水库地形测绘中无人机机载雷达的应用

符家辉
海南省水利水电勘测设计研究院有限公司，海南 海口 570203
DOI:10.61369/ERA.2025060003

摘　　要： 水库是以防洪、灌溉、供水、发电、渔业等综合效益为主要目标的大型水利工程。在水库建设过程中，需要对水库周边的地形地貌进行测绘，以便为水库的运行和管理提供必要的基础资料。本文结合实例，探讨了机载激光雷达在水库地形测绘中的应用。

关 键 词： 无人机机载雷达；三维点云；地形测绘

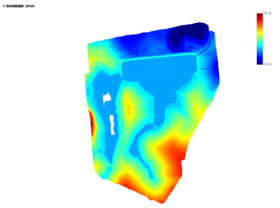
Application of UAV-borne Radar in Topographic Surveying and Mapping of Reservoirs

Fu Jiahui
Hainan Provincial Water Resources and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd.
Haikou, Hainan 570203

Abstract: Reservoirs are large-scale water conservancy projects with comprehensive benefits such as flood control, irrigation, water supply, power generation, and fisheries as their main objectives. In the process of reservoir construction, it is necessary to survey and map the topography and landforms around the reservoir to provide essential basic data for the operation and management of the reservoir. This article explores the application of airborne lidar in reservoir topographic surveying and mapping through practical examples.

Keywords: UAV-borne radar; 3D point cloud; topographic surveying and mapping

引言



机载激光雷达系统可以实时获取大范围内地形地貌数据，具有快速获取地形高程信息，获取地形图和三维影像，精确采集地物属性信息等优点。机载激光雷达系统可以通过高分辨率、高精度的测绘数据，准确获取水库周边地形地貌的三维数据模型，为水库建设方案设计、水文分析等提供依据。如图所示：

一、工程概况

海口市岭后水库，是一座兼具防洪、灌溉、供水及发电等多功能的重要水利枢纽。随着时间推移以及周边环境变化，原有的水库地形数据已无法满足当下水库管理、安全评估以及水资源合理调配等工作的需求。例如，在防洪方面，精准的地形数据对于洪水演进模拟、防洪预警至关重要；灌溉时，了解水库地形能更科学地规划灌溉范围与水量分配。因此，开展新一轮高精度的水库地形测绘工作迫在眉睫。

（一）机载激光雷达系统

机载激光雷达系统由飞行平台、激光发射系统、接收系统、数据处理软件等组成。该系统可以在无地面控制点的情况下，快速获取大范围高精度的三维点云数据，具有全天候、全天时、快速获取地形信息的能力[1]。

该设备采用了世界先进的固态激光雷达技术，通过接收机载激光接收器，将其发射出的激光束转化为脉冲形式，脉冲经整形后形成波形，并以此为基础生成数字地面模型。由于激光在空中传播时，会受到空气中大量悬浮颗粒及各种障碍物的影响，因此其产生的回波信号具有很强的随机性。经过分析和研究，该设备采用了两种解决方案来解决这个问题：一是采用多通道同步探测技术来提高系统的探测能力；二是采用主动式滤波技术来提高系统的探测精度。这两种方案都可以有效地提高系统的探测精度和抗干扰能力[2]。

为了降低系统测量误差，避免出现人工干预、人为干扰等问题，在实际应用中一般采用2套激光扫描仪进行测量。机载激光雷达系统可以连续工作数小时甚至数天，而不需要休息或进行其

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

它工作。因此，在本次项目中采用了2套机载激光雷达系统进行测量。

（二）无人机系统

本次项目中的无人机系统采用了某公司生产的某公司的M300rtk 无人机。M300rtk 无人机是一款多旋翼无人直升机，可以搭载多种载荷，包括激光雷达、多光谱相机、电子地图等，满足不同的测绘需求。

M300rtk 无人机的机身采用了复合材料制造，具有重量轻、强度高、耐腐蚀、抗氧化等特点。它可以在无电源的情况下执行任务，无需为其配备电池，这对于野外作业非常有利。它的电机采用了无刷直流电机，可以实现高速飞行，同时也更加的平稳可靠[3]。

M300rtk 无人机还配备了 GPS 模块和无线通信模块，可以实现数据的实时传输。M300rtk 无人机配备了一块智能电池，该电池具有自动充电功能。在飞行过程中，M300rtk 无人机可以根据电池电量的变化自动调节飞行高度和速度，确保其始终保持在最佳的工作状态下。

M300rtk 无人机还可以加装遥控设备，实现对其的遥控操作。该遥控设备可以设置飞行高度和速度等参数，完成对无人机的各种控制和数据传输工作。

M300rtk 无人机具有自动返航功能，当它到达预定高度时会自动返航。同时，该无人机还具有一定的自动悬停功能和自动降落功能。

（三）测量成果

为了检验测量成果的精度，本次测绘采用了禅思 L2雷达系统进行采集数据。无人机获取数据后，将数据导入到 ArcGIS 软件中，可以得到本次测绘项目的地形图。

在地形图的基础上，为了更好地进行水库的施工管理，还需要对水库周边的山体和河流进行测量。本次项目中，采用的是利用无人机机载激光雷达系统进行测量，无人机机载激光雷达系统采用了高精度的 RTK 设备，对水库周边进行了全方位的测绘[4]。

由于本次测量项目所涉及到的区域面积较大，在进行激光雷达测绘时，需要结合无人机飞行高度和飞行速度来确定位置。根据以往测量经验以及本次项目的实际情况，在确定激光雷达位置时，一般会选择在山体与河流交接处附近。此外，为了避免地形过于复杂而影响激光雷达正常工作，需要对周围环境进行考察。同时在进行测量时也要注意天气因素对测绘工作的影响[5]。因此本次项目采用了多个控制点来进行控制测量，并且采用 RTK 技术对其进行加密。

二、数据采集

1. 地形资料比例尺1：1000，坐标系为大地2000坐标系，1985国家高程基面，2007年版图式；标示清楚：（1）测量时间；（2）测量人员；（3）校审人员。

2. 测量成果须符合《工程测量标准》（GB 50026-2020）和《水利水电工程测量规范》（SL 197-2013）要求。

3. 测量图中应反映测量范围内的原有地形地貌（含水下地形）和所有构筑物。

4. 测量范围：按1:1000的比例及精度施测水库大坝平面图，坝肩处往上5m（垂直高度）或延伸50m，坝脚处及主要建筑物如涵管出口等往外水平伸展20m 范围内为测量范围。

5. 平面图中应标明大坝坝脚（上下游）迹线，标明坝上游的干砌石护坡范围及其顶高程，下游坝脚排水棱体范围及顶高程；应落实涵管进、出口高程，涵管内径及管壁厚度，渠道出口断面等建筑物的尺寸。

（一）飞行控制

飞行控制系统是无人机任务执行的基础，其主要负责无人机的姿态控制、飞行控制以及路径规划等。本次任务采用的是固定翼无人机，其动力系统为三轴增稳机械，结构简单、稳定性高，具备较强的抗风性能。其飞行高度和航高受到机体尺寸和负载能力的限制，在实际应用中需对其进行适当的调整。通过在 GPS 基准站上进行 GPS 定位，获取飞机位置坐标；通过地面控制站接收 GPS 信号，获取飞机姿态信息。在飞行过程中，通过实时监测机身姿态参数，采用 PID 控制算法实现飞机飞行姿态的自动解算，从而完成对航向和横滚角的精确控制[6]。

（二）航飞方案设计

根据任务要求，飞行高度控制在120m 以下，航高控制在80m 以下。每次飞行前都要进行航飞方案设计，根据设计方案确定每条航线的飞行参数及飞行顺序。例如：基线航线1号线的初始参数为：高度120m、距离2000m；基线航线2号线的初始参数为：高度120m、距离4000m；基线航线3号线的初始参数为：高度120m、距离6000m。

三、精度分析

无人机机载激光雷达系统是利用无人机搭载激光雷达传感器，在航线飞行过程中采集地面高程数据，将原始数据经过处理后，生成 DEM、DOM、DSM 等产品，用于水库的勘测和规划[7]。

为了验证无人机机载激光雷达系统在水库地形测绘中的应用精度，在水库周边选取一定面积的区域进行了试验。在该区域内共布设了3个测站，测站与测站之间的距离为3 km。按照每2 km 布设一个像控点的方式对本次试验进行控制。本次试验共布设了9个像控点，其中5个点位于测区边缘，其余5个点位于测区中心。当距离测区边缘4 km 时，测站与测站之间的平均误差为0.086m；当距离测区中心6 km 时，测站与测站之间的平均误差为0.323m。因此，本次试验采用无人机机载激光雷达系统可以满足水库地形测绘精度要求。如图所示：

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

（一）平面精度

采用测区中心的像控点对整个测区进行平面控制。在距离测区中心2 km处，控制点的平面误差最大，为2.78 cm；在距离测区中心6 km处，控制点的平面误差最小，为0.47 cm。同时可以看出，在测区边缘，平面精度相对较高；而在测区中心，平面精度较低。这是由于距离测区中心越近，航线角度越小，从而使得高程精度下降。另外，在距离测站边缘2 km和6 km处分别布设了3个像控点。因此可以认为在测区边缘布设的3个像控点能够满足精度要求[8]。

（二）高程精度

在本次试验中，选取了两个具有代表性的点，即测区边缘点和测区中心点。测区边缘点的高程误差为7.839m，测区中心点的高程误差为7.837m。无人机机载激光雷达系统采用全球定位系统（GPS）和惯性导航系统（INS）获取机载传感器所获得的三维坐标数据[9]。在数字地面模型（DTM）中，高程数据的精度直接影响DTM精度。而机载激光雷达系统是通过获取高精度DEM数据，从而获得地面三维点云的空间分布情况，因此从某种意义上说，激光雷达数据本身就具有高精度。在本次试验中，测区边缘点和测区中心点的高程精度均达到了厘米级；当距离测站4 km时，测区边缘点和测区中心点的平均误差为5.652m；当距离测站6 km时，测区边缘点和测区中心点的平均误差为7.837m。

（三）点云分类精度

将无人机机载激光雷达系统获取的点云数据，通过激光雷达技术进行地物分类，并输出相关数据。其中，高程数据采用激光雷达点云数据进行处理，利用激光雷达点云数据的点密度和高度信息计算地物高程值。同时，将三维坐标转换为平面坐标和高程，并生成三维点云模型。

地面点的分类精度较高。根据所获取的三维点云模型，可以将地面点分为3类：建筑、树木和其他地物。其中，建筑和树木的分类精度较高。对于建筑地物，通过测量地物的高度差、坡度差、棱线差等参数来判断建筑物是否属于建筑地物；对于树木和其他地物，通过测量树木与地面之间的高度差判断其是否属于树木地物；对于其他地物，通过测量地面与相邻地面之间的高度差判断其是否属于其他地物。

四、水库三维模型的构建

在水库周边，我们可以看到各种建筑物，但这些建筑物不能用简单的几何图形来表示，它们应该由三维空间几何体来表示。所以，在构建水库三维模型时，应根据已有的地形地貌特征进行提取。

对于建筑物来说，可通过分析建筑的不同角度的图像，将其分为多个层次，利用计算机软件进行数据处理，从而形成建筑物三维模型。在构建三维模型时，可以利用TIN（TIN是Terrain Index Number的缩写）进行划分和提取。通过分析建筑物的不同角度图像数据，可以生成建筑物表面的三维模型。

构建三维模型时应注意以下几点：

（1）在构建三维模型时，需要将所有的地面点和地面线都包括在内。

（2）在构建三维模型时，应该先建立建筑物表面。

（一）生成三维模型

通过无人机机载雷达生成的数字高程模型数据，可以直接应用于数字高程模型数据的创建，还可以对其进行几何处理，从而生成具有真实地形地貌的三维模型。通过无人机机载雷达生成的数字高程模型，可以应用于多种领域。在水库建设中，无人机机载雷达的应用能够快速获得水库周边的三维地形地貌信息。由于三维地形地貌信息是从多个角度进行采集和获取的，因此在获取数据时需要应用不同的软件和方法。通过建立TIN结构，并将其划分为多个层次，可以生成具有不同拓扑结构的三维地形地貌信息。在利用无人机机载雷达采集数字高程模型数据时，需要注意以下几点：（1）对植被进行处理。（2）对建筑物进行处理。

（二）三维模型的提取与分析

点云生成：经过预处理的数据以点的形式呈现，每个点包含了在地理坐标系下的三维坐标信息（X、Y、Z）。这些点构成了点云数据，直观反映了水库地形表面的离散分布情况。通过特定的软件工具，将雷达采集的原始数据解析并生成点云文件，为后续的模型构建奠定基础。表面重建：基于点云数据，运用表面重建算法构建水库地形的连续表面模型。常用的算法有三角网生成算法（如Delaunay三角剖分），它将点云数据中的离散点连接成三角形网格，形成一个近似的地形表面。通过对三角形网格进行优化和细化处理，可提高表面模型的精度和光滑度。纹理映射：为了使构建的三维模型更加真实直观，可将无人机同时搭载的光学相机拍摄的影像数据作为纹理信息，映射到地形表面模型上。通过纹理映射，三维模型不仅能够呈现地形的几何形状，还能展示地面物体的颜色、纹理等特征，增强模型的可视化效果[10]。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

五、结束语

综上所述，无人机机载激光雷达系统在水库地形测绘中的应用，解决了传统测绘方法效率低、劳动强度大的问题，提高了工作效率，降低了生产成本，为水库的建设和管理提供了有力支持。同时，利用无人机机载激光雷达系统，可以采集更多、更准确、更全面的数据信息，为水库规划设计、工程管理提供基础资料。在今后的工作中，需要不断改进机载激光雷达系统的技术和应用方法，不断提高其数据处理能力，为水库地形测绘工作提供更加优质的服务。

参考文献

[1] 闫宝华 . 论无人机在地形测绘工程中的应用 [J]. 数字通信世界，2022(3):119-121,124.

[2] 张安信 . 无人机技术在工程检测行业上的运用现状和展望 [J].. 四川建筑，2022,42(2):76-78,82.

[3] 元立壮，安士凯，田超，等 . 基于无人机激光雷达技术的开采沉陷监测方法与参数反演川 [J]. 科学技术与工程，2022,22(12):4752-4761.

[4] 杜梦飞，刘俊锋 . 测绘工程中无人机的应用流程及要点分析 [J]. 工程技术研究，2022,7(3):220-222.

[5] 罗宇，梁晓军 . 无人机测绘技术用于工程测量的实践探究 [J]. 科技资讯，2019,17(32):52-54.

[6] 黄丹 . 无人机机载雷达在广西古皂水库地形测绘中的应用 [J]. 水利水电快报 ,2022,43(S2):18-22.DOI:10.15974/j.cnki.slsdkb.2022.S2.006.

[7] 李森华 . 基于无人机 LiDAR 技术的复杂地形测绘精度优化方法 [J]. 水利建设与管理 ,2023,43(S1):101-106.DOI:10.16616/j.cnki.11-4446/TV.2023.S1.20.

[8] 黎广 , 黎亮 , 杨智翔 . 机载 LiDAR 系统在水库地形测绘中应用研究 [A]. 江苏省测绘地理信息学会 . 第二十二届华东六省一市测绘学会学术交流会论文集（二）[C]. 江苏省测绘地理信息学会 :《现代测绘》编辑部 ,2021:4.DOI:10.26914/c.cnkihy.2021.019203.

[9] 史佳豪 , 鲁健 , 黎娟 . 无人机机载雷达作业的航线控制优化研究 [J]. 自动化与仪器仪表 ,2023(08):150-154.DOI:10.14016/j.cnki.1001-9227.2023.08.150.

[10] 左罗 , 田其 , 郭力驰 . 利用无人机机载雷达测量进行输电线路竣工通道检测分析 [J]. 湖北电力 ,2023,47(01):91-97.DOI:10.19308/j.hep.2023.01.013.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.