倾斜摄影测量技术在大比例尺地形图测绘中的应用

——以芜湖智能网联产业园为例

王首一

（广东省佛山地质局，广东 佛山 528000）

摘要： 针对传统大比例尺测图存在成图时间慢、成本要求高、外业工作量大的问题，提出一种适合于大范围1∶500的无人机测图方案，利用GPS-RTK（global positioning system-real-time kinematic）进行图根控制测量，采用大疆公司的无人机数据和航空影像数据处理软件Terre进行数据处理，内业成图采用Cass3D影像进行数字化采集，采集地物要素数据，最终完成地形图的绘制。在芜湖产业园应用表明，所研究的无人机倾斜摄影方案可以满足1∶500高精度的三维测图，且高效、低成本，具有可行性。

关键词： 倾斜摄影；数字正射影像；实景三维模型

中图分类号： P237 **文献标志码：** A **文章编号：** 1671－1807(2024)22－0251－07

大比例尺地形图是地区规划与发展不可或缺的基础资料[1]。目前我国各大城市的大比例地形图已经绘制完善，随着城市的发展变化，大比例地形图测绘需要进行周期性更新。传统测绘方法费时费力，存在着如工作效率低、精度达不到要求、数据不准确等弊端，难以满足目前地区规划与发展的需求。其中，郑朝峰和王东野[2]分析了仿地飞行和倾斜摄影测量技术后，提出使用无人机仿地飞行技术进行倾斜影像数据采集，并利用Context Capture三维实景建模软件进行空中三角测量解算。结合外业采集控制点平差调整，基于多视影像密集匹配技术进行密集点云匹配和三角网构建，完成纹理贴图自动映射，生产得到实景三维模型。结果表明平面和高程精度均可满足1∶2 000地形图航空摄影测量内业规范规定要求，并且整个任务区成果精度均匀。林国彬和翁文璇[3]综合应用低空遥感，机载激光雷达（light detection and ranging，LiDAR）以及移动车载激光测量等先进测绘技术进行大比例尺地形图修测更新。通过融合多种数据获取手段构建立体地形图绘制环境，将设计的多种数据融合的地形图更新模式应用于具体项目中，试验结果表明该作业模式绘制地形图精度满足规范要求。Jaehong等[4]使用CAS500-1立体数据进行了1∶5 000大比例尺地形测绘，并评估了精度。重叠的CAS500-1数据用地面控制点（GCP）芯片自动处理，以获得更好的位置精度。然后将这些数据用于立体绘制的极线重采样图像。通过立体声显示质量评估，为每个站点选择最佳立体声集。使用地面实况数据，分别检查地形图的准确性。实验结果表明，该精度成功地满足韩国1∶5 000地形图的要求。张津瑞[5]分析固定航高摄影测量方式特点和不足的基础上，提出了采用仿地飞行摄影测量技术生成高山地区大比例尺地形图的作业方案。实际测试表明，采用该方案生成的地形图，其精度均匀，可满足高山地区1∶2 000测绘精度要求。

在正射影像中无法采编而需要到现场调绘的细节信息[6-8]，倾斜摄影技术可以在飞行平台同时搭载多台传感器，同时从垂直、前视、后视、左视、右视共5个角度采集影像[9-11]，获取地形地貌完整与精确信息，大大减小了外业调绘的工作量。本文将根据具体实际项目提出基于倾斜摄影测量技术测绘大比例尺地形图方法，研究该方法具体的生产流程。通过芜湖产业园数据采集与处理试验对本方法进行验证分析，以求验证方法的可行性，达到数据准确的目标。

1 实例分析

1.1 测区自然地理概况

芜湖经济技术开发区智能网联产业园一期测绘项目位于安徽省芜湖市鸠江区境内，地处安徽省东南

收稿日期： 2024-05-28

作者简介： 王首一（1990—），男，满族，广东佛山人，工程师，研究方向为地下管线探测、工程测量、基坑监测。

部，紧邻长江，位于长江东侧，属亚热带湿润季风气候。测区为已建区，内有建成厂房及办公楼，地表植被多为桃树、景观树，部分区树林较茂盛，厂区内来往车辆和人员较多。测区地形高差起伏不大。

1.2　软硬件投入

本次测量工作所使用的仪器均在仪器检定的有效期内，拟投入外业设备大疆经纬 M300RTK 无人机 1 架，赛尔 102S 镜头 1 台，动态全球定位系统（global positioning system，GPS）1 台套，安徽省 CORS（continously operating reference station）卡 1 张，全站仪 1 台，大疆智图（Terra）软件 1 套，数字化成图软件 1 套，计算机2 台，其他附属设备，如棱镜、钢卷尺、对讲机、对中杆等，按工程需要全部配备，具体如表 1 所示。

（1）航摄无人机：采用大疆公司生产的经纬 M300RTK 六旋翼无人机，其性能参数如表 2 所示。

（2）航摄相机及参数：无人机搭载赛尔 102S 五镜头倾斜摄影相机，获取作业区范围内的真彩色影像，其性能参数如表 3 所示。

1.3　技术流程

基于航空摄影测量技术，采用 DJI 大疆生产的经纬 M300RTK 六旋翼无人机，搭载赛尔 102S 五镜头相机，获取作业区范围内的真彩色影像。通过 GNSS-RTK 技术进行像片控制测量[12]，获取像控点的平面和高程坐标。利用Terra软件进行空三加密、生成正射影像。利用 CASS3D 进行数据采集[13]，生成数字线划地图（German agricultural society，DLG），最终成图。本次测量首级控制测量为图根控制测量，采用实时动态定位技术（GPS post-processed kinematic，GPS-RTK）方法。图根控制测量利用 AHCORS 根据测区内的相关参数布置 2000 国家大地坐标系，1956 黄海高程系。技术思路主要包括航摄设计、像片控制测量、航摄实施、空中三角测量、正射影像文档对象模型（document object model，DOM）生产、质量报告分析、内业 DLG 数据生产、地形图测绘、整理与提交。具体流程如图 1 所示。

表 1　主要软硬件投入一览

序号	名称	型号	数量	备注
1	大疆无人机	经纬 M300RTK	1	外业
2	赛尔镜头	102S	1	
3	华测 GPS 接收机	i90	1	
4	省网 CORS 卡	中国移动	1	
5	徕卡全站仪	TS-50	1	
6	电脑	华硕，戴尔	2	
7	影像处理软件	Terra	1	内业
8	成图软件	南方 Cass	1	

表 2　无人机性能参数

类型	专业级无人机
轴距/m	0.895
重量/kg	1.4
最大水平飞行速度/（m·s^{-1}）	S 模式：23　P 模式：17
最大飞行时间/min	55

表 3　航摄相机性能参数

性能	参数
有效像素	2 430 万 pbcel，总像素大于 1.2 亿 pbcel
传感器尺寸	APS-C 画幅（23.5 mm×15.6 mm）
镜头焦距	35 mm×5 定焦测绘镜头
曝光	飞控触发曝光，曝光时间≥0.8 s

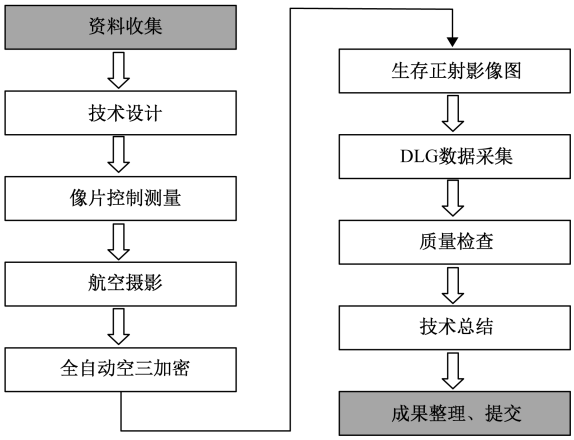


图 1　基于无人机倾斜摄影的大比例尺地形图测绘作业流程

倾斜摄影测量技术是一种通过搭载在无人机或其他飞行平台上的倾斜相机，从多个角度同时采集地面影像数据的技术。该技术的主要方法包括：通过控制摄像机的倾斜角度和角度传感器确定摄像机的姿态；利用倾斜角度的摄像机拍摄地面目标，获取倾斜图像；通过图像匹配、立体重建等技术手段，从倾斜图像中提取特征点并构建三维模型，获取地面目标的三维坐标信息；对倾斜图像进行纠正、校正等处理，提高数据精度。

核心技术手段包括无人机搭载平台和航空影像摄像仪的外业数据采集技术，以及计算机图像匹配、三维重建算法为代表的计算机技术。其中，无人机平台有多旋翼、固定翼、垂起固定翼等多种类型，航摄相机主要有带单镜头和多镜头两种形式。

在计算倾斜影像分辨率时，常使用地面采样距离公式，公式结合垂直影像 GSD 计算公式和倾斜相机主光轴旋转角度，可以计算出倾斜影像中心点、近地点与远地点的大致分辨率。对于倾斜摄影技术应用的主要公式为地面采用距离的获取，具体公式为

$$GSD = \frac{S_w F_r}{D_w H} \tag{1}$$

式中：GSD 为地面采样距离；S_w 为真实传感器宽度；F_r 为相机镜头真实焦距；H 为摄影机镜头中心至地表的垂直距离；D_w 为相机传感器像元尺寸。

式(1)用于计算影像上每个像素所代表的实际距离，它是摄影测量中的一个关键参数，直接决定了地形图的空间分辨率和精度。在倾斜摄影测量中，由于无人机或摄影机从不同角度拍摄地面，GSD 的计算需要考虑飞行高度、相机传感器尺寸以及镜头焦距等多个因素。通过精确计算 GSD，可以确保生成的数字正射影像(DOM)和三维模型具有足够的细节和准确性，从而满足大比例尺地形图测绘的精度要求。

1.4　实景三维模型构建

1.4.1　倾斜航摄

(1)受测区实际地形走向、分布及空域限制的影响，整个摄区划分为 5 个航摄分区。

(2)航摄时间拟定于 10：00—14：00。

(3)航线按南北向平行于图廓线直线飞行。具体设置及航线飞行情况如图 2 所示。

(4)按照 1∶500 比例尺要求，结合无人机电池续航时间及测区面积，设计相对航高为 100 m，设计地面分辨率为 1.57 cm。

(5)航高设置为 100 m，正射 GSD 为 1.57 cm/pixel，旁向重叠率为 70%，航向重叠率为 80%，主航线角度为 181°，具体数据如图 3 所示。

(6)本次航测外业共完成工作量：1∶500 地形测量 1 500 亩(1 亩≈666.67 m^2)。

航摄飞行线路设置与数据设置如图 2 和图 3 所示。

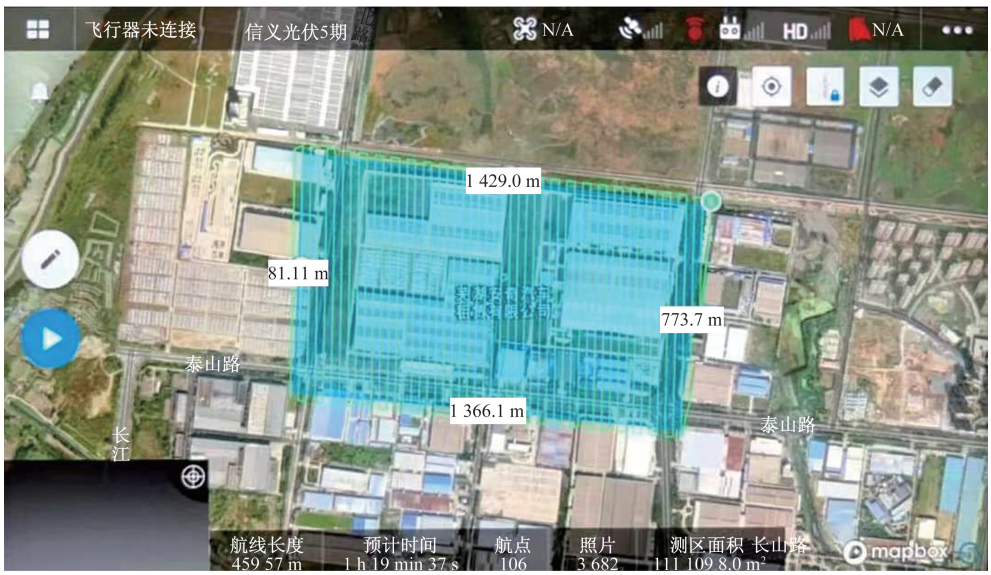


图 2　航摄飞行线路设置

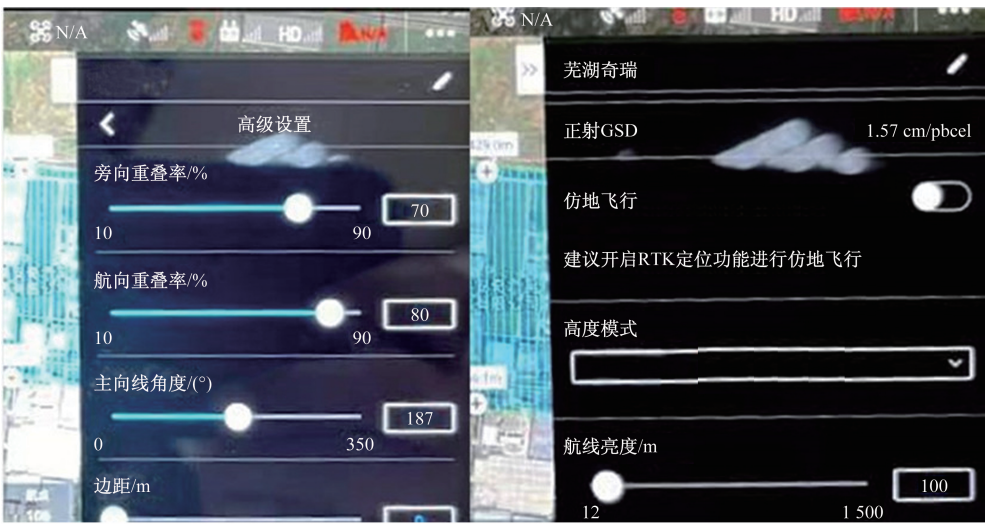


图 3　航摄飞行数据设置

1.4.2 像控点测量

本次像控点采用预先布设方式。根据1∶500比例尺要求，利用谷歌影像在测区内预先均匀选取像控点，像控点布设在空旷无遮挡处。像控点的密度以满足测图需要为原则，视具体情况增加或减少点数，共量测像控点3 743个，采用木桩或铁钉作标志。

图根控制测量采用GPS-RTK方法[14]，利用AHCORS直接测定图根点的坐标和高程，图根点观测采用图根测量方法进行两次独立测量，经平差计算平面位置较差最大为0.014 m，高程较差最大为0.046 m，满足要求。

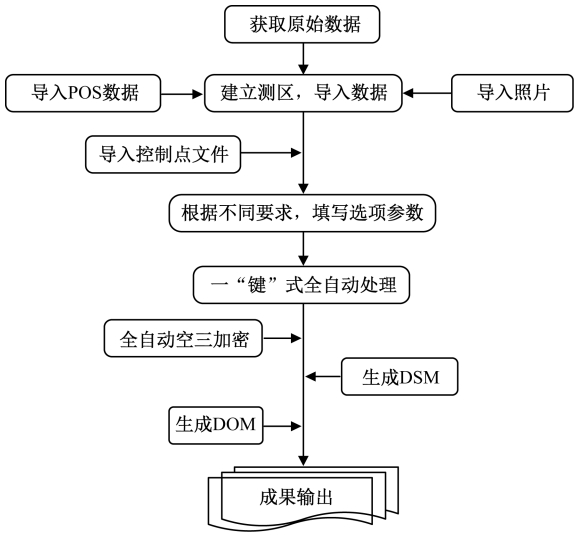
1.4.3 航摄内业数据处理

(1)空三加密：空中三角测量使用大疆智图(Terra)软件计算，通过自主航线规划、飞行航拍、二维正射影像与三维模型重建，进行空三加密测算。多角度拍摄的影像导入后生成实景三维模型，基于CUDA智能重建算法，输出较高质量重建结果。

(2)正射DOM生产：采用大疆公司的无人机数据和航空影像数据处理软件Terre进行数据处理。导入原始航拍数据，选择输出坐标系，本次测区由于是当地坐标系，中央子午线为118°30′，Terra系统中无此坐标系选择项，需导入PRJ文件。由于经纬M300RTK带有免像控功能，本次内业先不刺入像控点，现场测设的像控点作为检查使用。点击开始重建，Terra软件开始对此项目进行正射DOM生产。作业流程如图4实时。

1.4.4 内业DLG数据生产

(1)地形采集内容及取舍。地物、地貌的各项要素的表示方法和取舍原则，按如下要求进行，同时符合现行规范与图式的规定。①居民地和垣栅的采集：居民地的各类建筑物、构筑物及主要附属设施应准确采集实地外围轮廓和如实反映建筑结构特征；房屋的轮廓应以墙基外角为准，并按建筑材料和性质分类，注记层数。房屋应逐个表示，6 m^2以下的临时性房屋可舍去；采集垣栅应类别清楚，取舍得当，围墙、栅栏、栏杆等可根据其永久性、规整性、重要性等综合考虑取舍[12-13]；台阶和室外楼梯长度大于3 m，宽度大于1 m的应在图中表示；永久性门墩、支柱大于0.8 m的依比例采集，小于0.8 m的测量其中心位置，用符号表示，重要的墩柱无法测量中心位置时，要量取并记录偏心距和偏离方向。②交通及附属设施采集：公路与其他双线道路在图上均按实宽依比例尺表示，公路在图上每隔15～20 mm注出公路技术等级代码，国道注出国道路线编号，公路、街道按其铺面材料分为水泥、沥青、砾石、条石或石板、硬砖、碎石和土路等，应分别以砼、沥、砾、石、砖、碴、土等注记于图中路面上，铺面材料改变处用点线分开；跨越河流或谷地的桥梁，实测桥头、桥身和桥墩位置，加注建筑结构；大车路、乡村路、内部道路按比例实测，宽度小于1 m时只测路中线，以小路符号表示。③管线采集：永久性的电力线、电信线均应准确表示，电杆、铁塔位置应采集。当多种线路在同一杆架上时，只标示主要的，各种线路应做到线类分明，走向连贯；架空的、地面上的、有管堤的管道均采集，分别用相应符号表示，并注明传输物质的名称，当架空管道直线部分的支架密集时，适当取舍。④水系采集：河、水库、池塘、泉、井等及其他水利设施，均应准确采集表示，有名称的加注名称；堤、坝应注顶部及坡脚高程，池塘应注塘顶边。⑤地貌和土质的测绘：地貌和土质的采集，图上应正确表示其形态、类别和分布特征。⑥植被的采集：地形图上正确反映植被的类别特征和范围分布，大面积分布的植被在能表达清楚的情况下，采用注记说明树种；农业用地的采集按稻田、旱地、菜地、经济作物地进行区分，并配置相应符号；田埂宽度在图上大于1 mm的用双线表示，小于1 mm的用单线表示，田块内应注有代表性的高程。⑦注记：对各种名称、说明注记和数字注记准确注出，居民地、道路、山岭、河流等自然地理名称，以及主要单位等名称应正确注记；地形图上高程注记点应分布均匀，丘陵地区高程注记点间距为图上2～3 cm；山顶、鞍部、山脊、水涯线等高程



销售终端(point of scale，POS)；数字表面模型(digital surface model，DSM)

图4 正射影像DOM生产流程

注记点。

(2)内业数据整理。①内业成图:内业计算机成图,绘图软件为南方 CASS9.1;②地形图分幅与编号:地形图分幅为标准图幅分幅,图幅分幅编号采用图廓西南角公里数编号法,X 坐标 km 数在前,Y 坐标 km 数在后,取至 0.01 km(3 482.25～486.75),图名图幅编号一致。

1.4.5 大比例尺地图制作

地形图成图主要由地貌高程点获取、地物数据采集、地形图整式及地形图精度检验等组成,地形图成图流程如图 5 所示。

2 精度分析

为确保本次测量工作保质保量地完成,严格按照质量环境职业健康安全管理 QSHE·AHZD-CX-27《测量控制程序》进行作业。完成地形图测绘后,首先需评定 1∶500 地形图成果的数学精度。内业加密点和加密点对附近野外控制点的平面位置中误差以图比例尺计不应大于表 4 的规定[14]。平面位置中误差与高程中误差如表 4 和表 5 所示。

内业加密点、高程注记点和等高线对附近野外控制点的高程中误差不应大于表 5 的规定[4]。

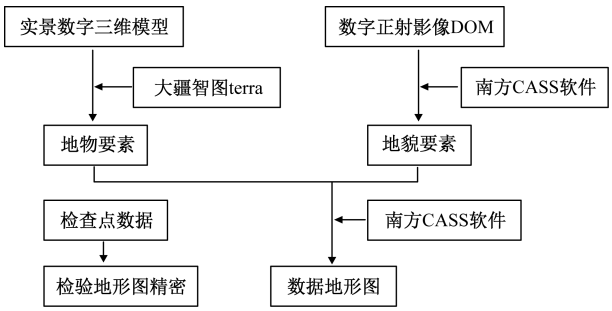


图 5 地形图绘制流程

2.1 空中三角测量精度

经过成果检测,控制点水平中误差为 0.005 m,高程中误差为 0 m,点位中误差为 0.005 m,检查点水平中误差为 0.022 m,高程中误差为 0.045 m,点位中误差为 0.050 m,空中三角测量精度较高,满足大比例尺地形图测绘需求。

2.2 平面及高程精度

2.2.1 平面精度

平面精度检查采用 GPS-RTK 外业实测特征点和地形图上的同名点进行统计分析,具体精度统计表如表 6 所示。

表 4 平面位置中误差

误差	平地、丘陵地/mm	山地、高山地/mm
加密点中误差	0.4	0.55
地物点中误差	0.6	0.8

表 5 高程中误差

比例尺		1∶500				1∶1 000				1∶2 000			
误差类别		平地/m	丘陵地/m	山地/m	高山地/m	平地/m	丘陵地/m	山地/m	高山地/m	平地/m	丘陵地/m	山地/m	高山地/m
基本等高距		0.5	1.0 (0.5)	1.0	1.0	0.5 1.0	1.0	1.0	2.0	1.0 (0.5)	1.0	2.0 (2.5)	2.0 (2.5)
中误差	加密点	—	—	0.35	0.5	—	0.35	0.5	1.0	—	0.35	0.8	1.2
	注记点	0.2	0.4 (0.2)	0.5	0.7	0.2 (0.4)	0.5	0.7	1.5	0.4 (0.2)	0.5	1.2	1.5
	等高线	0.25	0.5 (0.25)	0.7	1.0 地形变形点	0.25 (0.5)	0.7	1.0	2.0 地形变形点	0.5 (0.25)	0.7	1.5 地形变形点	2.0 地形变形点

注:括号内数值可根据地形的类别和用途选用。

表 6 平面坐标精度统计

测点号	原测 X/m	原测 Y/m	检测 X/m	检测 Y/m	ΔX/m	ΔY/m	ΔS/m
P1	*1 671.507	*463.943	*1 671.575	*463.919	0.068	0.024	0.073
P2	*1 668.553	*454.571	*1 668.440	*454.540	0.113	0.031	0.117
P3	*1 669.407	*449.230	*1 669.341	*449.221	0.065	0.009	0.066
P4	*1 673.207	*427.439	*1 673.178	*427.395	0.029	0.045	0.053
P5	*1 676.753	*406.921	*1 676.714	*406.913	0.039	0.011	0.041
…	…	…	…	…	…	…	…
P22	*1 739.780	*421.061	*1 739.754	*421.153	0.026	0.093	0.096
平面中误差 $m_s=\pm\sqrt{\sum\Delta^2/n}=\pm 0.096$ m,$n=1,2,\cdots,N$							

注:* 表示数据经过处理后的近似值;Δ 分别表示 ΔX、ΔY、ΔS。

地物点及高程注记数学精度较好，抽检地物点平面绝对位置，统计得出平面位置精度均小于0.2 m，中误差为0.096 m，满足1∶500大比例尺地形图平面精度要求。

2.2.2 高程精度

高程精度检查采用GPS-RTK外业实测特征点和地形图上的同名点（可通过实景三维模型直接获取）进行统计分析，具体精度统计如表7所示。

表7 高程精度统计

高程点	原图高程/m	检测高程/m	Δh/m
G01	9.136	9.112	0.024
G02	8.623	8.613	0.010
G03	8.285	8.292	0.007
G04	8.828	8.844	0.016
G05	8.214	8.228	0.014
…	…	…	…
G36	8.735	8.739	0.004
高程中误差 $m_h=\pm\sqrt{\sum\Delta h^2/n}=\pm0.017$，$n=1,2,\cdots,N$			

对地形图成图精度进行检验，统计平面位置中误差和图幅等高线高程中误差。统计出高程误差均小于0.1 m，最大高程误差为0.043 m，高程中误差为0.017 m，满足规范要求，数据有效证明了该方法可行。

3 结论

本文通过具体实际项目，提出了基于倾斜摄影技术测绘大比例尺地形图的技术路线，利用无人机航测系统拍摄测区倾斜影像生成实景三维模型和点云数据，借助Terre进行数据处理，对这些影像数据进行细致的处理和分析，确保数据的准确性和可靠性。利用Cass3D影像系统，对处理后的数据进行数字化采集，精准捕捉各类地物要素数据。最终成功绘制出完整且详细的地形图。通过实验得出以下结论。

（1）验证得出所提作业方式能满足1∶500地形图的平面与高程精度要求。能够准确识别各种设备类型，与实际情况保持高度一致，具有较高的准确性和检测速度，在排除外界噪声干扰的条件下，精准检测到低压电气设备外绝缘紫外放电结果。

（2）结合了紫外图像分析和超声检测技术，有效提高了低压电气设备放电超声检测的准确性和速度。节省了传统地形图外业调绘、补测等工作，为大比例地形图测绘提供了一个新的解决方案。

目前，倾斜摄影技术采用可见光进行测量，对天气要求较高。实际应用中面临更多复杂情况，针对动态环境因素还需验证所提方法的普适性和鲁棒性。未来的研究中将通过进一步的研究，优化现有方法以提高数据处理的精度和效率。

参考文献

[1] 何敬，李永树，徐京华，等. 无人机影像制作大比例尺地形图试验分析[J]. 测绘通报，2009(8)：24-27.

[2] 郑朝峰，王东野. 仿地飞行技术在山区大比例尺地形图测绘中的应用研究[J]. 科技创新与生产力，2023，44(9)：142-144.

[3] 林国彬，翁文璇. 基于多源数据的大比例尺地形图更新模式研究[J]. 测绘与空间地理信息，2024，47(3)：199-202.

[4] JAEHONG O，HAKSONG J，HYO J Y，et al. Large scale topographic mapping using stereo pair imagery from CAS500-1 satellite[J]. KSCE Journal of Civil Engineering，2023，27(3)：1288-1297.

[5] 张津瑞. 仿地摄影测量技术在高山地区大比例尺地形图测绘中的应用研究[J]. 长江信息通信，2024，37(2)：30-31.

[6] 王文娜，张弓，吴侃，等. 三维建筑模型单体化的深度学习技术实现[J]. 测绘通报，2022(12)：14-18.

[7] 谢元，董梦，马新建. 多源数据在复杂场景建筑物三维重建的应用[J]. 测绘通报，2022(6)：143-147.

[8] 贾煜，汪泓，蔡宏，等. 结合地形因子与分层策略的喀斯特地区无人机影像分类[J]. 测绘通报，2022(2)：121-127.

[9] 罗振威，李骁，刘承承，等. 利用倾斜摄影与激光扫描技术构建城市级实景三维模型[J]. 测绘通报，2023(12)：116-120.

[10] 刘帅，陈建华，王峰，等. 基于无人机倾斜摄影的数字露头实景三维模型构建[J]. 地质科学，2022，57(3)：945-957.

[11] 钱佳鑫，陈东，邓树新. 建筑信息模型技术在城市密集区桥梁施工中的应用[J]. 科学技术与工程，2022，22(5)：2063-2068.

[12] 李杰，郑建新，杨切，等. 超高空间异形曲面索塔线形控制技术研究[J]. 科学技术与工程，2023，23(12)：5285-5293.

[13] 吴晓章，谢宏全，徐瑞基，等. 利用激光点云数据提取采石场地貌特征[J]. 测绘通报，2017(7)：85-88.

[14] 许文涛，李晓昭，章杨松，等. 基于摄影测量系统的岩体结构面精细识别表征及应用[J]. 测绘学报，2022，51(10)：2093-2106.

Application of UAV Tilt Photogrammetry Technology in Surveying and Mapping Large-scale Topographic Map: Taking Wuhu Intelligent Connected Industrial Park as an Example

WANG Shouyi

(Foshan Geological Bureau of Guangdong Pronvince, Foshan 528000, Guangdong, China)

Abstract: Aiming at the problems of slow mapping time, high cost requirements, and large field workload in traditional large-scale mapping, a drone mapping scheme suitable for large-scale 1:500 was proposed. GPS-RTK was used for map root control measurement, and DJI's drone data and aerial image data processing software Terre were used for data processing. Cass3D images were used for digital acquisition in indoor mapping, collecting ground feature data, and ultimately completing the drawing of topographic maps. The application in Wuhu Industrial Park shows that the studied unmanned aerial vehicle oblique photography scheme can meet the high-precision 3D mapping of 1:500, and is efficient, low-cost and feasible.

Keywords: oblique photogrammetric; digital orthophoto map; live 3d model