

机载激光雷达技术在资源县抽水蓄能电站 地形图测量中的应用

龙宇杰, 辜杰为, 唐晓强

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610000)

摘要:抽水蓄能电站的主要作用是为了存储更多的电能,通常为了达到这样的目的,电站的选址所在区域通常高差较大,植被覆盖率高。这样的区域,通行条件大多较差,对于采用常规方式进行测量难度大,成本高,同时精度也很难满足要求。近年来,机载激光雷达测量技术的发展,对于这类问题的解决起到了良好的作用。结合实际项目生产实践经验,从测区分析、航飞设计、点云及影像数据获取、数据预处理、激光点云分类、航摄影像处理各个方面进行阐述,通过最终的精度分析,证明了机载激光雷达技术在大高差、植被覆盖率高区域,仍然能够达到地形测绘的精度要求,对于未来的水利水电航空摄影测量,拥有广阔的应用前景。

关键词:抽水蓄能电站;机载激光雷达测量技术;地形测绘;点云

中图分类号:P217;P225.7

文献标志码:A

文章编号:1001-2184(2024)02-0020-07

Application of Airborne Lidar Technology in Topographic Survey of Ziyuan Pumped Storage Power Station

LONG Yujie, GU Jiewei, TANG Xiaoqiang

(PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 610000)

Abstract: The main function of pumped storage power station is to store more electric energy, usually in order to achieve this purpose, the site of the power station is usually located in the area with a large height difference and high vegetation coverage. In such areas, the traffic conditions are mostly poor, and making it difficult and costly measure by conventional methods, and the accuracy is also difficult to meet the requirements. In recent years, the development of airborne Lidar photogrammetry technology has played a good role in solving these problems. Combined with the practical experience of the actual project production, this paper expounds various aspects of survey area analysis, flight design, point cloud and image data acquisition, data preprocessing, point cloud classification, and aerial image processing. Through the final accuracy analysis, it proves that airborne lidar technology can still meet the accuracy requirements of terrain surveying and mapping in areas with large altitude difference and high vegetation coverage. It has a broad application prospect for water conservancy and hydropower aerial photogrammetry in the future.

Keywords: Pumped storage power station; Airborne Lidar survey technology; Topographic survey; Point cloud

0 引言

抽水蓄能电站按照常规的规划设计,一般有上下两级水库,工作原理主要是利用电力负荷低谷时的电能抽水至上水库,在电力负荷高峰期再放水至下水库发电的小型电站。为满足上下库储能的需求,抽水蓄能电站通常选择在适宜形成高差较大的地方,同时综合考虑到电站的建设和施工便捷,上下库之间的水平距离较近。所以,在该选址原则下,电站选址往往在地势陡峭、相对高差

较大的山区,这些区域大多数植被茂密、地形复杂、交通不便,人类活动少。人工观测方法存在大多数区域到达困难甚至无法到达、效率低、成本投入大等问题,传统航空摄影测量方法存在像控点布设困难、影像匹配不易、作业周期长、植被覆盖区域精度差等问题,同时也为后续三维设计带来三维地形细致度不足的问题^[1]。

机载激光雷达测量技术(Light Detection And Ranging,简称 LiDAR)作为一种快速获取三

收稿日期:2023-11-28

维空间地理信息数据的技术,近几年在测绘行业中已经得到了广泛的应用^[2]。国外研究的机载激光雷达技术在地形测图方面的应用相对较少^[3],特别是优质水利水电资源点地形存在山高坡陡、河谷狭窄、植被茂密、气象复杂、交通通信不便等特点,这在激光雷达技术比较发达的欧洲国家相对少见^[4]。中国近几年对机载激光雷达技术进行了一定程度的研究和应用,但目前还处在起步的阶段,暂时未形成大规模化的生产性应用,也还没有比较完整的技术标准^[5]。针对水利水电建设工程行业,对于测绘精度要求比较高。由于地形条件限制,采用传统的人工和航空摄影测量的方式来获取较高精度要求的测绘成果非常困难,部分数据精度不能满足地形图的要求^[6],采用机载激光雷达技术进行数据的采集和处理,很好的解决了这一难题^[7]。

1 项目背景

资源县抽水蓄能电站(资源镇马家)项目是资源县推动风光电绿色能源产业发展的重大项目之一。该项目的上水库位于车田苗族乡粗石村,下水库位于资源镇马家村,电站规划装机容量 120 万 kW,总投资约 70 亿元。电站平均水头约 550 m,距高比约 5.5,建设条件优良。测区海拔在 400~1 500 m,山势陡峻,沟谷纵横,峰峦叠翠,山岭峰峦起伏绵延、岭谷互掩,谷狭沟深,属亚热带季风山地气候,其特点是春季干旱多风,夏季湿热多雨,秋季凉爽、昼夜温差大,冬季湿冷、降雪少。测区交通情况良好,有国道 G241、省道 S301、县道 X584 可以到达测区周围,有村道及机耕路贯穿测区,测区植被多为杂树、杉树、灌木、竹林,居民区周围多为水田、旱地及厚朴树,地形类别为山地。若采用常规航空摄影测量或倾斜摄影的方法,由于地形复杂、树木遮挡严重,测区面积大,需要投入大量人力和时间,且很多高山陡坡地段人员很难到达,因此测量精度很难保证^[8]。

2 机载激光雷达摄影测量技术方案

根据该项目的特点,采用机载激光扫描技术,获取高精度的激光点云、POS 数据和可见光影像数据。使用数据预处理软件完成 POS 联合解算、轨迹解算、点云数据解算、航带平差及坐标转换等

工作,输出标准点云成果^[9]。并使用点云数据后处理软件对点云进行去噪、滤波分类等工作,输出最终的点云成果数据。总体实施技术路线见图 1。

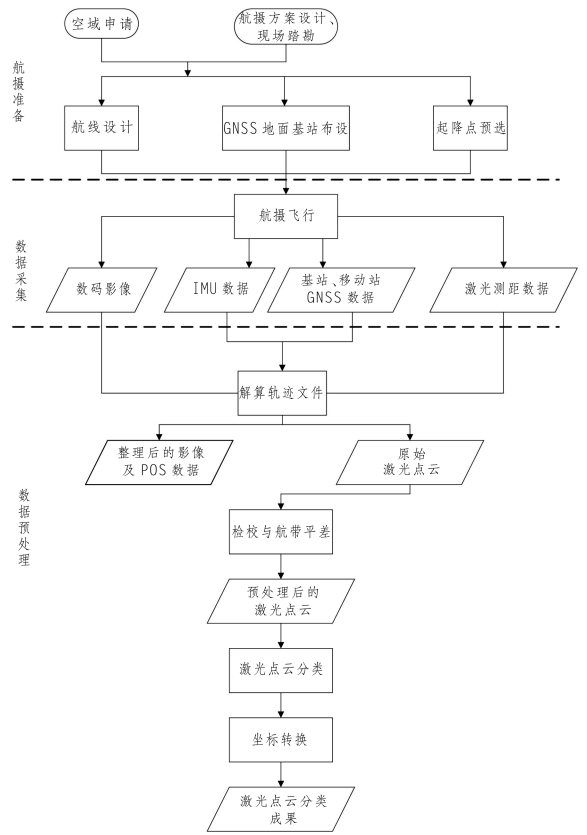


图 1 总体实施技术路线图

该项目选用傲势 XC-25 固定翼无人机搭载华测 AS-1300HL 多平台激光雷达系统进行数据采集。航飞范围图见图 2。

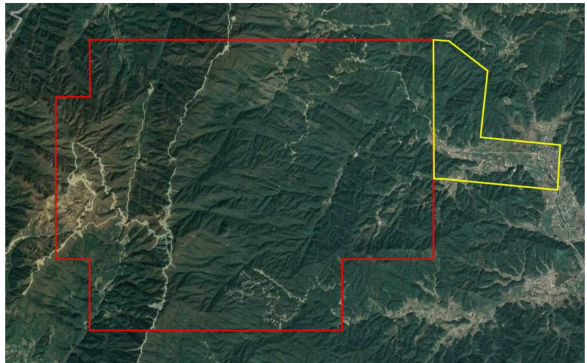


图 2 航飞范围图

3 机载 LiDAR 数据获取及处理

3.1 机载 LiDAR 数据获取

该项目选用傲势 XC-25 固定翼无人机搭载华测 AS-1300HL 多平台激光雷达系统开始执行外业数据采集任务,共飞行 4 架次,飞行总面积约为 25.9 km²。在测区范围内架设 2 个基站点(基站 1 和基站 2),基站布设图见图 3。激光航飞

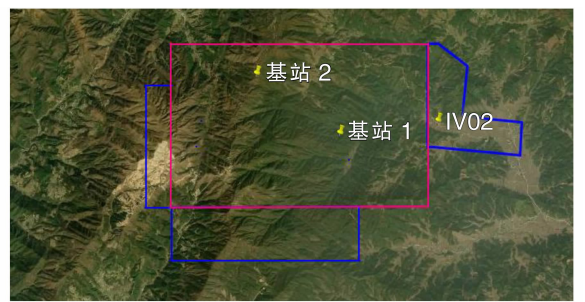


图 3 基站布设图

表 1 航线详细信息表

分区编号	航线数	绝对航高 /m	相对航高 /m	激光频率 /kHz	扫描频率 /Hz	相机焦距 /mm	影像分辨率 /cm	航向重叠 /%	旁向重叠 /%	点密度 (点/m ²)	飞行时间 /min	飞行面积 /km ²
1	8	1 030	500	200	60	24.000	9.4	80	65	6.7	38	7.1
2	8	1 530	500	200	60	24.000	9.4	80	65	6.7	49	8.6
3	6	1 720	500	200	60	24.000	9.4	80	65	6.7	38	6.1
4	5	1 820	500	200	60	24.000	9.4	80	65	6.7	34	4.1
5	6	1 830	500	200	60	24.000	9.4	80	65	6.7	39	6.1
新增	16	503	150	240	60	25.726	8.0	80	65	74.0	34	2.1

坐标转换、点云分类等步骤。利用点云数据测绘产品生产地形图,根据分类完成的地面点云,提取模型关键点和等高线关键点,生成等高线和高程点,利用 CASS 软件编辑等高线及高程点,即完成地形图的高程要素采集,利用影像生产正射影像(DOM),绘制地物要素,结合外业调绘、补测成果进行编辑,经质量检查、修改,完成地形图制作^[10]。点云数据测绘产品生产流程图见图 4。

3.2.1 点云轨迹解算

点云轨迹解算采用 Inertial Explorer(简称 IE)后处理软件进行。根据测区范围和基站条件,采用双向紧耦合的方法进行解算。

从轨迹解算的精度评估图(以一个架次解算后的轨迹为例)可以看出,主航线上往返计算的分离偏差值基本小于 16 cm,此次获取的数据具有良好的可靠性与精确度。轨迹解算分离偏差图见图 5。

检查差分解算的位置精度(Estimated Position Accuracy),基本都在毫米级,各项指标良好,

设计详细信息见表 1。
航飞执行满足《航空摄影技术设计规范》GB/T 19294-2003。

3.2 数据处理

首先对点云数据进行预处理,在 IE 软件中通过实时 GNSS 和 IMU 数据从测距文件中粗略提取出激光点云数据,检查激光数据的覆盖完整性和基本分布、质量特征。激光点云数据按 20% 抽样提取,提取出的数据在 TerraScan 中检查各个航带数据的重叠情况。经检查,数据的覆盖范围达到设计要求,激光点密度和典型目标的反射率正常。

预处理后,进行点云质量检查、影像预处理、

差分解算位置精度评估图见图 6。

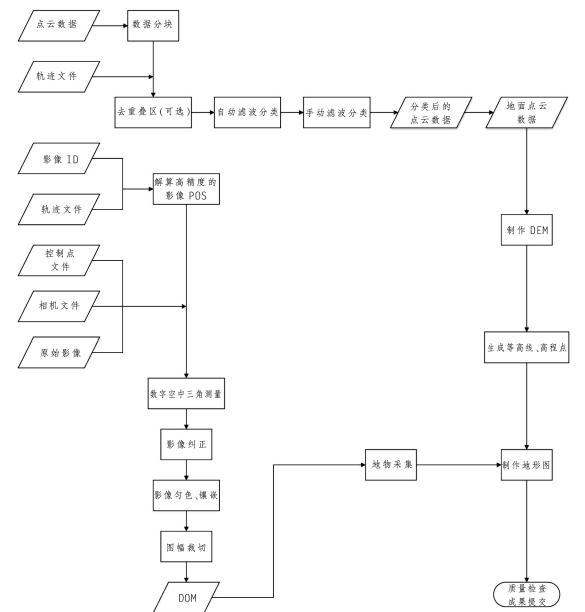


图 4 点云数据测绘产品生产流程图

检查差分解算的姿态精度(Estimated Attitude Accuracy),主航线的姿态精度基本小于 0.6

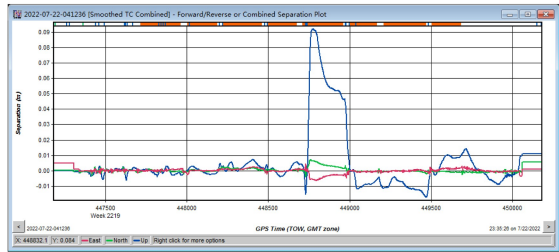


图5 轨迹解算分离偏差图

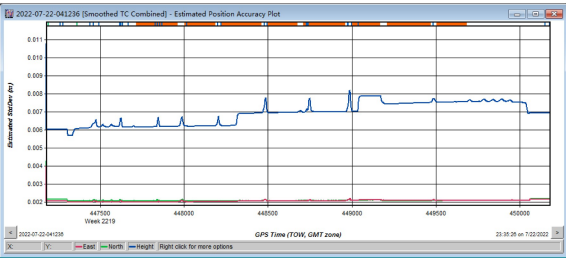


图6 差分解算位置精度评估图

分,飞机进出场的航线上,姿态精度优于0.6分,最大没有超过0.8分,精度指标良好,次差分解算姿态精度评估图见图7。

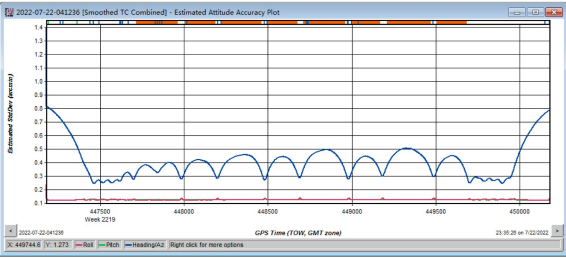


图7 次差分解算姿态精度评估图

3.2.2 点云解算及预处理

轨迹解算完成后,采用CoPre软件输出点云,输出前需选择主航线的轨迹,即剔除航线转弯处、进出场等飞行姿态不好的轨迹,再将点云数据以“*.las”的格式进行输出。

(1)激光点云覆盖完整性检查

对于输出的激光点云数据,套合范围线检查数据覆盖的完整性。该次飞行,采集的点云和影像数据覆盖完整,无漏洞。2022年7月19日下达任务范围激光点云的平均点密度为9.87个/m²,2022年8月17日变更新增范围激光点云的平均点密度为104个/m²,满足相关规范的技术要求。

(2)激光点云穿透性检查

该项目测区,测区内植被覆盖茂密,对激光点云的穿透率造成一定的影响。将测区内的激光点

云进行剖面分析,检查激光点云在典型植被区域内的穿透性。经过检查,测区内的典型植被情况,图8是低矮植被、稀疏的针叶林、灌木林中激光点云穿透情况,穿透到地面的点能够形成了连续的地形表面;图9是植被高大密集的林地,激光点云的穿透率相应的较低,激光穿透到地面的点相对较少,有些地方无法形成连续的地形表面,但是地形表面走向线能清楚地显示出来:

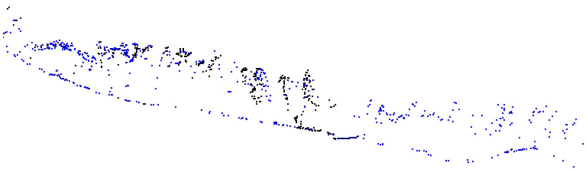


图8 低矮植被、稀疏的针叶林、灌木林中激光点云穿透情况

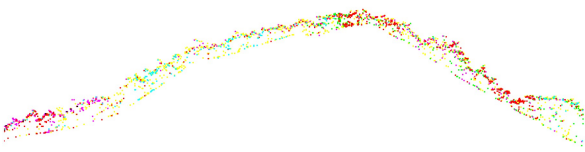


图9 密集植被激光点云穿透情况

(3)点云数据内符合精度检查

首先检查每个架次内部各个航线间的数据分层情况,若有较大分层情况则采用CoRefine软件或TerraMatch软件进行平差纠正。再检查不同架次接边处的点云分层情况,若有较大分层,则根据测区检测点调整相邻架次点云数据的高程。对裸露地面及房屋进行切剖面显示,检查点云数据分层情况,人字形屋顶点云数据的剖面图见图10。相邻航线以及相邻架次的点云数据分层优于30 cm,其内符合精度良好,满足相关规范的技术要求,相邻航线以及相邻架次的点云数据的剖面图见图11。

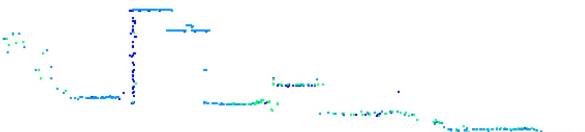


图10 人字形屋顶点云数据的剖面图

(4)点云数据绝对精度检查

测区实测了243个高程检查点,检查点较为均匀地分布于测区,高程中误差为0.121 m。检查点中误差小于《水电工程三维激光扫描测量规

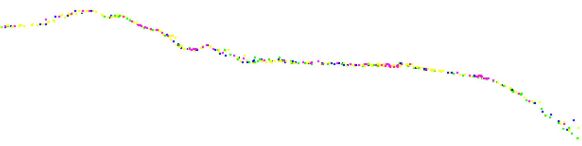


图 11 相邻航线以及相邻架次的点云数据的剖面图

程》NB/T 35109—2018 中对二级山地的点云数据高程中误差 1.340 m 的规定。该测区点云数据的绝对精度符合相关规范和技术设计要求,高程精度检查结果见表 2。点云数据高程中误差的分布基本满足正态分布,说明数据精度良好,没有出现整体性的系统误差。

表 2 高程精度检查表

最大值 /m	最小值 /m	平均值 /m	检查点高程 中误差 /m	二级山地高程 中误差 /m
0.217	-0.586	-0.031	0.121	1.340

3.2.3 影像数据预处理

影像预处理采用 CoPre 软件,提供影像文件及影像曝光时间记录位置和姿态的文件。影像输出为 8 位色深的非压缩 JPG 格式,以“摄区代号+快门曝光计数序号”命名影像。曝光时间文件中文件名应与之对应并经过验证。曝光标志文件已经根据拍摄影像的轨迹,删除航线转弯处以及进出场等姿态不好的曝光记录,只保留主航线上的曝光记录。影像以“*.JPG”格式存储;曝光标志文件以“*.dd”格式存储;原厂相机检校文件以“*.pdf”格式存储。

(1)影像数据覆盖完整性检查:

将测区内所有影像的 POS 坐标展点到 CAD 软件中,与范围线套合检查影像数据的覆盖情况。通过检查无影像漏洞,任务范围影像 POS 分布图见图 12,范围影像 POS 分布图见图 13。

(2)影像质量检查:

各个架次的航片编号与影像 POS 中记录的编号一一对应,航片数量正确有效,无黑片、漏片,影像色彩真实,无明显色差。

3.2.4 坐标转换

(1)激光点云高程转换

预处理后的点云数据坐标系统与目标坐标系一致,高程为大地高。根据高程转换模型,将点云数据大地高转换到正常高。

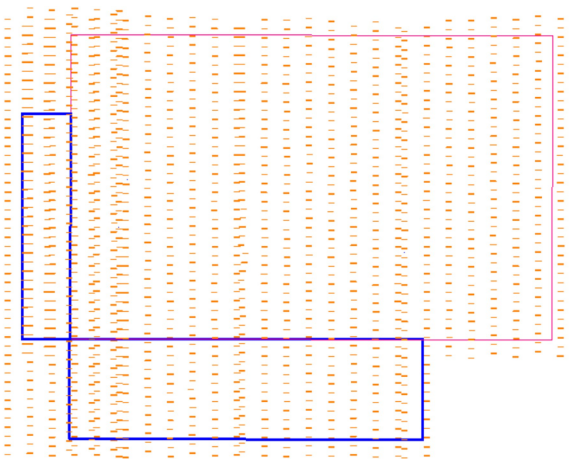


图 12 任务范围影像 POS 分布图

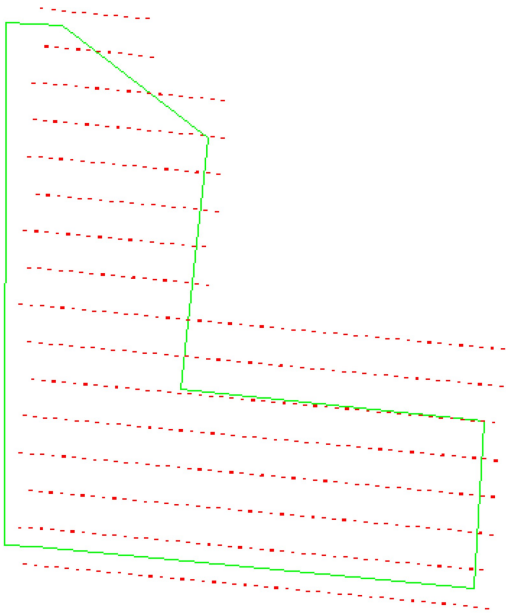


图 13 范围影像 POS 分布图

(2)影像 POS 高程转换

预处理后的影像 POS 数据坐标系统与目标坐标系一致,高程为大地高。根据高程转换模型,将影像 POS 数据大地高转换到正常高。

坐标转换主要使用 TerraSolid 软件的 TerraScan 模块。根据建立的测区大地高与正常高的转换模型进行转换。

3.2.5 点云分类

LiDAR 系统获得的初始数据,不仅包括地面上的所有地物,如建筑物、植被、水、道路及道路上的汽车等 DSM 地表模型,称为“全部层”。将 LiDAR 数据应用于各领域之前,对其进行了非地面点的过滤处理。激光点云分类流程见图 14:

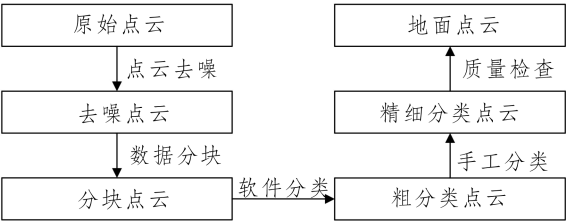


图 14 激光点云分类流程

- (1)点云分块
- 由于整个测区的点云数据量大,计算机的硬件处理能力有限,因此在分类前,对测区数据进行分块处理。
- (2)点云粗分类
- 在 TerraSolid 中将分块后的点云数据进行粗分类,去除各种噪声点和误差点,并利用合适的算法进行滤波处理,实现对激光数据的粗分类,获取裸露地表的激光点。TerraScan 提供了丰富的分类工具,进行点云数据的分类工作。
- 通过软件的自动分类算法,对点云进行粗分类,得到初始地面点云。
- (3)手动精分类
- 由于通过软件的自动分类算法,得到的地面点存在错分、漏分等情况,比如将一些低矮的植被错误的归类到地面点中,或是将山峰、田埂等地面点错误地归类到非地面点中。因此在粗分类的基础上,采用人机交互的方法手动分类,并以实时获取的影像作为参考,得到正确的地面点云。
- (4)点云分类数据检查

通过点云分类显示、按高程显示等方法,目视检查分类点云,对于有疑问的地方,采用点云切剖面的方式来进行辅助检查。经过检查,测区内点云分类数据质量满足要求。

3.2.6 地形数据生成

根据分类完成的地面点云,按照成图比例尺,利用 TerraSolid 软件提取等高线关键点和模型关键点,生成等高线和高程点。

使用南方 CASS11.0 编辑软件按照相关作业要求及规范完成地形数据编辑工作。

3.2.7 地物采集

利用 PIX4D 软件对激光采集区域的地面影

像进行免像控空三加密,生成分辨率优于 0.1 m 的 DOM 以用于地物采集。

使用南方 CASS11.0 编辑软件按照相关作业要求及规范完成地物采集工作,地物采集样图见图 15。

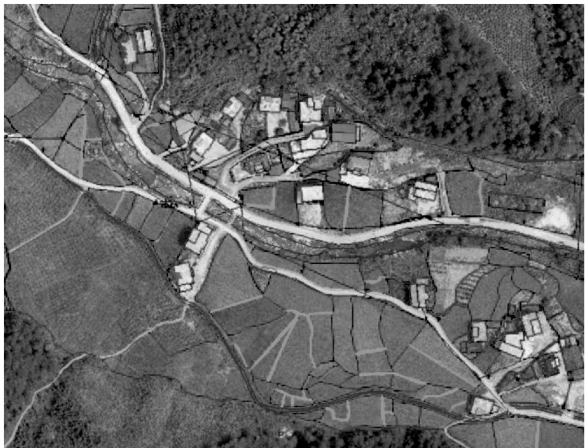


图 15 地物采集样图

3.2.8 外业调绘及修测

外业利用内业完成的地形图采集成果,配合正射影像,利用基础测绘外业电子调绘系统,开展外业调绘工作。主要对测区地类、居民区、工矿建(构)筑物及其它设施、交通及附属设施、管线及其附属设施、水系及附属设施、土质和地貌、地理名称及权属等进行调绘。同时,对大面积影像模糊地物、隐蔽或阴影遮盖地物、变化和新增地物、地貌进行修测。保证了地形图产品的时效及准确性。外业将调绘及修测资料进行处理,形成 dwg 格式数据,提交内业进行数据整编。满足规范和测绘作业计划要求。

3.2.9 编辑成图

地形图要素分层表示,分层的方法和图层的命名按照成勘院分层要求执行。

图幅分幅:采用图廓西南角坐标,以公里为单位。1:1000 地形图按 50 cm×50 cm 分幅,以成图比例尺分母/10 m 划分。

图幅编号:采用从北至南,从西至东的原则编制图幅号。图幅号使用阿拉伯数字 1、2、3、4 等。

(1) 地形图数据编辑

①数据编辑在南方 CASS 专用图形编辑系统上,依据相应比例尺图式的要求以及外业调绘片

和调绘结果,按照综合取舍的原则进行数据编辑,做到不失真、不遗漏,主次有别、层次分明;消除定位错误、图层错误、属性错误等;

②数据编辑过程中,消除了要素的图形遗漏、属性遗漏、注记遗漏等;

③数据编辑过程中,消除了要素间相互矛盾、线条不平滑等不合理现象;

④编辑后的图形文件绘图输出时,符合《国家基本比例尺地图图式第 1 部分 1 : 500,1 : 1 000,1 : 2 000 地形图图式》GB/T 20257.1—2017 的相关要求。

(2) 地形图图幅接边

①同比例尺同精度图幅接边,地物平面位置较差或等高线的高程较差符合要求的地物平面位置中误差或图幅等高线高程中误差的 2 倍,在限差以内则取中数接边。

②各类地物的拼接,符合实际形状及相关位置;地貌接边未产生变形。

外业工作结束后,内业依据外业提供的成果数据,利用南方 CASS 专用图形编辑系统,进行规范化编辑、接边、分幅和图廓整饰。自查后经过两级检查、修改,形成最终测绘产品。

3.3 精度分析

由于测区部分区域植被茂密、不同高度的植被多层次覆盖,导致激光点云穿透效果较差。且外业现场山区实地交通条件很差,外业人员能到达的修补测区域有限,导致测区局部植被茂密区域精度不佳。对外业人员无法到达的区域,采取传统航测方式恢复立体像对进行修测和生成 DSM 的方式进行地形判读修改等高线。由于植被太深无法看到地面,所以仅能修饰大致山形。对存在这种情况的局部区域,笔者在地形图上注记“植被茂密”并圈定范围放在“其他情况说明”图层。

该次地形数据获取方式为机载激光雷达数据采集,利用点云生产等高线,利用影像采集地物,外业测点检查,调绘及修补测,内业进行套合编辑,形成地形图和地类图成果。严格按《测绘作业计划》和《水电工程测量规范》NB/T 35029—2014、《国家基本比例尺地图图式第 1 部分 1 : 500,1 : 1 000,1 : 2 000 地形图图式》GB/T 20257.1—2017 规范要求执行。

根据测绘产品生产流程及项目安排,对测区进行外业测点检查地形图,统计精度情况,地形图精度统计见表 3。

表 3 地形图精度统计

工程名称	比例尺	平面位置中误差 /m	平面位置中误差限差 /m	高程中误差 /m	高程中误差限差 /m
资源县(马家站点)抽水蓄能电站地形图	1 : 1 000	±0.229	±0.8	±0.372	±0.67

综上所述,该次完成地形图精度满足测绘作业计划的相关精度要求,符合《水电工程测量规范》NB/T 35029—2014 的规定。

4 结 论

通过广西资源抽水蓄能电站地形图测量项目的实践,得到结论如下:

(1)机载激光雷达技术在大高差、植被覆盖密集区域,相比传统的航空摄影测量以及倾斜摄影测量,有着更大的优势。首先,设备的更新换代,使得现在的点云密度更高,穿透性更强,对于地形的获取,有着更大的优势。

(2)无人机的的发展,使得作业效率提高。现代化的无人机有着更长的续航。搭载的设备一次性获取了激光雷达数据和航摄影像数据,极大的获

取了数据获取的时间,从而避免了航摄对天气的过分依赖。

(3)随着激光雷达设备的发展,点云数据量大,该次项目采用了数据分区处理、分块处理的方式,虽然增加了接边的工作量,但总体提高了生产效率,同时也保证了点云精度能够达到规范要求。

机载激光雷达正在逐步成为一种主流且非常重要有效的测绘技术,但目前的技术手段,对于点云的滤波、分类等工作,人工干预的工作量还比较大,希望在后期能够完善算法,减少人工工作量。相信在未来的工程建设当中,机载激光雷达会有更广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 张婷,燕樟林,许晶,等. 机载激光雷达在抽水蓄能电站三维地形数据采集中的应用[J]. 大坝与安全,2019(4):

32-34.

[2] 徐晓臣,谢津平. 机载激光雷达技术在乌龙山抽水蓄能电站工程测量中的应用[J]. 水利水电技术,2017,48(10):136-141.

[3] 宋高伟. 机载激光雷达摄影测量在桐城抽水蓄能电站中的应用[J]. 吉林水利,2019(6):52-55.

[4] 张婷,燕樟林,许品,等. 机载激光雷达在抽水蓄能电站三维地形数据采集中的应用[J]. 大坝与安全,2019(4):32-34.

[5] 查海林,李光明. 无人机机载激光雷达扫描系统在抽水蓄能电站工程中的应用研究[J]. 中国科技纵横,2020(17):21-23.

[6] 张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法[M]. 武汉:武汉大学出版社,2007.

[7] 许克嵘,黄磊,程铁洪,等. 轻型机载 LiDAR 技术在电力工

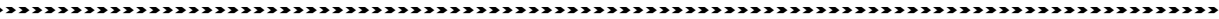
程中的应用[J]. 电力勘测设计,2017(增刊1):37-41.

[8] 蔡悦. 机载激光 LiDAR 在密林山区测绘中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息,2020,43(3):157-159+164.

[9] 曹炳霞,黄剑飞. 激光雷达点云数据处理软件对比及其应用研究[J]. 矿山测量,2019,47(1):109-112.

[10] 李冬森,王永志,陈建忠. 基于低空摄影测量的机载 LiDAR 点云修复方法[J]. 测绘与空间地理信息,2019,42(4):52-54.

作者简介:
龙宇杰(1990-),男,四川成都人,工程师,硕士研究生,从事航空摄影测量与遥感工作;
辜杰为(1984-),男,四川成都人,高级工程师,硕士研究生,从事勘测管理工作;
唐晓强(1981-),男,四川成都人,工程师,本科生,从事工程测量工作.
(编辑:廖益斌)



(上接第 5 页)

4 结 语

笔者以四川省为研究区域,利用常规矩法与线性矩法分析极值降水的四个统计参数及空间分布。主要结论如下:常规矩法和线性矩法均适用于四川省极值降水空间分布特征的分析,且分布规律具有相似性。四川省 1、3 小时极值降水均值从川西高原向四川盆地逐渐增高,高值中心位于盆地西部沿山一带的眉山市与乐山市交界处,空间覆盖范围与青衣江暴雨中心相一致。1 小时极值降水偏差系数在川西高原由北向南递减,高值中心在阿坝藏族羌族自治州;3 小时偏差系数高值区域位于德阳市与绵阳市,与龙门山暴雨中心一致。1 小时偏态系数由川西北部向川东南递减,高值中心在阿坝藏族羌族自治州和甘孜藏族自治州;3 小时偏态系数高值中心位于阿坝羌族藏族自治州。1、3 小时峰度系数从川西高原向东部盆地递减,高值区在甘孜藏族自治州和阿坝藏族羌族自治州内。

受资料所限,该研究未对小时极值降雨统计参数空间分布成因进行深入探讨,下一步将结合四川省所处纬度、地形条件等探讨小时极值降雨统计参数空间变化特征的原因,并深入开展不同频率下小时极值降雨计算,为具体指导四川省中小河流山洪防御工作提供依据。

参考文献:

[1] 任国玉,吴虹,陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征[J]. 应用气象学报,2000(03):322-330.

[2] 江锦红,邵利萍. 基于降雨观测资料的山洪预警标准[J]. 水利学报,2010,41(04):458-463.

[3] 刘伟东,尤焕苓,任国玉,等. 北京地区精细化的降水变化特征[J]. 气候与环境研究,2014,19(01):61-68.

[4] 雷庆文,高培强,李建林. 基于 Python 的优化适线法在水文频率分析中的应用[J]. 河北水利电力学院学报,2021,31(03):25-29.

[5] Daniel Gellens. Combining regional approach and data extension procedure for assessing GEV distribution of extreme precipitation in Belgium[J]. Journal of Hydrology, 2002, 268: 113-126.

[6] 陈永勤,黄国如. 基于线性矩法的东江流域区域枯水频率分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2005(04):409-416.

[7] 涂华伟,彭涛,彭虹,等. 基于洪水过程的山区小流域洪水预警研究——以四川省白沙河流域为例[J]. 人民长江,2020,51(06):11-16.

[8] Hosking J. R. M. L—moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics [J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series B Methodological, 1990, 52(1):105-124.

[9] Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. Regional frequency analysis: An approach based on L—moments[M]. New York: Cambridge University Press, 2005.

作者简介:
王帅人(1998-),女,四川成都人,硕士,研究方向为极值降水;
兰平(1987-),女,四川成都人,助理研究员,博士,从事极端降水方面工作;
胡静(1998-),女,四川成都人,硕士,从事水文预报方面工作;
覃光华(1975-),女,四川成都人,教授,博士生导师,从事水文预报、水文模拟及水资源管理工作.

(编辑:吴永红)