 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i8.11450

An Analysis of the Intelligent Prevention and Control Mechanism for Safety Risks Associated with the Operation of Trackless Equipment Underground

Zhengjiang Zhang

Jinchengxin Mining Management Co., Ltd. Southern Branch, Kunming, Yunnan, 650500, China

Abstract

With the rapid adoption of intelligent mining technologies, trackless underground equipment has become the primary auxiliary transportation and operational tool in mines due to its mobility, flexibility, and strong adaptability. However, frequent operational incidents involving these devices occur owing to complex underground tunnel environments, non-standard manual operations, delayed maintenance, and inadequate risk monitoring. According to 2024 statistics from the National Mine Safety Administration, transport accidents involving trackless rubber-tired vehicles account for approximately 43.8% of all underground mine incidents, making them the foremost threat to mining safety. This chapter proposes a comprehensive, end-to-end intelligent risk prevention system encompassing four key aspects: smart perception monitoring, data platform development, inherent safety design of equipment, and institutional culture cultivation. The system aims to achieve proactive risk warning, real-time control, and closed-loop post-incident resolution for underground equipment, providing technical and managerial references for enhancing mining safety efficiency.

Keywords

underground trackless equipment; safety risks; intelligent prevention and control

井下无轨设备运行安全风险智能防控机制探析

张正江

金诚信矿业管理股份有限公司南方分公司，中国 · 云南 昆明 650500

摘　要

随着矿山智能化开采技术的迅速推广，井下无轨设备由于具有机动灵活、适应性强的特点，成为了矿山井下辅助运输、作业施工的主要设备。但是由于井下巷道环境复杂、人工操作不规范、设备运维滞后、风险预警滞后等原因造成无轨设备运行事故频繁发生。根据国家矿山安全监察局2024年统计资料可知，井下无轨胶轮车等设备运输事故占全部矿山井下事故的43.8%左右，是矿山安全生产的头号大敌。本章从智能感知监控、数据平台搭建、设备本质安全、制度文化建设四个方面来建立全方位、全流程的智能风险防控体系，以达到井下设备风险事前预警、事中控制、事后闭环处置的目的，给矿山安全生产提质增效提供技术、管理上的参考。

关键词

井下无轨设备；安全风险；智能防控

1 引言

近些年来，我国十分重视矿山安全生产智能化转型，应急管理部、国家矿山安全监察局相继下发有关煤矿智能化建设的指南（2021 年版）、地下矿山安全生产专项整治提升方案等政策文件，提出要推进煤矿井下运输设备智能化管控，创建起风险智能预警、隐患闭环治理的安全防控体系，依靠智能化技术创建新的防控体系，使井下无轨设备安全管控难题、遵照安全生产合规要求的主要途径。

【作者简介】张正江（1989–），男，中国云南大理人，本科，工程师，从事机械工程及自动化研究。

2 井下无轨设备运行安全风险智能防控的重要性

2.1 降低事故发生率，筑牢矿山安全生产底线

井下无轨设备包括无轨胶轮车、铲运机、无轨运输车等，是井下人员输送、物料转运、设备检修的主要作业工具，运行安全直接关系到矿山整体安全生产形势 [1]。根据国家矿山安全监察局 2024 年行业统计数据可知，井下无轨设备碰撞、侧翻、失控、人车混杂事故占井下运输事故的 82.7%，其中弯道、交叉口等特殊路段事故占 41.3%，人工操作失误、环境风险漏判、设备故障未预警是事故的主要原因。智能防控机制依靠物联网、大数据、AI 智能识别等技术，可以 24 小时不间断地对设备状态、巷道环境、人员动线进行监测，

捕捉到人工无法察觉的细微风险隐患，提前干预违规操作、设备异常、危险工况，牢牢守住矿山安全生产的底线，保证井下作业人员的生命财产安全。

2.2 提升管控效能，推动矿山智能安全转型

矿山智能化是煤炭、非煤矿山行业高质量发展的主要方向，设备运行安全智能化管控是矿山智能化建设的主要部分。依靠智能防控机制，可以对设备运行、环境监测、人员管控、隐患治理进行数字化、一体化的控制。根据 2024 年矿山智能化发展白皮书可知，完成无轨设备智能防控体系搭建的矿山，安全巡检人力成本降低 42%，隐患整改闭环效率提高 59%，设备故障停机率下降 37.5%。智能运行设备能使矿山安全管理工作由原来的依靠经验来控制变为依靠数据来管理，以促进矿山行业的安全、高效、绿色可持续发展。

3 井下无轨设备运行安全风险智能防控机制策略

3.1 部署智能感知与实时监控系统，实现风险准确识别

3.1.1 车辆状态监控

为无轨设备全部安装 360 度全景环视监控、高精度测速模块、超速自动报警装置和驾驶员行为智能监测系统，建立设备运行的监测体系。系统能及时获得车辆行驶速度、运行轨迹、制动状况、发动机状态等诸多参数，借助 AI 图像识别技术识别驾驶员的疲劳驾驶、未带防护装备等危险举动。根据矿区实测数据可知，本系统可以有效地减少由于人为操作失误造成的事故，防控率提高 72%（数据来源于矿业安全与环保 2025 年行业实测报告）。

3.1.2 环境与定位感知

融合北斗精确定位、激光雷达、红外热释传感、气体检测等多种技术，建立井下环境及人员感知系统，设备静态定位误差控制在 0.3 米以内，动态定位误差小于 0.5 米。系统可以对井下作业人员、无轨设备的位置进行实时采集，并且能监测到巷道瓦斯浓度、顶板位移、巷道积水、粉尘浓度等各方面的环境安全参数，全方位了解井下作业工况 [2]。依靠电子围栏技术，能解决井下视线不好，并识别环境复杂等问题。

表 2：环境与定位感知技术配置成效

功能模块	核心技术 / 措施	关键指标 / 数据
高精度定位	北斗定位 + 激光雷达	静态定位误差：≤ 0.3 米 动态定位误差：≤ 0.5 米
环境参数监测	红外热释 + 气体检测	监测内容：瓦斯、顶板位移、积水、粉尘浓度
区域安全防护	电子围栏虚拟边界	预警提前量：3-5 秒
风险预警机制	多元技术融合感知	重点防护区：窄巷、交叉口、采掘工作面

3.1.3 交通智能管控

为了解决井下巷道弯道多、视线不好、双向通行容易发生冲突的问题，在巷道交叉口、急弯、陡坡、狭窄路段等危险地段安装智能交通信号联锁系统。系统依靠设备定位数据和区域感知数据展开实时联锁运算，自动辨别相向行驶、近距离尾随、违规占道等危险行车状况，自动闭锁敌对进路，触发信号灯切换，从而达成井下交通智能调度。



图 1：驾驶员通过智能系统远程监控

3.2 构建一体化智能管控平台，推动数据驱动决策

3.2.1 数据融合与智能分析

搭建统一的数据采集和存储终端，把无轨设备运行参数、环境监测数据、人员作业数据、历史隐患数据、设备维保数据等各方面的信息集中起来。依靠大数据挖掘以及人工智能算法，创建起无轨设备健康评判模型和安全风险预估模型，对设备出现的故障情况，环境方面的危险以及操作上的潜在危险实施趋势剖析并做出等级预估 [3]。

3.2.2 风险可视化与闭环管理

平台具有三维井下巷道建模功能，根据风险等级绘制出安全风险空间“四色图”，用红色、橙色、黄色、蓝色四种颜色分别标示出各个区域、各个设备的安全风险等级，从而达到安全风险可视化、动态化、全景化的监管效果。



图 2：智能巡检机器人

3.3 强化设备本质安全与预防性维护，筑牢物理防线

3.3.1 提升本质安全水平

优化无轨设备核心结构设计，对动力、传动、制动等重要系统做冗余设计，提高设备运行的稳定性、可靠性，降低设备发生突发故障的概率。经由统计可知，对设备实施本

质安全改善并开展巷道环境改良的矿井，因设备硬件故障所引发的安全事故减少达 58.3%（数据来源于中国矿山安全学会 2025 年行业调查）。

3.3.2 推行预测性维护

依靠物联网感知技术，就无轨设备发动机、制动系统、轮胎、液压系统这些主要部件的温度、压力、转速、损耗等参数展开 24 小时透明化的监视，及时掌控设备运行状况 [4]，从而提前安排好维保计划。

3.3.3 配备智能应急系统

对井下无轨设备火灾、碰撞失控等重大安全风险，在设备发动机舱、电池舱、充电硐室等高危部位设置智能自动灭火、防爆抑爆系统。系统配有高精度的火焰、温度传感器，在 0.5 秒内就可以检测出火情隐患，并且自动启动灭火装置，使早期火情得到快速抑制，防止火势蔓延造成重特大事故。

3.4 完善标准规程与安全文化，落实全员责任体系

3.4.1 健全标准化作业体系

根据井下无轨设备智能化管控的特点，依据国家矿山安全有关规范，制定并及时更新设备调度、行驶作业、装卸施工、维保检修、应急处置全流程标准化作业指导书，明确智能设备操作规范、风险预警处置流程、设备运维标准、岗位安全职责，消除作业模糊地带和操作随意性。根据智能防控系统预警信息、设备异常工况、特殊路段作业等场景来制定专项处置规程，规范岗位人员的操作行为，保证智能化管控设备的正常运行、风险隐患处置有章可循，使设备运行管控标准化、规范化。

3.4.2 深化全员安全责任制

创建层级化的全员安全生产责任体系，确定管理层、技术岗、操作岗、维保岗的安全职责，把无轨设备运行安全、智能防控系统运维、隐患排查治理等工作具体到岗位、落实到个人。常态开展智能化设备操作培训、风险辨识培训、应急处置演练，结合典型事故案例开展警示教育，提高全员智能化管控操作能力、风险辨识能力、应急处置水平，筑牢全员安全思想防线，保证智能防控机制落地见效。

4 结语

井下无轨设备运行安全属于矿山安全生产管控的重要部分，传统的管控模式已经不能满足现代矿山安全发展的要求。未来矿山要不断改善智能防控技术和管理制度，加大数据赋能的应用力度，不断加强设备运行安全防线，促进矿山安全生产高质量、智能化发展。

参考文献

[1] 柴少年.井下电动胶轮梭车的动力传动方案设计与研究[J].有色设备,2026,40(1):105-110.

[2] 常晓龙,钱俊,吴强,等.基于多传感器的井下无轨设备智能防撞系统[J].矿山机械,2026,54(1):10-16.

[3] 韩文涛.基于UWB技术的矿山井下无轨设备人机防碰撞系统[J].设备管理与维修,2025(S1):33-35.

[4] 陈太文.井下无轨设备的安全与可靠性研究[J].今日制造与升级,2024(6):163-165.