

平巷乘人车智能化辅助行驶系统设计

王胜龙¹, 蒋琪², 张华成¹, 李明远¹, 李志卫¹

(1. 淮南矿业(集团)有限责任公司朱集东煤矿, 安徽 淮南 232087;

2. 淮北祥泰科技有限责任公司, 安徽 淮北 235047)

摘要: 针对平巷乘人车在矿山井下运输安全保障方面的不足, 提出了一种智能化辅助行驶系统。首先通过分析事故案例, 明确其在环境感知、风险预警分级及干预措施分级等方面的需求。进而开展系统总体设计, 涵盖环境感知、控制决策与系统协同三层架构, 利用多传感器融合等技术实现对车辆周边环境的实时监测与风险评估。该系统具备多传感器融合、冗余控制以及多模态人机交互等特点和优势, 经在朱集东煤矿的测试, 证明能显著提升车辆行驶安全性, 降低事故风险。

关键词: 平巷乘人车; 智能化; 辅助驾驶; 事故预防

中图分类号: TD52 **文献标志码:** A

Design of intelligent auxiliary driving system for underground horizontal drift personnel car

WANG Shenglong¹, JIANG Qi², ZHANG Huacheng¹, LI Mingyuan¹, LI Zhiwei¹

(1. Zhujidong Coal Mine, Huainan Mining (Group) Co., Ltd., Huainan 232087, Anhui, China;

2. Huaibei Xiangtai Technology Co., Ltd, Huaibei 235047, Anhui, China)

Abstract: An intelligent assisted-driving system for personnel carriers in mine drifts is proposed to address safety-assurance deficiencies. By analyzing accident cases, the needs in environmental perception, risk-warning classification, and intervention-measure classification are clarified. The system is designed with three layers: environmental perception, control decision-making, and system coordination. Using multi-sensor fusion and other technologies, it enables real-time monitoring and risk assessment of the vehicle's surroundings. With features like multi-sensor fusion, redundant control, and multi-modal human-computer interaction, this system has been tested at the Zhujidong Coal Mine. Results show it can enhance driving safety and reduce accident risks.

Key Words: underground horizontal drift personnel car; intelligence; auxiliary driving; accident prevention

平巷乘人车由电动机车牵引运行, 主要适用于坡度较小的矿山井下平巷和平硐, 用于运送矿山工作人员、伤病员及其他救灾物资, 是矿山平巷运输人员的安全设备。然而, 近年来的多起事故表明, 现有的平巷乘人车在安全保障方面还存在较多不足。例如, 2021年山西省某煤矿发生的一起运输事故, 造成1人死亡, 直接经济损失206.48万元, 暴露了异常识别和安全风险等级预警方面的缺失。又如, 2024年江西省某煤矿发生的一起较大窒息事故, 造成3人遇难, 直接经济损失418万元, 表明气体检测及预警没有真正实现安全保障。再有, 2023年贵州省某煤矿运输平巷发生的一起重大火灾事故, 造成16人

死亡, 3人受伤, 直接经济损失4233.82万元, 凸显了消防报警的重要性。除此之外, 现有的平巷乘人车虽然能够配置字幕显示屏和音响, 可以输出提示信息, 但信息来源种类少, 很多情况下, 这些装置成为摆设, 无法及时提供有效的安全信息。因此, 仅提供风险预警信息还远远不足, 有必要研究降低风险的干预措施。

当前, 矿上智能化手段已得到广泛应用, 但大多侧重于提升工作效率^{[1][2]}, 对于提升车辆的智能化水平也多集中在地面^[3], 还较少关注井下平巷乘人车的行驶安全。为了减少此类事故的再次发生, 本文从风险感知、风险预警和行驶干预角度出发, 围绕平巷乘人车的安全保障水平, 通

过智能化行驶辅助，来提升整个系统的安全性。

1 平巷乘人车辅助行驶系统需求分析

通过调研和分析 2020 年以后的 47 起典型事故案例，总结平巷乘人车的安全辅助需求，如图 1 所示。忽略事故原因中的多因素叠加，主要原因分别有：环境感知失败占 51.1%、违章作业占 61.7%、操作失误占 23.4%、安全装置失效占 14.9% 等，从控制的角度，进一步将上述原因归结为环境精准感知需求、风险分级预警需求和主动干预控制需求等。

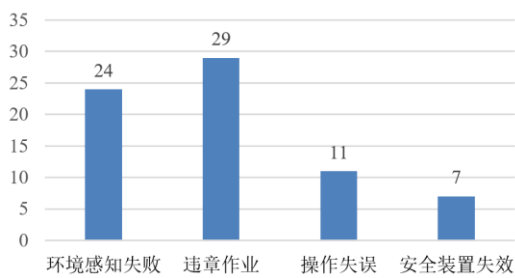


图 1 事故原因

1.1 环境感知需求

瓦斯浓度检测：在煤矿井下，瓦斯浓度的实时监测至关重要^[4]。根据《煤矿安全规程》，当瓦斯浓度达到 1.0% 时，若未能及时检测并采取通风或停车措施，极易导致爆炸事故。因此，乘人车辆应配备可靠的瓦斯监测设备（如甲烷传感器），以便在瓦斯浓度超标时提醒停止作业、撤离人员。

火灾烟雾检测：一旦发生火灾，烟雾会迅速扩散，影响视线并危及人员安全。然而，矿井下环境通常具有高温、高湿、高粉尘的特点，这些条件会显著影响烟雾检测的准确性^[5]。单一检测手段往往难以准确识别火灾烟雾，因此需要结合多种检测手段，如光学烟雾传感器和离子烟雾传感器，以提高检测的可靠性。

障碍物与巷道状态监测：平巷乘人车在矿井下行驶过程中，可能面临多种突发状况，例如轨道断裂、巷道坍塌、临时障碍物等。这些突发状况会严重干扰车辆的正常运行，甚至直接威胁到作业人员的生命安全^[6]。加大对巷道状态的全面监测，能够及时发现潜在的安全隐患，从而采取

有效的预防和应对措施。

1.2 风险预警分级需求

鉴于矿井下的复杂环境与潜在风险，构建一个全面且精细的分级预警机制非常重要。并且，风险预警系统需与其他矿用系统紧密联动，形成全面高效的安全保障体系。

例如，当瓦斯浓度轻微超标，处于 1.0% 至 1.5% 之间时，触发一级预警，系统通过声光报警提醒驾驶员注意，并建议采取通风或减速等预防性措施；若瓦斯浓度达到或超过 1.5%，则立即触发二级预警，此时除了声光报警外，系统自动限制车辆速度，并向地面监控中心发送紧急信号；若瓦斯浓度进一步升高至 3.0% 或检测到明火、大量烟雾等紧急情况，系统则触发最高级别的三级预警，自动实施紧急制动，主动刹停车辆，或控制车辆向安全方向撤离，防止爆炸等严重事故的发生。

同时，与通信系统无缝对接，确保预警信息及时准确传达给地面监控中心和作业人员。与人员定位系统联动，预警时自动识别车辆周边人员位置，通知其避险。与紧急撤离指示系统联动，高级别预警时启动巷道内紧急撤离指示灯和语音广播，引导人员安全撤离。

1.3 干预措施分级需求

从风险预警级别可以看出，当系统感知到危险因素，仅仅发送预警信息是不够的，与相关系统联动，实施分级干预措施，可以提供更加有效的干预措施。

初级辅助：当系统检测到轻微潜在危险，如瓦斯浓度轻微超标、较远前方出现障碍物时，自动触发减速指令，降低车速。同时联动相关系统，如矿井通风系统，根据瓦斯浓度调整通风参数，以稀释瓦斯。此外，与照明系统联动，自动调整照明方向和亮度，为驾驶员提供清晰视野。

中级辅助：当系统检测到严重潜在危险，如出现明火、大量烟雾、巷道坍塌等，迅速触发紧急制动，刹停车辆。同时联动洒水灭火系统，自动灭火降温，向地面监控中心发送紧急信号，报告事故详

情，请求救援等。

高级辅助：系统利用多种雷达与视觉融合算法，实时监测前方环境，识别轨道断裂、临时障碍物等突发状况。一旦发现障碍物，立即规划避障路径，调整车辆行驶方向。避障时，考虑巷道宽度、轨道稳定性等因素。若避障路径不可行，则触发紧急制动。同时与照明系统联动，优化检测系统和驾驶员视野。

2 平巷乘人车智能化辅助行驶系统总体设计

在系统需求分析的基础上，提出图 2 所示系统总体方案，总体包括了环境感知、控制决策层和系统协同三部分。



图 2 系统整体架构

(1) 环境感知

车辆配置了可见光摄像头、红外热成像摄像头、激光雷达、毫米波雷达、超声波传感器、气体传感器以及惯性测量单元（IMU）等多类型传感器。通过多传感器融合技术，系统能够实时感知车辆周围环境，实现功能包括障碍物检测、道路边界识别、行人识别与路径预测、烟雾识别以及气体浓度检测等^[8]。此外，系统还预留了扩展接口，后续可进一步接入振动传感器、压力传感器、温度传感器、红外人体感应摄像头以及生命体征监测模块，用于车辆状态监测和乘员状态检测。

(2) 控制决策

系统采用双电子控制单元（ECU）架构，包含车载 ECU 和备用 ECU，确保控

制决策的高可靠性和容错性。决策系统构建了多维度风险评估体系，结合环境感知结果，运用自适应路径规划算法（融合动态障碍物预测与多约束条件优化），实时生成安全通行方案，有效规避移动障碍物和复合型危险源。行为决策模块通过多目标决策算法权衡行驶效率与安全优先级，并借助协同决策机制与矿井中央控制系统联动，实时接收全局风险信息（例如气体泄漏扩散预警），据此动态调整局部行驶策略，保障车辆在复杂矿井环境下的安全运行^[9]。

(3) 系统协同

系统配备高性能存储单元，实时记录车辆运行的关键数据，如传感器采集的环境信息、控制决策指令、车辆行驶状态及故障日志等^[10]。这些数据支持车辆实时运行，并为后续分析、优化和事故追溯提供依据。通过集中式设备管理模块，系统对车辆的传感器、ECU、执行器等设备进行统一管控，实时监测设备运行状态，自动检测故障并报警，同时支持远程配置和升级设备参数。此外，系统具备与矿用以太网的有线和无线通信能力，支持与其他设备的信息共享和协同工作。

3 关键子系统设计与实现

3.1 安全供电子系统

首先，严格遵循 GB3836.1-2021《爆炸性环境 第 1 部分：设备通用要求》及 GB3836.4-2021《爆炸性环境 第 4 部分：本质安全型“i”》标准，取得 Ex ib IIC T4 组防爆认证。同时，适应 -40°C~+70°C 的环境温度，能承受 60kPa~130kPa 的气压，能承受不超过 95%RH 的湿度；配备氧含量动态监测模块，当检测到氧浓度偏离 18%~23%安全区间时自动启动保护机制。并且机械结构通过 IEC 61373 认证，可承受 5Grms 随机振动及 50g 机械冲击。

其次，提供多电压水平输出。输出端配置 24V/48V/127V 三档可调直流电压，支持±1%稳压精度、配备 CAN 总线通信接口；采用分层递阶式保护策略：一级（MOSFET 电子熔断器，响应时间 <100μs）、二级（磁保持继电器）、三级

(物理隔离断路器)；集成绝缘监测单元(IMD)，实时检测正负极对地绝缘阻抗(阈值 $>100\text{k}\Omega/\text{V}$)，预防漏电风险。

3.2 多维度环境感知子系统

多维度环境感知子系统是平巷乘人车智能化辅助行驶系统的关键部分，它融合了多种先进的传感器技术，以实现车辆周围环境的全面、精准监测。车辆配备的多种类型传感器各司其职，又相互协作，通过多传感器融合技术，系统能够实时获取车辆周围环境的丰富信息，包括障碍物的检测、道路边界的识别、行人的识别与路径预测、烟雾的识别以及气体浓度的检测等，为后续的风险评估和决策提供准确的数据支持。

此外，该子系统还具有良好的扩展性，预留了扩展接口。后续可根据实际需求和应用场景，进一步接入振动传感器、压力传感器、温度传感器、红外人体感应摄像头以及生命体征监测模块等，以实现车辆状态和乘员状态的监测，进一步丰富系统的感知功能，提升其对复杂矿山井下环境的适应性和应对能力。

多维度环境感知子系统的构建，为平巷乘人车的智能化辅助行驶提供了坚实的基础，使其能够敏锐地感知周围环境的变化，及时发现潜在的安全隐患，为后续的控制决策和干预措施提供可靠依据。

3.3 人机交互界面

基于组态软件，设计了人机交互界面，可以同时运行于车载触摸屏和设备管控上位机上，能够多界面地提供各项繁简信息。



图3 监控界面

4 系统特点和优势

下面总结系统的特点和优势如下：

(1) 多传感器融合技术

多传感器融合技术是本系统的核心技

术之一，通过时间同步和空间校准算法消除传感器数据差异，降低环境干扰，提高感知准确性。多传感器融合算法能够实时整合数据，消除因传感器采样频率、分辨率和噪声特性差异导致的数据不一致性。多种传感器的数据融合，使得系统能够相互验证和补充，明显提升检测的准确性和可靠性。

(2) 冗余控制设计

为了保证系统在极端条件下的稳定性和可靠性，系统采用了冗余控制设计。采用双 ECU (电子控制单元) 架构，主系统和备份系统相互独立，同时运行。正常情况下，主系统负责执行控制任务，如风险评估、路径规划、车辆控制等。一旦主系统出现故障，备份系统能够无缝接管，保证系统功能不受影响，提高了系统的容错能力和抗干扰能力。

(3) 多模态人机交互

多模态人机交互是本系统的一大亮点，通过智能字幕显示屏、定向语音播报和应急通信中继等多种方式，实现高效的信息传递。智能字幕显示屏动态显示逃生路线、气体浓度、火灾定位等关键信息，并与矿井数字孪生地图联动，使驾驶员和乘员直观了解危险状况和应对措施。定向语音播报通过座椅头枕扬声器定向传递指令，避免井下噪声干扰，保证信息准确传达给每个乘员。

5 结语

本文提出的平巷乘人车智能化辅助行驶系统，能够较好提升平巷乘人车的运行安全性。该系统通过构建涵盖环境感知、风险预警以及主动干预等多环节的多维度安全防控体系，实现了对平巷乘人车行驶过程的智能化安全保障。目前，已针对朱集东煤矿的两辆矿下乘人车完成了部分升级改造工作，并在诸如日常人员运输、模拟突发状况等多种典型场景下进行了多项的测试，测试结果显示系统运行稳定、性能可靠，车辆的行驶安全性得到了显著提升，有效降低了事故风险。下一步，将继续推广改造范围，为矿下作业人员提供更好的安全保障。

参考文献:

- [1] 刘冀尧,李彬.智能化和低碳化矿山机械在国内的应用及发展趋势[J].矿山机械,2024,52(05):49-54.
- [2] 李晓东.带式输送机煤流智能化控制系统研究[J].矿山机械,2025,53(04):67-70.
- [3] 马力,雷尧,常治国,等.基于改进YOLOv8m-PSC的露天煤矿危险驾驶行为检测系统[J/OL].煤炭学报,1-12[2025-04-25].<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1310>.
- [4] 张鹏.分布式激光甲烷检测系统及温度补偿技术研究[J].矿业安全与环保,2024,51(05):112-118.
- [5] 程英模,苗德俊,徐毓名,等.矿用空冷器翅片主动抑尘研究[J].煤矿机械,2020,41(01):34-37.
- [6] 韩雷,云龙.基于FDH包围盒算法的煤矿井下机器人避障最小安全距离控制[J].中国煤炭,2024,50(S1):21-27.
- [7] 黄涛,肖仁喜.矿用架空乘人保护装置及安全设施[J].煤矿机电,2020,41(02):92-95.
- [8] 郝斌.矿用架空乘人装置安全保护系统优化设计[J].机械工程与自动化,2024,(04):211-212+214.
- [9] 赵彤.岳城矿架空乘人装置远程监控系统[J].能源技术与管理,2021,46(01):180-182.
- [10] 孙涛.张集矿井下连续化网络化乘人系统的设计及应用[J].现代矿业,2019,35(11):186-188+197.