

基于多模态数据的水库三维模型构建与工程应用

苏秀永^{1,2}, 肖奔奔^{1,2}, 魏填填^{1,2}

(1.浙江华东测绘与工程安全技术有限公司, 杭州 310014;

2.中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 310014)

摘要: 针对库区早期单一测绘产品, 已无法满足水库精细化管理这一问题, 本文提出利用无人机倾斜摄影、无人船多波束测量技术分别获取库岸、水下海量数据, 经过空三解算、匀光匀色、各项改正等一系列处理后, 构建库岸、水下三维模型的方法, 并通过图新地球软件一体化展示, 供用户使用。以陈蔡水库为例, 阐述了库岸、水域数据采集与处理的方法与特点, 以及三维建模的流程。所构建的模型直观形象、系统全面地反映库区地物、地貌信息, 既能应用于库区淹没范围计算、库容复核、库底坡度计算、泥沙淤积分析、绘制库区地形图等, 也为后期库区运维管理系统、数字孪生库区建设提供了足够精准的时空数据。

关键词: 无人机倾斜摄影; 无人船; 多波束; 多模态数据; 三维建模

中图分类号: P23

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023529

苏秀永, 肖奔奔, 魏填填. 基于多模态数据的水库三维模型构建与工程应用[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(Supp.1): 175-179.

SU Xiuyong, XIAO Benben, WEI Tiantian. Construction and Engineering Application of Reservoir 3D Model Based on Multimodal Data[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(Supp.1): 175-179.

0 引言

水利水电工程是我国经济发展的重要基础, 目前我国已建各类水库 9.8 万多座, 总库容达 9 000 多亿 m^3 。早期修建的水库, 库岸地形多以航摄技术解析成中小比例尺地形图, 精度偏低; 水域测量多采用全站仪结合测深锤或 GNSS (Global Navigation Satellite System) 结合单波束测深仪进行定位测深, 该作业方式劳动强度大且数据质量不高。水库在长期运行过程中, 受地表径流、洪水冲刷等自然因素以及人类生产建设活动影响, 库区的地形和库容也势必发生变化。以上因素导致早期的库区地形图精度低、现势性弱且产品单一, 已无法满足时下水库精细化管理需求, 水库三维模型构建及信息可视化应用应运而生。

历经多年发展的无人机低空航测技术, 能够高效率获取高精度的海量三维数据, 在水利水电工程大比例尺地形图测绘中得到有效应用^[1-2]。诞生于上世纪 70 年代的多波束测深系统经过多年的发展^[3], 日趋成熟, 成功应用于水库地形测量^[4-5]、水工建筑物检测^[6], 以其快速、高效和全覆盖的特征, 在大量水下测量领域正逐步替代单波束测深仪。王合玲等^[7]阐述了水陆空三位一体测绘技术在某山塘水库测绘中具体应用。由无人机航测和多波束测深技术获得的海量的数

据, 为构建库区库岸、水下三维模型提供了数据基础。马红^[8]利用无人机航测数据实现了实景三维建模, 陈宝枝等^[9]利用多波束数据建立了水下三维地形模型。三维模型既能提供库区全方位的浏览, 又可对地物进行实时测量, 还可进行三维空间分析。

得益于前人大量研究, 本文提出利用无人机倾斜摄影、无人船多波束测量技术, 获取库岸、水下海量地形数据, 使用 Smart 3D、Terrasolid 软件构建水库三维模型, 使用图新地球软件对库岸、水域模型进行融合、一体化展示。通过陈蔡水库三维建模项目实践应用, 验证这种建模方式的可行性和实用性。

1 多模态数据三维一体化建模方法、特点

使用地面智能终端, 结合测区的相关数据, 对飞行航线进行规划设计, 设置参数, 实现仿地飞行; 地空信息数据实时双向传输, 实时显示飞行参数, 对无人机进行超视距操控, 开展无人机搭载多镜头的倾斜摄影测量。

以无人船为载体, 集通信、动力、多波束、GNSS、IMU 及计算机于一体的水下三维数据采集系统, 自动或手控扫描水下地形。新型无人船测量系统具备组装简易、携带方便、多波束免安装校准, 测量精度高、无死角全覆盖等优点, 尤其适用于湖泊型水库。

基于无人机倾斜摄影测量技术获取的多视影像构建的库区陆上三维实景模型, 与使用无人船多波束测量系统获取的水下三维数据构建的水域三维模型,

收稿日期: 2023-11-15 修回日期: 2023-11-15

作者简介: 苏秀永 (1976-), 男, 安徽淮南人。高级工程师, 主要从事工程测量质检。

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

空间参考系一致，能够融合展示。

1) 无人机航空摄影测量和原始数据处理。影响航空摄影测量精度的主要是航高、像控点的布设方法和密度，以及影像重叠度。根据地面分辨率确定适宜的航高：

$$h=f \times \text{GSD} \times a^{-1}, \quad (1)$$

式中： h 为摄影航高； f 为物镜焦距； GSD 为航摄影像地面分辨率； a 为像元尺寸。地面分辨率由测图比例尺根据规范^[10]确定。

航线飞行方向根据地形走向设计，航向重叠 80%，旁向重叠 80%^[11]。像片控制点采用航线布点，平高点宜采用像主点布点。对于丘陵、山区，像控点布设困难，可少量布设。

对外业飞行质量进行检查后，航摄内业的内容一般包括数据的预处理、自动化空三加密。其中，将无人机航拍的影像、POS 资料以及相机参数导入处理软件，对影像进行滤波变化、畸变差改正等一系列预处理；使用外业布设的少量像控点和影像上众多定向点，通过光束法进行自动化空三加密^[12]，连同外业布设的像控点进行联合空三，进一步提高影像精度。

2) 库岸三维实景模型构建。航摄飞行获取的原始影像数据使用与相机镜头配套的专业系列软件进行图像后处理。为了保证模型纹理色调的均衡，在空三计算之前利用软件对部分照片进行调色处理，在实景三维建模工作站下进行空三平差后自动化三维建模生产，对局部拉花的模型进行修补，最终得到实景三维模型。

3) 无人船水下测量及数据处理。外业测量前，需对测区状况，尤其是测区范围内的水深、水下障碍物、水流流速、水流流向等要素有所了解，根据水深情况布设主测深线、确定无人船航速。主测深线平行或垂直水库轴线走向，测深线间距在保证全覆盖测量的基础上还需测线间有数据重叠带，相邻子区应有 5% 以上的重叠。船速按照式 (2) 计算，确保扫测数据质量。

$$V=2 \tan \frac{\theta}{2} \times (H-D) \times P, \quad (2)$$

式中： V 是最大船速 (m/s)； θ 是纵向波束角 (°)； H 是测线上最浅水深 (m)； D 是换能器吃水 (m)； P 是多波束测深系统的实际发射频率 (Hz)。实际作业中无人船以某一速度匀速航行。

水下数据采集、处理作业流程如下：求取系统校准参数→创建船型文件→新建工程文件→导入原始观测数据→数据编辑、改正→条带水深转换计算→水深网格化→构建河床表面网格模型→构建水下三维模型。其中水深值按取浅原则选取。水下数据量大、冗余，数据处理和三维建模，考验服务器最大运行内存，需

要分区域处理，或设置一定阈值，对海量多波速数据进行抽稀。

4) 图新地球是由中科图新 (苏州) 科技有限公司开发，具有大范围、海量、多源数据一体化管理和快速三维实时漫游功能的国产三维地球软件，支持空间数据快速融合。本文利用该软件实现了实景三维模型、人工模型完美融合，在一个场景中直接展示或进行多期对比，进行空间测量分析，叠加各种二、三维数据。

2 工程实践

2.1 水库概况和技术要求

1985 年竣工后运营至今的陈蔡水库是一座以防洪为主，结合灌溉、发电、养鱼等综合利用的大 (2) 型水库，位于浦阳江支流陈蔡江上游。根据水库加固改造工程项目要求，需要制作水库陆上约 13 km² 的倾斜摄影模型及水库水下约 3 km² 三维模型，最终完成库岸、水域一体化建模。要求采用 2000 国家大地坐标系、1985 国家高程基准 (二期)；倾斜摄影实景三维模型地面分辨率 0.03 m，水下三维模型优于 0.5 m；模型参考比例尺为 1:1 000，特征点点位中误差要求不大于 0.6 m，高程中误差不大于 0.5 m。

2.2 无人机航摄与库岸实景三维建模

该项目采用无人机倾斜摄影技术获取多视影像结合飞行作业航迹数据，采用专业软件进行数据处理，进行库岸实景三维模型的构建。主要流程：影像数据采集→空三加密→影像密集匹配→DSM 生成→纹理映射→实景三维建模。

2.2.1 无人机倾斜摄影测量及数据处理

选用大疆 M300RTK 搭载睿铂 DG3M 倾斜相机及 GNSS-RTK、IMU 模块，规划航摄区域：航向重叠 80%，旁向重叠 80%，按式 (1) 计算，相对航高为 215 m。实际航向重叠 83%、旁向重叠 84%，航高 215±5 m，水平飞行速度 8 m/s，均符合优于 3 cm 影像采集精度要求。使用随机软件 DJI Pilot 布设航线。对航摄过程中出现的漏洞、缺陷，及时进行了补摄、重摄。

像控点采用区域网均匀布点的方式，在区域四周均匀布设、内部加密布设，按照一级 GNSS 控制点精度，采用基于浙江省 CORS 的网络 RTK 技术施测，严格按照规范观测，测量数据由省 CORS 中心统一解算。

对航摄飞行获取的原始影像数据使用与相机镜头配套的专业系列软件进行图像后处理。利用 PhotoShop 软件对每架次飞行获取的 (部分) 影像数据匀光、匀色处理，获得最佳成像效果的影像数据。所有成果进行自身质量检查合格后得到最终航摄成果。

2.2.2 库岸实景三维建模

考虑运行服务器所能承受的最大运行内存，影像

数据分区模型计算采用集群式 GPU 计算, 根据倾斜影像航迹线及控制点分布情况, 划分空三处理的区域, 并编辑分区后的像片文件, 最后生成包含像片分组信息、像片信息、控制点文件的各分区影像的分区文件。

将上述分区文件导入瞰景 Smart 3D 软件中, 检查影像信息正常读取, 否则对分区文件进行修改, 并重新导入到软件中读取影像。建模软件完成自动相对定向后通过人工选点、刺点完成区域绝对定向; 统计误差, 空三成果检查合格后提交空三资料, 最后利用空三成果进行模型重建。对模型重建结果 mesh 的元数据、坐标系、现势性检查及模型完整性等进行检查, 对模型漏洞导入第三方软件中进行修补, 修补完漏洞后, 将模型重新导入 Smart 3d Master 软件中, 将原漏洞的位置贴上应有的纹理。

在首批三维数据成果场景生成后采用“反复处理修补——质量控制——再生产”的模式, 直到生产出满足要求的三维成果数据。重点在成果中对玻璃面反光建筑物、路面杂波等情况进行优化处理, 最终构建的陈蔡水库库岸实景三维模型成果, 如图 1 所示。



图 1 库岸实景三维模型

Fig 1 Realistic 3D model of the reservoir bank

2.3 水下测量及水域三维建模

采用基于浙江省 CORS 网络 RTK 与多波束测深系统相结合的技术手段进行水下三维数据测量, 这一作业模式具有成本低、效率高的明显特点^[13]。使用专业软件进行数据处理后, 连同水涯线数据进行水域三维模型构建。

2.3.1 无人船多波束测深系统选用

目前市场上有多款无人船多波束测深系统, 本项目选用华微 6 号无人船搭载挪威 Norbit 公司生产的 iWBMS 多波束测深系统, 展开水下测量作业。

2.3.2 多波束测线布设

根据无人机航摄的水域范围, 考虑到多波束的覆盖范围以及测量条带之间的覆盖要求, 结合测区水库水深情况, 使用操作平板安装的 Auto Planner 软件进行测线布设。

2.3.3 多波束系统设置调试、艏向校准

多波束测深系统完成安装之后, 精确量取 GNSS

天线与换能器之间的相对位置关系, 结合已知的换能器参考中心、惯导单元参考中心以及安装支架参考中心三者之间相对位置关系, 在打开 INS Tools Setup Wizard 模块中输入, 将定位、姿态数据改正归算至换能器参考中心。打开外业导航采集软件 QINSy, 建立相应的工程模板*.db 文件, 设置 CGCS2000 椭球、投影面高程 0 m 等地理参数; 添加多波束测深系统组成的各项传感器, 设置相应的通讯协议以及端口, 并设置各传感器相对于多波束测深系统的参考原点的位置关系。

开展水下测量作业前, 进行艏向校准工作。如图 2 所示, 先操纵无人船绕 8 字行驶 3 次, 然后反向航行 30 s, 最后同向航行 30 s, 重复上述操作直至艏向均方根值小于 0.5° , iWBMS 多波束测深系统自动解算 GNSS 相对位置关系。

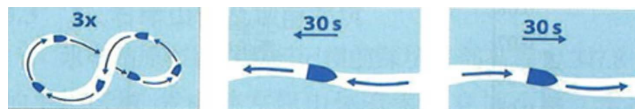


图 2 艏向校准

Fig 2 Heading calibration

2.3.4 定位测深

在本实践项目中, 多波束水下测量导航定位采用浙江省 CORS 进行。将计算机时间、测深仪时间与 GNSS 接收机时间统一, 将 GNSS 的接收机安装在多波束换能器上方的同一铅垂线上, 天线安装高度高于船体, 并与金属体绝缘。GNSS 定位所用卫星的截止高度角设置为 $\geq 20^\circ$, 观测卫星数 ≥ 5 颗。

由多波束显控(声呐)软件 Norbit WBMS GUI 控制声呐发射脉冲信号, 将工作频率调整为 200~400 kHz, 设置波速开角 45° 、声波发射频率 60 Hz、3 m/s 匀速航行, 并根据导航显示随时修正无人船航向, 调整测深线, 确保扫测测线之间有 10% 左右的重叠带。通过安装在无人船 PC 内的导航采集 QINSy^[14]实时记录扫测数据。扫测期间, 基于无人船内嵌的表面声速仪(SSVP)自动采集声速数据, 基于无人船内嵌的定位定向测姿态系统(POS MV WaveMaster)自动记录 GNSS 数据及 CORS 差分信号、来自惯导系统(IMU)的角速度和加速度、以及来自方位角测量系统的航向数据, 并采用毫秒级的时间精度同步位置、方向、涌浪、速度等数据, 消除定位漂移进而提供稳定、精确的三维坐标^[15]。

2.3.5 数据处理

多波束测深数据处理过程是在 Caris Hips 10 中进行, 具体流程如下: 首先通过采集的校准测线求取系统校准参数, 然后基于校准计算的参数创建船型文件, 导入 Norbit iWBMS 系统各辅助设备之间的相对位置信息, 并利用该船型文件新建工程文件, 再将原

始观测数据导入创建的工程中。在完成导航数据、姿态数据、航向数据和水深数据等编辑后,分别进行声速剖面改正和水位改正,在此基础上进行条带水深转换计算,在定义测区地图参数后进行水深网格化,根据网格模型将水深数据分子区进行编辑,完成河床表面网格模型,最后基于此模型导出 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 格网高程数据用于水下三维模型构建,水深值按取浅原则选取。

2.3.6 水域三维模型构建

将经过合理性检查、校对后正确无误的水下三维数据进行整理,生成标准格式的.xyz 数据文件,连同水涯线数据(由倾斜摄影三维模型提取并转换的.xyz 格式数据),输入 Terrasolid 中生成 DEM 并转为.FBX 格式水域三维模型,如图 3 所示。

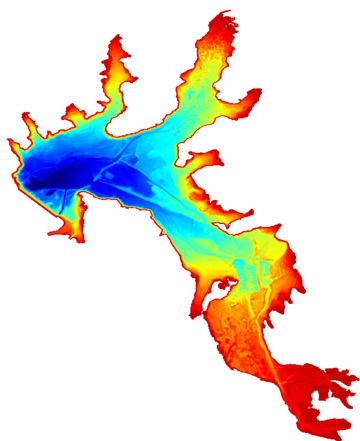


图 3 水域三维模型渲染图

Fig 3 3D model rendering of water area

2.4 库岸、水域三维模型融合

为了尽可能减少库岸、水域模型之间的融合误差,实际作业时,同期开展库岸、水下测量,制作的库岸倾斜三维模型、水域模型以现时水涯线分界。所建库岸倾斜三维模型为.OSGB 格式,水域三维模型为.FBX 格式,属于同一空间参考系。使用图新地球软件,导入上述 2 个模型,可以实现模型的融合显示,如图 4 所示。



图 4 水库三维模型一体化展示效果图

Fig 4 Integrated display rendering of reservoir 3D model

2.5 成果检验与应用方向

使用 GNSS-RTK 对不同形随机检测 632 个高程点、225 个明显特征点,与对应位置的模型数据比较,按高精度检测统计,得到特征点点位中误差 $\pm 0.26\text{ m}$,高程中误差 $\pm 0.18\text{ m}$ 。使用未参与水域建模的 1 028 个水下数据与对应位置(图上 0.5 mm 范围)的模型数据比较,按同精度检测统计,得到高程中误差 $\pm 0.13\text{ m}$ 。数据完整、格式正确,库岸、水下模型分辨率符合本项目技术方案的要求。

图 3 中,蓝色区域水深达 24 m 左右,黄色区域水深 10 m 左右,浅红色区域水深 $0\sim 5\text{ m}$ 。水域三维模型全面系统地呈现了整个库区水深由东南侧向西北侧逐渐加深的趋势,反映了水库库底整体地形走势,视需要计算局部库底坡度。

利用模型,可快速准确地计算出某一高程对应的库区淹没面积;利用模型,采用方格网法、三角网法可以精确计算出某一水位对应的实际库容。

不同时期的三维模型叠加比对,可直观形象地查看库区泥沙冲刷、淤积部位,从空间环境分析淤积成因,并精确计算出某一时间段内泥沙淤积量。

由模型制作的高精度数字地形图,信息丰富,更新方便。同时提供二、三维数字产品,为库岸边坡监测、水库大坝加固除险、流域规划设计等提供时空数据,也为如图 5 所示的后期数字孪生库区建设提供了时空数据底座。



图 5 数字孪生库区建设效果图

Fig.5 Design sketch of digital twin reservoir area construction

3 结 论

1) 将互补性的多模态数据分别载入不同软件建模, 最大程度上降低对计算机和网络的要求, 对后期模型数据增加非常友好, 仅需添加即可, 但是要求库岸、水下数据绝对定位精度高, 否则容易出现错位现象。

2) 由无人机倾斜摄影获取的多视角影像数据生成实景三维模型, 纹理清晰、数学精度高, 该技术成熟, 具有相对成本低、作业效率高特点。

3) 新型无人船多波速测量系统安装方便、航行稳定、续航能力强、吃水浅不易搁浅, 作业自动化程度高、全覆盖测量, 尤其适用湖泊型水库的水下测量。获取的海量水下三维数据, 分布均匀, 无需进行数据内插处理, 以此构建的网格模型、DEM 模型精度高, 真实地反映了库底实际起伏趋势。

4) 库岸、水域三维模型, 满足不同工程需求。为了方便水库管理人员查询浏览、人机交互操作, 尚需要对模型进行轻量化处理。

5) 图新地球软件功能丰富且简单易用, 可以将不同数据格式的库岸、水域三维模型一体化管理和融合展示。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 王春生, 杨鲁强, 王杨, 等. 无人机低空摄影测量系统在水利工程测量中的应用[J]. 测绘通报, 2012(S1): 408-410.
- [2] 姜丙波, 柳忠伟, 彭云, 等. 无人机机载激光雷达在抽水蓄能电站大比例尺地形图测绘中的应用[J]. 测绘通报, 2021(S1): 248-251.
- [3] 李家彪. 多波束勘测原理技术与方法[M]. 北京: 海洋出版社, 1999.
- [4] 梁昭阳. 无人船测量系统在水库地形测量中的应用[J]. 城市勘测, 2018(1): 132-135.
- [5] 王冬敏, 杨国兴, 李春林, 等. 无人船水下测量技术在溪洛渡库区的应用[J]. 人民黄河, 2022, 44(S1): 269-270.
- [6] 毕继鑫. 无人船联合多波束在水工建筑物检测中的应用研究[J]. 人民黄河, 2023, 45(3): 125-130.
- [7] 王合玲, 胡云云, 廖丽霞, 等. 水陆空三位一体测绘技术在山塘水库库容测绘中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(6): 211-214.
- [8] 马红. 大范围多源多尺度实景三维模型建设及应用研究——以重庆市实景三维模型建设为例[J]. 测绘通报, 2019(S2): 61-64.
- [9] 陈宝枝, 陈科, 李正品, 等. 多波束测深系统在水库测量中的应用[J]. 地理空间信息, 2013, 11(4): 145-146, 153, 189.
- [10] 国家测绘局. 低空数字航空摄影规范: CH/Z 3005—2010[S]. 北京: 测绘出版社, 2010.
- [11] 国家测绘局. 低空数字航空摄影测量外业规范: CH/Z 3004—2010[S]. 北京: 测绘出版社, 2010.
- [12] 付成华, 金鼎, 熊腾飞. 低空摄影技术在采石区地形测绘中的应用[J]. 地理空间信息, 2019, 17(5): 99-101, 110, 6.
- [13] 程剑刚. 网络 RTK 技术联合数字测深仪在湖泊库容测量中的应用[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- [14] 张琦. 基于 HZMB-CORS 的 GPS-RTK 三维多波束水深测量[J]. 水运工程, 2016(11): 193-198.
- [15] 杨彬, 何林帮, 汪佳丽. POS MV OceanMaster 系列数据格式译解及其应用[J]. 海洋测绘, 2018, 38(2): 38-42.

Construction and Engineering Application of Reservoir 3D Model Based on Multimodal Data

SU Xiuyong^{1,2}, XIAO Benben^{1,2}, WEI Tiantian^{1,2}

(1. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;

2. Zhejiang Huadong Mapping and Engineering Safety Technology Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

Abstract: The early single surveying and mapping products in the reservoir area can not longer satisfy the fine management of the reservoir, this paper proposes to use the oblique photography of the UAV and the multi-beam measurement technology of the unmanned ship to obtain massive data of the reservoir bank and underwater respectively. After a series of processing such as aerial triangulation, uniform light and color, and various corrections, the method of a three-dimensional model of the reservoir bank and underwater was constructed, and integratively displayed through the LocaSpace Viewer for users to use. Taking the 3D modeling of Chencai Reservoir as an example, the methods and characteristics of data collection and processing of reservoir bank and water area, as well as the process of 3D modeling were expounded. The constructed model intuitively and systematically reflects the ground objects and geomorphological information of the reservoir area. It can be applied to the calculation of the submerged area of the reservoir area, the review of the storage capacity, the calculation of the slope of the reservoir bottom, the analysis of sediment deposition, and the drawing of the topographic map of the reservoir area.

Key words: UAV oblique photogrammetry; unmanned ship; multi-beam; multi-modal data; 3D modeling

责任编辑: 赵宇龙