

文章编号: 1007-2993(2024)06-0644-06

# 空地融合数字工程勘察关键技术与应用 ——第九届全国岩土工程实录交流会特邀报告

李清波 杜朋召 刘振红 齐菊梅 裴丽娜  
(黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南郑州 450003)

**【摘要】** 结合工程勘察行业数字化、信息化建设的重大需求,系统分析了工程勘察数字化技术的现状与不足,开展了勘察信息数字化采集、集成化管理、协同化应用等方面的关键技术研究,取得了多项具有工程实际应用价值的研究成果。以东庄水利枢纽工程为例,通过空地融合数字工程勘察关键技术应用,提升了高山峡谷区水利工程勘察工作效率和成果质量,为其他行业大范围、长线路、艰险区的地质工作提供借鉴,促进勘察行业信息技术进步。

**【关键词】** 岩土工程;工程勘察;数字化;空地融合

**【中图分类号】** P642

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.06.002

## Key Technologies and Applications of Air-Ground Integrated Digital Engineering Investigation

Li Qingbo Du Pengzhao Liu Zhenhong Qi Jumei Pei Lina  
(Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, Henan, China)

**【Abstract】** Combined with the major needs of digitalization and informatization construction in the engineering investigation industry, the current status and shortcomings of the digital technology for engineering investigation were systematically analyzed, the research on key technologies in the digital collection, integrated management, and collaborative application of investigation information was carried out, several research results with practical engineering application value were obtained. Taking the Dongzhuang Water Control Project as an example, through the application of the key technologies of air-ground integration digital engineering investigation, the work efficiency and achievement quality of water conservancy engineering investigation in the mountain canyon area were improved, this provides a reference for the geological work in large-scale, long-distance, and difficult areas in the field, and promoting the advancement of information technology in the investigation industry.

**【Key words】** geotechnical engineering; engineering investigation; digitization; air-ground integration

### 0 引言

工程勘察是工程建设的重要基础,数字化、信息化技术是提升工程勘察质量和效率的重要手段。我国水利水电、能源交通等领域重大工程建设的推进及信息化技术快速发展,传统工程勘察工作模式与技术手段已无法满足数字化、流程化的工作需要<sup>[1-3]</sup>。新的技术背景下,工程勘察需要解决的关键技术难题主要包括多尺度多场景多手段勘察信息数字化采集、海量多源异构勘察信息集成管理、数字工程勘察信

息协同应用与服务等。

多尺度、多场景、多手段勘察信息数字化采集技术,既要满足不同阶段勘察精度逐步加深,勘察精度与阶段要求相适应,又要满足坝址区、水库区、料场区等不同部位与勘察阶段、勘察精度相适应;而在不同阶段、不同部位的勘察信息采集时,无论遥感、无人机等空天手段,还是地质测绘、勘探、物探等地面地下手段,均需进行数字化的协同采集,以提高勘察工作效率。

**基金项目:** 国家重点研发计划(2018YFC1508703);黄河勘测规划设计研究院有限公司自主研发项目(2014-ky09)

**作者简介:** 李清波,男,1964年生,河南商丘人,教授级高级工程师,主要从事工程地质及勘察信息化研究工作。E-mail: li-qbyrec@163.com

对于重大工程建设,各个阶段收集、采集的勘察信息来源不同、获取方式不同,其中既有结构化的表单数据,又有非结构化的图像、文件等数据,海量多源异构勘察信息集成管理,需要在数据资源详细规划的基础上,研究面向数据挖掘与大数据应用的集成管理机制,选择合理的数据库类型,开展完备的数据编码和表结构设计,构建勘察数据资源池,从而实现多源异构勘察信息的集成管理<sup>[4-5]</sup>。

空地融合数字工程勘察信息协同应用与服务,需要在数字化采集和集成化管理的基础上,针对重大水利工程坝址区、水库区、高边坡、长隧洞等关键地质问题分析评价需求,通过勘察信息协同应用算法与服务发布机制研究,解决工程应用中存在的分析算法欠缺、数据共享性差、可视化水平低等技术问题,建立数字工程勘察应用服务技术体系,实现工程地质评价和岩土分析设计的协同应用。

空地一体技术是一种基于卫星、互联网等多种手段,实现高质量多功能通信的技术,它能够提供高效的数据传输,在极端环境下也能保持运行稳定,提供可靠的通信服务,具备良好的协同性,极其适配数字工程勘察技术体系对协同应用于服务的需求。目前,国内空地一体技术已经广泛应用于众多领域,如地质灾害监测领域,空-天-地协同观(监)测技术可以为致灾机理研究提供多层次、多角度、多维立体观测数据和技术支撑<sup>[6-7]</sup>;在工程建设领域,基于无人机和地面测量技术的空地融合一体技术可以用于重构三维模型<sup>[8-9]</sup>;此外,空地一体技术在应急救援、协同运行、环境监测等领域均有应用。

因此,考虑基于遥感解译、移动 GIS、无人机航测、图像智能识别、BIM、InSA 等技术,开展新技术需求下的全流程数字化勘察关键技术研究,构建数字工程勘察应用技术体系,对提升勘察工作效率和成果质量具有重要意义。

## 1 工程勘察数字化技术现状

数字技术不断发展,工程勘察行业的数字化水平显著提升,内外一体化的工程勘察信息采集系统在各个领域得到了广泛应用<sup>[10-12]</sup>。在市政岩土领域,采集系统主要是基于百度或高德 SDK 进行开发,不进行复杂地形数据加载,采集信息以钻孔编录及孔内试验数据为主;在水利水电领域,采集系统多基于移动 GIS 底层进行开发,可加载复杂地形数据、工程布置数据、区域地质数据和高精度影像数据,能够采集地质测绘、勘探、物探等各类勘察数据。在长距离线路、地形复杂地区的勘察工作中,遥感、InSAR、无人机

等技术的介入<sup>[13-15]</sup>,取得了传统勘察手段无法企及的效果。

目前工程勘察数据管理多针对结构化数据,对于非结构化的勘察信息管理较少,勘察数据存储分散、碎片化严重。中国勘察设计协会印发的《工程勘察设计行业“十四五”信息化工作指导意见》中明确指出<sup>[16]</sup>:“编制各类工程勘察数据采集标准、专业软件数据交互标准,以及管理信息系统间互联互通标准,推进各类专业软件的集成应用。”基于勘察数据集成管理的大数据中心建设,仅在地矿、市政等领域开展了技术研究与应用实践工作。

在勘察数据协同应用方面,主要分为单项目数据的统计分析、计算评价、三维建模、图件绘制、报告生成,以及多项目勘察大数据的挖掘分析和智能应用。对于单项目的勘察数据统计分析、图件绘制相对简单,目前应用较为广泛。基于简易数学公式的岩土计算评价也已基本实现信息化,对于复杂的岩土分析计算,一般利用 FLAC3D、3DEC、MIDAS 等软件进行<sup>[17-19]</sup>。对于多项目勘察大数据的挖掘分析和智能应用,还处于研究起步阶段。

在勘察信息可视化应用方面,目前相关的应用软件较多,如国外的 Gocad、EVS、Leapfrog geo 和国内的 Geostation、Geomodeler、理正三维地质建模软件等<sup>[15]</sup>。而基于 GIS+BIM 技术的工程勘察信息三维综合展示,由于缺少成熟的应用平台,仅在部分大型工程中得到应用。基于仿真引擎的数字孪生场景构建在工程勘察中的研究应用还很少。

## 2 空地融合数字工程勘察关键技术

数字工程勘察关键技术具体包括基于空天手段的地质信息解译技术、地面地下勘察全要素协同采集技术、多源异构勘察信息集成管理技术和数字工程勘察信息协同应用与服务 4 个方面。

### 2.1 基于空天手段的地质信息解译技术

基于空天手段的高精度地质信息识别与提取方法,主要解决大区域、长线路、高陡边坡等复杂艰险地区工程勘察信息快速获取技术难题,具体研究包括以下 3 个方面。

#### (1) 基于 GIS 的三维高精度遥感地质信息层次解译法

传统遥感地质解译多限于工程初期阶段的小比例尺应用,解译精度较低。针对大范围、长线路地质测绘难度大和传统遥感手段解译精度低等问题,以高精度遥感和 DEM 为信息源,提出了基于 GIS 的三维高精度遥感地质信息层次解译法,建立了地形解译、

影像解译、三维真彩色解译相耦合的层次解译标准流程,大幅提升了工程区地质信息采集精度与效率。

### (2) 基于 InSAR 数据滤波的地质灾害时空连续性分析方法

目前 InSAR 数据分析受地形、地物等因素影响较大,地表微小变形难以区分,地质灾害信息识别率低。针对地质灾害信息早期识别技术难题,通过可信区域分拣与双向滤波分析,提出了基于 InSAR 数据滤波的地质灾害时空连续性分析方法,建立了地质灾害变化及形变信息识别的技术流程,可计算得到地表垂直位移、水平位移和坡向位移,实现了高山峡谷区地质灾害信息的精准动态识别。

### (3) 面向地质信息识别的无人机影像解译方法

传统施工地质编录主要由地质技术人员到达现场,通过肉眼观察、人工量测和手动编录方式进行,编录工作效率低、安全风险大。针对高陡岩质边坡施工地质编录问题,通过影像信息识别和结构面产状自动计算,建立了面向地质信息识别的无人机影像解译方法,创新了施工地质编录成果形式与作业模式,解决了高陡岩质边坡施工地质信息采集技术难题,编录效率提升 4~5 倍,有效地避免了作业安全风险。

## 2.2 地面地下勘察全要素协同采集技术

地面地下全要素勘察信息采集技术,主要实现多尺度、多场景、多手段勘察信息的数字化分布协同采集,具体研究包括以下 3 个方面。

### (1) 基于云服务的勘察信息分布协同采集技术

现阶段工程勘察信息采集主要采用独立、分散的作业模式,不同采集作业组及采集内外业之间无法实现有效协同。通过整合勘察信息采集过程中的软硬件资源,提出了基于云服务的勘察信息分布协同采集技术,构建基于云架构的勘察数据中心,研发了包含控制中心、协同中心和采集终端的分布协同式地质信息智慧云平台,实现了全要素工程勘察信息的分布协同采集、远程实时传输、云端智能交互服务,提高了采集工作效率和一体化水平。

### (2) 便携式移动勘察信息采集系统

目前勘察信息采集系统主要基于百度或高德 SDK 进行开发,无法与工程布置信息充分融合。针对上述需求,突破了 GNSS 定位与工程地图实时关联、洞室信号盲区地质对象精准定位等技术,研发了集 GNSS 定位、数字地质罗盘、数码相机等功能于一体的便携式移动勘察信息采集设备,融合了工程地质测绘、地质勘探、原位测试与现场试验等数据的采集功能,提高了野外勘察信息采集工作效率。

### (3) 地下岩体综合信息集成采集系统及装备

传统地下岩体信息采集主要通过不同手段单独进行,信息采集不成系统,工作效率低下。结合地下岩体物性指标、力学指标集成采集需求,研发了地下岩体综合信息集成采集系统,研制了钻孔压水试验综合测试仪、全自动智能化钻孔弹模测试仪、便携冲击式微水试验测试仪等测试装备;集成 9 套孔内测试设备,实现了 20 余种地下岩体信息的一体化采集。

## 2.3 海量多源异构勘察信息集成管理技术

海量多源异构勘察信息集成管理技术,通过对多源异构勘察数据的标准化整合与治理,增强勘察数据的协同共享与专业应用能力,具体研究包括以下 3 个方面。

### (1) 工程勘察信息分类与编码标准

结合工程勘察各类数据类型、数据格式,构建了工程勘察信息分类与编码标准,共编制 8 大类,145 项工程勘察数据库表结构及标识符,创建了可动态更新的工程勘察信息字典库,为多源异构勘察数据的深度整合与管理奠定基础。

### (2) 空间数据智能无损转换技术

综合 CAD 工程图件与 GIS 空间数据特点,基于分层对比与要素对照关系,提出了具备智能记忆功能的 GIS 与 CAD 空间数据转换方法,建立了增量式扩充二元要素类映射池,实现了要素映射关系的主动存储与识别调用,解决了空间数据的双向导通与便捷无损转换技术难题。

### (3) 数字工程勘察信息综合管理技术

传统工程勘察信息管理技术多存在管理数据不全、平台接口不畅、服务能力不足等问题。利用系统全面的勘察信息分类与编码标准,研发了内外业协同、多窗口联动的数字工程勘察信息综合管理技术及其应用系统,创新了钻孔图像 RQD 计算、结构面定量分组、弧段剖面精确绘制等多源数据分析算法,实现了多源异构勘察信息集成管理与高效服务。

## 2.4 数字工程勘察信息协同应用与服务技术

数字工程勘察信息协同应用与服务,主要解决工程地质评价和岩土分析设计在协同应用过程中存在的关键技术问题,具体研究包括以下 3 个方面。

### (1) 基于三维 GIS 的库坝区工程地质条件综合评价技术

结合勘察信息综合管理平台的数据服务,研发了基于三维 GIS 的库坝区工程地质条件综合评价技术,提出了坝基岩体质量智能评价和广域地质灾害定量评价等方法,建立了库坝区工程地质条件评价标准



流程,实现了库坝区关键地质问题的系统化、可视化评价。

### (2) 基于“岩-机-渣”复合关系模型的双护盾 TBM 施工隧洞围岩快速分类方法

由于缺乏规程规范指导,工作中基于渣料形态参数变化规律,建立了 Rc 与 TBM 设备参数、掘进参数、渣料形态参数间的关系模型;基于贯入度、片状和块状岩渣含量、岩渣长度和宽度等指标,建立了岩体完整性多指标评价模型;通过确定围岩质量修正指标,提出了基于“岩-机-渣”复核关系模型的双护盾 TBM 施工隧洞围岩快速分类方法。

### (3) 岩土工程分析设计一体化技术

目前地质建模、数值计算、岩土设计类软件相互独立,不同平台间的数据和模型共享性差。基于“一套数据”、“一个模型”,研究了岩土工程分析设计一体化应用技术,并构建研发了三维应用平台,突破了地质非连续与结构连续数据底层融合技术,实现了边坡、洞室等工程对象的分析评价、支护设计的数据相通和模型共享,提高了岩土工程三维分析设计工作效率。

## 3 空地融合数字工程勘察技术应用

东庄水利枢纽工程位于关中大峡谷,水库区全长 97 km,工作环境艰险、地质条件复杂,在地貌上

以老龙山断层为界分为两个地貌单元。其中,老龙山断层以北为砂页岩库段,长度 94.3 km,处于黄土高原南缘,出露地层主要为第四系(Q)松散堆积物,三叠系(T)、二叠系(P)砂岩、泥岩、页岩等;老龙山断层以南为碳酸盐岩库段,长度 2.7 km,为基岩中低山地貌,两岸坡体高陡、山势陡峻、基岩裸露,出露地层主要为第四系(Q)松散堆积物和奥陶系(O)灰岩、白云岩。

东庄水利枢纽工程勘察期间,应用空地融合的数字工程勘察技术,大幅提升了勘察工作效率和成果质量。

### 3.1 空天手段的地质信息识别与提取

综合利用 Landsat-8、GF-2 遥感数据和高精度无人机数据,在项目建议书与可行性研究阶段,对库坝区的主要地质信息,开展了全面的识别提取。其中,Landsat-8 数据主要用于区域地质构造的遥感分析及岩性的宏观分析;GF-2 数据主要用于地质构造的详细解译、滑坡等地质灾害提取,以及库区岩性的详细分类;高精度无人机数据主要针对老龙山断层等关键地质构造、H1—H35 等地质灾害信息,进行精细识别和详细复核(见图 1)。利用空天手段,大幅提升了东庄水利枢纽工程高山峡谷区勘察信息的采集工作效率。



图 1 高精度遥感地质信息获取

### 3.2 地面地下全要素勘察信息协同采集

在高精度遥感地质解译的基础上,针对坝址区等重点工程部位和关键地质问题,采用基于云服务的分布协同技术,将区域地质信息、遥感解译成果、勘

察工作布置信息和地形数据等,导入便携式移动勘察采集信息系统,实现 GNSS 定位与工程地图实时关联及勘察信息的分布协同采集(见图 2),先后采集地面地质测绘数据 4376 点、钻孔数据 29376 m。

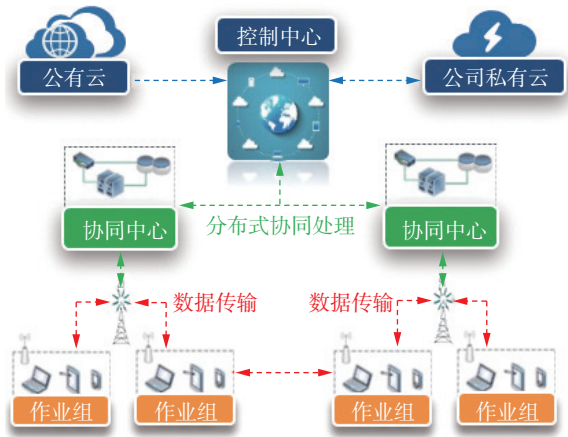


图2 全要素勘察信息分布协同采集

结合洞室信号盲区地质对象精准定位和电子厘米纸地质编录等技术,采用移动勘察信息采集系统,采集平洞数据 7386 m;采用地下岩体综合信息集成采集系统及装备,采集物探数据 61486 m、岩土体试验数据 1853 组。

### 3.3 海量多源异构勘察信息集成管理

东庄水利枢纽工程多源异构的勘察信息,在工程勘察信息分类与编码标准的基础上(见图3),以统一、标准的数据格式,导入数字工程勘察信息综合管理平台,形成完整的勘察数据中心,其中既包含地质点、钻孔、平洞编录的结构化数据,也包括遥感影像、岩心照片、报告图件等非结构化数据。

通过工程勘察信息综合管理平台,建立了大型工程全阶段、全部位、全类型的项目级勘察数据中心,实现了多源异构勘察数据的深度整合与管理,便于形成企业勘察数据资产,为勘察大数据挖掘与应用奠定了良好基础。

### 3.4 数字工程勘察信息协同应用与服务

在东庄水利枢纽项目级勘察数据中心的基础上,系统开展了统计分析、图件绘制等基础性地质工作。其中,统计分析包括工作量统计、地层岩性统计、风化卸荷统计、物理力学参数统计等;图件绘制包括钻孔柱状图、平洞展视图、地质剖面图、地质平面图等。

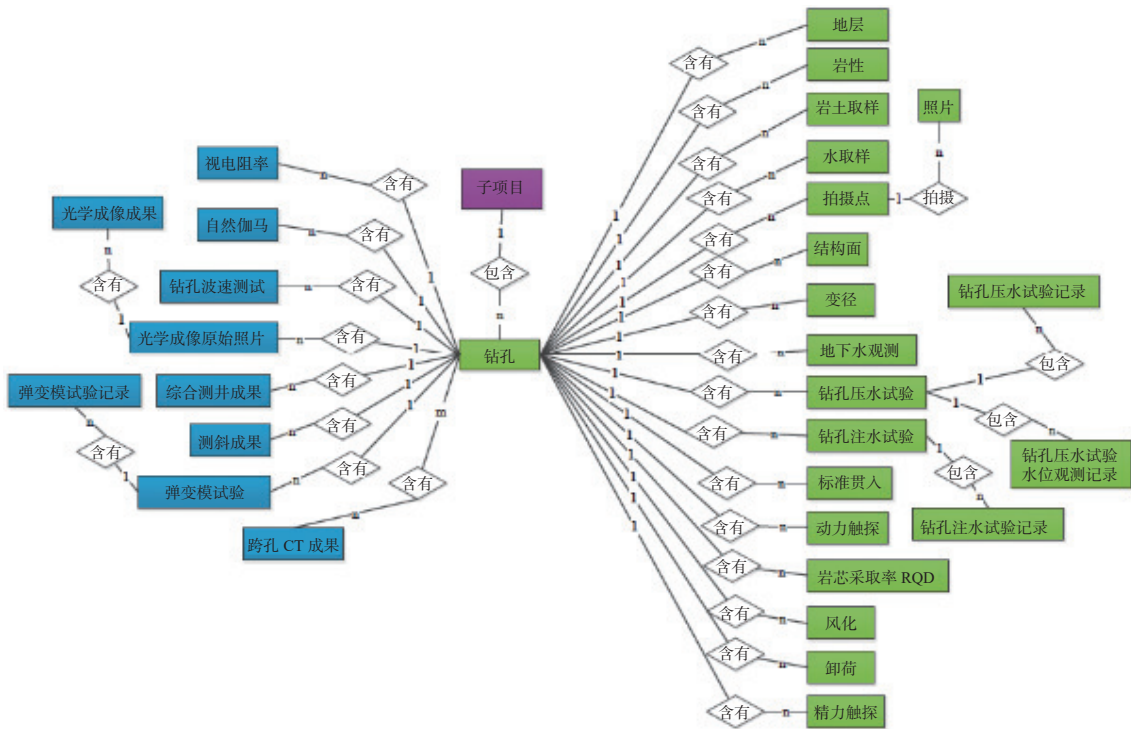


图3 钻孔数据信息表结构

利用工程勘察信息综合管理平台的数据接口,不同类型的勘察数据能够直接导入 Itascad 三维地质建模平台进行地质 BIM 正向设计工作:包括构建地表、地层、构造、钻孔、透水率等值面及岩体分级等模型。并且支持以三维可视化的形式,进行岩溶渗漏、建基岩体、坝肩抗滑稳定性等关键工程地质问题的分析评价(见图4)。

在三维 GIS 数据集成的基础上,利用水库区工程地质条件评价系统,对 68 处塌岸和 3 处浸没点进行了系统评价。利用 3DSlopeGIS 边坡分析评价系统,对水库区 30 处滑坡的稳定性进行了分析计算。同时,在三维地质模型的基础上,利用岩土分析设计一体化三维平台,开展了坝肩岩质高边坡的开挖支护设计和导流洞围岩稳定性分析与支护设计工作,实现



了工程勘察设计数字化协同。

空地融合数字工程勘察技术体系,构建了全新的工程勘察数字化工作模式及应用服务。数字化采集、集成化管理、协同化应用、可视化表达的融合,实现了东庄水利枢纽工程的高效数字化,极大地提高了现场勘察工作效率和勘察成果质量,也为建造智慧东庄提供了重要的基础支撑。

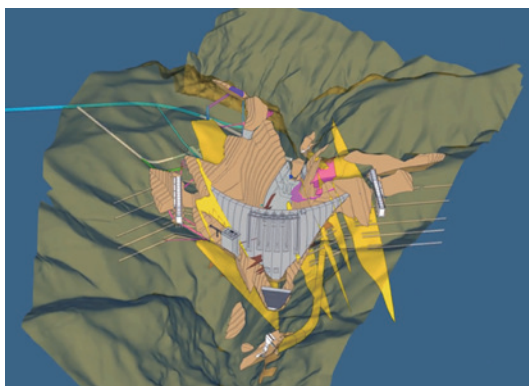


图4 坝肩岩质高边坡三维开挖设计

#### 4 结论

工程勘察数字化、信息化技术的研究应用,是勘察行业发展的重要方向,空地融合数字工程勘察技术体系在基于空天手段的地质信息识别与提取、地面地下全要素勘察信息协同采集、多源异构勘察信息集成管理和数字工程勘察信息协同应用与服务4个方面,取得了系列关键技术研究成果。通过在东庄水利枢纽工程中的实际应用表明,空地融合数字工程勘察关键技术,能够提高勘察信息采集工作效率、实现勘察数据集成共享、提升专业服务能力,对于提升大范围、长线路、艰险区的勘察工作效率和成果质量大有裨益,为不同行业重大工程的地质勘察工作提供了技术借鉴。

#### 参 考 文 献

- [1] 周晓梅. 浅谈岩土工程勘察中存在的问题及相应对策[J]. 矿产勘察, 2007(5): 40-41.
- [2] 林海娟. 基于数字化的岩土工程勘察探索架构[J]. 地理信息, 2020, 10(5): 83-84.
- [3] 孟宪才. 数字化技术在提高岩土勘察效率方面的应用[J]. 工程建设与设计, 2017(20): 17-18.
- [4] 郭凡. 数字化工程勘察资料馆开发及勘察大数据初步分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- [5] 占建琴, 李世明, 鱼安卿. 城市岩土大数据平台研发及道路工程勘察应用[J]. 西部交通科技, 2022(3): 167-171.
- [6] 王志超, 赵健赞, 温兰冲, 等. 基于“天-空-地”协同观测的西宁市南川东路滑坡变形特征与稳定性分析[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 223-235.
- [7] 朱江, 杨胜雄, 黄泽磊, 等. 空地一体化技术在地质灾害调查评价中的应用——以粤北连州镇为例[J]. 矿产勘查, 2023, 14(12): 2426-2433.
- [8] 王升钊, 陈雨人, 杨元毅. 空地融合的城市道路基础设施数字化技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 176-182, 188.
- [9] 刘尚蔚, 李闯, 魏群. 面向水利工程的空地一体三维重建方法研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 73-77, 84.
- [10] 裴丽娜, 侯清波, 齐菊梅, 等. 基于Android的工程勘察数字采集系统关键技术[J]. 人民黄河, 2017, 39(1): 113-116.
- [11] 唐志政, 唐佳, 李尚高, 等. 基于Android+Web的工程勘测数字化采集系统[J]. 资源信息与工程, 2021, 36(5): 150-152.
- [12] 宋广, 吴芮, 安亚杰. 工程勘察内外业一体化信息管理平台设计与应用[J]. 河南水利与南水北调, 2021, 50(9): 88-90.
- [13] 高姣姣. 高精度无人机遥感地质灾害调查应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [14] 王桂杰, 谢谟文, 邱骋, 等. D-INSAR技术在大范围滑坡监测中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1337-1344.
- [15] 贾曙光, 金爱兵, 赵怡晴. 无人机摄影测量在高陡边坡地质调查中的应用[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1130-1136.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房城乡建设部关于印发2016—2020年建筑业信息化发展纲要的通知[A/OL]. (2016-08-23). [https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/201609/20160919\\_228929.html](https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/201609/20160919_228929.html)
- [17] 亓兆伟, 王星. 基于华宁勘察软件与理正勘察软件数据接口的研究与开发[J]. 西部探矿工程, 2016(6): 157-162.
- [18] 苏定立, 胡贺松, 谢小荣. 岩土工程勘察智能信息化技术研究现状[J]. 广州建筑, 2019, 47(6): 10-18.
- [19] 任或, 戴一鸣. 基于BIM的工程勘察软件系统研究与应用[J]. 工程勘察, 2017(3): 29-34.

收稿日期: 2024-03-31