

煤矿井下无轨胶轮车运行风险智能预警与管控体系研究

李吉刚 王传景

内蒙古双欣矿业有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘 要: 煤矿井下复杂受限的作业环境,易诱发无轨胶轮车各类行车隐患,车辆运行风险管控难度持续提升。梳理井下胶轮车典型运行工况与环境干扰要素,剖析风险内生演化机理,本文搭建多源信息感知采集框架,构建适配动态场景的智能预警模型,设置分级预警判定规则。依托分层架构、全流程管控策略与闭环运维机制,形成适配井下场景的一体化管控体系,可为井下胶轮车安全稳定运行提供智能化支撑。

关键词: 无轨胶轮车; 井下运行; 风险感知; 智能预警; 闭环管控

引言: 无轨胶轮车是煤矿井下人员与物料运输的核心设备,广泛应用于各类井下作业场景。井下巷道空间受限、环境动态多变,多类干扰因素叠加会持续影响车辆行驶稳定性,滋生各类行车安全隐患。传统管控模式难以适配动态化、隐蔽化的井下行车风险,无法实现风险的前置防控与精准处置。依托智能技术搭建系统化预警管控框架,能够有效适配井下复杂行车场景,补齐现场安全管控短板。

1 煤矿井下无轨胶轮车运行工况与风险特征分析

1.1 井下无轨胶轮车典型运行工况解析

煤矿井下巷道空间结构特殊,作业场景区别于地面车辆通行环境。无轨胶轮车日常作业包含多种固定运行场景,巷道常规直行行驶是最基础的运行状态,车辆保持固定行进速度,依托巷道固有空间完成物料运输与人员输送作业。弯道变道工况对车辆操控精度有着更高要求,井下弯道曲率不统一,巷道侧壁会限制车辆通行空间,迫使车辆调整行驶轨迹与行进速度。坡道通行工况普遍存在于矿井分层巷道与倾斜巷道路段,车身重心会随坡道角度发生偏移,行驶稳定性会随坡度变化产生明显波动。会车避让工况多出现在巷道通行空间有限的主干路段,巷道狭窄的物理条件会大幅压缩车辆通行余量。启停停靠工况多用于工作面出入口、巷道交汇点位与设备装卸区域,车辆需要频繁完成制动、静止、重启的状态切换^[1]。不同运行工况对应不同的车体运行参数,也对应不同的巷道通行约束条件,能够清晰反映井下封闭受限空间内无轨胶轮车的整体运行规律。

1.2 无轨胶轮车运行环境干扰要素梳理

井下作业环境复杂多变,各类环境条件会对无轨胶轮车行驶状态产生直接影响。巷道空间结构决定车辆通行的基础边界,狭窄巷道、异形巷道会限制车辆转向幅度与行驶范围,不规则巷道断面会改变车辆正常通行轨迹。巷道路面长期受车辆碾压、积水浸泡与矿渣堆积影响,容易出现凹凸、湿滑、破损等问题,直接改变车轮受力状态,降低行驶平稳性。井下光照条件薄弱,固定照明设备存在照射盲区,昏暗视野会干扰驾驶员对路况的判断。井下作业产生的粉尘与雾气会遮挡视线,降低环境可视度,干扰路况识别与车辆操控。巷道两侧布设的管线、支架、机电设备会形成固定障碍物,压缩有效通行空间。井下作业人员的动态移动,会改变巷道通行状态,对车辆正常行驶造成干扰,各类环境要素都会单独影响车辆行驶稳定性、操控灵活性与环境感知能力,形成各类行车隐患。

1.3 无轨胶轮车运行风险形成机理

无轨胶轮车井下运行风险的产生,依托设备状态、人为操作、作业环境三类核心要素。车辆长期在井下恶劣环境持续作业,机械零部件会出现磨损、老化、松动等问题,制动系统、转向系统、行走系统的性能衰减,会让车辆出现行驶失控、制动失效等设备类隐患。操作人员长期处于压抑、昏暗的井下环境,易出现操作判断偏差、操控动作失误,不规范的行驶控制行为会逐步诱发行车风险。井下动态变化的环境条件会持续作用于车辆运行全过程,单一环境干扰会影响车辆行驶状态,多种环境条件交叉作用会持续放大行车隐患。各类初始隐患不会直接引发安全问题,会随车辆行驶时长、作业频次、环境变化逐步积累、持续演化。普通行驶隐患会逐步升级为影响行车安全的核心风险,不同诱发因素对应

的风险类型存在明显区别,风险表现形式与演化速度也具备独有的特征。

2 井下无轨胶轮车运行风险感知与信息采集体系构建

2.1 运行风险感知需求拆解

结合井下无轨胶轮车各类运行风险的生成规律与外在特征,可对智能预警工作所需的感知信息维度进行系统性拆解。车辆运行状态信息是风险研判的基础内容,能够直观反映车体行驶姿态、动力输出及部件工作状态。井下环境实时信息能够体现作业场景的动态变化,巷道路面、空气能见度、空间温湿度的波动都会改变行车条件。周边空间态势信息聚焦车辆通行范围内的障碍物分布、巷道边界及周边设备排布情况,用来判断车辆通行空间的安全余量。操控行为信息记录驾驶员行驶过程中的各类操作动作,能够捕捉不规范操作带来的安全隐患^[2]。明确每一类信息的具体采集范围与重点监测内容,界定数据更新频次与精度标准,建立信息维度与风险研判的对应关系。完整梳理各项感知指标的适配要求,能够搭建层次清晰、覆盖全面的风险感知需求框架,为后续设备选型与数据采集工作提供清晰依据。

2.2 多源感知设备适配与布设方案

煤矿井下特殊作业场景对监测设备的使用性能有着严苛标准,设备选型需要满足防爆、防尘、防潮的井下作业硬性条件。针对车辆运行状态、井下环境参数、空间定位监测的不同需求,筛选性能适配的专业感知设备,匹配各类监测场景的数据采集需求。逐一梳理不同设备的监测原理、功能优势与适用场景,确认各类设备对井下复杂环境的适应能力。结合矿井巷道整体布局结构、胶轮车固定行驶路线、作业密集区域分布特点,科学规划各类感知设备的安装点位。合理设定设备监测覆盖半径,调整设备安装角度与固定方式,弥补巷道拐角、坡道、盲区等特殊位置的监测短板。整套布设方案可以覆盖车辆全部行驶路段与作业时段,消除数据采集空白区域,保障车辆全程运行状态都可被精准捕捉。

2.3 运行数据融合与预处理机制

各类感知设备采集的原始数据存在结构不统一、时间节点分散的问题,数据本身具备显著的异构性与时序性特征。针对这类数据特点,建立适配井下胶轮车运行场景的数据融合规则,统一多维度数据的处理标准。搭建完整的数据处理工作流程,依次完成原始数据的清洗、降噪、时序对齐与归一化处理工作。剔除采集异常、数值失真、重复冗余的无效数据,过滤井下复杂环境干扰产生的错误数据信息。打破不同监测设备、不同监测维度的数据独立壁垒,建立多类数据之间的内在关

联。整合零散的单项数据信息,形成完整、规范、统一的运行数据体系。经过标准化处理后的数据集可以适配智能预警的运行要求,为风险识别、状态研判提供扎实可靠的数据支撑。

3 无轨胶轮车运行风险智能预警模型构建

3.1 预警指标体系搭建

井下无轨胶轮车运行安全受设备工况、驾驶行为、巷道环境多重因素共同影响,风险成因具备多源耦合的典型特征。根据车辆运行、环境变化、空间通行及人员操作的实际风险特征,分层筛选适配井下作业场景的预警指标。车辆运行状态层面选取行驶姿态、动力输出、部件工况等核心参数,真实反映车体设备运行的稳定水平^[3]。环境干扰程度层面围绕巷道路面状态、井下能见度、环境湿度等监测内容设置指标,客观体现井下环境对车辆行驶过程的影响强度。空间通行态势层面结合巷道有效通行宽度、障碍物分布、路段复杂程度等内容建立指标,精准表征车辆通行空间的安全储备条件。操作运行状态层面针对驾驶行为设置对应监测指标,明确不规范操作对应的风险判定标准。对全部筛选指标开展分类梳理与层级整合,细化各项指标的风险表征意义,明确不同指标数值对应的运行状态判定标准。完整指标体系可全面覆盖井下胶轮车的各类风险诱因,为智能预警模型的构建提供规范、系统的研判依据。

3.2 智能预警算法适配与优化

井下无轨胶轮车运行数据具备连续时序变化特征,风险隐患会随作业环境与行驶状态持续演变。依据这类数据特征与风险演化规律,挑选适配动态风险识别需求的智能算法,适配井下复杂行车场景的风险研判工作。井下作业环境存在大量不确定干扰因素,会影响风险特征提取的精准度,降低风险状态识别的准确性。针对这类问题对算法结构与运算逻辑进行优化调整,强化算法对微弱风险特征的提取能力,提升模型对复杂场景下行车状态的判别精度。优化算法对隐性风险的挖掘能力,捕捉常规监测中难以发现的潜在行车隐患。强化算法对动态演化风险的跟踪判别能力,适配井下多变的运行场景,让算法可以精准适配复杂、动态的井下胶轮车运行研判场景。

3.3 分级智能预警机制建立

不同类型的无轨胶轮车运行风险,在危害程度、演化速度、影响范围上存在明显差异。以风险本身的危害属性为划分依据,对各类行车风险进行等级划分,构建差异化的预警层级标准。针对不同层级的风险类型,制定对应的状态判定逻辑与预警触发条件,明确各类风险

的研判规则。搭建覆盖全程的预警工作流程,以实时数据监测为基础,完成运行风险的动态判别,根据风险等级输出对应的预警提示内容。整套运行机制贯穿车辆行驶的全部过程,能够完成行车风险的前置识别与动态研判,精准输出对应等级的预警提示,实现井下无轨胶轮车运行风险的精细化预警管控。

4 井下无轨胶轮车运行全流程智能管控体系搭建

4.1 分层分级管控架构设计

以风险处置流程与管控逻辑为核心支撑,搭建适配井下无轨胶轮车作业场景的分层分级管控架构^[4]。整体架构依托预警识别、过程约束、闭环治理的完整思路进行层级划分,依次设置前端感知预警层、中端智能管控层与后端统筹管控层。前端感知预警层承担数据采集与风险初判的职能,负责捕捉车辆运行状态与环境变化信息,为整体管控工作提供原始数据支撑。中端智能管控层承接前端监测数据,完成风险等级判别、管控策略匹配、处置指令生成等核心工作,是体系智能研判的核心载体。后端统筹管控层负责整体流程的统筹调度、流程监管与资源协调,保障各类管控工作有序落地。明确各层级独立工作职能与内部运行逻辑,梳理层级间的信息传输与业务联动关系,构建权责清晰、层层衔接的一体化管控架构。

4.2 全运行过程智能管控策略

无轨胶轮车井下作业包含多个独立运行阶段,各阶段风险生成特点与隐患表现形式存在区别。立足车辆出车、行驶、停靠、收车完整作业链条,结合不同环节的风险规律与预警标准,制定针对性、阶段化的智能管控策略。出车阶段侧重车辆初始状态核验,排查设备隐患与作业前置条件,从源头规避初始运行风险。行驶阶段聚焦全程动态监管,结合巷道环境与车辆运行状态,对行驶姿态、行驶速度、通行轨迹进行智能约束。针对行车过程突发的危险态势,启动主动干预管控模式,及时约束异常行驶行为。停靠与收车阶段强化状态复核,规范车辆停靠位置与停机流程,杜绝收尾阶段的安全隐患。多维度管控内容相互配合,覆盖车辆全部作业环节,完成全流程智能化管控落地。

4.3 管控联动与闭环运行机制

打通预警研判、管控执行、状态反馈之间的业务壁垒,建立多环节贯通的联动运行机制。依托井下智能传输通道,实现预警信息快速传递、管控指令精准下发,衔接系统智能判别与现场管控执行环节。完善体系内部

的信息交互通路,让风险数据、管控指令、执行状态可以高效流转。构建完整的闭环管控运行模式,以风险预警作为启动起点,触发对应等级的管控处置措施,推动各类管控手段落地执行。持续监测车辆运行状态变化,待风险隐患彻底消除后完成状态复位。整套运行模式可以实现行车风险的动态化治理,把控每一个管控环节,形成稳定规范的智能化管控运行逻辑。

4.4 系统运维与动态优化机制

井下作业环境与车辆运行状态始终处于动态变化中,风险隐患类型与演化规律会随作业条件改变持续更新。建立常态化的体系运维机制,规范各类感知设备、预警算法模型、管控功能模块的日常运维流程。定期排查设备运行工况、数据传输精度与模型运行状态,保障整套管控体系稳定运转。搭建适配场景迭代的动态优化机制,结合巷道环境更新、作业模式调整、风险类型演变等实际情况,对现有预警指标、算法运算逻辑、管控策略进行迭代完善。持续适配井下复杂多变的作业场景,保障管控体系长期具备良好的适用性与有效性^[5]。

结束语

针对井下无轨胶轮车行车风险隐蔽性、动态性强的特点,从风险机理、信息感知、智能预警、全程管控四个维度形成完整技术框架。各模块相互衔接、深度联动,贴合并下复杂作业环境的运行管控需求,可有效化解传统行车管控的滞后性与片面性问题。整套架构具备良好的场景适配性与迭代空间,能够为井下辅助运输安全管控提供全新的智能化实施路径。

参考文献

- [1] 王高伟,黄怀德,李启海,等.煤矿井下无轨胶轮车液压油箱固体颗粒分布特性研究[J].煤矿机械,2026,47(6):51-55.
- [2] 姚军,吴邦民,贺耀宜.煤矿井下无轨胶轮车多目标优化调度方法研究[J].矿业研究与开发,2026,46(2):280-287.
- [3] 毛松松,郑明涛,李超,等.煤矿井下双向单行巷道无轨胶轮车路径优化研究[J].工矿自动化,2026,52(1):114-122.
- [4] 马超,杨俊起,郑明涛.煤矿井下无轨胶轮车启发式路径规划与调度[J].煤矿机电,2026,47(3):19-25.
- [5] 闫二庭.煤矿井下无轨胶轮车运输安全管理优化措施[J].中国煤炭工业,2026(6):60-61.