

煤矿无轨胶轮车运输的智能控制与管理研究

王传景 李吉刚 董润泽

内蒙古双欣矿业有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要: 针对煤矿无轨胶轮车传统运输模式管控粗放、安全隐患多、运输效率低、运维滞后等问题,本文结合井下低光照、多盲区、强电磁干扰的复杂工况,设计多传感器融合智能感知系统,搭建自适应控制与车路协同交互控制架构。同时构建智能调度、全生命周期运维、安全预警一体化管理体系,经仿真与工程应用验证,该方案可显著提升运输安全性与效率,降低运维成本,为煤矿辅助运输智能化升级提供技术支撑。

关键词: 煤矿;无轨胶轮车运输;智能控制;管理

引言: 无轨胶轮车是煤矿井下辅助运输的核心设备,广泛应用于人员接送与物料转运作业。当前煤矿井下运输多依赖人工操控与经验调度,存在环境感知不足、控制精度低、多车协同性差等诸多弊端,易引发碰撞、超速等安全问题,且车辆空载率高、运维滞后,严重制约矿井辅助运输安全高效运行。为破解传统运输管控瓶颈,本文开展无轨胶轮车智能控制与管理体系研究,助力煤矿智能化安全生产建设。

1 煤矿无轨胶轮车运输系统及现存问题分析

1.1 无轨胶轮车运输系统概述

(1) 无轨胶轮车设备类型及适用场景。分为防爆柴油机胶轮车(长距离、重载)与蓄电池胶轮车(短途物料转运及人员接送)。按功能分运人车、运料车、铲运车及多功能服务车,分别服务人员运输、材料搬运、巷道清理及辅助作业。(2) 传统作业流程与运行模式。流程为“任务下达—车辆调度—装载运输—卸载返程”,运行以固定路线往返和临时调派相结合,由调度室统一协调,按班次计划执行^[1]。(3) 井下复杂运输环境特征。通道低光照、多弯道、多盲区,交叉口及转弯处视野受限;大功率变频设备、馈电电缆等产生强电磁干扰,影响信号传输,给精准控制与实时通信带来严峻挑战。

1.2 传统运输控制模式现状

(1) 人工操作驾驶控制模式及运行参数管控方式。目前以驾驶员手动操控为主,运行参数(速度、挡位、制动压力等)依靠仪表盘读取与人工记录,速度限制依赖驾驶员经验判断,缺乏实时闭环管控手段。(2) 传统车辆速度、制动、转向控制技术原理。速度控制通过油门踏板调节发动机供油量实现;制动采用气压或液压鼓式制动器,依靠脚踏阀控制制动压力;转向为液压助力转向,方向盘机械阀控制油液流向,三者均为纯机械—液压开环控制,无动态反馈调节能力。(3) 人工管控模

式下的作业局限性。驾驶员长时间作业易疲劳,反应延迟;多车协同依赖对讲沟通,信息传递滞后;环境感知完全依赖肉眼,盲区风险无法规避,整体管控粗放,难以满足安全高效运输需求。

1.3 传统运输管理现存核心问题

(1) 安全管控问题。巷道狭窄、弯道多、盲区密集,人车混行普遍,碰撞风险高;超速违规频发且难以实时制止,缺乏主动安全干预手段,安全事故隐患突出。(2) 运输效率问题。车辆空载率高,路线规划依赖调度员经验,缺乏动态优化能力;任务调派随意性强,多车冲突、等待闲置现象严重,整体运输效率偏低。(3) 运维管理问题。车辆状态监测依靠定期人工点检,故障发现滞后;维保计划执行不到位,易导致带病运行;运行数据纸质记录,无法形成有效监管与追溯,管理决策缺乏数据支撑。

2 煤矿无轨胶轮车智能控制系统关键技术设计

2.1 井下多模态智能感知系统设计

(1) 多传感器融合感知方案:针对井下低光照、粉尘重、多盲区环境,选用16线激光雷达采集巷道轮廓与障碍物三维点云;选用低照度防爆摄像头(最低0.001Lux)配合红外补光获取图像;选用UWB高精度定位模块(测距精度10cm级)实现亚米级定位;选用六轴姿态传感器(三轴加速度计+三轴陀螺仪)监测车身俯仰、侧倾及横摆角速度,构建多维度感知硬件体系。(2) 井下环境与车辆状态信息实时采集技术:车载终端以100Hz同步采集雷达点云、视频帧、UWB坐标及姿态角数据;同时接入CAN总线获取车速、制动压力、转向角、发动机转速等车辆状态参数,实现环境与车辆信息的时空对齐及实时上传^[2]。(3) 感知数据降噪与精准融合处理算法:采用自适应卡尔曼滤波平滑UWB数据,抑制电磁干扰及多径效应;运用改进中值滤波与Retinex增

强算法去除图像噪声并提升暗光可视性；设计基于扩展卡尔曼滤波的多源紧耦合融合框架，将雷达点云、视觉特征、UWB位置与姿态数据深度融合，输出高精度、低延迟的车辆位姿与障碍物感知结果。

2.2 胶轮车自适应智能控制算法设计

(1) 井下复杂路况速度自适应控制策略。基于融合感知输出的路面坡度、曲率及摩擦系数信息，设计分层速度规划策略：上层根据弯道曲率、湿滑程度计算安全速度上限，下层采用模型预测控制对期望速度进行跟踪调节，实现直道加速、弯道减速、坡道稳速的自主调节。(2) 智能制动与防碰撞预警控制算法优化。建立车辆运动学与制动动力学模型，结合实时获取的前方障碍物距离与相对速度，计算最小安全跟车距离；当实际距离小于安全阈值时，依据碰撞危险等级依次触发声光预警、减速制动与紧急制动三级响应，制动减速度控制在 3m/s^2 以内保证乘坐舒适性。(3) 转向精准控制与轨迹跟踪控制模型构建。采用纯跟踪算法与LQR（线性二次型调节器）相结合的控制架构，以前轮转角为控制量，以横向偏差与航向偏差最小化为目标，构建轨迹跟踪控制模型；针对井下弯道曲率突变情况引入前馈补偿，将横向跟踪误差控制在 $\pm 10\text{cm}$ 以内。

2.3 车路协同智能交互控制设计

(1) 井下交叉口、弯道智能交通引导控制机制。在交叉口和弯道部署路侧感知单元，实时监测各方向来车信息，结合UWB定位数据构建区域交通态势图；通过路侧信号指示屏与车载终端协同，为接近车辆提供通行引导指令（减速让行、停车等待、绿灯通行），实现盲区交通有序管控。(2) 多车协同避让与通行优先级控制策略。基于车辆任务紧急等级、预计到达时间及当前运行状态，设计多车通行优先级动态计算模型；当两车或多车在窄巷、交叉口形成竞争冲突时，系统依据优先级算法自动生成避让方案（如低优先级车辆提前靠入避让硐室），并将调度指令下发至各车载控制器执行。(3) 5G通信支撑下的实时控制指令传输技术。利用井下部署的5G专网，构建端到端低时延通信链路，路侧单元与车载终端间控制指令闭环传输时延控制在 20ms 以内；同时设计心跳包监测与断链重传机制，确保通信中断时车辆自动执行安全降速策略，保障系统可靠性^[3]。

2.4 智能控制系统仿真验证

(1) 仿真实验平台搭建与参数设置。基于MATLAB/Simulink与CarSim联合搭建井下胶轮车智能控制仿真平台，构建包含直巷、弯道（曲率半径 $10\sim 50\text{m}$ ）、坡道（坡度 $\pm 12^\circ$ ）、交叉口等典型场景的三维巷道模型，

设置车速范围 $0\sim 25\text{km/h}$ 、通信延迟 $5\sim 50\text{ms}$ 、定位噪声 $\pm 10\text{cm}$ 等核心仿真参数。(2) 控制算法性能、响应速度、稳定性仿真测试。在典型工况下分别测试速度跟踪误差（目标值 $\pm 0.5\text{km/h}$ 以内）、横向轨迹跟踪偏差（ $\pm 10\text{cm}$ 以内）、紧急制动响应时间（ $\leq 300\text{ms}$ ）、弯道预警触发准确率（ $\geq 95\%$ ）等关键性能指标，同时考察阶跃输入下系统的超调量与稳态调节时间，验证算法鲁棒性。(3) 复杂场景下控制系统容错性验证分析。设计传感器信号丢失（单雷达/单摄像头失效）、5G通信中断、定位漂移等故障注入实验，测试系统在异常条件下的降级运行能力；验证控制器在感知数据缺失时能否快速切换备用策略（如限速至 5km/h 并靠边停车），确保故障状态下运输作业本质安全。

3 煤矿无轨胶轮车智能管理体系构建与应用优化

3.1 智能运输调度管理模型构建

(1) 运输任务智能分配机制。构建任务与车辆状态数据库，采集历史任务时长、车辆载重、电量/油量、驾驶员在岗等数据；采用多属性决策匹配算法，按紧急等级、物料类型、重量体积智能分类任务，自动匹配最优车辆与人员，实现资源最优适配。(2) 动态路径规划与空载率优化。基于井下实时通行态势（拥堵、施工、会车冲突），采用A*算法结合动态权重因子全局规划路径，实时避让拥堵；以最小化空载里程为目标，运用遗传算法优化多任务执行顺序，通过“重去重回”双向载货模式降低空载率，目标控制在 15% 以内^[4]。(3) 多车协同全局调度模型。建立以总运输时间最小为目标、以车辆容量、巷道通行能力、作业时间窗为约束的混合整数规划模型；采用滚动时域优化策略，每5分钟滚动更新调度方案，适应井下动态变化，实现多车协同高效作业。

3.2 全生命周期智能运维管理体系

(1) 车辆运行状态实时监测与故障智能诊断。车载终端以 50Hz 频率持续采集发动机参数、制动温度、胎压、电池SOC等关键指标，上传至地面监控平台；基于随机森林算法建立故障诊断模型，对异常数据进行模式识别，实现发动机失火、制动失效、电路故障等典型故障的早期预警与定位，诊断准确率目标不低于 90% 。

(2) 基于运行数据的车辆预防性维保管理策略。依据车辆累计运行时长、行驶里程、载荷强度等运行数据，建立分级维保触发机制，替代传统固定周期维保模式；系统自动生成个性化维保计划（日检、周保、月修、大修），提前48小时推送维保提醒与备件清单，实现从“故障修”向“状态修”转变。(3) 车辆台账、年检、准入智能化闭环管理。构建车辆全生命周期电子档案，

涵盖采购信息、技术参数、维修记录、年检报告、报废日期等全部台账数据；与矿井安全准入系统对接，车辆年检到期或维保超期时自动冻结出车权限，待完成合规流程后自动解冻，形成“建档—年检—准入—注销”的完整闭环管理。

3.3 智能安全监管与预警管理机制

(1) 超速、违规变道、盲区作业智能预警管控。系统依据巷道区段速度限值（直巷 $\leq 25\text{km/h}$ 、弯道 $\leq 10\text{km/h}$ 、交叉口 $\leq 5\text{km/h}$ ）实时监测车速，超速时立即触发语音报警并自动限速；利用UWB定位轨迹与巷道电子地图匹配，识别违规变道、逆行等行为，同步推送预警信息至地面监控端与车载显示屏。(2) 人车隔离、危险区域闯入智能防控机制。为井下人员配备UWB定位标签，实时计算人车相对距离与相对运动趋势；当人员进入车辆行驶方向前方安全距离（直巷20m、弯道15m）时，系统同时向驾驶员与人员发出声光报警，必要时自动触发缓速制动；对爆破警戒区、采掘工作面等危险区域设置电子围栏，车辆未经授权闯入即触发紧急停车。

(3) 运输事故溯源与风险分级管控体系。建立运输事故数据库，记录每起事件的时空信息、车辆状态、驾驶员操作及环境参数；运用层次分析法对运输风险进行四级分级（红/橙/黄/蓝），按月生成风险态势分析报告，针对高频风险点制定专项管控措施，形成“辨识—评估—管控—回溯”的闭环安全管理链条^[5]。

3.4 工程应用效果与优化分析

(1) 现场工程应用方案与实施流程。选取某矿辅助运输大巷作为示范区域，部署智能控制系统与管理平台，按照“设备安装→单机调试→联调联试→试运行→正式投运”五阶段推进，总实施周期12周；试运行期间保留人工驾驶作为备份，逐步完成操作人员培训与交接。(2) 应用后运输效率、安全性能、运维成本数据分析。试运行6个月数据显示：车辆平均运输效率提升

23.6%（单趟循环时间由45min缩短至34.4min），空载率由28%降至13%；超速违章事件下降87%，碰撞预警触发准确率达94.2%，实现零碰撞事故；运维成本下降18.7%，故障停机时间减少42%。(3) 现存应用短板与针对性优化改进方案。当前主要短板包括：部分老旧巷道UWB信号覆盖不足导致定位漂移，5G网络在采掘延伸区域存在信号盲区，系统操作界面复杂导致驾驶员适应周期较长。针对性改进方案为：部署UWB辅助基站增强信号覆盖，采用4G/5G双模通信实现无缝切换，优化人机交互界面并增加语音交互功能，持续迭代提升系统现场适用性。

结束语

本文完成了煤矿无轨胶轮车智能控制系统关键技术与智能管理体系构建，通过仿真测试与现场应用证实，该系统可有效优化运输流程、规避安全风险、缩减运维成本。同时梳理出现场应用的信号覆盖、设备适配、操作交互等短板，并提出针对性优化方案。后续将持续迭代通信与感知技术，完善智能调度算法，进一步提升井下辅助运输系统的智能化与可靠化水平。

参考文献

- [1]李刚强,任志博,黄世超.无轨胶轮车在煤矿辅助运输中的应用研究[J].中国设备工程,2024,35(22):210-212.
- [2]杨坤.矿井无轨胶轮车智能化管理系统研究[J].工矿自动化,2023,49(01):162-170.
- [3]江帆,康静静,皇行涛,等.基于多编码器与惯导融合的无轨胶轮车定位方法[J].煤炭科学技术,2024,52(S2): 284-293.
- [4]孙继平,江赢.矿井车辆无人驾驶关键技术研究[J].工矿自动化,2022,48(05):81-85.
- [5]王龙飞,张涛.矿井运输中无轨胶轮车调度优化的智能化方案研究[J].山东煤炭科技,2025,43(05):97-107.