

露天煤矿无人卡车运输系统运营痛点及精细化提升对策研究

冷 睿¹ 董国淏²

1. 国能北电胜利能源有限公司 内蒙古自治区 锡林郭勒盟 锡林浩特 026000

2. 锡林浩特市第三中学 内蒙古自治区 锡林郭勒盟 锡林浩特 026000

【摘 要】：露天煤矿无人卡车运输系统是智慧矿山建设的一部分，无人卡车运输系统运行效率和稳定性同矿山安全生产、降本增效目标相关联。本文以国能北电胜利能源有限公司胜利一号露天煤矿无人驾驶矿卡项目为例，从常态化运营过程中无人卡车运输系统存在的装、运、卸全流程效率瓶颈、矿区恶劣环境对感知系统造成的影响、无人/有人混合编组的协同调度困难、设备健康管理及运维保障不足等问题入手进行分析。在此基础上，从作业流程优化、感知系统加强、混合编组调度体系完善、预测性维护体系创建等各方面提出精细化提升措施。无人卡车运输系统的运营优化属于技术迭代、管理革新和制度保证三位一体的综合性工程，需要达成从单点突破到全链条协同的目的才能达成“安全、高效、稳定”运行目的。

【关键词】：露天煤矿；无人驾驶；矿用卡车；运营痛点；精细化提升

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.031

1 引言

露天煤矿运输环节属于矿山生产系统中劳动密集程度最高、安全风险最大的部分。长期以来矿区运输存在着司机招工难、传统模式下效率提高受限制、有人驾驶一直存在安全风险等主要问题^[1]。矿山地处偏远地区，工作环境恶劣，生产生活条件艰苦，生活节奏快，竞争激烈，给招聘造成极大困难。运输作业安全管理工作一直把“人”作为中心，人员状态不稳定、夜间照明不好等都会造成安全风险无法彻底消除^[2]。

无人驾驶技术的引入为破解上述困局提供了技术路径。近些年来，以5G通信、北斗高精度定位、多传感器融合感知为代表的新型信息技术迅速渗透到矿业当中，矿用卡车无人驾驶由试验验证转向规模化应用。国能北电胜利能源有限公司（以下简称“胜利能源”）自2020年率先启动智慧化矿山建设以来，累计投入资金超过4亿元，在胜利一号露天煤矿部署了国内第一个实现无安全员常态化运行的220吨级矿用无人驾驶卡车编组^[3]。截至2025年9月，无人驾驶矿用卡车累计运输作业次数为11万次以上，运输里程超过55万公里^[4]。但是无人驾驶由“跑起来”向“跑得稳”迈进的时候，装—运—卸全流程的效率瓶颈、恶劣工况下的感知可靠性、多车协同调度等运营层面深层次的问题开始凸显出来，成了系统效能发挥到极致的阻碍因素。

2 无人卡车运输系统运营现状

2.1 系统建设概况

胜利能源无人卡车运输系统设在内蒙古锡林郭勒盟胜利一号露天煤矿。矿区属于典型的大陆性干旱气候，冬季寒冷漫长，极端低温可达零下40摄氏度，夏季短暂，年温差大。极端气候条件下，无人驾驶系统所用的硬件以及算法都要达到很高的可靠性要求^[5]。

胜利能源依靠5G网络、智能调度系统、大数据分析这三

者相结合的技术，创建起一个完整的智能化无人驾驶生产运输控制体系。矿区已经建成22个5G基站，物理传输链路采用光缆和微波的方式实现链路冗余和环路保护，达到矿区5G专网全覆盖。车辆端装有激光雷达、毫米波雷达、视频采集器、惯性测量单元等各类感知设备，可以对矿区环境进行高精度识别，也可以对车辆的位置以及运动轨迹进行准确的监测。系统在调度上以平台下发执行指令的形式完成了从停车场发车、装载作业、路径行驶、卸载作业、收车的全过程。

2.2 运营成效

经过不断的迭代优化之后，胜利能源无人卡车运输系统取得了很好的运行效果。2023年3月项目成功实现安全员下车编组24小时连续运行。早、中、夜三班24小时重载编组试运行，单日剥离生产达270车以上，单班剥离平均完成90车以上。2023年4月圆班拉运车数达到300车，完成316车次安全运行。到2024年7月为止，安全员连续工作700天以上，累计运输量达1000万立方米以上，累计运输里程达40万公里以上。项目被科技部列为重大科研项目，是我国矿区L4级无人驾驶运输的开端。无人驾驶已经达到了有人驾驶效率的90%左右。

3 运营核心痛点分析

3.1 装—运—卸全流程效率瓶颈突出

无人卡车运输系统已经实现了全流程自动化运行，但是各个环节之间衔接的效率还比较低。装载区无人驾驶系统经常会遇到指点成功率低、预停靠生成成功率低、预停靠距离远等问题，造成卡车在装载区等待时间变长。卸载区多车同时到达时的协同通行问题也较多，由于自动驾驶技术对于交叉路口的通行策略比较保守，每个路口一般只有一辆无人矿卡可以通行来保证安全，容易造成排队等待。

3.2 恶劣环境对感知系统的持续干扰

露天煤矿的作业环境存在着高粉尘、强振动、极低温等特点，这些特点都会给无人驾驶感知系统造成持续性的考验。采煤区煤灰浓度高造成激光雷达反射率下降，煤灰过滤以及地图边界检测难度增大。在冬季极端低温下，传感器的光学窗口很容易出现结霜结冰现象，从而影响到数据采集的质量。在泥泞或者雨雪天气下，路面情况发生改变，车辆定位以及地图匹配的精确度就会降低。强振动环境会造成传感器安装位置出现微小的偏移，长期累积之后会对感知数据的准确性产生影响。

感知系统是无人驾驶决策链的第一环，数据质量的好坏直接影响到之后的规划和控制。当感知系统出现误检或者漏检的时候，车辆就会做出错误的避障决定或者路径选择，轻则造成不必要的停车等待，重则造成安全隐患。

3.3 无人/有人混合编组的协同调度困难

无人卡车运输系统不是在封闭的真空中运行的，它和电铲、推土机、洒水车、平路机、指挥车等有人驾驶辅助设备一起在同一个作业面上工作。无人驾驶车辆与有人驾驶车辆的行为模式是完全不一样的，无人车辆严格按照设定好的规则和路径行动，有人驾驶车辆有较多的主观判断和灵活性。由于混合编组的情况下无人车辆很难准确预测有人车辆的运动意图，有人驾驶员也很难对无人车辆的行为逻辑有直观的认识。

深层次问题就是目前无人驾驶系统缺少对“车、路、矿、云”等多端设备和算力的高效并行协同调度机制，不能实现大规模混合编组下的智能化监控。当编组规模由个数发展到几十辆甚至上百辆的时候，调度系统的复杂程度以及实时性要求随之提高，单靠经验规则的调度方式已经不能满足需要了。无人和有人设备协同规则缺少统一的规范，也成了影响混合编组效率的主要原因。

3.4 设备健康管理 with 运维保障不足

矿用卡车属于重型工程设备，工作环境恶劣，保养维护工作量大。无人驾驶模式下车辆实际运行时间及作业强度比有人驾驶模式要高得多，所以对设备可靠性要求更高。胜利能源依靠 220 吨级矿卡（包含北重 MT4400 和小松 830E 两种车型）的复杂应用环境，虽然已经开始创建起“车、边、云”协同的全生命周期健康管理大模型体系，但是仍然存在诸多难题。

由于高危故障样本数量少，造成漏报的风险就成为设备健康监测的主要问题。制动失效、电驱短路等关键故障在实际运行中发生的概率很小，但是一旦发生就会造成严重的后果。由于缺少足够的故障样本，传统的基于数据驱动的故障诊断模型很难训练，容易造成漏报或者误报，如下表 1 所示。

表 1 露天煤矿无人卡车运输系统运营痛点及成因分析

痛点类别	具体表现	深层成因
------	------	------

作业流程效率瓶颈	装载区指点成功率低、预停靠位置远、卸载区排队等待	调度策略缺乏全局前瞻性，多车并发路径规划算法有待优化
感知系统环境干扰	煤灰过滤难、极寒结霜、振动致传感器偏移	矿区非结构化环境特征显著，传感器防护与算法鲁棒性不足
混合编组协同困难	无人/有人车辆行为模式冲突、协同规则不统一	缺乏多端设备高效并行协同调度机制
设备运维保障不足	高危故障样本稀缺、多品牌协议封闭、维修能力参差	预测性维护体系尚不完善，数据驱动的运维转型未完成

4 精细化提升对策

4.1 作业流程优化与智能调度升级

对于装、运、卸全流程的效率瓶颈，应该由单点优化转向全链条协同优化。在装载区，采用基于动态可行行驶距离的多车协同通行决策方法来代替传统的先到先服务调度策略，可以有效地缩短停车等待时间。在卸载区制定出标准的多车卸载方案，对车辆进入卸载区的排序及路径进行优化。

在调度系统上应该使用间断式的实时卡车调度策略，即由调度系统主动触发，按照固定的周期去检测实时货流量，预测出不同的运输路线所具有的生产能力能否满足计划需求。把调度决策由“被动响应”变成“主动预判”，可以有效地削减由于频繁调度造成的生产能力损失。随着编组规模的不断扩大，应该使调度算法由原来的规则调度向以数据驱动、人工智能为基础的调度方式转变，在多车并发的情况下达到全局最优调度的目的。

4.2 感知系统增强与环境适应性提升

提高感知系统在恶劣环境下可靠性的途径有三个方向，即硬件防护、数据融合以及算法鲁棒性。从硬件角度来讲，安装抗恶劣环境传感器套件，对高粉尘环境下的激光雷达进行选型和防护设计，对于极寒环境增设传感器窗口加热及清洁装置。建立传感器定期标定、校准制度，及时消除由于振动造成的安装误差。

从算法上讲，推进多传感器数据融合感知技术的应用，用不同的传感器优势互补来弥补单一传感器在某些环境下存在的不足。对煤灰过滤、地图边界检测等难题，用深度学习的点云滤波、语义分割的方法来提高感知系统在恶劣工况下识别精度、稳定性。同时建立感知系统性能的实时评价体系，当检测到感知质量变差的时候就会自动触发降级运行或者人工介入，保证系统的安全。

4.3 混合编组协同机制与规则完善

解决无人/有人混合编组的协同调度难题要从技术和制度两个方面共同着手。从技术上讲要研发出车、路、矿、云多端设备并行协调度度的机制,把无人车辆和有人辅助设备统一纳入调度平台上进行协同管理。建立无人车辆对有人车辆行为的预测模型,使得无人系统可以更好地预估有人驾驶设备的运动意图,从而减少由于行为模式的不同而引起的冲突。

从制度上来说要制订无人和有人设备协同作业的标准化规则,对各类作业场景下通行优先级、安全距离、避让方式等关键参数做出规定。根据不同的编组规模来制定不同的协同作业方案,在编组规模较小的时候重视单车的效率,而在编组规模较大的时候重视系统的整体吞吐量。

4.4 预测性维护体系与数据驱动运维转型

创建起完备的预测性维护体系,乃是保证无人卡车运输系统长久稳定运转的重要保障。对于高危故障样本少的情况,应该采用融合架构,即把物理模型和数据驱动的方法结合起来,用机理模型来弥补数据的不足,用仿真模拟来生成典型的故障场景的训练数据,提高模型的泛化能力。推进多品牌协议适配技术研究,打通各个车型数据壁垒,达成全车队统一监测和诊

断。

运维管理上要促使维保模式由“经验驱动”变为“数据驱动”。创建起“实时监测-智能诊断-方案产生-维修回馈”这样的闭环管理机制,把每一次的维修行动变成可以剖析、可以再利用的数据资源。针对维修人员能力不一致的问题,创建起标准化的培训体系以及故障诊断知识库,缩减维修人员的培养时间,改善独立作业能力。经过预测性维护的不断改进,可以缩减非计划停机时长,改善设备整体运作效能。

5 结语

露天煤矿无人卡车运输系统属于矿山智能化转型的主要方向。胜利能源实践证明,无人驾驶技术可以实现矿区复杂工况下安全员下车常态化运行,具有替代有人驾驶的技术可行性。在作业流程上促使单点改善走向全链条协作,从硬件防护和算法鲁棒性两个方面加强协同,调动无人和有人设备的协同规则与调度机制,创建起以数据为驱动力的预测性维护体系。无人驾驶编组规模从几十辆到上百辆的变化,系统运行优化的复杂性以及它的价值也会同步提高,只有坚持问题导向、不断迭代才能把无人卡车运输系统的技术优势变成安全生产和降本增效的实际效果。

参考文献:

- [1] 栾博钰,周伟,以斯哈·米萨尔·吉斯卡尼,等.露天煤矿多干线运输系统无人卡车实时调度策略[J].煤炭学报,2025,50(10):4667.
- [2] 赵红泽,丁震,赵光辉,等.露天煤矿卡车无人驾驶道路设施设计及应用研究[J].中国煤炭,2025,51(3):84-92.
- [3] 巴特尔,戚红建,曹鋆程,等.GNSS与SINS融合下的露天煤矿无人驾驶矿用卡车视觉惯性导航方法[J].煤矿机械,2025,46(1):228-232.
- [4] 刘浩田.露天煤矿无人驾驶卡车远程应急接管系统应用[J].内蒙古煤炭经济,2025(24):151-153.
- [5] 吴中明,赵团委,司明理,等.露天矿单斗卡车采装作业煤尘污染相似实验[J].煤炭工程,2025,57(S1):165-172.