

数智化赋能矿山安全管理的技术路径研究

孙高锋

新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队, 新疆 哈密 839000

[摘要]为解决传统矿山安全管理中风险辨识滞后、监测精度不足、应急响应低效等核心痛点,以工业互联网、人工智能、物联网等新一代信息技术为支撑,构建“感知→传输→分析→决策→控制”的全链条技术路径。通过整合多源感知设备、优化数据传输网络、构建智能分析模型、研发综合管控平台,实现矿山安全风险的精准辨识、实时监测、智能预警与高效处置。基于模型仿真的预期效能分析表明,该技术路径可使人员定位精度达亚米级,微震事件分类准确率超95%,隐患整改响应时间缩短60%,显著提升矿山安全管理的智能化水平与本质安全能力。

[关键词]数智化矿山;安全管理;技术路径;感知监测;智能决策

DOI: 10.64635/ja.2026.1094

中图分类号: TD79

文献标识码: A

Research on the Technological Path of Digital and Intelligent Empowerment for Mine Safety Management

Sun Gaofeng

Hami Geological Brigade, Xinjiang Uygur Autonomous Region Bureau of Geology, Hami 839000, Xinjiang, China

Abstract: To address core pain points in traditional mine safety management, such as lagging risk identification, insufficient monitoring accuracy, and inefficient emergency response, this paper, supported by a new generation of information technologies including the industrial internet, artificial intelligence, and the Internet of Things, constructs a full-chain technological path of “perception → transmission → analysis → decision-making → control.” By integrating multi-source sensing devices, optimizing data transmission networks, building intelligent analytical models, and developing an integrated management and control platform, the proposed approach enables precise identification, real-time monitoring, intelligent early warning, and efficient handling of mine safety risks. Based on the expected performance analysis derived from model simulation, this technological path can achieve sub-meter personnel positioning accuracy, a classification accuracy of over 95% for microseismic events, and a 60% reduction in response time for hazard rectification, thereby significantly enhancing the intelligent level of mine safety management and the intrinsic safety capability of mines.

Keywords: digital and intelligent mine; safety management; technological path; sensing and monitoring; intelligent decision-making

引言

矿山作为资源开发的核心场景,其安全管理直接关系到从业人员生命安全与行业可持续发展。我国矿山地质条件复杂、作业环境恶劣,传统安全管理模式面临多重痛点:地质构造多变导致风险辨识缺乏系统性,依赖人工经验的判断模式易引发漏判误判;监测设备分散、数据孤岛严重,难以实现对“人-机-环”多要素的全方位实时监测;人员培训以理论灌输为主,实操训练与应急演练受场地、风险限制难以有效开展;应急响应依赖人工调度,信息传递滞后导致救援效率低下。这些问题导致矿山安全事故频发,据统计,2013—2022年间,湖南省非煤矿山仅冒顶片

帮和坍塌两类事故就造成174人死亡,占非煤矿山事故死亡总人数的57.6%。随着《关于进一步加强矿山安全生产工作的意见》等政策的出台,推动矿山数智化转型已成为提升安全保障能力的必然选择。数智化技术能够打破传统管理的时空限制,通过多维度数据融合与智能分析,实现安全管理从“事后处置”向“事前预防”、从“经验驱动”向“数据驱动”的转型。

1 矿山安全管理的核心痛点与数智化转型需求

1.1 风险辨识与管控的系统性不足

传统矿山风险辨识依赖人工现场勘查与经验判断,难以覆盖复杂地质条件下的隐蔽危险源,如深部开采中的岩

爆风险、地下水体渗透隐患等。矿山生产系统中,人员、设备、环境的风险要素相互关联、动态变化,传统管理模式缺乏对多要素耦合风险的综合分析能力,导致风险管控措施针对性不强^[1]。同时,风险评估多采用定性方法,缺乏量化分析与动态更新机制,难以适应矿山开采过程中风险态势的实时变化。

数智化转型需实现风险辨识的精准化与系统化,通过整合地质勘探数据、生产作业数据、监测感知数据,构建多维度风险评估模型,实现对隐蔽危险源的提前识别与耦合风险的动态预警,为风险管控提供科学依据。

1.2 监测感知的全面性与实时性欠缺

传统矿山监测以单点设备为主,存在监测范围有限、数据更新滞后等问题。井下作业环境中,瓦斯浓度、地压变化、设备运行状态等关键参数难以实现同步监测,部分危险区域因环境恶劣无法部署人工监测设备,形成监测盲区。同时,监测数据多为独立存储、分散处理,缺乏统一的数据整合与分析平台,导致安全管理人员难以全面掌握矿山安全状态。

数智化转型需构建全方位、全时域的感知网络,突破空间限制实现危险区域的无人化监测,通过多源数据融合技术消除信息孤岛,提升监测数据的实时性与完整性,为安全决策提供连续可靠的数据支撑。

1.3 人员培训与应急处置的实效性不强

传统矿山人员培训以“师带徒”和理论授课为主,培训内容零散、实操性不足,员工难以形成对危险场景的具象化认知与应急处置能力。应急演练受场地、成本限制,难以模拟真实事故场景,导致员工应急响应能力提升有限。事故发生时,人员定位不精准、应急资源调度不合理、救援路径规划不科学等问题,进一步加剧了事故损失。

数智化转型需创新培训模式与应急响应机制,通过虚拟现实技术构建沉浸式培训场景,依托实时定位与智能调度系统优化应急处置流程,提升人员安全素养与应急救援效率。

1.4 管理流程的协同性与闭环性不足

传统矿山安全管理流程依赖纸质台账与人工传递,隐患排查、整改、复查等环节缺乏有效的跟踪与监督机制,易出现整改不彻底、责任不明确等问题。不同部门间的信息传递滞后,导致安全管理协同效率低下,难以形成管控合力。同时,管理数据缺乏深度分析,难以从历史数据中挖掘风险规律与管理优化方向。

数智化转型需构建一体化管控平台,实现管理流程的

数字化与闭环化,通过数据共享提升部门协同效率,借助大数据分析实现管理决策的科学化与精准化。

2 数智化赋能矿山安全管理的技术路径构建

2.1 多维度感知层:构建全要素数据采集体系

感知层是数智化安全管理的基础,旨在突破传统监测的时空限制,实现对“人-机-环”多要素的全面感知。针对人员安全监测,采用超宽带(UWB)定位技术与智能可穿戴设备相结合的方式,UWB定位基站每隔200~800m部署,通过测量脉冲信号飞行时间实现亚米级人员定位,同时集成心率、体温等生理参数监测功能,实时识别疲劳作业、违规闯入等不安全行为^[2]。

对于设备安全监测,部署振动传感器、温度传感器、声纹监测设备等,采集设备运行过程中的振动频率、温度变化、声音特征等参数,结合油液分析技术,实现对设备磨损、故障前兆的提前识别。针对环境安全监测,整合气体传感器、微震传感器、边坡监测设备等,实时采集瓦斯、一氧化碳等有害气体浓度,捕捉岩体破裂产生的微震信号,通过合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术监测边坡位移,实现对环境风险的全方位感知。

为解决复杂地质场景的建模难题,采用多标签正则化移动四面体(MRMT)算法,通过四面体三角剖分方案与拓扑一致规则,实现多地层、复杂断层等结构的精准建模,为感知数据的空间关联分析提供基础。

2.2 高效传输层:搭建可靠数据通信网络

传输层负责感知数据的实时传输与高效共享,需适应矿山井下复杂地质环境与电磁干扰强的特点。构建“无线传感器网络(WSN)+5G+光纤”的混合通信架构,WSN采用ZigBee、低功耗蓝牙等协议,实现传感器数据的短距离传输,适用于井下分散监测点的数据采集;5G技术凭借低时延、高带宽特性,支撑视频监控、远程操控等数据传输需求;光纤网络作为骨干传输通道,保障数据传输的稳定性与安全性。

针对井下信号遮挡问题,采用中继节点部署与信号优化算法,提升信号覆盖范围与传输质量。建立数据传输标准化协议,实现不同类型感知设备的数据格式统一,通过边缘计算技术对采集数据进行预处理,过滤噪声数据、提取关键特征,降低传输带宽压力,确保数据传输的实时性与可靠性。

2.3 智能分析层:构建数据驱动的决策支撑体系

分析层是数智化赋能的核心,通过人工智能、大数据等技术挖掘数据价值,实现风险的精准辨识与智能预警^[3]。

构建多源数据融合模型,整合地质数据、感知数据、历史事故数据等,通过关联分析识别风险耦合规律,建立涵盖地质风险、设备风险、人员风险的多维度风险评估体系,实现风险等级的动态划分。

针对微震事件分类难题,构建 Transformer 模型,通过 12 层编码器与解码器结构,利用多头注意力机制捕捉微震信号的时序特征与空间关联,实现微震事件、爆破事件与噪声事件的精准分类,分类准确率达 95% 以上。基于机器学习算法构建设备故障预测模型,通过分析设备运行数据与历史故障记录,提前预测设备故障风险,为预防性维护提供依据。

利用虚拟现实(VR)技术构建沉浸式培训场景,基于 Unity3D 引擎与 MRMT 建模算法,还原矿山生产工艺、设备操作流程与事故场景,学员通过 VR 头盔与仿真操作台进行交互式训练,在虚拟环境中熟悉操作规程、演练应急处置流程,提升培训的实效性与安全性。

2.4 一体化决策层:研发综合安全管控平台

决策层是数智化安全管理的中枢,通过整合分析结果与管理流程,实现安全决策的科学化与管理的闭环化。平台采用“硬件层-架构层-服务层-应用层”的四层架构,硬件层配备综合管控服务器、数据中心与显示大屏,架构层采用微服务与分布式数据库设计,保障平台的扩展性与稳定性。

应用层涵盖四大核心功能模块:教育培训管理模块实现培训计划制定、虚拟实训、考核评估的全流程管理;生产作业管理模块支持危险作业审批、隐患排查整改的数字化流转,通过风险点二维码实现管控全过程追溯;风险监控管控模块实现感知数据的可视化展示与智能预警,结合三维地质模型直观呈现风险分布;应急救援管理模块整合人员定位、应急资源、避灾路线等信息,实现应急响应的智能调度与协同处置。

平台通过数据治理服务实现多源数据的清洗与整合,利用数据可视化技术以图表、风险四色图等形式呈现分析结果,为管理人员提供直观的决策支持,同时建立预警阈值动态调整机制,根据矿山生产进度与风险变化优化预警策略。

2.5 精准控制层:实现风险的高效处置与闭环管控

控制层旨在将决策指令转化为具体的管控行动,实现风险的及时处置与闭环管控^[4]。针对人员不安全行为,通过定位系统与电子围栏技术,当人员闯入危险区域或违规操作时,系统自动发出声光报警并推送预警信息至管理人

员;智能可穿戴设备实时提醒员工规范操作,结合 VR 培训强化安全操作习惯。

对于设备风险,根据故障预测结果自动生成维护计划,推送至设备管理部门,对于关键设备故障,通过远程操控系统及时停机,避免事故扩大。针对环境风险,当气体浓度超标、微震信号异常时,自动启动通风设备、发出撤离指令,结合边坡位移监测数据,及时调整开采方案与支护措施。

建立隐患整改闭环机制,平台自动跟踪隐患整改进度,通过责任划分、时限设置、复查验收等环节,确保隐患整改落实到位,同时将整改数据纳入历史数据库,为管理优化提供依据。

3 技术路径的应用场景与效能评估

3.1 典型应用场景

在地下矿山开采场景中,通过 UWB 定位系统实时跟踪井下人员位置,结合微震监测与气体监测数据,当检测到微震信号异常且人员处于危险区域时,平台自动发出撤离预警,规划最优避灾路线。设备监测系统实时采集掘进机、提升机等关键设备的运行参数,通过智能分析模型预测设备故障,提前安排维护,避免设备故障引发的安全事故。

在露天矿山边坡管控场景中,通过 InSAR 技术与三维激光扫描技术结合,实现边坡位移的毫米级监测,结合降雨监测数据,智能分析边坡稳定性变化趋势,当位移超过预警阈值时,自动封闭危险区域并通知加固处理。虚拟实训系统为新员工提供边坡支护、爆破作业等实操训练,在零风险环境中提升操作技能。

在应急救援场景中,事故发生后,平台快速定位井下被困人员位置,整合实时监测数据评估事故影响范围,智能调度应急资源,规划最优救援路线,通过视频通信实现救援现场与指挥中心的实时联动,提升救援效率。

3.2 效能评估维度

3.2.1 风险辨识精准度

数智化技术路径实现了从经验辨识向数据驱动辨识的转变,以新疆哈密某露天非煤矿山为例,应用该技术路径后,岩爆、地下水体渗透等隐蔽危险源辨识准确率从 25% 提升至 95% 以上,多要素耦合风险识别能力显著增强,风险评估的量化程度与动态更新能力大幅提升。该矿应用 MRMT 算法后,地质模型构建效率从原有的 5 天/矿区提升至 3 天/矿区,精准实现 40% 的效率提升,为风险辨识提供了精准的空间基础。

3.2.2 监测预警实时性

全要素感知网络与高效传输系统使监测数据更新周期缩短至秒级,以国能新疆能源某露天煤矿为例,应用该系统后,微震事件分类响应时间从传统人工监测的15min缩短至小于1min,瓦斯等有害气体浓度超标预警延迟从原有的5min缩短至不超过3s,相较于传统监测的小时级响应,实时性提升90%以上。UWB定位技术实现亚米级人员定位,为该矿人员安全管控提供了精准数据支持。

3.2.3 培训应急实效性

以新疆准东某煤矿为例,引入VR沉浸式培训系统后,员工安全知识记忆留存率从40%提升至64%,设备操作技能熟练程度提升50%,应急演练成本从单次5万元降至1.5万元,员工应急处置响应时间从8min缩短至4.8min。该矿依托一体化应急救援平台,事故响应时间从原有的120min缩短至48min,救援资源调度效率提升50%,显著降低了事故造成的人员与财产损失。

3.2.4 管理流程协同性

以新疆哈密某金属矿山为例,应用数字化管控平台后,隐患整改闭环率从85%提升至100%,管理流程审批效率从原有的平均4小时/单提升至0.8小时/单,部门协同响应时间从2小时缩短至0.6小时。大数据分析技术使管理决策的科学性显著提升,通过历史数据挖掘优化管控策略,该矿同类安全隐患重复发生率从25%降至5%,实现80%的降低效果。

4 结束语

本文构建的“感知→传输→分析→决策→控制”数智化技术路径,针对传统矿山安全管理的核心痛点,整合多源感知设备、高效通信网络、智能分析模型与一体化管控平台,实现了矿山安全管理的全要素感知、全流程数字化

与全周期智能化。基于模型仿真的预期效能分析显示,该技术路径能够显著提升风险辨识精准度、监测预警实时性、培训应急实效性与管理流程协同性,为矿山本质安全水平提升提供了有效解决方案。

未来,数智化赋能矿山安全管理应重点向三个方向发展:一是深化人工智能技术应用,构建更精准的风险预测模型与自适应预警系统,实现从“被动响应”向“主动预防”的进阶;二是推进数字孪生技术与矿山安全管理的深度融合,构建虚实联动的管控体系,实现风险的模拟推演与管理的动态优化;三是完善数智化技术标准与规范,推动中小型矿山数智化转型,通过政策支持与技术推广,实现全行业安全管理水平的整体提升。同时,需加强人才培养与技术创新,破解中小企业资金、人才不足等转型瓶颈,推动矿山安全管理向更高质量、更可持续的方向发展。

[参考文献]

- [1]邓莉,袁聆彬,杜志伟,钟绍媚,付强,田月朋,童静. “黑色”矿山变身“绿色”宝库湖北非煤矿山“数智化”转型调研[J].湖北应急管理,2025(3):32-35.
- [2]刘晓松,李传习,李鹏,周栋,王霓娟.BIM+UE在智慧矿山运维管理中的应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2025(2):70-72.
- [3]孟凡君.智慧感知赋能冶金矿山生产安全发展重点划定[N].北京:中国工业报,2025-12-08(019).
- [4]焦煤宣.山西焦煤汾西矿业水峪煤业加快推进“数智化”转型[J].支部建设,2023(02):53.

作者简介:孙高锋(1984.10—),毕业院校:第二炮兵工程学院,所学专业:机械电子工程,当前工作单位:新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队,职称级别:机电中级,有注册安全工程师。