

基于机载 LIDAR 的水库库容曲线计算方法

方 聪¹, 李明峰¹, 王亚梅¹, 王冬梅², 梁文广²

(1. 南京工业大学测绘科学与技术学院, 江苏 南京 211816;

2. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

摘要:针对传统水库静态库容测量周期长、计算效率低的缺点,提出基于机载 LIDAR 点云数据建立高精度 DEM,构建水库水位—水域面积—水量体积关系模型,实现水库库容曲线计算方法。结合江苏句容仑山水库进行试验,利用机载 LIDAR 获取范围 10.8 km² 的水库及周边地形的点云数据,构建出 51.3~58 m 水位高程的水库库容曲线,并进行精度验证。结果表明,利用该方法计算水库库容的总体精度达到 97.08%,对静态水库库容计算的适用性强,为水库管理、洪涝预警与风险评价提供数据支撑。

关键词:机载 LIDAR; 水库库容; 点云滤波; 数字高程模型

中图分类号:TV62

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2022)08-0062-0004

Calculation method of reservoir capacity curve based on airborne LIDAR

FANG Cong¹, LI Mingfeng¹, WANG Yamei¹, WANG Dongmei², LIANG Wenguang²

(1. College of Geomatics Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China)

Abstract: In view of the disadvantages of long measurement period and low calculation efficiency of traditional reservoir static reservoir capacity, a high-precision DEM based on airborne LIDAR point cloud data is proposed, and a reservoir water level-area-volume of water (H-S-V) relationship model is constructed to realize calculation method of reservoir capacity curve. Combined with the test of Jurong Lunshan Reservoir in Jiangsu Province, the airborne LIDAR is used to obtain the point cloud data of the reservoir with a range of 10.8 km² and the surrounding terrain, and the reservoir capacity curve with the water level elevation of 51.3-58 m is constructed, and the accuracy is verified. The result shows that the overall accuracy of reservoir capacity calculation by this method reaches 97.08%, which is applicable to static reservoir capacity calculation and provides data support for reservoir management, flood warning and risk assessment.

Key words: airborne LIDAR; storage capacity of reservoir; point cloud filtering; DEM (digital elevation model)

水库库容是水利枢纽工程设计、运营管理的重要参数之一,为水库发电、灌溉、防洪等调度提供数据支撑^[1]。传统库容计算方法是利用全站仪、水准仪对水库进行断面测量,效率较低,水库泥沙淤积

与水域周边地形的变化,造成计算值与实际库容出现偏差。随着测量技术的发展,水库库容的计算方法取得进展。孟凡超^[2]利用 GPS 技术获取水库周边数据,测算出官昌水库库容。与传统方法相比,在

收稿日期:2022-03-15

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41974214);江苏省水利科技项目(2020061);江苏自然资源发展专项资金(海洋科技创新)项目(JSZRHYKJ202101)

作者简介:方聪(1996—),男,硕士研究生,研究方向为点云处理与三维建模。E-mail:1774786301@qq.com

保证精度的同时,提高了作业效率;李鑫龙等^[3]利用无人机倾斜测量,基于GIS技术,计算出黑龙江某水库库容曲线;王元超^[4]提出通过多次空中三角测量,利用GIS空间叠加分析与CAD辅助制图,实现水库库容的高效计算。然而上述的方法仍存在不足,GPS获取数据的效率提高有限,重复劳动量大;摄影测量虽然效率高,但对于植被覆盖度高的山区无法有效获取地面信息;空中三角测量无法实现上视拍摄,导致水库部分空间缺失,库容计算精度较低。

随着低空无人机的发展,机载激光雷达(Light Laser Detection and Ranging, LIDAR)应运而生。机载LIDAR凭借高密度、高效率、高精度的优势,能够在复杂地形下探测地理信息数据,进行地形图测绘^[5]。针对大面积水库库容曲线的计算效率较低、精度不高等问题,本文利用机载LIDAR点云数据,建立研究区域的DEM,通过水体积计算,构建出水库的水位高程-水域面积-水量体积模型,并对模型精度进行验证。

1 技术方法

1.1 机载LIDAR技术

机载LIDAR是一种集成了GPS、IMU、激光扫描仪等设备的主动对地观测系统^[6]。通过激光雷达发射近红外激光脉冲,经地面反射由传感器接收并获得目标的距离,其原理如图1所示。实现对地面信息的获取并以高精度密集点云的形式呈现,在多个行业得到广泛应用。

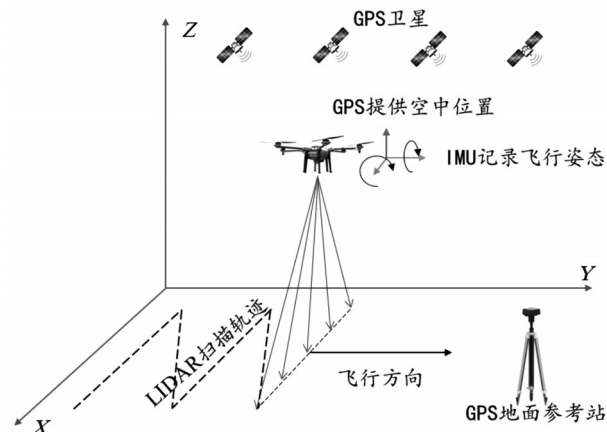


图1 机载LIDAR系统原理

相对传统测量方式,机载LIDAR最大的优势在于高效、高精度的数据采集能力,同时能够穿透植被叶冠获取高分辨率地面数字模型(DSM)。此外,

机载LIDAR一般采用波长在近红外波段的激光脉冲,由于纯净水体在近红外波段反射率极低,难以被激光传感器接收识别,因此在点云中,水体呈现为空洞或点分布特别稀疏的情况,这使得基于机载LIDAR点云提取水体边界具备独特的优势^[7]。因此,通过机载LIDAR点云数据研究水库库容曲线成为最有效的方法之一。

1.2 水库库容曲线构建方法

利用机载LIDAR在水库低水位时段进行点云数据采集,并对点云数据进行预处理。由于点云中包含植被、房屋、人造设施等非地面点,无法准确构建水库DEM模型,因此需要对点云数据进行滤波,保留地面点,剔除非地面点。通过高程选取,截取出不同水位 H 下的点云,利用不规则三角网插值建立不同水位下的DEM模型,通过栅格计算,统计当前水位下的水域面积 S 。将不同水位的DEM进行叠加,通过对多个不同水位下的面积进行积分,即可计算出在多个水位区间下的水量体积 V_i ,并构建出 $H-S-V$ 的关系。

研究方法技术路线如图2所示。

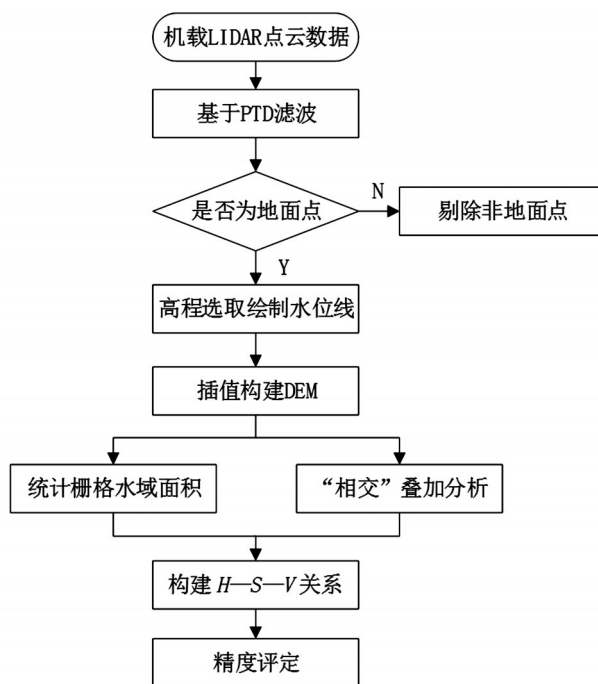


图2 水库库容曲线计算方法

1.2.1 基于PTD的点云滤波

机载LIDAR点云数据滤波是获取水库及周边DEM的关键,对水库初始水域面积的率定精度起到重要作用。本文采用渐进三角网(PTD)滤波算法,该方法能有效滤除建筑物、低矮植被以及其他地

物^[8]。其原理是对点云建立格网索引,选取格网中的最低点为种子点建立不规则三角网(TIN),如图3所示。

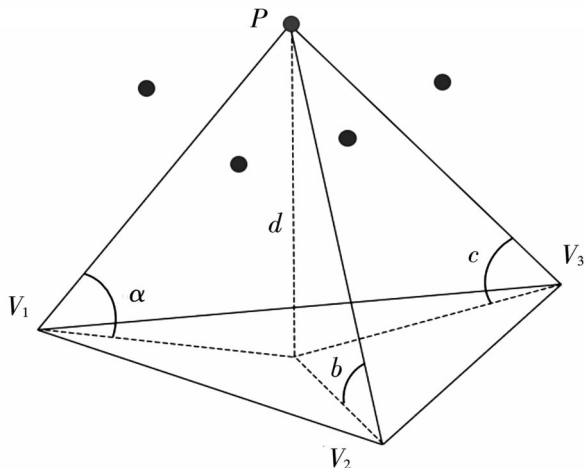


图3 渐进三角网原理示意

设定阈值,若反复角和反复距离小于设定的阈值,则该点为地面点,予以保留;反之则为非地面点,予以剔除。

1.2.2 反距离加权插值构建DEM

滤波后的点云数据存在多处空洞与断裂,极大影响着DEM的真实性与精度,因此需要对点云模型进行插值。

本文利用反距离加权插值^[9](IDW),假定空间待插值点为 Q , Q 点邻域内散乱点 P ,利用反距离加权插值法对点 Q 的属性值 Z_Q 进行插值。其插值原理是待插 Z_i 为邻近区域内所有数据点 Z 值的加权平均,权重系数与待估点到采样点的距离的 k ($0 \leq k \leq 3$)次幂成反比,即随着距离增大,权重呈幂函数递减,且对某一待估点而言,其所有邻域内采样点数的权重和为1。其计算式为

$$Z_Q = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^k}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^k}} \quad (1)$$

式中, d_i 为待插点与其邻域内第 i 个点之间的距离。

1.2.3 水库库容计算方法

DEM作为高程信息与平面信息相互转化的载体,将水库的水位与水域面积的变化从二维空间过渡到三维空间。以最低水面作为初始面,以初始水面高程向上对模型进行切片、排序,统计出相应高程的水位面积。将相邻的空间看作柱体,累加各个

部分的面积,得到从初始水位开始的水量体积。测量中断面法常用的库容计算公式为梯形公式和截锥公式,即,

$$V = \sum_{m=1}^{n-1} \frac{1}{2} h (S_m + S_{m+1}) \quad (2)$$

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{1}{3} (S_i + S_{i+1} + \sqrt{S_i S_{i+1}}) d_i \quad (3)$$

式中, V 为水库蓄水体积, i 为切片序号, h 为切片间隔, S_m 为第 m 层切片的面积。

式(2)为梯形公式,又叫一般计算公式,广泛应用于河槽式河流类型;式(3)为截锥公式,称之为严密计算公式。

水库地形更加符合截锥几何特征,本文可利用式(3)进行计算,蓄水体积计算的原理如图4所示。

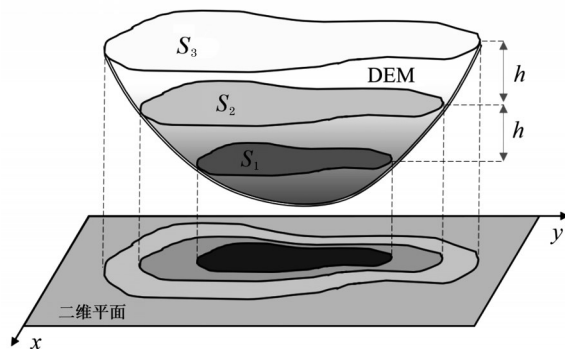


图4 水体积计算原理

2 实验与结果

2.1 试验区选取

研究示范区位于江苏省句容市东北部山区通济河支流,属太湖流域,地势低洼,易受洪涝灾害威胁^[10]。水库集水面积 24.5 km^2 ,总库容约 2704 万 m^3 ,属于中型山谷水库,水库主坝坝顶高程 59.3 m ,校核洪水位 57.22 m 。水库设计以防洪、灌溉为主,结合水产养殖,并向下游城镇供水。自2001年5月,南京水文自动化研究所安装了自动化水位、雨量遥测系统与水位雨量站,为验证库容曲线提供了参考数据。

2.2 DEM与库容曲线的构建

本研究利用terrasolid2019软件,基于PTD滤波后的点云数据,利用反距离插值法建立DEM。设置格网大小为 0.1 m ,权重为2,半径搜索阈值 5 m ,计算得到高精度数字高程模型。滤波结果与DEM构建的结果如图5所示。

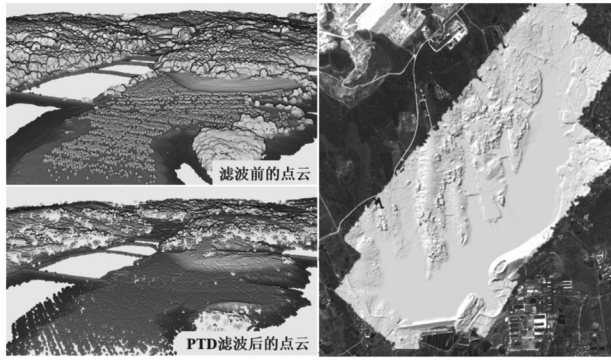


图5 PTD滤波与DEM构建成果

根据仑山水库及周边地形的DEM数据,对模型进行高程提取。提取出不同高程 H 下的河湖周边模型。利用式(3)计算不同水位高程差 H 下的蓄水容积 V_i 。本实验的水位高程设定0.5 m为间隔,利用ArcGIS10.2进行栅格计算获取不同水位下的水域面积。分别计算0.5 m水位间隔下的水量体积,并将不同水位的蓄水容积 V_i 依次求和,绘制 H - S - V 关系模型,结果如图6所示。

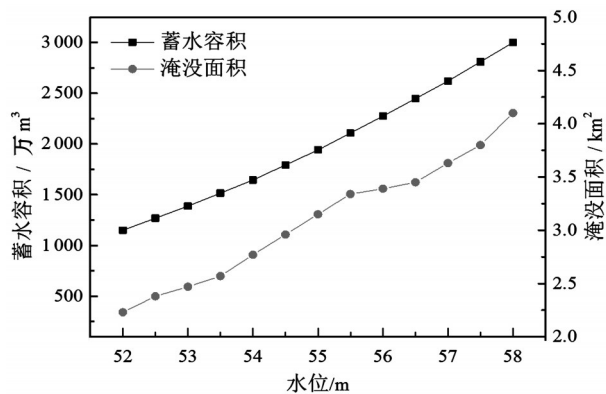


图6 水库 H - S - V 关系模型

2.3 精度验证

为了验证所建水库库容曲线的可靠性,需要对库水位—水域面积—水量体积变化关系进行精度分析。仑山水库建设自动化水位、雨量遥测系统以及水位雨量站,参照水库管理所提供的 H - S - V 关系表,计算蓄水容积 V_i 与实际蓄水的差值(D_v),以及水域面积 S_i 与实际面积的差值(D_s),结果如表1所示。分析模型在不同水位与实际数据的相似度,判断库容曲线是否可靠。

结果表明,计算水域面积与实水域面积相似度最低为96.10%,最高达99.46%,平均相似度为97.32%,误差在可接受范围内;模拟蓄水量与实际蓄水量相似度最低为96.14%,相似度最高达99.46%,平均相似度为97.08%。模拟蓄水量总体相较实际蓄水量偏大,属于合理范围,说明该方法的准确性较高,应用性较强。

3 结 语

本文对仑山水库约10.8 km²的范围展开研究,利用机载LIDAR获取的水库及周边点云数据,基于初始水位建立DEM。通过对水域面积进行提取与水量体积计算,构建从51.3~58 m水位下的库容曲线。经过精度分析,得到以下结论。

(1)机载LIDAR技术在库容曲线计算相对传统方法,自动化程度高,可视化效果好,提高了测量效率和准确性。

(2)机载LIDAR未能获取水下的地形数据,因此库容曲线是从获取数据时的水位开始算起。本文采用水量体积计算适用于静态或者水流较为平缓的水库。

表1 计算模拟结果与实际结果对比

水位高程/m	蓄水容积 V_i /万 m ³	水域面积 S_i /km ²	实际蓄水 V /万 m ³	实际面积 S /km ²	D_v	D_s
52	1 171	2.211	1 130	2.234	41	-0.023
52.5	1 294	2.459	1 259	2.387	35	0.069
53	1 398	2.513	1 334	2.475	54	0.040
...
57	2 665	3.665	2 623	3.637	42	0.030
57.5	2 795	3.882	2 810	3.801	-15	0.080
58	3 046	4.260	3 000	4.103	46	0.160

(下转第69页)

丙橡胶条,在下方设置接油盘,并将装置与闸门启闭控制电路有效连接,实现了在闸门运行时封闭装置能自动开启,闸门在到达上下限位和停止时能自动闭合的功能,不仅在闸门运行时确保运行人员可以实时观察闸门运动以及水面的情况,更好地对装置进行控制以及根据水面的实际情况进行调节,而且在平时闸门不使用的时候底板能够及时闭合,有效防止灰尘及动物等进入启闭机房,延长了整体设备的使用寿命,确保工程运行安全。

该装置施工简单,使用可靠,故障率低,经济实用,适用于各种闸门型式的卷扬式启闭机,尤其适用于直升式弧形闸门、下卧式弧形闸门等出绳方向随起升高度不断发生变化的卷扬式启闭机。当水闸每年定期进行维修养护时,该装置可自动启闭,便于钢丝绳日常保养,可节省大量人力物力,便于

保持启闭机房的干净。该装置日常维护工作量小,维修保养费用低,性价比高,维护方便,具有一定的推广价值。

参考文献:

- [1] 万泉,陈宇潮,何云轩. 卷扬式启闭机绳孔封闭自动装置研制探讨[J]. 治淮,2016(8):39-40.
- [2] 王继涛. 白龟山水库固定卷扬式启闭机钢丝绳绳孔封闭装置的理论与实践[J]. 河南科技,2016(1):92-94.
- [3] 孙超君,张宜亮,赵庆华. 安全生产标准化的推广和应用实践[J]. 中国水利,2021(2):53-55.
- [4] 李二顺,马真真,李聪聪. 弧形闸门启闭机钢丝绳养护及绳孔封闭技术探讨[J]. 水利建设与管理,2015(2):68-71.
- [5] 陈铭华. 闸门启闭机钢丝绳日常维护和相关技术的应用分析[J]. 建筑工程技术与设计,2015(13):1715.

(上接第65页)

(3)基于LIDAR点云数据建立的三维模型,具有较好的可视化效果,可以模拟水位增长与淹没面积变化对周边环境的影响程度。

参考文献:

- [1] 高圣益,李成国. 水库库容测量技术研究[J]. 人民长江,2007(10):98-99.
- [2] 孟凡超. GPS技术在水库库容测绘中的应用[J]. 吉林水利,2018(10):51-53.
- [3] 李鑫龙,阮宝民,陈和权. 无人机倾斜摄影测量技术在水库库容计算中的应用[J]. 东北水利水电,2021,39(12):59-61.
- [4] 孟凡超. GPS技术在水库库容测绘中的应用[J]. 吉林水利,2018(10):51-53.
- [5] 高胜超,高彦涛,王文杰. 机载LiDAR在河南省重点水

库库区高精度DEM建立中的应用[J]. 测绘通报,2022(1):128-132.

- [6] 陈松尧,程新文. 机载LIDAR系统原理及应用综述[J]. 测绘工程,2007(1):27-31.
- [7] 周维娜,程晓光,严明,等. 机载LiDAR点云中静态水体边界提取[J]. 遥感信息,2021,36(3):32-38.
- [8] 隋立春,张熠斌,张硕,等. 基于渐进三角网的机载LiDAR点云数据滤波[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2011,36(10):1159-1163.
- [9] Vincent Chaplot et al. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density[J]. Geomorphology,2005,77(1):126-141.
- [10] 张耀华,孙雯,朱喜,等. 太湖流域平原城市洪涝防治思路[J]. 江苏水利,2016(1):56-60.