卡车划分了独立的运行区域,卡车运输速度达到 20~35 km/h;黑龙江省云山石墨矿目前试运行无人驾驶卡车

表 4 无人驾驶电动卡车综合成本比较

Table 4 Comprehensive cost comparison of driverless electric trucks

项目	传统矿卡车队	无人驾驶矿卡车队	备注
人数/人	90	18	驾驶员/运营人员
人员工资/(万元·a ⁻¹)	972	260	
车辆、系统购置成本/(万元·a ⁻¹)	900	2 100	5 年平摊
油耗费用/(万元·a ⁻¹)	2 640		模拟估算
电耗费用/(万元·a ⁻¹)		1 020	
费用合计/(万元·a ⁻¹)	4 512	3 380	
费用差值/万元	1 132		

表 5 截至 2023 年 11 月份统计的部分矿山无人驾驶卡车统计情况

Table 5 Statistics of driverless trucks in some mines as of November 2023

矿山名称	无人化技术	卡车	备注
国家能源集团宝日希勒煤矿	无人驾驶矿车	42 台矿车	极寒工况
中国华能集团伊敏煤矿	无人驾驶矿车	8 台矿车	混编
国家能源集团准能公司	无人驾驶矿车	51 台矿车	混编
江西铜业德兴铜矿	无人驾驶矿车	3 台矿车	混编
中国黄金乌努格土山铜矿	无人驾驶矿车	3 台矿车	混编
紫金矿业驱龙铜矿	无人驾驶矿车	12 台矿车	高海拔
华润水泥 A 矿山	无人驾驶矿车	5 台宽体车	全矿无人驾驶
华润水泥 B 矿山	无人驾驶矿车	45 台宽体车	混编
黑龙江省云山石墨矿	无人驾驶矿车	2 台宽体车	混编
润信大排砂石骨料项目	无人驾驶矿车	38 台宽体车	全矿无人驾驶

2 台, 2 台无人卡车与常规配置驾驶员的卡车处于混编运行状态, 运行状态良好, 未来将逐步实现卡车全矿无人化作业。

受技术发展进程、现场管理水平与矿山推动力度等多方面因素影响, 无人化系统在不同的矿山应用效果存在一定差异, 部分矿山应用效果未达到预期。通过对技术的分析, 在配套系统与组织管理满足要求的前提下, 无人驾驶卡车能够发挥其工作效率。部分矿山已实现工作面无人化, 卡车的运行效率也符合预期。

从统计的数据上分析, 规模小、矿山设备少的条件下采用无人驾驶卡车相对容易; 大规模矿山如煤矿、水泥矿山无人驾驶卡车应用推广较快; 而金属矿山受工作面的限制, 全矿采用无人驾驶卡车推进速度较慢。

4 无人驾驶电动自卸卡车在露天矿山面临的主要问题

无人驾驶自卸卡车经过多年的技术与现场试验, 目前已在多个矿山开展了卡车无人化运输, 个别矿山已实现了全矿无人化卡车运输。根据矿山的环境特点、与矿山企业及智能卡车运营单位的沟通了解, 无人驾驶卡车在矿山面临的主要问题如下。

1) 复杂地形与恶劣环境。矿山开采条件复杂多变, 例如石场或者煤矿作业面较平坦、宽广, 同时作业水平少, 而有色金属矿山采场作业面相对较窄, 同时作业的水平台阶较多, 采场与排土场地形变化周期快; 内蒙古、黑龙江区域极端低温多、冰雪天多、大风天气多; 南方矿山雨水大、多雾天; 青海、西藏地区紫外线强等复杂情形, 都对无人驾驶卡车提出了

挑战。此外,矿山运输条件差,受风沙、雨雪、粉尘的影响,对运输设备和精密仪器的耐用性和实用性要求高。

无人卡车需要对地形和道路进行识别,保障车辆安全平稳运输。地形和道路的快速变化,加大了运输卡车的感知系统计算量,增加了感知系统容易损耗的配件成本。

2) 安全风险。矿山环境中存在诸多安全隐患,如岩石滚落、塌方、陷落、场地不平整等,这些风险可能对无人驾驶卡车的安全运行造成威胁。矿山环境中场地不平整和岩石滚落较为常见,需要考虑无人驾驶卡车在行驶中遇到道路石头、车辆躲避的同时不与其他车辆发生碰撞或者行驶到边坡危险区域等问题。

3) 部分矿山投资维护成本高、效益不明显。当前改造常规自卸卡车到无人驾驶卡车成本较高,单台设备改造费用在50万~100万,同时需要配套的通讯基站、计算平台系统和其他设备的车载定位、感知设备。摄像头、雷达均易损耗,需要定期更换配件,升级软件系统。而根据目前收集到的矿山无人驾驶运行数据显示,无人驾驶设备在封闭区域能达到有人驾驶车辆的运输能力,在混编模式下较有人驾驶车辆的运输效率相对较低。

4) 责任区分不明确与心理接受度较低。无人驾驶卡车因系统问题、车辆部件故障或传感器故障造成的损失,主体责任区分界限不明确^[13]。传统车辆有定期维护和保养,而改造车辆的智能系统由第三方维护,即存在2个维保单位。

在心理上,部分传统矿山和施工承包单位对无人驾驶卡车技术存在抵触,一方面由于该技术的成熟度不足、前期投资较高,另一方面考虑当地就业率和自卸卡车的生产效率。

5 结语

基于无人驾驶电动卡车在露天矿山的运行现状,无人驾驶电动卡车的可实用性已得到了证实。部分科技公司已承接了矿山的无人卡车运输矿岩工程,验证了无人驾驶卡车相比传统的燃油自卸卡车在经济性上也是有优势的。

无人驾驶电动自卸卡车虽然有投资高、电池充电时间长、受工作环境影响故障率高等不利条件,但是随着电池成本的降低、电池的大型化、充电时间的

大幅度缩短、换电技术的成熟应用、无人智能技术的发展、配件的更新换代,无人驾驶电动自卸卡车的购买成本和使用成本会进一步降低,无人驾驶自卸卡车较传统燃油自卸卡车在经济性上的优势会更加明显。

可以预见,随着更多无人电动自卸卡车的投入运行,运营数据的不断积累、解决方案的成熟、相关法律与管理水平的完善,工作面无人化系统的整体效率、安全性、稳定性、经济性均会不断提高,未来无人驾驶电动卡车将在矿山行业发挥出更好的经济效益和环境效益。

[参考文献]

- [1] 自然资源部,生态环境部,财政部,国家市场监督管理总局,国家金融监督管理总局,中国证券监督管理委员会,国家林业和草原局. 关于进一步加强绿色矿山建设的通知[EB/OL]. [2024-04-16]. https://gk.mnr.gov.cn/zc/zxgfwj/202404/t20240416_2842551.html.
- [2] 国家矿山安全监察局. 关于印发《关于深入推进矿山智能化建设 促进矿山安全发展的指导意见》的通知[EB/OL]. (2024-04-24) [2024-04-30]. http://www.mem.gov.cn/gk/zfxxgkpt/fdzdgnr/202404/t20240430_486617.shtml
- [3] 邹龙,张君,曾体强,等. 自动驾驶技术在井下矿用卡车中的应用[J]. 中国矿山工程,2022,51(6):77-82.
- [4] 武懋. 平朔东露天矿矿用卡车无人驾驶系统应用[J]. 露天采矿技术,2023,38(4):61-63,69.
- [5] 顾清华,宋江珊,薛步青,等. 露天矿无人驾驶矿用卡车排土边缘警戒线更新方法[J]. 矿业研究与开发,2022,42(2):151-157.
- [6] 李庆玲,张慧祥,赵旭阳,等. 露天矿无人驾驶自卸卡车发展综述[J]. 煤炭工程,2021,53(2):29-34.
- [7] 闫凌,黄佳德. 矿用卡车无人驾驶系统研究[J]. 工矿自动化,2021,47(4):19-29.
- [8] 王妍,白洪亮,蒋方正,等. 露天矿无人驾驶运输关键技术研究[J]. 现代矿业,2023,39(10):178-181.
- [9] 张晞,梁斌等. 露天矿山无人驾驶运输技术现状及发展趋势研究[J]. 煤炭工程,2022,54(6):132-138.
- [10] 王本金,王山东,尹力,等. 露天采场无人驾驶矿车试运行[J]. 现代矿业,2021,37(6):159-161.
- [11] 武懋. 平朔东露天矿矿用卡车无人驾驶系统应用[J]. 露天采矿技术,2023,38(4):61-69.
- [12] 武讲,郑群飞. 哈尔乌素露天矿无人驾驶方案研究[J]. 金属矿山,2021(2):167-172.
- [13] 李亚倩,何昕航. 无人驾驶车辆交通肇事的罪责刑相适应研究[J]. 西部学刊,2022(7):73-77.

Application analysis of unmanned electric dump truck in open pit mine

HU Datao, XI Yong, MA Ning

(China ENFI Engineering Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: Dump truck is the main tool for transporting minerals and rocks in mines, playing an important role in open-pit mining production. In recent years, the assessment indicators for energy conservation, emission reduction, and intelligent technology in mines have become increasingly strict. With the rapid development of battery technology and unmanned technology, unmanned electric trucks have also carried out experiments and applications in the field of mining. This paper carried out practical investigation and status analysis on the application of unmanned electric dump trucks in open-pit mines, listed application examples to illustrate the advantages and economic value of unmanned electric dump trucks compared with traditional fuel dump trucks in mining applications, and sorted out the application situation of unmanned dump trucks. It provides reference for the related research and application of unmanned electric dump truck technology.

Key words: unmanned; electric dump truck; open-pit mine; energy saving; safety; intelligent mining



(上接第 20 页)

Research and application of wireless communication mode of unmanned electric locomotive for intelligent mine rail transportation

LIU Wei, LIU Zhiqiang

(China ENFI Engineering Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: The running route of the electric locomotive for mine rail transportation in China covers the underground electric locomotive track in the mine, and the transmission mode of wired communication cannot be used to collect and control all the data on the electric locomotive. The data that the locomotive needs to communicate with the control room includes voice data, locomotive positioning data, control data, video data, etc. The traditional communication mode of most electric locomotives only uses WiFi wireless communication technology, which cannot ensure the stable and reliable transmission of various industrial data on mobile electric locomotives. In this paper, a variety of transmission modes of wireless communication of unmanned electric locomotives are studied, and according to the moving scenarios of mine electric locomotives, a wireless communication data transmission mode with high stability, high reliability, economic and practical, and easy expansion and maintenance suitable for intelligent mine unmanned electric locomotives is proposed.

Key words: intelligent mining; rail locomotives; wireless communication technology; data transmission; 5G; WiFi6

