

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. doi: 10.3969/j.issn.1672-0636.2025.02.014

JIN Minfei, YI Piyan. System design and application of an integrated management and control platform for smart mines[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(2): 400-413(in Chinese).

智慧矿山综合管控平台系统设计与应用

晋敏斐, 伊丕源

1 铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 北京 100029

2 核工业北京地质研究院, 北京 100029

3 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029

摘要 传统矿业开采受矿体勘探精度不足、开采装备自动化水平低下等技术局限及复杂地质构造、恶劣地下环境等自然条件制约, 长期存在开采工艺精准度低、生产能效衰减与安全风险累积等系统性问题, 严重制约矿山行业的高质量发展。随着信息技术的迅速发展, 为解决传统矿业开采中存在的问题, 智慧矿山技术应运而生, 成为推动矿山行业转型升级的重要手段。在对智慧矿山的关键技术进行系统分析与总结基础上, 设计并开发一套综合管控平台, 实现对智慧矿山的智能化管理与高效运营, 特别是在通信技术、物联网、大数据和云计算等领域的集成与应用方面, 提升矿山的安全性和生产效率。通过5G和物联网的深度融合, 智慧矿山显著提高了数据传输速率和稳定性, 并支持海量数据实时传输。物联网设备借助多类型传感器, 实现了对环境温湿度、设备运行状态和人员定位等数据的全面感知, 构建了高度互联的智能系统。通过融合大数据与云计算技术, 能够有效应对矿山生产过程中复杂且海量的数据需求, 实现数据资源的实时共享和分布式处理, 同时对数据存储和计算效率进行优化。结合大数据技术, 智慧矿山能够对多维度数据进行快速分析和深度挖掘, 提供精准的趋势预测。未来, 随着技术的不断进步和管理模式的创新, 智慧矿山有望实现更高水平的智能化和自动化, 为矿山行业的高质量发展提供有力支撑。

关键词 智慧矿山; 现代通讯技术; 物联网; 大数据; 云计算; 人工智能

中图分类号 TD67; TD2 文献标志码 A 文章编号 1672-0636(2025)02-0400-14

System design and application of an integrated management and control platform for smart mines

JIN Minfei, YI Piyan

1 National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, Beijing 100029, China

2 Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

3 CNNC Key Laboratory of Uranium Resources Exploration and Evaluation Technology, Beijing 100029, China

Abstract: Traditional mining operations, constrained by technological limitations such as insufficient accuracy in ore body exploration and low automation levels in mining equipment, as well as natural constraints including complex geological structures and harsh underground conditions, have long suffered from persistent systemic issues

基金项目: 多模态卫星遥感数据接引设计及典型应用关键技术研究(编号: WDZC_2023_HDYY_101)资助

收稿日期: 2025-03-24 改回日期: 2025-04-06

第一作者: 晋敏斐, 男, 2000年生, 在读硕士研究生, 科研方向为遥感图像分析。E-mail: jin_minfei@163.com

Supported by Multi-modal Satellite Remote Sensing Data Access Design and Typical Application Key Technology Research (No.WDZC_2023_HDYY_101)

Received date: 2025-03-24 revised date: 2025-04-06

First author: JIN Minfei, male, born in 2000, master's degree candidate, focusing on remote sensing image analysis. E-mail: jin_minfei@163.com

including low precision in mining processes, declining production efficiency, and accumulating safety risks, thereby severely constrained the high-quality development of the mining industry. With the rapid advancement of information technology, smart mining technology has emerged as a crucial solution to address these issues and promote industrial transformation. Based on systematic analysis and summarization of key technologies in smart mining, this study designed and developed an integrated management platform to achieve intelligent management and efficient operation of smart mines. Particularly through the integration and application of communication technologies, Internet of Things (IoT), big data analytics, and cloud computing, this platform significantly enhances mining safety and production efficiency. Through deep integration of 5G and IoT technologies, smart mining systems have significantly improved data transmission speed and stability while supporting massive real-time data transfer. IoT devices equipped with multiple sensors enable comprehensive monitoring of environmental parameters (temperature/humidity), equipment status, and personnel positioning, establishing a highly interconnected intelligent system. The convergence of big data and cloud computing technologies effectively addresses complex and massive data demands in mining operations, achieving real-time data sharing and distributed processing while optimizing data storage and computational efficiency. Combined with big data analytics, smart mining systems can rapidly analyze multi-dimensional data and perform deep mining to provide accurate trend predictions. Future advancements in technology and management models are expected to enable higher-level intelligentization and automation in smart mines, providing robust support for the high-quality development of the mining industry.

Keywords: smart mining; modern communications technology; the internet of things; big data; cloud computing; AI

现代科技的飞速发展使得智能技术成为社会进步的核心动力,伴随着现代通讯技术、物联网、大数据、云计算、人工智能以及地理信息系统(GIS)等高新技术的广泛普及与应用,传统工业领域迎来了前所未有的变革机遇。矿山产业作为国民经济的重要支柱,其发展模式也在经历着由传统开采向全方位智能化转型的深刻变革^[1-2]。在这一变革浪潮中,“智慧矿山”作为矿业现代化的重要方向,正处于持续完善与深化发展的关键阶段。吴立新^[3]于早先提出“数字矿山”的概念,此后,学术界陆续引入了“智能矿山”、“智慧矿山”等新概念,为矿山产业注入了新的活力和发展思路;何敏^[4]通过综合众多专家学者的研究成果,对智慧矿山进行了科学的界定;李忠诚^[5]从行业转型和用工荒问题凸显等角度出发,阐明了智慧矿山建设的必要性和重要意义;赵奕^[6]等人对矿山信息化建设的实施与应用进行探讨,从而逐步构建了矿山信息化发展的多元理论体系;霍中刚^[7]结合互联网时代背景,指明了智慧矿山未来发展方向。

立足于智慧矿山的发展现状与趋势,全面分析并总结了现代通讯、物联网、大数据、云计算以

及GIS等前沿技术在矿山生产调度、产量统计、矿体品位分布和生产成本分布等关键环节中的应用实践,进一步提出一种智慧矿山综合管控平台的总体设计架构,通过对这些技术的深度整合与协同创新,探讨如何实现矿山生产过程中的数据化管理和智能决策,从而大幅提升生产效率和安全管理水平,最终为矿山资源的高效利用和绿色可持续发展提供坚实的技术支撑。

1 智慧矿山关键技术概述

智慧矿山的发展是在传统矿山发展的基础上不断演进而来的。受国家政策(如《关于推进“互联网+”智慧能源发展指导意见》和《关于加快推进国有企业数字化转型工作的通知》等)推动,矿山生产逐步迈入信息化、数字化时代。现代通讯技术、物联网、大数据、云计算、人工智能以及地理信息系统等高新技术得到了广泛应用,实现了对矿山各环节的全面监控、精细管理和智能决策。智慧矿山的发展主要分为两个阶段:

1) 自动化阶段:该阶段主要依靠分类传感技术及二维、三维GIS平台构建系统管理和信息发

布体系,实现对矿山作业信息的实时采集和管理。

2)智能化阶段:在自动化基础上,通过大数据、云计算、人工智能和深度学习等技术,构建多系统联动平台,实现对矿山生产进行智能决策分析,提升整体生产效率和安全性。

当前,我国在智能化应用方面正处于局部智能化阶段。随着深度学习和人工智能技术的广泛应用,部分关键环节已实现初步智能化处理,未来矿山作业将有望借助这些高新技术,逐步迈入全面智能化阶段,从而在提升生产效率、降低安全风险和优化资源配置等方面发挥更加显著的作用^[8]。

在矿山建设的生产环节中,现代化信息技术正逐步融入各项生产作业中,推动着生产流程的高效、智能和安全管理。通过引入无线通讯、工业物联网、大数据分析、云计算、人工智能与GIS等信息技术,在矿山建设过程中的关键环节实现了数据驱动与智能监测,进而提升整体生产效率和工程质量。

1.1 现代通讯与物联网技术驱动生产现场智能协同

矿山建设现场要求实现高效、精准的信息传输与设备联动。现代通讯技术与物联网的融合,使得现场数据能实时传输和精确定位。例如,Inpixon公司的Chirp扩频技术结合GPS和LiDAR,不仅实现了对施工人员和设备的精准追踪,还为现场安全监控提供了有力支持^[9]。随着工业物联网技术应用于智慧矿山,矿山的生产设备正逐步实现智能化,从而显著提升整体生产效率^[10]。赫尔辛基Metso公司开发的IIOT采矿方案^[11],通过PLC连接关键设备,实现传感器数据的实时采集与云端传输,并利用AI算法检测故障、预警风险;在澳大利亚铁矿区,Metso Metrics^[12]通过分析破碎机数据,帮助采矿者预测事故、主动维护并避免停机。智能感知技术的应用,不仅增强了安全保障,还提升了整体生产效率与管理水平。

1.2 大数据与云计算助力施工管理智能化升级

在矿山建设过程中,各类传感器和监控设备不断产生大量结构化与非结构化数据。借助大数据技术和云计算平台,施工现场数据得

以高效存储和并行处理,实现了施工进度、设备状态及材料使用情况的实时监控。周小希^[13]等利用云计算技术、大数据分布式计算等构建出一种铀矿大数据平台,借助分布式存储技术对结构化与非结构化数据进行统一管理,并结合并行处理技术,有效提升了钻孔三维可视化、Web客户端瓦片数据调度以及关联条件查询的效率。同时,边缘计算的引入极大地提升了数据传输的效率,减少了在传输过程中的延迟,将资源从分析走向设备端,数据处理更加快速的同时,响应性也更强^[14]。云-边-端协同技术将部分数据处理任务下放至现场终端,确保在网络条件不佳时仍能实现关键数据的即时处理。该一体化解决方案为施工指挥中心提供了及时、准确的决策依据,有效预防设备故障和施工隐患,进一步优化了施工流程和资源配置。

1.3 人工智能与GIS赋能智慧矿山决策与安全保障

人工智能与地理信息系统的融合,为矿山建设中的智能决策和安全保障提供了新动力。人工智能技术的引入,实现了矿山的智能化管理,加速了传统矿业向现代化、智能化的转型^[15]。例如,华为的“智慧矿脑”系统融合了AI、物联网和大数据等技术,对施工现场进行全方位监控和智能分析。当系统检测到异常或不安全状况时,能够迅速向指挥中心预警,确保人员和设备的安全。同时,通过GIS技术与遥感影像,实现对矿区地形、地质等信息的精准建模^[16],不仅有助于施工前期的规划与风险评估,更能在施工过程中实时监控各作业区域的进展,优化资源配置,实现施工过程的动态管理与科学调度。

2 综合管控平台总体架构与关键技术

2.1 平台总体架构

提出了一种智慧矿山综合管控平台的总体设计架构。该平台的系统架构主要由数据采集层、数据处理层、应用服务层和展示层构成(图1),各层之间相互协作与支撑,共同实现矿山生产管理、调度优化、安全监测及决策支持等多方面的智能化功能^[17]。

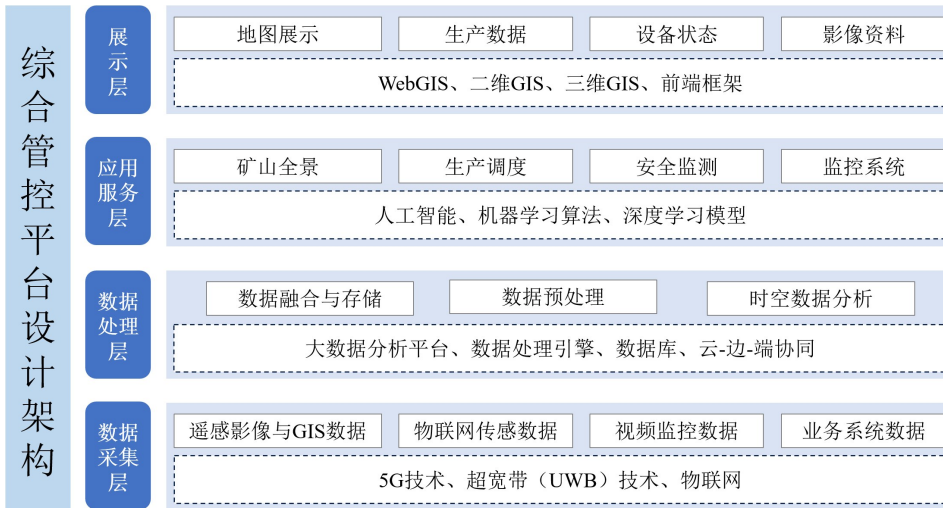


图 1 智慧矿山综合管控平台设计架构

Fig. 1 Design architecture of smart mine comprehensive control platform

数据采集层,基于现代通讯和物联网技术,矿区内通过部署多类型传感器和物联网设备,实现对环境参数、设备状态以及人员定位等信息的实时获取,通过 5G 网络提供的高速、低时延通信环境,海量数据可被稳定、快速地传输至后端^[18]。与此同时,结合云-边-端协同理念,在矿区边缘侧部署部分计算和存储能力,对传感器采集的关键数据进行本地预处理与初步分析,从而减少网络带宽压力并提高系统的实时响应能力。

数据处理层在大数据与云-边-端协同框架下,充分利用云计算与分布式存储技术,对采集到的海量数据进行高效管理与深度分析。云计算平台不仅提供了弹性的计算与存储资源,支持快速处理大规模数据,还可与边缘侧协同分担计算负载,降低数据回传和集中处理带来的延迟与压力^[19]。大数据分析工具和算法则用于挖掘数据中的潜在规律与关联关系,为生产优化、安全预警及设备故障预测等提供决策支持^[20]。

应用服务层则进一步结合人工智能技术,为系统提供智能决策、自动控制和预测性维护等功能^[21]。在此层面,平台可基于机器学习算法^[22]与深度学习模型^[23],对生产数据、设备数据以及环境数据进行综合分析,从而实现多种智能化服务。以智能调度为例,平台会根据不同采掘区的实时情况和产能目标,自动优化生产调度方案,提高整体运营效率;在安全保障

方面,则可通过模型训练与实时监测的结合,动态识别潜在安全隐患并及时预警。

最外层的展示层利用可视化技术,将分析处理后的数据以直观、易操作的方式呈现给用户。结合二维、三维 GIS 技术,平台能够实时展示矿区全景视图、设备状态和生产数据、影像资料等,为管理者提供准确、清晰的矿山运行态势^[24]。用户可通过人机交互界面快速获取关键信息,并基于可视化结果进行科学决策。

2.2 关键技术

本次研究将现代通讯、物联网、大数据处理及云-边-端协同等多项前沿技术深度融合,构建出一体化的综合管控平台。5G 与超宽带 (UWB) 构建高速、低延迟的通信网络,物联网实现人、机和环境等多维数据的实时采集,大数据技术高效治理多源异构信息,云-边-端协同架构优化分层计算模式等关键技术的集成应用,为平台赋能全面感知、实时互联、智能决策及自主学习能力^[25]。

2.2.1 现代通讯技术

在矿山系统中,主要使用的现代通讯技术包括 5 G (5th-Generation Mobile Communication Technology) 和 UWB (Ultra-Wideband) 技术。5G 技术的高速率和低时延意味着传感器可以更快地将生产数据上传至云端或本地服务器,保证系统进行及时的数据更新,为矿山各环节的监测与管理提供了可靠支持^[26]。然而矿山复杂地质环境对 5G 基站部署、信号稳定传

输及设备防爆特性提出了特殊挑战。以矿山远程监控系统为例,应用 5G 网络,矿山中生产设备和高清监控设备等数据传输效率显著提升,通过将各子系统数据库与总数据库连接,构建一套全面、稳定的智慧矿山远程监控及预警系统^[27](图 2)。与以往依赖人工巡视、红绿

灯及声光信号等传统监测方式相比,该系统能够在事故发生时迅速触发报警,并将监控数据和位置信息发送至管理平台,随后通过移动终端将预警信号传达给相关工作人员,为应急措施的启动争取宝贵时间,从而显著提升了矿区的安全性和生产效率。

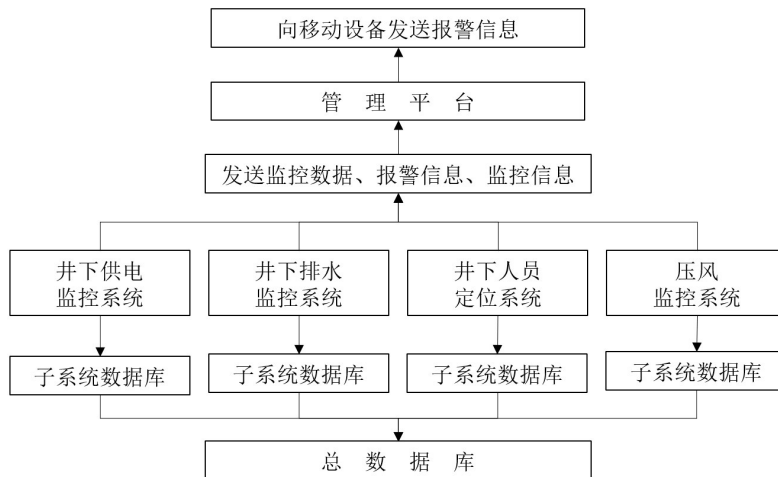


图 2 智慧矿山远程监控系统工作流程

Fig. 2 Workflow of smart mine remote monitoring system

UWB 技术凭借精准定位、高速传输及强抗干扰能力,在智慧矿山中具有重要应用价值。针对矿山复杂环境(尤其是地下场景),UWB 可实现毫米级定位精度,实时监控人员与设备动态,为安全管理提供即时决策依据^[28];同时支持传感器数据高速采集与设备间通信,提升矿山运营效率。井下实时定位系统依托传感器网络、通信技术与定位算法,通过布设节点采集环境及位置数据,结合物联网实时分析,并利用多普勒定位、三角定位等算法实现目标位置解算与可视化呈现。Inpixon 公司基于 UWB 技术构建的系统采用飞行时间(ToF)测距法,通过计算脉冲传播时间实现 50 cm 精度定位及移动追踪^[29]。相比依赖接收信号强度(RSSI)的蓝牙(5 m 精度)和 Wi-Fi(10 m 精度),UWB 具备更高精度、更低延迟及更宽频谱特性,其低功率信号对窄带技术干扰极小^[30],更加适配矿山的复杂大型场景需求。

2.2.2 物联网技术

通过泛在感知与智能互联,物联网构建了以井下智能终端、异构网络传输层、边缘计算平台和智能辅助系统为核心的数字化架构^[31],

凭借其卓越的实时数据采集能力,将人、机和环境等全要素高效连接。该体系通过部署振动、倾角和气体浓度等多参数传感装置,建立设备运行状态与环境参数的动态感知网络,实现开采作业面的全息可视化监测。

基于实时数据流构建的智慧矿山综合管控平台物联系统展现出三大核心价值:1)依托无线传感网络与数字孪生模型,实现对液压支架、运输皮带等关键设备的远程诊断与自适应控制,显著提升生产系统响应速度与操作安全性;2)通过多源异构数据融合与特征提取,构建覆盖设备全生命周期的数据仓库,为生产调度优化与能效管理提供决策依据;3)集成自主学习算法的工作流引擎,可动态优化采矿设备协同作业模式,在降低人工干预强度的同时提升资源利用效率^[32]。

在安全管控维度,智慧矿山综合管控平台物联网架构创新性整合可信数据加密与安全态势感知技术,构建覆盖终端准入、传输隧道和云端防护的三层防御体系。通过设备指纹认证与行为基线建模,有效识别非法接入与异常操作,为矿山安全生产构筑智能化防护屏障。

2.2.3 大数据技术

在矿山生产作业中会产生大量数据,其中涵盖如地质勘探时序流、设备振动频谱和环境监测点云等结构化、半结构化及非结构化数据形态。作为智慧矿山系统中核心技术,在进行平台架构时采用数据湖仓、流式计算和知识图谱三维技术架构,依托分布式存储引擎实现多模态信息的统一治理,有效应对数据规模超大规模化(Volume)、产生高频化(Velocity)和形态多样化(Variety)特征^[33]。

针对上述多源异构数据治理挑战,矿山大数据体系通过“数据湖仓-流式计算-知识图谱”三维架构形成级联式技术响应:数据湖仓基于分布式存储引擎构建多模态数据融合底座,实现地质点云模型、设备振动时序流与环境监测视频流的标准化存储与关联检索,从根本上破解超大规模异构数据(Volume)的整合难题^[34];流式计算引擎依托内存计算与窗口化处理机制,对开采设备毫秒级振动频谱进行在线特征提取与工况诊断,有效应对数据产生高频化(Velocity)衍生的实时性需求^[35];知识图谱通过领域本体建模与语义推理,将离散的勘探报告、设备维护日志等非结构化数据转化为可计算的关联网络,系统性解决数据形态多样化(Variety)导致的知识沉淀困境^[36]。三者通过“流处理即时响应-湖仓持久化治理-图谱语

义化增强”的协同机制,在设备监测管理、生产成本分布和安全风险预警等维度形成数据价值转化,显著提升系统运行效率、实现秒级响应能力。

2.2.4 云-边-端协同

云计算技术作为一种强大的资源扩展手段,具备弹性计算和存储功能,在矿山管理中能够安全可靠地存储和管理海量数据^[37]。通过云计算平台,用户可以将地理信息数据以数字化形式上传到云端,也能在云端进行资源的访问与共享,从而降低了对设备的限制。

由于分布式矿山系统具有边缘设备分散性、动态异构性及高并发数据流等特性,传统云计算架构在实时响应、传输可靠性及数据精准性层面存在显著局限,其集中式数据处理模式与网络传输层级冗余导致无法满足矿山场景下毫秒级实时控制、多节点协同决策及地质数据高精度建模的综合要求。当场景发生变化时,大规模数据传输易受环境干扰引发通信延迟,直接影响生产系统的运行的稳定性^[38]。为构建高效计算体系,实际部署中采用边缘节点分流机制:前端节点负责实时数据计算与临时存储,中心云则专注于数据深度挖掘、模型训练及跨系统协同,最后仅需将特征数据上传云端进行智能算法迭代,形成“边缘预处理-云端深度学习-终端动态更新”的智能闭环系统(图 3)。

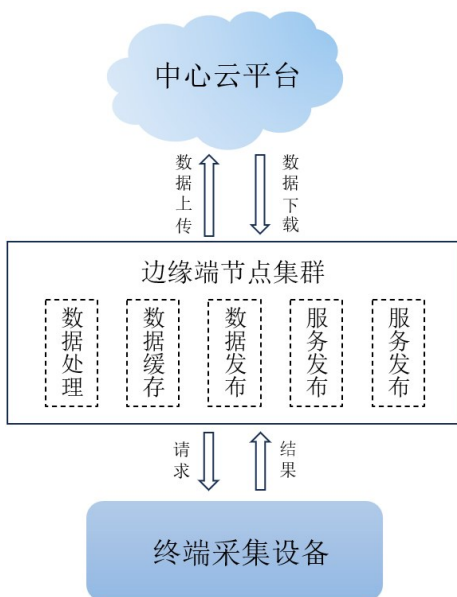


图 3 云-边-端协同示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cloud-edge-end collaboration

针对传统监测系统依赖人工巡检导致的时效性缺失与数据断层问题,本次研究通过在开采面部署嵌入式边缘节点,集成多模态传感器与智能摄像头构建自主感知网络。这些节点不仅实现振动频谱、液压参数等关键指标的实时采集,还能通过轻量化算法进行异常工况

的初步诊断。经预处理的结构化数据通过分级传输机制向云端汇聚,既降低了网络带宽压力,又为数字孪生建模与工艺优化提供了高质量数据源(图4)。这种分层处理机制有效解决了多源异构数据的标准化难题,为矿山设备预测性维护提供了新的技术路径^[39]。

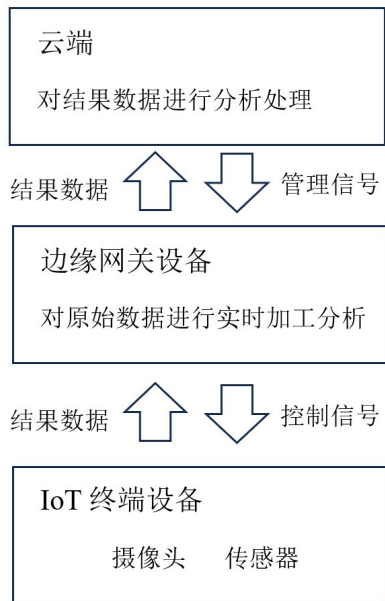


图4 智慧矿山中的云-边-端协同模式

Fig. 4 Cloud-edge-end collaboration model in smart mines

2.2.5 人工智能技术

人工智能(Artificial Intelligence, AI)作为新一代技术,正在矿山领域构建起面向复杂工业场景的智能化解决方案。其技术架构以数据智能为核心驱动力,本平台通过机器学习与深度学习的有机融合,形成了从环境感知到决策执行的认知闭环。

在机器学习技术维度,系统通过构建动态知识图谱实现多维数据关联^[40]。基于监督学习框架建立的预测模型,不仅能够解析设备运行参数与生产效能之间的映射关系,更通过增量学习机制持续吸收新产生的工况数据,形成具有时序适应能力的决策引擎。无监督学习技术则通过特征解耦重构,挖掘振动频谱、热成像等异构数据中隐含的设备劣化模式,建立多维度的健康评估体系。

深度学习技术通过构建层次化特征提取网络,为矿山复杂场景提供认知增强能力。卷积神经网络对多源视觉数据的解析,使系统具

备从地质构造识别到设备表面缺陷检测的视觉理解能力^[41]。递归神经网络与注意力机制的结合,实现了对振动时序、压力波动等动态信号的时空特征建模,精准捕捉设备亚健康状态的早期征兆。生成对抗网络则通过构建设备运行的数字孪生体,为故障演化模拟提供虚拟试验场,大幅提升风险预警的预见性。这种多层次感知能力的融合,使得系统能够突破传统阈值报警的局限,建立起基于设备全生命周期健康评估的预测性维护体系。

3 智慧矿山综合管控平台实现与应用

3.1 智慧矿山综合管控平台实现与技术概述

智慧矿山综合管控平台实现主要围绕矿山的生产成本、矿体质量与安全状况等角度进行设计,主要用于显著提高矿业企业的生产效率、降低运营成本,并有效保障矿山生产的安全性和环保合规性。图5是笔者开发的智慧矿山综合管控样例平台。



图 5 智慧矿山综合管控平台

Fig. 5 Smart mine comprehensive control platform

该样例平台基于 Vue.js 框架构建前端, 利用 Mapbox 实现矿区二维空间数据的高精度展示, 并通过 ECharts 提供生产数据的动态交互式呈现, 为进一步探讨前端开发框架、矿区信息可视化与生产数据可视化三大核心技术的选择与应用提供了实践依据。

3.1.1 前端开发框架

平台主要采用 Vue.js 框架^[42], 其轻量化和响应式特点使得开发过程高效且易于维护。此外, React^[43]和 Angular^[44]等其他前端技术也各具优势, 前者在组件复用与生态系统丰富性上表现突出, 后者则在大型项目的结构化开发中具有优势。开发者可根据项目需求与团队技术栈, 选择最合适的框架, 从而优化开发效率和系统可扩展性。

3.1.2 矿区信息可视化

在矿区信息可视化方面, 系统融合了 Mapbox^[45]技术与遥感影像, 通过高分辨率遥感影像、矢量瓦片及多样化地图样式, 实现了矿区范围、矿点分布及地形起伏等信息的精准呈现。Mapbox 具备高分辨率遥感影像、矢量瓦片及多样化的地图样式, 能够有效增强矿区的空间信息表达, 并与三维场景无缝融合, 实现地理信息的动态渲染和多层级缩放。与此同时, OpenLayers^[46]作为一款开源 GIS 解决方案, 由

于其高度扩展性和灵活的插件机制, 也常被用于处理 GeoJSON、KML 和 3D Tiles 等多种数据格式。两者各有特点, 为矿区信息的动态渲染、多层次缩放及三维场景无缝融合提供了不同的技术路径。

3.1.3 生产数据可视化

针对生产数据的动态展示, 平台选用了 ECharts^[47]进行实时统计与交互式分析, 展示采矿量、矿石品位分布和生产成本构成等关键指标。与此同时, D3.js 等技术则凭借其高度定制化和强大的交互功能, 适合应用于更为复杂的数据可视化场景。两者相辅相成, 为深入解析生产效率变化趋势和资源开采的空间分布特征提供了丰富的数据支持和可视化手段。

随着增强现实(AR)和虚拟现实(VR)等前沿技术的不断发展, 未来的矿区可视化系统有望在现有技术基础上系统化集成这些先进技术, 提供更加沉浸式、真实感更强的交互体验。

3.2 智慧矿山综合管控平台应用效果

平台以“数据驱动决策”为核心, 通过整合矿山生产、地质、经济与安全多维度数据资源, 在实际应用中展现出以下场景化功能优势:

1) 基于物联网设备实时数据采集网络, 实现对矿区开采量与产量数据以季度为基本统计单元的精细化统计(图 6)。通过对不同时

期开采量与产量数据的对比分析,平台直观呈现出生产周期中的波动特征;同时,结合对雨季、设备检修等外部因素影响的定量分析,揭

示了这些因素对矿山产能变化的规律性作用,从而为生产计划的调整和资源调配提供科学依据。



图 6 基于季度数据的矿区开采量与产量统计

Fig. 6 Statistics of mining area extraction and production based on quarterly data

2)集成地质勘探、物探解译与生产化验多模态数据源,创新构建矿体品位三维空间数据

库。运用机器学习算法对全矿区品位分布进行智能分级,借助交互式可视化展示,各品位



图 7 矿体各品位等级的资源占比

Fig. 7 Resource proportion of ore body by grade level

等级的资源占比得以直观呈现(图 7),进而为矿体资源质量评估及后续优化开采方案的制定提供了可靠的数据支撑。

3)基于多源数据融合与智能分析技术,实现了矿山成本管理由传统粗放型向精细化、透明化管理模式的转变,依托对“开采、运输、选

矿、环境、安全”五大成本维度的实时数据采集与整合,平台构建了全面的成本数据库,并利用动态饼状图实现各成本环节占比的秒级可视化更新(图 8),这一机制使得管理者能够迅速识别出成本消耗的关键环节,从而准确定位降本增效的关键目标。



图 8 矿区各成本环节占比

Fig. 8 Proportion of cost components in the mining area

4)整合了高分辨率遥感影像数据,通过实时采集矿区地形、环境及设施变化信息,实现了对矿区全域状况的动态监控。平台融合二

维、三维影像数据,构建了详尽的矿区空间信息展示体系,直观反映矿区整体布局和局部细节(图 9)。

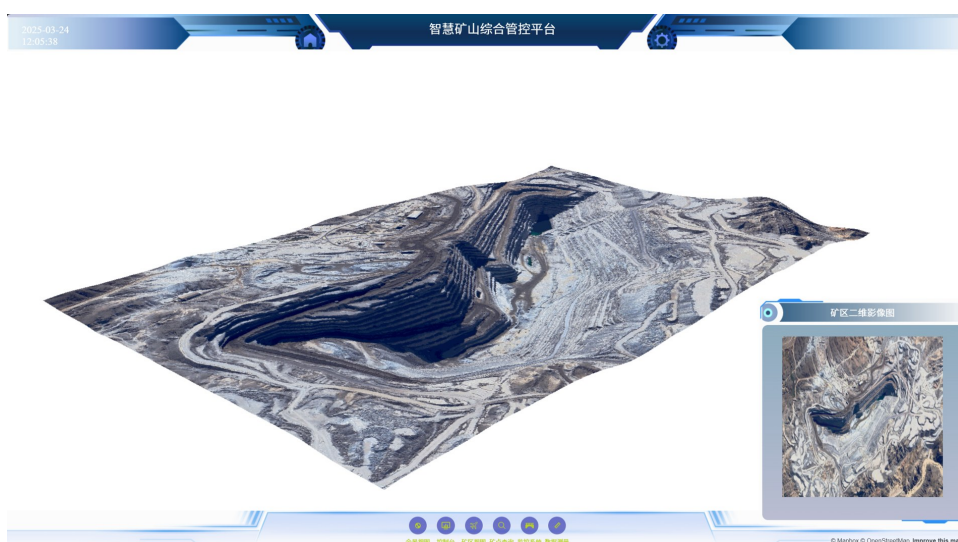


图 9 矿区二、三维影像展示

Fig. 9 Display of 2D and 3D imagery of the mining area

5) 建立设备参数监测体系, 通过实时监控关键设备的运行数据, 结合智能故障诊断算法, 有效捕捉设备运行异常(如振动、温度及能耗等指标的异常波动), 实现对故障隐患的早

期预警(图 10); 同时, 内置的风险评估和预警机制可及时识别并响应潜在安全事故, 迅速启动应急处置流程, 从而大幅降低事故发生风险, 保障矿山安全生产。

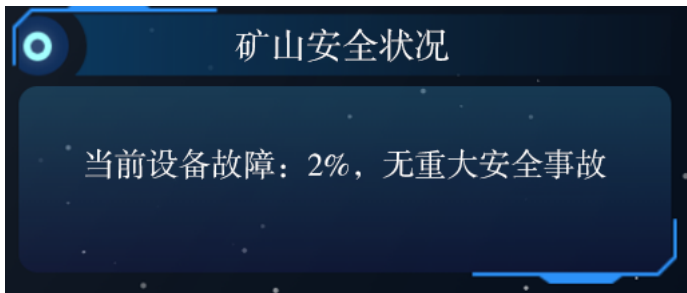


图 10 矿区设备故障与安全事故预警

Fig. 10 Early warning of equipment failure and safety incidents in the mining area

4 现存问题与未来发展趋势

4.1 综合管控平台现存问题

针对平台系统的开发, 平台现有加密机制难以完全覆盖物联网设备动态数据流的安全需求。在实时数据融合分析场景下, 边缘节点缓存环节仍存在未加密隐患, 可能会影响关键生产数据的传输安全性。而现有的安全防护体系往往侧重于传统信息系统, 对于实时传输和海量传感器数据的安全防护尚显不足, 使得整体系统在面对复杂网络安全威胁时显得较为脆弱。

同时, 当前平台的可视化功能虽然支持二维、三维地理信息的展示, 但在如何将这两种展示方式有机整合方面仍显不足。当前系统可以分别呈现平面和立体地图, 但缺乏将二维、三维数据互联互通的深度融合机制, 致使空间信息的综合表达与联动效果未能达到预期。如何在完善二维与三维 GIS 结合的基础上构建高效协同机制, 实现智能系统与人工操作的无缝对接, 仍然是技术研发亟待解决的关键难题。

4.2 未来发展趋势

网络安全和隐私保护将成为未来智慧矿山不可忽视的重要研究方向。随着数据采集规模的不断扩大, 未来的智慧矿山系统将面临更为严峻的信息安全挑战。预期在未来, 零信任架构、端到端数据加密和匿名化处理等多层

次安全防护机制将得到更为广泛的应用, 加之人工智能在异常检测与威胁识别方面的持续突破, 有望构建出一套适应海量实时数据传输环境的动态安全监控体系, 全面提升系统对网络攻击和内部安全隐患的防御能力^[48]。

随着人机协同机制与智能调度算法的持续优化, 矿山生产系统正逐步实现高阶自主化运行。未来, 基于深度学习和人工智能技术的预测性维护模型将实现设备故障的早期预警, 而 AR/VR 等沉浸式交互技术的融入将改变传统的人机交互方式, 促使操作培训、远程指导及故障诊断等应用场景的智能化升级^[49]。从系统论视角来看, 通过构建跨领域技术融合的开放式互联架构, 智慧矿山系统与智慧城市基础设施、智能交通网络的协同发展已形成明确的技术演进路径, 这种多维度的技术耦合将实质性推进矿业领域在生态友好性、生产效能及可持续发展维度的重要转型。

网络安全是能够保障系统稳定运行的重要基石, 未来相关技术和防护机制将不断得到强化; 人机协同技术将在智能化管理与决策支持方面发挥更大作用, 平台也会在不断优化升级中满足未来发展的多样化需求。

5 结 语

矿山智能化建设已成为矿业转型升级的重要方向, 依托现代高新技术, 实现了生产效

率提升、成本优化和安全管控的整体升级。在梳理智慧矿山现状与前沿技术的基础上,开发了一套集数据采集、实时监测和影像展示于一体的综合管控平台,并得出以下两点结论:

1)平台通过整合现代通讯技术、物联网、大数据、云计算及人工智能等先进技术,改变了传统矿山的运营模式和思维,实现了生产流程的自动化与精细化管理,将矿山运营可视化,显著提升了生产效率。

2)在平台设计与开发过程中,这些技术的集成能够有效对矿山设备故障进行预警,从而降低矿山风险事故的发生,保障从业人员的安全。

参考文献

- 于国振.智慧矿山建设的探索与应用[J].冶金管理,2023(15):15-17.
YU Guozhen. Exploration and application of smart mining construction [J]. China Steel Focus, 2023(15):15-17(in Chinese).
- 袁朋,周华,郝建华.智慧矿山现状与关键技术分析[J].长江信息通信,2021,34(3):4-6.
YUAN Peng, ZHOU Hua, HAO Jianhua. Analysis of the current status and key technologies of smart mines [J]. Changjiang Information & Communications, 2021, 34(3):4-6(in Chinese).
- 吴立新,殷作如,邓智毅,等.论21世纪的矿山——数字矿山[J].煤炭学报,2000,25(4):337-342.
WU Lixin, YIN Zuoru, DENG Zhiyi, et al. Research to the mine in the 21st century: Digital mine [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(4):337-342(in Chinese).
- 何敏.智慧矿山定义探讨[J].工矿自动化,2017,43(9):12-16.
HE Min. Discussion on definition of wisdom mine [J]. Journal of Mine Automation, 2017, 43(9):12-16(in Chinese).
- 李忠诚.智慧化矿山建设的必要性研究[J].内蒙古煤炭经济,2021(2):154-156.
LI Zhongcheng. Research on the necessity of intelligent mining construction [J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2021(2):154-156(in Chinese).
- 赵奕,韦永兰,石磊,等.智能矿山信息化建设实施与应用探讨[J].有色设备,2022,36(1):1-6.
ZHAO Yi, WEI Yonglan, SHI Lei, et al. Discussion on Implementation and Application of Intelligent [J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2022, 36(1):1-6(in Chinese).
- 霍中刚,武先利.互联网+智慧矿山发展方向[J].煤炭科学技术,2016,44(7):28-33+63.
HUO Zhonggang, WU Xianli. Development tendency of internet plus intelligent mine [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7):28-33+63(in Chinese).
- 吕鹏飞,何敏,陈晓晶,等.智慧矿山发展与展望[J].工矿自动化,2018,44(9):84-88.
LYU Pengfei, HE Min, CHEN Xiaojing, et al. Development and prospect of wisdom mines [J]. Journal of Mine Automation, 2018, 44(9):84-88(in Chinese).
- ZHANG Y. Precise location technology based on chirp spread spectrum [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 40:1000-1005.
- 樊荣,徐青云.工业物联网背景下智慧矿山建设现状及关键技术探讨[J].煤,2022,31(9):25-29.
FAN Rong, XU Qinyun. Discussion on current situations and key technologies of smart coal mine construction under background of industrial internet of things [J]. Coal, 2022, 31(9):25-29(in Chinese).
- ZHOU C, DAMIANO N, WHISNER B, et al. Industrial internet of things: (IIoT) applications in underground coal mines [J]. Mining Engineering, 2017, 69(12):50.
- CARTER R A. Taking a closer look at IPCC [J]. Engineering and Mining Journal, 2022, 223(8):16-19.
- 周小希,邓凡,万林,等.铀矿大数据综合管理信息平台设计与实现[J].煤田地质与勘探,2019,47(1):6-14.
ZHOU Xiaoxi, DENG Fan, WAN Lin, et al. Design and implementation of information management platform for big data of uranium [J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(1):6-14(in Chinese).
- CARVALHO G, CABRAL B, PEREIRA V, et al. Edge computing: Current trends, research challenges and future directions [J]. Computing, 2021, 103(5):993-1023.
- 韩兆龙.人工智能技术在矿山智能化建设中的有效运用[J].中国战略新兴产业,2024(29):54-56.
HAN Zhaolong. The effective application of artificial intelligence technology in the intelligent construction of mines [J]. China Strategic Emerging Industry, 2024(29):54-56(in Chinese).

- 16 ŞALAP S, KARSLIOĞLU M O, DEMIREL N. Development of a GIS-based monitoring and management system for underground coal mining safety [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 80 (2): 105-112.
- 17 华贤兵, 蔡美玲. 智慧矿山大数据综合管控平台的设计与实现 [J]. *煤矿机械*, 2024, 45 (6): 210-214.
HUA Xianbing, CAI Meiling. Design and implementation of smart mine Big Data comprehensive management and control platform [J]. *Coal Mine Machinery*, 2024, 45 (6): 210-214 (in Chinese).
- 18 何治东, 李东辉. 基于 5G 通信的智慧矿山物联网架构研究 [J]. *通讯世界*, 2024, 31 (5): 28-33.
HE Zhidong, LI Donghui. Research on the architecture of smart mining IoT based on 5G communication [J]. *Telecom World*, 2024, 31 (5): 28-33 (in Chinese).
- 19 张俊. 智慧矿山综合信息化云平台架构设计与应用 [J]. *网络安全和信息化*, 2024 (4): 82-84.
ZHANG Jun. Architecture design and application of intelligent mining comprehensive mining informatization cloud platform [J]. *Cybersecurity & Informatization*, 2024 (4): 82-84 (in Chinese).
- 20 DIACONITA V, BOLOGA A R, BOLOGA R. Hadoop oriented smart cities architecture [J]. *Sensors*, 2018, 18 (4): 1181.
- 21 郝维栋. 基于人工智能识别技术的智慧矿山可视化系统应用 [J]. *山东煤炭科技*, 2025, 43 (1): 158-162.
HAO Weidong. Application of smart mine visualization system based on artificial intelligence identification technology [J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2025, 43 (1): 158-162 (in Chinese).
- 22 赵慧广. 智慧矿山设备维修与管理技术在玉龙铜矿中的应用 [J]. *露天采矿技术*, 2025, 40 (1): 101-104.
ZHAO Huiguang. Application of intelligent mine equipment maintenance and management technology in Yulong copper mine [J]. *Opencast Mining Technology*, 2025, 40 (1): 101-104 (in Chinese).
- 23 YANG S, LIAN H, XU B, et al. Application of intelligent mine equipment maintenance and management technology in Yulong copper mine [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 871: 162056.
- 24 TEMKIN I, MYASKOV A, DERYABIN S, et al. Design of a digital 3D model of transport - technological environment of open-pit mines based on the common use of telemetric and geospatial information [J]. *Sensors*, 2021, 21 (18): 6277.
- 25 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.
DING Enjie, YU Xiao, XIA Bing, et al. Development of mine informatization and key technologies of intelligent mines [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47 (1): 564-578 (in Chinese).
- 26 张海. 5G 技术的研究现状及前景分析 [J]. *通讯世界*, 2016 (11): 64.
ZHANG Hai. Research status and prospect analysis of 5G technology [J]. *Telecom World*, 2016 (11): 64 (in Chinese).
- 27 王小东, 王存政, 王冲, 等. 浅谈 5G 技术在智慧矿山建设中的应用前景 [J]. *内蒙古煤炭经济*, 2020 (12): 168-169.
WANG Xiaodong, WANG Cunzheng, WANG Chong. A brief discussion on the application prospects of 5G technology in the construction of smart mines [J]. *Inner Mongolia Coal Economy*, 2020 (12): 168-169 (in Chinese).
- 28 GARCIA L G U, ALMEIDA E P L, BARBOSA V S B, et al. Mission-critical mobile broadband communications in open-pit mines [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54 (4): 62-69.
- 29 刘清. 基于超宽带技术的采煤机定位系统设计 [J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44 (11): 132-135.
LIU Qing. Design on positioning system of shearer based on ultra wide band technology [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44 (11): 132-135 (in Chinese).
- 30 赵红梅, 赵杰磊. 超宽带室内定位算法综述 [J]. *电信科学*, 2018, 34 (9): 130-142.
ZHAO Hongmei, ZHAO Jielei. An overview of ultra-wideband indoor positioning algorithms [J]. *Telecommunications Science*, 2018, 34 (9): 130-142 (in Chinese).
- 31 王旭强. 矿山物联网技术及其在智慧矿山建设中的应用分析 [J]. *科技资讯*, 2024, 22 (6): 30-32.
WANG Xuqiang. Analysis of the technology from the mine internet of things and its application in the construction of smart mines [J]. *Science & Technology Information*, 2024, 22 (6): 30-32 (in Chinese).
- 32 HUANG B. On the Application of big data and its intelligent processing technology in internet of things industry [C]// *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021, 1915 (4): 042002.

- 33 YAQOOB I, HASHEM I A T, GANI A, et al. Big data: From beginning to future [J]. *International Journal of Information Management*, 2016, 36(6): 1231-1247.
- 34 王雪峰,蒋鑫,俞进发,等.基于湖仓架构的智能矿山大数据融合共享平台设计与应用[J].*现代矿业*,2024,40(12):214-218.
WANG Xuefeng, JIANG Xin, YU Jinfa, et al. Design and application of big data fusion and sharing platform in intelligent mines based on lake Warehouse Architecture[J]. *Modern Mining*, 2024, 40(12):214-218(in Chinese).
- 35 孟云飞.大数据流式计算关键技术研究[J].*黑龙江科学*,2022,13(14):55-57.
MENG Yunfei. Study on key technologies of big data streaming computing[J]. *Heilongjiang Science*, 2022, 13(14):55-57(in Chinese).
- 36 王忠强,宋建鑫,余数三,等.基于依存句法分析的智慧矿山知识图谱构建方法[J].*矿业研究与开发*,2023,43(10):232-240.
WANG Zhongqiang, SONG Jianxin, YU Shusan, et al. A method of constructing knowledge graph of intelligent mines based on dependency syntax analysis [J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(10):232-240(in Chinese).
- 37 吴伟,杨以兵,王清,等.基于云计算的工业数字化转型研究[J].*科技与创新*,2023(24):26-28+31.
WU Wei, YANG Yibing, WANG Qing, et al. Research on industrial digital transformation based on cloud computing [J]. *Science and Technology & Innovation*, 2023(24):26-28+31(in Chinese).
- 38 黎冠,李志伟,陈浩,等.边缘计算在智慧矿山建设中的应用分析[J].*华北科技学院学报*,2024,21(1):1-11.
LI Guan, LI Zhiwei, CHEN Hao, et al. Application analysis of edge computing in smart mine construction [J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2024, 21(1):1-11(in Chinese).
- 39 DING C, ZHOU A, LIU Y, et al. A cloud-edge collaboration framework for cognitive service[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2020, 10(3):1489-1499.
- 40 NICKEL M, MURPHY K, TRESP V, et al. A review of relational machine learning for knowledge graphs[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2015, 104(1):11-33.
- 41 BALANIUK R, ISUPOVA O, REECE S. Mining and tailings dam detection in satellite imagery using deep learning[J]. *Sensors*, 2020, 20(23):6936.
- 42 HANCHETT E, LISTWON B. *Vue.js in Action*[M] // 1st ed. Shelter Island, NY: Manning Publications, 2019: 1-375.
- 43 GACKENHEIMER C. *Introduction to react*[M]// 1st ed. New York: Apress, 2015:1-128.
- 44 BAMPAKOS A, DEELEMEN P. *Learning Angular: A no-nonsense guide to building web applications with Angular 15*[M]// 4th ed. Birmingham: Packt Publishing Ltd, 023:1-446.
- 45 RZESZEWSKI M. *Mapbox*[M]//Evaluating participatory map software. Cham: Springer International Publishing, 2023:21-40.
- 46 FARKAS G. *Mastering OpenLayers 3* [M]// 1st ed. Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2016:1-288.
- 47 LI D, MEI H, SHEN Y, et al. ECharts: A declarative framework for rapid construction of web-based visualization [J]. *Visual Informatics*, 2018, 2(2): 136-146.
- 48 《企业观察家》编辑部.智慧矿山——未来的必由之路[J].*企业观察家*,2020(12):54-55.
Editorial Department of *Enterprise Observer*. Smart mining: The only way forward[J]. *Enterprise Observer*, 2020(12): 54-55(in Chinese).
- 49 陈翔宇.论VR技术与AR技术的未来发展[J].*科技创新与生产力*,2017,278(3):21-22+25.
CHEN Xiangyu. The future development of VR technology and AR technology[J]. *Sci-tech Innovation and Productivity*, 2017, 278(3): 21-22+25 (in Chinese).