

控制点布设方案对无人机精度测量的影响及其应用

戴 嵩, 魏冠军, 梁 斌

Influence of control point number on UAV low-altitude photogrammetry and its application: A case study in subsidence monitoring of a tailing dam area in northwestern China

DAI Song, WEI Guanjun, and LIANG Bin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

无人机载LiDAR和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期识别中的应用

The application of UAV LiDAR and tilt photography in the early identification of geo-hazards

贾虎军, 王立娟, 范冬丽 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 60-65

面向东川复杂山地泥石流沟谷三维地形建模及特征分析的无人机遥感探测应用研究

Application research of unmanned aerial vehicle remote sensing detection for 3D terrain modeling and feature analysis of debris flow gullies in complex mountainous area of Dongchuan

毕瑞, 甘淑, 李绕波, 胡琳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 91-100

西藏笨多高位变形体遥感解译与危险性预测分析

Remote sensing interpretation and risk prediction analysis of Benduo high deformation body in Tibet

卫童瑶, 殷跃平, 李滨, 褚宏亮, 高杨, 王猛, 赵超英, 刘晓杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 17-24

国产GB-InSAR在特大型水库滑坡变形监测中的应用

Application of GB-InSAR in deformation monitoring of huge landslide in reservoir area

郭延辉, 杨溢, 杨志全, 高才坤, 田卫明, 何玉童 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 66-72

采煤区地表拉张裂缝演化及其控制因素物理模拟试验

Physical model experiment on formation of surface tension fractures and their controlling factors in a coal mining area

黄河, 冯宇, 严家平, 鲁海峰, 刘伟, 郭宝伟, 尚相春 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 93-98

基于增量加载法的泥石流拦挡坝抗冲击力数值模拟

Numerical simulation of impact resistance of debris flow dam: A case study of the debris flow dam in Sanyanyu Gully, Zhouqu County, Gansu Province

刘兴荣, 魏新平, 陈豫津, 王翔宇 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 78-83



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-14

控制点布设方案对无人机精度测量的影响及其应用 ——以西北地区某尾矿坝地表沉降监测为例

戴 嵩^{1,2,3}, 魏冠军^{1,2,3}, 梁 斌^{1,2,3}

(1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:近年来矿区地质灾害愈发严重。为准确监测尾矿坝地表沉陷变形,以地形地貌复杂的尾矿坝为研究实例,开展无人机低空摄影的形式进行监测数据收集。无人机原始 POS 数据存在系统误差的问题,文章利用误差改正模型纠正原始 POS 数据,并设计 7 种像控点布设方案,并对获取的尾矿坝高分辨率正射影像及 DEM 进行了精度评价。结果显示,当布设像控点数量为 8 个时,数据误差可以控制在 3 mm 以内;用两期 DEM 数据差值覆于地面模型,生成尾矿坝沉降图,沿 $Y=350\text{ m}$ 、 $Y=100\text{ m}$ 和 $X=60\text{ m}$ 剖面线做剖面图。基于测量结果发现,尾矿坝已出现整体沉降,其中南部尾矿坝下坡沉降范围最大,沉降范围在 0.16 m 之内。这次应用验证了在尾矿坝地表监测中无人机低空摄影测量的精度是可靠的。利用无人机的高精度成图方法对尾矿坝变形进行监测,对应急响应溃坝可能导致的绿洲地区及周边河湖生态灾难地形和矿区安全生产起到一定的预警作用。

关键词:无人机摄影测量;尾矿坝地表沉陷;误差改正;变形分析

中图分类号: V279⁺.2; P642.26

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)05-0113-08

Influence of control point number on UAV low-altitude photogrammetry and its application: A case study in subsidence monitoring of a tailing dam area in northwestern China

DAI Song^{1,2,3}, WEI Guanjun^{1,2,3}, LIANG Bin^{1,2,3}

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Nation-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Geological disasters in mining areas have become more and more serious in recent years. For accurate monitoring of surface subsidence with complex topography of tailings dam, based on the monitoring data of UAV(Unmanned Aerial Vehicle) low-altitude photogrammetry, the UAV original POS(Position and Orientation System) data error were improved, data from the error correction model was used to correct the original POS model and 7 kinds of control point layout were designed, high resolution evaluation was conducted on the orthogonal projection as well as the DEM(Digital Elevation Model) accuracy. The

收稿日期: 2021-01-01; **修订日期:** 2021-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目:基于数据同化的高铁路基冻胀变形分析与时空预报研究(41964008);祁连山北部基岩河道宽度及共构造抬升的响应研究(41771002);兰州交通大学“百名青年优秀人才培养计划”(152022);兰州交通大学优秀平台(201806)

第一作者: 戴 嵩(1996-),男,山东德州人,建筑与土木工程专业,硕士研究生,目前从事无人机摄影测量及矿区灾害方面的研究。

E-mail: 731841719@qq.com

通讯作者: 魏冠军(1976-),男,甘肃平凉人,测绘工程专业,博士,教授,博士生导师,目前从事测量数据处理,地质灾害预警方面的研究。

E-mail: 77217808@qq.com

results show that when the number of image control points is 8, the data error can be controlled within 3 mm. The settlement map of the mining dam is generated by overlaying the ground model with the difference values of the two DEM data, and the profiles with $Y=350$ m, $Y=100$ m and $X=60$ m were made respectively. The measurement results indicated that the tailing dam has been subsided as a whole, and the southern mining dam has the largest subsidence area, which is within 0.16 m. This application verifies that the accuracy of UAV low altitude photogrammetry in mining dam surface monitoring is reliable. The high-precision mapping method of UAV is used to monitor the deformation of tailing dam, which plays a certain early warning role in the ecological disaster terrain of the oasis area and the surrounding rivers and lakes which may be caused by the emergency response of dam break and the safe production of mining area.

Keywords: UAV photogrammetry; mine dam surface subsidence; error correction; deformation analysis

0 引言

近年来,矿区地质灾害愈发严重,其中尾矿坝由于堆放工业废渣及废弃物,具有高势能,存在人造泥石流溃坝危险^[1]。矿山环境污染是采矿活动引发的主要环境问题之一,基于尾矿坝严重的安全隐患,世界上很多国家把对尾矿坝的安全监测列为国家劳动部门安全监察的重要内容^[2-4]。当险情发生时,由于灾区环境风险,常规的监测手段无法及时获取灾情。无人机同现有的常规手段相比,可以解决灾情勘察人员由于安全隐患无法接近灾区的问题,能够快速获取空间要素,具有高精度、高时效、低成本的优势,是一种快速部署、零伤亡的灾情获取技术手段^[5-9]。利用无人机遥感监测地面空间要素一直是学者们关注的热点。文献[10]进行了单相机无人机航摄试验,并开发了相应的地面监测软件;文献[11]对辽宁省某市铁矿开采区域进行了无人机动态遥感监测;文献[12]利用无人机摄影测量监测程潮铁矿西部塌陷区的地表塌陷变形。文献[13]利用无人机影像对云南省滇东北地区滑坡的活动性、发生发展过程进行监测,分析山体滑坡体特征。文献[14]以锦屏二级水电站出线场边坡落石灾害所在区域为例,将无人机摄影测量技术应用于高陡边坡危岩体调查中。随着无人机技术应用范围越来越广泛,这为尾库坝监测防灾及精细测量提供一种新思路。

采用无人机技术进行沉陷监测具有非接触性,大面积采集监测数据的优点。获取高精度的成图是无人机监测的保证。本文基于无人机低空摄影测量获取的航摄照片,经 POS(Position and Orientation System) 数据误差纠正,选取合理的像控点布设方案,利用获取的尾矿坝高分辨率两期 DEM(Digital Elevation Model) 数据进行尾矿坝沉降变形分析,对 $0 \sim 120$ m, $Y=0 \sim 700$ m 地表高程主要分析区域的变化情况做剖面分析,精度符合实际要求,为实际工况下无人机低空摄影测量提供参考,

具有一定工程应用价值。

1 无人机低空摄影成图方法

无人机低空摄影测量是对地面监测的一种新型手段。无人机采集地表信息的一般流程有航线规划、布设像控点和提取信息,它通过获取高清晰度航摄影片,获取 POS 数据,联系地面控制点,利用畸变改正等方法,经过空三解算,获取高精度 DEM 数据以及高分辨率正射影像^[15-16]。无人机低空摄影测量获取的航片需要确定投影坐标以及 DEM 数据网格间距,精度越高则分辨率越高^[17]。基于无人机低空摄影测量的尾矿坝地表沉降主要技术流程如图 1 所示。

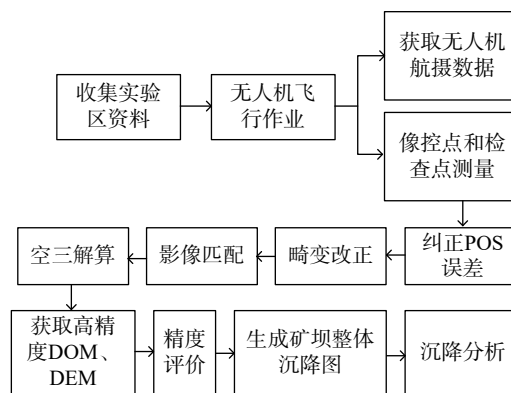


图 1 无人机监测应用流程

Fig. 1 UAV monitoring application process

2 无人机航测影像 POS 数据系统误差分析

无人机低空摄影测量有一定的系统误差,对数字摄影测量精度造成影响的原因有很多种,但是最重要的是相机的分辨率;相机拍摄时存在的安置误差;原始 POS 数据系统误差^[18]。通过设计合理的航飞方案可以提高影像质量,提高航片的重叠度减少误差,建立误差改正模型纠正原始 POS 数据系统误差。无人机飞行时的 6 个外方位元素 $X_s, Y_s, Z_s, \phi, \omega, K$ 是由共线方程反算

得到, 这是摄影测量的一个基本问题^[19-20]。共线方程的建立如式(1):

$$\begin{aligned} x - x_0 + \Delta x &= -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)} \\ y - y_0 + \Delta y &= -f \frac{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: x_0, y_0 ——像主点;

x, y ——以像主点为原点的像平面坐标;

$\Delta x, \Delta y$ ——相机畸变改正数;

f ——像片主距;

X_s, Y_s, Z_s ——外方位线元素;

X, Y, Z ——物点的地面坐标;

$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ ——旋转矩阵的 9 个元素。

通过地面控制点反算获取影像精确的外方位元素, 得到 POS 数据误差的改正参数, 建立两种针对单张相片和多张相片的误差改正模型。其中单张相片误差改正公式如式(2):

$$\begin{cases} \Delta X_{Pi} = X_i - X_{Pi}, \Delta Y_{Pi} = Y_i - Y_{Pi} \\ \Delta Z_{Pi} = Z_i - Z_{Pi}, \Delta \Phi_{Pi} = \Phi_i - \Phi_{Pi} \\ \Delta \Omega_{Pi} = \Omega_i - \Omega_{Pi}, \Delta K_{Pi} = K_i - K_{Pi} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $X_{Pi}, Y_{Pi}, Z_{Pi}, \Phi_{Pi}, \Omega_{Pi}, K_{Pi}$ ——原始 POS 数据的外方位元素;

$X_i, Y_i, Z_i, \Phi_i, \Omega_i, K_i$ ——地面控制点反算获取的外方位元素;

i ——表示计算的影像张数, $i = 1, 2, \dots, n$;

$\Delta X_{Pi}, \Delta Y_{Pi}, \Delta Z_{Pi}, \Delta \Phi_{Pi}, \Delta \Omega_{Pi}, \Delta K_{Pi}$ ——表示第 i 张影像外方位元素的改正值。

如果选取多张相片进行误差改正, 则误差取平均值计算多张相片误差改正公式如式(3):

$$\begin{cases} \Delta X_p = \sum_{i=1}^n \Delta X_{Pi} / n, \Delta Y_p = \sum_{i=1}^n \Delta Y_{Pi} / n \\ \Delta Z_p = \sum_{i=1}^n \Delta Z_{Pi} / n, \Delta \Phi_p = \sum_{i=1}^n \Delta \Phi_{Pi} / n \\ \Delta \Omega_p = \sum_{i=1}^n \Delta \Omega_{Pi} / n, \Delta K_p = \sum_{i=1}^n \Delta K_{Pi} / n \end{cases} \quad (3)$$

通过改正模型纠正原始 POS 数据误差如表 1 所示。

3 实验区概况与控制点布置方案

3.1 实验区概况

本次实验区深处亚欧大陆腹地, 地形地貌复杂, 气候干旱少雨, 绿洲生态维持主要依赖高山雨雪形成的河流。尾矿坝较多, 属典型的山谷型尾矿库。其中研究区

表 1 外方位元素的改正值和误差来源

Table 1 Correction values and error sources of elements with external orientation

外方位元素	改正值	改正误差
X_i	奇数行带 ΔX_P	相反性误差 偏移误差
	偶数行带 $-\Delta X_P$	
Y_i	奇数行带 ΔY_P	相反性误差 偏移误差
	偶数行带 $-\Delta Y_P$	
Z_i	ΔZ_P	偏移误差
Φ_i	$\Delta \Phi_P$	
Ω_i	$\Delta \Omega_P$	视准轴误差
K_i	ΔK_P	

尾矿坝具有高势能的人造泥石流危险源, 一旦溃坝容易造成特重大事故和河流污染, 对矿区的安全及其它方面也会产生一定影响。尾矿坝位于图 2 所示的研究范围内, 尾矿坝用于存放工业废渣, 而且在进行数据采集之前就已经出现过部分边坡的滑落。因此需要对尾矿坝进行无人机摄影测量监测, 通过数据分析判断边坡是否再次出现滑坡灾害, 以确保矿区地质安全^[21-22]。

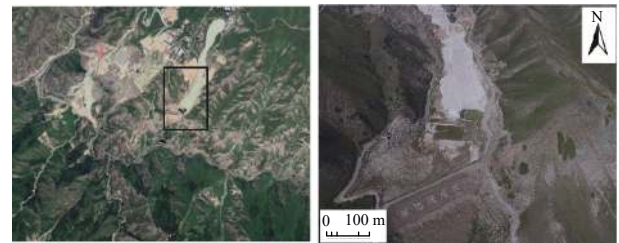


图 2 实验区研究范围

Fig. 2 Research scope of the experimental area

3.2 控制点布置方案

为获取实验区无人机影像, 设计合理的飞行方案, 分别在 2018 年 8 月 2 日及 2019 年 8 月 5 日采用固定翼和多旋翼无人机对实验区进行航拍, 获取两期原始航片数据。为了保证生成具有高精度的 DEM, 飞行前在地面做好控制点并记录其大地坐标, 将控制点清晰记录在影像上。无人机飞行参数设置相对航高为 95 m, 航向重叠度为 85%, 旁向重叠度为 80%。在完成航摄后, 应对照片进行质量检查, 主要包括: 照片的清晰度和重叠度, 有没有航摄漏洞, 航摄区域与需要观测区域的覆盖情况。如果在检查时发现有些照片不符合要求, 进行补飞, 以免影响后续处理的精度^[23]。

控制点的选取和布设可以保证低空摄影测量的精度。做空中三角测量需要布设的地面控制点和检查点进行区域网平差^[24]。采用高精度水准仪按照一等测量规范在实验区域架设仪器获取两期尾矿坝区域控制点

高程数据,高精度全站仪获取控制点点位数据。实验区主要为尾矿坝区域,矿区两侧有山路环绕,便于行走及架设仪器。因此以尾矿坝为主要区域,然后沿矿区两侧山路在路边进行布设控制点。

针对控制点数量对成图的精度影响问题,在第一次航拍前实验选取最佳控制点数量提高成图精度。参考“均匀布设原则”,按照控制点依次增加 2 个,最后累加到 14 个的 7 种控制点布设方案。建模时,把用全站仪及水准仪测量的对应控制点坐标及高程输入到软件中,并且把纠正过的 POS 数据输入到 Pix4Dmapper 软件中,建立对应的三维立体模型。对生成的模型进行分析,读取不同控制点布设方案下各控制点的坐标,比较平面及高程精度。经过处理的 7 种控制点布设方案的数据误差如图 3 所示。

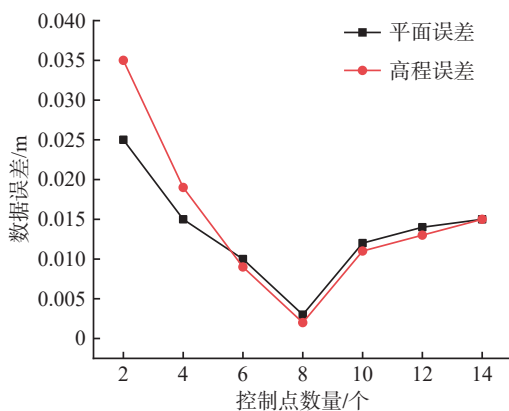


图 3 7 种布设方案的控制点误差

Fig. 3 Control point errors of seven layout schemes

由图 3 可以看出,随着控制点数量的增加,数据精

度也在逐渐增加,数量到达 8 个之后,精度逐渐降低并趋于稳定,所以此次尾矿坝控制点数量选取为 8 个,数据精度达到最高。

将原始外方位元素代入控制点坐标进行反算,利用 Matlab 软件设计系统误差改正模型计算出 POS 数据改正参数,然后对原始 POS 数据进行改正。选取第一期部分影像原始 POS 数据与纠正后 POS 数据对比如表 2 所示。

表 2 原始 POS 数据与纠正后 POS 数据对比
Table 2 Comparison of original POS data and corrected POS data

ID	$ \Delta X /m$	$ \Delta Y /m$	$ \Delta Z /m$	$ \Delta \Phi_P /(^\circ)$	$ \Delta \Omega_P /(^\circ)$	$ \Delta K_P /(^\circ)$
D35	0.013	0.046	0.093	0.18	0.13	0.87
D36	0.056	0.099	0.034	0.20	0.43	0.50
D42	0.074	0.060	0.089	0.47	0.59	0.61
D43	0.025	0.054	0.051	0.78	0.78	0.84
D92	0.076	0.012	0.060	0.14	0.11	0.26
D93	0.047	0.083	0.081	0.28	0.25	0.55

由表 2 可以看出改正的外方位元素精度得到提高,生成的正射影像及 DEM 数据相对提高。此次获得的原始 POS 数据精度较高,经区域网平差后,线元素误差在 0.1 m 以内,角元素误差在 1° 以内,但还是满足不了沉降观测高精度的要求,所以需要纠正 POS 数据提高精度。用 Pix4Dmapper 软件进行后续处理生成正射影像与 DEM 数据,投影坐标系为 WGS84-UTM44N 坐标系,第一期 POS 数据纠正前正射影像与纠正后正射影像对比如图 4 所示。两期控制点与 DEM 坐标点位误差如图 5 所示。



图 4 第一期 POS 数据纠正前正射影像与纠正后正射影像对比

Fig. 4 Contrast of orthophoto before and after correction of POS data in the first phase

通过图 4 可知用纠正后 POS 数据生成第一期正射影像的定位精度高于原始 POS 数据。由于目前的无人

机没有搭载后差分 POS 数据处理系统,因此要纠正 POS 数据进行影像定位,提高定位精度。由图 5 可知两

期地面控制点和生成 DEM 数据的对应监测点坐标的差值在毫米级别,控制点的误差基本控制在 3 mm 之内,说明其生成的坐标精度可靠,可以用于接下来的尾矿坝地表沉陷分析。

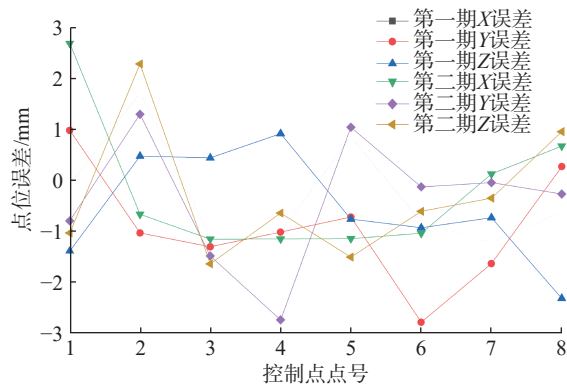


图 5 两期控制点与 DEM 坐标点位误差

Fig. 5 Error between control points in two phases and DEM coordinates

4 尾矿坝地表沉陷特征

对本次研究区域进行位移沉降分析,首先需要得到 DEM 数据的坐标信息,生成的 2018 年 8 月 2 日及 2019 年 8 月 5 日 DEM 数据整体差值如图 6 所示。根据 Pix4Dmapper 软件生成的三维尾矿坝图如图 7 所示。

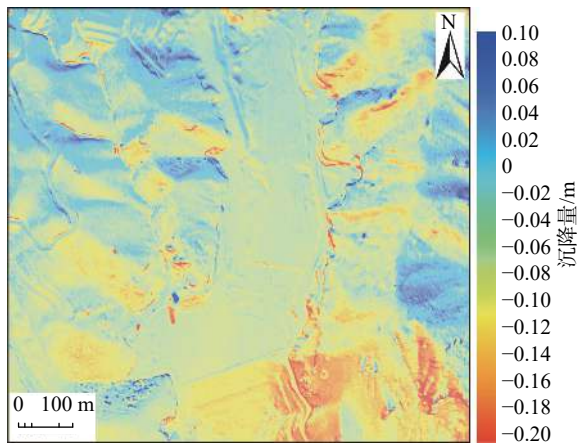


图 6 两期 DEM 整体差值

Fig. 6 Overall DEM difference between the two phases

将尾矿坝两期 DEM 数据整体差值覆于数字模型表面上,经过 ArcGIS 平台的技术处理^[25],得到尾矿坝整体沉降图如图 8 所示。

对于尾矿坝整体的主要分析区域为 0 ~ 120 m, Y=0 ~ 700 m 地表高程的变化情况。为了分析研究区域地表塌陷区的沉降情况,对两期实验所得到的模型区域内,分别在 Y=350 m、Y=100 m 和 X=60 m 剖面线上,提



图 7 三维尾矿坝图

Fig. 7 3D tailing dam

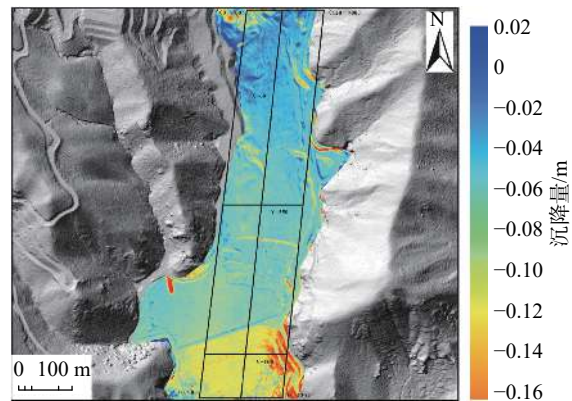


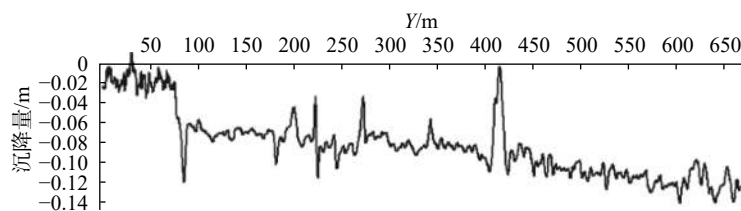
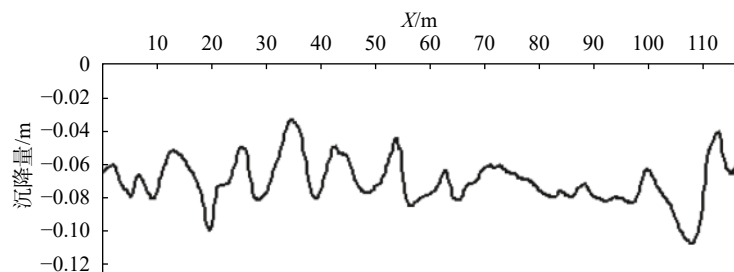
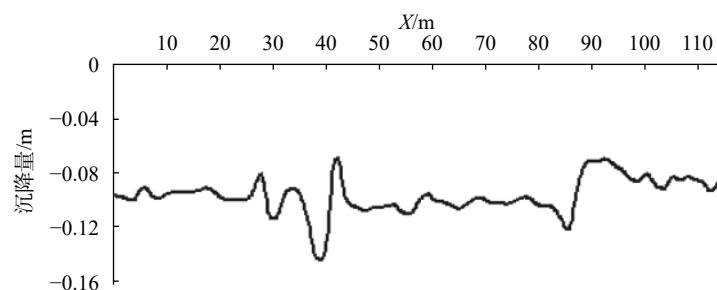
图 8 尾矿坝整体沉降图

Fig. 8 Overall settlement of mine dam

取相应点的高程差值,分析其高程在三次监测情况下的变化,如图 9、10、11 所示。

由图 8 可知,尾矿坝整体出现了沉降,尾矿坝两侧山坡西坡受尾矿坝沉降及西南暖湿气流的影响,在南北或偏南北走向山脉的西坡和西南坡形成大量降水,出现沉降现象。由 X=60 m 剖面可知尾矿坝南坡沉降范围最大。由于尾矿坝内部存在矿区工业废水,经过一年的废水流失,以及该实验区降水量大,受日照及降雨影响,尾矿坝的地质发生了解构现象,导致了整体沉降。南部尾矿坝下坡是尾矿坝的坡顶区域,坡度大,降雨量受面广,受沉降位移的影响较为明显,加快了地表塌陷区的沉降。尾矿坝北部因为坡度小,受降雨及日照影响小,所以沉降范围小于南部。对于剖面 Y=500 m,根据剖面线上各点高程的变化情况可知,此剖面线上沉降位移为 0.08 m 左右。分析其原因,主要是因为此剖面所处区域比较平坦,属于尾矿坝中部地区,沉降比较稳定。对于剖面 Y=100 m,尾矿坝下坡沉降范围在 0.16 m 之内。

综上所述,当前利用无人机低空摄影测量技术为监

图 9 $X=60$ m 剖面沉降图Fig. 9 Settlement diagram of profile with $X=60$ m图 10 $Y=350$ m 剖面沉降图Fig. 10 Settlement diagram of profile with $Y=350$ m图 11 $Y=100$ m 剖面沉降图Fig. 11 Settlement diagram of profile with $Y=100$ m

测地表沉降提供了新的方法, 比传统监测方式更加便捷。与传统监测相比, 低空摄影测量技术能够从多角度进行影像采集, 能够充分地获取监测区域的地形地物信息。

5 结论

文章基于无人机低空航摄技术获取实验区数据, 并进行数据处理, 利用高精度成图方法, 得到实验区尾矿坝地表沉陷图。实验结果表明:

(1) 通过改正原始 POS 数据误差, 是可以提高无人机摄影测量成图精度的, 这为无人机在精细测量方向上有更多的研究潜力。无人机成图精度并不是随着像控点数量的增加而增加, 要根据实际情况做出决策。

(2) 经过实际工程的应用, 利用无人机监测尾矿坝地表沉陷的高精度成图方法获得的精度是可靠的, 可以达到毫米级, 这对现有监测手段是一种有效的补充。

(3) 尾库坝安全监测一直是矿区安全生产的重要保证。由于光照、温度、雨量、风速和土壤质地等因子的综合作用, 尾矿坝发生沉降, 尾矿坝北部因为坡度小, 受降雨及日照影响小, 所以沉降范围小于南部。通过无人机低空摄影测量监测, 对矿区安全生产起到一定的预警作用。需要指出的是, 本次试验研究的是植被覆盖较少的尾矿坝区域, 沉降变形主要靠人工识别和分析, 下一步的研究工作将针对植被覆盖广的区域以及对矿区地质灾害信息进行自动识别和统计分析。

参考文献 (References):

- [1] 国家安全生产监督管理总局. 尾矿库安全技术规程: AQ 2006—2005[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.
[State Administration of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Safety technical regulations for the tailings pond: AQ 2006—2005[S]. Beijing: China Coal

- Industry Publishing House, 2006. (in Chinese)]
- [2] 李超越. 马家田尾矿库环境风险评价及危险范围预测 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019. [LI Chaoyue. Environmental risk assessment of Majiatian tailing pond and hazardous range forecast[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张凯翔. 基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(6): 1–11. [ZHANG Kaixiang. Review on geological disaster monitoring and early warning system based on “3S” technology in China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 1–11. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 侯燕军, 周小龙, 石鹏卿, 等. “空-天-地”一体化技术在滑坡隐患早期识别中的应用: 以兰州普兰太公司滑坡为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(6): 12–20. [HOU Yanjun, ZHOU Xiaolong, SHI Pengqing, et al. Application of “Air-Space-Ground” integrated technology in early identification of landslide hidden danger: Taking Lanzhou Pulantai company landslide as an example [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 12–20. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张鸣之, 湛兵, 赵文伟, 等. 基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(6): 54–59. [ZHANG Mingzhi, ZHAN Bing, ZHAO Wenyi, et al. Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 54–59. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505–513. [LI Deren, LI Ming. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(5): 505–513. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李文鹏. 地质灾害隐患和水文地质环境地质调查计划进展 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 1–4. [LI Wenpeng. Achievements of the program of geological investigation on geo-hazards and hydrogeology and environmental geology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(2): 1–4. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 李学刚, 韩术合, 燕鸣. 矿山地质环境治理保证金制度发展历程及现实意义: 以内蒙古赤峰地区为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 104–109. [LI Xuegang, HAN Shuhe, YAN Ming. Development process and practical significance of the deposit system of mine geological environment management: Take Chifeng area of Inner Mongolia as an example [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 104–109. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 曹伟, 盛煜. 煤矿开采过程中的冻土环境问题与对策 [J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(5): 91–96. [CAO Wei, SHENG Yu. Permafrost environment problems and countermeasures in the process of coal mining [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(5): 91–96. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 马瑞升, 孙涵, 林宗桂, 等. 微型无人机遥感影像的纠偏与定位 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(5): 632–639. [MA Ruisheng, SUN Han, LIN Zonggui, et al. Geometric correction and registration of optical remote sensing image from miniature unmanned aerial vehicle [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2005, 28(5): 632–639. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 邵媛媛. 无人机遥感在某铁矿矿区资源监测中的应用 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2008. [BING Yuanyuan. UAV remote sensing in a mine iron resources monitoring[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2008. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张慧超. 基于无人机摄影测量技术的地表塌陷变形监测及应用研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2018. [ZHANG Huichao. Application of photogrammetry based on UAV in surface collapse deformation monitoring[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 喜文飞. 滇东北山区无人机遥感影像预处理方法及滑坡特征识别研究 [J]. 测绘学报, 2020, 49(8): 1071. [XI Wenfei. Study on remote sensing image preprocessing method and landslide feature identification of UAV in northeast Yunnan mountain area [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(8): 1071. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 黄海宁, 黄健, 周春宏, 等. 无人机影像在高陡边坡危岩体调查中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(6): 149–155. [HUANG Haining, HUANG Jian, ZHOU Chunhong, et al. Application of UAV images to rockfall investigation at the high and steep slope [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6): 149–155. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 金伟, 葛宏立, 杜华强, 等. 无人机遥感发展与应用概况 [J]. 遥感信息, 2009, 24(1): 88–92. [JIN Wei, GE Hongli, DU Huaqiang, et al. A review on unmanned aerial vehicle remote sensing and its application [J]. Remote Sensing Information, 2009, 24(1): 88–92. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 迟臣鑫, 陈伟强, 朱鹏程, 等. 采煤塌陷积水区面积无人

- 机采集方法 [J]. 金属矿山, 2020(8): 136–141. [CHI Chenxin, CHEN Weiqiang, ZHU Pengcheng, et al. Acquisition method of accumulated water area in mining subsidence area by unmanned aerial vehicle [J]. Metal Mine, 2020(8): 136–141. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 林元茂, 李建, 韩立. 灾后复杂地形区域的测量测绘模型设计 [J]. 灾害学, 2019, 34(4): 35–40. [LIN Yuanmao, LI Jian, HAN Li. Design of survey and mapping model for complex topographic areas after disaster [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(4): 35–40. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 赵星涛, 胡奎, 卢晓攀, 等. 无人机低空航摄的矿山地质灾害精细探测方法 [J]. 测绘科学, 2014, 39(6): 49–52. [ZHAO Xingtao, HU Kui, LU Xiaopan, et al. Precise detection method for mine geological disasters using low-altitude photogrammetry based on unmanned aerial vehicle [J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(6): 49–52. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 鲁恒, 李永树, 江禹. 一种基于POS数据的无人机影像自动展绘控制点方法 [J]. 光电工程, 2011, 38(9): 25–29. [LU Heng, LI Yongshu, JIANG Yu. A method of automatic extraction of image control points for UAV image based on POS data [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(9): 25–29. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 贾鑫, 杨树文, 张志华, 等. 搭载POS数据的无人机影像提高定位精度的方法 [J]. 遥感信息, 2019, 34(4): 92–96. [JIA Xin, YANG Shuwen, ZHANG Zhihua, et al. A method to improve positioning accuracy of UAV image based on POS data [J]. Remote Sensing Information, 2019, 34(4): 92–96. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 鲍先凯, 杨东伟, 段东明, 等. 施工工法对浅埋软岩小净距隧道地表沉降和围岩稳定的影响研究 [J]. 公路工程, 2019, 44(4): 22–29. [BAO Xiankai, YANG Dongwei, DUAN Dongming, et al. Influence of construction methods on surface subsidence and surrounding rock stability of shallow buried soft rock with small distance tunnel [J]. Highway Engineering, 2019, 44(4): 22–29. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 杜娟, 景恒青, 何仁志. 隧道施工中地表沉降致险因素识别机制研究 [J]. 公路工程, 2019, 44(6): 38–45. [DU Juan, JING Hengqing, HE Renzhi. Identification mechanism research of ground subsidence risk factors in tunnel construction based on hierarchical clustering [J]. Highway Engineering, 2019, 44(6): 38–45. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 鲁恒, 李永树, 何敬, 等. 无人机低空遥感影像数据的获取与处理 [J]. 测绘工程, 2011, 20(1): 51–54. [LU Heng, LI Yongshu, HE Jing, et al. Capture and processing of low altitude remote sensing images by UAV [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2011, 20(1): 51–54. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 段平, 李佳, 李海昆, 等. 无人机影像点云与地面激光点云配准的三维建模方法 [J]. 测绘工程, 2020, 29(4): 44–47. [DUAN Ping, LI Jia, LI Haikun, et al. 3D modeling method of UAV image point cloud and ground laser point cloud registration [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2020, 29(4): 44–47. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 赵魁. 基于ArcGIS平台的广东云浮云安区地质灾害危害程度分区评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 89–95. [ZHAO Kui. The assessment on hazard degree division of geology disaster in Yun'an District based on ArcGIS [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 89–95. (in Chinese with English abstract)]