

数字孪生与 AI 赋能矿山安全管控平台 设计应用

Design and Application of Mine Safety Intelligent Management and Control
Platform Based on Digital Twin and AI

吴立活(五矿有色金属股份有限公司, 北京 100044)

摘要:针对矿山双重预防机制落地难、数据孤岛及安全管控效能不足等行业痛点,落实国家强化矿山安全、推进智能化的政策部署,提出基于数字孪生与 AI 融合的矿山安全智能化管控平台。平台整合露天矿、地下矿及选冶工厂多元安全数据,构建“安全监测—场景安全—系统应用”三层架构;AR 装备实时采集可视化、AI 安全模型风险分析预警、矿山知识库案例规程支撑,三者协同形成决策中枢;攻克深地高精度定位及矿山场景自适应 AI 识别等关键技术。平台落地后,行业隐患识别率可提升 30%~40%,事故率降低 25%~35%,突水等事故应急响应时间从平均 45 min 缩短至 20 min 内。该平台为超深井、超大规模矿山提供可行方案,破解人工巡检盲区等难题,助力安全治理向事前预防转型。

关键词:矿山安全;数字孪生;人工智能;双重预防机制;AR 装备

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)06-0046-07

Abstract:To address industry pain points such as the difficulty in implementing the dual prevention mechanism for mines, data silos, and insufficient safety management efficiency, and to implement the national policy deployment of strengthening mine safety and promoting intelligence, a mine safety intelligent management and control platform based on the integration of digital twin and AI is proposed. The platform integrates diverse safety data from open-pit mines, underground mines, and beneficiation & metallurgy plants, and constructs a three-layer architecture of “safety monitoring-scenario safety-system application”; AR equipment enables real-time data collection and visualization, AI safety models conduct risk analysis and early warning, and the mine knowledge base provides historical case and regulatory support to build a decision-making center; key technologies such as deep underground high-precision positioning and mine scenario-adaptive AI recognition are conquered. After the platform is put into operation, it is expected to increase hidden danger identification rate by 30%~40%, reduce accident rate by 25%~35%, and shorten the emergency response time for accidents such as water inrush from the industry average of 45 minutes to within 20 minutes. The platform provides a feasible solution for ultra-deep and ultra-large-scale mines, solves problems such as blind spots in manual inspection, and helps transform safety governance towards pre-event prevention.

Key words:mine safety; digital twin; artificial intelligence (AI); double prevention mechanism; AR equipment

1 前言

1.1 政策背景

党中央、国务院高度重视矿山安全生产,国家矿山安监局围绕源头防控、过程管控、应急管理出台多项政策文件,为矿山智能化安全建设提供明确导向。政策摘要如图 1 所示。

上述政策内容共同构建了矿山安全智能化建设

的制度框架,强调以技术创新破解传统安全监管与风险控制中的瓶颈问题。

1.2 行业现状与痛点

国内矿山智能化建设在产安保障上有一定进步,但与国际先进水平差距明显,核心痛点集中于三方面,具体如图 2 所示。

(1) 双重预防机制落地受阻;人工巡检存在窄

[作者简介] 吴立活(1970—),男,正高级工程师,享受国务院政府特殊津贴,从事金属矿业开发与运营管理,以及矿山控制技术、信息技术应用、矿山数字化转型路径等领域的研究与实践。

[基金项目] 国家重点研发计划资助(2022YFC2904600);中国五矿集团有限公司科技专项计划项目(WKZB2212BJM501977)

[引用格式] 吴立活. 数字孪生与 AI 赋能矿山安全管控平台设计应用[J]. 中国矿山工程,2025,54(6):46-52.

“深入贯彻落实两办《意见》，一体推进矿山安全生产治本攻坚三年行动和“八条硬措施”硬落实，**强化源头防控、过程管控、应急管理**，持续推进矿山安全“件事”全链条治理，强力推进矿山安全治理模式向事前预防转型”
——《全国矿山安全生产工作会议》(2025年1月9日)

“到2026年，建立完整的矿山智能化标准体系，推进矿山数据融合互通，实现环境智能感知、系统智能联动、**重大灾害风险智能预警**…到2030年，建立完备的矿山智能化技术、装备、管理体系，实现矿山数据深度融合、共享应用，推动矿山开采作业少人化、无人化，**有效防控重大安全风险**，矿山本质安全水平大幅提升”
——《关于深入推进矿山智能化建设促进矿山安全发展的指导意见》(2024年4月24日)

“**坚决遏制矿山领域重特大生产安全事故多发势头**…强化制度约束和源头治理，建立健全执法全过程监督机制，切实提升发现问题和解决问题的强烈意愿和能力水平”
——《关于防范遏制矿山领域重特大生产安全事故的硬措施》(2024年1月16日)

“**加强矿山安全生产，要求矿山安全升级转型，提高科技创新支撑能力，强化矿山安全科技支撑体系建设，防范化解矿山重大风险，健全矿山安全管理体系，提升风险监测预警处置能力，加强矿山多灾种和灾害链综合监测、风险早期识别和预警预报能力建设，加大安全投入和安全培训力度，及时研究解决矿山安全生产重大问题，强化安全基础管理**”
——《关于进一步加强矿山安全生产工作的意见》(2023年9月6日)

图1 矿山安全智能化政策摘要

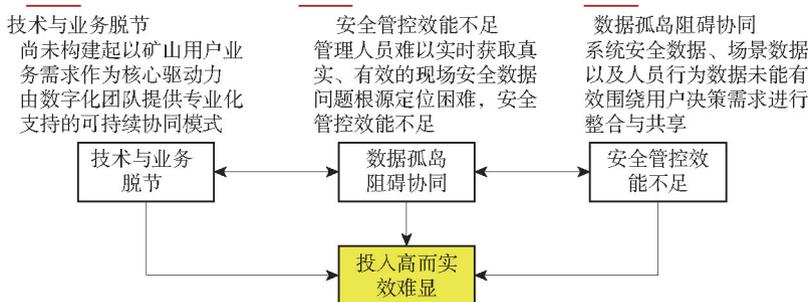


图2 矿山数字化转型中的核心痛点

技术与业务脱节
尚未构建起以矿山用户业务需求为核心驱动力由数字化团队提供专业化支持的可持续协同模式

安全管控效能不足
管理人员难以实时获取真实、有效的现场安全数据问题根源定位困难，安全管控效能不足

数据孤岛阻碍协同
系统安全数据、场景数据以及人员行为数据未能有效围绕用户决策需求进行整合与共享

投入高而实效难显

巷、深井等覆盖盲区，隐患识别效率低(行业平均不足60%)、误判率高，预警依赖经验缺乏智能支撑。

(2)数据孤岛阻碍协同:系统安全数据、场景数据及人员行为数据割裂,无法围绕决策需求有效整合共享,难以支撑科学研判。

(3)安全管控效能不足:矿山环境复杂(深地、高粉尘、强干扰),现场数据获取难、风险定位难,灾害防治及安全责任落实阻力大,叠加投入与实效不匹配、安全人才短缺等问题。

1.3 矿山安全管控的技术发展趋势

数字经济推动下,生成式 AI、数字孪生、智能机器人、大模型等新技术加速赋能矿山领域,成为破解行业痛点的关键力量。2025年9月 Gartner 新兴技术趋势报告显示^[1],此类技术为传统工业升级提供核心支撑;结合矿山场景适配性(图3),它们可覆盖安全风险分析、应急演练、高精度定位、智能装备协同等环节,为平台攻克深地定位、AI 识别等关键技术奠定基础。

2 双重预防机制的理论根基与核心构成

2.1 双重预防机制的核心理论支撑

双重预防机制是平台设计的核心逻辑框架,以

系统安全科学理论为基础,依托风险演化理论与事故致因理论,协同形成“识风险、防事故”的理论闭环,为破解“双重预防机制落地难”提供明确方向指引。

1) 风险演化理论—动态管控的方法论依据

风险演化理论聚焦矿山风险动态发展特征,明确不同场景下风险演化路径(图4),为“风险识别—分级管控”全流程提供支撑。基于该规律,平台设想建立“识别—评估—红橙黄绿分级管控”闭环,实现风险动态追踪与超前干预,助力安全治理向事前预防转型。

2) 事故致因理论——隐患治理的因果逻辑

以轨迹交叉理论为代表的事故致因理论指出,事故是“人的不安全行为、物的不安全状态、环境的不安全因素”三类致因时空交叉的结果(图5),为平台隐患排查模块设计提供依据。据此构建防控措施,可切断事故链条,支撑“隐患识别率提升”的预期目标。

3) 理论协同逻辑

风险演化理论聚焦“风险如何发展”,支撑前端风险分级管控;事故致因理论关注“事故如何发生”,指导后端隐患排查治理。二者融合形成“超前

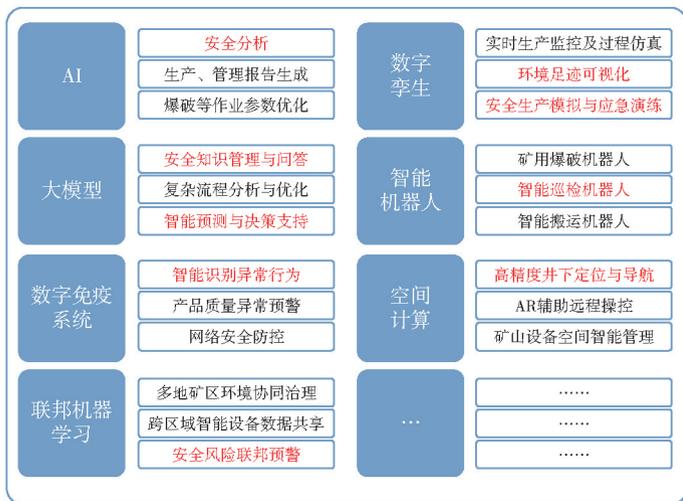
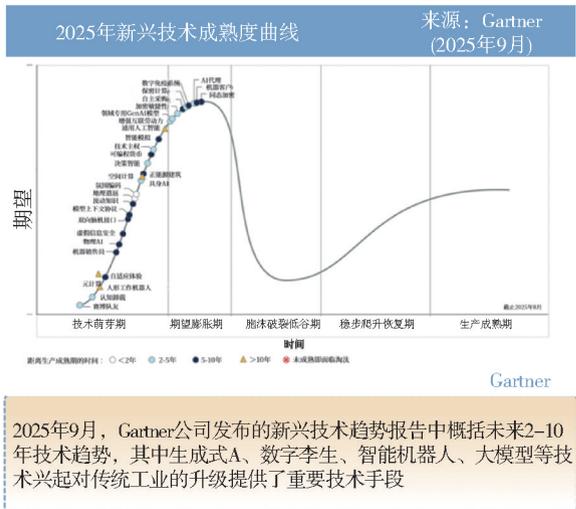


图3 Gartner 新兴技术成熟度曲线及矿山场景技术应用

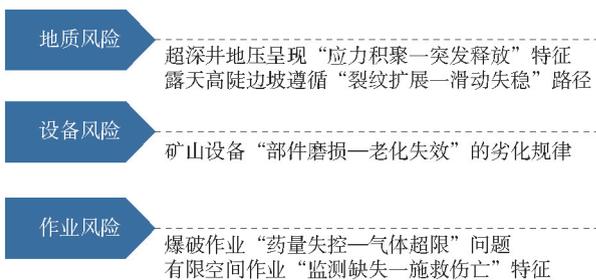


图4 矿山典型场景风险演化路径



图5 事故致因及其典型现象

表1 风险分级管控与隐患排查治理核心环节及关键措施/技术

类别	核心环节	关键措施/技术(平台设计适配方向)
风险分级管控	风险源识别	基于矿山地质勘查报告、工艺设备台账及近5年历史事故案例,平台数据融合模块整合多源数据,自动识别边坡失稳、突水突泥等核心风险源,预计识别覆盖率达90%以上
	风险等级划分	按“发生概率—后果严重性”风险矩阵,通过平台数字孪生模块可视化展示红、橙、黄、绿风险等级,支持分级管控指令自动下发,预计等级判定准确率提升30%
隐患排查治理	隐患多渠道发现	设想通过平台AI视觉识别(监测人员违规行为)、传感器网络(采集设备/环境异常数据),结合安全监管人员专项检查,补充技术盲区,预计隐患发现效率提升40%,破解人工巡检盲区难题
	隐患处置与闭环	结合矿山知识库推荐处置方案,经专家评审后派发整改工单;通过现场验收+设备/传感器数据复核确认效果,预计闭环完成效率提升50%,支撑隐患识别率提升的预期目标

识险—精准排险”的逻辑链,为平台“安全监测—场景安全—系统应用”三层架构提供理论支撑。

2.2 双重预防机制的核心构成要素

双重预防机制由“管理本体”与“技术支撑要素”构成,前者明确安全管理核心流程,后者提供高效运行技术基础,二者协同保障机制落地,破解行业痛点。

1) 双重预防机制本体

作为矿山安全管理的核心载体,包含风险分级管控与隐患排查治理两大联动模块,平台设计将全面适配该流程,具体见表1。

2) 安全智能化支撑要素

多源数据融合、视觉感知、具身智能、AI预警模型四类组件协同,为双重预防机制提供技术保障,与平台核心技术模块一一对应,要素构成如图6所示。



图6 矿山安全智能化支撑要素构成

3 矿山安全智能化管控平台总体设计

3.1 设计目标与思路

平台以“破解行业痛点、助力事前预防转型”为核心,明确“一体化管理、精益化管控、智能化决策、本质化安全”目标,横向覆盖露天矿、地下矿及选冶工厂三大场景,纵向延伸至设备级、区域级、企业级管控。图7所示为三项设计思路,兼顾技术前瞻性与实用性,对接矿山智能化规划,保障系统可靠安全,为超深井、超大规模矿山提供可行方案。

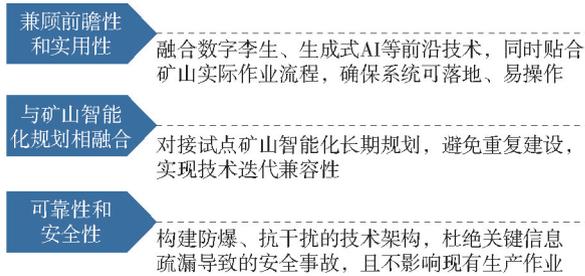


图7 矿山安全智能化管控平台设计思路

3.2 系统架构设计

平台采用“环境层—技术层—核心层”三层架构,各层级数据互通,支撑双重预防机制全流程智能运行,精准破解痛点。环境层通过设备稳定运行支撑安全监测数据采集,技术层通过多源融合、智能感知等能力赋能场景安全管控,核心层通过 AI 大模型与知识库落地系统应用功能。

环境层:适配矿山深地、高温、高粉尘等极端环境,通过防爆设计、抗干扰处理,保障 AR 眼镜、机器狗、传感器等设备稳定运行,为数据采集提供基础;

技术层:集成多源数据融合、智能感知、AI 预警三大技术模块,其中多源数据融合破除数据孤岛,智能感知覆盖全域巡检,AI 预警实现风险精准研判;

核心层:以“安全 AI 大模型 + 矿山知识库”为驱动,AI 大模型负责风险预测与决策生成,知识库关联 10 万条级事故案例、安全规程,为双重预防机制提供科学依据,支撑预期成效达成。

3.3 核心功能模块

核心模块采用“基础技术—单体智能—集控系统”的三层架构设计,各层级功能模块协同支撑矿山安全智能化管控,与“安全监测—场景安全—系统应用”一体化架构一一对应,具体如图8所示。

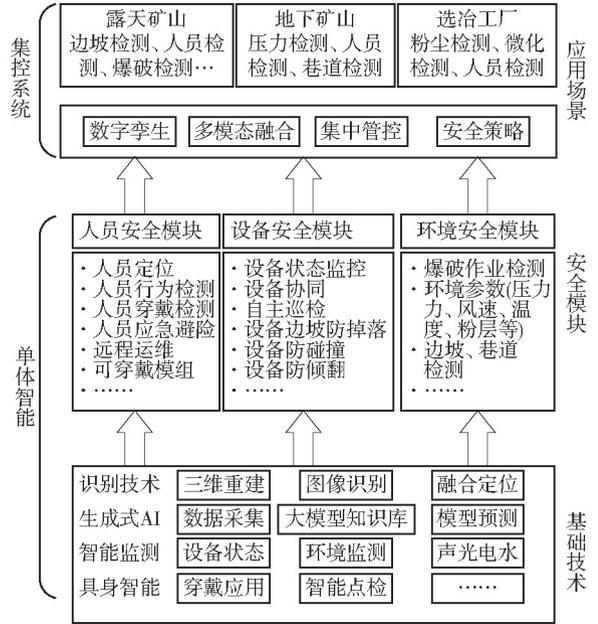


图8 核心功能模块三层架构

1) 基础技术层

作为平台功能的底层支撑,为上层模块提供技术能力底座^[2]。

识别与智能技术:集成生成式 AI、具身智能等,实现风险模式与设备/人员动态感知,支撑 AI 识别体系构建。

感知与重建技术:通过三维重建、图像识别、融合定位等,完成多维度数据采集与关联,为深地高精度定位提供技术基础。

知识与决策技术:依托大模型知识库、环境监测数据,为风险预判和隐患处置提供支撑,缩短应急响应时间。

2) 单体智能层

聚焦“人员、设备、环境”三大维度,构建全要素安全监测体系,针对性破解安全管控效能不足痛点:

人员安全模块:实现人员定位、行为检测、风险预警及可穿戴设备数据采集,预计可降低人员违规导致的事故率 35%。

设备安全模块:实时监控设备状态,支持主备切换与自主巡检,具备主动防护功能,预计可减少设备故障导致的事故率 25%。

环境安全模块:针对爆破、通风、巷道/边坡等开展检测,捕捉地质与环境风险,预计可提升环境类隐患识别率40%。

上述人员、设备、环境类事故率降低指标,共同支撑平台整体“事故率降低25%~35%”的预期目标,其中人员违规、设备故障是矿山事故的主要诱因,两类指标降低可覆盖整体事故率降低的核心贡献。

3) 集控系统层

横向覆盖三大场景,纵向实现层级化集中管控,贴合“全场景适配”需求。

(1) 场景化监测体系

露天矿山:监测边坡、人员、爆破等风险,预计可降低边坡失稳事故率30%。

地下矿山:聚焦地压、通风、有害气体、巷道支护等安全,预计可将突水应急响应时间缩短至20分钟内。

选冶工厂:防控粉尘、水质、危化品、火灾等风险,预计可提升危化品隐患识别率35%。

(2) 系统级智能应用

多模态数据融合与数字孪生:跨模态分析异构数据,推演风险(如边坡失稳预判),预计风险预警提前量延长至2h以上。

集中管控与安全策略:依托知识库实现预警分发、应急调度、全流程追溯,预计应急协同效率提升50%。

通过三层架构设计,实现技术与业务场景深度耦合,形成“感知—分析—决策—管控”的一体化安全治理体系。

4 关键技术突破

4.1 深地复杂环境高精度定位技术

1) 矿山实践痛点

超深井、超大规模矿山深地环境中,巷道遮挡、多路径效应导致定位精度不足(如山东莱州某金矿深部巷道定位误差超0.5m);长距离巷道信号衰减严重,传统基站覆盖不足;且井下潮湿粉尘环境提升设备故障率,影响人员搜救与设备调度效率。

2) 平台设计针对性解决

为攻克该痛点,平台设计“UWB+LiDAR+惯性导航”融合方案:

硬件优化:定制矿用本安型UWB基站,采用双天线架构增强穿透性,搭配矿用高鲁棒性LiDAR剔

除多径干扰;所有硬件均通过防爆认证与IP65防护,适配深地极端环境。

算法改进:采用双自适应因子卡尔曼滤波算法,融合多传感器数据,嵌入数字孪生模型动态校正定位基准,设计目标为实现 ± 2 cm定位精度,通过“硬件优化+算法改进”双路径破解深地定位难题^[3]。

3) 应用场景与操作流程

适用于超深井、超大规模矿山人员追踪、设备调度、应急搜救场景。

部署设想:按“运输大巷每500m、采掘面每150m”布设基站,用全站仪标定坐标,终端集成多模块关联数字孪生。

预期效果:定位精度达 ± 2 cm,可实时追踪人员与设备位置,为隐患识别提供精准空间数据支撑,预计助力应急搜救效率提升60%,间接支撑事故率降低25%~35%的目标^[4]。

4.2 矿山场景自适应AI识别体系

1) 矿山实践痛点

矿山环境复杂,辽宁鞍山某铁矿露天强光、山东莱州某金矿地下昏暗环境叠加粉尘遮挡,导致传统视觉识别准确率不足60%;隐蔽隐患人工巡检难覆盖,模型缺乏矿山专属场景数据支撑,隐患识别率低、误判率高,直接制约双重预防机制落地。

2) 平台设计针对性解决

为提升隐患识别率,平台构建自适应AI识别体系。

数据支撑:采集多地矿山多环境图像,扩充12类专属隐患数据集至10万+样本,覆盖露天/地下/选冶全场景。

算法优化:采用Yolo(人员/设备识别)、U-Net(裂缝/支护变形识别)、LSTM(违规操作识别)算法融合方案,结合边缘计算实现现场实时处理。

跨模态融合:融合视觉数据与声/光/电/水传感数据(如设备振动+外观裂纹图像、红外热成像),交叉验证避免误判,提升隐患识别可靠性。如图9所示:展示井下设备隐患的多模态融合识别——含视觉、声光电水传感数据采集,输出隐患类型、风险等级,直观呈现融合效果。

3) 应用场景与操作流程

适用于全域隐患筛查、支护监测、违规预警场景。

部署设想:在关键区域布设摄像头与传感器,边缘节点预处理数据并调用专属AI模型,识别隐患后

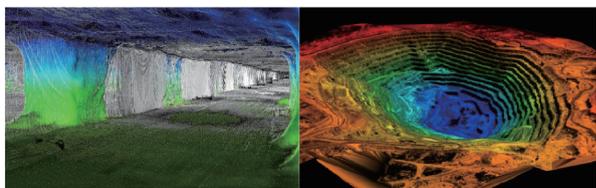


图9 多环境多模态数据融合与智能识别成像

关联定位系统推送至终端与平台。

预期效果: 矿山场景隐患识别准确率提升至90%以上, 误判率降至8%以下, 直接达成“隐患识别率提升30%~40%”的核心目标, 破解人工巡检盲区难题。

4.3 极端工况通信保障体系

1) 矿山实践痛点

安徽铜陵某铜矿深部巷道遮挡致5G信号碎片化, 数据传输中断风险高; 辽宁鞍山某铁矿超大规模采场远控时延超300 ms, 影响设备协同; 极端情况下(如透水、暴雨)易造成通信中断, 直接制约应急响应效率。

2) 平台设计针对性解决

为缩短应急响应时间, 平台构建“5G + Mesh + 光纤”融合通信体系。

井下通信: 巷道部署防爆 Mesh 中继节点, 搭配抗干扰调制技术, 解决信号碎片化问题, 保障传输时延 < 100 ms。

露天通信: 采用“5G 宏微基站 + 边缘计算”全覆盖采场, 降低远控时延至 50 ms 内。

应急通信: 配置便携式卫星终端作为备用链路, 极端情况自动切换, 保障指挥中心与现场通信不中断。

3) 应用场景与操作流程

适用于井下数据传输、露天设备协同、应急通信场景。

部署设想: 井下按间距布设 Mesh 节点, 露天规划基站覆盖范围, 应急终端部署于关键区域。

预期效果: 通信成功率提升至99%以上, 设备协同效率提升40%, 应急指令传输时间缩短至10 s内, 为突水等事故应急响应缩短至20 min内提供通信保障。

4.4 具身智能装备应用技术

1) 矿山实践痛点

安徽铜陵某铜矿狭窄巷道(宽度 < 1.5 m)人工巡检风险高、覆盖难; 各地矿山固定设备分布广, 人

工点检耗时久、漏检多; 深部采场高温、高瓦斯环境威胁人员安全, 制约安全管控效能。

2) 平台设计针对性解决

为替代人工完成高风险作业, 平台定制化研发具身智能装备。

AR 智能眼镜: 轻便防爆设计, 支持语音控制与骨传导音频, 实时叠加设备状态、风险热力图, 标注巡检指标, 隐患即拍即传。

矿山机器狗: 机身宽 ≤ 0.8 m、续航 8 h, 适配狭窄巷道, 配置视觉摄像、气体传感器与蓄能休息舱, 自主规划巡检路径。

智能点检机器人: 挂轨式设计, 用于压风机、水泵等固定设备巡检, 采集温度、振动数据, 支持预测性维护。

3) 应用场景与操作流程

适用于狭窄巷道巡检、固定设备维护、人员安全防护场景:

部署设想: 巷道内安装挂轨轨道与机器狗蓄能舱, 作业人员配备 AR 智能眼镜, 装备按预设路径巡检; 如图 10 所示: 左图为挂轨式巡检机器人采集场景数据, 右图为 AR 眼镜显示设备状态与风险热力图。



图10 巷道巡检机器人与 AR 智能眼镜可视化界面

预期效果: 替代 80% 以上高风险区域人工巡检, 设备点检效率提升 50%, 漏检率降至 5% 以下, 减少人员安全风险, 支撑事故率降低目标。

5 实施与应用效果

5.1 实施架构与推进步骤

平台实施采用“总部统筹—专业支撑—硬件配套协同”的运行机制。总部安全环保部门牵头规划与资源调配, 联合典型矿山开展痛点调研; 头部矿山、智能化机构、院校及智能企业分工协作, 分别提供场景经验、技术适配、工艺优化及定制硬件支持。分阶段推进规划见表 2。

5.2 核心应用设想与预期价值

1) 超深井、超大规模矿山应用设想

超深井矿山: 聚焦地压、突水等核心风险, 通过

表2 分阶段推进规划表

实施阶段	周期	核心任务	可落地文档
调研与需求建模	1~2月	典型矿山痛点排查 + 设备接口测试	《矿山痛点报告》 《设备接口清单》
技术开发与验证	3~4月	核心技术开发 + 实验室模拟场景测试	《技术开发报告》 《测试数据表》
适配部署规划	1月	老旧设备接口适配 + 试点部署方案设计	《设备改造方案》 《部署计划书》

地压监测 + AI 预警模块,针对岩爆风险,平台通过地压监测传感器 + AI 预警模型联动,设计预警提前量 ≥ 2 h,助力重特大事故规避;深地高精度定位技术保障人员与设备精准调度,应急响应时间从行业平均 45 min 缩短至 20 min 内。

超大规模矿山:依托具身智能装备协同与融合通信体系,预计运输事故率降低 25% ~ 35%,设备利用率提升 15%,破解安全管控效能不足痛点。

2) 老旧矿山应用设想

通过设备健康预警模块,预计非计划停机时间缩短 40%;接口改造方案破解系统割裂难题,实现多源数据融合共享,支撑科学决策;无需大规模投入即可完成升级,解决“投入与实效不匹配”痛点。

3) 全场景综合预期价值

安全效能提升:按预期,隐患识别率提升 30% ~ 40%,事故率降低 25% ~ 35%,突水等事故应急响应时间缩短至 20 min 内。

管理效率优化:智能装备替代人工巡检,预计减少 80% 高风险区域人工投入,隐患闭环管理效率提升 50%^[9]。

行业可复制性:平台模块化设计适配露天矿、地下矿、选冶工厂全场景,为不同类型矿山提供可参考的智能化升级路径,助力全行业安全治理向事前预防转型。

平台精准解决多类矿山痛点。超深井靠地压监测与 AI 预警避岩爆,超大规模矿山凭装备协同降运

输事故率,老旧矿山通过设备健康预警减停机、接口改造破系统割裂;同时提升安全效能,AR + AI 提隐患识别率、降事故率,VR 强应急能力、P2P 缩响应时间,智能装备替代人工减巡检与管理成本。

6 结论

基于数字孪生与 AI 的矿山安全智能化管控平台,紧扣行业痛点与政策要求,构建“安全监测—场景安全—系统应用”一体化架构,核心创新体现在三方面。

(1) 首创超深井、超大规模矿山智能安全融合模式,实现 AR 装备与矿业生产深度耦合,填补深地可视化巡检空白,针对性解决深地定位、狭窄巷道巡检等核心难题。

(2) 整合“AR + AI + 知识库”形成三位一体决策中枢,突破传统单点安防局限,实现风险全流程智能管控,支撑隐患识别率、事故率等预期指标达成。

(3) 重塑“智能巡检—沉浸培训—应急协同”业务流,推动安全治理从被动响应向事前预防转型,破解双重预防机制落地难、数据孤岛等行业痛点。

基于设计与应用设想分析,平台为超深井、超大规模矿山及复杂矿床安全管控提供可行方案,预计可达成各项预期成效,显著提升矿山安全效能与管理水平。

[参考文献]

- [1] 张帆,葛世荣. 矿山数字孪生构建方法与演化机理[J]. 煤炭学报,2023,48(1):510-522.
- [2] 鲍久圣,张牧野,葛世荣,等. 基于改进 A* 和人工势场算法的无轨胶轮车井下无人驾驶路径规划[J]. 煤炭学报,2022,47(3):1347-1360.
- [3] 鄢德波,刘子强,吴均文,等. 智能化技术在矿山安全管理中的应用实践[J]. 采矿技术,2022,22(4):195-197.
- [4] 秦智. Unity 引擎在数字孪生矿山领域的应用[J]. 中国矿山工程,2024,53(4):70-76.