

露天矿山重型汽车复杂路况下经济运行方式技术探究

齐伟 宋建华 韩志慧

内蒙古包钢钢联股份有限公司巴润矿业分公司 内蒙古 包头 014080

摘要：公路运输矿车是矿业公司物流链中的重要组成部分，其成本控制直接关系到企业的经济效益和市场竞争能力。在通过对公路运输矿车的成本构成及其控制方法的详细分析，为企业提供有效的成本管理策略。云端智能调度优化，云控平台实时分析车流密度、路线拥堵及设备状态，动态调整任务分配，减少空驶与等待时间。

关键词：露天矿山；重型汽车；复杂路况下；经济运行方式

复杂路况下露天矿重卡的经济运行需融合无人驾驶调度、新能源动力、高精度控制三大技术，通过全流程数字化与能源结构转型，实现安全、高效、低碳的矿山运输体系。

1 智能矿卡多维感知系统

1.1 核心感知组件。激光雷达，采用128线主雷达构建环境三维点云，精准识别障碍物边界（如落石、边坡）及装载区域语义分割，空间精度达厘米级。在短中距离场景优势显著，但对雨雾、灰尘等恶劣天气抗干扰性较弱。视觉摄像头，高分辨率光学镜头捕捉路面纹理、交通标志及人员动态，辅助AI算法识别违章行为（如未佩戴安全装备）。结合深度学习实现驾驶员疲劳监测和危险区域闯入预警。毫米波/感知雷达，利用多普勒效应实时检测移动物体相对速度，有效弥补激光雷达在远距离（> 200米）和高速场景的感知短板。全天气适应性突出，暴雨、大雪环境下仍可稳定工作。定位与辅助传感器，UWB定位系统：通过车载定位终端与读卡器协同，实现矿卡横向定位误差 < 0.3米，支持井下车辆调度防碰撞。惯导（IMU）与RTK：融合车身姿态数据与卫星差分定位，保障陡坡弯道场景的航向稳定性。

1.2 多维数据融合与处理。异构传感器协同，激光雷达点云、视觉图像、毫米波雷达目标列表通过时空对齐技术融合，生成统一环境模型，漏检率降低40%。示例：睿控创合车载AI计算机接入多路GMSL2摄像头+激光雷达+毫米波雷达，并行处理多维信号。抗干扰增强设计，针对矿山扬尘、团雾环境，采用多源数据互补策略：激光雷达受粉尘干扰时，由毫米波雷达主导障碍物探测，视觉系统校验目标属性。露天矿案例中，融合感知系统实现暴雨环境下持续安全通行。

1.3 功能应用场景。安全避障与路径规划，实时监测矿卡、工程车辆、人员等动态目标，决策系统动态调整路径，规避交叉路口碰撞风险。支持倒车场景精准泊车

（误差 < 0.3米），解决溜车冲撞挡墙问题。智能化作业协同，与挖掘机OBU通信联动，实现装载区自动对位装料，装车效率提升30%。无人矿卡项目应用：淋水房通过率100%，地磅称重次数减少47%。应急与合规管理，电子围栏划定高危区域，人员闯入即时触发声光报警。视频AI分析矿卡驾驶室超员、脱岗等违规行为，提升安全管理效率。

1.4 系统集成与成效。“车-云-地-网”架构：感知数据上传云端调度平台，优化全域车流分配，减少空驶能耗。经济效益：易控智驾无人矿卡累计节省碳排放1500吨，出勤率超95%；矿卡无人驾驶里程超27万公里，横向控制精度达0.19米。演进方向：正向4D感知雷达+边缘计算升级，强化极端天气下的目标轨迹预测能力，支撑L4级全无人化运营。

2 云控平台在露天矿山的应用

2.1 核心功能模块。智能调度与路径优化，实时分析车流密度、路线拥堵及设备状态，动态分配运输任务，减少卡车空驶率与等待时间。基于整数线性规划模型调度矿卡集群，能耗成本降低40%-72%，运输效率提升30%。全域作业协同，联动挖掘机、装载机等设备：远程智控系统实现装载区自动对位装料，装车效率提升30%。支持多场景协同：如准东露天煤矿实现135台无人矿卡仅需5人远程监护，7×24小时连续作业。安全监控与应急管控，集成亿像素全景监控系统：单台设备覆盖全矿场景，实时检测人员闯入、设备异常等风险。电子围栏与AI视频分析：自动识别未佩戴安全装备、疲劳驾驶等违规行为，触发即时告警。数据融合与决策支持，打破数据孤岛：整合车辆定位、路况监测、能耗统计等多源数据，构建矿山数字孪生模型。预测性维护：基于车联网数据分析部件损耗，维护成本降低30%，故障停机时间减少50%。

2.2 应用成效。降本增效，伊敏露天矿应用32台无人

矿卡，年节省人工成本750万元，生产效率达人工驾驶的90%。露天煤矿无人矿卡日产量达1.2万吨，运输人员减少80%，工作时长增加20%。安全升级，露天矿无人驾驶累计运行27万公里，横向控制精度 < 0.3 米，暴雨环境下零事故。边坡监测系统融合GNSS+遥感数据，地质灾害识别率提升40%，预警响应时间缩短至5分钟内。绿色低碳。支持新能源矿卡调度：纯电动矿卡电耗成本仅为燃油车的1/3，全生命周期碳排减少70%-90%。易控智驾无人矿卡累计节省碳排放1500吨。

2.3 技术演进方向。5G-A网络升级：低时延通信保障车-云指令实时交互，支撑200+台矿卡集群调度。边缘计算赋能：部署矿端边缘节点，提升粉尘雨雾环境下的本地决策速度。AI大模型集成：强化运输路径自学习能力，适应动态地质变化与极端天气。

3 露天矿山无人驾驶系统稳定性保障措施

3.1 多重冗余控制系统。全栈式冗余架构。采用“感知-决策-执行”三环节硬件与算法冗余设计：主控制系统故障时，备援系统可在毫秒级接管车辆控制权。露天矿案例：双控制器冗余方案实现横向控制误差 < 0.3 米，连续运行27万公里零失控。高可靠线控底盘。关键执行机构（转向、制动、驱动）配备三重独立电源与通信链路，单点故障不影响系统功能完整性。

3.2 实时云边协同监控。云端动态诊断，云控平台实时分析矿卡运行数据（定位精度、能耗曲线、部件温度），异常状态自动触发远程干预或停车指令。预测性维护模型通过车联网数据预判部件失效风险，维护响应时间缩短60%。边缘计算应急响应，矿区部署边缘计算节点：粉尘/暴雨导致通信中断时，本地系统自主执行紧急避障与路径重规划。露天矿方案支持断网续驾能力，网络恢复后自动重同步任务数据。

3.3 极端环境适应性强化。多传感器抗干扰融合，激光雷达+毫米波雷达+视觉的异构数据融合算法，扬尘场景下障碍物识别准确率 $> 95\%$ 。动态感知权重调整：雨雾天气增强毫米波雷达主导作用，粉尘环境启用激光雷达点云补偿技术。全天候定位保障，GNSS-RTK/INS/UWB组合定位：卫星信号受遮挡时，UWB基站与惯导协同定位，水平误差 < 0.5 米。露天煤矿应用高精度惯性导航，陡坡弯道航向偏差控制在 1° 以内。远程人工接管，无人驾驶舱配备全景监控与低延迟操控台，紧急情况下远程操作员可无缝接管车辆控制权。露天煤矿实现135台无人矿卡仅需5人监护，接管响应时间 < 2 秒。

3.4 持续验证与优化。数字孪生测试：构建矿山虚拟场景库，模拟塌方、团雾等200+极端工况，算法迭代周

期缩短50%。实车压力测试：完成 -40°C 低温冷启、40%陡坡驻车、60cm涉水等极限验证，系统可用性 $> 99.5\%$ 。稳定性成效：路凯智行长治矿区项目实现5台纯电无人矿卡全流程无人化闭环作业，故障率较人工驾驶降低70%；国能北电胜利能源无人驾驶系统连续作业12个月无重大安全事故。

4 露天矿山重型汽车复杂路况技术实现方式

4.1 动力与驱动系统优化。高扭矩电驱动技术，大功率电机配合传动装置提供强劲动力输出，确保矿车在爬坡（最大支持40%坡度）及坑洼路段保持稳定牵引力。电动轮驱动方案通过精准控制轮端扭矩，避免复杂路面打滑和陷车。智能能量管理，增程式技术优化能源分配，在重载爬坡时自动提升输出功率，下坡时启用能量回收降低制动损耗。

4.2 底盘与悬挂系统强化。铰接式车身设计，车身中部采用液压铰接转向结构，增强车辆在狭窄弯道和崎岖地形的机动性，最小转弯半径减少30%。独立液压悬挂系统自动调节车轮高度，适应高低不平的路面，减少车体颠簸。全轮驱动与差速控制，多轴驱动配合电子差速锁，实时分配各车轮扭矩，确保单轮悬空或打滑时仍保持驱动力。

4.3 智能决策与路径规划。动态路况感知，激光雷达+毫米波雷达融合感知：厘米级精度识别路面起伏、落石及软质地基（如泥沼），数据更新频率 $> 10\text{Hz}$ 。视觉系统辅助识别道路纹理变化，预判潜在陷车风险。自适应路径生成，基于实时地形数据规划最优路径：优先选择坡度平缓、地质坚硬路段，避开深坑与松散边坡。露天矿应用案例：系统在27万公里运行中横向控制误差 < 0.3 米，复杂路面全速域（0~30km/h）稳定跟踪路径。

4.4 线控执行与安全冗余。高精度线控底盘，三重冗余线控制动系统：响应时间 $< 100\text{ms}$ ，陡坡场景自动启用驻车制动防溜车。转向系统双控制器热备份，单点故障时无缝切换。多级应急机制，路况突变（如塌方）时，云端协同边缘计算节点启动紧急避障，同步触发声光告警并降速至安全阈值。

5 露天矿山重型汽车复杂路况技术应用场景与效果

5.1 关键技术应用成效。动力与机动性提升，爬坡能力：40%陡坡工况下动力输出稳定，载重70吨矿卡爬坡速度 $\geq 8\text{km/h}$ ；弯道效率：铰接车身设计使重载转弯时间缩短40%，减少轮胎磨损。全地形通过性保障，露天矿累计运行27万公里，复杂路面横向控制误差 $< 0.3\text{m}$ ，速度误差 $< 2\text{km/h}$ ；煤矿135台无人矿卡实现60cm深坑、 30° 侧坡100%安全通过。极端环境适应性，华为方案支持海拔

5000米高原矿（西藏玉龙矿）7×24小时作业，-40℃低温冷启成功；雨雾天气定位精度保持 $\leq 0.5\text{m}$ ，粉尘环境感知失效率 $< 3\%$ 。

5.2 技术演进方向。4D感知雷达：强化未知道路实时建模（如塌方后新路径）；车云协同控制：低时延通信保障200+台矿卡集群调度一致性；材料轻量化：高强度底盘减重15%，提升复杂路况载重比。典型案例：国能准东露天矿203台无人矿卡规模化应用，复杂路况下年运输量提升40%，事故率下降90%。

6 成本控制策略

6.1 优化运输路线。通过科学合理的运输路线规划，可以有效减少运输距离和油耗，从而降低变动成本。减少坡道占比的影响，降低运矿车单耗。一是部室积极协调胶带运输的产量，降低运矿车的爬坡距离；二是严格把控道路质量验收，控制坡度处于正常范围；三是根据生产任务，调整排土场的翻卸位置，减缓坡道占比增加的趋势。

6.2 缩减无效移动，避免不必要的浪费。一是在各停车场增设临时故障处理点，减少运矿车的回库次数；二是根据采场生产的推进，实现多个停车的布局；三是调整油罐车司机的上班模式，利用点检时间，进行加油作业；四是在多个排土场增设零时加油点，实现“小车找大车”的加油模式。

6.3 加强协调沟通，减少等待时间。一是主动与生产部和采矿部建立良好的外部协作关系，及时调整出车台数；二是构建和谐的内部工作氛围，加强各班组的协作能力；三是利用试铲的形式，合理控制出车数量和顺序，减少待铲时间。

6.4 加快新技术的应用，缓解运矿车性能下降的趋势。一是830E车型的节油卡试验完成，已积累大量数据，预计下半年进行改造；二是根据积累的发动机运行数据，推行运矿车柔性驾驶；三是试验发动机的预热系统，减少设备的冬季热车时间；四是推行优秀的先进操作法，如化运矿车翻卸角度和翻卸距离、双半径推排作业法；五是QSK60发动机超级保养包的持续推广，目前已安装36台220吨级运矿车，单台年降本约为5.12万元。

6.5 精确备件计划，源头把控费用发生。一是依托部室的数据化平台，搭建备件消耗数据库，精确备件的消

耗周期，为备件计划的上报提供坚实的基础；二是及时关注库存，定期开展备件的清点工作，做到心中有数；三是加大备件计划的审核力度，制定了部门的材备件计划审批流程。

6.6 提升维修质量，杜绝设备事故。一是持续加强点巡检工作，推动三级点检工作的开展；二是制定了检修项目的验收流程，严格把控维修质量，杜绝设备带病作业；三是重新梳理保养项目，制定更加详细的保养表；四是开展设备的专项检查，重点查找设备隐患，把隐患消灭在萌芽中；五是开展设备的“大保养”的维修模式，减少故障时间，降低维修成本。

7 露天矿山重型汽车复杂路况技术挑战与解决方案

7.1 系统性技术突破。动态路况智能决策，挑战：突发塌方/落石致路径中断，方案：激光雷达+毫米波融合感知（10Hz刷新率），云端重规划避障路径，成效：西湾矿27万公里运行零失控，能源与成本优化，挑战：重载工况燃油成本占比超12%，方案：纯电驱动+智能换电（8分钟/次），增程式动能回收。成效：吨公里成本从3.2元降至1.8元（-44%）。人机协同安全冗余，挑战：人工驾驶夜间事故率占70%，方案：三重线控制动冗余+远程监护介入，成效：预测性维护使故障率降低70%。

7.2 综合效益提升。安全增效：无人驾驶实现21小时/天连续作业，运输效率达人工135%。人力优化：单台矿卡节省2-3名司机，用工成本降85%。绿色转型：30台电动矿卡年减碳3000吨，轮胎磨损减少30%。技术演进：车云协同控制推动200+台矿卡集群调度时延 $< 100\text{ms}$ ，实现全矿区无人化作业。

总之，公路运输矿车的成本控制是企业提高经济效益和市场竞争力的重要手段。通过优化运输路线、减少坡道占比的影响，降低运矿车单耗、缩减无效移动，避免不必要的浪费、提升维修质量等措施可以有效降低运输成本，实现可持续发展。

参考文献

[1]张红,露天矿山重型汽车复杂路况下经济运行方式技术分析.2022.

[2]赵小龙,露天矿山重型汽车复杂路况下经济运行方式技术探讨.2023.