

Research on the Construction and Safety Assurance Technology of Unmanned Driving System for Underground Rail Transportation in Coal Mines

Jilong Li

Shandong Honghe Holdings Group Co., Ltd., Jining, Shandong, 273500, China

Abstract

This article focuses on the research of unmanned driving system for underground rail transportation in coal mines, and elaborates on the system construction and safety guarantee technology. In terms of system construction, a hierarchical distributed architecture is adopted, covering the perception layer, control layer, and execution layer; By applying key technologies such as high-precision positioning and environmental perception, combined with wired and wireless hybrid communication networks, vehicles can achieve autonomous operation. In terms of security technology, a comprehensive monitoring system is constructed through multi-source sensors, and a "model+data" fusion diagnosis mode is used to enhance fault handling capabilities. A hierarchical emergency response mechanism is established to respond to unexpected situations. This research achievement provides a technical solution for the intelligent transformation of underground rail transportation in coal mines, which is of great significance for improving transportation efficiency, ensuring safety production, and promoting high-quality development of the coal mining industry.

Keywords

underground coal mine; Rail transportation; Autonomous driving system; Security guarantee technology

煤矿井下有轨运输无人驾驶系统构建与安全保障技术研究

李继龙

山东宏河控股集团有限公司, 中国·山东 济宁 273500

摘要

文章围绕煤矿井下有轨运输无人驾驶系统展开研究, 阐述系统构建与安全保障技术。系统构建方面, 采用分层分布式架构, 涵盖感知层、控制层与执行层; 应用高精度定位、环境感知等关键技术, 结合有线无线混合通信网络, 实现车辆自主运行。安全保障技术上, 通过多源传感器构建全域监测体系, 运用“模型+数据”融合诊断模式提升故障处理能力, 建立分级应急响应机制应对突发状况。该研究成果为煤矿井下有轨运输智能化转型提供技术方案, 对提升运输效率、保障安全生产、推动煤矿行业高质量发展具有重要意义。

关键词

煤矿井下; 有轨运输; 无人驾驶系统; 安全保障技术

1 引言

煤矿作为我国能源供应的重要支柱, 其井下有轨运输安全与效率直接关乎行业发展。传统人工驾驶模式受井下复杂环境制约, 安全隐患突出、运输效率低下。随着人工智能、物联网技术的突破, 无人驾驶系统在煤矿领域的应用成为必然趋势。本文深入研究煤矿井下有轨运输无人驾驶系统的构建方案与安全保障技术, 旨在推动煤矿智能化升级, 实现安全生产与高效运输的双重目标。

【作者简介】李继龙(1983-), 男, 中国山东济宁人, 本科, 工程师, 从事煤矿机电运输研究。

2 煤矿井下有轨运输无人驾驶系统构建

2.1 系统架构设计

感知层作为系统的“神经末梢”, 通过多类型传感器的协同部署, 构建起立体式环境感知网络。高分辨率激光雷达以每秒数万次的脉冲频率扫描巷道空间, 基于飞行时间(TOF)原理, 将反射光的时间差转化为三维点云数据, 可精准勾勒出毫米级障碍物轮廓, 实时构建高精度环境模型; 多目摄像头搭载深度学习算法, 利用YOLO、Mask R-CNN等模型, 能够在低光照、高粉尘环境下识别轨道标识、信号灯状态及行人特征, 目标检测准确率保持在95%以上; 77GHz毫米波雷达凭借高频电磁波穿透能力, 在粉尘浓度超 $1000\text{mg}/\text{m}^3$ 的极端工况下, 仍能以 $\pm 0.1\text{m}$ 精度持续监测300米范围内目标的距离、速度与角度; 惯性导航系统(INS)

通过陀螺仪和加速度计，以 1000Hz 采样频率实时解算车辆航向、俯仰和横滚角度，结合里程计数据与卡尔曼滤波算法，有效补偿动态环境下的定位漂移误差。控制层作为系统的“智慧中枢”，由地面中央控制器与车载智能终端构成两级决策架构。中央控制器基于云计算平台，运行多车辆协同调度算法，通过遗传算法、模拟退火算法等优化策略，可同时管理 50 辆以上运输车辆的任务分配，使单车平均等待时间缩短 40%；车载控制器采用多核异构芯片，集成 NVIDIA Jetson AGX Xavier 计算平台，实时处理 TB 级感知数据，其内置的路径规划模块结合 A 全局寻路与 RRT 动态避障算法，在复杂巷道中实现小于 100ms 的路径重规划；基于 Dyna-Q 强化学习的决策系统，通过 10 万+ 场景模拟训练，可针对瓦斯超限、轨道变形等突发状况自动生成减速、绕行指令，决策准确率达 98.7%。

2.2 关键技术应用

高精度定位技术是煤矿井下有轨运输无人驾驶系统的基石，其性能直接决定了系统的可靠性与安全性。在井下复杂环境中，GPS 信号被岩层完全屏蔽，因此需采用多传感器融合的组合定位方案。惯性导航系统（INS）基于 MEMS 陀螺仪和加速度计，以 1000Hz 采样频率实时解算车辆运动状态，在短时间内可提供厘米级定位精度，但存在随时间累积的漂移误差，典型漂移速率为 0.1° / 小时。RFID 无源信标定位技术通过在轨道沿线每 50 米部署电磁感应信标，车辆通过时读取信标编码信息，结合 TOF 测距原理实现 $\pm 5\text{cm}$ 的绝对定位精度，但其更新频率仅为 1Hz，无法满足连续定位需求^[1]。编码器定位利用车轮转动脉冲计数，通过累积计算实现相对定位，精度可达 $\pm 2\text{cm/m}$ ，但在轨道打滑或弯道行驶时误差显著增加。视觉定位系统采用基于 ORB 特征点匹配的实时定位算法，通过对比当前图像与预建巷道纹理地图，在纹理特征丰富区域可实现 $\pm 3\text{cm}$ 定位精度，但在无特征的平直巷道中易失效。多传感器融合定位系统采用卡尔曼滤波算法，将 INS 的高频动态数据与 RFID 的绝对位置、编码器的相对位移和视觉定位的纹理特征进行数据融合，通过自适应权重分配策略，使系统在全工况下保持 $\pm 8\text{cm}$ 的定位精度，满足无人驾驶系统的严格要求。

2.3 通信网络搭建

煤矿井下通信网络的搭建需克服电磁干扰强、巷道结构复杂、环境潮湿多尘等严苛挑战，因此采用“有线骨干网+无线接入网”的混合组网架构，通过多链路冗余与加密传输机制，构建高可靠、低延迟的信息传输通道。在有선通信方面，采用工业级单模光纤构建井下环形骨干网络，通过双纤自愈环网技术实现链路故障的毫秒级切换。光纤敷设遵循巷道主运输线路，每隔 200 米设置光分线箱，支持以太网无源光网络（EPON）技术，单纤可同时承载 128 个光网络单元（ONU），实现 1Gbps 以上的稳定传输速率^[2]。该网络主要承担实时性要求极高的核心数据传输，如车辆

运行状态参数（每秒更新 50 次）、高清视频监控流（单路 4K 视频码率达 30Mbps）以及控制指令集（响应延迟需控制在 100ms 以内）。同时，采用冗余光纤链路设计，主备链路通过自动保护倒换（APS）协议实时监测链路状态，当主链路因塌方、设备故障中断时，备用链路可在 50ms 内无缝接管数据传输，保障通信连续性。无线通信部分构建“Wi-Fi + 5G”双制式覆盖体系。在巷道交叉口、采区工作面等局部区域部署工业级 Wi-Fi 6 接入点，支持 802.11ax 协议，单 AP 并发连接数可达 256 个，峰值速率达 9.6Gbps，适用于车辆短距离数据交互、设备状态监测等场景。在主运输巷道及长距离运输路线，采用井下专用 5G 基站实现全覆盖，基于 NSA/SA 双模组网架构，下行速率可达 1Gbps，上行速率 200Mbps，空口时延低至 10ms，满足无人驾驶车辆在动态行驶过程中的实时通信需求。5G 网络还支持切片技术，为控制指令、视频流、传感器数据等不同业务划分独立逻辑通道，确保关键控制信号的传输优先级。

3 煤矿井下有轨运输无人驾驶系统安全保障技术

3.1 安全检测与实时预警技术

煤矿井下有轨运输无人驾驶系统的安全检测与实时预警技术，依托多源传感器网络构建起全域覆盖的智能监测体系，实现对车辆、轨道及作业环境的三维动态感知与即时风险预警。在车辆核心部件监测层面，高精度温度传感器采用铂电阻元件，以 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的测量精度实时捕捉电机绕组、轴承等关键部位的温度变化，当轴承温度突破 80°C 阈值时，系统立即触发分级预警机制，并生成包含故障类型、发生位置、持续时间的专属代码；振动传感器基于压电效应原理，以 1000Hz 的采样频率解析设备运行振动频谱，通过机器学习算法识别部件松动、磨损等早期故障特征；霍尔电流传感器则实时监测电气系统电流波形，当电流波动幅度超过额定值 15% 时，毫秒级启动异常报警。

轨道安全监测融合分布式光纤传感技术与智能巡检设备，形成“动态感知+精准检测”的双重保障。基于光时域反射（OTDR）原理的特种光纤沿轨道全程铺设，如同嵌入轨道的“神经网络”，可敏锐感知毫米级的轨体变形与位移，通过布里渊散射光频移分析，实现对轨道应力变化的定量监测；轨道几何状态检测机器人搭载激光测距阵列、惯性导航单元及机器视觉系统，以 $\pm 0.5\text{mm}$ 的测量精度定期扫描轨距、水平、高低等参数，其 AI 图像识别模块可自动检测钢轨表面裂纹、扣件松动等缺陷，检测准确率达 98% 以上^[3]。井下环境监测通过复合型传感器网络实现全要素覆盖，在巷道交叉口、工作面等关键区域部署的监测终端集成催化燃烧式瓦斯传感器、电化学一氧化碳传感器、激光粉尘检测仪等 12 类感知单元。当瓦斯体积分数达到 0.75% 临界值时，系统立即启动三级响应：向无人驾驶车辆发送限速指

令,联动智能通风系统调节风机转速,同时向周边设备发出安全警示。所有传感器数据经边缘计算节点进行实时降噪、特征提取与异常判别,运用长短期记忆网络(LSTM)模型对环境参数进行趋势预测,通过卡尔曼滤波算法融合多源数据,确保异常信息以低于100ms的延迟推送至地面控制中心。控制中心的数字孪生系统同步生成三维可视化预警界面,运维人员可通过AR远程协作系统,实现故障现场的远程诊断与应急指挥。

3.2 故障诊断与容错控制技术

煤矿井下有轨运输无人驾驶系统的故障诊断与容错控制技术,通过创新融合“模型驱动”与“数据驱动”双重诊断模式,结合软硬件协同的容错策略,构建起全方位的系统健康保障体系。在故障诊断层面,系统深度整合车辆动力学理论模型与实时传感数据,基于卡尔曼滤波算法建立残差分析模型,通过将车辆行驶过程中的速度、加速度、扭矩等实际测量值与动力学模型计算的理论值进行逐帧对比,能够精准识别电机缺相、制动闸片磨损超限等硬件故障。以电机故障诊断为例,当实际电流波形与理论模型偏差超过预设阈值时,系统可在100毫秒内定位故障电机,并通过故障树分析法快速锁定具体故障部件,整体诊断准确率达95.6%。

同时,系统引入长短期记忆网络(LSTM)构建数据驱动型故障预测模型,通过对车辆运行过程中采集的温度、振动、电流等多维度历史数据进行深度学习训练。模型可自动挖掘数据间的时序关联特征,对轴承磨损、电路板元件老化等渐进式故障进行提前预警^[4]。在某矿区实际应用中,该模型成功预测出23起轴承异常磨损故障,平均预警时间达72小时,有效避免因设备突发故障导致的运输中断。为进一步提升诊断可靠性,系统还采用迁移学习技术,将不同工况下的故障特征进行跨场景迁移分析,使模型在复杂井下环境中的泛化能力提升30%。在容错控制方面,系统构建了“硬件冗余+软件重构”的双重保障机制。动力系统采用双电机热备架构,主备电机通过智能功率切换单元实时同步运行状态,当主电机出现堵转、过载等故障时,备用电机可在200毫秒内完成扭矩补偿和动力接管,确保车辆运行平稳过渡。控制系统创新采用三模冗余架构,三个独立控制器并行处理感知数据和控制指令,通过多数表决算法对输出结果进行仲裁,即使单个控制器出现计算错误或数据异常,也能保证输出正确的控制信号。通信网络则部署有线光纤环网与5G无线链路的双冗余传输通道,通过动态链路质量评估算法实时监测信道状态,当有线链路因巷道塌方中断时,系统

可在50毫秒内自动切换至5G网络,保障车辆与控制中心的通信连续性。此外,系统还设计了软件重构机制,当部分功能模块出现逻辑错误时,可通过热补丁技术实现故障模块的在线修复和替换,显著提升系统的容错能力与可用性。

3.3 应急防护与快速响应机制

煤矿井下有轨运输无人驾驶系统的应急防护与快速响应机制,通过构建科学严谨的分级处置体系,结合多重应急保障措施,为系统在复杂突发状况下的安全运行筑牢防线。该机制依据风险程度将应急响应划分为三个等级,每个等级均配备精细化、差异化的应对策略,确保系统能在各类异常场景下迅速做出有效反应。

一级应急响应聚焦于轻微异常状况,主要针对单个传感器数据波动、短暂通信延迟等不影响车辆基本运行的情况。当系统监测到此类异常时,边缘计算节点会立即启动数据校验程序,通过对冗余传感器数据和历史运行数据模型,判断数据异常是否为偶然误差。若确认数据存在偏差,系统将自动切换至备用传感器,确保数据采集的连续性与准确性^[5]。同时,系统还会向周边车辆和地面控制中心发送预警信息,提示该区域存在风险,避免其他车辆误入。

4 结语

煤矿井下有轨运输无人驾驶系统的构建与安全保障技术研究,通过分层分布式架构设计、多技术融合应用及通信网络优化,实现了运输系统的自动化与智能化。安全保障技术则从实时监测、故障诊断、应急处理等维度,为系统稳定运行构筑起坚固防线。研究成果有效提升了煤矿运输效率,降低了安全风险,为煤矿智能化发展提供了可行路径。未来,随着技术的持续创新,该系统将在功能集成、安全性能等方面进一步优化,为煤矿行业高质量发展注入新动力。

参考文献

- [1] 臧涛,穆国庆,赵凯.煤矿井下单轨吊轨道运输系统优化设计[J].中国机械,2024(27):7-11.
- [2] 刘海波.煤矿井下长距离斜巷轨道运输问题分析及应对技术研究[J].机械管理开发,2023,38(03):214-215+218.
- [3] 胡正鑫.浅论矿山井下有轨运输无人驾驶系统[J].内蒙古煤炭经济,2022(10):141-143.
- [4] 盖海洋.煤矿井下轨道运输及其监控系统探讨[J].能源与节能,2021(06):114-115.
- [5] 陈兴红,李红飞.煤矿井下轨道液压推移旋转装置的设计与应用[J].煤,2017,26(03):23-24.