井下电动铲运机无人驾驶系统设计与应用*

黎钊[1],柴颖豪[2,3],代建龙[2,4]

(1.安徽开发矿业有限公司, 安徽 六安市 237400;
2.湖南创远高新机械有限责任公司, 湖南 长沙 410205;
3.湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭市 411100;
4.中南大学 自动化学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:自动驾驶技术的快速发展使其应用场景持续拓展,矿山无人驾驶已成为智能矿山建设的重要方向之一。针对井下作业环境复杂、人工劳动强度大、安全风险突出等问题,结合自动驾驶与远程遥控技术,设计并实现了一套井下电动铲运机无人驾驶系统。系统采用"远程遥控铲装、自动驾驶运输与卸载"的作业模式,实现了井下巷道环境下铲运机出矿作业的全流程无人化。现场工业试验结果表明:系统在运行过程中平均横向跟踪误差控制在0.30 m以内,定位丢失概率约为0.11%,通信平均时延低于5 ms,且具备良好的安全保障能力,门禁系统和防碰撞检测模块可有效应对突发情况。研究成果验证了该系统在矿山井下环境中的稳定性与实用性,能够有效降低矿工劳动强度,改善井下作业条件。

关键词:电动铲运机;远程遥控;无人驾驶系统;横向跟踪;巷道边界检测
中图分类号:TD67;TD421 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)08-0254-12

Design and Application of Unmanned Driving System for Underground Electric Load-Haul-Dump Machines

Li Zhao[1], *Chai Yinghao*[2,3], *Dai Jianlong*[2,4]

(1.Anhui Development Mining Co., Ltd., Lu'an, Anhui 237400, China;
2.Hunan Chuangyuan High-Tech Machinery Co., Ltd., Changsha, Hunan 410205, China;
3.School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411100, China;
4.School of Automation, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: The rapid development of autonomous driving technology has continuously expanded its application scenarios, and unmanned driving in mines has become an important direction in intelligent mine construction. Aiming at the problems of complex underground working environments, high manual labor intensity, and prominent safety risks, an unmanned driving system for underground electric Load-Haul-Dump (LHD) machines was designed and implemented by integrating autonomous driving and remote control technologies. The system adopted an operation mode of "remote-controlled loading, autonomous driving for transportation and unloading", realizing the full-process unmanned operation of LHD machines in underground roadway environments. Field industrial test results show that the average lateral tracking error of the system during operation is controlled within 0.30 m, the positioning loss probability is approximately 0.11%, and the average communication latency is less than 5 ms. The system also possesses good safety assurance capabilities, with the access control system and anti-collision detection module effectively handling emergency situations. The research results verify the stability and practicability of the system in underground mine environments, which can effectively reduce miners'labor intensity and improve underground working conditions.

Key words: Electric Load-Haul-Dump (LHD) machine, Remote control, Unmanned driving system, Lateral tracking, Roadway boundary detection

0 引言

随着全球矿业向智能化、绿色化方向快速转型,电动铲运机作为地下矿山出矿作业的核心设备,其自动驾驶系统研发已成为矿山智能化建设的关键课题[1]。传统人工驾驶模式在恶劣的井下作业环境

* **收稿日期**:2025-10-17
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2907405)
作者简介:黎钊(1987—),男,湖南岳阳人,硕士,高级工程师,主要从事矿山智能化、矿山装备状态监测与系统管理。E-mail:33033722@qq.com
通信作者:代建龙(1988—),男,河南南阳人,博士,高级工程师,主要从事矿山采矿自动化及智能化系统研究。E-mail:2206402436@qq.com

中,面临巷道狭窄、粉尘浓度高导致能见度低、长时间连续作业引发驾驶员疲劳等诸多问题,不仅严重制约作业效率的提升,更给安全生产带来重大威胁。国际矿山安全协会统计数据显示,约 23%的地下矿山事故与铲运机操作直接相关。与此同时,全球矿业普遍面临熟练操作人员短缺、人力成本持续上涨等现实压力,发达国家矿山行业人工成本已占运营总成本的 35%~45%[2]。在此背景下,研发电动铲运机自动驾驶技术具有重要的工程实践价值。

当前国际矿业领域在电动铲运机自动驾驶方面已取得显著进展。Guevara 等[3]、Hennen 等[4]相继推出新一代自动驾驶电动铲运机产品,其技术路线主要呈现三方面特征:(1)在环境感知方面,采用多传感器融合方案,典型配置包括 16 线激光雷达、77 GHz 毫米波雷达与红外热成像相机,通过自适应滤波算法有效克服矿山粉尘干扰,目标检测准确率达 92%以上;(2)在定位导航方面,开发了 UWB(超宽带)-IMU(惯性测量单元)-轮速计多源融合定位系统,在 GPS 拒止环境下可实现±10 cm 的定位精度;(3)在决策控制层面,应用改进型模型预测控制(MPC)算法,结合深度强化学习算法优化轨迹规划,使铲运机在复杂巷道中的横向跟踪误差控制在±0.30 m。

远程遥控驾驶技术在我国矿山铲运机中已较为成熟,主要通过对铲运机进行无损化改造,在不破坏原车电气线路的前提下,实现远程遥控行走和出矿作业[5-7]。但自动驾驶相关技术仍处于探索阶段,尚需实现关键性突破。针对铲运机智能控制[8]、路径规划[9]领域,众多学者开展了大量深入研究工作。如马飞[9]等提出一种基于改进 A* 算法的铰接式井下铲运机导航路径规划方法,在实验室环境下实现了无人铲运机的路径规划及轨迹跟踪。崔冰等[10]提出了基于改进 A* 算法的地下自动驾驶铲运机路径规划方法,将 A* 算法与图像骨架相结合,解决了铲运机自动驾驶时路径规划的安全与效率问题。罗维东等[11]提出了基于 NMPC 算法的反应式导航运动控制器,可在较窄巷道内实现自主导航,且能适应巷道宽度变化,多组仿真巷道环境中,铲运机与巷道壁的距离最小值为 0.73 m。然而,现有研究多集中于单一算法或仿真层面的验证,针对完整无人驾驶系统的工程化设计及现场应用的系统性研究仍相对不足。

本文针对某矿井下采场的生产工艺与环境特征,对山特维克 LH514E 型电动铲运机进行智能化改造,集成适配井下铲运机的无人驾驶解决方案,通过自动驾驶与远程遥控的协同配合,覆盖出矿作业全流程,实现无人化闭环作业,将矿山作业人员从高危恶劣的环境中解放出来,显著提升矿山生产的安全性与作业效率。

1 铲运机无人驾驶系统

1.1 车载硬件系统

本文以图 1 所示的山特维克 LH514E 型电动铲运机为研究对象,进行自动驾驶改造。该型号铲运机原厂仅支持人工本地驾驶,不具备电子线控功能,因此在系统升级过程中,需要通过外加电控装置实现车辆的自动化控制。



图 1 山特维克 LH514E 型电动铲运机

Fig.1 Sandvik LH514E electric Load-Haul-Dump (LHD) machine

1.1.1 硬件分类

稳定可靠的硬件平台是电动铲运机实现自动驾驶作业的核心基础。在改造过程中,系统结合功能需求加装了三类硬件单元(见图 2),分别为底盘线控硬件、自动驾驶硬件以及远程端硬件。各类硬件的构成与功能如下。

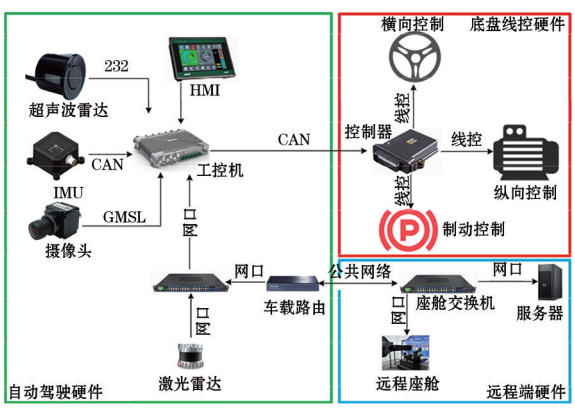


图 2 电动铲运机硬件系统构成

Fig.2 Hardware architecture of electric LHD machine

(1) 底盘线控硬件。

底盘线控硬件主要负责整车点火、油门开度、行车制动、挡位切换、转向控制以及铲斗与大臂举升等车载执行机构的控制。其中,硬件系统由控制器、传

感器和执行器三部分组成。控制器作为底盘指令上传与下发的核心单元,承担信息交互与指令调度;传感器包括铰接机构编码器、轮速里程计及大臂与铲斗液压油缸编码器,可实时采集车速、前桥转角及铲斗大臂位置等关键状态信息,为上层横向与纵向控制提供数据支撑;执行器由电子制动装置与电控电磁阀构成。在原有机械阀门的基础上加装电磁阀,可实现车辆关键执行机构完全的电子化控制,满足自动驾驶作业需求。

(2) 自动驾驶硬件。

自动驾驶硬件主要包括工控机、激光雷达、惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)、高清摄像头、超声波雷达、车载交换机及车载路由器等设备。其中,车载工控机作为核心硬件平台,承担各类传感器数据的处理与融合、自动驾驶算法运行、座舱之间的数据交互等任务;激光雷达与惯性测量单元构成核心感知单元,能够实时获取车辆周边环境信息及速度状态,为定位与感知模块提供必要的输入;高清摄像头用于采集车辆周围关键区域的视频画面并将其传输至远程座舱,便于操作人员在自动驾驶模式下及时掌握周边作业环境,从而降低事故风险,保障人员与设备安全;超声波雷达负责检测车辆与近距离障碍物之间的相对距离,并将测量结果传递至感知模块,为低速行驶与停靠作业提供近距避障数据支撑;车载交换机确保各网口通信设备之间的高效数据交互;车载路由器则承担车辆与远程座舱之间的无线通信,保障控制指令与状态数据的稳定传输。

(3) 远程端硬件。

远程端硬件主要包括远程座舱、数据服务器与座舱交换机。其中,远程座舱集成了人机交互软件、功能操作按钮、远程控制手柄与踏板,以及应急控制装置等,可实现操作人员对铲运机的远程操控需求;数据服务器用于存储和管理重要运行数据,包括座舱操作信息、故障记录及设备交互日志等,为后续系统维护与性能优化提供数据支持;座舱交换机则承担网络通信功能,保证远程端与车载设备之间的控制指令和状态信息能够实时双向传输,确保系统运行的可靠性与安全性。

1.1.2 硬件布置

为保障各传感器与控制设备的稳定运行,同时满足感知视野、定位精度与通信性能等功能需求,需对车载硬件进行合理的空间布置。电动铲运机部分硬件布置如图 3 所示。前置高清摄像头安装于驾驶室前支架处;前后激光雷达通过专用定制支架固定于车体首尾,其中后部雷达支架下侧同时安装惯性测量单元;铰链处布置角度编码器;后向摄像头安装于后车体两侧;车载计算单元、路由器与交换机等通信设备集中布置于驾驶舱旁的防爆集控箱内;超声波雷达则分布于后车体周边。

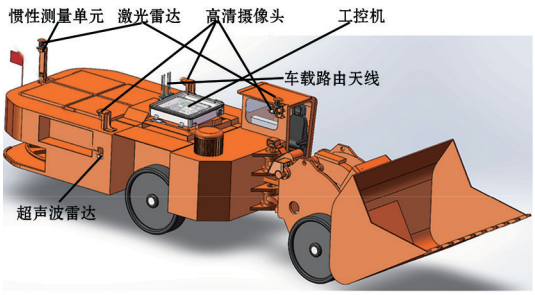


图 3 电动铲运机部分硬件布置

Fig.3 Partial hardware layout of electric LHD machine

1.2 软件系统设计

在硬件系统构建完成并具备感知、控制与通信能力的基础上,需通过配套软件系统实现功能调度,以实现自动驾驶的整体功能。铲运机自动驾驶软件基于机器人操作系统(Robot Operating System, ROS)进行分层设计与工程化实现。ROS 采用分布式节点架构,各功能模块以独立节点形式部署,通过松耦合的通信机制(Topic/Service)进行连接,具备良好的可扩展性与代码复用性。同时,ROS 提供标准的构建系统(catkin)、依赖管理工具(rosdep)与通信协议,便于团队协作与系统维护。电动铲运机软件系统主要构成如图 4 所示,本文重点介绍电动铲运机软件系统中的地图处理、定位、规划、决策和上层控制五大核心模块。

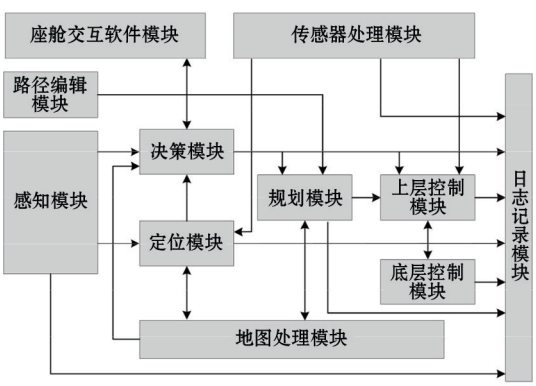


图 4 系统软件模块

Fig.4 System software module

1.2.1 地图处理模块

针对地下矿山巷道狭窄、封闭且无卫星信号的环境特点,为获取更加精确的环境参数,系统采用激光-惯性紧耦合框架(见图 5)实现三维地图构建。

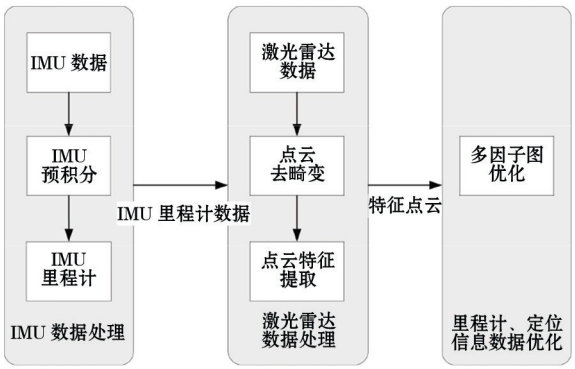


图 5 地图处理模块算法框架

Fig.5 Framework of the map processing algorithm module

该框架能够实现高精度、高实时性的车辆轨迹估计与地图生成,惯性测量数据为激光雷达里程计优化提供初始值,而激光雷达里程计的位姿解算结果又可反向修正惯性导航系统的累计误差。此外,为保证建图过程的实时性,系统引入滑动窗口机制进行局部匹配,从而提升计算效率。

实际构建的巷道地图如图 6 所示,通过车载设备人工驾驶铲运机完成建图并利用软件处理后,生成的巷道地图具有较高的特征分辨率,能够满足后续自动驾驶的定位需求。

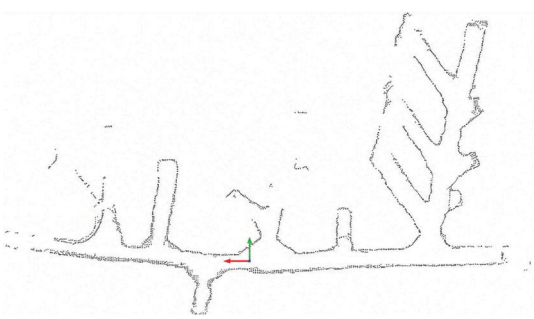


图 6 实际构建的巷道地图

Fig.6 Real-world constructed roadway map

1.2.2 定位模块

铲运机自动驾驶系统采用多传感器融合的定位方案,主要传感器包括激光雷达、惯性测量单元(IMU)及轮速计。定位模块算法框架如图 7 所示,该方案通过 IMU 与轮速计融合解算车辆的里程信息,结合激光雷达点云获取车辆的位置与姿态数据,在卡尔曼滤波框架下完成多源信息的最优融合,输出平滑且精确的位姿估计结果。

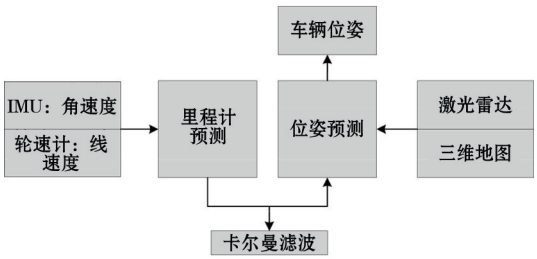


图 7 定位模块算法框架

Fig.7 Framework of the localization algorithm module

在点云配准方面,系统采用基于正态分布变换[12](Normal Distributions Transform,NDT)的点云配准算法完成激光雷达数据与实际构建的巷道地图的匹配。相较于传统的迭代最近点[13](Iterative Closest Point,ICP)算法,NDT 算法在复杂环境中具有更高的配准效率和更强的鲁棒性,适用于井下巷道场景的定位需求。

1.2.3 规划模块

规划模块采用全局路径规划-局部轨迹优化的协同机制,全局路径规划构建巷道通行骨架,局部轨迹规划结合实时感知信息生成可执行的运动轨迹,保障铲运机在复杂井下环境中高效、安全运行。

(1) 全局路径规划。基于自主研发的路径规划工具,在二维栅格地图中设定不同路径的起始点与目标点,并采用改进的 A* 算法[14-15]生成全局基准路径。该算法可在保证路径可行性的前提下,生成一条平滑且贴近巷道中心的最优路径。所得路径信息以 CSV 文件的格式保存并导入自动驾驶系统。系统加载路径后可在人机界面直观显示路径规划结果,如图 8 所示。

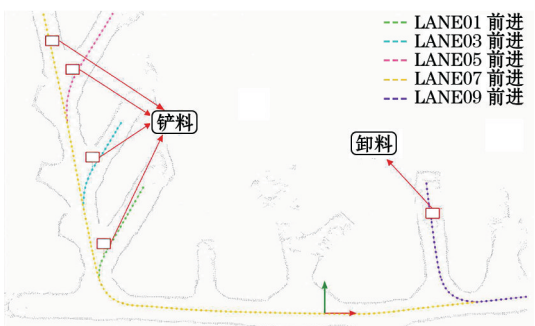


图 8 全局路径规划路线

Fig.8 Global path planning route

(2) 局部轨迹规划。巷道作业过程中,铲运机遥控铲料作业时,易出现车辆与全局路径偏离过大的

问题。因此,在全局路径规划的基础上,将车辆坐标系转换为 Frenet 坐标系[16],对横向与纵向偏差进行多项式插值与平滑处理,生成局部路径,如图 9 所示。

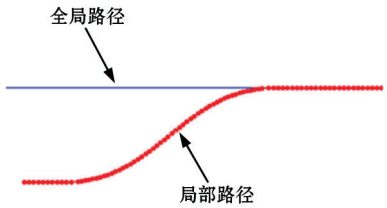


图 9 局部路径规划

Fig.9 Local path planning

1.2.4 决策模块

铲运机自动驾驶程序融合定位、测距与障碍感知,首先完成行驶场景的实时判别;随后将场景映射至预置行为库,生成起步、巡航、定点、遇障停车及铲装、卸载等指令;当作业场景与障碍分布发生变化时,按预设规则自动切换运行策略与行驶车速,兼顾铲运机运行时的安全性与平稳性。各状态之间的切换逻辑如图 10 所示。

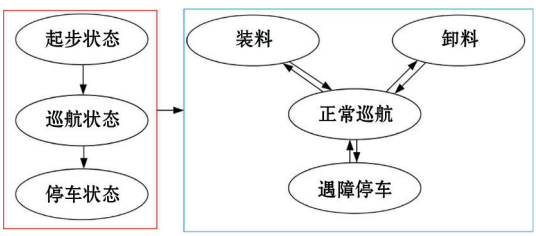


图 10 决策状态机

Fig.10 Decision state machine

1.2.5 上层控制模块

铲运机自动驾驶系统的上层控制框架如图 11 所示,分为纵向控制与横向控制。纵向控制通过调节油门开度与制动强度控制车速,使车辆按照规划速度平稳行驶。纵向控制一般采用比例-积分-微分(Proportional-Integral-Differential,PID)控制器实现,见式(1)。

$$u_k = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)\mathrm{d}t + K_d \frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t} \quad (1)$$

式中:u_k 为 PID 控制器的输出;K_p 为比例系数,决定系统对误差的敏感度;$e(t)$ 为当前误差;K_i 为积分系数,控制累积误差的修正强度;K_d 为微分系数,影响对误差变化率的响应。

横向控制通过调节铲运机的铰接角来实现转向控制,使车辆尽可能保持在规划路径上。采用基于铰接型底盘改进的纯跟踪算法[17-18],引入铰接角补偿与预瞄距离,使车辆在狭窄巷道内能够平滑、稳定地沿全局轨迹行驶,有效减小了横向偏差,避免转向频繁调整。前轮转向角计算见式(2)。

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2(L_1 + (L_2 + d)\cos\varphi)\sin\eta}{L_d}\right) + k\varphi \quad (2)$$

式中:L_d 为预瞄距离;L_1 为前车轴距;L_2 为后车轴距;d 为铰接点偏移距离;φ 为铰接角;α 为前轮转向角;η 为航向误差角;k 为铰接角补偿增益。

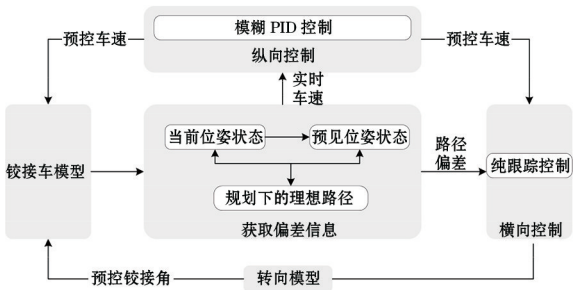


图 11 上层控制框架

Fig.11 High-level control framework

1.3 安全保障体系

针对井下有人-无人设备混行的作业场景,混合作业模式必然存在一定的安全隐患。为降低风险并保障无人驾驶铲运机作业安全,提出以下两方面针对性措施。

1.3.1 门禁系统

在铲运机作业区域与主巷道、其他巷道的连接位置部署安全门禁系统,实现作业区人员与设备的安全隔离。当无关人员或其他设备进入作业区时,门禁系统将立即触发报警,并联动车辆控制系统执行紧急制动。门禁系统的工作原理如图 12 所示。

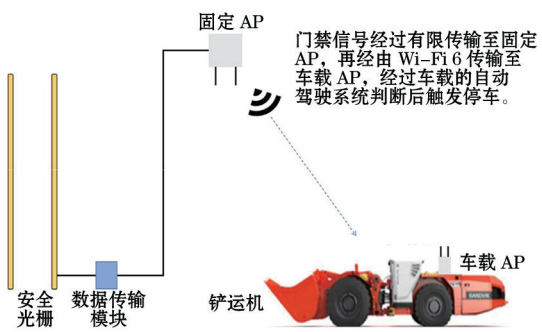


图 12 门禁系统工作原理

Fig.12 Working principle of the access control system

当安全光栅发出的光束被遮挡,接收端信号中断时,系统实时识别入侵目标并自动更新门禁状态。一旦触发门禁报警,铲运机立即执行停车熄火操作。

此外,为降低井下网络延迟带来的潜在安全隐患,系统设计了超时冗余保护机制:若 3 s 内未能获取到有效门禁状态信息,系统会自动判定为异常情况,并立即触发停车熄火。

1.3.2 防碰撞检测

感知模块主要包含巷道边界/障碍物检测与聚类报警,其总体目标是基于激光雷达点云数据实现环境感知,为后续路径规划与运动控制提供安全约束输入。

巷道边界/障碍物检测是保障铲运机行驶安全的重要环节。自动驾驶系统基于二维地图进行路径规划,但井下巷道环境往往存在不规则性,巷道边缘可能伴随凸出的岩石,两侧悬挂的风筒也会因通风鼓胀侵入巷道内部,对铲运机的自动驾驶造成干扰与潜在碰撞风险。因此,自动驾驶系统引入巷道边界实时感知模块,动态识别巷道实际边界,有效避免碰撞事故。同时,通过聚类分析处理巷道边界数据,降低噪声误报率,准确识别可能存在的碰撞风险并触发报警。

(1) 巷道边界/障碍物检测原理。巷道边界/障碍物检测模块通过铲运机前后位置的激光雷达获取点云数据,并根据前、后桥的位置对点云进行划分。通过构建对应的包围盒,将属于车体本体的点云剔除。在此基础上,以后桥安装高度为阈值对点云进行筛选,得到剩余有效点云,即视为巷道边界点云与障碍物点云。随后,系统计算巷道边界点云与车体包围盒之间的最小空间距离,并提取可能发生碰撞的点云索引信息,为后续处理提供输入。

(2) 聚类报警原理。聚类报警模块在巷道边界/障碍物检测的基础上,通过获取巷道边界点云及对应的障碍物索引信息,提取候选障碍物相关点云数据。随后,将点云由车体坐标系转换至全局地图坐标系,采用欧式聚类算法对点云进行聚类分析,解算各障碍物的质心位置与几何尺寸。

为避免偶发点云噪声造成的误检,在该模块中引入时序滤波抑制机制:仅当同一障碍物质心在连续 5 帧数据中均被检测到时,才将其纳入正式障碍物列表并发布。此外,系统设计了屏蔽机制,适配井下固定设施的实际应用需求。当远程座舱界面操作人员对某一障碍物点发出屏蔽指令后,系统将屏蔽点与障碍物质心列表进行对比,若某质心点在(x, y)平面内与屏蔽点的距离小于 0.4 m,则将该障碍物从障碍物列表中移除。最终,处理后的障碍物列表与告警标志信号同步发送至车辆控制层,并触发自动停车。防碰撞检测流程如图 13 所示。

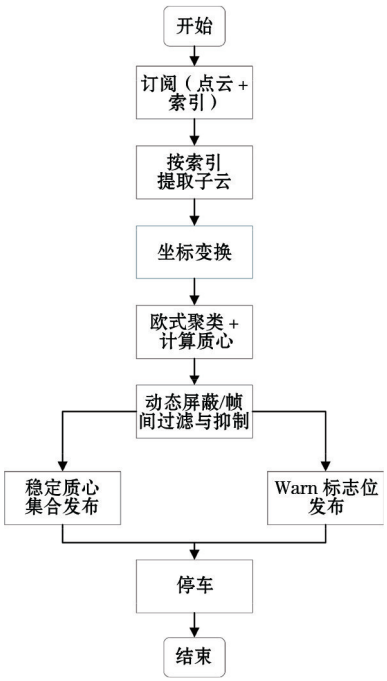


图 13 防碰撞检测流程

Fig.13 Anti collision detection process

2 远程遥控系统

2.1 远程遥控座舱

地面集控中心内布置远程遥控座舱,整体方案如图 14 所示。驾驶舱主屏可实时回传车载主摄像头的作业画面,同时集成巷道边界监测数据、历史故障记录入口、操作日志入口,以及行驶速度、铲斗位置和大臂位置等关键运行参数的可视化界面,便于操作人员全面实时掌握铲运机的作业状态。



图 14 远程座舱组成

Fig.14 Composition of remote cockpit

远程遥控座舱内部配置有操作手柄、制动踏板、油门踏板、左右扶手箱和 12 英寸触控屏等控制与交互装置。其中,左侧操作手柄主要用于控制车辆行驶,通过推动操作杆实现铲运机的转向控制,配备的 6 个功能按键,可完成挡位切换、路径模式切换等操作。右侧操作手柄主要控制大臂的举升与收放动作,配备的 6 个功能按键可实现摄像头切换、铲斗振动、称重系统启停等功能。

此外,座舱左右两侧均设有综合控制面板,集成灯光控制、灭火系统、作业模式切换、警示喇叭等功能键,进一步提升了操作的便捷性与安全性。脚下的左右踏板分别对应制动与油门控制,形成与操作手柄相互配合的多维度操控体系。

2.2 远程遥控通信系统

远程遥控通信系统如图 15 所示,该系统采用分层式网络拓扑结构,以保障数据传输的可靠性与实时性。地面集控中心的远程遥控座舱首先通过以太网接入网络控制柜,实现上位机与控制网络之间的有线通信。随后,网络控制柜通过光纤链路接入井下环形网络,保障地面与井下各节点间的高速稳定互联。为覆盖作业区域,在巷道内布设无线接入点(AP),并与车载 AP 建立无线通信链路。该链路采用 Wi-Fi6 技术,在井下复杂电磁与粉尘环境中具备高带宽、低时延及抗干扰能力,可有效保障远程控制指令的下行下发与车载传感器数据的回传。

整体而言,该系统自上而下构建了“地面集控中心—光纤环网—巷道无线网络—车载终端”四层级通信通道,为井下无人驾驶系统的安全稳定运行提供了可靠的网络支撑。

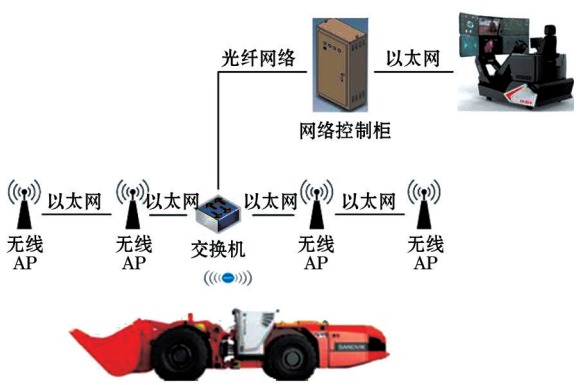


图 15 远程遥控通信系统

Fig.15 Remote control communication system

2.3 自动与遥控协同流程

按照上述设置,铲运机已实现各作业环节的分段自动化运行,其中运输与卸料环节可完全自主完成,铲料环节仍需人工远程遥控操作。为实现远程遥控铲料与自动运输、自动卸料环节的高效协同运行,系统整体工作流程如图 16 所示。

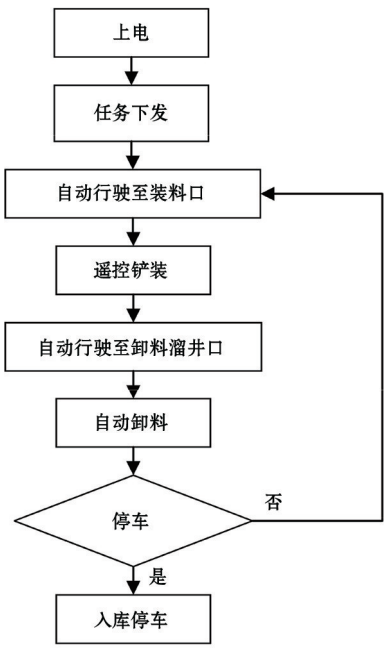


图 16 铲运机自动驾驶协同作业流程

Fig.16 Collaborative operation process of automatic driving for LHD

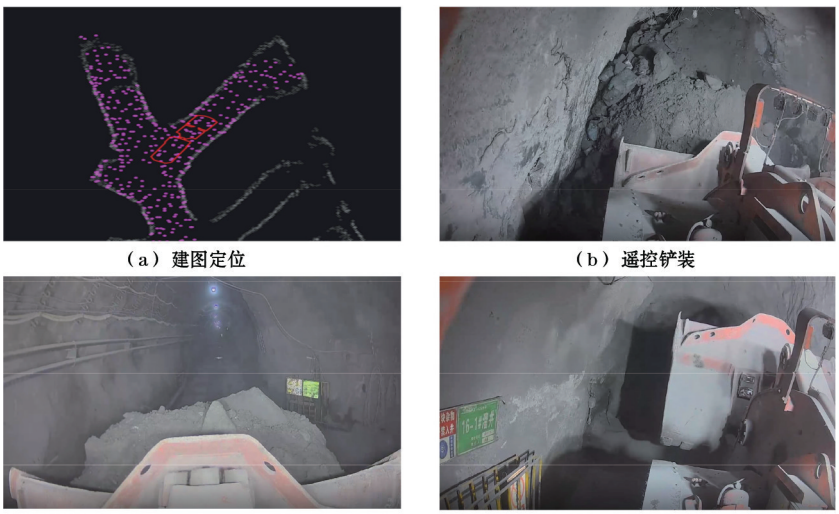
具体作业流程如下:系统上电完成初始化后,远程端下发当班铲装任务;铲运机自动驶向铲料点,到位后自动驻车,切换至远程遥控模式完成装料;铲装完成后切换回自动模式,自主行驶至卸料溜井口并执行自动卸料;卸完后车辆自动返回铲料点,形成“装料—去溜井—卸料—回铲料点”的作业循环。每轮循环结束后进行任务判定,若当班任务未完成则继续下一轮,若任务完成或需收工,则车辆自主行驶至指定车位,完成入库、熄火与断电操作。

3 工程应用

铲运机无人驾驶系统在某矿山采场-300 m 中段开展工程化应用与性能评估。该矿山采用分段垂直崩落法开采,-300～-400 m 中段分层高度为 25 m,采用自上而下、由远及近的分层爆破作业模式。应用区域巷道见图 6,包括约 80 m 主巷道与 30 m 出矿分支巷道,装料点至卸料点的运输总距离约为 150 m,现场应用结果如图 17 所示。无人

驾驶铲运机系统能够顺利完成井下定位、自动行驶、远程遥控铲装及自动卸料全程作业,各环节之间衔接通畅。

系统自投入使用以来,已连续稳定运行超 2 个月,累计出矿近 8 万 t,各项功能与稳定性目标达到设计预期。综合现场试验数据,改造后的井下铲运机满足远程自动驾驶的工程应用标准,出矿效率与国外同类先进技术基本相当,作业模式切换灵活、运行过程安全可控。为进一步验证系统在实际工况下的适配性与技术优势,围绕定位可靠性、横向跟踪精度、远程遥控时延及安全保障能力 4 个维度进行评估,具体结果如下。



(a) 建图定位 (b) 遥控铲装

(c) 自动驾驶 (d) 自动卸料

图 17 现场应用结果

Fig.17 Field application results

3.1 定位效果评估

为评估系统在长期作业中的定位可靠性,在连续多日的生产作业中,对连续定位时长与定位丢失事件进行全程记录与统计,从时间连续性与失效频次两个维度评估该系统在实际工况下的鲁棒性与长期稳定性。

在三班倒连续高强度作业(覆盖多条巷道与不同负载工况)期间,整个运行周期内仅发生 3 次定位失败,累计丢失约 25 min,占总运行时长的比例不足 0.11%。各次失效均为偶发的独立事件,发生时间段与间隔无明显规律,且每次均可在 10 min 内完成重新定位,未对作业节拍与生产产能造成实质性影响。经排查,定位失效的主要原因如下:

(1) 采场悬挂的通风风筒在未通风时自然下垂,偶发遮挡激光雷达视野,导致实时点云数量显著减少,引发短时定位丢失,现场可通过抬高并固定风筒,有效规避该问题;

(2) 放炮后或自动灭火系统触发场景下,巷道内烟尘浓度过高,导致点云质量下降,进而引发定位丢失。

上述定位失败现象具有偶发性、短时性与可处置性,不构成持续性风险。由此可见,所设计的定位模块在复杂井下环境中表现出良好的鲁棒性与长期稳定性,可满足无人驾驶铲运机的长期连续作业定位需求。

3.2 横向跟踪效果评估

通过控制铲运机沿预设路线自动驾驶,测试控制算法的横向跟踪能力,采用横向偏差指标量化车辆实际路径与参考线的横向偏离程度,如式(3)所示。

$$m=(x_r-x)\cos\theta_{des}+(y_r-y)\sin\theta_{des} \tag{3}$$

式中:m 为车辆实际路径与参考线的横向偏差;(x_r,y_r)为临近参考点坐标;(x,y)为测量实际坐标;θ_{des}为路径点航向角。根据井下作业情况,测试了 3 种路段场景。

3.2.1 直线跟踪场景

直线跟踪测试场景如图 18 所示,图中蓝色轨迹为参考路径,青色轨迹为车辆实际路径(颜色标识见电子版)。测试统计最大横向跟踪偏差与平均偏差,结果见表 1。

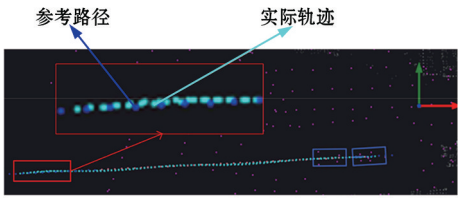


图 18 直线跟踪场景

Fig.18 Scenario of straight-line tracking

表 1 直线跟踪场景横向误差

Table 1 Lateral error in straight-line tracking scenario

速度/(km/h)	行驶方向	行驶距离/m	最大偏差/m	平均偏差/m
3.9	前进	60	0.133	0.086
6.9	前进	60	0.253	0.089
11.5	前进	60	0.502	0.225
3.9	后退	60	0.127	0.061
6.9	后退	60	0.205	0.085
11.5	后退	60	0.377	0.167

3.2.2 直角弯跟踪场景

直角弯跟踪场景如图 19 所示,测试车辆以 3.9 km/h 的速度通过不同转弯半径的弯道(转弯半径分别为 8 m、10 m、12 m),统计横向跟踪偏差,结果见表 2。

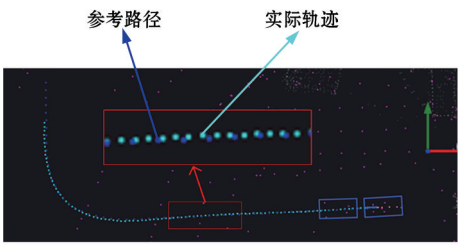


图 19 直角弯跟踪场景

Fig.19 Scenario of right-angle bend tracking

表 2 直角弯跟踪场景横向误差

Table 2 Lateral error in right-angle bend tracking scenario

转弯半径/m	行驶方向	转向方向	最大偏差/m	平均偏差/m
8	前进	右转	0.421	0.192
8	前进	左转	0.157	0.068
8	后退	右转	0.349	0.069
8	后退	左转	0.227	0.062
10	前进	右转	0.411	0.196
10	前进	左转	0.136	0.058
10	后退	右转	0.274	0.083
10	后退	左转	0.205	0.072
12	前进	右转	0.473	0.188
12	前进	左转	0.168	0.068
12	后退	右转	0.392	0.070
12	后退	左转	0.266	0.062

3.2.3 弧形路段跟踪场景

弧形路段跟踪场景如图 20 所示,统计不同速度下的横向误差,结果见表 3。

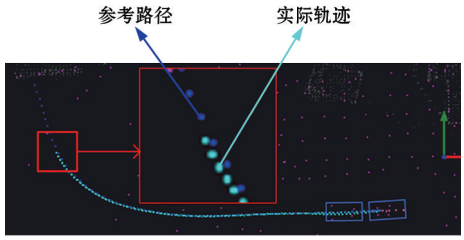


图 20 弧线路段跟踪场景

Fig.20 Scenario of curved-section tracking

表 3 弧形路段跟踪场景横向误差

Table 3 Lateral error in curved-section tracking scenario

速度/(km/h)	行驶方向	转向方向	最大偏差/m	平均偏差/m
3.9	前进	右转	0.314	0.131
3.9	前进	左转	0.100	0.043
3.9	后退	右转	0.312	0.042
3.9	后退	左转	0.296	0.052
6.9	前进	右转	0.306	0.156
6.9	前进	左转	0.085	0.041
6.9	后退	右转	0.372	0.086
6.9	后退	左转	0.287	0.091
11.5	前进	右转	0.493	0.294
11.5	前进	左转	0.390	0.123
11.5	后退	右转	0.451	0.162
11.5	后退	左转	0.393	0.196

综合上述三类工况的测试结果可知,在不同场景和行驶速度条件下,车辆路径跟踪的平均偏差均控制在 0.30 m 以内。需要说明的是,本次试验所用车辆为服役多年的在用设备,存在铰接角反馈精度偏差、前桥磨损致轮距与定位微偏等问题,使得车辆前进行驶时存在固有的右偏,该偏差在“前进-右转”工况中与转向方向同向叠加,因而该工况的平均偏差显著高于同场景下的其他行驶方式;而设备后桥磨损较轻,对跟踪精度的影响较小。考虑井下巷道的有效宽度通常为 3~5 m,该水平的跟踪误差相对于巷道端面尺寸处于可接受范围内。综上所述,本文所提出的路径跟踪方法可在保证安全距离的前提下,实现铲运机运行轨迹的有效控制,具备较高的安全跟踪精度与工程适用性,能够满足井下复杂环境下的无人驾驶作业要求。

3.3 井下远程遥控性能评估

为验证系统远程控制的通信可靠性,在装载区、卸料区及行驶路径的直线段、转弯段等关键工况点,对铲运机与远程操控端的通信时延性能进行了测

试,结果如图 21 所示。由图 21 可知,上述关键工况点的网络时延均保持在 5 ms 以内;在整个作业周期内,即便出现网络抖动,最大时延也未超过 15 ms。测试结果表明,该系统可在矿山实际环境中实现稳定、低延时的远程通信响应,为无人驾驶作业提供了有效支撑。



(a) 装载区延时 (b) 卸载区延时

(c) 直线行驶延时 (d) 弯道行驶延时

图 21 通信时延性能测试结果

Fig.21 Communication latency performance test results

3.4 安全保障效果评估

3.4.1 门禁系统效果

门禁系统的现场应用效果如图 22 所示,当门禁系统被触发后,座舱主屏将实时弹出闯入报警信息并显示对应的门禁编号,同时系统立即向铲运机下发停车指令,使车辆处于安全待机状态。当门禁报警信号解除后,车辆控制逻辑会自动切换至自动驾驶模式,确认作业环境安全后继续执行既定的作业流程。该机制实现了对作业人员与设备闯入的及时预警与快速处置,兼顾了井下作业的安全性与连续性。

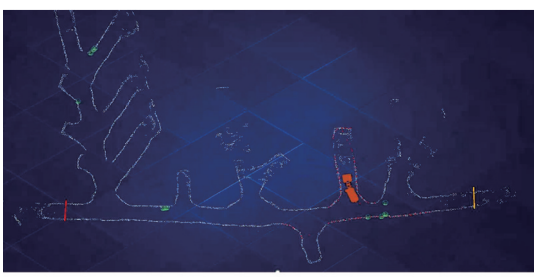
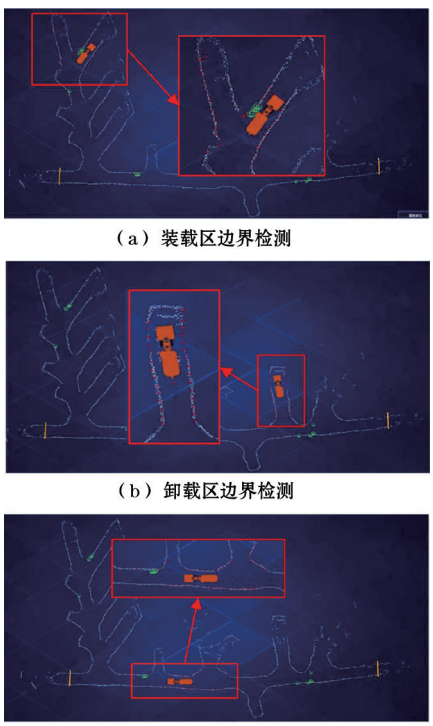


图 22 门禁报警停车应用效果

Fig.22 Application effect of access control alarm and parking

3.4.2 防碰撞效果

(1) 巷道边界/障碍物检测效果。巷道边界检测信息如图 23 所示,可以看出,铲运机自动驾驶在直行、转弯、遥控铲装及自动卸矿过程中,都可在远程遥控座舱的主界面看到清晰准确的巷道边界检测信息(用红色标出,颜色标识见电子版)。



(a) 装载区边界检测

(b) 卸载区边界检测

(c) 直线行驶边界检测



(d) 弯道行驶边界检测

图 23 巷道边界检测信息

Fig.23 Lane boundary detection information

(2) 聚类报警效果。在完成巷道边界检测结果的现场复核后,进一步对障碍物聚类及报警屏蔽策略开展应用评估,结果如图 24 所示。



图 24 障碍物报警停车

Fig.24 Obstacle alarm parking

自动驾驶过程中,当铲运机检测到潜在障碍物碰撞风险时,会发出报警信号并触发停车指令,同时远程遥控座舱的地图界面会弹出图 24 所示的红色报警标识(颜色标识见电子版)。操作人员确认该障碍物无碰撞风险后,可点击报警标识执行屏蔽操作,此时报警标志变为绿色。此后,铲运机即可切换回自动驾驶运行状态并继续作业,避免因误报警导致铲运机在刹车后频繁启停,提高作业连续性。

4 结论与展望

4.1 结论

本文针对井下矿山电动铲运机无人化作业需求,设计了一套远程遥控铲装及自主运输卸料的无人驾驶系统,并通过井下工业试验验证了该系统的性能与实用性,得出以下主要结论。

(1) 现场连续作业结果表明,电动铲运机自动驾驶系统可在井下复杂巷道环境下完成铲装、运输与卸料的全流程无人作业。量化指标显示,系统定位丢失概率仅为 0.11%、远程遥控端到端时延低于 5 ms、自动驾驶横向跟踪偏差不超过 0.30 m。同时,系统具备良好的安全保障能力,门禁系统和防碰撞检测模块可有效应对突发情况。

(2) 该系统可显著改善井下作业环境、降低劳动强度,提升整体生产效率。系统在产出可量化的经济与安全收益的同时,完成了对核心技术路径的场景化实证。此外,该系统具备良好适用性,可以通过传感器与执行接口适配及参数标定迁移至油动机型,实现对存量装备的智能化改造。

4.2 展望

面向严苛多变的井下工况,铲运机自动驾驶的后续研究将聚焦于感知退化、定位鲁棒性及动态交互方面,具体需要围绕粉尘、水雾、强反射等干扰环境下的稳健感知,以及弯窄巷道场景下的地图在线维护与拼接扩展等技术,以进一步提升系统在复杂环境下的长期稳定性与工程适用性。

参考文献(References):

[1] 张元生,战凯,马朝阳,等.智能矿山技术架构与建设思路[J].有色金属(矿山部分),2020,72(3):1-6.
Zhang Yuansheng, Zhan Kai, Ma Zhaoyang, et al. Technical architecture and construction ideas of intelligent mine[J].Nonferrous Metals (Mining Section),2020,72(3):1-6.

[2] 战凯,吕潇,金枫,等.地下金属矿智能开采技术与装备现状及"十四五"的思考[J].智能矿山,2021,2(1):11-15.
Zhan Kai, Lyu Xiao, Jin Feng, et al. The present situation of intelligent mining technology and equipment of underground metal mines and the thinking of "14th Five-Year Plan"[J]. Journal of Intelligent Mine, 2021, 2(1): 11-15.

[3] Guevara Luis, Rivadeneira Franco, Pezo Jose, et al. Autonomous rock detection for LHD vehicles in underground block caving [C]//2025 9th International Conference on Mechanical Engineering and Robotics Research (ICMERR).New York:IEEE,2025.

[4] Hennen Emilia, Pekarski Adam, Storoschewich Violetta, et al. Stereo vision-based underground muck pile detection for autonomous LHD bucket loading [J]. Sensors, 2025, 25(17):5241.

[5] 李铭,刘伟,宋岳汶,等.井下铲运机无人驾驶系统发展及 5G 应用[J].有色金属(矿山部分),2024,76(2):1-5+25.
Li Ming, Liu Wei, Song Yuewen, et al. Development of unmanned system for underground scraper and application of 5G[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2024,76(2):1-5+25.

[6] 杨雄.基于 5G+无人驾驶铲运机远程出矿技术及应用[J].采矿技术,2023,23(3):155-159.
Yang Xiong. Remote mining technology and application based on 5G+ unmanned scraper[J].Mining Technology, 2023,23(3):155-159.

[7] 甄文昊,张元生,吕潇,等.电动铲运机无损智能化改造及应用实践[J].有色金属(矿山部分),2023,75(2):13-18.
Zhen Wenhao, Zhang Yuansheng, Lyu Xiao, et al. Nondestructive and intelligent transformation and application practice of electric scraper[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2023,75(2):13-18.

[8] 朱铭,吕潇,张元生,等.自主行驶铲运机路径跟踪控制[J].有色金属(矿山部分),2023,75(1):9-14.
Zhu Ming, Lyu Xiao, Zhang Yuansheng, et al. Path following control of autonomous LHD[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2023,75(1):9-14.

[9] 马飞,杨皓岫,顾青,等.基于改进 A* 算法的地下无人铲运机导航路径规划[J].农业机械学报,2015,46(7):303-309.
Ma Fei, Yang Haoshen, Gu Qing, et al. Navigation path planning of unmanned underground LHD based on improved A* algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(7):303-309.

[10] 崔冰,赵辉军,段景文,等.基于改进 A* 算法的地下自动驾驶铲运机路径规划[J].矿业研究与开发,2024,44(5):185-193.
Cui Bing, Zhao Huijun, Duan Jingwen, et al. Path planning of underground autonomous LHD machines based on improved A* algorithm[J]. Mining Research and Development,2024,44(5):185-193.

[11] 罗维东,马宝全,孟宇,等.基于 NMPC 的地下无人铲运机反应式导航系统[J].煤炭学报,2020,45(4):1536-1546.
Luo Weidong, Ma Baoquan, Meng Yu, et al. Reactive navigation system of underground unmanned load-haul-dump unit based on NMPC[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(4):1536-1546.

[12] Biber P, Straber W. The normal distributions transform: a new approach to laser scan matching[C]//RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat No 03CH37453). New York:IEEE,2003.

[13] 李燕.一种改进 ICP 点云配准方法的研究[J].光学与光电技术,2024,22(3):23-29.
Li Yan. An improved ICP point cloud registration method[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2024, 22(3): 23-29.

[14] 代建龙,柴颖豪,陈凌,等.基于改进 A* 算法的井下移动机器人全局路径规划[J].有色金属(矿山部分),2025,77(5):25-36.
Dai Jianlong, Chai Yinghao, Chen Ling, et al. Global path planning of underground mobile robots based on an improved A* algorithm[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2025,77(5):25-36.

[15] Dai Jianlong, Chai Yinghao, Xiong Peiyin. Path planning of underground robots via improved A* and dynamic window approach[J]. Applied Sciences,2025,15(13):6953.

[16] 赵海鹏,孙小松,段敏.基于 Frenet 的智能车横向跟踪控制[J].辽宁工业大学学报(自然科学版),2023,43(4):216-220+227.
Zhao Haipeng, Sun Xiaosong, Duan Min, et al. Lateral tracking control of intelligent vehicles based on Frenet[J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition),2023,43(4):216-220+227.

[17] 谭震,崔祥,高永军,等.多传感器时延下井工矿无轨胶轮车轨迹跟踪控制[J].工矿自动化,2025,51(4):120-130.
Tan Zhen, Cui Xiang, Gao Yongjun, et al. Trajectory tracking control of trackless rubber-tired vehicles in underground mines under multi-sensor time delays[J]. Journal of Mine Automation,2025,51(4):120-130.

[18] 张博,周彬,夏启,等.矿用无人运输车辆轨迹跟踪控制算法研究[J].汽车工程学报,2024,14(2):168-180.
Zhang Bo, Zhou Bin, Xia Qi, et al. Trajectory tracking control algorithm for unmanned mining transportation vehicls[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024,14(2):168-180.