

基于煤矿地理空间数据的三维透明矿山系统研究及应用

董振楠*

(陕西陕煤韩城矿业有限公司, 陕西 韩城 715400)

摘要: 为贯彻国家和陕煤集团智能化矿山建设要求,开展智能矿山管理系统研究工作。首先,基于地理空间数据建模技术与实景建模技术,构建井上下一体化的三维透明矿山空间模型;其次,基于工业物联网 4 层架构,利用 GIS 等算法服务和定位寻路等方法构建空间数据与应用的技术框架;最后,结合各矿实际业务需求,研发出三维透明矿山平台。该平台实现了地质信息透明化,为煤矿安全生产提供“可视、可查、可推演、可分析”的安全保障。研究成果为煤矿智能化矿井建设提供了新思路。

关键词: 地理信息系统;透明矿山;3DGIS;地质模型;数字孪生

中图分类号:P628;TD163

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2025)01-0063-07

Research and Application of Three-Dimensional Transparent Mining System Based on Coal Mine Geographical Space Data

DONG Zhennan

(Shaanxi Shaanmei Hancheng Mining Industry Co., Ltd., Hancheng 715400, China)

Abstract: In order to implement the national policies and Shaanxi Coal Group's requirements for intelligent mine construction, this paper conducts the researches on an intelligent mine management system. Firstly, it constructs a three-dimensional transparent mine spatial model based on the integration of geospatial data and real-life modeling. Secondly, based on the four layer architectures of the industrial internet of things, a technical framework for spatial data and applications is constructed by using algorithm services, such as GIS tools and routing-using location. Finally, a three-dimensional transparent mining platform is developed based on the actual business needs of various mines. This system research has achieved the transparency of geological information, providing a “visible, traceable, deductive, and analytical” security guarantee for coal mine safety production, and providing new ideas for the construction of intelligent coal mines, too.

Keywords: geographical information system; transparent mining; 3DGIS; geological model; digital twin

煤炭是我国的主体能源和基础产业^[1]。2020 年国家八部委联合发布《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》^[2],在以科技赋能传统行业的背景下提出智能化矿山的建设理念^[3]。智能化煤矿是将云计算、大数据、人工智能、物联网、虚拟现实、三维可视化与智能采矿等领域的理论方法^[4]进行深入融合,形成全面感知、实时互联、分析决策、自主学习、动态预测和协同控制的智能系统^[5],实现煤矿开拓、采掘(剥)、运输、通风、洗选、安全保障及经营管理等全过程的智能化运行。

2021 年 1 月 22 日,陕煤集团印发《陕西煤业股份有限公司关于加强煤矿智能化建设的实施意见》(陕西煤业发〔2021〕28 号),提出“智能生产、智能矿井、智慧矿区、智慧陕煤”的建设目标,建设煤炭行业高质量发

展标杆中心,创建企业发展服务大数据中心和行业信息数据共享平台,服务企业、辐射全国,打造行业标杆。

三维透明矿山平台作为智能矿山的主要表现形式,诸多学者提出了建设思路。谷保泽等^[6]提出透明化矿山的关键技术,认为要利用物探、钻探和地理信息等技术,基于地质资料建立高精度透明化三维地质模型;周丕基等^[7]通过研究三角化算法实现动态建立矿山、采空区和矿井巷道的三维模型,利用 Unity 引擎进行三维展示和浏览控制;邓勤等^[8]在三维矿山模型上集成人员定位、瓦斯监测和视频监控等多方面数据,实现矿山安全管理和应急救援路线模拟,开发矿山安全生产管理系统。但以上研究没有明确将物探、钻探等地理空间数据利用协同制图软件处理并统一存储,没有利用地理空间数据自动建模技术和实景建模技术来打造井上下一体化的透明化矿山,也没有融合自动化数据、监控数据、业务数据形成全矿的三维可视化应用。本文运用地理空间数据存储及自动建模技术,并将地理空间数据自动建模与实景建模进行融合,构建井上下一体化的三维透明矿山空间模型。该研究成果解决了煤矿地质数据动态展示和实时更新问题,并创新性地实现了全矿监控系统融合联动,对煤矿安全生产具有重要指导意义。

1 系统架构

三维透明矿山系统采用 PostgreSQL 库进行数据存储,采用 C#语言进行功能开发,通过 Unity 3D 进行模型可视化渲染。整体架构分为 4 层^[9],如图 1 所示。数据层提供关系性数据库,对平台需要的数据进行存储,包括地理空间数据、自动化数据、监测数据、业务数据。服务层提供平台支撑服务,包括数据综合服务、GIS 协同服务、时空位置服务、组态化服务。引擎层提供三维模型制作和渲染的工具,包括核心控制、定位寻路等。应用层提供可视化应用表达,包括数据模型展示、三维可视化、专业应用、采掘数字孪生。



图 1 三维透明矿山系统架构

2 系统关键技术

通过技术调研并与先进煤矿智能化建设厂家合作进行技术攻关,最终确定三维透明矿山平台应用技术路线,如图 2 所示。该系统以地理空间数据存储技术为基础,通过地质建模技术、实景建模技术、模型整合技术建立三维基础平台,利用数据采集技术将全矿多元异构数据进行融合,打造井上下一体化应用成果。

2.1 地理空间数据存储技术

建立煤矿空间对象数据标准,基于 PostgreSQL 开源框架封装研发地理空间数据库,实现对矿井地层、煤层、构造、巷道等各类空间对象的统一存储。基于 Auto CAD 底层接口二次开发,搭建数据协同平台,将各类空间数据进行可视化管理,实现各类对象的新增、删除、编辑、自动加载与定位等功能,并支持空间对象的自定义,如图 3 所示。基于数据协同平台,通过插值计算^[10]可以利用地理空间数据建立地质模型,并进行可视化表达以便指导生产,再把采掘活动产生的动态数据手动录入空间数据库,对地质模型进行动态实时更新。

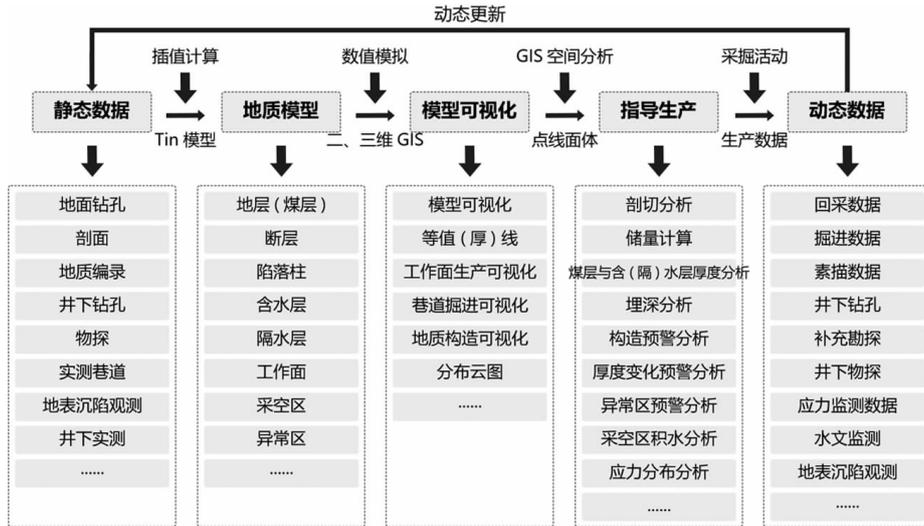


图 2 地理空间数据应用技术架构

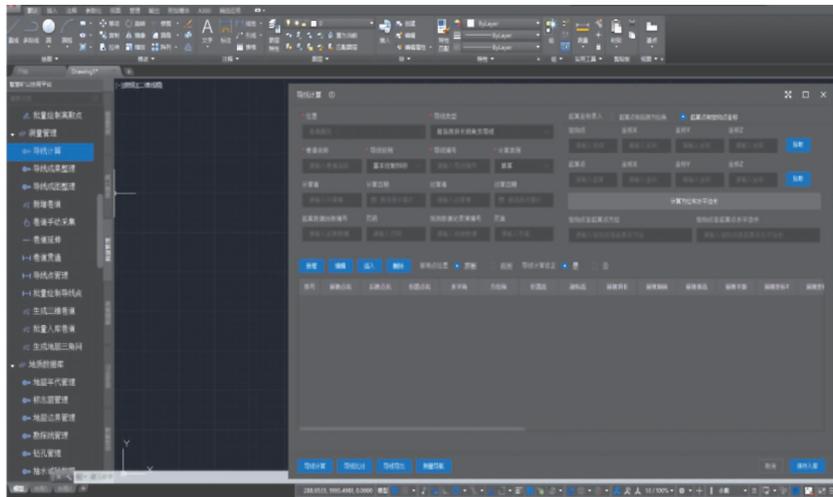


图 3 协同平台数据管理

2.2 地质建模技术

地质建模技术是将地质、测井、地球物理资料和各种解释结果或者概念模型进行综合分析,利用计算机图形技术,生成三维定量随机模型^[11],技术架构如图 4 所示。

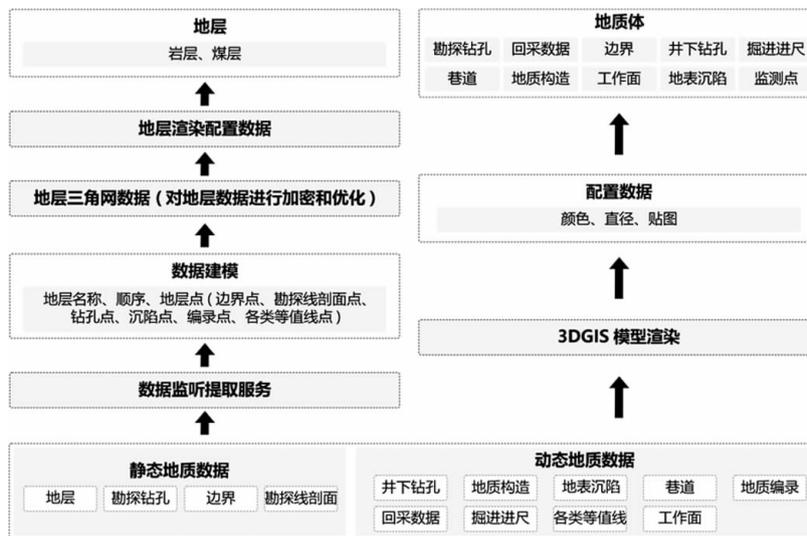


图 4 地质建模技术架构

采用不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN)建模技术,根据区域有限点集将区域划分为相等的三角网,数字高程由连续的三角面组成,三角面的形状和大小取决于不规则分布的测点的位置和密度,能够避免地形平坦时的数据冗余,又能按地形特征点表示数字高程特征。

地质模型根据不同应用场景和不同的视点位置需要不同的模型精度,因此本系统采用基于 TIN 的视相关动态多分辨率地形模型.基于不规则三角网的“回”结构分辨率的 LOD(Level of Detail)算法,真正实现离视点越近越清楚、越远越模糊的视觉效果,避免在模型简化过程中出现交叉、重叠和细长的三角形,煤层三角网如图 5 所示.该算法能实时动态生成不规则格网的连续多分辨率模型,实现地形场景的平滑绘制,同时具有较快的显示速度。

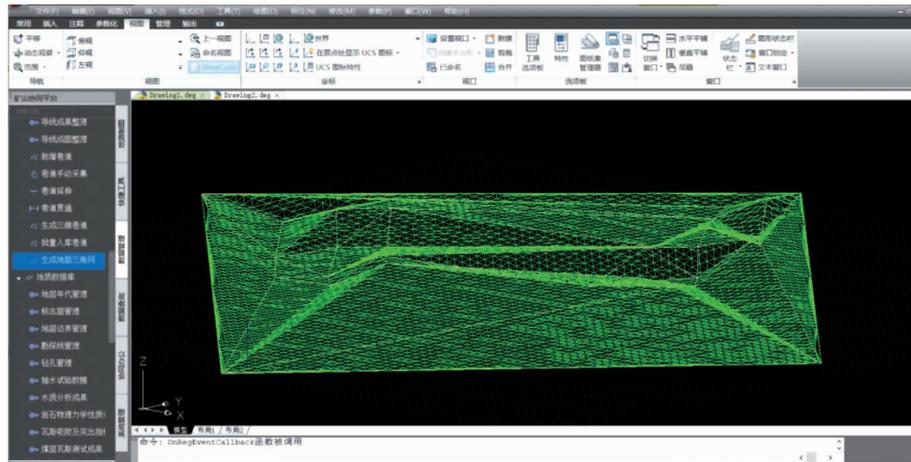


图 5 系统平台生成煤层三角网

2.3 实景建模技术

实景建模技术是利用摄影仪器和激光扫描等工具,通过对真实世界中的物体和自然环境进行采集和处理,创建出高精度的三维数字模型。

通过无人机及防爆相机对井上下场景拍摄获取实景图,结合 CAD 建筑布置矢量图,利用 3Dmax, MaYa 和 Blender 建模软件创建 1:1 的三维数字精细化模型.运用 Substance Painter 和 Photoshop 软件将 PBR 材质和纹理应用到模型表面,以增强细节真实感.最后使用 Unity 和 Unreal Engine 等渲染引擎将工业广场主要建筑物、道路、绿化及井下工作面、掘进面、变电所、水泵房等场景的数字模型呈现为高质量的三维场景模型。

2.4 模型整合技术

模型整合是指将多个场景合并为一个完整场景的技术.利用 3D GIS^[12] 和建筑信息模型 (Building Information Modeling, BIM) 把矿山地理空间数据与三维场景模型结合,通过 Unity 引擎进行可视化表达处理,构建数字孪生的三维可视化系统。

精细的建模和纹理是场景的基础,使用高质量的三维模型和纹理,可以增加场景的真实感和逼真度.将地质模型和实景模型资源导入到 Unity 中,包括贴图、音频、模型、动画等,在场景中对资源进行组织和安排,根据需求对资源的属性进行调整,以达到预期的效果.利用灯光效果与烘焙技术增强场景的视觉效果,并添加后处理效果,如景深、运动模糊、屏幕空间反射、阴影可视距离等,来改善场景的外观和可视化表达。

2.5 数据采集技术

研发智能采集网关实现各类子系统的数据采集.智能采集网关支持多种通讯协议,通过 OPC/PLC 方式与主提升、主通风等自动化系统通讯,实现系统的数据采集;通过 FTP, WebSocket 等方式实现与安全监控、人员定位等监测系统的数据采集;通过 WebAPI 接口方式实现业务类数据的采集.数据采集技术架构如图 6 所示。

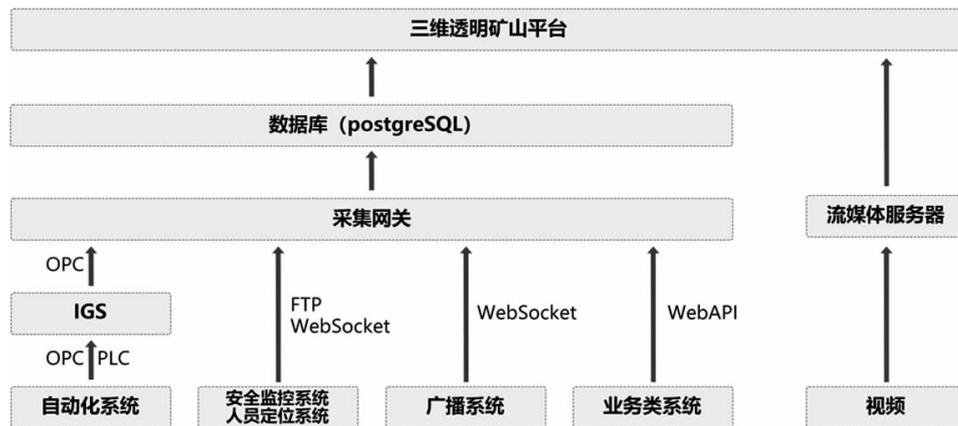


图 6 数据采集技术架构

3 应用

韩城矿业公司按照国家及陕煤集团煤矿智能化建设的要求,组织其属下的桑树坪煤矿、桑树坪二号井、下峪口煤矿和象山矿井等 4 家单位成立专项技术团队进行研讨,结合国内外先进案例,并从实际应用出发,确定了以地理空间数据为基础打造三维透明矿山的智能化矿井建设思路.公司与国内领先的煤矿智能化解决方案提供商开展合作,共同研发三维透明矿山平台系统,该系统从全矿井宏观和微观两个角度,分层次实时展现生产与安全综合动态工况.实现工业广场主要建筑物、道路和绿化的巡检及井下煤层、断层、巷道、钻孔、掘进和综采的动态信息管理.系统服务于煤矿的地测、采掘、通防、安全、机电、监测和调度等多个方面,在虚拟仿真环境中实现安全监测、人员定位、工业视频和综合自动化等实时数据与数字孪生模型的集成与交互,为煤矿安全生产管理提供有力保障.

3.1 井上下一体化巡检应用

设定巡检路线进行全矿井巡检漫游,如图 7 和图 8 所示.巡检地点包括煤矿地面工业广场、副井口、副井筒、水泵房、变电所、避难硐室、掘进工作面、采煤工作面、井上下煤流和装车站等全部重点场所.配有专业语音导航,能够让管理者详细了解每个场所的生产场景和实时信息.



图 7 三维巡检(井上)



图 8 三维巡检(井下)

3.2 三维空间信息综合应用

1) 三维地层剖切

三维高精度地质模型可进行任意剖切(如图 9 所示),通过剖切断面可直观展示地层产状及煤层分布情况,通过缩放定位局部位置(如工作面)可查看煤层厚度及变化趋势,三维地层剖切可为智能开采提供精确的地质数据.

2) 通风线路模拟

基于统一的 GIS 空间数据库,自动生成矿井三维通风系统,结合风速传感器、风量传感器、密闭和风门等实时数据,实现三维通风线路模拟,直观展现全矿井通风情况.如图 10 所示.

3) 危险源三维预警

通过高精度地质模型和巷道模型,动态计算掘进头到危险源的垂直距离,实时预测灾害发生的概率并

做出预警报警提醒.如图 11 所示.

4) 避灾线路模拟

基于三维巷道空间关系自动生成矿井避灾线路,方便井下人员找到最优逃生通道及时升井.如图 12 所示.

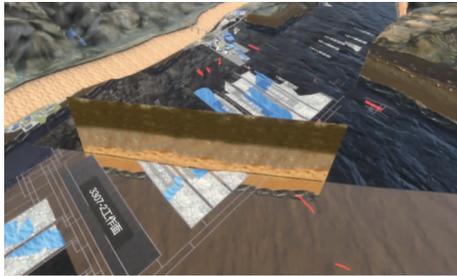


图 9 三维地层剖切

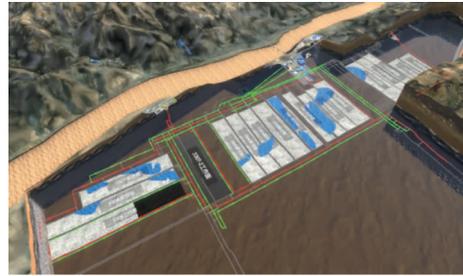


图 10 通风线路模拟

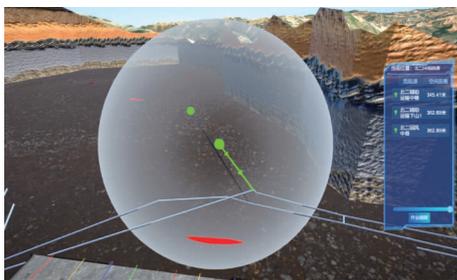


图 11 危险源三维预警

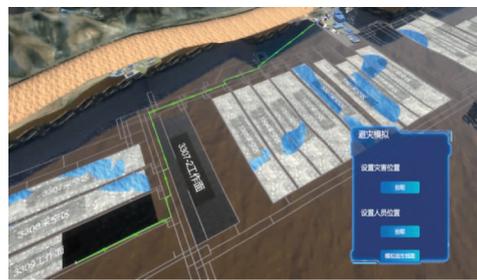


图 12 避灾线路模拟

3.3 安全生产动态工况应用

1) 井下环境监测

将井下环境气体、防治水、束管、光纤测温、顶板压力和顶板离层等监测系统数据与三维模型进行融合,并通过热力图实时分析系统监测状态,反映全矿生产环境的安全状态.如图 13 所示.

2) 设备自动化监控

在虚拟仿真环境中查看各种设备的工作情况,如图 14 所示.从平台三维模型库中可自由选择^[13]需查看的设备,实时了解该设备的自动化监测数据,直观了解设备的健康状况,及时预测故障发生的可能性,为安全生产保驾护航.

3) 井下人员实时定位

在虚拟仿真环境中实时显示井下人员总数及不同区域人员分布情况,如图 15 所示.实时定位人员所处位置,显示其下井时间及时长,还可对其下井历史轨迹进行回放.全面掌控井下人员状况,出现超员和下井超时等情况自动报警,保障井下人员安全.

4) 工业视频监控

将井上下各地点的视频进行集成并在虚拟仿真环境中播放,如图 16 所示.可实时查看生产场所的画面,支持对监控视频回放,方便用户对历史生产场景的查询和问题追溯.



图 13 环境实时监测



图 14 自动化设备监控

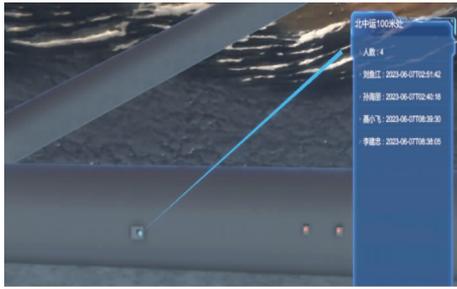


图15 井下人员实时定位

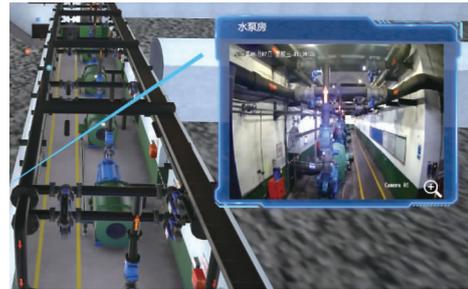


图16 工业视频监控

该系统通过融合地质空间数据与应用数据,打破煤矿各子系统间的数据壁垒,基于三维可视化场景实现自动巡检、实时监控、在线分析及预警联动,成功构建了动态可视的透明化三维矿山模型,并形成了“地质-工程双驱动”预警模式。目前该平台系统已在韩城矿业公司下属的桑树坪煤矿、桑树坪二号井、下峪口煤矿和象山矿井中推广应用,大大提升了巡检效率,降低了管理成本。

4 结论

1) 地理空间数据存储及空间数据自动建模技术解决了地质空间数据实时更新的问题,为矿山透明化研究提供了新思路;融合地质、环境、设备等数据的煤矿多模态数据融合决策模型为煤矿智能开采提供辅助决策。

2) 相较于现有矿山数字平台,本系统实现了地质体属性参数与工程动态数据的实时双向耦合,提出的“地质-工程双驱动”预警模式,在韩城4个矿井成功应用,可降低地质开采风险率37%~42%。实践验证该系统具有很好的应用效果,可以推广应用到金属矿山等领域。

参考文献:

- [1] 张立宽,武强.新中国70年煤炭工业铸就十大辉煌[J].中国能源,2019,41(10):4-8.
- [2] 郭昌放,杨真,武祥,等.透明矿山建设与推进的思考[J].中国煤炭,2021,47(1):83-92.
- [3] 谭章禄,吴琦.智慧矿山理论与关键技术探析[J].中国煤炭,2019,45(10):30-40.
- [4] 吴群英,蒋林,王国法,等.智慧矿山顶层架构设计及其关键技术[J].煤炭科学技术,2020,48(7):80-91.
- [5] 陈晓晶,何敏.智慧矿山建设架构体系及其关键技术[J].煤炭科学技术,2018,46(2):208-212.
- [6] 谷保泽,邱少杰.透明化矿山建设关键技术探讨[J].工矿自动化,2021,47(增刊1):24-25.
- [7] 周丕基,廖传艺,杨帮礼,等.基于Unity引擎的矿山三维空间辅助管理系统开发[J].测绘与空间地理信息,2023,46(4):155-157.
- [8] 邓勤,张金花,靳旭.基于实景三维的矿山安全生产管理系统的设计与实现[J].测绘,2017,40(5):228-230.
- [9] 黄智煌,邬娜,仇巍巍.基于3D GIS和物联网的智慧矿山三维可视化系统设计及实现[J].自然资源信息化,2022(2):50-56.
- [10] 徐丽娜.三维可视化物探技术在矿山地质勘查中的应用[J].世界有色金属,2023(1):127-129.
- [11] 张平松,李洁,李圣林,等.三维地质建模在煤矿地质可视化中的应用分析[J].科学技术与工程,2022,22(5):1725-1740.
- [12] 冀念芬,王成志,令紫娟.基于3D GIS的绿色矿山三维管控平台建设方案探讨[J].石材,2023(11):10-12.
- [13] 张靖.智能矿山综合管控平台的三维模型界面设计及应用[J].煤田地质与勘探,2023,51(6):85-91.