

煤矿安撤车辆智能调度运输系统优化研究与现场应用

李欣华

山东方大工程有限责任公司 山东 淄博 255000

摘要: 针对煤矿井下工作面安装与回撤过程中车辆运输效率低、调度依赖人工、安全风险高等突出问题, 本文提出并构建了一套煤矿安撤车辆智能调度运输系统。系统集成多模态环境感知、GA-ACO融合路径规划、GOA-DBN故障智能诊断及多车协同调度等核心技术, 形成了“感知-决策-控制-协同”的闭环管控体系。现场应用表明, 系统路径搜索效率提升51.5%, 运输距离缩短20.1%, 环境感知精度达10mm以内, 自动驻车准确率超过97%, 系统响应时间稳定在4ms以内, 维护频率降低55%。实际运行数据验证了系统在提升运输效率、降低安全风险和减少人工干预方面的显著效果, 为煤矿安撤运输智能化升级提供了可行的技术方案。

关键词: 煤矿安撤; 智能调度; 路径规划; 多车协同; 故障诊断; 环境感知

引言

煤矿井下工作面安撤运输面临巷道狭窄、环境复杂及传统人工调度效率低、风险高等挑战。随着矿山智能化发展, LiDAR多模态感知、智能路径规划算法及设备故障诊断技术在单点环节取得进展, 但现有研究缺乏面向安撤全流程的系统性优化, 尤其在多车协同、重心自适应控制等场景存在不足。本文基于山东方大工程与山东科技大学联合研发的“安撤车辆智能化运输系统”, 围绕井下安撤全链条, 系统阐述该智能调度系统的技术架构、核心算法及现场应用效果。旨在解决传统运输痛点, 通过技术创新提升运输安全性与效率, 为煤矿安撤运输的智能化升级提供可复用的技术范本与实践参考。

1 系统总体架构

1.1 系统设计目标与原则

系统设计围绕“安全、高效、少人化”三大目标展开。安全目标旨在降低运输过程中的碰撞、侧翻、溜车等事故风险; 高效目标聚焦于缩短运输时间、减少无效等待和路径冗余; 少人化目标通过智能决策与自动控制减少井下作业人员数量与劳动强度^[1]。设计原则遵循以下四个方面: (1) 感知全面性——实现对巷道环境、车辆状态、障碍物分布的多维感知; (2) 决策智能性——基于AI算法实现路径规划、调度决策和故障预警的自主化; (3) 控制实时性——确保从感知到执行的全链路响应时间满足井下安全要求; (4) 系统可靠性——具备抗干扰能力和冗余机制, 适应井下高温、高湿、高粉尘的恶劣工况。

1.2 系统物理与逻辑架构

系统物理架构由三层组成: 感知层包括车载摄像头、激光雷达、毫米波雷达、惯性测量单元(IMU)及

超声波传感器等, 实现环境与车辆状态数据采集; 决策层部署边缘计算单元与井下环网通信节点, 运行路径规划、协同调度和故障诊断算法; 执行层涵盖线控底盘、液压调节机构、自动驻车执行器及车载显示屏等设备, 完成决策指令的物理执行^[2]。逻辑架构上, 系统构建了“感知-决策-控制-协同”闭环体系。感知模块将多源异构数据进行时空同步与融合处理后, 分别送入环境感知子系统和车辆状态监测子系统; 决策模块在融合信息基础上运行路径规划、任务分配和故障预测算法; 控制模块生成具体的车速控制、转向指令、重心调节指令和驻车指令; 协同模块通过V2V(车车通信)和V2I(车路通信)实现多车信息交互与冲突消解。

1.3 关键技术体系

系统关键技术体系涵盖五个核心方向: (1) 井下复杂环境智能感知与防碰撞技术, 解决低照度高粉尘条件下的障碍物精准识别问题; (2) 液压支架搬运车重心自适应调节技术, 提升车辆在颠簸倾斜巷道的抗侧翻能力; (3) 矿用车辆自动驻车与安全控制技术, 攻克坡道启停防溜车难题; (4) 矿车故障智能诊断与预测性维护技术, 实现从事后维修向预测性维护的转变; (5) 智能路径规划与多车协同调度技术, 优化全局运输效率。

2 智能调度关键技术与算法优化

2.1 井下复杂环境智能感知

针对煤矿井下低照度、高粉尘、强干扰环境下的目标识别难题, 系统采用图像复原算法对原始图像进行去尘、增强处理, 而后将视觉数据与激光雷达点云、毫米波雷达数据进行多模态融合。融合策略采用特征级融合方法, 对视觉检测框和雷达目标进行关联匹配, 置信度低于阈值的检测结果通过互补信息予以修正。目标检测

算法以YOLOv5为基线,针对井下特殊场景进行了三项改进:引入注意力机制(CBAM)增强对小目标和遮挡目标的特征提取能力;采用K-means++聚类重新设计适合井下障碍物尺度分布的Anchor尺寸;增加夜间红外模态的输入通道,实现可见光与红外图像的决策级融合。

2.2 融合路径规划算法

井下安撤运输路径规划是一个多约束优化问题,约束条件包括巷道通行宽度、坡度限制、单向/双向通行规则、车辆转弯半径、设备装载尺寸以及时间窗要求等。传统单一算法难以同时满足全局最优与实时响应的需求。本文采用分层规划策略:上层为全局路径规划层,运行改进遗传算法(GA)生成从起点到终点的最优宏观路径。改进措施包括:采用基于巷道拓扑网络的染色体编码方式,设计适应度函数时综合考量路径长度、坡度代价和拥堵风险系数,引入精英保留策略和自适应交叉变异概率。下层为局部动态规划层,在实际行驶过程中检测到突发障碍或拥堵时,触发蚁群算法(ACO)进行局部重规划^[3]。ACO算法中引入信息素挥发系数的动态调整机制,并根据井下巷道特点设置转向惩罚因子,减少不必要的频繁转向。全局与局部规划的衔接采用“滚动窗口+触发重规划”策略,即在全局路径指引下按窗口推进,当局部环境变化超出阈值时启动ACO局部优化。

2.3 多车协同调度模型

多车协同调度的核心是在保证安全间隔的前提下最大化整体运输效率。系统建立以最小化总运输完成时间为目标函数的调度模型,约束条件包括车辆载重限制、速度区间、巷道通行容量、任务优先级及最大工作时长等。求解该NP-hard问题,本文设计了基于强化学习的调度算法。将调度问题建模为马尔可夫决策过程(MDP),状态空间定义为各车辆当前位置、任务状态、剩余电量/燃油量及巷道占用情况,动作空间为任务分配与路径选择组合,奖励函数综合考虑运输效率、等待惩罚和安全约束。采用D3QN(DuelingDoubleDeepQ-Network)算法进行训练,在仿真环境中迭代20万次后收敛。现场部署时,调度决策周期设置为5s,与实时感知信息保持同步更新。多车避碰协同采用“主从式+分布式”混合架构:全局调度器负责任务分配和主路径规划,各车辆通过V2V通信交换实时位姿和意图信息,在遇到狭窄巷道错车场景时,依据优先级和当前负载状态自动协商通行顺序,实现无中心节点的分布式冲突消解。

3 运输安全与稳定性控制

3.1 重心自适应调节与自动驻车

液压支架等大型设备重量可达20~40t,在倾斜巷道

(坡度可达15°~25°)运输过程中,车辆重心偏移极易引发侧翻事故。系统基于多源传感(IMU、轴重传感器、悬架行程传感器)实时测算车辆当前重心位置和载荷分布,通过模糊PID控制器驱动液压伺服机构,对悬架刚度和油缸压力进行动态调节,将重心偏移量控制在安全阈值以内^[4]。坡道启停过程中的溜车是安撤运输的又一重大安全隐患。自动驻车系统基于CAN总线网络,综合坡度角、车速、制动压力及电机转矩信号,在驾驶员松开制动踏板时自动计算驻车所需制动力。坡道起步时,系统检测到驱动转矩达到驻车释放阈值后自动解除制动,实现平稳起步。

3.2 故障智能诊断与预测性维护

矿用车辆长期在恶劣工况下运行,关键部件(制动系统、转向系统、液压系统、动力总成等)的隐蔽性故障难以通过人工巡检及时发现。系统构建了基于GOA-DBN(蝗虫优化算法-深度置信网络)的智能诊断模型。DBN由多层受限玻尔兹曼机(RBM)堆叠而成,用于自动提取车辆状态监测数据(振动、温度、压力、电流等)的高层特征。引入GOA对DBN的网络结构参数(隐含层节点数、学习率)进行全局寻优,避免人工调参的盲目性。诊断流程分为离线训练和在线诊断两阶段。离线阶段采集正常工况及各类典型故障工况下的监测数据,经预处理和标注后训练GOA-DBN模型,建立故障模式库。在线阶段将实时监测数据输入模型,输出故障类型识别结果和剩余寿命预测值。系统还设置了三级预警机制:黄色预警(注意观察)、橙色预警(建议检修)、红色预警(立即停车)。

4 现场应用与效果分析

4.1 应用条件与部署方案

系统于2025年1月至12月在山东某煤矿进行了一年期现场应用。该矿为高瓦斯矿井,主采煤层平均厚度3.5m,工作面走向长度1200~1600m,运输巷道最大坡度18°,巷道最小宽度4.2m,部分区段存在弯道半径不足20m的急弯。安撤期间每日运输任务15~25车次,运输距离单程平均约2.5km。部署方案包括:在5台液压支架搬运车和3台多功能矿用机车上安装感知与控制终端,在井下变电所部署边缘计算服务器,地面调度中心部署调度管理平台,井下环网采用万兆工业以太网确保数据传输实时性。整个部署分三个阶段完成:第一阶段(1~2月)完成单车的感知与控制系统改造;第二阶段(3~4月)完成通信网络和边缘计算节点部署;第三阶段(5~6月)完成多车联调和系统集成测试,7月起正式投入安撤运输作业。

4.2 关键性能指标验证

表1汇总了系统主要性能指标的测试结果与设计目标对比，各项指标均达到或优于设计要求。

表1：关键性能指标

性能指标	设计目标	实测值	达成情况
环境感知精度	≤ 15mm	≤ 10mm	优于目标
障碍物检测mAP	≥ 92%	95.2%	优于目标
自动驻车准确率	≥ 95%	≥ 97%	优于目标
系统响应时间	≤ 5ms	≤ 4ms	优于目标
路径搜索效率提升	≥ 45%	51.5%	优于目标
运输距离缩短	≥ 15%	20.1%	优于目标
维护频率降低	≥ 50%	55%	优于目标
运行稳定性提升	≥ 35%	40%	优于目标

4.3 效率与安全改善

效率改善方面，统计正式运行后6个月内（2025年7—12月）的运输数据，相较改造前同期（2024年7—12月）人工调度模式，单次运输任务平均完成时间从约2.8h缩短至2.1h，降幅25%；因路径冲突造成的等待时间占比从15.6%下降至4.2%；每日有效运输车次由平均18车次提升至23车次，提升幅度27.8%。安全改善方面，应用期间未发生任何碰撞、侧翻或溜车事故。智能防碰撞系统共触发主动制动干预37次，其中有效避免潜在碰撞事件29次，误触发率控制在3.2%的合理区间；重心自适应调节系统在通过大坡度弯道时累计动作1200余次，车辆侧倾角峰值较人工驾驶模式降低约32%；自动驻车系统在坡道启停场景中动作5800余次，零溜车记录。

人员效益方面，单车由原需驾驶员和地面调度员各1名，优化为仅需驾驶员1名（复杂区段可派1名安全监护），单班次井下作业人员由5~6人减少至3~4人，井下累计作业工时减少约35%。地面调度人员从4人减至2人，调度决策由全人工经验判断升级为系统辅助决策与人工确认相结合的模式。

4.4 经济与社会效益

经济效益方面，综合计算因运输效率提升带来的工

作面接续周期缩短、设备维护成本降低和故障停机减少。社会效益方面，系统的成功应用大幅降低了井下作业人员的劳动强度和安全风险，减少了人员在粉尘、噪声环境中的暴露时间。同时，项目形成的智能化运输技术方案可推广至全国煤矿及非煤矿山辅助运输领域，对推动矿山智能化建设、完善行业辅助运输标准具有重要意义。

结束语

本文围绕煤矿安撤车辆运输智能化需求，设计并实现了一套涵盖感知、决策、控制、协同全链条的智能调度运输系统。通过多模态环境感知与YOLOv5改进算法实现了井下高精度障碍物检测，通过GA-ACO融合路径规划与强化学习调度模型实现了运输路径与多车任务的协同优化，通过重心自适应调节和自动驻车技术提升了运输安全性，通过GOA-DBN智能诊断模型实现了预测性维护。现场一年期应用验证了系统各项性能指标均达到设计要求，在运输效率、安全水平和减人增效方面成效显著。进一步的研究将聚焦于以下方向：（1）探索5G+多接入边缘计算（MEC）架构下的更低时延调度方案；（2）研究基于数字孪生的全工况仿真与远程操控融合技术；（3）推动系统由辅助驾驶向无人驾驶演进，开展L4级自动驾驶矿车在安撤场景的验证工作。

参考文献

[1]王国法,刘峰,孟祥军,等.煤矿智能化建设技术体系与发展路径[J].煤炭学报,2023,48(1):1-17.

[2]李树刚,王伟,张东升.基于多传感器融合的井下无人驾驶环境感知技术研究[J].煤炭科学技术,2024,52(3):168-177.

[3]张强,赵四海,刘志强.改进遗传算法在矿井运输路径优化中的应用[J].工矿自动化,2025,51(2):45-53.

[4]孙继平,李静,杨帆.基于强化学习的矿井机车智能调度方法[J].煤炭学报,2024,49(6):2789-2800.