

无人机摄影测量在尾矿坝变形监测分析中的应用

廖文景^{1,2}, 戴 军^{1,2}, 唐鹏飞³

(1. 长沙矿山研究院有限责任公司, 长沙 410012;

2. 湖南省矿山地质灾害防治与环境再造工程技术研究中心, 长沙 410012;

3. 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737103)

摘 要: 由于尾矿坝安全管理范围大, 山地环境特殊, 传统测绘手段难以开展, 尾矿坝变形位移数据仅通过单点或多点的监测方式获得, 因此本文提出一种基于无人机(UAV)摄影测量的尾矿坝变形监测分析方法。该方法通过无人机对尾矿坝两期空间三维地理信息数据的采集, 将采集到的两期数据分别进行三维重建并生成点云模型, 再利用地理信息三维时空对比分析技术对两期点云模型进行对比分析。结果表明: 该方法实现了对尾矿坝由点到面的全方位监测, 监测精度可达厘米级, 为尾矿坝宏观变形监测及异常变形区域的快速核查及安全巡检等提供了依据。

关键词: 尾矿坝; 无人机; 摄影测量; 点云模型; 变形分析

中图分类号: TD926.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-4172(2024)03-0112-06

Application of UAV photogrammetry in monitoring and analysis of tailings dam deformation

LIAO Wenjing^{1,2}, DAI Jun^{1,2}, TANG Pengfei³

(1. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha 410012, China;

2. Hunan Mine Geological Disaster Prevention and Environmental Reconstruction Engineering Technology

Research Center, Changsha 410012, China;

3. Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang Gansu 737103, China)

Abstract: Due to the large scope of safety management of tailings dam and the special mountainous environment, traditional surveying and mapping means are difficult to carry out, and the deformation and displacement data of tailings dam can only be obtained through single or multi-point monitoring. Therefore, this paper proposes a tailings dam deformation monitoring and analysis method based on UAV photogrammetry, which collects the three-dimensional geographic information data of two phases of a tailings dam by UAV. The collected data of the two periods were reconstructed in three dimensions and the point cloud model was generated. The point cloud model of the two periods was compared and analyzed by using the three-dimensional spatiotemporal comparative analysis technology of geographic information. The results show that the method can realize the comprehensive monitoring of tailings dam from point to surface, and the monitoring accuracy can reach cm level, which provides a basis for the macro deformation monitoring of the tailings dam and the rapid verification and safety inspection of abnormal deformation area.

Key words: tailings dam; UAV; photogrammetry; point cloud model; deformation analysis

收稿日期: 2023-11-02

基金项目: 湖南省应急管理厅安全生产预防及应急专项项目(Hunan-201905)

作者简介: 廖文景(1983—), 男, 高级工程师, 硕士, 安全工程专业, 主要从事矿山安全技术咨询与研究工作。E-mail: 65323569@qq.com。

尾矿库是由筑坝拦截谷口或围地构成的, 用于储存选矿厂废弃尾砂的重要生产设施^[1-3]。尾矿库作为矿山最重要最危险的部分, 是矿山事故发生的高频区域, 它的安全对矿山生产具有至关重要的作用, 因此需要实时监测尾矿库坝体变形情况, 找出变

形的位置,对于尾矿库安全稳定运行具有重要意义^[4-6]。

目前,针对尾矿坝坝体变形监测分析,已有不少专家学者做了大量研究。李宗伟等^[7]基于 Mohr-Coulomb 破坏准则的弹塑性模型原理,结合某尾矿坝介绍了其建模分析过程,分析了其应力及变形计算结果的合理性。赵小稚^[8]采用灰色 GM(1,1)模型对尾矿坝的变形进行预测,并结合某金矿尾矿坝变形监测实际数据进行预测,结果表明,模型用于尾矿坝变形趋势预测具有很好的适用性。邱宇等^[9]提出了基于 Verhulst 灰色模型的坝体变形定量分析的思路,得出坝体的变形具有空间和时间效应。张一帆等^[10]利用三维激光扫描技术设计一种新的尾矿坝变形监测方法,通过控制网测量、数据采集、数据预处理、点云建模、变形分析等操作完成对尾矿坝变形监测。张卫中等^[11]针对某尾矿坝的沉降变形监测问题,采用岩土数值模拟软件 SIGMA/W,对其闭库后多年的沉降量进行了模拟计算分析。王乾等^[4]建立了基于 PSO-BP 组合的尾矿坝变形预测模型,并验证了 PSO-BP 组合模型在尾矿坝变形监测数据处理中具有较高的预测精度和拟合精度。LIU 等^[12]以尾矿坝变形为研究重点,以在线监测为行数据,以变形因素为主线,采用小波神经网络的方法,建立预测模型并进行分析。

近年来,随着无人机摄影测量技术和影像三维重建技术的发展,为地理信息的获取带来了极大的便利。通过使用无人机摄影测量技术对同一地形进行多期数据的采集,然后进行三维重建生成带有坐标信息的点云模型,利用点云对比分析软件得出地理空间信息随着时间发生的变化^[13-15]。本文以湖南省某尾矿坝为工程背景,采用无人机摄影测量技术,将该尾矿坝无人机摄影测量获取的两期原始影像数据进行三维重建,然后基于三维重建生成的点云模型对坝坡变形量进行分析。

1 尾矿库概况

该尾矿库为山谷型尾矿库,设计库容 5 255 万 m³。初期坝设计为透水坝,在构筑过程中,所选原料为堆积石块和选厂废石,其两侧设计构筑坡比均为 1:2,在内侧铺设土工布反滤层,坝底标高+256 m,坝高 29 m,坝顶宽度 40 m。堆积坝初期设计所采用的方法为向上游堆积尾砂筑坝,后因尾矿粒度太细,坝前难以形成干滩,因此在原有筑坝方案上进行改

进,联合采用废石、土工布、旋流器沉砂筑坝,其中,堆积坝设计外坡比为 1:4,设计堆积高度 87 m,坝顶宽度 60 m,尾矿堆积至最终标高+370 m时,总高为 116 m。根据《尾矿库安全规程》(GB39496—2020),该尾矿库为三等库,但其总坝高接近二等库的高度,因此提高管理标准,将其按二等库管理。由于该尾矿坝安全管理范围大,山地环境特殊,传统测绘手段难以开展,尾矿坝变形位移数据仅通过单点或多点的监测方式获得,难以实现尾矿坝由点到面的全方位监测,并且监测精度不高。

2 尾矿坝无人机影像获取及三维点云数据建立

本研究选取湖南省某尾矿坝为研究区域,利用大疆精灵 Phantom 4 RTK 进行倾斜摄影测量,相机型号为:FC6310R;相机焦距:8.8 mm;像元大小:2.41 μm。尾矿坝区域飞行相对高度设为 100 m,分辨率为 2.74 cm/pixel,相机倾角设置为 60°,航向重叠度和旁向重叠度均为 70%,航线之间采用交叉飞行的方式进行航线设计,数据采集周期为 10 个月,共获取了 2019 年 8 月和 2020 年 6 月两期无人机航测影像集,然后利用 DJI Terra 软件分别对两期航拍影像集进行三维重建生成点云模型。如图 1 所示为无人机摄影测量技术流程图。

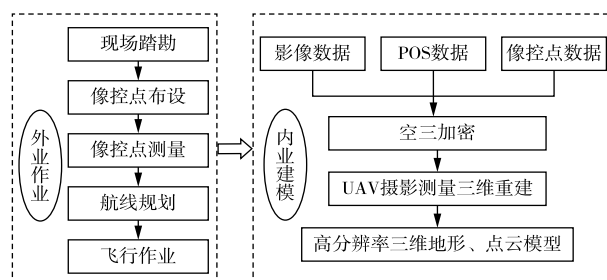


图1 摄影测量技术流程图

Fig. 1 Flow chart of photogrammetric techniques

在进行点云变形分析之前,对点云模型进行预处理,去除噪声点,并对其进行点云配准,预处理后两期点云模型如图 2 所示。在两期点云模型中可以明显的看出,在第一次数据采集时尾矿坝部分区域进行了覆绿工作,而在第二次采集数据时由于当地气候连续多天干旱,导致覆绿的植被大多已经干枯,难免会产生误差,本次研究为了尽可能降低覆绿对尾矿坝变形分析的影响,选取坝体中间包含道路和部分区域未覆绿的部分分析其变形量。



图 2 2019 年 8 月(左)和 2020 年 6 月(右)尾矿坝点云模型
Fig. 2 Tailings dam point cloud models in August 2019(left) and June 2020(right)

3 尾矿坝变形监测分析

3.1 两期点云模型对比分析

将两期摄影测量生成的点云模型导入到点云分析软件中,首先使用软件中的裁剪功能对其分别进行裁剪,使得两期点云模型对比范围一致,图 3 为两期点云模型裁剪后进行对比分析的范围。

两期点云模型对比范围确定后,依据点云分析软件中提供的对齐功能,将第一期重建点云模型设置为参考模型,第二期点云模型设置为测试模型,然后建立特征点,使得两期模型对齐,对齐后不同位置的变形量通过色谱图来渲染,并且软件会自动计算出对比后的 3D 偏差、最大和最小偏差以及平均偏差和标准偏差,图 4 为两期点云模型对比色谱图,从图中左下角可以看出两期尾矿坝模型对比区域中的最大正偏差为 15.23 cm,最大负偏差为 -15.42 cm,平均正偏差为 +3.26 cm,平均负偏差为 -3.22 cm,标准偏差为 3.73 cm。

3.2 特征点变形量对比分析

点云分析软件提供了色谱注释功能,通过对待分析的点添加色谱注释,能够在色谱图中直观地分析出每一点的色值分别在 X、Y、Z 轴方向以及 3D (模型整体)的变形量,并对每个点设置允许偏差值,软件将依据设置的偏差允许范围,自动计算出当前点的状态,若当前点的偏差大于设定值,会显示失败,当偏差在设定的范围内时,则该点的状态显示为通过,因此利用该功能可以快速地识别出异常点的位置。

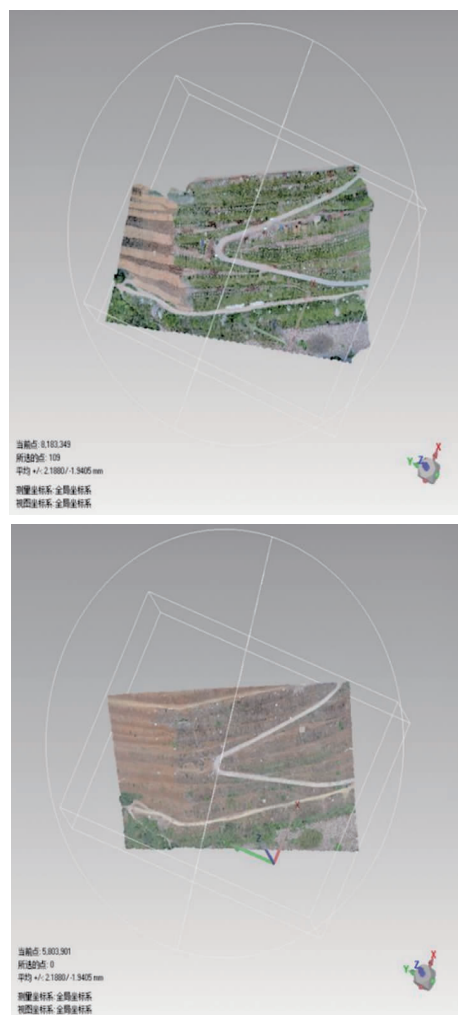


图 3 两期点云模型对比范围

Fig. 3 Comparison range of two phase point cloud models

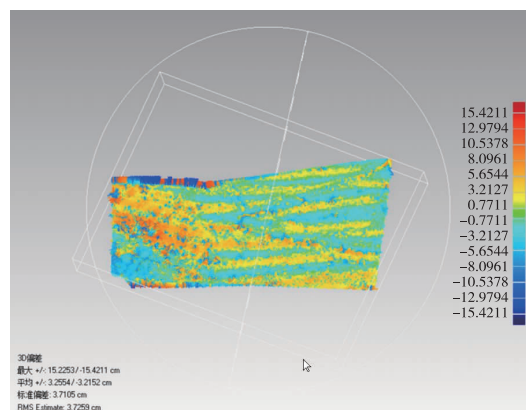


图 4 两期点云模型对比色谱图

Fig. 4 Comparison chromatogram of two phase point cloud model

本次试验选取两期点云模型对比色谱图中具有代表性的 8 个点进行注释,分别为 A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8,如图 5 点云模型色谱注释图所示。从图中可以直观地看出所注释的色谱分别在 X、Y、

Z轴方向以3D(模型整体)的变形量,如图中A1点处DX的偏差为-1.974 cm、DY的偏差为-0.511 cm、DZ的偏差为3.33 cm,3D偏差为3.90 cm,可以看出该点在Z轴方向的偏差大,而在X和Y轴方向的偏差很小,再对比其它点在三个坐标轴方向的偏差也会发现其主要偏差在DZ,也就是高程方向的偏差

较大,而水平方向的偏差很小,结合实际情况中坝坡的台阶上通常有工作人员进行巡检以及覆绿植被等均会造成影响,因此在高程方向偏差较大,和实际情况相符。此外,从两期点云模型对比色谱图中也可以看出,色谱图明显成条带状分布,结合实际情况分析可知这是由于坝坡台阶覆绿造成的影响。

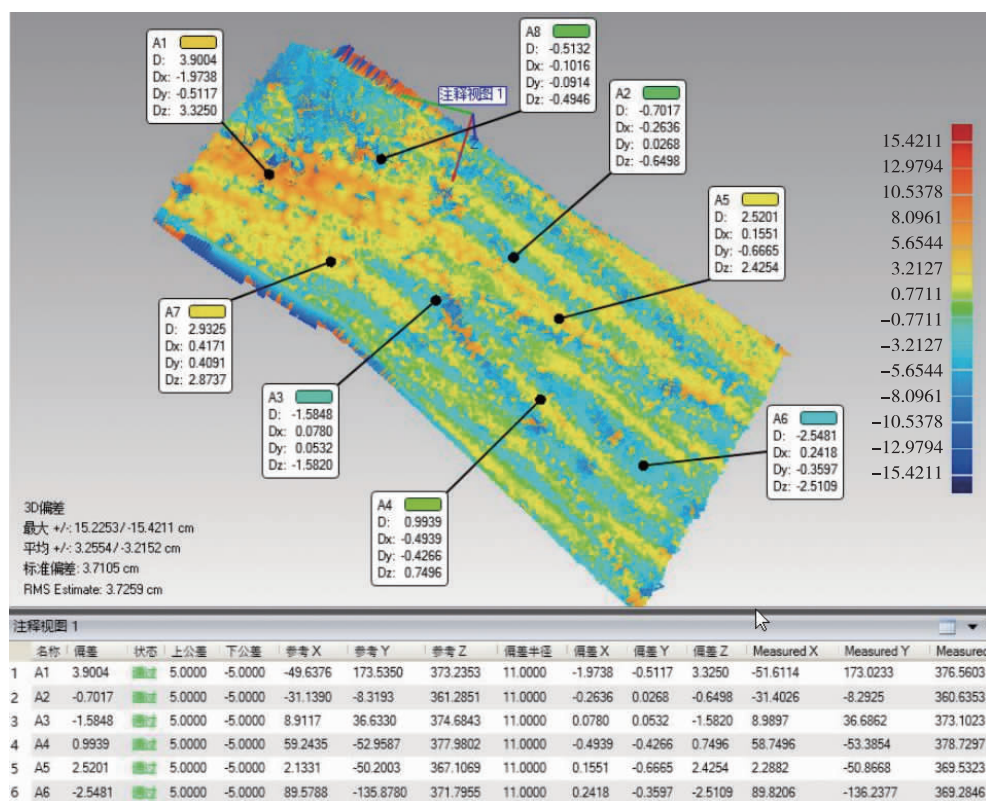


图5 点云模型色谱注释图

Fig. 5 Chromatographic annotation of point cloud model

3.3 计算结果综合分析

点云模型对比完成后,根据对比结果,软件将自动生成点云模型对比分析报告,点云模型分析报告

主要为两期点云对比中点云数量在不同变形量区间的分布情况以及最大偏差和平均偏差,表1为两期点云对比分析报告中的偏差分布表,图6为点云对

表1 点云模型对比偏差分布表

Table 1 Comparison deviation distribution table of point cloud model

$\geq$ Min/cm	$\leq$ Max/cm	点云数量/个	占比/%
-15.421 1	-12.979 4	1 234	0.098 8
-12.979 4	-10.537 8	3 849	0.308 2
-10.537 8	-8.096 1	8 439	0.675 8
-8.096 1	-5.654 4	42 958	3.439 9
-5.654 4	-3.212 7	170 366	13.642 1
-3.212 7	-0.771 1	318 314	25.489 2
-0.771 1	0.771 1	37 108	2.971 4
0.771 1	3.212 7	372 157	29.800 7
3.212 7	5.654 4	225 301	18.041 1
5.654 4	8.096 1	57 981	4.642 9
8.096 1	10.537 8	9 212	0.737 7
10.537 8	12.979 4	1 840	0.147 3
12.979 4	15.421 1	61	0.004 9

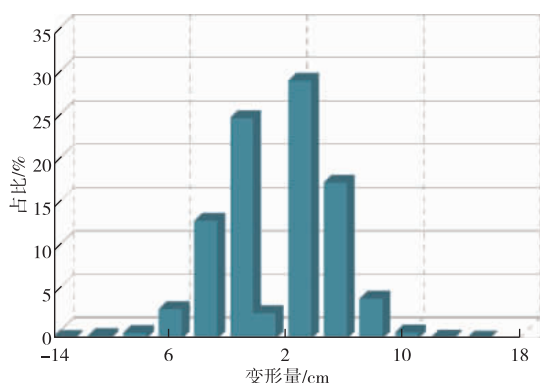


图6 点云模型对比偏差分布图

Fig. 6 Contrast deviation distribution of point cloud model

比分析中的偏差分布柱状图。

从点云模型对比偏差分布表和分布图中可以看出,本次点云模型中点云的总数为1 248 821个,其中偏差在 ± 3.21 cm区间的点云数量占比最大,达到58.26%,绝对偏差大于8.1 cm的点云数量总共占比为1.97%,可以看出偏差大于8.1 cm的点云数量很少,在图4两期点云模型对比色谱图找出变形量较大的点,结合原始点云模型进行对比,未发现异常,综上可以得出两期点云模型变形量基本在厘米级范围内,标准偏差为3.73 cm,考虑到实际情况中坝坡表面通常有工作人员进行巡检以及坝坡覆绿植被等均会造成影响。该方法实现了对尾矿坝由点到面的全方位监测,为尾矿坝宏观变形监测及异常变形区域的快速核查及安全巡检等提供了依据。

4 讨论

本文提出的基于无人机摄影测量的尾矿坝表面变形监测分析方法目前仍有需要继续改进与完善的方面,无人机摄影测量作为一种新型的测量方法,虽然有很多的优势,但和使用高精度便携仪器测量的坝面位移监测点数据相比,坝面位移监测点的精度达到毫米级,而摄影测量数据的精度为厘米级,摄影测量的精度不及坝面位移监测点的精度。造成无人机摄影测量精度低的主要原因是无人机在航飞过程中拍照时,由于网络等原因,难免在拍摄时会存在延迟的情况;此外,无人机在进行航拍作业时由于电机转动和风速的影响,也会影响每张影像的定位精度。

随着无人机低空遥感技术的发展,将无人机搭载LiDAR、可见光、热红外等传感器在同一研究区域进行多次飞行获取不同种类的数据,实现多类型遥感载荷集成,可以获取更高精度的数据^[16-18]。将5G技术应用到无人机摄影测量领域,5G网络由于

具有超低时延的特性,数据传输可以实现毫秒级的传输时延,尤其对于在执行航拍任务时的无人机,在拍摄影像时,响应速度更快,地面控制人员可以准确地操控无人机,从而使每张影像的位置信息也更加准确^[19]。

5 结论

1)通过对该尾矿坝两期点云模型对比分析可得:对比区域中的最大正偏差为15.23 cm,最大负偏差为-15.42 cm,平均正偏差为+3.26 cm,平均负偏差为-3.22 cm,标准偏差为3.73 cm。

2)通过对两期点云模型8个特征点X、Y、Z轴方向以及3D(模型整体)的变形量进行分析可得,所有特征点在Z轴方向的偏差大,而在X和Y轴方向的偏差很小,是由于坝坡台阶覆绿造成的影响。

3)相较于目前尾矿坝应用较多的单点或多点监测方式,基于无人机摄影测量的尾矿坝边坡表面变形监测分析方法能够快速准确地获取尾矿坝边坡的整体变形和细节变化,监测精度可达厘米级。

4)该方法实现了对尾矿坝由点到面的全方位监测,为尾矿坝宏观变形监测及异常变形区域的快速核查及安全巡检等提供了依据。

参 考 文 献

- [1] 田文旗,薛剑光.尾矿库安全技术与管理[M].北京:煤炭工业出版社,2006.
TIAN Wenqi, XUE Jianguang. Safety technology and management of tailings ponds [M]. Beijing: Coal Industry Press, 2006.
- [2] 沈楼燕,李连通,张超,等.我国尾矿库安全监测技术发展综述[J].有色金属工程,2023,13(1):121-126.
SHEN Louyan, LI Liantong, ZHANG Chao, et al. Overview of the development of safety monitoring technology for tailings ponds in China [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(1): 121-126.
- [3] 侯建斌.尾矿库工程地质特性和稳定性分析——评《尾矿库工程地质特性与稳定性研究》[J].矿业研究与开发,2020,40(1):160.
HOU Jianbin. Analysis of geological characteristics and stability of tailings pond engineering: review of "research on geological characteristics and stability of tailings pond engineering" [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(1): 160.
- [4] 王乾,赵杰,王要善.基于PSO-BP组合模型的尾矿坝变形预测[J].地理空间信息,2022,20(11):119-122,128.
WANG Qian, ZHAO Jie, WANG Yaoshan. Prediction of tailings dam deformation based on PSO-BP combination model [J]. Geospatial Information, 2022, 20(11): 119-122, 128.

- [5] 袁利伟,李素敏.尾矿库溃坝灾害风险分析理论与实践[M].北京:电子工业出版社,2017.
YUAN Liwei, LI Sumin. Theory and practice of risk analysis for tailings dam failure disasters [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2017.
- [6] 詹京晶,肖田元.基于GPS数据的尾矿坝监测系统的研究与应用[J].中国安全生产科学技术,2013,9(4):5-10.
ZHAN Jingjing, XIAO Tianyuan. Research and application of tailings dam monitoring system based on GPS data[J]. China Safety Production Science and Technology, 2013, 9(4): 5-10.
- [7] 李宗伟,许灵.基于弹塑性理论的尾矿坝应力及变形研究[J].东北水利水电,2012,30(6):3,28,71.
LI Zongwei, XU Ling. Research on stress and deformation of tailings dams based on elastic-plastic theory [J]. Northeast Water Resources and Hydropower, 2012, 30(6): 3, 28, 71.
- [8] 赵小稚.基于GM(1,1)模型的尾矿坝变形趋势预测[J].山东理工大学学报(自然科学版),2012,26(5):36-39.
ZHAO Xiaozhi. Prediction of deformation trend of tailings dams based on GM (1, 1) model [J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 26(5): 36-39.
- [9] 邱宇,项宏海,汪斌.基于Verhulst模型的尾矿坝变形监测数据分析[J].现代矿业,2013(10):68-70.
QIU Yu, XIANG Honghai, WANG Bin. Analysis of deformation monitoring data for tailings dams based on the Verhulst model[J]. Modern Mining, 2013(10): 68-70.
- [10] 张一帆,张硕.三维激光扫描技术在尾矿坝变形监测中的应用研究[J].世界有色金属,2019(18):265-267.
ZHANG Yifan, ZHANG Shuo. Application research of three-dimensional laser scanning technology in deformation monitoring of tailings dams [J]. World Nonferrous Metals, 2019(18): 265-267.
- [11] 张卫中,陈赞宇,康钦容,等.某铜尾矿库子坝坝体变形与沉降量数值模拟[J].矿业研究与开发,2016,36(4):86-89.
ZHANG Weizhong, CHEN Zanyu, KANG Qinrong, et al. Numerical simulation of deformation and settlement of the sub dam body of a copper tailings pond [J]. Mining Research and Development, 2016, 36(4): 86-89.
- [12] LIU P P, HAO Y J. The research of tailings pond deformation displacement prediction based on wavelet neural network [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 271-272: 1726-1730.
- [13] 杨超,杨鹏,吕文生,等.基于无人机摄影测量的尾矿坝边坡表面变形监测[J].中国安全生产科学技术,2021,17(5):5-11.
YANG Chao, YANG Peng, LYU Wensheng, et al. Surface deformation monitoring of tailings dam slopes based on drone photogrammetry [J]. China Safety Production Science and Technology, 2021, 17(5): 5-11.
- [14] 闫石,林荡,李胜宣,等.基于无人机倾斜摄影的三维重建技术在崩岸监测中的应用[J].成都工业学院学报,2023,26(1):34-39.
YAN Shi, LIN Dang, LI Shengxuan, et al. The application of three-dimensional reconstruction technology based on drone oblique photography in landslide monitoring [J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 2023, 26(1): 34-39.
- [15] 毛亚纯,伏雨文,曹旺,等.基于无人机点云数据的露天采场矿车提取方法[J].东北大学学报(自然科学版),2021,42(6):842-848,863.
MAO Yachun, FU Yuwen, CAO Wang, et al. A method for extracting open-pit mining vehicles based on unmanned aerial vehicle point cloud data [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2021, 42(6): 842-848, 863.
- [16] 侯方国,刘欣,任秀波.无人机倾斜摄影与LiDAR融合监测技术[J].测绘通报,2022(11):128-131.
HOU Fangguo, LIU Xin, REN Xiubo. Drone tilt photography and LiDAR fusion monitoring technology [J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2022(11): 128-131.
- [17] 廉旭刚,韩雨,刘晓宇,等.无人机低空遥感矿山地质灾害监测研究进展及发展趋势[J].金属矿山,2023,52(1):17-29.
LIAN Xugang, HAN Yu, LIU Xiaoyu, et al. Research progress and development trend of unmanned aerial vehicle low altitude remote sensing for monitoring geological hazards in mines [J]. Metal Mine, 2023, 52(1): 17-29.
- [18] 樊冰,胡晓宇,马良,等.无人机LiDAR及倾斜摄影测量技术在复杂河道工程测绘中的融合研究[J].水运工程,2023(1):11-17,28.
FAN Bing, HU Xiaoning, MA Liang, et al. The fusion research of unmanned aerial vehicle LiDAR and oblique photogrammetry technology in complex river engineering surveying [J]. Water Transport Engineering, 2023(1): 11-17, 28.
- [19] 宣润通,杨浩,刘成,等.基于5G技术的无人机侦查系统设计[J].价值工程,2019,38(16):158-160.
XUAN Run tong, YANG Hao, LIU Cheng, et al. Design of unmanned aerial vehicle reconnaissance system based on 5G technology [J]. Value Engineering, 2019, 38(16): 158-160.