

煤矿无轨胶轮车运输的智能控制与管理研究

王梦迪

内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司车队 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要: 本文聚焦煤矿无轨胶轮车运输的智能控制与管理。介绍了运输系统,涵盖车辆结构、工作原理及系统组成。研究智能控制技术,包括定位导航、避障、状态监测等;再探讨智能管理技术,涉及任务调度、人员物资管理等。随后阐述系统实现,包括架构、软硬件设计及集成测试。通过融合多种先进技术,提升煤矿运输的效率、安全性与管理水平,为煤矿智能化发展提供有效方案。

关键词: 煤矿无轨胶轮车; 运输; 智能控制; 管理

1 煤矿无轨胶轮车运输系统概述

1.1 无轨胶轮车的基本结构与工作原理

无轨胶轮车是煤矿井下运输的核心设备,其结构由动力装置和工作机构两大部分组成。动力装置包含防爆柴油机或蓄电池组,为车辆提供驱动能源;工作机构则涵盖驾驶室、货箱或载人舱体、前后车铰接装置等。驾驶室采用一室两座布局,主副驾驶座间设置操作控制台,左侧配备仪表盘,这种设计符合人体工程学原理,使驾驶员在矿井坑道作业时不需掉头即可实现双向运行,缩短车体长度并提升操作便捷性。动力传输方面,防爆柴油机通过传动轴将动力传递至驱动桥,驱动车轮旋转;蓄电池车型则通过电机直接驱动,减少机械传动环节。转向系统采用铰接式转向机构,前后车体通过液压缸连接,转弯半径可控制在3-6米,适应井下狭窄巷道。制动系统配备工作制动、停车制动和紧急制动三套装置,工作制动采用液压盘式制动器,停车制动通过弹簧制动缸实现,紧急制动则集成于液压系统中,确保在突发情况下快速停车。

1.2 煤矿无轨胶轮车运输系统的组成

煤矿无轨胶轮车运输系统由硬件设备层、网络通信层、智能控制层和管理应用层构成。硬件设备层包括无轨胶轮车本体、充电桩(蓄电池车型)、巷道定位基站、环境感知传感器等。以巷道定位基站为例,其采用UWB超宽带技术,通过布置在巷道顶部的锚点设备,实现车辆厘米级定位精度,定位延迟低于50毫秒^[1]。网络通信层采用工业以太网与无线Wi-Fi6混合组网方式,在巷道直线段部署光纤环网,在转弯区域和交叉口设置无线接入点,确保数据传输带宽不低于100Mbps,丢包率小于0.1%。智能控制层集成车辆定位、导航、避障、状态监测等核心算法,采用模块化设计,各功能模块通过API接口实现数据交互。管理应用层提供运输任务调度、人员

物资管理、安全预警、数据分析等功能,采用B/S架构开发,支持多终端访问,调度员可通过Web端实时监控车辆位置和任务执行情况,现场作业人员则通过移动APP接收任务指令和上报异常信息。

2 煤矿无轨胶轮车运输智能控制技术研究

2.1 车辆定位与导航技术

车辆定位与导航是无轨胶轮车智能控制的基础。当前主流技术方案采用UWB+IMU+激光SLAM融合定位模式。UWB定位通过巷道顶部布置的4个以上锚点设备,利用TDOA(到达时间差)算法计算车辆位置,定位精度可达10厘米,但易受巷道金属支护结构干扰。IMU(惯性测量单元)包含三轴加速度计和陀螺仪,可提供高频(200Hz)姿态数据,但存在误差累积问题。激光SLAM通过车顶安装的16线激光雷达扫描巷道环境,构建点云地图,结合ICP(迭代最近点)算法实现车辆位姿估计,定位精度20厘米,但计算量大,对处理器性能要求高。融合定位算法采用卡尔曼滤波框架,将UWB绝对定位结果作为观测值,IMU和激光SLAM相对定位结果作为预测值,通过协方差矩阵调整权重,实现优势互补。导航系统基于高精度巷道地图,采用A*算法进行全局路径规划,结合DWA(动态窗口法)进行局部路径优化,生成平滑无碰撞的行驶轨迹。

2.2 智能避障技术

智能避障技术是无轨胶轮车安全运行的关键。当前采用多传感器融合方案,包括激光雷达、毫米波雷达、超声波传感器和摄像头。激光雷达负责远距离(50米)障碍物检测,毫米波雷达补充中距离(20米)动态障碍物监测,超声波传感器处理近距离(5米)低矮障碍物,摄像头提供视觉信息用于障碍物分类。以某型无轨胶轮车为例,其车头安装1个16线激光雷达、2个77GHz毫米波雷达和4个超声波传感器,形成360度无死角感知覆盖。

避障算法采用分层决策架构，第一层为安全距离判断，当障碍物距离小于安全阈值时，立即触发紧急制动；第二层为路径重规划，结合激光SLAM地图和D星算法，在障碍物周围搜索可行路径；第三层为行为决策，根据障碍物类型（如人员、设备、巷道支护）和运动状态（静止、移动），选择绕行、等待或停车策略。实验数据显示，该方案在复杂巷道环境下的避障成功率达99.2%，误报率低于0.5%，制动距离较传统方案缩短40%。

2.3 车辆状态监测与故障诊断技术

车辆状态监测与故障诊断技术通过实时采集发动机、传动系统、制动系统等关键部件的运行数据，利用机器学习算法实现故障预测和健康管理。以发动机状态监测为例，系统采集转速、水温、油压、排气温度等12个参数，结合振动传感器数据，采用LSTM（长短期记忆网络）算法构建故障预测模型。该模型可提前48小时预测发动机冷却系统故障，准确率达92%。传动系统监测则通过扭矩传感器和转速传感器数据，利用小波包分析提取齿轮啮合频率特征，结合SVM（支持向量机）分类算法实现齿轮磨损故障诊断，诊断准确率95%。制动系统监测采用压力传感器和位移传感器，实时监测制动压力和制动盘磨损量，当磨损量超过阈值时，系统通过HMI（人机界面）发出预警，并限制车辆最高行驶速度。

2.4 智能控制算法应用

智能控制算法是无轨胶轮车运输系统的核心。当前主要采用模糊PID控制、模型预测控制（MPC）和强化学习算法。模糊PID控制结合模糊逻辑和传统PID控制，通过模糊规则在线调整PID参数，解决车辆负载变化导致的控制性能下降问题^[2]。以速度控制为例，当车辆负载增加时，模糊控制器根据速度误差和误差变化率，增大比例系数 K_p ，减小积分系数 K_i ，避免超调，使速度稳定在设定值 ± 0.5 米/秒范围内。MPC算法通过建立车辆动力学模型，预测未来 N 步的系统状态，优化控制输入序列，实现多目标控制。在巷道转弯场景中，MPC算法可同时考虑路径跟踪精度、侧向加速度限制和能量消耗，生成最优转向角度和油门开度，使车辆平稳通过弯道。强化学习算法则用于复杂场景下的决策优化，如多车协同避障。以DeepQNetwork（DQN）为例，智能体通过与环境交互，学习最优避障策略，在模拟巷道环境中，经过10万次训练后，避障成功率达98%，较传统规则算法提升15%。

3 煤矿无轨胶轮车运输智能管理技术研究

3.1 运输任务智能调度

运输任务智能调度系统基于TMS（运输管理系统）框架，集成订单管理、车辆分配、路径规划和实时监控

功能。系统采用混合整数规划（MIP）模型，以运输成本最低、时效性最高为目标，考虑车辆载重、容积、续航里程、巷道通行能力等约束条件，实现任务与车辆的最优匹配。以某矿井为例，其每日运输任务量达200次，采用智能调度系统后，车辆空载率从35%降至12%，运输时效性提升25%。系统还具备动态重调度能力，当车辆故障或任务变更时，可在5分钟内重新分配资源，确保运输任务连续性。

3.2 人员与物资管理

人员与物资管理模块通过RFID（射频识别）技术和二维码标签，实现人员定位、物资追踪和库存管理。人员定位采用UWB标签，佩戴在矿工安全帽上，定位精度30厘米，可实时显示人员在巷道中的位置和运动轨迹。物资管理则通过在设备、材料上粘贴二维码标签，结合手持终端扫描，实现入库、出库、运输、使用全流程信息化。以液压支架运输为例，系统可记录支架型号、重量、运输时间、目的地等信息，当支架到达指定位置后，自动触发安装任务，提高协同效率。库存管理模块通过实时采集物资出入库数据，结合需求预测算法，自动生成补货计划，避免物资积压或短缺。

3.3 运输安全管理与预警

运输安全管理与预警系统集成车辆状态监测、环境感知和人员定位数据，构建多层次安全防护体系。第一层为设备安全预警，当车辆发动机温度过高、制动系统故障或轮胎压力异常时，系统立即通过HMI和移动APP发出预警，并限制车辆行驶速度。第二层为环境安全预警，通过巷道顶部的气体传感器、粉尘传感器和温湿度传感器，实时监测瓦斯浓度、粉尘浓度和温度，当参数超过阈值时，系统自动关闭相关区域车辆电源，并引导人员撤离。第三层为行为安全预警，结合人员定位和视频监控数据，利用计算机视觉算法检测违规行为，如未佩戴安全帽、进入危险区域等，及时发出警告并记录违规信息^[3]。

3.4 数据管理与分析

数据管理与分析平台采用Hadoop大数据框架，集成车辆运行数据、任务调度数据、安全预警数据和设备维护数据，构建企业级数据仓库。通过ETL（抽取、转换、加载）工具，实现多源数据清洗和整合，为数据分析提供高质量数据源。平台提供可视化分析工具，支持运输效率、设备故障率、安全事件等关键指标的实时监控和历史趋势分析。以运输效率分析为例，系统可生成车辆利用率、任务完成率、平均运输时间等报表，帮助管理人员识别瓶颈环节，优化运输流程。设备维护分析模块

则通过关联设备运行数据和维修记录,利用关联规则挖掘算法,找出故障高发部件和维修周期,为预防性维护提供依据。

4 煤矿无轨胶轮车运输智能控制与管理系统实现

4.1 系统总体架构设计

系统采用微服务架构,基于SpringCloud框架开发,分为数据采集层、数据处理层、业务逻辑层和用户界面层。数据采集层通过OPCUA协议与车辆PLC、传感器等设备通信,实现数据实时采集;数据处理层采用Kafka消息队列和Flink流处理引擎,实现数据清洗、转换和实时分析;业务逻辑层封装运输调度、安全预警、设备管理等核心服务,通过RESTfulAPI对外提供服务;用户界面层采用Vue.js框架开发Web应用,支持PC端和移动端访问。系统还集成Redis缓存和MongoDB文档数据库,提高数据访问性能和灵活性。

4.2 硬件系统设计

硬件系统包括车载终端、巷道基站和中心服务器。车载终端采用工业级嵌入式计算机,配置IntelCorei7处理器、8GB内存和256GB固态硬盘,运行Linux操作系统,支持CAN总线、RS485、以太网等多种接口,可连接激光雷达、毫米波雷达、UWB标签等设备。巷道基站采用防爆设计,配置UWB锚点、无线接入点和环境传感器,通过光纤环网与中心服务器通信。中心服务器采用双机热备架构,配置2颗IntelXeonPlatinum8380处理器、512GB内存和10TBRAID6存储,运行Hadoop大数据平台和业务应用系统,确保系统高可用性和数据安全性。

4.3 软件系统设计

软件系统包括操作系统、中间件和应用软件三部分。操作系统采用UbuntuServer20.04LTS,提供稳定运行环境;中间件包括Kafka2.8.0、Flink1.14.0、Redis6.2.6和MongoDB5.0.3,实现数据流处理、缓存和存储功能;应用软件采用Java11开发,基于SpringBoot2.5.0和SpringCloud2020.0.3框架,实现运输调度、安全预警、设

备管理等业务逻辑。系统还集成ECharts5.2.2可视化库,提供丰富的图表组件,支持运输效率、安全事件等数据的可视化展示。

4.4 系统集成与测试

系统集成采用分阶段实施策略,先完成车载终端与传感器的集成测试,验证数据采集准确性;再进行巷道基站与中心服务器的联调测试,确保网络通信稳定性;最后进行全系统集成测试,验证运输调度、安全预警等核心功能^[4]。测试方法包括单元测试、集成测试和系统测试,采用JUnit5和Mockito框架编写测试用例,覆盖90%以上代码逻辑。性能测试采用JMeter5.4.1工具,模拟200辆无轨胶轮车并发访问,验证系统吞吐量和响应时间。安全测试则通过OWASPZAP工具检测系统漏洞,确保数据传输和存储安全性。经过3个月测试和优化,系统达到设计要求,在矿井成功上线运行。

结束语

煤矿无轨胶轮车运输的智能控制与管理研究意义重大。本文从系统概述到智能控制与管理技术研究,再到系统实现,全面深入探讨。实践表明,所研究的技术和实现的系统可有效提升运输效率、降低事故发生率、优化管理流程。未来,随着技术持续进步,该领域将不断完善,为煤矿智能化建设提供更强有力的支撑,推动煤矿行业迈向更高质量的发展阶段。

参考文献

- [1]张宏阳.煤矿无轨胶轮车智能调度管理技术研究与应用[J].矿业装备,2023,(02):128-130.
- [2]李桂芳.煤矿无轨胶轮车智能调度管理技术探究[J].矿业装备,2022,(03):216-217.
- [3]冯欣.煤矿无轨胶轮车运输管理中存在的问题及对策[J].内蒙古煤炭经济,2022,(12):184-186.
- [4]张宏阳.煤矿无轨胶轮车智能调度管理技术研究与应用[J].矿业装备,2022,(02):128-130.