

基于多源数据集成与WebGIS的三维矿山空间数据管理系统关键技术及应用

陈根深^{1,2,3,4}, 刘刚^{1,2,3,4}, 陈麒玉^{1,2,3}, 赵力行⁴, 向世泽⁴, 罗庆^{1,2,3}, 张俊杰^{1,2,3}

(1. 中国地质大学计算机学院; 2. 智能地学信息处理湖北省实验室;
3. 生物地质与环境地质国家重点实验室; 4. 武汉地大坤迪科技有限公司, 湖北武汉430074)

摘要: 基于地质、物探、钻探、采掘和测量等多领域数字化信息的矿山生产, 面临着空间数据集成与管理困难等重要挑战。为此, 提出一种基于多源数据集成与WebGIS的三维矿山空间数据管理系统, 其核心是利用地质、物探、钻探等数字化信息为支撑来构建统一的综合地质信息数据库, 以实现空间数据、属性数据、模型数据以及时态数据的存储、转换、管理、查询、分析与可视化等功能。在实际应用中, 通过整合三维实景模型、地质模型与地震数据模型, 在此基础上融合多个系统形成的矿山生产管控数据, 实现矿产资源勘探过程中地质信息的高效管理和数据共享, 从而为矿山生产的决策与操作提供有力的技术支持。

关键词: 多源数据集成; 数字矿山; WebGIS; 三维可视化

DOI: 10.11907/rjdk.231777

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号: TP311.13

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2023)011-0018-11

Key Technologies and Applications of 3D Spatial Data Management System for Mining Based on Multi-Source Data Integration and WebGIS

CHEN Genshen^{1,2,3,4}, LIU Gang^{1,2,3,4}, CHEN Qiyu^{1,2,3}, ZHAO Lixing⁴, XIANG Shize⁴, LUO Qing^{1,2,3}, ZHANG Junjie^{1,2,3}

(1. School of Computer Science, China University of Geosciences; 2. Hubei Key Laboratory of Intelligent Geo-Information Processing, China University of Geosciences; 3. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology;
4. Wuhan Didakundi Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: Mining production processes, comprising different fields such as geology, geophysics, drilling, exploration, and geomatics, confronts with significant challenges in terms of spatial data integration and management complexities. Therefore, this paper introduces a 3D spatial mining management system based on multi-source data integration and WebGIS, in which digital information derived from geology, geophysics and drilling is mainly used to support establishment of unified comprehensive geological information database so that restoration, transformation, management, querying, analysis, and visualization of spatial data, attribute information, model objects, and temporal data. In practical application, according to integrating 3D reality models, geological models, seismic data models and multiple systems data fusion to form a comprehensive mining production framework. This framework efficiently manages and share geological information during mineral exploration, thereby providing robust technological support for mining production decision-making.

Key Words: multi-source data integration; digital mine; WebGIS; three-dimensional visualization

0 引言

数字矿山的概念源于数字地球和数字城市, 是信息技

术应用与地质矿产领域的重要实践^[1-3]。其目标是将矿山的各种信息, 包括地质、工程、生产、经济、环境等信息进行数字化、网络化、可视化处理, 从而实现矿山的精细化、智能化管理^[4-8]。数字矿山既然是矿山信息化的产物, 其产

收稿日期: 2023-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1711267, 41942039, 42172333); 贵州省科技战略勘探项目([2022]ZD003); 武汉市曙光计划项目(2022010801020206)

作者简介: 陈根深(1993-), 男, 中国地质大学(武汉)计算机学院博士研究生, 研究方向为地学大数据; 刘刚(1967-), 男, 博士, 中国地质大学(武汉)计算机学院教授、博士生导师, 研究方向为地学大数据、智能地学信息处理、可视化与可视分析、三维地理信息系统。本文通讯作者: 刘刚。

生、发展和运行必然受到矿山系统本身信息运动客观机理的制约。在矿山系统中, 矿地质体(矿床、矿体和矿石)是最核心的信息^[9]。然而, 矿山生产涉及多种不同来源和格式的数据, 给数据的综合集成与利用带来了重大挑战。具体而言, 来自地质测量、物探、钻探、采掘等不同来源数据的集成与融合分析通常复杂且繁琐, 数据在结构、格式和协议等方面存在差异, 难以协调, 导致了信息孤岛问题。为了支持矿山生产过程中海量空间数据的实时可视化与交互分析, 尤其是三维地质模型数据, 其复杂性和多样性给可视化表达带来挑战, 在实时可视化的情境下, 跨尺度的信息表示需要在保持高效渲染和流畅交互的前提下, 将地质构造和资源分布呈现在同一界面中。

本文专注于解决开发三维矿山空间数据管理系统时所面临的两个关键问题: 矿山多源数据集成和三维地质模型的可视分析与交互。

矿山生产是一个复杂的过程, 涵盖了地质勘探、物探、钻探、采掘和测量等多个环节。地质勘探阶段获取的地质构造、地层分布和矿产赋存等信息, 通过物探与钻探手段获取的地层数据和岩性数据、采掘过程中收集到的矿体分布和品位等数据, 以及测量环节产生的矿山地理信息和矿体变化等数据对于了解矿山地质特征至关重要, 为矿山的实时监测与资源管理提供了关键支持。然而, 由于这些数据来自不同环节、不同设备和传感器, 常常以文本、图像、视频、传感器读数等不同格式存在, 甚至存储在各自独立的数据库中。这种异构性和分散性导致数据难以进行统一的处理与利用, 数据之间缺乏连接和交互性, 形成了“数据孤岛”。这种数据的隔离使得人们在整个数据集中难以获得全面的洞察力, 导致决策的不准确和资源浪费, 同时增加了数据管理的复杂性, 使得矿山生产过程中的数据分析和决策规划变得困难且低效。因此, 解决多源数据集成的挑战显得尤为迫切。通过标准化数据格式以及建立统一的数据模型, 不仅有助于消除数据的异构性, 而且能促使数据在不同环节之间实现有机的关联。

三维地质模型涉及大量的复杂数据和结构, 会导致数据加载和渲染性能方面的问题。当前网络 GIS 难以有效应对这种大规模数据, 导致页面加载缓慢, 甚至可能导致崩溃。在模型需要进行实时更新、拾取和剖面分析等操作时, 实时交互受到性能限制和延迟影响, 严重影响用户的使用体验。针对复杂的地质模型, 现有产品在展现细节和真实感方面存在不足, 很难准确呈现地层、岩性、断层等微观细节, 从而限制了用户对地质结构的深入理解。同时, 由于地质数据的多样性和异构性, 数据集成和模型构建变得更复杂, 因此需要解决数据来源不一致和格式不统一等问题。通过三维可视化集成建立统一的矿山地质数据模型和标准, 可打通不同部门或机构之间数据访问与信息共享的通道, 提升矿山的管理效率和决策的准确性。

为此, 本文提出一套三维矿山空间数据管理系统, 通

过多源数据集成和三维地质模型快速渲染等技术实现三维矿山空间数据的集成管理与高效的可视化交互。本文的贡献包括:

(1) 基于 MRM 存储架构, 结合关系型数据库、内存数据库和对象存储服务, 实现多源数据的解析、转换和一体化处理。构建统一的综合地质信息数据库, 有效应对海量空间数据存储与处理的挑战, 为系统提供了高性能、可扩展的数据存储与处理能力。

(2) 提出一种省域级多尺度三维地质体模型渲染方法, 通过构建八叉树索引, 采用多级缓存策略, 实现大规模三维地质模型的流畅加载和高效可视化渲染, 从而提升三维模型的渲染速度和用户交互体验。

在此基础上, 研发基于多源数据集成与 WebGIS 的三维矿山空间数据管理系统。通过四层架构的设计, 实现系统的高效集成、综合管理和可视化分析。通过 MRM 存储架构的运用, 为系统提供稳定、可靠的数据存储和处理能力。此外, 通过基于二三维一体化的客户端可视化技术架构, 应对地质数据可视化的挑战, 为用户提供先进且可靠的数据展示与交互分析工具。

1 相关研究

本文工作围绕三维矿山空间信息管理系统建设展开研究, 涵盖了矿山信息系统的理论、方法和关键技术, 主要涉及多源数据集成、存储、管理和可视化等领域。

近年来, 在矿山数据管理系统和三维可视化技术的研究与开发方面取得了许多重要进展^[10]。为应对矿山领域数据集成、可视化和交互分析的挑战, 许多学者开展了大量理论与系统研发实践^[11-13]。卢新明等^[14]针对地质体几何计算和地质灾害预报两个关键问题, 总结凝练了构造地质、煤层地质、地质力学、地质扰动、瓦斯地质、水文地质、透明地质共 7 项云计算技术; 李鹏等^[15]针对煤矿地质保障系统开发面临数据来源多样、地质监测系统集成开发语言不统一等问题, 提出基于微服务的地质保障系统架构与应用; 马丽等^[16]以小保当煤矿地质信息的精细解释为基础, 提出基于精细勘查的煤矿地质保障信息系统, 实现了地质信息动态管理和地质灾害预警体系; 苗彦平等^[17]设计红柳林煤矿地质保障软件系统, 其具备地质信息管理、高精度建模、灾害预测预警等功能, 但仍面临三维地质模型精度不足和地质透明化难度大等挑战。在智能煤矿地质保障系统建设的浪潮中, 左书豪^[18]总结了智能煤矿地质保障系统必须解决的包括多元数据融合分析、复杂地质建模和海量三维数据管理与服务等 8 项关键问题; 张新^[19]针对智慧矿山的需求, 提出大数据应用平台的基本方案。针对我国智慧矿山建设过程中存在的多系统、数据难以有效整合的问题, 张绍周等^[20]研发了智慧矿山三维可视化管理系统, 实现了矿山数据实时图形可视化、场景化以及实时交

互等功能;苏玲慧^[21]针对当前国内外计算机编制生产计划难以适应地浸式开采实际生产过程中复杂的矿山现状,提出基于WebGL的地浸矿山生产计划管理系统。矿山数据集成和综合利用是矿山建设朝着数字化、智能化、智慧化方向发展的重要前提。基于Web的矿山数据管理系统提供了综合的解决方案,以数字化、网络化和可视化的方式实现了对矿山业务中地质、工程、生产、经济和环境等各类数据的管理与综合分析。

矿山的地质结构通常非常复杂,包括矿床、矿体、断层等,具有多维特征,如何准确地表达和可视化这些复杂的地质结构是一个挑战。鲍成霞^[22]论述了GIS在矿山地质测绘中的优势,从不同角度阐述其在矿山地质测绘中的应用要点;郭向前等^[23]提出基于3DGIS的可视化矿山平台,通过虚拟可视化技术展现可视化的矿山,并实现多部门、多专业、多层面的空间业务数据集成与应用;温瑞恒等^[24]针对矿山企业内部系统间出现信息孤岛、业务隔离、数据价值挖掘受限等问题,提出矿山一体化智能管控系统的建设方案,通过应用工业控制、信息网络、数字孪生等先进技术,建立矿山一体化智能管控系统,可有效解决矿山内部的信息孤岛问题;Szujó等^[25]指出采矿活动中缺乏一种能够整合多源数据、跨平台运行且用户不需要GIS知识的软件,并提出了一款面向采矿业服务的二三维Web应用程序MaGISter-mine,该应用程序适用范围广、系统框架灵活可定制,但存在定制化需要额外资源以及兼容性等方面的挑战。

综合前述研究,针对矿山地质结构的复杂性和多维特征,研究者采用GIS技术、虚拟可视化技术等,根据智能管控系统建设方案提出了一系列方法,以准确表达与可视化矿山的地质结构。尽管目前在矿山数据管理系统和三维可视化技术方面已取得了重要进展,但仍然存在一些问题需要解决。首先,在多源数据集成方面,虽然研究者提出了多种解决数据异构性的方法,但在实际应用中,数据标准化和统一数据模型可能面临挑战。此外,由于一些矿山环节采用了不同的系统和技术,导致数据整合变得复杂且耗时。在三维可视化与交互分析领域,虽然已有多种方法和系统用于准确呈现复杂的矿山地质结构,但仍然存在技术挑战。例如,如何更好地表达多维特征的地质结构,以及如何实现高度逼真的三维可视化效果,需要进一步深入研究。此外,一些系统可能面临数据孤岛和业务隔离等问题,因此需要更深度的整合和三维可视化管控方案来解决此问题。目前,国外基于WebGIS的产品如MapXtreme、ArcIMS和WebMap可提供强大的地理分析和可视化能力,但可能需要较高的学习成本和硬件投入成本。国内相关产品包括SuperMap iClient3D、GeoSurf、MapWEB和MapEngine,其中SuperMap IS具有丰富的功能以及较高的市场份额,GeoSurf注重地球科学领域,MapWEB和MapEngine着重于用户体验。在实际应用中,经常需要解决功能定制性

不足以及与特定数据格式的兼容性问题,部分产品对复杂地质结构的表达能力有限,难以准确展示多维特征的地质结构。

针对矿山多源数据存在的信息孤岛问题以及矿山数据三维可视化的实际需求,本文提出一种基于多源数据集成与WebGIS的三维矿山空间数据管理系统。首先,以地质、物探、钻探、采掘和测量等数字化信息为支撑,基于MRM(MySQL-Redis-MinIO)存储框架构建一个综合数据库,将地质勘探和调查数据、断层和地层数据、矿床和矿石数据等以空间数据的形式存储,同时建立多种类型数据的元数据,主要包括空间坐标、三维几何信息和属性特征等关键信息。其次,通过解析与处理不同数据源的数据进行格式转换,并统一空间坐标,以实现多源数据的集成管理;通过运用先进的三维可视化技术,以将地质、空间和环境数据以立体的方式呈现;探索实时计算与交互分析技术,研发支持用户实时查询、计算和分析矿山数据的功能,提供全面的地质信息管理、可视化展示和数据分析功能,为矿山企业提供决策支持和数据探索的能力。之后,针对系统建设的实际需求设计系统总体架构,在此基础上开展系统服务端和客户端的技术架构设计,以满足系统的功能要求和性能需求。最后,根据某矿山的不同类型数据,研发基于多源数据集成与WebGIS的三维矿山空间数据管理系统,并开展各类数据的管理与可视化应用,以实现矿山地质数据的集成、管理和可视化分析,为矿山行业的决策与开发提供技术支撑。

2 基于多源数据集成与WebGIS的三维矿山空间数据管理系统

2.1 系统总体架构设计

系统总体架构分为基础运行环境、存储层、应用层和展示层,如图1所示。运行环境主要包括Java应用程序开发基础平台和Tomcat9服务器, Tomcat是一个跨平台的Web服务器,可在Windows和Linux操作系统上运行。

存储层采用MRM(MySQL-Redis-MinIO)存储架构,该架构常用于构建可扩展、高性能的应用程序。MySQL是一款广泛应用于数据存储和检索的开源关系型数据库,以可靠的数据持久性、支持ACID(原子性、一致性、隔离性和持久性)事务以及强大的查询功能而闻名。MySQL在存储地质信息数据、矿石属性信息、空间对象的元数据等结构化数据方面发挥着重要作用。Redis是基于键值存储的内存数据库,支持字符串、哈希、集合等多种数据结构,具有极快的读写速度,用于缓存常用数据、消息队列和实时统计信息等。MinIO是开源对象存储服务器,常用于在分布式环境中存储和索引大型非结构化对象,在系统中存储地质图像、地质图件、三维模型以及处理大规模的文件数据。

应用层主要包括系统权限管理、地质数据管理和空间分析三大功能模块。在权限管理模块中,主要功能包括用

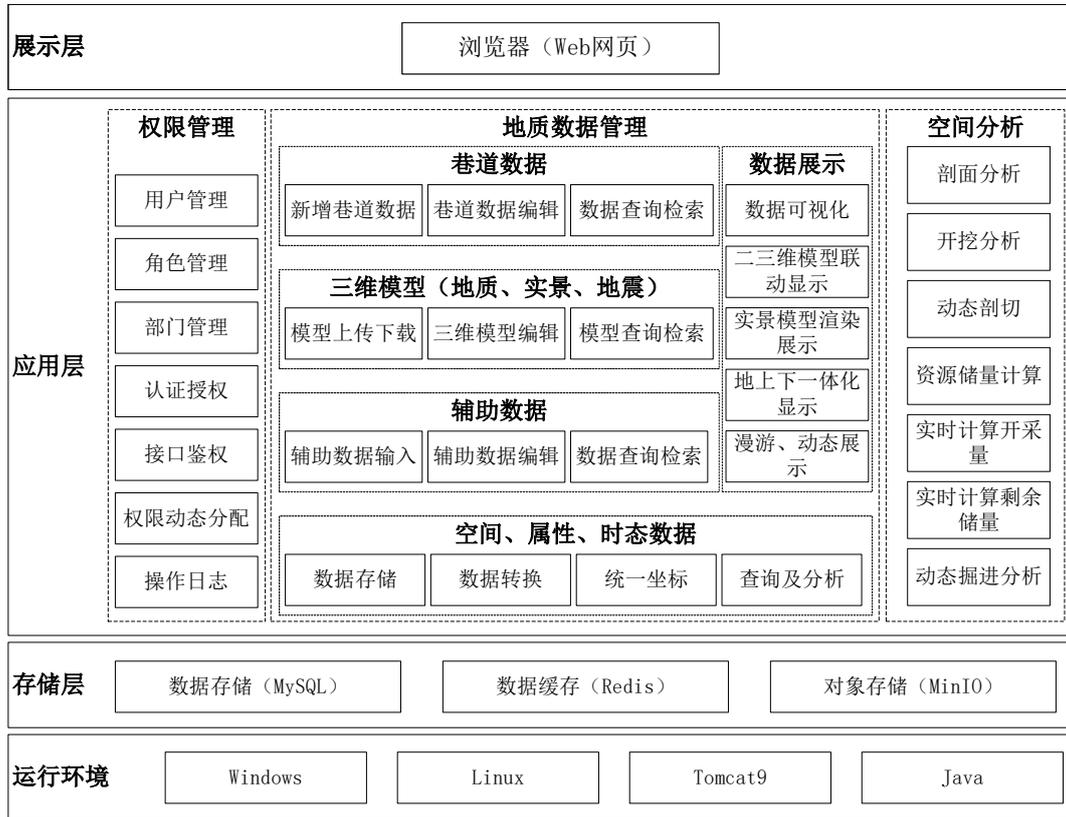


Fig. 1 System overall architecture

图1 系统总体架构

户管理、角色管理、认证授权、接口鉴权、系统操作日志和单位部门管理,以实现交互监管、权限动态分配等系统安全需求。地质数据管理模块用于满足矿产开采过程中的各种数据管理需求,主要功能包括巷道数据管理、三维模型管理、辅助数据管理、空间数据管理以及属性数据和时态数据管理等,实现对矿山各类地质数据的集成管理。在此基础上,实现数据可视化、二三维联动、实景模型渲染、地上一体化展示和漫游及动态展示等功能,可进行全面、直观的矿山地质数据展示和分析,支持决策和规划工作。空间分析模块主要包括剖面分析、开挖分析、动态剖切、资源储量计算、开采量与剩余储量实时计算以及动态掘进分析等功能,可准确地进行地质信息和开采数据分析,支持资源评估、矿山规划等方面工作。

展示层是基于浏览器的 Web 网页,通过 HTML、CSSS 和 JavaScript 等前端技术,结合现代先进的 Web 技术框架实现地图、三维模型和图表等元素的渲染和交互功能。

该系统架构实现了矿山多源数据的高效集成和综合管理,有效消除了不同数据格式与来源之间的障碍,从而解决了信息孤岛问题。同时,采用 MRM 存储架构的综合方案,以应对海量数据处理的挑战,为用户提供了强大且可扩展的数据存储和处理能力。此架构具备极强的可定制性和可扩展性,能够满足不同矿山运营的独特需求。通过先进的 Web 技术,实现了地图、三维模型和图表等可视化和交互功能,同时整合了资源储量计算和开挖分析等功

能,为矿山规划与决策提供了有力支持。

2.2 面向多源地质数据管理的服务端技术架构

服务端采用多种技术和框架作为系统各层次功能的支撑,主要分为数据存储层、数据交互层、应用层,如图 2 所示。在系统构建过程中,使用 Maven 进行项目依赖管理,通过 GitLab 提供安全可控的代码管理和协同开发环境,对项目代码进行版本管理。采用 Nginx 技术进行反向代理和负载均衡,反向代理解决系统前后端跨域的问题,确保请求能够正确到达后端服务。同时通过 Nginx 将请求分发到多个后端服务器上,以减轻单个服务器的压力,提高系统的稳定性。

数据存储层采用 MRM 存储架构,利用 MySQL 进行数据存储,同时利用 Redis 缓存技术对验证码、热点数据等进行缓存,以提升数据访问速度。选择 MinIO 作为分布式对象存储系统,其分布式架构提供了高可用性和可扩展性。MinIO 兼容 Amazon S3 协议,意味着其可以与许多支持 S3 的应用程序和工具进行集成。这种兼容性使得迁移现有 S3 应用程序到 MinIO 变得非常容易。借助此特性,可实现对文件的上传、下载和访问。

数据交互层主要负责处理数据的访问与交互,通过集成 Mybatis Plus 作为 ORM(对象关系映射)工具,简化数据访问层的代码编写,实现对数据库的访问和操作,同时采用 Spring 集成 Redis 的 Spring Data 框架,简化对 Redis 缓存的操作。

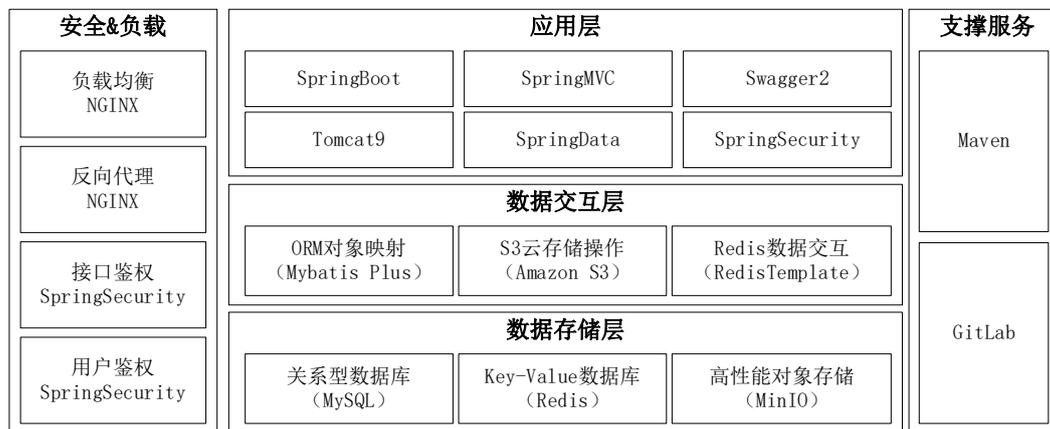


Fig. 2 Server-side technical architecture for multi-source geological data management

图2 面向多源地质数据管理的服务端技术架构

在应用层使用SpringBoot搭建系统框架,这是由Pivotal团队提供的基于Spring的快速配置框架。SpringBoot的主要优势在于其简化了开发人员的配置工作,使得开发过程更加高效、便捷。SpringBoot集成了众多流行的开发框架,可避免繁琐的配置,快速构建Spring项目。其中, SpringMVC负责处理系统的请求和响应,提供了强大的Web应用程序支持,使得开发RESTful API变得更加容易。Swagger2是一个开源框架,用于设计、构建和文档化可扩展的RESTful Web服务。其不仅提供了一套强大的工具和规范,而且简化了API的定义、测试和使用过程。通过Swagger2,开发人员能够更轻松地创建并记录API,同时能够为团队和其他开发者提供清晰而易于理解的API文档。

通过层次分明的技术架构支持,包括数据存储层、数据交互层和应用层,以及多种先进技术与框架的融合应用,为地质数据管理提供了可靠的技术基础。

2.3 基于二三维一体化的客户端可视化技术架构

针对传统的二维地图在呈现地质数据时存在局限性,无法提供足够的空间感和深度信息的问题,提出一种基于二三维一体化的客户端可视化技术架构,如图3所示。通过B/S结构的设计,充分利用现代前端工具如Vite、Axios和Fetch API,构建了高效的数据交互机制。在架构中,数据层使用Redux Toolkit管理状态,集成MinIO提供高效的数据服务,同时采用数据流框架异步进行数据传输与处理。在视图层,集成UI组件库和各种渲染技术,通过3D网格拾取以及几何布尔运算实现复杂交互,同时利用3D渲染和可视化技术进行地形渲染、模型渲染以及光照等效果的处理。该技术架构为直观展示和深入分析地质信息提供了先进且可靠的解决方案。

在项目构建阶段,在开发方面,定义标准的代码规范,保持代码风格的一致性,是保障系统开发过程中代码质量与可维护性的关键;搭建开发服务器vite-dev-server,实时监听文件的变化,提供热重载和模块热替换功能,便于实时查看和调试代码,快速预览和测试应用程序的效果;系统客户端采用现代化前端构建工具Vite进行构建,Vite可

快速地进行冷启动,并具有高效的开发流程,使得构建和部署应用程序变得更加便捷、高效。配置文件在项目起着重要作用,通过在vite.config.js配置文件中设定构建目标、插件配置等参数,可更好地定制与管理项目的构建和开发流程。该阶段为系统的高效和可靠开发奠定了基础。在生产优化方面,通过压缩和缓存等技术减少静态资源的文件大小,对图片和字体等静态资源进行优化,并配置缓存策略以减少网络请求,提高网页加载速度和性能;通过动态导入和异步加载等技术将代码分割成独立的模块,根据页面的需求进行按需加载,减少不必要的资源请求,提高页面的初始加载速度;针对不同浏览器对CSS规范的支持程度不同导致的兼容问题,使用PostCSS工具对CSS进行后处理,自动添加浏览器前缀,从而实现跨浏览器的兼容性。

在网络层,Axios-http是基于Promise的HTTP客户端库,具有跨浏览器的兼容性,并支持自定义请求头、请求参数和响应处理。Fetch API是浏览器内置的现代化网络请求API,提供了一种更简单、强大的方式来发送和处理HTTP请求。HTTP拦截器是在发送HTTP请求和接收HTTP响应的过程中,对请求和响应进行预处理和后处理的机制。在发送HTTP请求前,动态地在请求头中添加认证信息、token和时间戳等参数,便于后端进行验证和授权。在接收HTTP响应后,对响应数据进行解析、转换或过滤,以便适应前端的需求。

在数据层,采用Redux Toolkit以高效管理应用程序的状态。通过Redux Toolkit,能够定义、组织和更新不同组件之间共享的状态,而无需编写大量的重复性代码。此外,将MinIO集成到数据层中,用于存储和检索大规模的三维数据,以提供高效的数据服务。数据的传输和处理是通过数据流框架实现的,意味着数据的加载和处理可以异步进行。通过数据流框架可更灵活地管理数据的传输和处理流程,以确保数据能够在需要时被高效地加载和处理。

在视图层,集成UI组件库,通过UI样式和CSS库定义界面的外观样式与布局,为系统界面提供统一的界面风格



Fig. 3 Client-side visualization technology architecture based on 2D-3D integration

图3 基于二三维一体化的客户端可视化技术架构

和交互效果;利用UI组件主题定制系统主题,使UI界面符合系统的整体设计风格;在交互操作或系统状态变化时,向用户提供弹窗提示以及动画、消息等相应的反馈信息;在三维场景中通过3D网格拾取技术,按照交互或程序逻辑对三维网格进行选择和操作,并对三维网格模型进行几何布尔运算,生成复杂的形状和拓扑变化,用于矿体体积计算、模型剖切等操作;通过集成各种渲染技术和图形处理库,如WebGL、Three.js等,对网格模型的光照、阴影、透明度、材质纹理等方面进行处理,使模型更加逼真,且具有层次感;采用3D渲染和可视化技术实现地形渲染、模型渲染、纹理贴图以及光照效果和动画效果等,使用户能够以直观的方式浏览和分析地质信息。

3 关键技术与方法

3.1 多源数据集成方法

多源数据集成是指通过运用不同数据工具,将不同来源的数据源集成到平台或系统内,成为所用平台或系统能够识别的数据形式。由于数据在采集过程中具有明显差

异,导致数据源形式不一,需对此类多源数据进行集成处理。矿山地质多源数据集成处理的具体流程如图4所示。

首先,对不同数据源的数据进行解析与处理,通过分析数据格式、结构和编码方式,使用适当的解析方法和算法来解析数据。数据解析主要应用巷道和测井数据的处理过程,测井数据在解析过程中需要加入深度和斜率进行实时计算,最终还原测井的最终形态。其次,通过数据格式转换、数据模型映射或数据编码转换对不同格式的数据进行转换,使其能够在统一的数据存储系统中进行统一管理与分析。之后,统一空间所有对象的空间坐标,确保不同数据源的空间坐标在统一的坐标参考系统下具有一致性,通过确定统一的坐标参考系统进行坐标转换与数据对齐,使得空间对象能够进行无缝集成和一体化分析。最后,通过数据导入接口将解析、转换与统一空间坐标后的数据按类别存储到MinIO和MySQL中。其中,MinIO用于存储激光点云数据、三维地质模型数据等非结构化数据,通过数据接口提供可扩展的对象存储和快速访问功能;MySQL用于存储巷道数据、测井数据及其属性信息等结构

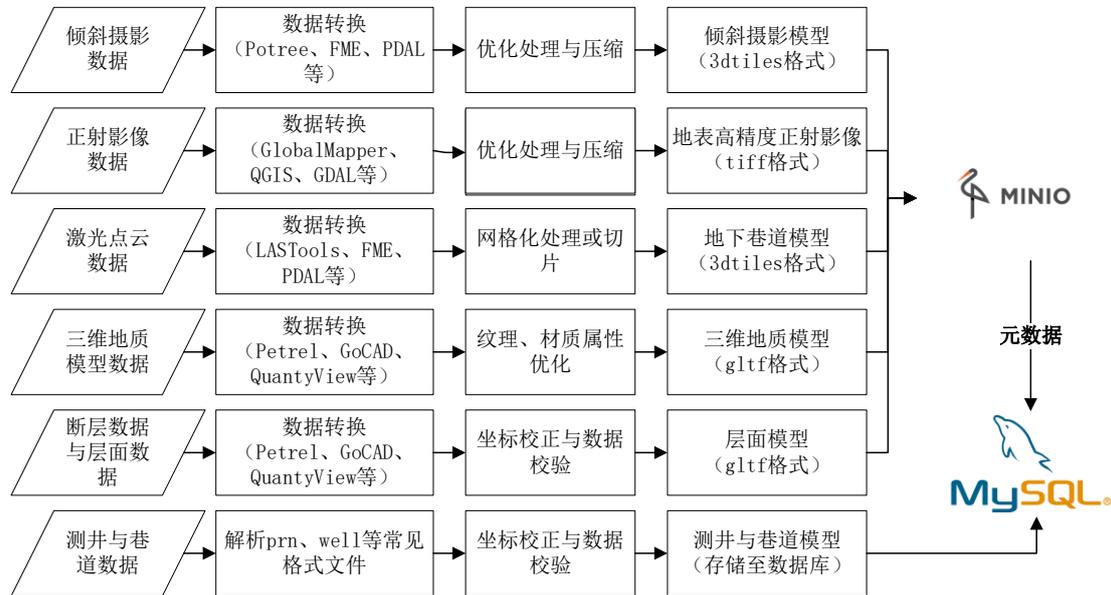


Fig. 4 Integrated approach for multi-source data in mine industry

图4 矿山多源数据集成方法

化数据,通过数据接口提供高效查询和管理功能。

3.2 三维地质模型可视化技术

三维数据可视化技术将地质、空间和环境数据以三维的形式进行可视化展示与交互操作。矿山涉及大规模的三维地质体模型数据,在多尺度多层次多要素一体化表达与集成、高效率可视化渲染与交互等方面难度很高,问题突出,其可视化展示与交互分析的实现是一个巨大的挑战。为此,提出一种省域级多尺度三维地质体模型的渲染方法,具体流程如图5所示。该方法采用八叉树构建三维地质体模型的元数据索引,并根据视点远近原则、数据量大小原则、多线程异步加载原则和遮挡剔除不渲染原则,提出了基于多级缓存结构的可视区域三维地质体模型数据动态加载和渲染策略。首先,加载并对三维地质体模型元数据进行空间划分,创建八叉树索引;其次,主线程对人机交互实时响应,监测视区变化,通过获取当前相机视区内的所有八叉树节点,开启渲染线程对可视区域节点的模型数据进行加载和渲染;再次,对可视区域内的八叉树节点按照视点远近和该节点所映射的数据大小进行空间排序,离视点近、数据量小的地质体模型被优先加载和渲染,同时异步并行加载离视点近、数据量大的模型数据;最后,对可视区域内的模型数据进行遮挡判别,将被遮挡的数据剔除且不渲染,以实现省域级多尺度三维地质体模型的流畅加载和可视化渲染。该方法能够有效解决大规模的三维地质体模型在可视化展示和人机交互场景中的操作卡顿与资源占用多的问题,提高数据量大的三维地质体模型的渲染速度和人机交互流畅度。

通过集成 OpenGL、WebGL 与 Three.js 等三维可视化算法库和技术框架,加载转换后的三维实景模型、地表正射影像、三维地质模型数据等,将矿山环境及其矿权范围内的地质结构以立体的方式呈现,辅助矿山用户在视觉上感

知地质特征、地形变化和资源分布。在此基础上,通过切面技术观察断层与地层之间的空间关系,深入认识复杂地质结构和断层空间分布特征。在三维场景中综合多种信息展示矿产开采作业的动态变化过程,从不同角度进行分析和对比。通过开挖分析和动态掘进等功能模拟开采过程,以规避地质灾害风险,提供更全面的决策支持。

4 系统应用

4.1 测井数据与巷道数据管理与可视化

系统具备测井数据和巷道数据的可视化展示与在线编辑功能,如图6所示。通过可视化展示,直观地观察与分析测井数据和巷道数据在矿山地质中的分布及特征。通过在线编辑功能,可对测井数据和巷道数据进行编辑与协同设计,实现数据的实时更新和管理。

4.2 层面数据管理与可视化

层面数据管理与可视化涉及地层面和断层面数据的管理、存储及可视化展示。地层面是指地质体之间的分界面,反映了地质体在不同层次上的空间分布和性质变化。系统通过建立统一的地层面数据库,对地层面数据进行分类、整理与存储。系统还提供了地层面透明度调整、颜色编码等功能,以进行可视化展示,如图7(a)所示。断层面表示地质构造中的断裂面,系统将断层面数据与地层面数据相关联,并使用不同颜色或纹理标识断层面的位置和性质,有助于直观、准确地理解地质构造的分布和特征,如图7(b)所示。层面属性数据可视化则通过将地层面属性数据与地层面相关联,以色彩映射或符号图形的方式展示不同属性值分布情况。以地表面的高程属性值可视化为例,如图8所示。

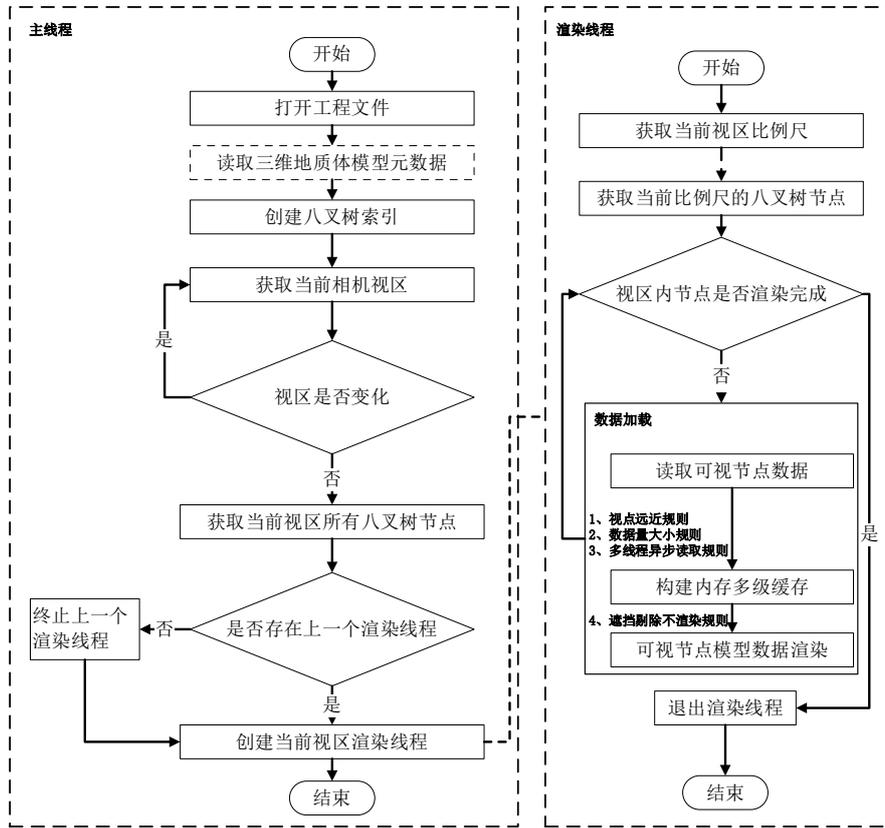
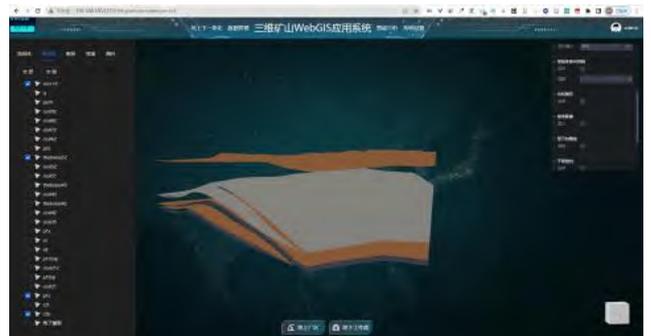


Fig. 5 Workflow of large-scale 3D geological model visualization and rendering techniques

图 5 大规模三维地质模型可视化渲染技术流程



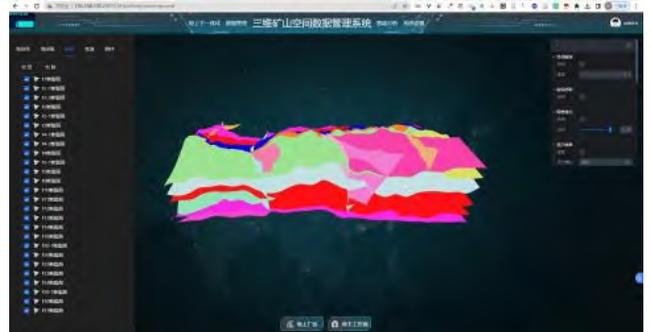
(a) Mine tunnel data
(a) 巷道数据



(a) Management and visualization of stratum surfaces
(a) 地层面管理与可视化



(b) Well data
(b) 测井数据



(b) Management and visualization of complex faults
(b) 复杂断裂管理与可视化

Fig. 6 Visualization editing of mine tunnel data and well data

图 6 巷道数据与测井数据可视化编辑

Fig. 7 Management and visualization of surface data

图 7 层面数据管理与可视化

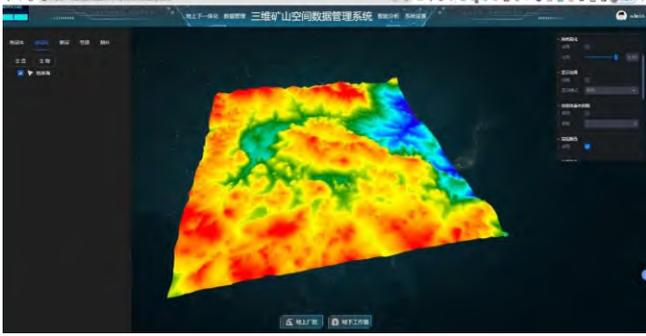


Fig. 8 Visualization effect of surface with assigned attribute values
图8 属性赋值后的地表可视化效果

4.3 三维模型管理与可视化

三维模型管理与可视化作为矿山勘探、规划和管理提供了强大支持。系统通过统一的三维模型数据库,对地表倾斜摄影模型、地下巷道激光点云模型和三维地质模型进行分类存储,并提供检索、更新和版本管理等功能。通过管理和可视化倾斜摄影模型,系统以真实、立体的方式展现了矿山,并结合矿山内部的实时数据信息,全面展示了各部门管理信息及生产环节的综合数据。通过处理激光点云数据、构建巷道模型和展示可视化场景,系统提供高精度、具有真实感的巷道环境和支持交互场景展示,有助于人们深入研究巷道结构,从而进行可视化分析与决策,如图9所示。

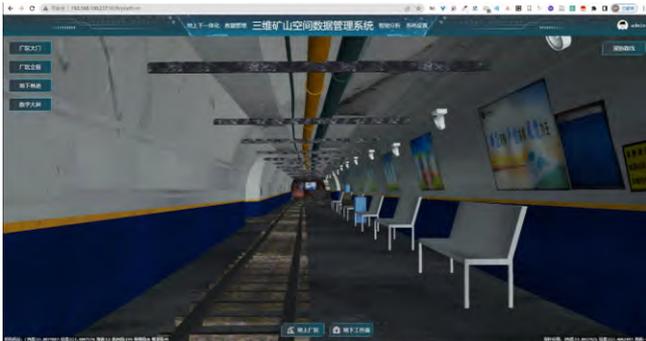
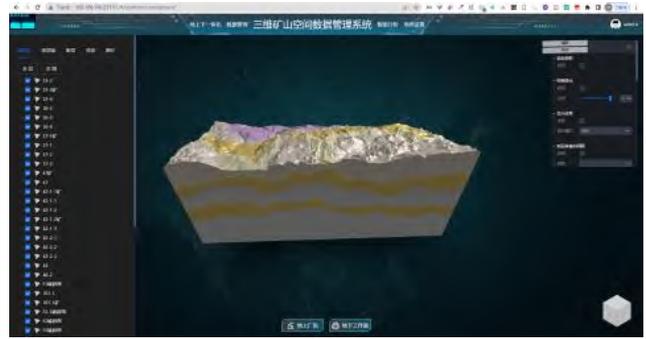


Fig. 9 Visualization of laser point cloud tunnel model
图9 激光点云巷道模型可视化

系统使用先进的三维渲染引擎技术加载和渲染三维地质模型数据,以精细呈现地质模型的细节、形态和空间特征。系统提供多种可视化形式,如使用不同颜色表示地层体,以展示地质特征和属性分布的变化趋势,如图10(a)所示;通过剪切栅栏面详细展示与分析矿体分布和地层构造,如图10(b)所示;在地质模型表面贴上纹理图像,增加地质表面的真实感,如图10(c)所示;展示地层的内部结构和分布情况,以及地层的层序、倾角和厚度变化,如图10(d)所示。

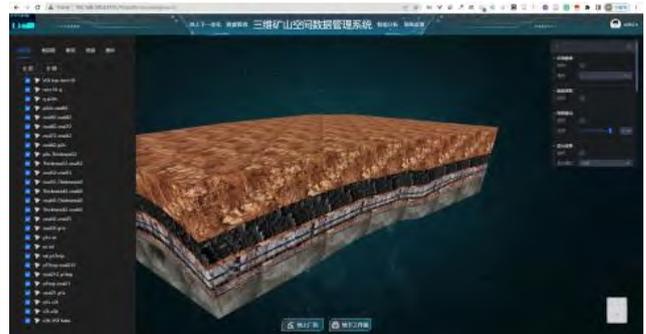
系统将来自不同数据源的测井、巷道、断层面和地层体等多种数据整合在一起(见图11),并通过可视化技术直观展示与分析,以帮助深入理解矿山的地质特征、资源分布和地质结构,提供全面的地质信息。



(a) Visualization of 3D geological models
(a) 三维地质模型可视化



(b) 3D geological model fence surface analysis
(b) 三维地质模型栅栏面分析



(c) 3D geological model texture mapping
(c) 三维地质模型纹理贴图



(d) 3D geological model vertical blast
(d) 三维地质模型垂向炸开

Fig. 10 Visualization and interaction of 3D geological model
图10 三维地质模型可视化与交互

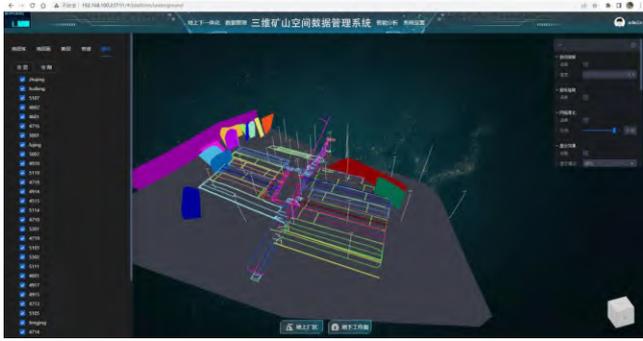


Fig. 11 Visualization of multi-source data integration

图 11 多源数据集成可视化

5 结论

本文针对目前矿井中存在的问题,即操作复杂、信息无法共享交流以及信息孤岛严重的问题等,研发了一种基于多源数据集成与 WebGIS 的三维矿山空间数据管理系统。该系统以地质、物探、钻探、采掘和测量等数字化信息为支撑,构建了统一的综合地质信息数据库,具备存储、转换、管理、查询、分析和可视化等功能,实现了煤矿生产过程中地质信息的高效管理和数据共享。同时,系统整合了三维实景模型、三维地质模型和地震数据模型,在三维实景的基础上,融合了三维地震数据和地质数据,并开发了基于 Web 的三维软件系统,实现了一体化的集成显示。本文工作是对数字矿山建设关键技术的重要探索,也是在矿山企业的数字化转型中针对三维信息系统研发的一次重要尝试,具有以下亮点:①通过建立统一的综合地质信息数据库,系统成功实现了对地质数据的存储、转换、管理、查询、分析和可视化展示等多项功能,有效整合了测井数据、巷道数据、正射影像数据、倾斜摄影数据、激光点云数据、三维地质模型数据、断层面数据和地层面数据等多种数据类型,使数据有机存储在统一的数据存储系统中,解决了数据分散和数据孤岛问题;②系统具备实时查询、计算和分析矿山数据的能力,通过实时获取最新数据进行计算,监测地质变化和生产状态,为用户提供动态的数据分析和决策支持功能。此外,系统提供了用户界面和多种交互功能,支持用户进行剖面分析、开挖分析和空间查询等操作,并支持用户自主探索矿山的地质特征和资源情况。通过为矿山企业提供准确、及时的数据支持,该系统有助于提升决策的科学性和可行性,从而提高矿山企业的生产效率和安全性。

然而,系统也存在一些不足,主要体现为:①由于多源数据具有不同的格式、结构和编码方式,因此对数据进行解析、转换和统一空间坐标是一项复杂的任务。在实际应用中,需要为不同的数据源编写特定的解析算法和转换逻辑,从而进一步增加了系统开发和维护的复杂性;②三维数据的可视化是一项计算密集的任务,需要大量计算资源

和强大的图形渲染能力,因此是对系统性能的重大挑战。特别是在处理大规模数据集或复杂的地质模型时,这种挑战表现在加载数据和用户交互过程中,会导致一定程度的延迟,对用户体验产生较大影响。因此,为了改善系统性能,需要针对三维模型轻量化进一步展开研究,以减少资源消耗,提高三维数据可视化效率和系统的响应速度。

参考文献:

- [1] WANG G F, REN S H, PANG Y H, et al. Research on development strategy of intelligent green mining industry in China[J]. *Coal Economic Research*, 2021,41(12): 4-10.
王国法,任世华,庞义辉,等.我国智能绿色矿业发展战略研究[J].*煤炭经济研究*,2021,41(12):4-10.
- [2] WU L X. The digital earth, digital China and digital mine[J]. *Mine Surveying*, 2000(1):6-9,62.
吴立新.数字地球、数字中国与数字矿区[J].*矿山测量*,2000(1):6-9,62.
- [3] WANG L G, CHEN X. Advancing technologies for digital mine[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016,26(8): 1693-1710.
王李管,陈鑫.数字矿山技术进展[J].*中国有色金属学报*,2016,26(8):1693-1710.
- [4] BI L. Study of key technology of platform of digital mining software system [D]. Changsha: Central South University, 2010.
毕林.数字采矿软件平台关键技术研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [5] XIONG S M. Study on key technologies of underground mine production 3D visual management and control system [D]. Changsha: Central South University, 2012.
熊书敏.地下矿生产可视化管控系统关键技术研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [6] BI L, WANG J M. Construction target, task and method of digital mine [J]. *Metal Mine*, 2019(6):148-156.
毕林,王晋森.数字矿山建设目标、任务与方法[J].*金属矿山*,2019(6):148-156.
- [7] LI M, MAO S J, ZHAO M J. Research progress and prospects of coal mine intelligent geological guarantee systems [J]. *Coal Science and Technology*, 2023,51(2):334-348.
李梅,毛善君,赵明军.煤矿智能地质保障系统研究进展与展望[J].*煤炭科学技术*,2023,51(2):334-348.
- [8] WANG Q, WU H C, NIU J K. Functions and components of a digital mine operation system[J]. *China Mining Magazine*, 2004(1):8-11.
王青,吴惠城,牛京考.数字矿山的内涵及系统构成[J].*中国矿业*,2004(1):8-11.
- [9] WU C L, TIAN Y P, ZHANG X L, et al. Discuss on the theory and method about construction of the digital mine [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2011,30(2):102-108.
吴冲龙,田宜平,张夏林,等.数字矿山建设的理论与方法探讨[J].*地质科技情报*,2011,30(2):102-108.
- [10] ZHAO Y, ZHANG W G, HE X C, et al. The multi-dimensional integration of construction framework and implementation path of intelligent mine [J]. *Nonferrous Metallurgical Equipment*, 2022,36(6):1-12.
赵奕,张维国,何煦春,等.智能矿山多维度一体化建设架构与实施路径研究[J].*有色设备*,2022,36(6):1-12.
- [11] LIU G, YE L X, CHEN Q Y, et al. Abnormal event detection of city slope monitoring data based on multi-sensor information fusion [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022,41(2):13-25.

- 刘刚,叶立新,陈麒玉,等. 基于多传感器信息融合的城市边坡监测数据异常事件检测[J]. 地质科技通报,2022,41(2):13-25.
- [12] CHEN G S, LIU J Q, HE Y, et al. Geological data field acquisition system based on world wind mobile terminal[J]. Computer Systems & Applications, 2019,28(4):96-104.
陈根深,刘军旗,何忆,等. 基于World Wind移动端的地质数据野外采集系统[J]. 计算机系统应用,2019,28(4):96-104.
- [13] FAN W Y, CAO M X, LU L J. Visualization process of 3D geological modeling based on GOCAD software[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(24):9771-9778.
范文遥,曹梦雪,路来君. 基于GOCAD软件的三维地质建模可视化过程[J]. 科学技术与工程,2020,20(24):9771-9778.
- [14] LU X M, KAN S T. Geological guarantee and transparent geological cloud computing technology of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(8):2296-2305.
卢新明,阚淑婷. 煤炭精准开采地质保障与透明地质云计算技术[J]. 煤炭学报,2019,44(8):2296-2305.
- [15] LI P, CHENG J Y. Design and implementation of the geological guarantee system architecture based on microservices[J]. Coal Geology & Exploration, 2022,50(1):118-127.
李鹏,程建远. 基于微服务的地质保障系统架构与应用[J]. 煤田地质与勘探,2022,50(1):118-127.
- [16] MA L, DUAN Z H, ZHANG J J, et al. Coalmine geological security information system based on fine prospecting[J]. Coal Geology of China, 2020,32(9):70-73,98.
马丽,段中会,张建军,等. 基于精细勘查的煤矿地质保障信息系统[J]. 中国煤炭地质,2020,32(9):70-73,98.
- [17] MAIO Y P, HOU E K, YANG L, et al. Hongliulin coal mine geology software software system construction and application[J]. Journal of Intelligent Mine, 2023,4(3):44-51.
苗彦平,侯恩科,杨磊,等. 红柳林煤矿地质保障软件系统建设与应用[J]. 智能矿山,2023,4(3):44-51.
- [18] ZUO S H. The eight key technologies of the intelligent geological guarantee system[J]. Journal of Intelligent Mine, 2022,3(1):66-69.
左书豪. 智能地质保障系统八大关键技术[J]. 智能矿山,2022,3(1):66-69.
- [19] ZHANG X. Big data technology analysis and platform design of smart mine[J]. Industrial Minerals & Processing, 2021,50(2):13-17.
张新. 智慧矿山大数据技术分析与平台设计[J]. 化工矿物与加工, 2021,50(2):13-17.
- [20] ZHANG S Z, SU Z P, CHEN Y M. Research and development of 3D visualization management system for smart mines[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2022,74(2):1-5,16.
张绍周,苏之品,陈玉明. 智慧矿山三维可视化管理系统研发[J]. 有色金属(矿山部分),2022,74(2):1-5,16.
- [21] SU L H. Design and implementation of production planning management system for in-situ leaching mine based on WebGL[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
苏玲慧. 基于WebGL地浸矿山生产计划管理系统的设计与实现[D]. 天津:天津大学,2020.
- [22] BAO C X. Application of GIS spatial data model in mine geological surveying and mapping[J]. World Nonferrous Metals, 2023(3):28-30.
鲍成霞. GIS空间数据模型在矿山地质测绘中的应用[J]. 世界有色金属,2023(3):28-30.
- [23] GUO X Q, WANG L M, HAO W T. Research on construction of visualized mine platform based on 3D GIS[J]. Geospatial Information, 2021, 19(6):64-67.
郭向前,王良民,郝伟涛. 基于3D GIS的可视化矿山平台建设研究[J]. 地理空间信息,2021,19(6):64-67.
- [24] WEN R H, LIANG X M, LI S H, et al. Study on the construction scheme of integrated intelligent control system of mines[J]. China Mine Engineering, 2022,51(6):12-16.
温瑞恒,梁新民,李少辉,等. 矿山一体化智能管控系统建设方案研究[J]. 中国矿山工程,2022,51(6):12-16.
- [25] SZUJÓ G, BIBER Z, GÁL V, et al. MaGISter-mine: a 2D and 3D web application in the service of mining industry[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023,116 : 103167.
(责任编辑:黄健)