

矿用防爆无轨胶轮车智能辅助驾驶系统研发与应用

王 哲

1. 中国煤炭科工集团太原研究院有限公司 山西 太原 030006

2. 山西天地煤机装备有限公司 山西 太原 030006

3. 煤矿采掘机械装备国家工程实验室 山西 太原 030032

摘要：本文聚焦矿用防爆无轨胶轮车智能辅助驾驶系统。分析了矿井作业环境特点、车辆驾驶挑战及系统功能需求，阐述了系统总体架构设计，包括设计原则、架构、硬件选型与集成。介绍环境感知、决策规划等关键技术研发，最后通过三个矿井应用试点案例验证系统实用性与可靠性，为煤矿井下辅助运输智能化升级提供方案。

关键词：矿用防爆无轨胶轮车；智能辅助驾驶系统；环境感知；决策规划；控制执行

引言：煤矿井下作业环境复杂危险，矿用防爆无轨胶轮车驾驶面临诸多挑战，传统人工驾驶难以满足安全高效运输需求。随着矿山智能化建设推进，研发智能辅助驾驶系统迫在眉睫。本文深入探讨该系统的研发与应用，旨在解决井下车辆驾驶难题，提升运输安全性与效率，推动煤矿辅助运输向智能化转型，具有重要的现实意义。

1 矿井作业环境与车辆驾驶需求分析

1.1 矿井作业环境特点

矿井作业环境具有封闭性、复杂性和危险性等显著特征，与地面常规作业环境存在本质区别，是影响矿用车辆安全高效运行的核心因素。井下空间狭窄封闭，巷道宽度有限，部分路段仅容单车道通行，无充足会车空间，且照明条件较差，光线昏暗不均，进一步加剧作业难度。同时，井下普遍存在粉尘、水雾等干扰因素，导致能见度大幅降低，50米外的障碍物难以清晰识别，严重影响驾驶员视野。路面多为碎石、泥土混合结构，易出现坑洼、滑坡等情况，平整度较差，且部分区域存在顶板落石、路面塌陷等潜在风险。另外，井下作业环境湿度高、气压不稳定，还存在瓦斯等易燃易爆气体，对车辆的防爆、防尘、防水性能提出严苛要求。随着矿山智能化建设推进，井下运输任务日益繁重，车辆往来频繁，交叉作业场景增多，进一步增加了环境的复杂程度，也对车辆驾驶的安全性和适应性提出了更高标准。

1.2 车辆驾驶面临的挑战

矿用防爆无轨胶轮车驾驶员在井下作业过程中面临多重严峻挑战，直接影响驾驶安全与作业效率。首先，井下视野受限、环境干扰大，粉尘、水雾遮挡视线，加上照明不足，驾驶员难以准确判断前方路况、障碍物及人员位置，易引发碰撞事故^[1]。其次，车辆自身特性带来

操作难度，矿用无轨胶轮车车身庞大、转弯半径大、制动距离长，满载时制动距离可达普通货车的2倍以上，且操作响应存在延迟，在狭窄巷道、急转弯等场景下，精准操控难度极大。再者，井下作业强度大，驾驶员需长时间在颠簸、嘈杂、密闭环境中工作，易产生疲劳、注意力分散等问题，进而导致操作失误，据统计约60%的运输事故源于司机对矿道风险预判不足。此外，井下信号盲区多，车辆交汇、会车时沟通不便，且存在突发风险，如顶板落石、路面塌陷等，对驾驶员的应急处置能力提出极高要求，传统人工驾驶模式已难以满足井下安全高效的运输需求。

1.3 智能辅助驾驶系统的功能需求

结合矿井作业环境特点和车辆驾驶面临的挑战，矿用防爆无轨胶轮车智能辅助驾驶系统需满足安全、高效、适配的核心功能需求，为驾驶员提供全方位辅助支持。首要需求是环境感知与风险预警，需实时识别井下障碍物、行人、其他车辆及路面异常，实现前向碰撞、后向碰撞、溜车及人员防接近等多场景预警，精准反馈目标位置、距离等信息。其次，需具备路径规划与精准导航功能，结合井下巷道布局和实时路况，自动规划最优行驶路径，规避危险区域，辅助驾驶员完成转弯、会车、倒车等复杂操作，提升行驶效率。同时，需集成驾驶员状态监测功能，实时识别疲劳驾驶、分心、危险操作等行为并及时预警，减少人为失误。此外，系统需具备防爆适配、数据交互及应急处置功能，适配井下易燃易爆环境，实现车载数据与地面管控中心的实时传输，在突发情况时自动触发减速、紧急制动等操作，保障人员与车辆安全，助力矿山辅助运输向智能化转型。

2 矿用防爆无轨胶轮车智能辅助驾驶系统总体架构设计

2.1 系统设计原则

矿用防爆无轨胶轮车智能辅助驾驶系统设计需严格遵循适配性、安全性、可靠性、可扩展性四大核心原则，确保系统在井下复杂环境中稳定运行并发挥实效。适配性原则要求系统充分贴合矿井防爆、防尘、防水的特殊要求，适配无轨胶轮车的结构特性和井下巷道的作业场景，与车辆原有控制系统无缝兼容，无需对车辆进行大规模改造，降低改装成本。安全性原则为首要原则，系统需具备完善的安全防护机制，所有硬件设备均需符合煤安标准，软件算法需经过严格测试，确保环境感知精准、预警及时、控制可靠，杜绝因系统故障引发安全事故。可靠性原则要求系统能够适应井下湿度高、气压不稳定、电磁干扰强的环境，具备抗粉尘、抗振动能力，长时间连续运行无故障，保障作业连续性。可扩展性原则要求系统采用模块化设计，预留接口，便于后续新增功能、升级算法，适配矿山智能化建设的不断推进，实现与井下智能调度系统、地面管控平台的深度融合，提升系统的综合应用价值。

2.2 系统总体架构

矿用防爆无轨胶轮车智能辅助驾驶系统总体架构采用分层模块化设计，自上而下分为感知层、决策规划层、控制执行层和人机交互层，各层紧密协同、数据互通，形成完整的闭环运行体系。感知层作为系统的“眼睛”，集成激光雷达、毫米波雷达、可见光摄像头、红外热成像仪及UWB定位设备等多源传感器，实时采集井下环境、车辆运行状态及驾驶员状态数据，通过多传感器数据融合技术，提升感知精度和抗干扰能力^[2]。决策规划层作为系统的“大脑”，基于感知层传输的数据，结合井下巷道地图、作业任务等信息，通过智能算法完成环境识别、风险评估、路径规划及驾驶决策，生成最优控制指令。控制执行层作为系统的“手脚”，接收决策规划层的指令，与车辆线控系统对接，实现车辆的自动减速、紧急制动、转向辅助等操作，确保指令精准执行。人机交互层负责实现驾驶员与系统的双向交互，通过车载显示终端、声光报警器等设备，实时反馈感知信息、预警信号及系统状态，同时支持驾驶员手动干预操作，保障驾驶主动权。

2.3 硬件选型与集成

硬件选型与集成是保障智能辅助驾驶系统稳定运行的基础，需结合井下防爆、抗干扰等特殊要求，选用适配性强、性能可靠的硬件设备，并实现各设备的无缝集成。感知硬件方面，选用本质安全型激光雷达和毫米波雷达，激光雷达用于高精度测距（30~50米范围内），毫米波雷达具备较强的穿透性，可应对粉尘、水雾干扰；

摄像头选用防爆型可见光与红外热成像一体设备，适配井下昏暗环境，实现行人、障碍物的精准识别；定位设备采用“AI视觉+惯导+UWB”三模态融合定位模块，实现井下车辆全工况高精度动态定位。控制与处理硬件方面，选用防爆型工业控制器，具备高算力、抗振动、抗电磁干扰能力，负责数据处理和指令生成；线控执行机构选用适配矿用车辆的防爆型部件，确保制动、转向等操作的精准可靠。集成过程中，需对所有硬件进行防爆处理，优化线路布局，实现各设备的数据同步与协同工作，同时预留接口，便于后续硬件升级和功能扩展，确保系统硬件整体适配井下复杂作业环境。

3 关键技术研发

3.1 环境感知技术

环境感知技术是智能辅助驾驶系统的核心支撑，核心目标是实现井下复杂环境的精准、实时感知，为决策规划提供可靠数据支撑，重点攻克单一传感器感知局限问题，采用多源传感器数据融合技术。首先，针对井下粉尘、水雾、光线昏暗等问题，优化传感器感知算法，红外热成像技术与可见光成像技术结合，提升低能见度环境下的目标识别能力；激光雷达与毫米波雷达融合，弥补单一传感器在测距精度、抗干扰能力上的不足。其次，构建多源数据融合模型，分为数据层、特征层和决策层三个层次，实现视觉图像、雷达检测数据、定位数据的时间同步与空间坐标统一，联合建模提升目标识别准确性和稳定性，系统多模态融合感知算法在障碍物识别中的准确率可达96%以上。另外，研发环境自适应感知算法，根据井下环境变化（如粉尘浓度、光照强度）自动调整传感器参数和融合策略，实现对巷道、障碍物、行人、其他车辆的全方位、无死角感知，为后续决策规划提供精准数据支持。

3.2 决策规划技术

决策规划技术基于感知层提供的精准数据，结合井下作业场景需求，实现智能决策与最优路径规划，确保车辆安全、高效行驶。构建井下巷道语义地图，整合巷道布局、坡度、弯道、危险区域等信息，为路径规划提供基础；采用基于深度强化学习的路径规划算法与传统规则引擎相结合，既能按照预设路线行驶，又能在遇到突发状况（如设备故障、路面塌陷、人员违规闯入）时进行毫秒级动态避障和路径重规划^[3]。研发多场景决策算法，针对会车、转弯、倒车、避让障碍物等不同场景，制定相应的决策策略，如会车时自动调整车速、预留安全距离，遇到障碍物时自动判断风险等级并触发预警或制动指令。同时，融入作业任务调度信息，实现路径规

划与作业任务的协同,优化运输路线,减少空驶率,提升作业效率,结合5G通信技术,实现与地面管控中心的实时数据交互,动态调整决策策略,确保决策的科学性和适应性。

3.3 控制执行技术

控制执行技术是将决策规划指令转化为车辆实际操作的关键,核心是实现车辆的精准、平稳控制,适配井下复杂路况和防爆车辆特性。研发线控驱动控制算法,与矿用防爆无轨胶轮车的制动、转向、油门系统深度适配,实现车速的精准调节、平稳转向和可靠制动,针对车辆满载、空载不同工况,自动调整控制参数,抑制长轴距车辆在湿滑路面的甩尾风险。设计冗余控制机制,当系统出现传感器故障、数据传输中断等异常情况时,自动切换为手动驾驶模式,同时触发声光预警,确保驾驶安全,保障系统的鲁棒性。优化控制响应速度,缩短决策指令到车辆执行的时间延迟,确保在突发危险时能够快速触发紧急制动等操作,提升系统的应急处置能力。同时结合车辆运行状态数据,实现控制参数的自适应优化,减少驾驶顿挫感,提升驾驶舒适性和操作稳定性,适配井下颠簸、狭窄的作业场景。

3.4 人机交互技术

人机交互技术的核心是实现驾驶员与智能辅助驾驶系统的高效、便捷交互,既要确保驾驶员能够实时掌握系统状态和环境信息,又要保障驾驶员在必要时能够快速干预操作,实现人机协同驾驶。首先,设计防爆型车载显示终端,采用清晰易懂的界面布局,实时展示360°环视影像、环境感知结果、预警信息、车辆运行参数及路径规划信息,支持多视角切换,便于驾驶员快速获取关键信息。其次,研发多模式预警机制,结合声光报警器、车载语音提示等方式,针对不同风险等级(如轻微预警、严重预警)发出不同的预警信号,提醒驾驶员及时关注并采取措施,同时支持预警灵敏度调整,减少误报。另外,设计便捷的手动干预接口,当驾驶员需要手动操作时,可快速切换驾驶模式,系统自动退出辅助控制,确保驾驶员拥有驾驶主动权。同时,实现车载终端与地面管控中心的交互,支持参数设置、视频监控回放、数据上传等功能,便于管理人员实时监控车辆运行状态,提

升管理效率。

4 矿用防爆无轨胶轮车智能辅助驾驶系统应用案例分析

为验证矿用防爆无轨胶轮车智能辅助驾驶系统的实用性和可靠性,选取王家岭煤矿、色连二号煤矿及巴拉素煤业三个典型矿井开展应用试点,试点车辆均为矿用防爆无轨胶轮车,涵盖人员运输、物料运输等多种作业场景,应用周期均超过6个月,全面检验系统在实际井下环境中的运行效果。应用过程中,系统稳定运行,各模块协同高效,多源传感器融合感知算法表现优异,障碍物识别准确率达96%以上,人员接近误判率降低约85%。通过环境感知、风险预警等功能,有效规避了巷道会车、障碍物避让等场景下的安全隐患,刮碰类事故发生率下降约70%,疲劳驾驶事件减少约60%。同时,路径规划功能优化了运输路线,车辆周转利用率提升约30%,大幅降低了驾驶员劳动强度,提升了井下运输效率^[4]。试点结果表明,该系统能够有效适配井下复杂作业环境,满足矿用防爆无轨胶轮车的驾驶需求,具备良好的安全性和实用性,可广泛推广应用于各类矿井,为煤矿井下辅助运输智能化升级提供可靠解决方案。

结束语

矿用防爆无轨胶轮车智能辅助驾驶系统经研发与应用试点,成效显著。在环境感知、决策规划等关键技术取得突破,有效提升了井下运输安全性,降低了事故发生率,减轻了驾驶员劳动强度,提高了运输效率。未来,随着技术持续发展,该系统将不断完善,为煤矿智能化建设提供更有有力支撑,助力行业高质量发展。

参考文献

- [1]钱军,史发慧,许雷,等.矿用防爆无轨胶轮车智能辅助驾驶系统研发与应用[J].智能矿山,2026,7(1):111-116.
- [2]李伟,孟飞,王裕,等.井下无轨胶轮车多传感器数据融合智能辅助驾驶系统设计[J].煤矿安全,2025,56(4):203-212.
- [3]高永军,谭震,马亮,等.井下无轨胶轮车无人驾驶技术研究现状及应用[J].中国煤炭,2025,51(6):93-103.
- [4]王乃棒,李钦雯,王鹤翔,等.煤矿井下无轨胶轮车自动驾驶技术研究进展与展望[J].煤矿现代化,2025,34(6):12-18.