

露天矿山无人驾驶矿卡环境感知与决策控制技术

李庆祥 陈思煜

呼伦贝尔东明矿业有限责任公司 内蒙古 呼伦贝尔 021000

摘要: 露天矿山开采环境复杂恶劣,传统人工驾驶矿卡存在安全隐患大、运营成本高、作业效率受人为因素影响显著等问题。无人驾驶矿卡作为智能矿山建设的核心装备,其环境感知与决策控制技术是实现安全高效自主运行的关键。本文系统阐述了露天矿山无人驾驶矿卡的技术架构,重点分析了复杂矿区环境下的多传感器融合感知、高精度定位与地图构建、动态障碍物检测与跟踪、道路边界与可行驶区域识别等环境感知技术,以及行为决策、运动规划、轨迹跟踪控制等决策控制技术。针对矿区非结构化道路、多尘扬尘、光照变化、GPS信号遮挡等特殊挑战,讨论了相应的技术解决方案。最后,展望了车路云协同、端边云融合计算、自主学习进化等未来发展方向,为露天矿山无人驾驶矿卡技术研究与应用提供参考。

关键词: 露天矿山;无人驾驶矿卡;环境感知;决策控制;多传感器融合

引言

矿产资源是国民经济的重要基础,露天开采因效率高、成本低、安全性好而广泛应用。然而,其运输作业面临道路恶劣、重载下坡频繁、扬尘严重、能见度低及矿卡盲区大等挑战,事故频发,且招工难、留人难问题日益突出。无人驾驶技术为此提供了新路径。相比城市道路,露天矿山具有道路固定、交通参与者少、流程标准化等优势,被视为自动驾驶优先落地场景。自21世纪初,卡特彼勒、小松等国际企业率先布局,我国虽起步晚但进展迅速,已实现多矿区规模化应用。环境感知(“眼睛”)与决策控制(“大脑”)是两大核心技术,分别负责识别非结构化道路、障碍物等要素,并规划执行行驶轨迹。但矿区多尘、GPS信号弱、光照剧烈变化及极端气候等特殊环境,对系统提出远超常规自动驾驶的严苛要求。本文系统梳理关键技术进展,分析难点与对策,为相关研究提供参考。

1 露天矿山无人驾驶矿卡技术架构

无人驾驶矿卡系统采用“感知-规划-控制”闭环架构,融合车端、云端与路侧协同。其技术架构包含六大模块:环境感知层通过激光雷达、摄像头、GNSS等多传感器融合,生成结构化环境信息;高精度定位与建图层结合SLAM、差分GPS与惯导,实现厘米级定位并维护矿区高精地图;决策规划层完成任务、行为与动作三级决策,生成路径与速度曲线;运动控制层运用模型预测或PID控制,将轨迹转化为执行指令;车载执行层依托线控底盘实现快速可靠响应;云端协同层负责多车调度、交通协调与远程监控。其中,环境感知与决策控制是系统核心,直接决定安全边界与作业能力。

2 露天矿山环境感知技术

环境感知的终极目标是让矿卡“看懂”所处的矿区环境。与传统道路相比,露天矿山的感知对象具有显著特殊性:道路无明确车道线标识,路面起伏不平且材质多变;大型矿卡车身长宽高可达15米×8米×7米,对近距离感知盲区要求严苛;扬尘、雨雪、水雾导致传感器信号衰减;矿区多位于偏远山区,GPS信号易受地形遮挡。针对上述挑战,当前主流技术路线是多传感器融合感知,辅以针对矿区特色的专用算法。

2.1 多传感器融合感知

单一传感器存在局限:激光雷达精度高但雨雾下性能下降;毫米波雷达穿透力强但角分辨率低;摄像头纹理丰富但易受光照干扰。融合策略分前融合(原始数据对齐联合处理,信息保留好但计算量大)和后融合(各传感器独立检测后融合结果,实现简单但信息损失大)。工业界多采用“前融合为主、后融合为辅”的混合策略:关键近距区域(如车前30米)用前融合保障精度,远距区域用后融合控制算力^[1]。典型配置包括3-5台激光雷达(主+补盲)、4-6个环视摄像头、4个毫米波雷达,以及IMU+差分GPS组合。时间同步与空间标定是融合前提,标定误差需控制在厘米级。

2.2 高精度定位与地图构建

矿卡定位精度需达10厘米以内。因GPS常被遮挡,需多源融合:RTK-GPS提供绝对位置,IMU补偿信号中断时的位姿推算,激光点云匹配高精地图实现精确定位,轮速计辅助短时递推。通过卡尔曼滤波融合,可在GPS中断30秒内维持20厘米精度。高精地图包含道路拓扑、坡度曲率、作业区边界等,建图采用“采集—标注—更

新”流程，并通过运营车辆数据增量更新。鉴于矿区道路常因爆破或碾压变化，静态地图时效性受限，推动无地图或轻地图方案研究，如端到端网络直接从感知推理可行行驶区域。

2.3 矿区环境下的特殊感知问题

2.3.1 扬尘与雾霾感知

矿区运输道路扬尘浓度可达城市道路的数十倍，对视觉感知构成严重干扰。针对扬尘的点云特性表现为稀疏、低反射强度、空间连续性差，可通过点云强度滤波与空间聚类将扬尘点云识别并滤除。同时，毫米波雷达对扬尘具有穿透能力，在尘雾条件下可作为感知主力。近年来，有研究提出利用深度神经网络直接从未经滤波的点云中学习障碍物表征，实现对扬尘的隐式鲁棒性。

2.3.2 非结构化道路边界检测

矿区道路通常没有施划车道线，道路边界由路堤、路肩、排水沟或自然地形界定。道路检测算法需从点云中提取地形高程梯度变化，结合摄像头图像中的纹理突变，采用图割或条件随机场方法分割出可通行区域^[2]。基于学习的语义分割方法（如U-Net及其变体）在矿区道路分割任务中已取得较好效果，但需要大规模的像素级标注数据，标注成本较高。

2.3.3 大型铰接车辆检测

矿区内除刚性矿卡外，还存在铰接式卡车、挖掘机、推土机等铰接车辆，其车头与车身存在相对转角，传统基于矩形框的目标检测难以准确刻画其姿态与轮廓。解决方案包括：采用部件化检测框架先分别检测车头与车身再推算铰接角；或将点云聚类后拟合为多个几何基元，利用主成分分析估计各部件位姿。

2.4 感知信息的时间一致性维护

矿区环境中，剧烈颠簸导致传感器外参发生微小变化，多尘环境造成镜头与窗口污染，传感器随之出现性能退化。感知系统需要具备在线标定与健康管理能力。典型做法是：利用自然路面的静态特征（如地面点云平面约束）在线修正激光雷达与IMU的相对外参；通过分析检测结果的时序一致性（如障碍物突然出现或消失的异常跳变）判断感知异常并触发传感器自清洁或冗余切换。

3 决策与控制技术

3.1 分层决策框架

3.1.1 任务决策层

负责宏观作业调度，根据矿山生产计划决定矿卡当前执行的任务类型（装载、运输、卸载、待命或维修）。该层次通常在云端完成，考虑多车资源优化，通过求解带约束的混合整数规划问题获得全局近似最优调

度。对于突发情况（如道路阻塞、设备故障），任务决策需要动态重规划。

3.1.2 行为决策层

在给定任务目标下，根据实时环境状态选择驾驶行为，如跟驰、换道、超车、路口通行、紧急制动、避障绕行等。矿区环境下行为决策的核心难点在于：重载下坡时需提前决策减速时机以避免制动过热失效；窄路会车时需判断是否具备通行空间或需要一方停车避让^[3]。有限状态机是工业界广泛采用的行为决策模型，其状态转移逻辑清晰、可解释性强，但无法处理未见过的复杂场景。基于学习的决策方法（如深度Q网络）理论上更具泛化能力，但安全验证仍是瓶颈。折中方案是采用“规则为主、学习为辅”的混合架构，由规则确保行为的安全性边界，由学习算法优化规则中的可调参数。

3.1.3 动作规划层

将抽象的行为决策具体化为一条满足运动学约束、避障且平滑的时空轨迹，包括路径曲线和速度曲线。常用的路径规划算法包括：基于搜索的A及Hybrid A算法（在离散网格上搜索最优路径，考虑车辆最小转弯半径约束）；基于采样的RRT算法（适合高维空间但路径次优）；基于优化的方法（将轨迹规划建模为带约束的二次规划问题，求解代价函数最小化的平滑轨迹）。矿卡的大尺寸和长制动距离要求轨迹规划预留充分的安全余量，通常的做法是将车辆轮廓按一定比例（如1.2倍）膨胀后进行碰撞检测。

3.2 运动控制技术

3.2.1 横向控制

主要控制前轮转向角，使车辆横向位置和航向角跟踪参考轨迹。经典方法包括纯跟踪控制（基于几何关系计算转角）、前馈-反馈控制（前馈补偿道路曲率，反馈消除累积偏差）、线性二次型调节器（LQR）。矿用卡车铰接式转向系统存在较大响应滞后和非线性特性，单纯线性控制器难以达到理想效果。模型预测控制（MPC）因其能够显式处理系统约束（如转角限幅、转角速率限制）并预测未来状态，成为当前矿卡横向控制的主流方法。MPC在每个控制周期求解一个有限时域开环优化问题，将第一个控制量作用于系统，下一周期滚动优化。计算效率是MPC工程应用的主要制约，面向嵌入式平台的快速MPC求解器（如基于交替方向乘子法的实现）可将单次求解控制在10毫秒以内。

3.2.2 纵向控制

通过调节油门开度和制动力度实现期望速度跟踪。矿卡纵向控制的特殊挑战在于：载重变化剧烈（空车和

满载重相差数倍),导致车辆动力学参数大幅漂移;下坡时重力分量可能超过发动机制动力,必须辅以缓速制动或电制动^[4]。应对策略包括:设计自适应控制器在线估计车辆质量和道路坡度,根据估计结果调整控制参数;采用分层纵向控制结构,上层基于模型预测生成期望加速度,下层通过油门/制动映射表将期望加速度转换为执行器指令;针对长下坡工况引入能量管理策略,优先使用电制动回收能量,仅在电制动不足时投入机械制动。

3.2.3 横纵向协同控制

横纵向运动通过轮胎-路面力学耦合,独立设计可能导致稳定性问题(例如高速急转弯时侧滑)。解决思路是在MPC框架内统一处理横纵向动力学,构建以位置、速度、航向角、横摆角速度为状态变量的预测模型,同时约束横向加速度和纵向冲击度以保证乘坐舒适性与货物稳定性。

3.3 安全冗余与失效控制

无人驾驶矿卡的安全容错至关重要。决策控制系统应具备多层次的安全冗余:第一层为实时监控模块,持续监测感知、决策、执行各环节的状态,检测到异常时迅速降级;第二层为独立的安全监控处理器(通常采用功能安全等级ASIL-D的芯片),使用异构传感器(如独立的单线激光雷达)判断是否存在碰撞风险,必要时直接触发紧急制动;第三层为远程驾驶接管,当车载系统完全失效时,通过4G/5G网络将控制权移交远程驾驶舱,由人类驾驶员完成脱困。失效模式的具体应对策略需根据危险程度分级处理:感知数据丢失(如摄像头遮挡)属于低风险,可降速运行并请求传感器清洁;定位失效属于中风险,应沿当前道路减速靠停;制动系统部分失效属于高风险,应启用驻车制动和缓速制动协同,同时向调度中心发送告警;完全失控属于最高风险,需自动激活主动避撞系统并远程呼叫救援。

4 关键技术与挑战

露天矿山无人驾驶仍面临多项关键技术挑战:一是高鲁棒性感知,极端天气下激光雷达与摄像头性能下降,非合作障碍物(如落石、塌陷)检测精度不足,需

探索多频谱融合方案;二是恶劣环境下的定位可靠性,在无GPS区域依赖IMU与激光里程计易致误差累积,需结合自然路标重定位,但特征匹配鲁棒性待提升;三是复杂场景决策智能,重载下坡等极端工况涉及高不确定性权衡,基于规则的方法覆盖有限,强化学习具潜力但存在安全与迁移难题;四是协同控制不足,当前以单车智能为主,多车在共用区域易陷入效率“囚徒困境”,需构建集中调度与分布式协商混合框架;五是功能安全与预期功能安全(ISO 26262/21448)认证要求高,矿区缺乏系统性风险识别方法与测试工具链。

5 结语

露天矿山因场景结构化程度高、交通参与者单一,被视为无人驾驶技术的“初级考场”。本文从环境感知与决策控制两大核心维度,系统梳理了无人驾驶矿卡的关键技术体系,分析了矿区特殊环境带来的挑战及主流应对方案。当前该领域已迈过原理验证阶段,正处于规模化应用攻坚期。未来将呈现“感知更全面、决策更智能、系统更协同、部署更经济”的趋势:感知向多模态、多层次演进,提升全天候适应性;决策融合数据驱动与知识引导,增强自主学习与策略优化能力;系统构建“车-路-云”协同的“云边端”智能架构;部署则趋向轻量化、低成本,推动技术向中小型矿山普及。需清醒认识到,矿区无人驾驶不仅是技术问题,更涉及生产流程再造、管理变革与人员转型。唯有产学研用深度融合,紧扣矿山实际需求,方能使其真正成为智能矿山建设的核心驱动力。

参考文献

- [1]石昌景,刘光,葛继平,等.露天矿山运输车辆无人驾驶系统研究[J].价值工程,2024,43(25):152-155.
- [2]王威,祁汉文.露天矿山无人驾驶智能集群应用及挑战[J].露天采矿技术,2026,41(1):44-48.
- [3]林巧,张磊,何玉东.露天矿山无人驾驶常态化应用面临的挑战及对策分析[J].智能矿山,2025,6(1):36-42.
- [4]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.