

基于GIS和无人机航摄测量技术的城市数字地形测量方法

Urban Digital Topographic Survey Method based on GIS and UAV Aerial Photogrammetry

朱英浩¹, 孟金龙², 杨平科²

(1. 正元地理信息集团股份有限公司, 北京 101399;
2. 山东正元地球物理信息技术有限公司, 山东 济南 250101)

摘要: 目前提出的城市地形测量无法对数据进行量化处理, 导致测量效果较差。为了解决上述问题, 基于GIS和无人机航摄测量技术研究了一种新的城市数字地形测量方法。通过明确坐标, 计算航线的均方差来对无人机航线进行选择, 根据城市地形高度曲线图提取城市地形数据, 确定线性数、面性数、球性数和垂直度数等几何特征。利用地形数值计算参数模拟分析地形数值。通过摄像机姿态参数分析, 建立3D模型, 实现场景融合, 计算无人机设备采集数值, 建立管理平台, 实现数值测量。实验结果表明, 基于GIS和无人机航摄测量技术的城市数字地形测量方法能够通过量化处理对数字地形进行精准测量, 无人机轨迹的绝对误差在0.25%以内, 轨迹精度低于5 cm, 坐标精度低于3 cm。

关键词: GIS; 无人机航摄; 测量技术; 城市数字; 数字地形; 地形测量; 测量方法

中图分类号: P208 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 06-0134-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.06.022

ZHU Yinghao¹, MENG Jinlong², YANG Pingke²

(1. Zhengyuan Geomatics Group Co., Ltd., Beijing 101399, China;

2. Shandong Zhengyuan Geophysical Information Technology Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: At present, the urban topographic survey can not quantify the data, resulting in poor measurement results. In order to solve the above problems, a new urban digital topographic survey method is studied based on GIS and UAV aerial photogrammetry technology. The UAV route is selected by specifying the coordinates and calculating the mean square deviation of the route. The urban terrain data is extracted according to the urban terrain height curve, and the geometric characteristics such as linear number, areal number, spherical number and vertical degree are determined. Terrain numerical calculation parameters are used to simulate and analyze terrain numerical values. Through the analysis of camera attitude parameters, a 3D model is established to achieve scene fusion, calculate UAV equipment acquisition values, establish a management platform, and achieve numerical measurement. The experimental results show that the urban digital terrain measurement method based on GIS and UAV aerial photogrammetry technology can accurately measure the digital terrain through quantitative processing. The absolute error of UAV collection is within 0.25%, the track accuracy is less than 5 cm, and the coordinate accuracy is less than 3 cm.

Keywords: GIS; UAV aerial photography; measurement technology; city figures; digital terrain; topographic survey; measuring method

作者简介: 朱英浩 (1977—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程测量。

通信作者: 孟金龙 (1981—), 男, 汉族, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 测绘地理信息技术与应用。

收稿日期: 2023-10-09

0 引言

城市数字地形测绘充分应用一系列的先进技术，获取点与点之间的坐标以及连接方式，合理描述地形图实体的空间位置及其形状，为都市建设的规划设计，建筑施工和经营管理提供数据支撑，包含城市建设管理监测，都市地形图测量绘制，各类专项版图的测量绘制，建设市政工程师的建设检测及其主要建筑物的变化观察等。但在测量城市数字地形的初始阶段，应适当考虑到测量过程中的各种干扰因素，如我国测量城市数字地形技术起步较晚，不够成熟，相关技术人员较少，因此需要相关技术人员的不懈奋斗，提升自身业务水平，利用城市数字地形测量收集详细准确的地理信息，进而精确地进行应用，提供有价值的参考意见。

文献 [1] 针对城市住宅区大比例尺地形图测绘中的建筑密集，城市内部道路设计复杂，植物茂密等特点，采用三维激光扫描技术，获得数据量更大且精度更高的点云数据，将大部分外业采集时间转为内业处理，减轻了外业管理工作力度，大大提高了效率，但存在位置局限性，难采集较高建筑的数据的问题。文献 [2] 利用视觉特征搭配、互联网云台 PTZ 解算和场景与视频流的业务化搭配等方式，搭建实时监控网络视频与三维空间情景融入使用的三维空间 GIS 管理系统，进一步实现网络视频与三维空间情景较好的融入，提升多路数字网络视频集成在三维空间情景中的展示性能，但视觉特征搭配的方式还有待进一步优化，以便其实现建模纹理与实际情景出现差别时最好地甄选出正确对应点。为此，针对以上问题，本文基于 GIS 和无人机航摄测量技术提出一种新式的城市数字地形测量方法。

本文在选择基于 GIS 的无人机航线进行城市地形数据提取后，对城市数字地形数值进行模拟，得到地形数值计算参数和模拟分析，同时采用无人机航摄测量技术对城市数字地形进行测量，有效实现城市场景融合，对无人机设备采集的数据进行解算，构建和优化城市数字地形

地图。

1 基于 GIS 的无人机城市数字地形数据提取

1.1 无人机航线选择

在进行无人机飞行试验的初始阶段，需要要求无人机航线的正下方的城市地形尽可能平坦，减小地形对信号的遮挡程度，以达到考核影响因素的理想条件。由于城市各地方的地形情况各不相同，需在无人机的飞行区域选择起伏相对平缓的航线，根据已知的无人机的飞行坐标判断航线捷径及航线长度，并获取相应的约束条件参数，按照无人机的飞行特点和航线，同时采取最小均方差原则，集中处理无人机航线采集到的数据信息，最终获得最优化选择^[3-4]。具体操作步骤如下：

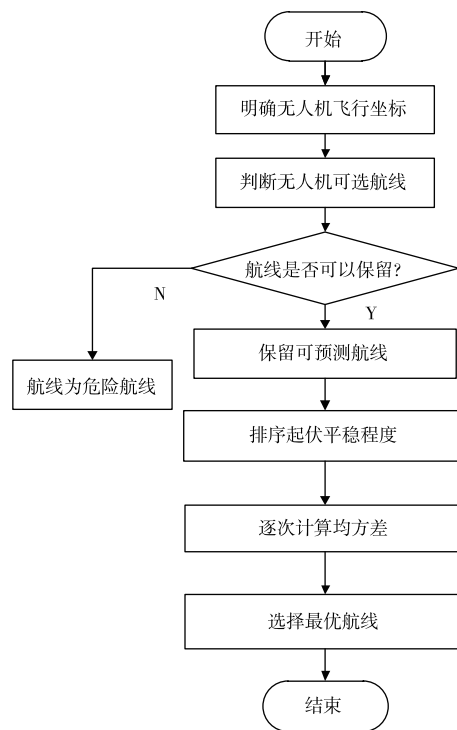


图 1 无人机航线选择流程

Fig. 1 UAV route selection process

步骤 1：明确无人机的飞行坐标。

步骤 2：根据相应的约束条件参数设定选择的航线，航线的拟合角度为 5° ，按照碰撞检测原则对预测航线上的每一个飞行坐标进行碰撞检测判断预测航线是否可以保留，当两条航线的飞行坐标之间发生碰撞，则判定为危险航线，

研究与应用

舍去^[5-6]。

步骤 3: 按照飞行航线的起伏平稳程度进行排序, 逐次计算保留航线的均方差, 根据最小均方差原则选择出最优航线。

1.2 城市地形数据提取

在完成无人机航线最优化选择后, 获取无人机飞行航线上的各个飞行坐标, 基于 DEM 模型计算出等间距差值, 设置飞行坐标的高度值为该坐标在城市地形上的投影高度, 录入上述高度值, 获得城市地形数据, 得到城市地形高度曲线图, 如图 2 所示:

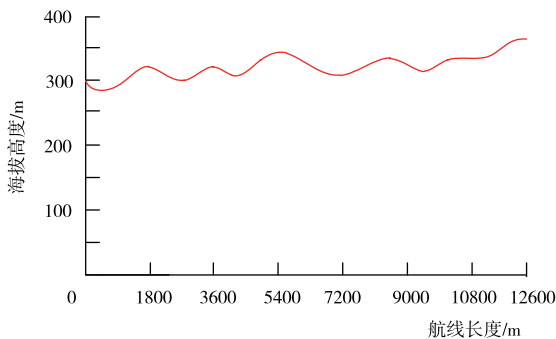


图 2 城市地形高度曲线图
Fig. 2 Height curve of urban terrain

根据相对位置中的地面点对垂直方向的限制性较高的特点, 区分地面点和飞行点的坐标, 结合飞行坐标提取的数据特点对城市地形数据进行提取^[7-8]。具体操作步骤如下:

步骤 1: 利用单帧扫描技术扫描获得数字图像 (a, b), 其中 a 为需采集数据的行数, b 为需采集数据的列数。每个数字图像都存在一个电子图像深度值 c 相对应。将数字图像的测距数据转变为数字图像的角度值 d , 在取得角度值 d , 基于 Savitsky-Golay 滤波算法能减少噪声影响, 设置飞行航线中角度低于 45° 的飞行坐标为初始地面, 控制飞行航线在进行广度优先算法后仍能保证飞行的平稳程度^[9-10]。

步骤 2: 根据地面坐标的特征, 设飞行坐标对应的地面坐标为 e , 其余为飞行坐标; 设地面坐标的法向量为 n_e 。

步骤 3: 在飞行坐标中, 根据邻域搜索方式计算每一个点的三个特征值 (x, y, z) 与其对应的

法向量 (n_x, n_y, n_z), 设点云坐标的几何特征为: 线性数 L , 面性数 M , 球性数 Q , 垂直度数 N , 可用下列公式表示:

$$L = \frac{\sqrt{x} - \sqrt{y}}{\sqrt{x}} \quad (1)$$

$$M = \frac{\sqrt{y} - \sqrt{z}}{\sqrt{x}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{\sqrt{z}}{\sqrt{x}} \quad (3)$$

$$N = \frac{n_z}{\|n_e\|} \quad (4)$$

2 城市数字地形数值模拟

2.1 地形数值计算参数

在进行城市数字地形数值模拟初始阶段需对地形数值进行计算, 根据工程实际地质勘测报告及室内测试结果分析城市数字地形数值模拟过程中的地形数值, 并在建立的城市素质地形模型中各方向的边界施加沿着各个固定方向的固定约束^[11-12]。基于 GIS 和无人机航线测量技术提取的城市地形数据更能反映城市地形的真实情况, 提高计算的准确性。地形三维模型如图 3 所示:

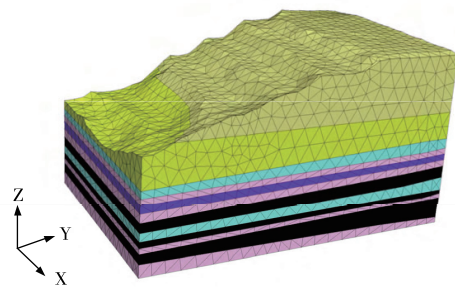


图 3 地形三维模型
Fig. 3 Three-dimensional terrain model

2.2 地形数值模拟分析

基于 GIS 和无人机航摄测量技术提取的城市数字地形数据在重力作用下生成初始地应力场, 根据初始竖向地应力成层状分布的原理, 保证压应力与深度成正比, 并获得在城市地形底部的最大值以及在城市地形表层的最小值。城市数字地

形初始地应力场可用图 4 表示：

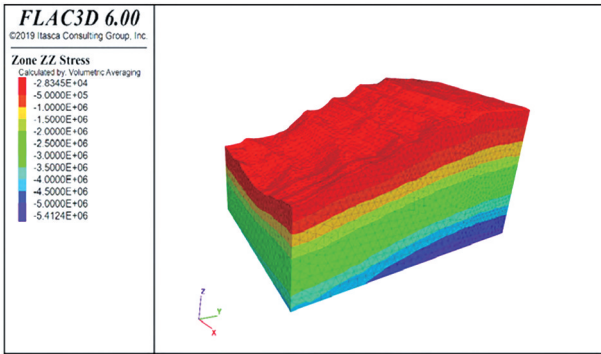


图 4 地形初始应力场
Fig. 4 Initial stress field of terrain

在完成边坡生成初始地应力场后，将获取到的数据进行现阶段城市地质稳定性分析，并精确掌握城市地形位移最大区和城市地面的塑性区，绘制城市地形位移云图，同时分析城市地面塑性区情况，控制城市地形位移最大区和城市地面的塑性区主要集中城市中部地区，在其他范围内，无较大张拉和剪切损伤，城市数字地形总体稳定性较好^[13-14]。

地形位移云图如图 5 所示。构建城市地形最大剪应变增量云图如图 6 所示。

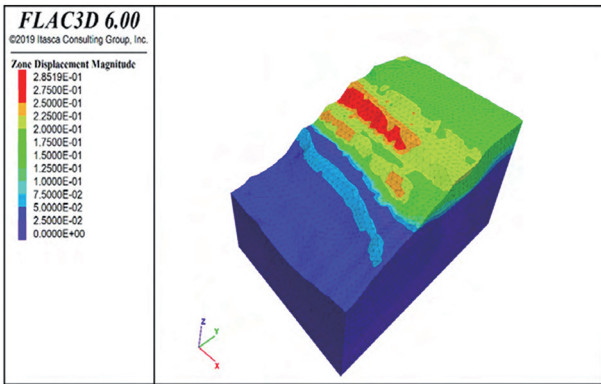


图 5 地形位移云图
Fig. 5 Terrain displacement cloud map

分析并录入边坡速度矢量情况，发现在城市地形的中部有小部分剪应变增量较大，其他区域剪应变增量均较小，由此可得，城市边缘地区无较大运动速度，速度变化区主要分布在城市中部区域。

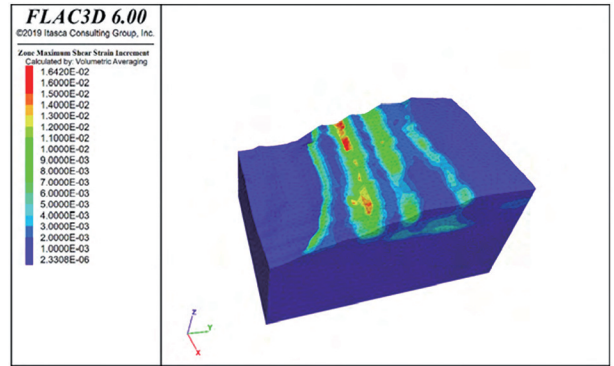


图 6 最大剪应变增量云图
Fig. 6 Cloud image of maximum shear strain increment

3 无人机航摄测量技术的城市数字地形测量

3.1 城市场景融合

根据测绘的方式获得的实际地理位置坐标，在三维空间情景中对真实互联网摄像头的方位和姿势加以仿真，即以网络摄像头方位为中心线构建空间直角坐标系，绕 X、Y 和 Z 轴转动形成翻滚角、俯视角和偏航角，一般用于使网络视频镜头画面水平，翻滚角默认为 0°，结合城市场景融合，有效利用图像特性的智能化搭配，将网上摄像头获得的实时监控视频图片与相同方位 3D 场景各个角度的图片实现特征搭配，过滤出最优化匹配图片，得到虚拟摄像机在相应 3D 场景中的视角参数，从而替换视频投影的真实场景参数的位姿。摄像机姿态参数如下图所示。

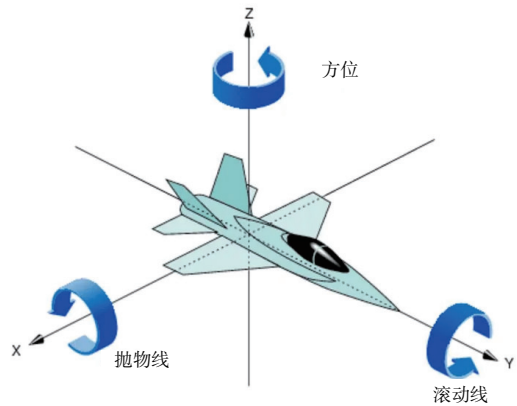


图 7 摄像机姿态参数
Fig. 7 Camera attitude parameters

在城市数字地形的实际观测中，存在建筑稠密、城市道路设计繁杂，植物茂盛等复杂影响因

研究与应用

素,其纹理保真度会影响到 3D 模型的匹配结果。因此,当特定图像点完成提取后,必须通过特定图像点过滤去除干扰点。使用单应矩阵原则,匹配对照图一一对应的特定图像点,并根据对应图像点的最小距离过滤重复的特定图像点,获得精确的特定图像点并以此作为标准搭配最好的视觉角度及数字地形参数^[15]。城市场景融合的自动化配套流程可用图 8 表示。

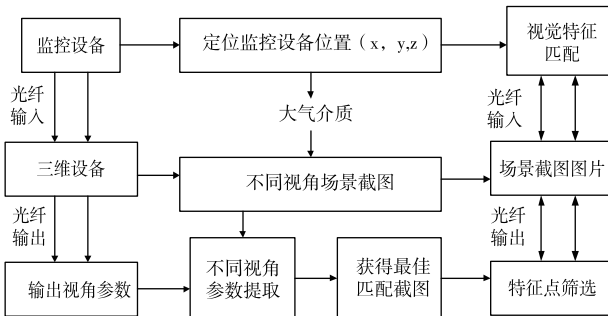


图 8 城市场景融合自动化配套流程

Fig. 8 Automatic matching process of urban scene fusion

3.2 无人机设备的采集数值计算

在实际城市数字地形测量过程中,需要解决无人机设备的采集值,设某个位置的云台测量的水平方位角为 A 和偏斜角为 B 后,并且设云台当前位置和转动后位置分别为 C 值 C_1 、 C_2 和 D 值 D_1 、 D_2 ,再与初始方位的角度参数进行运营得到转动后云台测量的水平方位角 A_1 和偏斜角 B_1 ,可用下列公式表示:

$$A_1 = A + D_2 - D_1 \quad (5)$$

$$B_1 = B + C_2 - C_1 \quad (6)$$

将视场角设定为 E ,则水平视场角可用下列公式表示:

$$E_L = 2\arctan \frac{L}{2F} \quad (7)$$

竖直视场角可用下列公式表示:

$$E_H = 2\arctan \frac{L}{2F} \quad (8)$$

式中: L 代表摄像机运行过程产生的水平宽度, H 代表运行过程得到的水平高度。

3.3 城市场景融合的管理平台

城市数字地形地图的实景融合管理系统分为使用层、业务层、数据分析层和支撑层,采取普

通的 Web 架构实现网络平台构建,其中,使用层作为系统平台的管理部分,起到重要的作用,服务层需实现平台的核心技术,数据层需完成平台数据收集及分析,支撑层需研发平台的核心技术。使用人层分为 4 个功能模块,即数据管理、查询、视频投射、场景操作,这 4 个模块数据通过平台进行服务共享完成各自的目标,以达到优化城市数字地形地图的目的。

利用管理平台对数据进行挖掘,在数据挖掘前需要对数据特征值进行较为规范的归一化处理,提取各特征聚类集合关键属性数值,统一进行数据特征规范化处理,针对数据特征属性的相关性指标划分数据性能序列的特征值区间。使样本数据特征值稳定在某个固定数值区间条件内,进而能够进行离散变换:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(x_k(t)) e^{-k2x'} \quad (9)$$

式中: $x_k(t)$ 表示 t 时间节点的有限长的离散信息数据序列, k 为离散系数。经过离散变换后显示的结果数据能够直观地分析出城市数字测绘位置,从而能够反向推断出数据所存在的聚类集合和节点序列,对地形数据进行挖掘,工作人员根据数据相关关系进行分析和处理,有利于后续工作的顺利进行。

4 实验研究

为了验证本文提出的基于 GIS 和无人机航测测量技术的城市数字地形测量方法,进行实验研究。实验过程的点位分布以及无人机运行轨迹如图 9 所示。

根据检查点分布状况判断城市数字地形误差分布状态,得到的实验结果如下图 10 所示:

根据上图可知,检查点存在随机误差,在不同的分布状态下,误差变化也不同,使用本文提出的测量方法能够很好地应对急剧出现的方位变化,减少误差残留,提高绘制的地形精度,从而更好地满足制图的要求。

本文针对城市地形的开放园区、公园和街区进一步分析无人机轨迹运行状态,选用传统的基

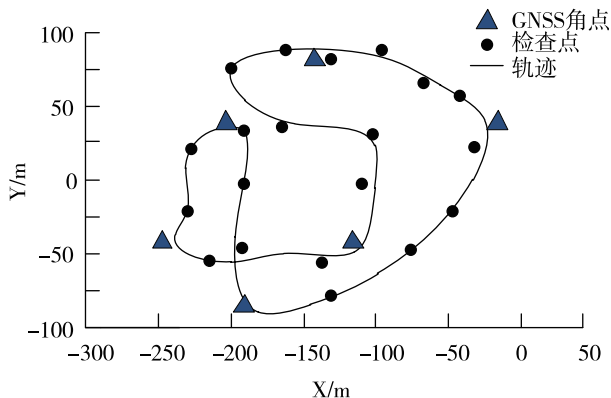


图9 点位分布以及无人机运行轨迹
Fig.9 Point distribution and UAV running track

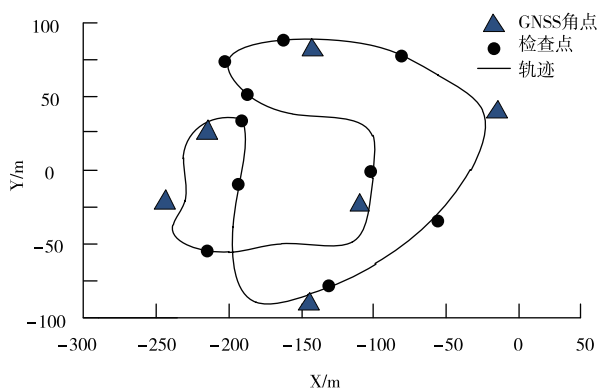


图10 误差分布状态
Fig.10 Error distribution

于三维激光扫描的数字地形测量方法和基于城市测绘的 SLAM 方法进行实验对比, 得到的误差统计结果如下表所示。

表1 统计结果
Table 1 Statistical results

| 数据集 | 方法 | 绝对误差 /% | 轨迹精度 /cm | 坐标精度 /cm |
|---------|----------------|---------|----------|----------|
| 开放园区数据集 | 三维激光扫描 | 1.35 | 3.25 | 2.96 |
| | SLAM 方法 | 2.12 | 5.78 | 3.85 |
| | GIS 和无人机航摄测量技术 | 0.13 | 4.22 | 0.25 |
| 公园数据集 | 三维激光扫描 | 4.28 | 8.77 | 4.97 |
| | SLAM 方法 | 5.22 | 9.24 | 3.81 |
| | GIS 和无人机航摄测量技术 | 0.18 | 2.51 | 2.45 |
| 街区数据集 | 三维激光扫描 | 3.96 | 5.96 | 5.78 |
| | SLAM 方法 | 2.02 | 6.43 | 5.55 |
| | GIS 和无人机航摄测量技术 | 0.17 | 0.22 | 0.24 |

根据上表可知, 本文提出的基于 GIS 和无人

机航摄测量技术的城市数字地形测量方法能够通过量化处理对数字地形进行精准测量, 无人机轨迹的绝对误差在 0.25% 以内, 轨迹精度低于 5 cm, 坐标精度低于 3 cm, 具有极强的城市地形测量能力, 更适用于实际工作中。

5 结论

本文深入分析基于 GIS 和无人机航摄测量技术的城市数字地形测量方法, 得出以下结论:

(1) 本文引入 GIS 技术和无人机摄影技术研究了一种新的数字地形测量方法, 确定无人机运行过程的轨迹, 根据运行结果分析测量的城市地形, 判断飞行坐标, 实现参数调整, 得到城市数字地形, 本文的研究方法可以使城市数字地形与实际地形达到较高的相似度。

(2) 运用无人机航摄测量技术对城市数字地形测量, 同时解算无人机设备的采集数值, 能具有较高准确性地构建和优化城市数字地形地图。

综上所述, 本文研究的数字地形测量方法虽效果优良, 但在实际应用当中仍存在一些不足需继续改进: 在解算 GIS 技术和无人机航摄测量技术采集到的数据时, 平台后方将持续发出请求, 延长投射时间。

参考文献

- [1] 张开坤, 胡帅朋. 地面三维激光扫描仪在城市住宅区大比例尺地形图测量中的应用 [J]. 测绘通报, 2020 (S01): 134-136.
- [2] 孙喜亮, 关宏灿, 苏艳军, 等. 面向高精度城市测绘的激光紧耦合 SLAM 方法 [J]. 测绘学报, 2021 (11): 1585-1593.
- [3] 李璇琼, 梁延龙. 基于 GIS 与无人机技术的地震应急救援系统设计 [J]. 地理空间信息, 2021, 19 (8): 83-85.
- [4] 刘辉喜, 张泽辉, 史豪杰. 基于 GIS 技术的城市明挖隧道深基坑支护施工安全监测方法 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (6): 58-63.
- [5] 丁涛, 付贵, 刘超, 等. 消费级无人机在 1:500 地形图测绘中的应用 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2021, 44 (6): 840-844.
- [6] 金爱兵, 陈帅军, 赵安宇, 等. 基于无人机摄影测量的露天矿边坡数值模拟 [J]. 岩土力学, 2021, 42 (1): 255-264.

研究与应用

- [7] 陈荣. 基于 WEBGIS 技术的地质滑坡测量实时监测系统设
计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (11): 75-78, 83.
- [8] 姜丙波, 柳忠伟, 彭云, 等. 无人机机载激光雷达在抽水
蓄能电站大比例尺地形图测绘中的应用 [J]. 测绘通报,
2021 (S01): 248-251.
- [9] 张欢, 巨能攀, 陆渊, 等. 基于无人机的滑坡地形快速重
建与稳定性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48 (6):
171-179.
- [10] 丁涛, 付贵, 刘超, 等. 消费级无人机在 1: 500 地形图测
绘中的应用 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版,
2021, 44 (6): 840-844.
- [11] 庄钰莹, 熊峰, 吕洋, 等. 基于 GIS 的城市建筑群动力响
应分析模型建模方法研究 [J]. 世界地震工程, 2021, 37
(4): 137-147.
- [12] 林国涛, 孙增奎, 肖斌, 等. 综合无人机, GIS, BIM 技术
的道路设计研究 [J]. 公路, 2021, 66 (3): 23-26.
- [13] 刘超, 雷启云, 余思汗, 等. 基于无人机摄影测量技术
的地震地表破裂带定量参数提取——以 1709 年中卫南 M7
(1/2) 地震为例 [J]. 地震学报, 2021, 43 (1): 113-
123.
- [14] 乔天荣, 马培果, 许连峰, 等. 基于无人机倾斜摄影测量
的关键技术及应用分析 [J]. 矿产勘查, 2020, 11 (12):
2698-2704.
- [15] 陶彭君、熊忠招、龚元夫, 等. 基于 GIS 技术的地名信息
采集系统设计 [J]. 地理空间信息, 2020, 18 (11):
74-76, 79.

(上接第 30 页)

移变化趋势较缓, 处于 25 mm 以下, 当距离小于
6 m, 最大位移快速增大至约 200 mm。

(3) 当掌子面距离溶洞 -18 m ~ -8 m 时, 隧
道掌子面涌水量处于 200 m³/h 以下, 当掌子面距
离溶洞 -8 m ~ -2 m 时, 涌水量迅速增大至
7371 m³/h, 势必发生突水事故。

(4) 隧道掌子面最大位移和涌水量均与溶洞
水压呈指数式增长关系。掌子面开挖遇前方有溶
洞应采取疏水降压以及补强掌子面岩体的措施。

参 考 文 献

- [1] 冯雪冬, 周小龙, 胡亚晴. 岩溶地区隧道突涌水机理的研
究进展 [J]. 武汉工程大学学报, 2022, 44 (3): 250-
259+354.
- [2] 路啸. 运营期隧道渗漏病害无损检测及治理研究 [J].
粘接, 2021, 48 (10): 189-192.
- [3] 蒋雅君, 陶磊, 刘世军, 等. 岩溶隧道衬砌施工缝疏水涂
层长期工作性能研究 [J]. 中国公路学报, 2022, 35 (4):
186-194.
- [4] 张鹏, 潘晓东, 任坤, 等. 岩溶地深埋特长隧道岩溶水
流特征及涌水评估 [J]. 公路, 2022, 67 (2): 337-345.
- [5] 杨坤, 肖维民, 王丽君, 等. 上伏落水洞岩溶隧道围岩力
学响应数值分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17
(S2): 637-644.
- [6] 何松霖. 基于流固耦合的隧道围岩稳定性分析 [J]. 粉煤
灰综合利用, 2020, 34 (5): 6-10.
- [7] 金美海, 刘新荣, 钟祖良. 岩溶隧道拱顶局部水压作用下
衬砌受力特征研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17
(4): 1099-1105+1131.
- [8] 曹林卫, 黄明利, 杨泽, 等. 隧道与溶洞间复合围岩抗水
压能力数值模拟 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (8):
3349-3357.
- [9] 曾斌, 陈植华, 邵长杰, 等. 基于地下水流系统理论的岩
溶隧道涌突水来源及路径分析 [J]. 地质科技通报, 2022,
41 (1): 99-108.
- [10] 郑宗利, 关惠军, 苟想伟, 等. 岩溶隧道突涌水预警体系
的建立 [J]. 灾害学, 2022, 37 (1): 41-46.
- [11] 舒恒, 彭雨杨, 宋明, 等. 超大直径盾构隧道穿越岩溶发
育区地表注浆合理加固范围 [J]. 科学技术与工程,
2021, 21 (25): 10948-10955.