

机载激光雷达与无人船协同的水库库容计算研究

孔 民, 王晓阳, 王 旭

(济南市水利建筑勘测设计研究院有限公司, 山东 济南 250014)

【摘要】针对传统水库库容计算方法效率低、精度不足问题,提出一种基于机载雷达与无人船协同测量的计算水库库容的方法。以山东省崮头水库为研究对象,采用无人机搭载激光雷达采集水上地形数据,结合无人船进行水下地形测量,通过多源数据融合技术生成 0.5 m 分辨率的数字高程模型(DEM)。利用 DEM 方格网法计算库容,并与等高线法及历史“三查三定”成果进行核对验证。结果表明:DEM 方格网法与等高线法的库容曲线最大相对误差为 $\pm 4.97\%$,验证了方法的可靠性;新测库容与历史数据对比显示,变化趋势相同,但存在一定差异,主要因测量技术升级及库区地形变化所致。无人机与无人船协同技术能够高效获取水陆一体化地形数据,结合 DEM 方格网法可显著提升库容计算精度,为水库动态监测与科学管理提供了技术支撑。

【关键词】机载激光雷达;无人船;水下地形测量;水库库容;点云数据

【中图分类号】TV697

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2025)-06-0026-03

Research on Reservoir Storage Calculation Based on the Collaboration of Airborne LIDAR and Unmanned Boat

KONG Min, WANG Xiaoyang, WANG Xu

(Jinan Water Conservancy Construction Survey Design Research Institute Co., Ltd. Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and insufficient accuracy of traditional reservoir storage calculation methods, this paper proposes a new method for calculating reservoir storage based on the collaborative measurement of airborne LIDAR and unmanned boat. Taking the Gutou reservoir in Shandong Province as the research object, an unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with LIDAR is used to collect above-water topographic data, combined with an unmanned boat for underwater topographic survey. A digital elevation model (DEM) with a resolution of 0.5 m is generated through multi-source data fusion technology. The DEM grid method is used to calculate the storage capacity, which is verified by comparison with the contour line method and the historical results of the "three inspections and three determinations". The results show that the maximum relative error of the storage capacity curve between the DEM grid method and the contour line method is $\pm 4.97\%$, which verifies the reliability of the method. The comparison between the newly measured storage capacity and historical data shows that the trends are the same but there are certain differences, mainly due to the upgrading of measurement technology and changes in the topographic features of the reservoir area. The collaborative technology of UAV and unmanned boat can efficiently obtain integrated land and water topographic data, and the combination with the DEM grid method can significantly improve the accuracy of reservoir storage calculation, providing technical support for dynamic monitoring and scientific management of reservoirs.

Key words: Airborne LIDAR; Unmanned boat; Underwater topographic survey; Reservoir storage; Point cloud

水库是水资源调控的核心载体,也是防洪抗旱的关键屏障。水库库容作为其功能实现的核心参数,直接决定水库的蓄水和调控能力。因此,对水库库容进行精确计算,不仅能够更准确地监测

水库状态,还能为制定科学合理的运行管理方案提供有力支撑,进而提升水资源综合利用效率和

收稿日期:2025-03-31

作者简介:孔民(1996—),男,工程师

水库防洪调度能力。

近年来,RTK、无人机倾斜摄影、机载激光雷达以及无人船等新技术为库容计算提供了新的手段。选取山东省崮头水库作为研究对象,综合运用无人机载激光雷达测量技术和无人船自动测量技术,分别进行水上和水下地形数据的采集与融合。在此基础上,利用DEM方格网法和等高线法,分别计算水库库容并且进行比较。通过与“三查三定”确定的水库库容进行对比分析,验证了模型的精度,为水库库容的计算提供了有益的参考。

1 工作内容与方法

1.1 技术路线

水库库容的计算流程可以分为数据采集、数据处理以及库容计算3个过程。其中,数据采集阶段主要包括水上数据采集、水下数据采集及检查点采集;数据处理阶段则涵盖水上数据处理、水下数据处理、精度验证、多源数据融合以及DEM的生成;而库容计算阶段则包括具体的计算过程以及验证分析等。具体的技术路线图如图1所示。

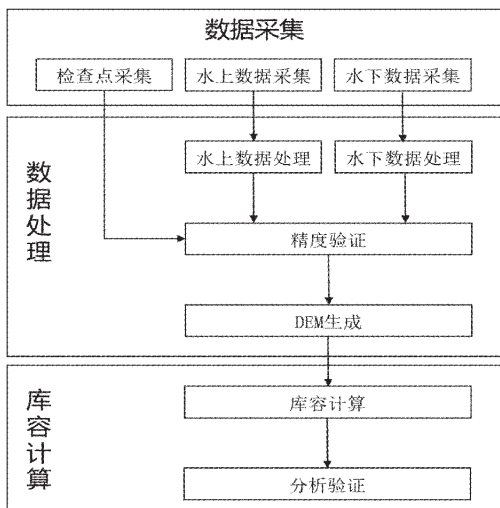


图1 技术路线图

1.2 数据采集

1) 平面与高程控制测量。为确保水库测量结果的精度与质量,建立统一且精确的空间基准是关键环节。因此,在正式采集数据之前,以CGCS2000平面坐标与1985国家高程为基准,首先进行了平面高程控制测量。

2) 水上数据采集。研究区域的水库属于山区

型水库,地形复杂多变,植被覆盖茂密,机载激光雷达具有高精度、高自动化、不受天气和地形限制以及穿透植被的优势,可满足水上数据采集的要求。采集水上数据运用大疆M300 RTK搭载禅思L1进行数据采集,涵盖实地踏勘、航线规划以及航线飞行3个主要步骤。

3) 水下数据采集。为提高水下数据采集的精度和效率,采用具备高精度、高效率以及高可靠性特点的华微3号无人船进行数据采集。在正式采集之前,需要整理仪器设备,确保电池充足;计算并检查转换参数的准确性;组装无人船,并检查马达等部件的正常工作。在采集过程中,需要新建工程,确定坐标系和转换参数;设置声速、水温、吃水深度等参数;进行初始化操作,并检查其测量深度的可靠性。随后,沿着水库水边线手动操作采集水库水边水下数据,并依据水边线数据布设无人船自动测量航线,进行自动采集,确保采集数据的全面性。

4) 检查点采集。检查点采集是验证采集数据精度与可靠性的关键环节。为确保检查点的代表性和全面性,需遵循了一定采集要求。首先,应均匀分布于测区内,涵盖不同地形地貌和地物特征区域。其次,检查点位置应明确且易于识别,通常选择在硬质地面如道路、广场等裸露平坦地面上,数量应根据测区规模和点云密度等因素合理确定。此外,检查点的高程基准必须与激光雷达点云的高程基准保持一致。

1.3 数据处理

1) 点云数据处理。采用大疆智图软件对采集的数据进行处理,导出标准格式的点云数据。随后,进行点云分类,包括坐标转换、去除噪声、点云滤波以及人机交互分类等步骤。在坐标转换阶段,将点云坐标系转换为统一空间基准。在去除噪声阶段,剔除了受仪器或环境影响产生的无效噪声点。在点云滤波阶段,采用渐进加密三角网滤波算法将点云进行分类,分为地面点与非地面点两类。在人机交互分类阶段,对分类的地面点进行了人工目视检查和修正。

2) 水下数据处理。将采集的水下数据导入HydroSurvey软件中,通过设置坐标系,转换参数,剔除声呐回波反射条件不足的噪点,进行声速、延迟、姿态改正,导出测量成果。

3)精度验证。为保证输出 DEM 的准确性,进行了水上数据和水下地形点的精度验证。水上数据检查利用外业采集的检查点对点云数据进行检查,水下地形点检查采用随机采集水下点三维坐标将该点高程值与图上该位置的点内插高程值作比较。经检查,点云高程中误差为±0.069 m,测深中误差为±0.130 m,满足测量规范要求。

4)多源数据融合。水库水上数据和水下地形数据都分别通过不同软件进行初步处理,确保两种数据源在统一的空间基准下,将两种数据进行融合,输出水库水上水下一体化点云成果,最后生成分辨率为 0.5 m 的 DEM 成果。

2 水库库容计算

2.1 库容计算

DEM 网格法具有数据结构的简洁性与操作的便捷性,在工程测量领域应用最为广泛,尤其适用于大范围地形建模与库容计算等实际需求。利用已建立的库区数字高程模型,将其微分成若干个正方体,对各正方体的体积进行积分,从而求得整个水库库容。其计算模型之一为:

$$V = \sum_{i=1}^n P_i (H - (h_i + h_{i+1} + h_{i+2} + h_{i+3}) / 4) \quad (1)$$

式中: V 为库容, m^3 ; P_i 为单个 DEM 网格的面积, m^2 ; H 为指定水位的高程面, m ; h_i 为网格角点高程面, m ; n 为 $(h_i + h_{i+1} + h_{i+2} + h_{i+3}) / 4$ 小于 H 的 DEM 网格个数,当 $(h_i + h_{i+1} + h_{i+2} + h_{i+3}) / 4$ 大于 H 时该网格不参与计算; h_i 为高程小于指定水位的格网高程值, m 。

其极限模型公式为:

$$V = \sum_{i=1}^n P_i (H - h_i) \quad (2)$$

式中: n 为高程小于 H 的 DEM 格网个数。

先裁剪出库容计算范围内的 DEM,再将 DEM 数据导入到 ArcGIS 软件中,使用 Python 编写的脚本文件,按照要求计算出每 0.5 m 步长高程对应的水域面积及水库库容,水库水位-面积-库容关系图如图 2 所示。

2.2 分析验证

为验证 DEM 方格网法计算库容的准确性,采用等高线法计算库容并将两种方法的结果进行了对比,如图 3 所示。通过比较发现,两种方法

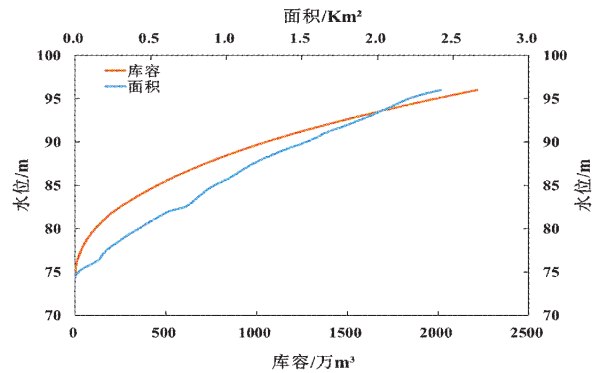


图 2 水位-面积-库容曲线图

计算出的库容曲线高度重合,最大的相对误差仅±4.97%,最小为±0.00%,且误差较大区域主要集中在水库底部,两种方法计算的结果精度相当,也验证 DEM 方格网法计算库容的准确性。

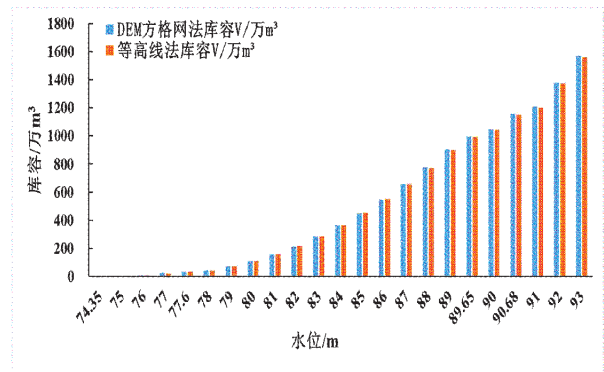


图 3 DEM 方格网法与等高线法水位-库容对比图

为进一步验证 DEM 方格网法的有效性,并明晰水位-库容关系的变化规律,还与“三查三定”确定的水库库容进行符合对比,如图 4 所示。

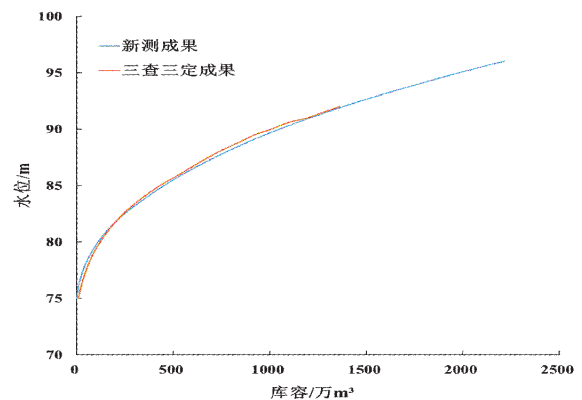


图 4 “三查三定”成果与新测成果库容对比图

通过图 4 可以看出,两者库容曲线趋势基本保持一致,但是仍然存在一定差异性,其中水下新测库容要小于历史库容,差值最大处为 16.37 万 m^3 。主要原因是历史库容对于水下数(下转第 34 页)

3.3 新旧知识融合

在推动技术升级和转变的过程中,注重新旧知识的融合。通过开展一系列的培训和教育课程,帮助现有员工更新知识和技能,适应现代化治河工作的需要。邀请国内外知名专家学者,举办一系列技术讲座和培训班,教授员工最新的水利技术和管理方法。通过开展继续教育和技能提升培训,帮助员工掌握最新的技术和方法,提升工作能力和水平。注重培养员工的创新意识和能力,鼓励他们提出创新性的想法和建议,推动治河工作的不断进步。

4 新时代发展要求

4.1 发展战略

面对新时代的挑战和机遇,制定新的发展战略,强调科技创新和可持续发展。在科技创新方面,加大对新技术新工艺的研发和应用力度,推动治河工作的现代化和智能化。积极推广节水灌溉技术,优化农业用水管理,提高水资源的利用效率。实施水污染治理工程,加强水质监测,改善黄河水质,保护河流生态系统。

在可持续发展方面,注重环境保护和资

源节约,推动黄河治理向绿色可持续发展。通过建设湿地和保护植被,恢复黄河的生态系统,减少水土流失和污染。通过科学调度和管理,优化水资源的配置和利用,保障沿岸地区的生产和生活用水需求。

4.2 人才需求

随着发展战略的调整,未来,将更加注重引进和培养具有高技能和创新能力的人才,特别是在信息技术环境科学和工程管理等领域。需要大量具备遥感技术地理信息系统大数据和人工智能等方面知识和技能的专业人才,以提升治河工作的现代化和智能化水平。

5 展望

未来研究可以进一步探讨如何更好地整合新技术与现有资源,以及如何通过国际合作提升黄河治理的现代化水平。开展基于大数据和人工智能技术的防洪决策支持系统的研究,提升防洪决策的科学性和准确性。通过国际合作,借鉴国际先进的水利管理经验,提升黄河治理的现代化和智能化水平。

(责任编辑 张玉燕)

(上接第 28 页)据采集多是采用有人船以及测深仪进行,与无人船相比,采集点分布不均匀,密度低,在计算库容时进行大量内插,导致产生误差,影响库容准确性;此外库容多年淤积也是造成新测库容小于历史库容的原因之一。随着水位上升,新测库容逐渐大于历史库容,主要原因是测量技术手段的先进,保证了数据的准确性;另经过历史影像对比,库区有新开挖坑塘,导致库容增加。

3 结论

利用机载激光雷达与无人船的相结合的方式采集数据,并采用数据融合技术获得 DEM,在此基础上利用 DEM 方格网法计算水库库容,通过与等高线法进行比较并验证了其准确性,发现两种方法精度相当,最大相对误差仅 $\pm 4.97\%$,测量成果准确可靠,证明利用无人机与无人船协同测量水库库容是有效的。同时,通过与“三查三定”确定的水库库容进行对比分析,进一步验证

了 DEM 方格网法的有效性,并解释了新测库容与历史库容存在差异的原因。

与传统的测量方式对比,该次采用的测量技术具有精度高、效率高的特点,但仍存在一些不足:采用“三查三定”的水库库容不具有现势性,用于精确地复核 DEM 方格网法计算水位库容的精度达不到要求,不同的测量方法和不同的计算方法会产生一定的计算误差,需研究不同计算方式的应用场景。

参考文献

- [1] 胡玉婵.水陆全量地形测量在四堡水库库容计算中的应用[J].东北水利水电,2024,42(11):57-60,70.
- [2] 曹培国.水库库容曲线的复核与成果分析[J].地矿测绘,2017,33(3):18-20.
- [3] 施春荣,袁伟.基于规则格网 DEM 的水库库容快速计算[J].现代测绘,2019(3):4.
- [4] 由明明,杨国兴,李春林,等.基于机载激光雷达的长龙山抽水蓄能电站库容计算[J].人民黄河,2022,44(z1):3.

(责任编辑 崔亚男)