引文格式：高铜祥,唐伟,崔海涛,等. 斋堂水库水陆一体化三维模型构建和库容计算[J]. 地理空间信息, 2026, 24(1): 92-96. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.01.020

斋堂水库水陆一体化三维模型构建和库容计算

高铜祥[1]，唐　伟[2*]，崔海涛[1]，杨　瑾[1]
（1. 北京市水利规划设计研究院，北京 100048；2. 中国矿业大学（北京），北京 100083）

摘　要：准确计算水库库容对水资源管理和防洪减灾至关重要。以斋堂水库为研究对象，提出了利用水陆一体化技术构建水库地形三维模型和计算库容的方法。采用无人机机载激光雷达（LiDAR）获取水上地形数据，采用单波束和多波束声呐测深技术采集水下地形数据；再通过整合这些数据，构建水陆一体化的水库地形三维模型，并计算库容。结果表明，该方法能有效获取水库完整的地形信息，构建的三维模型能精确反映水库的实际地形特征，计算的库容数据也具有较高精度。水陆一体化技术能显著提高库容计算的精度和效率，有助于改善水资源管理策略，提高防洪减灾能力，对水利工程领域具有重要的实践意义。

关键词：LiDAR；水陆一体化；多波束；单波束；库容
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）01-0092-05

3D Model Construction of Integrated Terrene and Bathymetry and Reservoir Capacity Calculation for Zhaitang Reservoir

GAO Tongxiang[1], TANG Wei[2], CUI Haitao[1], YANG Jin[1]
(1. Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China;
2. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Accurately calculation reservoir capacity is vital for effective water resource management, flood prevention, and disaster mitigation. Taking the Zhaitang Reservoir as the research object, we present 3D reservoir topography model construction method and reservoir capacity calculation method based on integrated terrestrial and bathymetric technologies. We used unmanned aerial vehicle-mounted light detection and ranging (LiDAR) to obtain above-water data, and used single-beam and multi-beam sonar depth sounding to obtain underwater data. Then, we integrated these data to develop a high-resolution 3D model, enabling high-precision capacity calculations. The result indicates that the integrated technology significantly enhances the accuracy and efficiency of capacity calculations. This study provides a robust methodology and reliable technical support for reservoir management, offering potential applications in similar water bodies worldwide.

Key words: LiDAR, integrated terrene and bathymetry, multi-beam, single-beam, reservoir capacity

水库库容是水库管理的重要基础数据，对水资源调度、防洪调度、泥沙淤积分析等具有重要意义[1-2]。传统水库库容主要采用人工测量，存在精度低、效率低、危险性高等问题[3]；而水陆一体化技术为水库库容测量提供了新的技术手段[4]。水陆一体化技术主要包括无人机机载激光雷达（LiDAR）、单波束和多波束声呐测深等，能快速获取水上和水下的高精度三维地形数据，为库容计算提供全面、准确的数据支持[5-8]。目前针对该技术的研究主要集中在：①多源异构数据的配准与融合处理；②水陆接边区域的数据处理；③水陆地形的一体化表达。在白鹤滩库区、辽河干流某水库、广东省河道等测量项目中，该技术获取的数据精度满足相关规范要求，为水利工程规划、设计、监测等提供了可靠的数据支持[9-12]。斋堂水库位于北京市门头沟区，是该区最大的中型水库[13]。为加强库容安全管理，切实发挥水库防洪减灾作用，有必要对斋堂水库进行库容复核。本文采用水陆一体化技术对斋堂水库进行测量，旨在探讨该技术在水库库容计算中的应用效果，为水库管理提供技术支持。

1　研究区概况与研究方法

斋堂水库位于北京市门头沟区斋堂镇、永定河支流清水河的中下游，距三家店60余km。水库控制流域面积为354 km^2，占清水河流域总面积的64%，占官厅山峡流域面积的22%。多年平均年径流量为2 480.0万m^3，多年平均降水量为42.2 mm。水库设计洪水标准为十年一遇，即1 610.0 m^3/s，校核洪水标准为千年一遇，即2 620.0 m^3/s。总库容为4 602.0万m^3，地震设防烈度为

第一作者简介：高铜祥（1985—），硕士，高级工程师，研究方向为水利工程测绘，E-mail：372136690@qq.com。
通信作者：唐伟（1987—），博士，副教授，研究方向为雷达遥感SAR/InSAR大地测量，E-mail：weitang@whu.edu.cn。

7度，是以防洪为主结合供水的中型水库。水质达到Ⅱ类水质标准，已作为北京市重要的备用水源。斋堂水库建筑物由大坝、溢洪道、泄洪洞和输水管等组成。斋堂水库主坝为碾压式黏土斜墙砂砾坝，坝顶高程为470.5 m；最大坝高为58.5 m，坝顶长380.0 m、宽5.0 m，防浪墙高1.5 m；校核洪水位为467.64 m，设计洪水位为464.52 m，正常蓄水位为465.00 m，汛期限制水位为453.00 m，死水位为422.00 m[14]。

1.1　水陆一体化技术

本文采用水陆一体化技术对斋堂水库进行测量，陆地地形采用LiDAR扫描，水下地形采用单波束采集、多波速扫描相结合的方式，平面坐标系为北京地方坐标系，高程基准为北京地方高程基准。利用大疆M350搭载禅思L2型激光雷达设备，获取测区的点云数据、影像数据和定位定姿系统（POS）数据。首先通过IMU/DGPS数据解算、点云粗分类、人工编辑分类、数据检查等步骤提取符合要求的地面点点云；再通过高精度POS数据和像控点进行空三计算、正射影像单片镶嵌、匀光匀色等处理，形成数字正射影像（DOM）；然后借助单波束采集浅水区地形，多波束扫描深水区地形，并将处理后的水下地形数据导出为点云数据与分类处理后的地面点点云数据融合生成数字高程模型（DEM）；最后通过DEM计算水库死水位至校核洪水位之间的水面面积与库容。水陆一体化技术的主要步骤包括：①控制测量（像控点测量），利用GNSS RTK技术布设控制点网；②无人机航空摄影测量（航摄数据采集，获取水库水上区域的高精度点云数据和影像数据；③水下地形测量（水下地形采集），采用单波束和多波束声呐系统测量水下地形；④数据处理与融合，处理并融合航测数据和水下测深数据，构建水陆一体化三维模型；⑤库容计算与分析，基于水陆一体化三维模型，采用格网法计算不同水位下的库容，并进行分析。

1.2　库容计算方法

将DEM数据各栅格点中心的高程值作为该栅格的高程值，计算各栅格与指定水库水位之间围成的棱柱体体积并进行累加，即为该水位下的水库库容值[15]。

$$V(H)=\sum_{i=1}^{n}P_S\times(H-h_i)$$

式中，V 为指定水位库容（m^3）；H 为水库水位高程（m）；n 为高程值小于DEM格网的数量；P_S 为各栅格的面积（m^2）；h_i 为高程小于指定水位的格网高程值。

2　水陆一体化三维地形模型数据获取与处理

2.1　点云数据采集与处理

陆地点云数据采用大疆经纬M350 RTK无人机搭载禅思L2激光雷达系统进行采集。激光雷达测距范围为450 m（反射率50%，0 klx），点云数据率单回波最大240 000点/s[16]。由于研究区位于山区、地势复杂，在保证飞行安全的同时，兼顾飞行效率和数据质量，将测区分为4块；采用仿地飞行的方式，航高为140 m，速度为10 m/s；激光雷达采用5回波重复扫描模式，地面点云密度为92点/m^2；影像地面分辨率为0.037 m，影像航向、旁向重叠度分别为70%、45%。

点云处理主要包括POS数据与点云数据提取、点云精度优化、点云平滑、激光雷达点云着色、点云分类、点云坐标转换、成果保存等步骤。常用的点云分类算法包括基于几何特征的传统算法（模拟布料法、渐进三角网法、形态学法）、机器学习算法（随机森林、SVM）和深度学习算法（PointNet、PointCNN），目前主流商业软件多采用渐进三角网法及其改进算法。本文采用Terrasolid软件进行点云分类。由于渐进三角网法假设格网中的最低点为地面点，孤立点、噪声点将导致滤波算法出现错误，因此先进行噪声点滤波和低点分类，采用默认参数即可[17]。地面点分类参数为：最大建筑尺寸50 m，地形角度88°，迭代角度10°到平面，迭代距离1.6 m平面，停止构建三角形边缘长度＜1 m。利用宏命令自动分类地面点；再对分类后的数据进行构TIN检查；最后利用Assign Poin Class工具修正分类错误数据。对于立交桥、高架路、桥梁等架空于地面或水面上的人工地物范围，不保留架空于地面或水面上的点云数据；对于路堤、土堤、拦水坝等构筑物底部与地面相接的地物，保留其点云数据[18]。将点云分类显示、按高程显示，并结合DOM对分类结果进行检查，确保点云无漏分、错分。

2.2　水下地形数据获取与处理

单波束测深单次测量只能获得测量平台垂直下方一个水深值，数据量少，无法反映复杂水下地形[19]。多波束测深发射波束向下呈较大的扇形开角，可在测量断面内形成多个测深点，有较宽的扫幅和较高的测点密度，较易获得详细的水下地形信息。多波束测深系统适用于水深较大的区域，可充分发挥测深的高效率，也可避免探头损坏；单波束则适用于浅水区域[20-21]。本文采用华微3号无人船测量系统（搭载D390

单波束测深仪）对浅水区（水深<2 m）进行测量，采用华微6号无人船测量系统（搭载NorbitiWBMS多波束测深系统）对深水区进行测量。

为能准确详细获取水下地形信息，设置多波束、单波束航线间距分别为30、10 m，采样间隔为1 m。多波束测线135条，总长33.1 km，面积为0.93 km^2；单波束测线39条，总长3.6 km，面积为0.036 km^2。检查测线垂直于主测线，均匀分布；多波束检查测线4条，总长3.0 km，占主测线总长度的9.1%；单波束检查2条，总长0.45 km，占主测线长度的12.5%。图1中细实线为主测线，黑色为多波束，红色为单波束；细虚线为检查线，紫色为多波束，绿色为单波束，蓝色为水边线。本文采用RTK方法施测12个点，分布于南侧浅水区域。



图1 测线分布图

多波束数据处理采用Qimera软件，包括静（动）吃水、潮位、声速等改正值合并，建立动态面，尖刺滤波，CUBE滤波与三维编辑、Swath编辑等步骤[21]。单波束数据处理采用华测的Hydro Survey，包括姿态和声速改正、假水深处理等步骤[22]。假水深处理过程中利用最大和最小水深门限法，设置合理的水深范围，过滤超出范围的异常数据，利用中值滤波平滑数据，去除孤立的噪声点。为验证水下地形数据的精度，对检测线与主测线所得数据进行比较，最大、最小高程差值分别为0.17、0.00 m，中误差为0.07 m；外符合精度则利用RTK实测数据与水下地形数据进行比较，最大、最小高程差值分别为0.13、0.03 m，中误差为0.06 m，符合规范要求[23]。

2.3 水陆数据融合

由于陆地和水下环境的特性不同，且采用的数据传感器精度存在差异，准确、高效地融合数据是实现高精度测量和分析的核心。

1）坐标系统一。在水陆一体化数据融合过程中，需先对数据进行坐标转换。本文通过北京CORS布设的地面控制点对数据进行配准或转换，使陆地数据和水下数据均位于统一的平面坐标系和高程基准中，以提高融合结果的准确性。

2）数据密度匹配。由于LiDAR和多波束/单波束声呐的工作原理不同，因此获取的数据精度和分辨率不一致。LiDAR在陆地上能获得较高的分辨率，而多波束声呐则在水下表现出较大的水深依赖性，且在复杂水下环境（水体浑浊度较高、反射弱的区域）中，其精度和密度可能会有所降低。因此，数据融合时对地面点云密度降采样，使其与水下声纳数据密度一致（36点/m^2），减少精度差异和数据密度不同对最终结果的影响。

3）数据时间同步。多波束声呐数据采集的时间窗口、水下环境变化（水流流速、水位变化）等因素将影响声呐的探测效率；而陆地环境中的LiDAR数据不受天气和能见度影响，因此应尽量保证不同传感器数据采集的时间同步性。首先利用LiDAR采集陆地数据，再利用多波束声呐采集水下数据。由于数据采集期间水位处于下降过程中，水陆分界处数据空洞略大，为保证数据的连贯性和平滑性，水下数据采集结束后，再利用LiDAR环绕水面线进行数据补飞。

4）水面与水下数据的接合。水陆数据融合中最复杂的环节之一是水面与水下数据的接合。由于水面反射、折射等因素影响，LiDAR信号可能无法穿透水面，无法直接获取水下部分数据；而水下部分的多波束声呐数据又难以提供水面以上的地形信息，即陆地数据与水下数据无重叠，因此在水陆交界处存在数据空洞，直接融合将造成密度突变，需在空洞区对水下地形点云进行插值增密，使密度变化平缓。本文以采集的水面线为断裂线，利用三角网线性插值构建水陆一体化模型，形成分辨率为0.5 m、面积为5.64 km^2的斋堂水库水陆一体化模型（图2）。

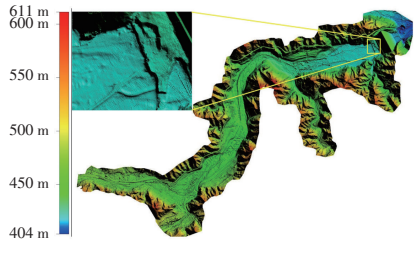


图2 斋堂水库水陆一体化三维地形模型

2.4 库容与水面面积计算

本文基于斋堂水库三维模型，利用ArcGIS中的ArcPy，使用for循环调用SurfaceVolume函数计算不同水位下的库容与水面面积。以三维模型为输入，设置水位最高值、最低值、间隔值，实现自动批量处理。斋堂水库水位—面积—库容曲线图见图3，直观展示了水位与库容、面积之间的关系。

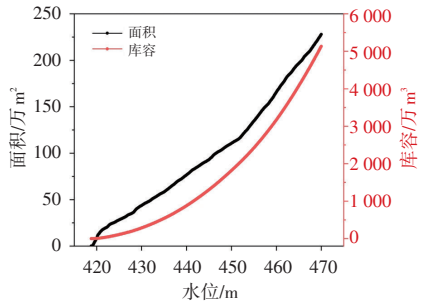


图3　斋堂水库水位—面积—库容曲线图

3　研究结果分析

3.1　水陆一体化DEM精度分析与检核

地形模型的精度直接决定了库容计算的精度，因此需对模型精度进行分析。地形模型的精度受多种因素影响，在数据采集精度固定的情况下最重要的因素是点云密度。点云密度与DEM精度存在非线性关系，点云密度超过临界值后，DEM精度并不会进一步提升。对于高密度点云数据，平地、山区的点云密度临界值分别为16、30点/m²，本文兼顾精度与效率，取值32点/m²。波束角直接影响多波束测量精度，小波束角在垂直方向上精确聚焦，可减少50%以上的误差，本文的波束角为0°。水面折射会对LiDAR信号产生干扰，本文采用点云滤波去噪，确保数据精度。

水下数据高程精度已经过检核，不再赘述。在水库两岸的水泥台阶拐角、公路等明显地物处采集15个特征点，将水陆一体化模型与RTK实测同名点坐标进行精度统计分析（表1）。

表1　点位精度统计/m

统计项	ΔX	ΔY	ΔH	ΔS
绝对值最小值	0.01	0.02	0	0.01
绝对值最大值	0.08	0.08	0.09	0.10
均值	0.07	0.06	0.07	0.07
均方差	0.04	0.04	0.05	0.04

3.2　库容比较与分析

将本次新复核库容与2003年斋堂水库安全评价所得库容进行比较分析（表2），结果表明：①水位448 m及以下库容小于原复核库容，主要是由库底淤泥淤积所致；②水位450~468 m（除466 m外）库容均增加，库容变化最大值为19.2万m²，增加百分比最大值为0.41%，近20年来水库库区无生产建设项目和清淤工程，且库区周围为山体地质结构稳固，水位长期保持稳定，水流冲刷基本可忽略不计，综合分析是两期数据精度不同所致。

表2　斋堂水位—库容—面积比较

高程/m	2024年水面面积/万 m²	2003年水面面积/万 m²	差值百分比/%	
			库容	水面面积
420	14.2	8.5	−83.4	67.1
422	20.1	19.6	−39.5	2.6
424	24.2	25.5	−20.5	−5.1
426	30.1	30.5	−12.6	−1.3
428	36.2	35.7	−8.6	1.4
430	42.8	43.7	−6.0	−2.1
432	49.9	49.3	−4.3	1.2
434	56.9	55.7	−3.8	2.2
438	68.1	69.7	−2.7	−2.3
440	74.5	76.7	−1.8	−2.9
442	82.3	83.9	−1.2	−1.9
444	88.6	90.2	−0.8	−1.8
446	95.6	91.8	−0.5	4.1
448	102.5	104.2	−0.1	−1.6
450	109.3	110.6	0.1	−1.2
452	117.3	116.9	0.1	0.3
454	128.4	128.5	0.1	−0.1
456	140.7	140.6	0.1	0.1
458	152.7	152.1	0.1	0.4
460	166.3	165.7	0.0	0.4
462	177.4	179.4	0.4	−1.1
464	188.4	191.4	0.2	−1.6
466	199.3	202.2	−0.1	−1.4
468	210.2	213.7	0.4	−1.6

为检核本次库容复核计算的准确性，利用无人机获取的库区DOM，采用人工勾画水边线与计算的水面面积进行比较，结果表明水位为452.00 m时，计算值为116.9万m²，实际值为119.4万m²，差值百分比为2.13%，证明了本次复核结果的准确性。本次库容复核利用水陆一体化数据采集技术结合GIS技术，通过模型计算库容；而2003年安全鉴定复核库容采用1∶2 000地形图在AutoCAD中对不同库容水位面积量算后计算库容，本文方法比传统方法更精确。

4　结　语

1）水陆一体化技术在斋堂水库库容测量中的应用取得了良好效果。通过融合LiDAR、单波束和多波束声呐系统，实现了水陆地形的无缝衔接和高精度测量，为库容计算提供了可靠的数据基础。

2）基于水陆一体化三维模型生成的DEM精度高，能真实反映水库水下地形和周边陆地地形。采用格网法进行库容计算，结果精确可靠。

3）与2003年的测量结果相比，本次复核的库容有所变化，反映了水库21年来的实际变化情况。

然而，水陆一体化技术仍受制于设备协同与数据融合、环境（空域、复杂水文、特殊地形）、硬件性能、标准缺失、成本高昂等，需通过优化传感器兼容性、增强环境抗干扰能力、统一标准等措施突破限制。

参考文献

[1] 水利部关于加强水库库容管理的指导意见[EB/OL]. (2024-01-09) [2024-10-23]. http://www.mwr.gov.cn/zwgk/gknr/202401/t20240109_1700708.html.

[2] 高圣益,李成国. 水库库容测量技术研究[J]. 人民长江,2007,38(10):98-99

[3] 崔周烽,蔡来良,袁占良,等. 小型水库库容精确测算方法研究[J]. 测绘通报,2024(增刊2):17-21

[4] 周建红,马耀昌,刘世振,等. 水陆地形三维一体化测量系统关键技术研究[J]. 人民长江,2017,48(24):61-65

[5] 郜士彬,汪诗奇,许世民. 基于机载LiDAR的水库库容计算[J]. 水利技术监督,2023(12):42-46

[6] 方聪,李明峰,王亚梅,等. 基于机载LiDAR的水库库容曲线计算方法[J]. 江苏水利,2022(8):62-65

[7] 梁冲. 基于机载LiDAR与无人船多波束的水陆一体化测量技术研究[J]. 水利技术监督,2022(6):70-74

[8] 张金山,邝良寒. LiDAR与多波束点云结合批量计算水库库容[J]. 治淮,2022(4):26-28

[9] 杨柳,何友福,郑亚慧. 复杂库岸地形空天地水陆一体化测量技术研究[C]//中国水利学会减灾专业委员会2024年学术年会论文集,2024:9

[10] 王晓鹏,郑亚运,赵美玲,等. 航道水陆一体化关键技术应用研究[J]. 江苏水利,2024(10):57-61

[11] 魏猛,杨柳,张亭. 水陆一体化河道三维模型构建方法研究与应用[J]. 人民长江,2023,54(增刊1):68-71

[12] 韩红,周兴华,邹宏亮,等. 水库水陆一体化三维模型构建与展示[J]. 浙江水利科技,2023,51(1):9-12

[13] 薛志春,刘绍辰,李永坤,等. 永定河斋堂水库流域产流规律及前期降雨影响分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2024,60(5):625-631

[14] 王璠,刘波,宋占春,等. 斋堂水库23·7特大暴雨洪水分析与思考[J]. 中国高新科技,2024(15):143-145

[15] 芦云峰,谭德宝,杨中华. 基于空间信息技术的大型水库库容计算方法[J]. 长江科学院院报,2010,27(1):9-12

[16] 大疆行业应用. 禅思L2操作白皮书[R/OL]. (2023-12-21) [2024-10-23]. https://www. dji. com/cn/downloads/products/zenmuse-l2#doc.

[17] 刘哲延,刘璐. 基于Terrasolid的机载激光雷达点云组合滤波方法研究[J]. 信息记录材料,2023,24(9): 243-245

[18] 王慧敏. 基于TerraSolid的机载激光雷达点云数据处理[J]. 华北自然资源,2023(3):84-87

[19] 方卫华. 水库库区地形测绘与库容曲线复核技术研究[J]. 中国水利,2024(14):12-17

[20] 裴洪超. 利用多波束测深仪及无人船等测量白石水库[J]. 经纬天地,2018(3):60-64

[21] 赵钢,王冬梅,黄俊友,等. 多波束与单波束测深技术在水下工程中的应用比较研究[J]. 长江科学院院报,2010,27(2):20-23

[22] 刘权. RESON Seabat T50-P多波束系统在水下基坑测量中的应用[J]. 水科学与工程技术,2020(3):88-91

[23] 内陆水域水下地形测量技术规程: CH/T7003-2021[S].

（上接第87页）

[4] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014,39(5):505-513

[5] 段涛,邓宇峰,郭猛猛,等. 无人机低空遥感技术在崩塌地质灾害动态监测中的应用[J]. 能源技术与管理,2024,49(3):31-34

[6] 黄勇,张勇. 无人机遥感技术在测绘工程测量中的应用探析[J]. 电子技术与软件工程,2023(1):214-219

[7] 颜明捷. 无人机倾斜摄影技术在城市实景三维建模中的应用[J]. 科技创新与应用,2023,13(10):173-176

[8] 万丽娟. 城市实景三维建模中无人机倾斜摄影技术的应用研究[J]. 工程建设与设计,2022(15):154-156

[9] 王伟,梁石,高钊,等. 无人机倾斜摄影测量像控点间距对三维模型精度的影响分析[J]. 测绘与空间地理信息,2024,47(7):194-196

[10] 胡丹丹,朱悦阳,刘杨. 仿地飞行和倾斜摄影技术相结合在高山地区1∶500地形图制作中的应用 [J]. 信息记录材料,2024,25(6):232-234

[11] 陈波. 多旋翼无人机仿地飞行倾斜摄影测量技术在地质灾害处置项目中的应用[J]. 四川地质学报,2024,44(2):317-321

[12] 王永生,卢小平,朱慧,等. 无人机实景三维建模在水利BIM中的应用[J]. 测绘通报,2018(3):126-129

[13] 曲林,冯洋,支玲美,等. 基于无人机倾斜摄影数据的实景三维建模研究[J]. 测绘与空间地理信息,2015,38(3):38-39

[14] 胡书友,李瑞红. 倾斜摄影不同定向方法三维建模精度影响研究[J]. 地理空间信息,2024,22(10):83-86

[15] 刘家橘,刘家橙,王晓燕,等. 倾斜摄影三维建模在矿山恢复调查中的应用[J]. 地理空间信息,2020,18(7):48-50

[16] 谭金石,黄正忠. 基于倾斜摄影测量技术的实景三维建模及精度评估[J]. 现代测绘,2015,38(5):21-24

[17] 段文华,许庆领. 倾斜摄影实景三维模型的质量控制分析[J]. 地理空间信息,2017,15(11):93-95