

基于实景三维的矿山综合智慧管理系统建设研究

Research on the Construction of Integrated Intelligent Management System of Mines Based on Real 3D Technology

周涛, 谢玉凤, 仲鸿儒, 范黎, 陈波, 何欣悦

(四川省自然资源测绘地理信息有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘要:针对传统露天矿山存在的信息孤岛、数据整合困难、信息流动性差及管理粗放等问题,导致其信息化、可视化和智能化综合管控能力薄弱,本研究提出并实践了基于实景三维与人工智能技术的矿山综合智慧管理系统。该系统创新性地融合实景三维建模与人工智能技术,构建了以统一时空基准的全要素矿山信息承载为核心的数字孪生管控平台,形成了覆盖“人-机-材-环”全要素的协同管理体系,并建设了集“智慧矿山指挥大屏系统”与“多套示范应用”于一体的综合智管系统平台,覆盖矿山安全与生产核心环节。在四川省德昌县大陆槽稀土矿的应用实践表明,该系统的引入使矿山生产效率提升约27.78%,管理效率提高约25%,安全风险降低约40%,同时实现年人力成本节约120万元。该成果为智慧矿山建设提供了可复制的科学范式,对推动矿产资源开发的绿色、安全、可持续发展具有重要意义。

关键词:实景三维; 数字孪生; 智慧矿山; 安全生产

中图分类号: TP274

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2025)04-0040-07

Abstract: The traditional open-pit mines face significant challenges, including information silos, data integration difficulties, poor information flow, and extensive management practices. These issues result in weak comprehensive capabilities for informatization, visualization, and intelligent management and control. To address these issues, this study proposes and practices an Integrated Intelligent Management System of Mines based on real 3D and artificial intelligence (AI) technologies. The system innovatively integrates real 3D with AI to construct a digital twin management and control platform. This platform centers on unified spatio-temporal benchmarks for full-element mine information integration. It establishes a coordinated management framework covering “human-equipment-material-environment” full-elements in open-pit mines and implements an integrated intelligent management system platform. This integrated system platform combines a “The Intelligent Mine Command Large-Screen System” with “The Multiple Demonstration Applications”, covering core aspects of mine safety and production. Practical application at the Dalucao Rare Earth Mine in Dechang County, Sichuan Province, demonstrates that the system delivers significant improvements: mine production efficiency increased by approximately 27.78%, management efficiency improved by 25%, safety risks were effectively reduced by about 40%, and annual labor costs were reduced by 1.2 million RMB. These results provide a replicable scientific paradigm for intelligent mine construction. The system holds significant importance for promoting the green, safe, and sustainable development of mineral resource exploitation.

Key words: real 3D; digital twin; intelligent mine; safety production

1 前言

一直以来,传统矿山管理过程中的信息孤岛问

题^[1-2]仍是制约矿业发展的主要瓶颈之一,在大型露天矿区尤为明显。汤玲等^[3]学者指出,目前我国矿区普遍存在多源信息整合难度大、信息流动性差等问题。这些问题导致矿企对矿山“人-机-材-环”等多要素及生产流程综合管控的缺失,降低了矿企协同管理、资源高效配置、风险防控及科学决策等方面的能力。因此,建立一个综合性、智能化的矿山管理体系与系统已成为当前矿企提高管理效能的迫切需求。近年来,随着国家政策的积极引导与矿企的发

[作者简介] 周涛(1994—),男,四川西昌市人,博士,工程师,从事三维数字矿山建设研究工作。

[基金项目] 乡村振兴背景下的耕地保护和土地利用现状调查研究(编号:KJ-2024-035)。

[引用格式] 周涛, 谢玉凤, 仲鸿儒, 等. 基于实景三维的矿山综合智慧管理系统建设研究[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(4): 40-46.

展需求,矿山信息化建设正从数字矿山加速迈向智慧矿山的全新发展阶段^[4-6]。智慧矿山通过物联网、云计算、大数据、人工智能等技术,集成各类传感器、自动控制器、传输网络、组件式软件等,形成一套能够主动感知、自动分析的智慧体系与系统,实现对矿山设计、生产、运营等环节的智能化管理^[7-8]。而智慧矿山建设是一个系统工程,需要自上而下的规划和自上而下的转型^[9],因此智慧矿山的呈现出了从技术、流程、平台等多角度的研究。如智慧矿山与5G^[10]、GIS^[11]、区块链^[12]、数字孪生^[13-14]等技术的结合,从不同技术视角探讨了智慧矿山建设的方向。也有学者从通信技术和矿山工艺流程、生产调度、运营管理深度融合^[15]角度出发探索智慧矿山;还有学者基于智慧矿山综合管控平台^[16]、智慧矿山数据治理等角度进行分析研究,为下一步提高矿企管理效能与转型升级发展提供了重要途径与方向。

尽管智慧矿山可基于多类型传感器/网集成矿山地质、设备、环境等多源异构数据,实现多源信息有效共享,达到消除矿山管理中信息孤岛问题^[17-18]。然而,多源异构数据存在海量、实时、多维、动态、异构等特征,导致了数据整合和集成协同显示难度大、信息流动性差等问题^[19]。基于此,利用数据仓库^[20]、数据湖^[21]等技术实现数据整合,并结合ETL工具^[22]、GIS^[23]等技术实现数据集成,才能满足智慧矿山系统数据管理和多源异构数据基准统一的分析利用需求。因此,建设一套统一时空的智慧矿山信息化承载底座,为矿山“人-机-材-环”等全要素数字化映射提供精准统一的时空基准,实现矿山实时动态监测、多场景模拟推演与协同决策支撑,是实现智能开采、安全预警与资源优化配置的核心基底。

实景三维技术作为新一代数字化技术的核心支撑,是多维动态现实世界体结构与表观的数字化描述与表达,具有立体化、真实化、实体化三大基本特征^[24]。基于实景三维的矿山综合智慧管理系统建设已经成为矿业领域的重要研究方向。利用实景三维数据,不仅可以实现矿区场景的可视化展示,还可以将相关地质、资源、设备和环境数据整合至统一的时空中,为智慧矿山信息化底座提供技术支撑,向矿山管理者提供更加直观、实时、科学的决策支持。曲瑞超等^[25]利用实景三维模型实现露天矿山开采监测的自动化以及三维可视化。覃智^[26]基于多源数据融合的实景三维建模方法显著提升了矿山的安全性、生产效率和资源管理水平。闫勇等^[27]基于Cesium框

架搭建了智慧矿山三维可视化应用平台,为智慧矿山应用奠定了较好的平台基础。另一方面,数字孪生、人工智能、5G等先进技术的发展,也推动了智慧矿山的建设。葛虎胜等^[28]基于双5G网络为基础的数字孪生技术,构建了露天智能矿山系统,实现了南泥湖钼矿开采效率和安全性能的显著提升。赵文等^[29]则从管控角度出发,基于数字孪生技术建立了煤矿智能管控平台。刘裕鑫等^[30]通过对区块链技术、边缘计算和人工智能等前沿技术在矿山建设中的应用分析,提出了构建数据可信平台、提升设备实时响应能力、优化生产调度和设备维护等关键策略。因此,结合实景三维与人工智能技术,构建以时空统一的全要素矿山信息承载为核心的智慧矿山综合管理系统,在矿山全生命周期智慧管理建设中展现了巨大的潜力。

针对智慧矿山在多源数据融合、多系统协同管控、多维度决策分析、及时监测预警等方面存在的问题及需求,本研究旨在基于实景三维和人工智能技术,通过建立统一平台,实现统一管控和决策,推动智慧矿山智慧管理系统建设,为矿企开辟更安全、更智能化和更可持续的发展路径。

2 系统架构建设

针对传统露天矿山数字化转型的需求,矿山综合智慧管理系统既要构建矿山多源数据整合、集成和协同分析的信息化三维底座,达到减少多源信息整合难度、提高信息有效共享的要求,也要充分以大数据、人工智能等现代化信息技术为基础,解决露天矿山人、机、材料、环境、生产和管理方面的需求,进而实现矿山综合智慧管理系统建设和矿产资源的绿色可持续发展。

2.1 建设目标

通过系统的建设,实现“人-机-材-环”多要素和“采、掘、机、运、通”全业务环节智能化统一管理与应用。基于构建的真实、直观、准确、可测量的露天矿山实景三维场景,利用数字孪生技术对矿区建筑、道路、厂房、作业设备、监控设备、运输设备、监测设备等进行数字孪生,使其数字仿真模型可映射各种设备的配备与运转状况,并最终整合地测模型、设备模型和场景模型形成一套融合各类多源异构业务数据,形成集地上、地表、地下一体,动静态相结合,展示与业务应用一体的矿区数字孪生底座。在此基础上,充分结合人工智能技术形成集系统管理、运维管理和服务管理为一体的智能服务平台,最终实现矿山

的智能生产管控、智能监管和数字资产智能管理,切实提升矿山安全和矿业管理效能。

2.2 系统框架设计

结合矿山开采全生命周期对矿山及周边环境的人、事、物的监测监管需求,基于全空间、全要素、全流程的矿山孪生管控思路,依据“1+1+N”的建设理念,利用实景三维、数字孪生、人工智能等先进技术手段,围绕矿山建设开采核心,开发了基于实景三

维的矿山综合智慧管理系统,其框架包含资源环境底座、数字孪生底座、智慧服务中台和矿山数字孪生应用层4部分,即构建一套矿山实景三维数字孪生底座,以人工智能、大数据、多源融合等技术为依托,建设一套智能化、实时化、可扩展的智慧矿山智能分析中台,在应用层面可实现矿山资产管理数字化、安全监管无人化,打造安全矿山、智能矿山、绿色矿山。具体架构如图1所示。

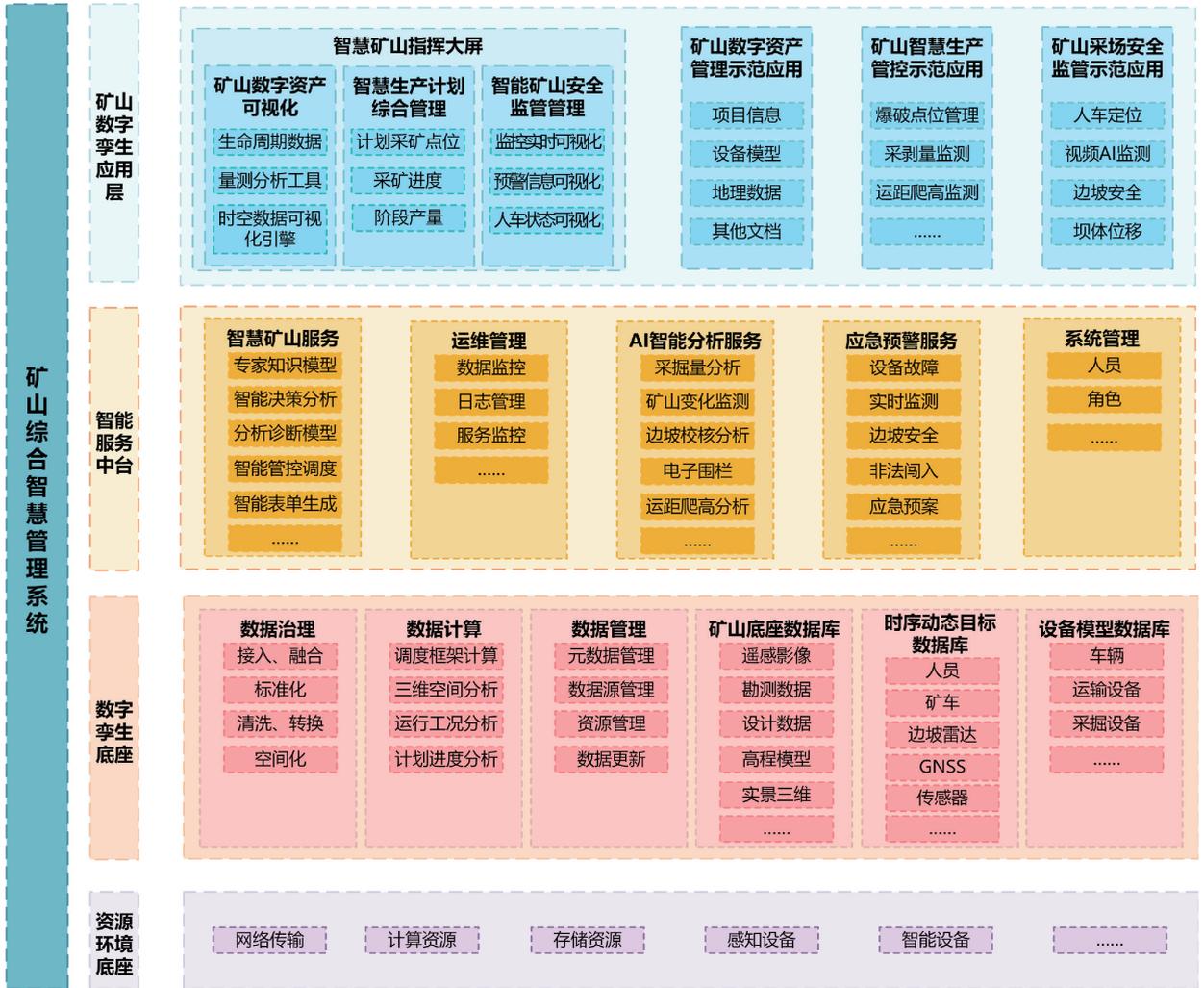


图1 总体架构

1) 资源环境底座

资源环境底座提供了整个系统部署运行的软硬件环境和网络环境,包括基础硬件资源(服务器、存储设备、安全设备、网络设备、IoT设备等)、基础软件(操作系统、数据库、GIS平台及各类中间件)以及计算机网络(局域网、涉密网、政务网)等IT基础设施。

2) 数字孪生底座

数字孪生底座融合矿山底座数据库、时序动态目标数据库和设备模型数据库,为矿区数字孪生系

统提供了基础数据支撑,它通过三维数字孪生技术,实现矿山地测、工程、监测监控、机电设备、开采环境等真实、实时信息的数据建模、数据存储和数据管理,为矿山的安全管控提供数据底座。

3) 智能服务中台层

矿山智能服务中台层是矿山智慧孪生管控平台的关键组成部分,主要承载系统管理、运维管理、AI智能分析服务、应急预警服务和智慧矿山服务5部分功能。

4) 矿山数字孪生应用层

矿山数字孪生应用层包括矿山数字孪生管控平台以及基于该平台建设的智慧应用,是实现矿山数字孪生智能化应用的关键环节,主要包含智慧矿山指挥大屏系统、矿山数字资产管理示范应用系统、矿山智慧生产管控示范应用系统和矿山采场安全监管示范应用系统4部分。

3 关键技术

3.1 三维场景更新技术

随着矿区采掘进程的不断推进,与“人-机-材-环”息息相关的各类要素均在动态变化。因此只有通过通过对矿区相关要素的三维动态持续更新,才能更好保持三维场景的时间现势性和视觉可观性^[31],进而准确反映矿区的最新布局 and 状态,为矿区综合管理提供可靠的基础数据。

为了解决矿山三维底座数据常态化快速更新的问题,本系统拟采用一种服务端-边侧-端侧协同的实景三维快速建模方法,利用端侧无人机搭载倾斜摄影相机设备进行数据采集,并将采集的影像数据实时传输至服务端建模平台,基于边侧的专业建模能力以及服务端提供的计算资源和服务实现服务端三维建模。通过设备的标准化、参数的标准化和流程的标准化来实现数据更新全流程的无人化与自动化。

在以上流程中,实景三维计算是最重要的支撑环节,基于服务端建模技术,无人机采集的数据可以无缝对接到实景三维智能建模平台,经过平台的自动化建模和分析,生成相关成果数据,为矿山业务所用,保证了从数据生产更新到应用的全流程的无人化与自动化,从而也最大限度保障了矿山监管与决策所依赖的底座数据的鲜活性与准确性。

3.2 矿山三维数字孪生仿真技术

实景三维模型是数字孪生模型的空间基底和统一的空间定位框架与分析基础^[32]。在矿山数字孪生管理系统建设中,数字孪生仿真技术主要用于预测设备故障、优化生产过程、提高安全性等方面,通过物联网技术接入传感器采集数据可以实时监测设备状态和生产过程,智慧控制系统可以自动调整设备运行参数,从而提高矿山的生产效率,实现矿山的可持续性发展^[33]。总体上,数字孪生仿真技术可以更加快速地帮助矿山实现数字化转型。然而,数字孪生仿真在矿山的三维重构和数据驱动能力较弱,存在不能对矿山复杂业务系统进行有效的数字重

建、智慧控制、实时反馈、交互映射及实时监控等问题。因此,可借助具备良好空间拓扑关系表达和空间分析能力的GIS技术,显示表达地理空间中各物理实体之间的相互作用关系^[32]。

本系统拟在鲜活而精确的矿山三维GIS模型的基础上,整合地测模型(包括钻孔、探槽、矿床、岩层、断层、破碎带等)、设备模型(穿孔、爆破、采装、运输、排土与生产设备等)和场景模型(积水、火点等),基于统一的空间坐标体系,构建矿区的数字孪生底座。其中,地测模型方面,搜集整合矿区的地质、钻探、物探、化探数据,对数据进行归一化与标准化,同时基于流程化的地质体建模技术,与地上构筑物、地表、地形等模型一起构建地质三维模型,实现地测数据孪生仿真。另一方面,构建单子级、单元级和系统级模型,提升虚拟模型和物理实体之间的孪生连接,从而实现物理系统与虚拟系统之间的虚实交互,达到设备孪生仿真。同时,利用实景三维模型,接入图形类、监测类、生产控制类、生产经营类等多源异构数据,形成统一的数字孪生底座,进而实现三维场景孪生仿真。

3.3 基于三维模型的边坡轮廓提取技术

为进一步提高露天矿山智能化管理水平,边坡安全是露天矿山生产过程重要的安全因素,为了最大限度规避矿山边坡滑坡、塌方等安全事件,边坡搭建必须符合矿山设计之初的规范,而边坡轮廓线,即边坡台阶线数据是露天矿开采过程中的重要基础资料,也是确保露天矿高效、智能开采的重要前提^[34]。传统的全站仪、GPS点式测量方法耗时长、劳动强度大、效率低,基于无人机影像构建的密集匹配点云数据为台阶线高效提取提供了可能^[35]。

本系统以实景三维模型为数据输入,经过数据预处理、聚类、融合和边界线规则化,自动生成边坡对应的台阶轮廓线,以此自动提取出台阶宽度、高度和边坡角参数,并与设计数值做比较,实现边坡合规性校核,为露天矿山安全智能开采提供数据支撑。

3.4 基于GNSS的边坡预警技术

露天矿山边坡监测是对边坡变化趋势预测、对破坏进行预警^[36]。传统监测方法(如地质测量、物理勘探)在实时性和准确性方面稍显不足,目前针对矿山边坡监测常用的方法主要有雷达技术^[37-38]、GPS^[39-40]、GNSS^[41-42]等,相比于GPS和GNSS监测技术,雷达监测具备亚毫米级的高精度和监测范围广的特点,但相较于GNSS,不能够获取边坡表面某

点的真实连续位移数据^[43]。基于此,本系统接入GNSS传感网系统实现对露天矿山边坡进行实时自动化监测预警。

利用GNSS自动化监测方式对边坡位移进行实时自动化连续监测。基于数据传输网络实时发送从矿区分布式部署的监测点与参考点接收机实时接收的定位信号至控制中心,并通过控制中心服务器数据处理软件实时差分解算出各监测点三维坐标,将此坐标与初始坐标进行对比进而获得该监测点变化量^[44],同时当边坡变形超过预定的阈值时,分析软件根据事先设定的预警值,系统可以生成预警信息,通知相关人员采取应急措施,以防止潜在的边坡灾害。

3.5 基于视频流的人员风险行为识别技术

矿区人员安全作为安全生产的重要保障,人员位置及其风险行为识别对矿区安全生产管理至关重要。矿山人员安全通常基于视频监控进行人工判断,存在较多人为因素限制。毕林等^[45]利用视频图像,基于卷积神经网络可以较好地实现对矿工是否正确佩戴安全帽的智能识别,但未能对未正确佩戴安全帽的具体人员进行定位识别。吴真真^[46]基于Faster R-CNN的施工现场视频识别方法,并引入人员ID与图像空间特征,完成了人员入场、施工作业到场的全过程跟踪精准管理,有效提高了施工现场人员不安全行为的识别率。因此,在复杂的矿山施工现场,需构建集定位、智能识别和预警于一体的人员风险行为识别技术,避免人员风险行为产生的安全生产事故。

基于此,本系统采用高精度GPS定位与三维场

景展示技术和高清摄像头与视频拼接技术实现矿区人员风险行为识别。具体包括两方面内容,首先对安全帽、工牌等可穿戴设备配备高精度GPS定位和传感器实现人员的位置信息实时监控,其次利用矿区部署的高清摄像头与视频拼接技术支持视频监测预警模块,集成高清摄像头管理、视频数据接入与传输技术,实现全景视频的拼接与实时监控,并通过目标识别和跟踪技术,结合三维场景展示与电子围栏等技术提高人员未戴安全帽、危险区域越界等风险行为识别的准确性和实时性,确保实时、及时发现风险行为并对其进行预警和应对。

4 系统应用

针对露天矿山信息化及智能化的管理需求分析,为有效实现对矿山的智能化生产管理,研发了基于实景三维的矿山综合智慧管理系统,形成了“智慧矿山指挥大屏系统+多套示范应用”的矿山数字孪生管控平台,并在四川省德昌县大陆槽稀土矿开展应用,具体如图2所示。首先通过数据仓库、ETL工具实现了矿区多源异构数据的整合和集成协同,并结合实景三维技术,整合地测模型、设备模型和场景模型形成一套融合多源异构业务数据,集地上、地表、地下、动静态相结合可展示与业务应用于一体的矿区数字孪生底座。基于该底座,结合人工智能技术,构成了融合矿区各种数据服务集中管理的大屏指挥管控枢纽。在此基础上建立了上层业务示范应用,包括智慧矿山指挥大屏、矿山数字资产管理示范应用系统、矿山智慧生产管控示范应用系统及矿山采场安全监管示范应用系统。



图2 系统应用

4.1 智慧矿山指挥大屏

针对矿山生产作业环节产生的多源海量异构数

据,以矿区三维模型为中心,通过构建矿山数字孪生三维可视化平台,系统整合生产运营全链条数据资

源(包括设备运行参数、多源传感器监测信息、智能终端采集数据等),打造虚实映射的矿山智能管理体系,实现了以三维空间维度动态还原矿山实体运行状态,为管理者提供多维数据融合分析、实时态势感知和运维效能评估功能、优化决策支持体系、提升矿山设施的全生命周期管理效率与安全管控水平的目的。

4.2 矿山数字资产管理示范应用系统

通过整合矿山基本信息、矿山实景三维模型、矿山遥感影像、矿山激光点云、其他应用分析类数据、安全管理数据及行政管理数据(包含人员、设备)等资料,依据保密等级和使用频率进行数字化处理与统一管理实现矿山资源分布一图总览,依托时空数据引擎实现大屏实时三维可视化,通过数据追溯技术实现矿产全生命周期资料的可查可溯。

4.3 矿山智慧生产管控示范应用系统

面向“无纸化智慧生产”,全面打通爆破计划、药剂耗用、产量成果全过程生产流程,实现人、机、料、法、环综合态势一屏掌控;依托物联网技术实时采集和分析矿区各个区域的设备、人员和环境数据,实现矿山设备和环境参数的监测预警,确保矿业环境安全和设备的高效运行及维护;利用人脸识别、指纹识别等生物识别技术,实现矿山人员考勤管理,帮助管理人员提高人力资源管理的效率;同时,通过三维建模技术展示挖方和填方的三维模型,并根据土方工程量分布生成优化的施工计划,确保作业的高效进行;通过无人机智能航测和车辆传感器技术,利用矿卡实时位置和实景三维底座,计算矿卡实时运输距离和爬高,帮助矿山精准管理运输成本。

4.4 矿山采场安全监管示范应用系统

基于数字孪生底座,通过 GIS 和 GPS 技术实现对矿区围栏区域(地理电子围栏)的全面监控和实时预警,防止非法入侵和设备故障,确保矿区的安全生产;同时,通过摄像头管理、视频接入与传输、视频拼接与轮询管理,以及目标检测与预警,实时监控矿区范围内的重要区域、设施设备及安全隐患点,确保矿区生产的安全。利用多期实景三维数据和 GNSS 传感网系统对矿山边坡形态变化进行安全校核以及实时监测和实时展示。

4.5 系统应用成效分析

在四川省德昌县大陆槽稀土矿的实践应用中,基于实景三维的矿山综合智慧管理系统显著提升了矿山的生产与管理效率,有效降低了安全风险和生产成本。具体成效体现在:

(1)生产效率提升与成本降低:生产环节整体效率提升约 27.78%,并带动每年人力成本减少约 120 万元。

(2)安全风险管控强化:采场安全巡检模式由人工巡检升级为自动巡检后,平均每月巡检查处数量由 15 件大幅提升至 40 件,依托系统的实时处理能力,矿山整体安全风险降低约 40%。

(3)管理效率优化:矿山管理流程简化约 10%,协调管理提升约 15%,整体管理效率提升约 25%。

综上所述,该智慧管理系统通过优化生产流程、提升管理效率、强化安全保障,为矿山的管理决策科学化和绿色可持续发展提供了有力支撑,意义显著。

5 结论

本研究基于实景三维建模与人工智能技术,构建了覆盖矿山安全与生产环节的全要素协同的综合智慧系统,在四川省德昌县大陆槽稀土矿开展了实践应用。基于实景三维模型,利用矿区多源异构数据形成了矿山全要素数字孪生底座,在此基础上,结合人工智能,形成了集系统管理、运维管理和服务管理为一体的智能服务分析平台,并围绕矿山数字资产可视化、智能生产计划综合管理和智能矿山安全监管管理开展应用,实现了以人员安全智能管理、矿区资源与环境三维可视化与透明化智能管理、矿区智能化全流程生产与安全监管为核心的矿山智慧管理,显著提升了资源利用效率、安全生产水平与管理决策科学性,对实现矿产资源开发的绿色可持续发展具有重要意义。

[参考文献]

- [1] 王国法,任怀伟,庞义辉,等. 煤矿智能化(初级阶段)技术体系研究与工程进展[J]. 煤炭科学技术,2020,48(7):1-27.
- [2] 张瑞新,毛善君,赵红泽,等. 智慧露天矿山建设基本框架及体系设计[J]. 煤炭科学技术,2019,47(10):1-23.
- [3] 汤玲,张衡,储扬静,等. 多源融合的智慧矿山安全生产管理系统设计与应用[J]. 中国矿山工程,2024,53(5):22-27.
- [4] 王国法,庞义辉,任怀伟,等. 智慧矿山系统工程及关键技术研究与实践[J]. 煤炭学报,2024,49(1):181-202.
- [5] 鞠建华,韩见,鞠方略. 中国智能矿山发展趋势与路径分析[J]. 中国矿业,2023,32(5):1-7.
- [6] 丁恩杰,俞啸,夏冰,等. 矿山信息化发展及以数字孪生为核心的智慧矿山关键技术[J]. 煤炭学报,2022,47(1):564-578.
- [7] 王国法,王虹,任怀伟,等. 智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径[J]. 煤炭学报,2018,43(2):295-305.

- [8] 和昌龙,王实金,番景硕. 智能矿山建设状况与功能探讨[J]. 内蒙古煤炭经济,2020(18):150-151.
- [9] 谭睿,魏志恒,温士苇,等. 智慧矿山的数据治理体系和应用场景研究[J]. 煤炭科技,2025,46(1):28-33,37.
- [10] 蒙绍旭,穆省斌,缪淳,等. 探析5G技术在智慧矿山建设中的应用[J]. 数字通信世界,2025(3):91-93.
- [11] 范海波. 基于卫星遥感及GIS空天地一体化智慧矿山技术研究及应用[J]. 世界有色金属,2024(12):55-57.
- [12] 范中启,戴琳. 基于区块链技术的智慧矿山数据信任模型及技术架构研究[J]. 矿业科学学报,2024,9(2):304-314.
- [13] 丁勇. 基于物联网(IoT)技术与数字孪生技术在智能矿山安全风险监测中的应用研究[J]. 工业控制计算机,2025,38(5):123-124.
- [14] 王国伟,郭茹涵,王勇澎. 基于数字孪生的露天矿山装备智能化实施方案研究[J]. 露天采矿技术,2024,39(5):9-12.
- [15] 何伟,任帅,耿帅,等. 中关铁矿智慧矿山建设探索与实践[J]. 煤炭技术,2025,44(6):246-250.
- [16] 晋敏斐,伊丕源. 智慧矿山综合管控平台系统设计与应用[J]. 世界核地质科学,2025,42(2):400-413.
- [17] 李刚,乔登攀,张枝伟,等. 煤矿多源异构数据传输及管控方法研究[J]. 煤炭技术,2023,42(12):257-260.
- [18] 陈黎明,冯晓林,王建民. 面向矿区地质数据的集成方法及应用[J]. 中国矿业,2021,30(S2):129-135.
- [19] 汪莹,祖子帅,王振华. 基于智能化矿山数据分类与编码规范的元数据标准构建方法[J]. 工矿自动化,2024,50(7):130-135,146.
- [20] 仇巍巍,葛振华,吴琪,等. 矿产资源开发利用统计数据仓库关键技术研究[J]. 矿业研究与开发,2023,43(8):222-230.
- [21] 李硕,卢华明. 基于数据湖的环境大数据存储模型[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版),2021,36(6):81-86.
- [22] 余启成. 智慧水利工程异构数据整合方法研究[J]. 水利水电快报,2024,45(8):113-117.
- [23] 李焯. GIS技术在矿山应急管理中的应用现状[J]. 中国矿业,2024,33(6):143-147.
- [24] 陈军,刘建军,田海波. 实景三维中国建设的基本定位与技术路径[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2022,47(10):1568-1575.
- [25] 曲瑞超,苏蕴远,罗议谈. 实景三维模型在露天矿山开采监测中的应用探索[J]. 南方国土资源,2020,214(9):62-65.
- [26] 覃智. 智慧矿山视域下的数字孪生实景三维建模方法研究[J]. 世界有色金属,2024(18):163-165.
- [27] 闫勇,李彪,杨化超,等. 基于Cesium框架的智慧矿山三维可视化应用平台搭建[J]. 矿山测量,2020,48(6):106-109.
- [28] 葛虎胜,宫福会,孙炎炎,等. 双5G网络下露天智能矿山系统构建与应用[J]. 金属矿山,2022,51(9):167-173.
- [29] 赵文,王超,何利辉,等. 基于数字孪生的煤矿安全智能监控平台设计[J]. 矿山机械,2025,53(5):54-59.
- [30] 刘裕鑫. 数字化背景下智慧矿山建设的策略研究[J]. 世界有色金属,2024(18):47-49.
- [31] 伍锡锈,陈国梁. 利用倾斜摄影三维模型的城市更新基础数据调查应用研究[J]. 工程勘察,2023,51(5):70-74.
- [32] 朱庆,张利国,丁雨淋,等. 从实景三维建模到数字孪生建模[J]. 测绘学报,2022,51(6):1040-1049.
- [33] 刘洋. 数字孪生技术在智慧矿山中的应用探讨[J]. 中国非金属矿工业导刊,2023(4):73-75.
- [34] 承达瑜,宿文松,毛爱芹. 顾及邻域几何特性的露天矿台阶线提取方法[J]. 金属矿山,2024,53(7):56-65.
- [35] 王继野. 基于密集匹配点云的露天矿台阶线提取方法研究[J]. 金属矿山,2022,51(9):155-160.
- [36] 任学锋,黄科伟,李营作. GNSS监测技术在露天矿边坡监测预警中的应用[J]. 露天采矿技术,2023,38(4):46-48,52.
- [37] 刘辰昇,刘言明. 雷达技术在露天矿边坡监测预警中的应用[J]. 中国高新技术,2024(9):92-93,99.
- [38] 杨飞,熊韶运,王靖,等. MSR边坡雷达技术在露天矿高陡边坡监测和风险预警的应用[J]. 现代矿业,2024,40(11):114-116,149.
- [39] 王旭光. 露天煤矿边坡监测预警系统的应用研究[J]. 内蒙古煤炭经济,2025(5):70-72.
- [40] 梁嘉伟. GPS技术在抚顺东露天矿的应用[J]. 露天采矿技术,2024,39(4):37-41.
- [41] 马明红,常华敏,邢克兵,等. 先锋露天煤矿北帮边坡监测与变形破坏机理研究[J]. 露天采矿技术,2025,40(3):22-25.
- [42] 李志聪,郇青. 基于GNSS的边坡自动化监测系统应用研究[J]. 测绘与空间地理信息,2024,47(8):152-154,158.
- [43] 韩流,陈祥宸,王胆,等. 露天矿边坡监测预警体系及变形速率阈值确定方法[J]. 煤炭科学技术,2025,53(2):329-338.
- [44] 王周兵,张玮鹏,胡义,等. 孤山库区地质灾害自动化监测与信息化防治研究[J]. 人民长江,2022,53(S2):202-206.
- [45] 毕林,谢伟,崔君. 基于卷积神经网络的矿工安全帽佩戴识别研究[J]. 黄金科学技术,2017,25(4):73-80.
- [46] 吴真真,唐超,杨晓飞. 基于深度学习的视频识别及动态监测技术应用——以轨道交通建设工程为例[J]. 测绘通报,2022(9):23-28.