

无人机倾斜摄影测量技术应用于地质灾害勘查

周阳阳^{1,2,3,4} 徐尚昭^{1,3,4} 陈斌^{1,3,4} 王春双^{1,3,4} 孙中瑞^{1,3,4}

1【核工业 290 研究所】，2【西北农林科技大学资源环境学院】，3【广东省环境保护核辐射追踪研究重点实验室】，4【广东省放射性生态环境保护工程技术研究中心】

摘要：

随着广东省社会经济的迅速发展，集镇建设和人口规模迅速扩大，滑坡、崩塌等地质灾害呈加剧趋势，前期的地质调查成果已无法满足地质灾害监测预警、防治和集镇建设规划的需求。为了获取更加翔实的地质资料，尤其是更大比例尺更高精度的勘查基础数据，本文采用无人机倾斜摄影测量技术，结合 Google 地图和现地调查，通过无人机倾斜摄影测量和实地测量相结合，实现满足精度要求的地质灾害隐患点（区、段）的类型、分布位置以及基本特征等信息的快速识别和获取。本文以《广东省连平县上坪镇地质灾害勘查示范项目（1:10000）》为例，运用飞马 D2000 地仿飞行模式构建 1:500 实景三维模型，可为进一步提高地灾调查精度，实施地灾预警工作提供清晰、可靠的本底数据，为有关部门制定防治规划提供决策依据。结果表明，该技术先进成熟，自动化程度高，满足地质灾害勘查的精度要求，具有广阔的探索潜力和应用前景，易于推广。

关键词：

倾斜摄影测量；地质灾害；飞马无人机；实景三维模型；河源市

1 项目背景

随着广东省社会经济的迅速发展，集镇建设规模和人口迅速扩大，滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害呈加剧趋势^[1]。由于技术方法的制约，1:5 万地灾详查成果已不能满足当前地灾监测预警、防治和集镇建设规划的需求。因此，亟需更为翔实的地质资料，尤其是更大比例尺更高精度的勘查资料，为减灾防灾工作提供依据充分、安全可靠的数据支撑^[2-3]。

根据《广东省自然资源厅关于调整 2019 年度中央财政特大型地质灾害防治补助资金分配建议的函》（粤自然资函[2020]65 号）要求，结合连平县地灾防治工作的实际需要，为了进一步提高地质灾害调查精度，以期为政府制定地质灾害防治规划和实施地质灾害预警工程提供数据支撑和决策依据，连平县上坪镇地灾勘查作为《1:1 万重点镇地质灾害勘查试点示范项目》之一，被纳入 2020 年度地质灾害勘查试点区。

随着新型信息观测技术的发展，无人机倾斜摄

影测量通过飞行平台搭载多角度传感器，可同时得到地物正射和倾斜方向的真实纹理，获得更加立体的地理环境信息^[4]。相较传统航空摄影二维平面观测的局限和实地勘测成本高、工作量大的限制，倾斜摄影测量拥有高效率的三维模型生产技术，成果更符合人类视觉系统的直观真实感知，大大提高了地表特征的判读解译效率和精度，还能提供多种直接的测量手段。因此，广泛应用于地质灾害勘查、不动产更新测绘、城市规划、自然资源管理^[5-8]等领域。

为了查明上坪镇范围内滑坡、地面崩塌、塌陷、不稳定斜坡和人工边坡等地灾点的发育特征、分布规律以及形成的地质环境条件，为其危害程度评价、划分地质灾害易发区和危险区提供有力的数据支撑，本项目通过无人机倾斜摄影测量技术，结合 Google 地图和现地踏勘，获取地灾隐患区 1:500 实景三维模型，在兼顾测绘精度要求的同时，能够为孕灾环境的调查提供直观、清晰的数据支撑。

2 关键技术步骤

作者简介：周阳阳（1990—），女，工程师，硕士，主要研究方向为林业 GIS 应用与无人机摄影测量；

联系电话：18200353665，E-mail: zhouyangyanger@163.com。

通讯地址：广东省韶关市武江区科技工业园广前路核工业二九〇研究所。

通过无人机倾斜摄影测量技术获取滑坡、崩塌等地灾点三维实景模型^[9]主要包括像控点布设、倾斜摄影测量平台设定、飞行航线设计、像控点测量、空三解算、实景三维建模以及灾害体识别等关键步骤。具体流程如图 1 所示。

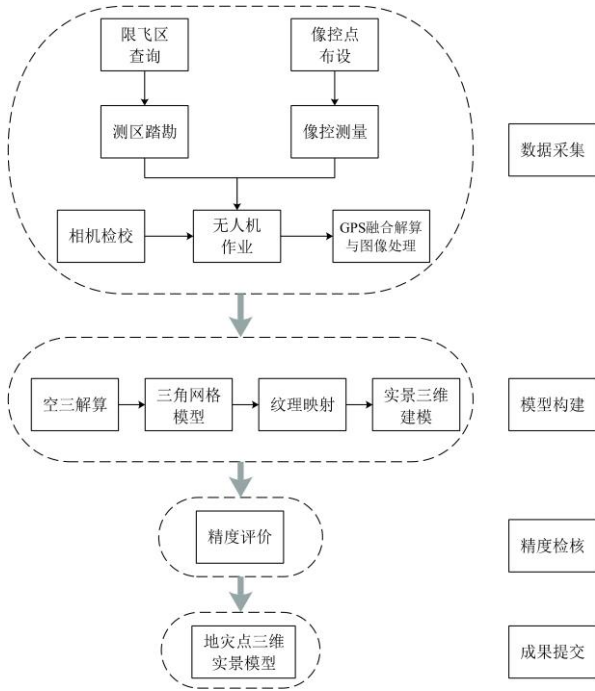


图 1 技术流程图

2.1 像控点布设

作为倾斜摄影测量中不可或缺且至关重要的基础步骤,在保证像控点测定几何精度的同时,还需兼顾其数量、质量满足像片处理和模型精度的要求,确保目标地物在空间系统中的绝对位置。像控点布设应避免在建筑物密集区、可能被基础设施建设和植被遮挡区域,而应布设在纹理明显、色彩差异较大的空旷区,如道路交叉点、房前空地等区域。

2.2 倾斜摄影测量系统

无人机倾斜摄影测量是以无人机为飞行平台,以倾斜摄影相机为传感器的航空摄影测量系统。对于飞行平台而言,应着重考虑续航时间、飞行速度、载重、安全性和抗风性等因素;对于传感器而言,应着重关注其波段数、焦距、POS 数据采集能力等主要指标。通过 POS 采集与相机拍摄的同步设置,最大程度减少了机械延时产生的定位误差,保证高动态

场景下的影像获取精度^[6];通过无人机与航摄系统融合的设计使飞行更趋稳定;通过高精度双 RTK 模块导航定位与精准飞行技术相结合的方式,使航线误差控制在 ± 2 cm、定向精度 0.2° 以内。

2.3 飞行航高及重叠率设计

根据任务需求设定合适的地面分辨率,依据测区地物高度和类型设置重叠率,结合倾斜相机的性能按照公式(1)计算航摄高度^[10]:

$$H = f \times GSD / a \quad (1)$$

式中, H 为航高, f 为相机焦距, GSD 为地面分辨率, a 为像元尺寸。

《低空数字航空摄影规范》(CHZ3005-2010)规定,航向重叠率应不低于 53%,旁向重叠率应不低于 8%,通常设置为 60%~80%与 15%~60%。考虑地物遮挡和模型形变等问题,航向及旁向重叠率大于 75%较适宜。

2.4 空三解算

倾斜摄影空三解算时,将机载 POS 提供的外方位元素视为观测值引入摄影测量区域网平差中,利用后处理软件采用统一的数学模型和算法,对多视影像进行自动匹配,获得同名连接点,构建自由网;在初次空三结果基础上加入控制点进行联合平差,可优化精度至 1/3 个像素,通过同名点匹配技术建立影像与模型间的严格对应关系,以满足后续自动化建模精度^[11,12]。当空三运算精度结果中像控点中误差小于 0.03 m (小于 0.01 m 效果最佳),残差满足限差要求,丢片合理,无分层、断层、错位,则认定空三运算满足质量要求。

3 应用实例

3.1 测区概况

本次航摄飞行作业涉及广东省河源市连平县上坪镇三个测区,覆盖面积共计 545.54 hm^2 ,具体区位如图 2 所示。

测区一位于古坑村以北至中村 G105 国道两侧,面积 512.45 hm^2 。平均海拔 412 m,海拔最高点 577

m, 最低点 335 m, 最大高程差达 242 m。测区内现有三座高压输电线塔, 高度在 25~40 m 之间, 一定程度上增加了飞行作业的难度。该区内地质环境复杂程度中等, 危害对象等级二级, 灾点类型以山体滑坡和崩塌为主, 多位于 G105 国道两侧和农村宅基地附近, 存在较大的安全隐患。同时, 部分灾点可达性较差, 不易进行近地观察, 勘查难度大。

测区二位于西坪村保中寨, 面积 9.56 hm²。平均海拔 338 m, 最高点海拔 352 m, 最低点海拔 328 m。该测区位于大广高速旁, 在宅基地屋后有一处滑坡点, 对人们生命财产安全存在一定威胁。

测区三位于小水村下湾组, 面积 23.5 hm²。平均海拔 481 m, 海拔最高点 576 m, 海拔最低点 436 m。该区地质环境复杂程度中等, 危害对象等级一级。

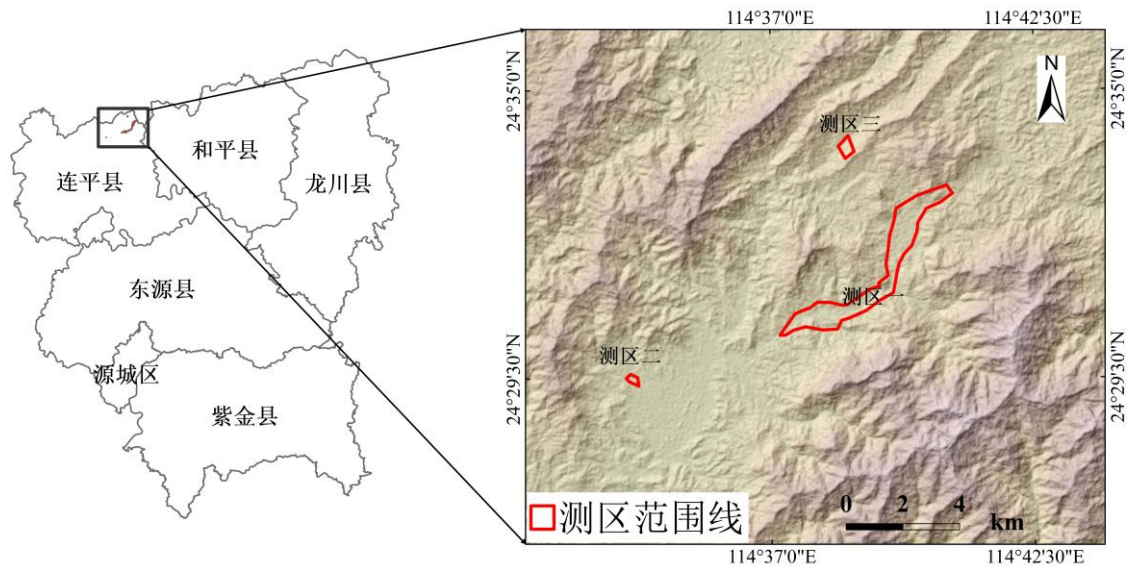


图 2 测区位置示意图

3.2 软硬件设备参数

由于测区地形环境复杂, 高程落差大, 同时该项目对模型精度要求较高, 若不选择合适、优化的飞行载体和传感器, 则易影响飞行质量和成果精度。

基于此, 本项目航摄飞行作业选用飞马 D2000 双轴四旋翼无人机搭载索尼 D-OP3000 五镜头相机, 单镜头像素 2400 万, 具有航线管理多任务一体化功能。D2000 具有仿地飞行的特点, 可实现精准的地形跟随飞行, 保证影像分辨率一致性的同时可提高整体分辨率和模型精度。同时, D2000 具有长航时、高效率、高可靠性等特点, 配备高精度差分 GNSS 板卡, 标配千寻服务, 支持高可靠性的网络 RTK、PPK 及其融合解算, 减少外业像控布设和测量工作, 提高模型刺点精度。所配备的“无人机管家”软件支持精准三维航线规划、三维实时飞行监控、GPS 融合解算、控制点量测、空三解算等多种功能。

3.3.1 像控点布设和采集

采用密周边隔基线的区域网控制点布设法^[13], 依据室内预选点结合实地踏勘, 在测区一以 1~1.5 km 为间距, 共布设 24 个像控点, 6 个检查点; 在测区二和测区三分别布设 4 个像控点、2 个检查点, 如图 3 所示。本项目采用 GPS 实时动态差分定位技术 (GPS-RTK), 依据已知基准站接收卫星信号, 以流动站形式采用智能中海达 iRTK 2, 求得基准站和流动站间的坐标增量, 实现实时联合解算, 获取全部像控点位置信息^[14]。坐标系统采用 2000 国家大地坐标系和 1985 国家高程基准。

3.3 无人机倾斜摄影测量

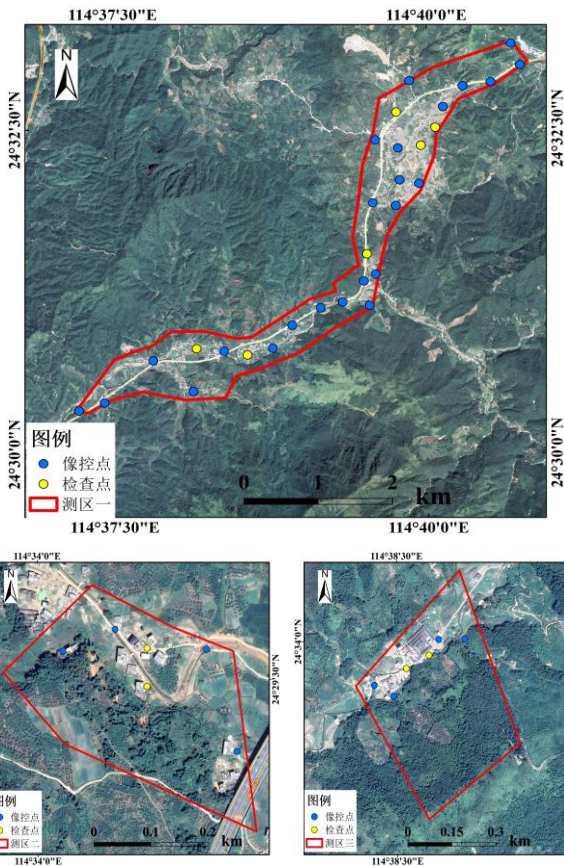


图 3 区域网控制点分布图

3.3.2 航线规划与作业

本项目于 2020 年 11 月 12 日至 11 月 18 日开展航摄飞行作业，飞行期间通视条件良好，均为无风晴天。在明晰任务需求的基础上，充分考虑航测平台参数设置（表 1）和航线规划（图 4），确保影像获取质量，航摄作业及规划均在飞马无人机管家中智航线和智飞行模块完成。航摄数据经检查无遗漏，对应 POS 信息齐全，飞行数据范围及质量均满足测区生产需求。

(1) 测区一呈条带状分布，因覆盖面积较大，地形较为复杂，作业时依据高程差和地物高划分成三个区块，如图 4 所示。设定地面分辨率 3 cm，相对飞行高度 191 m，即飞行平台距地面地物的距离始终保持在 191 m。共飞行 9 个架次，有效飞行面积 512.7 hm²。

(2) 测区二呈梯形分布，设定地面分辨率 2 cm，相对飞行高度 128 m，共飞行 1 个架次完成，有效飞行面积 10.1 hm²。

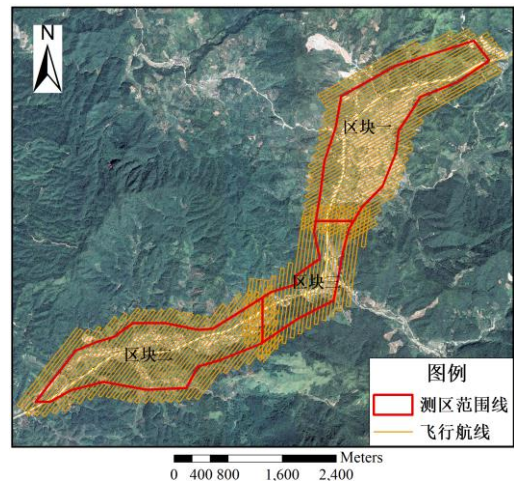
(3) 测区三呈矩形分布，设定地面分辨率 2 cm，

航高 128 m，飞行 1 个架次完成，有效飞行面积 23.5 hm²。

所有测区均在 1:500 比例尺下开展飞行作业，设置航向重叠度 80%，旁向重叠度 75%；测区一变高航线航向外扩 216 m，旁向外扩 4 条航线；保中寨及下湾组航向外扩 144 m，旁向外扩 5 条航线。

3.3.3 三维建模

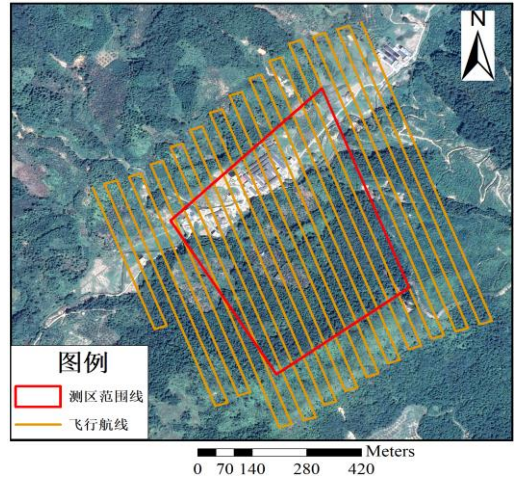
项目采用 ContextCapture Center 软件，集群调用 8 组 GPU 同步运算。通过集成处理 POS 数据，验证 POS 精度并对其姿态角数据进行子午线收敛角补偿，解算出精确外方位元素；利用特征匹配算法获取高精度同名点匹配结果，通过光束法局域网平差实现空中三角测量；根据聚簇算法和密集匹配算法初步构建高密度点云数据，依据空三建立的影像间三角关系经由高密度点云构建 TIN 网格模型；最后经由纹理映射形成实景三维模型，效果真实性强，纹理现实性好。



(a) 测区一



(b) 测区二



(c) 测区三

图4 航线规划图

表1 倾斜摄影测量平台参数

对象要素	参数	对象要素	参数
有效像素	2430 万×5 像素	相机型号	SONY a6000
镜头焦距	25 mm 定焦 (下视) 35 mm 定焦 (倾斜)	航线间距	45 m
传感器尺寸	23.5×15.6 mm	拍照间距	24 m
航向重叠率	80%	测区一飞行面积	512.7 hm ²
旁向重叠率	75%	测区二飞行面积	10.1 hm ²
飞行速度	13.5 m/s	测区三飞行面积	23.5 hm ²
相对飞行高度	191 m	测区一飞行航点个数	543
变高航线	航向外扩 216 m 旁向外扩 4 条航线	测区二飞行航点个数	50
		测区三飞行航点个数	167

3.3.4 几何精度验证

为保证模型精度的准确性和可靠性，验证倾斜摄影测量在自然保护区三维模型构建中所能达到的精度，依据国家《三维地理信息模型数据产品规范》(CH/T9015-2012)，本文引入中误差通过选择平整道路地面及建模效果较好的 10 个特征点进行综合点位几何精度验证，计算公式如下：

$$M_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$M_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$M_s = \sqrt{(M_x)^2 + (M_y)^2} \quad (4)$$

$$M_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta z_i)^2}{n}} \quad (5)$$

式中， M_x 、 M_y 、 M_s 和 M_z 分别为 x 、 y 方向、平面、高程中误差， Δ 为检测较差， n 为检验点总数。经计算(表 2-3)，测区一 x 中误差为 0.0585 m、 y 中误差为 0.0539 m，平面中误差为 0.0795 m。测区二 x 中误差为 0.0191 m， y 中误差为 0.0205 m，平面中误差为

0.0281 m。测区三 x 中误差为 0.0339 m， y 中误差为 0.0494m，平面中误差为 0.0599 m。所有测区高程中误差为 0.0697 m。由此可知，模型成果满足 1:1000 地形测图精度要求。

3.3.5 三维成果展示

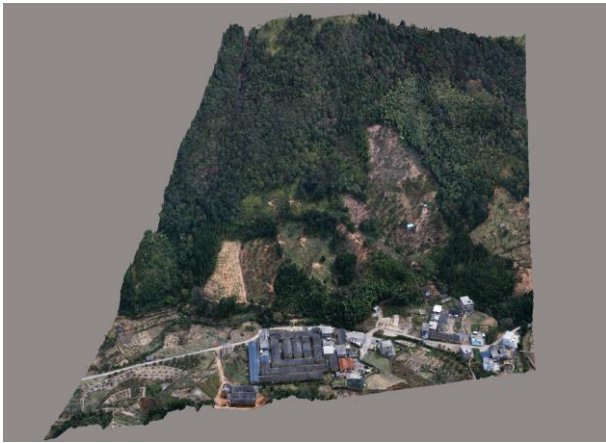
内业处理采用北京山维科技 EPS 测图软件，该软件可集成真三维与真正射环境，通过二三维联动实现地质灾害类型、分布、面积等相关信息采编。模型全局和细节如图 5 所示。



(a) 测区一模型全局与细节



(b) 测区二模型全局与细节



(c) 测区三模型全局与细节

图 5 三维实景模型

表 2 平面几何精度

测区	编号	实地 x	模型 x'	Δx	实地 y	模型 y'	Δy
测区一	1	****225.743	****225.747	-0.004	***133.306	***133.313	-0.007
	2	****313.593	****313.564	0.029	***446.811	***446.784	0.027

	5	****465.384	****465.286	0.098	***659.788	***659.706	0.082
	6	****682.837	****682.801	0.036	***135.726	***135.674	0.052
	平面	0.0585			0.0539		
	中误差	0.0795					
测区二	1	****854.07	****854.091	-0.021	***629.5864	***629.6054	-0.019
	2	****917.887	****917.87	0.017	***629.5864	***629.5644	0.022
	平面	0.0191			0.0205		
	中误差	0.0281					
测区三	1	****116.869	****116.91	-0.041	***033.645	***033.673	-0.028
	2	****160.15	****160.125	0.025	***110.5813	***110.5173	0.064
	平面	0.0339			0.0494		
	中误差	0.0599					

表 3 高程几何精度

测区	编号	实地 z	模型 z'	Δz
所有测区	1	358.454	358.474	-0.02
	2	352.022	352.01	0.012
	3	400.918	400.891	0.027
	4	428.917	428.823	0.094
	5	436.578	436.457	0.121
	6	432.533	432.441	0.092
	7	338.103	338.175	-0.072

8	341.943	341.909	0.034
9	446.865	446.775	0.09
10	441.256	441.226	0.03
中误差	0.0697		

4 结语

此次航摄作业倾斜摄影测量平台智能先进、自动化程度高，航线规划及像控布设合理，航摄期间均为无风晴天，光照、风速等自然拍摄条件优越。所构

建三维实景模型体块清晰、现实性较好,模型完整性及场景协调性一致;平面及高程中误差均小于 0.1 m,模型成果满足 1:1000 地形测图精度要求。同时,模型精准反映滑坡等地质灾点外轮廓的基本特征,真实表现其全部细节;在 200m 视点高度下浏览,无明显拉伸变形、粘连塌陷或纹理漏洞等情况,倾斜摄影模型总体质量较好。基于本本所使用的方法和航测平台,可针对重点、特殊区域施行无人机监测,一定程度弥补了航空、航天遥感的平面观测缺陷和现地调查技术的不足。

另一方面,如何加强三维实景模型与致灾地质环境背景的相关机理研究仍是今后探索的重点,地质灾害诱发因素、破坏机理等特性与模型信息的关联性分析仍有待进一步提高。

参考文献:

- [1] 刘传正,陈春利.中国地质灾害防治成效与问题对策[J].工程地质学报,2020,28(2):375-383.
- [2] 李凌婧,姚鑫,张永双,等.汶川地震绵远河流域地质灾害遥感提取与分布特征研究[J].工程地质学报,2014,22(1):46-55.
- [3] 铁永波,徐伟,梁京涛,等.川藏铁路卡子拉山滑坡发育特征与防灾减灾对策[J].水文地质工程地质,2021,48(5):129-136.
- [4] 李德仁,刘立坤,邵振峰.集成倾斜航空摄影测量和地面移动测量技术的城市环境监测[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(4):427-435.
- [5] 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.
- [6] 杨亚彬,谢思梅,谢荣安.无人机倾斜摄影测量技术在不动产更新测绘中的应用[J].测绘通报,2020(7):108-111.
- [7] 原明超,仇俊.无人机倾斜摄影测量在三维模型测图中的应用[J].测绘通报,2020(7):116-119.
- [8] 单杰,李志鑫,张文元.大规模三维城市建模进展[J].测绘学报,2019,48(12):1523-1541.
- [9] SVENNEVIG K, GUARNIERI P, STEMMERIK L. From oblique photogrammetry to a 3D model – Structural modeling of Kilen, eastern North Greenland[J]. Computers & Geosciences, 2015, 83(10): 120-126.
- [10] 张祖勋,张剑清.数字摄影测量学.第2版[M].武汉:武汉大学出版社,2012.

- [11] 李德仁,肖雄武,郭丙轩,等.倾斜影像自动空三及其在城市真三维模型重建中的应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2016,41(6):711-721.
- [12] 王建梅,朱紫阳.利用已有像控点的多期航空影像光束法区域网联合平差[J].测绘学报,2010,39(1):22-27.
- [13] 陈良浩,朱彩英,徐青,等.无人机航测水域控制点布设方案的精度试验[J].测绘科学,2016,41(7):205-210.
- [14] 辛星,谷金.GPS-RTK界址点测量系统性误差改正方法探讨[J].测绘工程,2018,27(1):73-76.