

基于无人机、无人船测量的小型水库库容分析

——以梅家洪、红峰水库为例

沈国进, 李子慧, 卢 笙

湖北省黄石市水文水资源勘测局, 湖北 黄石

收稿日期: 2024年6月27日; 录用日期: 2024年8月12日; 发布日期: 2024年8月28日

摘 要

本文采用无人机、无人船对黄石市梅家洪水库、红峰水库开展了地形测量和库容计算, 分析了三种主要库容计算方法, 以三角网法基于LAS的数据集和抽稀后的数据计算库容变幅较小, 梅家洪水库、红峰水库库容在CoPrecess2较CASS计算结果的均方差为2.13%和1.23%, 且差异性主要在低水位; 方格网法受数据顶点影响较大, 使用三角网法内插方格网顶点其结果趋近三角网法计算的库容, 在CoPrecess2方格网法计算的结果与三角网法结果趋于一致, 而未使用三角网法内插顶点的CASS计算库容较三角网法有一定的差别, 尤其在梅家洪水库均方差达到了9.99%, 而红峰水库均方差为4.32%; 等高线法受到溢洪道影响, 在正常蓄水位以上无法产生闭合线而无法计算正常蓄水位以上库容, 限制较多, 仅有类似CASS专业少量软件支持该算法来计算库容。

关键词

库容计算, 三角网法, 方格网法, 等高线法, 小型水库

Reservoir Capacity Analysis of Small Reservoirs Based on UAV and Unmanned Ship

—A Case Study of Meijiahong and Hongfeng Reservoir

Guojin Shen, Zihui Li, Sheng Lu

Huangshi Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Huangshi Hubei

Received: Jun. 27th, 2024; accepted: Aug. 12th, 2024; published: Aug. 28th, 2024

Abstract

This article conducted topographic measurements of Meijiahong Reservoir and Hongfeng Reservoir in

作者简介: 沈国进(1989-), 男, 湖北宜昌人, 工程师, 主要从事水文预报及水情数据分析方面的工作, Email: 121701226@qq.com

Huangshi City using drones and unmanned ships, and calculated their storage capacity. The article analyzed the main three storage capacity calculation methods, and calculated the storage capacity changes using the triangulation method based on the LAS dataset and diluted data. The mean squared deviation of the storage capacity of Meijiahong Reservoir and Hongfeng Reservoir in CoPrecess2 compared to CASS calculation results is respectively 2.13% and 1.23%, and the difference is mainly at low water levels; The grid method is greatly influenced by data vertices. The triangulation method interpolating grid vertices results in storage capacity is close to that calculated by the triangulation method. The results calculated by the CoPrecess2 grid method and the triangulation method tend to be consistent. However, the CASS calculation of storage capacity without the triangulation method has a certain difference compared to the triangulation method, especially in Meijiahong Reservoir where the mean square deviation reaches 9.99%, while in Hongfeng Reservoir 4.32%; The contour line method is affected by the spillway, and cannot generate a closed line above the normal water level to calculate the storage capacity above the normal water level. There are many limitations, and only a small number of professional softwares like CASS support this algorithm to calculate the storage capacity.

Keywords

Reservoir Capacity Calculation, Triangle Net Method, Grid Net Method, Contour Method, Small Reservoir

Copyright © 2024 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

我国特殊的自然地理条件和水资源分布特性决定了水库工程在防洪、蓄水灌溉、供水等发挥了不可替代的作用，随着河湖(库)长制的实施，水安全、水生态、水环境被越来越重视，如何协调水库水资源成了当前水利工程迫在眉睫的问题，而这一切的基础是准确的水库库容信息，但绝大多数小型水库库容来源于建库之初通过 1:5000 或 1:10,000 比例尺的地形图由等高线法量算而来，而建库时间多为上世纪六七十年代，距现在时间均已经超过了 50 年，受淤积影响及当时的技术条件影响，现库容准确与否有待考证。以湖北为例，6500 多座小型水库建库之后就未复核过库容，为构筑水安全防线，湖北省于 2023 年开始小型水库引测校测工作，对水库库容等进行校测分析，保证其基础数据的准确性。

随着信息化、智能化的不断发展，高精度、高分辨率、高测绘速度的无人机[1]航测技术和无人船[2]水下测量[3]的结合被广泛应用在水库等测量中，同时针对水库库容采集数据的后处理方式更专业化、智能化、可视化，依托于方格网法、三角网法、等高线法的行业认可南方 CASS 以及带有渲染的 CoPrecess2 和更高效的 LiDAR360 等多种软件被市场所认可和推广。文章对黄石市小型水库进行水上、水下部分测量，并将整合的水库地形数据结合多种库容计算方式来分析其水库库容，以便自动化的提高水库库容计算结果精度，为后续开展的水库库容校核工作提供技术支持。

2. 测量技术与库容计算原理

2.1. 无人机

本次库容水上测量采用了免像控点的大疆 Matrice 350 RTK，搭载禅思 L2 激光雷达(见图 1)，针对水库周边植被茂盛，其激光雷达选择了现穿透力最强的五回波负载模式，并通过 RTK 在大坝断面做多个比对点，控制航拍点精度。根据无人机和 RTK 测量精度对比，控制点误差小于 3 cm，其测量精度满足要求。

无人机流程图如图 2 所示，针对地表建筑物、植被使用了大疆智图进行分类和去噪，其梅家洪水库雷达点云数据渲染成的 DEM 如图 3 所示。

2.2. 无人船

无人测量船由单波束、GNSS 和 IMU 传感器的集成提供了准确的位置和姿态数据，较传统测深技术具有更快速、更精确获取水域地理信息的优势，广泛应用于河道断面测量、水下地形测量等。本次水下地形测量采用华微 3 号无人船，通过无人机航拍获得当前水体水边线，然后依据此数据进行规划无人船轨迹，如图 4 所示，以达到自动航行的目的，同时为防止无人船撞击岸坡或者搁浅，对水边线进行内缩，部分区域由自动控制调整为手动控制，并避开浅滩区域，以保证无人船测量的顺利进行，后续的测量成果根据 HydroSurvey 软件通过姿态改正、三项改正等数据处理来把控数据精度，无人船水下测量工作流程图见图 5。



图 1. 无人机航拍测量图

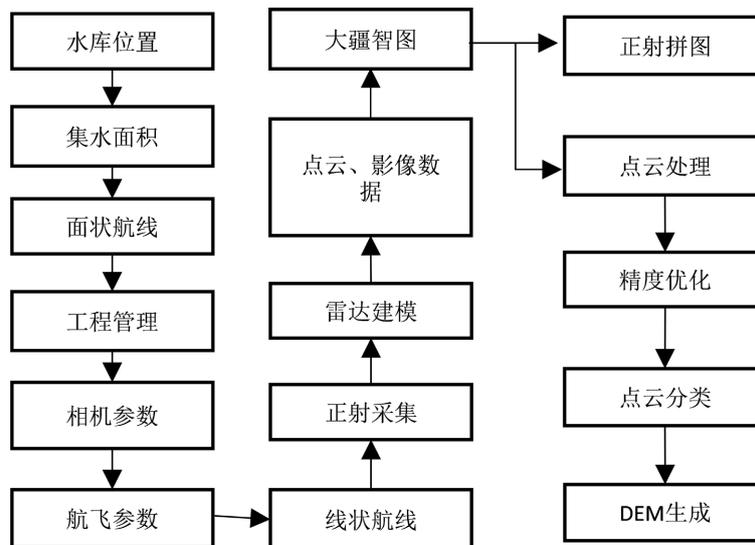


图 2. 无人机低空航拍工作流程图

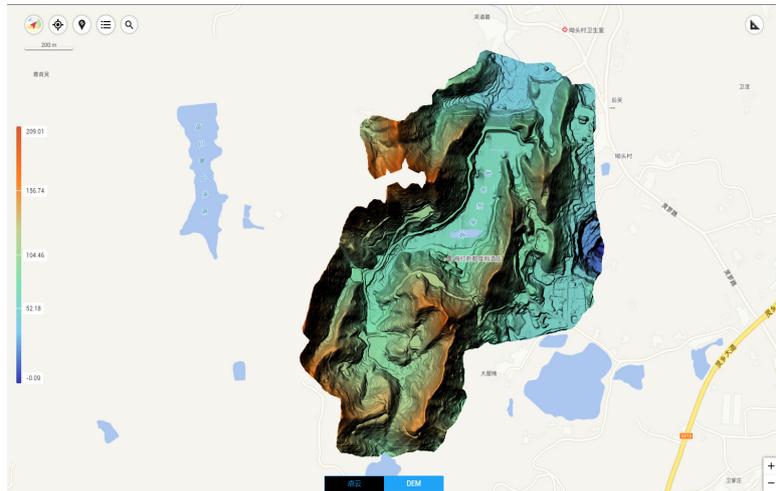


图 3. 梅家洪水库 DEM 数据渲染图



图 4. 红峰水库无人船航线

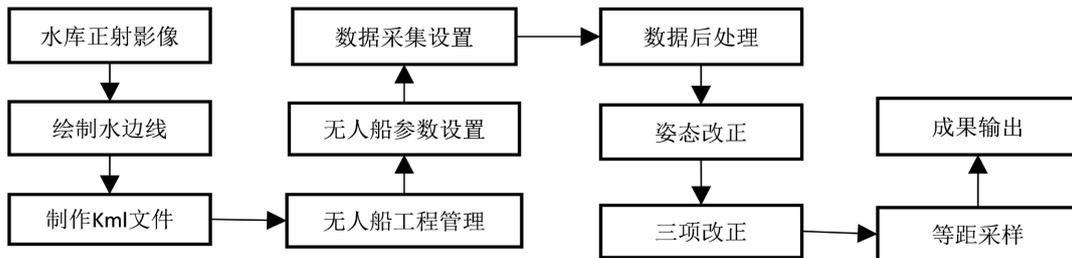


图 5. 无人船水下测量工作流程图

2.3. 库容计算原理

目前，库容计算均为借助填挖土方中的填方来计算，常见方法为 3 种：

1、方格网法[4]，适用于地形变化较为平缓的区域。根据测定的地面点坐标(X, Y, Z)和计算高程，多以构建 20 m × 20 m、50 m × 50 m 的方格，通过内插获得方格网 4 个角点，以四角棱柱的体积来计算。

1) 方格中全填或全挖，其挖方或者填方体积为：

$$V = a^2 \left(\frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}{4} \right) \quad (1)$$

2) 方格中一角点填方(挖方), 三角点挖方(填方), 以 h_4 低于计算高程为例:

$$V_{\text{填}} = a^2 h_4^3 / 6 (h_1 + h_4) (h_3 + h_2) \quad (2)$$

其挖方部分土方量为:

$$V_{\text{挖}} = a^2 (2h_1 + h_2 + 2h_3 - h_4) / 6 + V_{\text{填}} \quad (3)$$

3) 方格中 2 个角点为挖方, 2 个角点为填方时, 以 h_3 、 h_4 低于计算高程为例, 其挖方或填方体积分别为:

$$V_{\text{挖}} = a^2 / 4 \times [h_1^2 / (h_1 + h_4) + h_2^2 / (h_2 + h_3)] \quad (4)$$

$$V_{\text{填}} = a^2 / 4 \times [h_3^2 / (h_2 + h_3) + h_4^2 / (h_1 + h_4)] \quad (5)$$

式中:

V 、 $V_{\text{挖}}$ 、 $V_{\text{填}}$ 为容积, m^3 ; a 为方格网的边长, m ; h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 为各网点高度(相对指定高程面), m 。

2、三角网法(DTM 法) [5], 公认精度较高且使用较为频繁的方法之一, 是库容(填挖方)计算的首选。计算土方量的原理是根据实地测定的地面点坐标(X, Y, Z)和计算高程, 根据计算高程每个三角形区域分为全填全挖或者有填有挖两种情况考虑, 当三角网顶点的高程都小于(大于)计算高程, 如图 6 所示, 计入累计填方(挖方)计算, 即:

$$V = \sum_{i=1}^n P_s \left(\frac{h_1 + h_2 + h_3}{3} \right) \quad (6)$$

当三角网顶点即有大于也有小于设计高程, 这时计算高程面将三角形分成 2 部分, 一部分为底面是三角形的锥体, 另一部分是底面为四边形的楔体, 如图 7 所示, 锥体和楔体部分体积计算公式分别为:

$$V_{\text{锥}} = \frac{P_s}{3} \frac{h_1^3}{(h_1 + h_2)(h_1 + h_3)} \quad (7)$$

$$V_{\text{楔}} = \frac{P_s}{3} \frac{h_1^3}{(h_1 + h_2)(h_1 + h_3)} - h_1 + h_2 + h_3 \quad (8)$$

式中:

V 、 $V_{\text{锥}}$ 、 $V_{\text{楔}}$ 为容积, m^3 ; P_s 为单个三角网格的面积值, m^2 ; h_1 、 h_2 、 h_3 为三角网顶点高度(相对指定高程面), m 。

另外, 对于部分挖方和填方在实际计算过程中主要为 6 种情况考虑, 即: ① $h_1 < 0, h_2 > 0, h_3 > 0$; ② $h_1 > 0, h_2 < 0, h_3 > 0$; ③ $h_1 > 0, h_2 > 0, h_3 < 0$; ④ $h_1 > 0, h_2 < 0, h_3 < 0$; ⑤ $h_1 < 0, h_2 > 0, h_3 < 0$; ⑥ $h_1 < 0, h_2 < 0, h_3 > 0$ 。对高于计算高程面部分累计计入挖方, 反之, 计入填方。

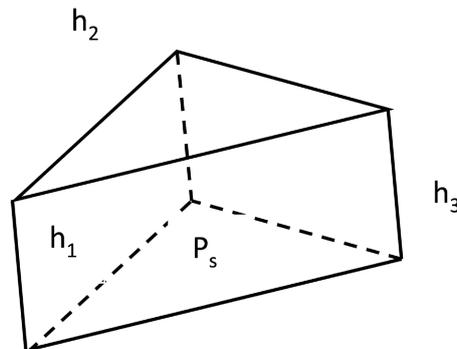


图 6. 全填或全挖型

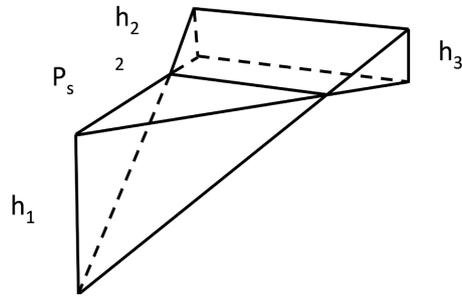


图 7. 有填有挖型

3、等高线法，是土方计算精度较高的方法之一。通过把容积按不同高程面微分成 n 层园台，整体库容由 n 层园台体积积分求得。等高线容积法计算土方量公式为：

$$V = \sum_{h_0}^h \Delta V = \sum_{i=1}^n \frac{1}{3} (S_i + \sqrt{S_i S_{i+1}} + S_{i+1}) \Delta h_i \quad (9)$$

式中：

V 为容积， m^3 ； S_i 为第 i 根闭合等高线所围的面积，且 $S_0 = 0$ ， m^2 ； Δh_i 为第 $i \sim i+1$ 根等高线之间高程差， m 。

3. 数据来源及分析计算

为了分析目前常用的库容计算方法，挑选了梅家洪、红峰 2 座小(一)型水库做分析，其地理位置示意图见图 8。

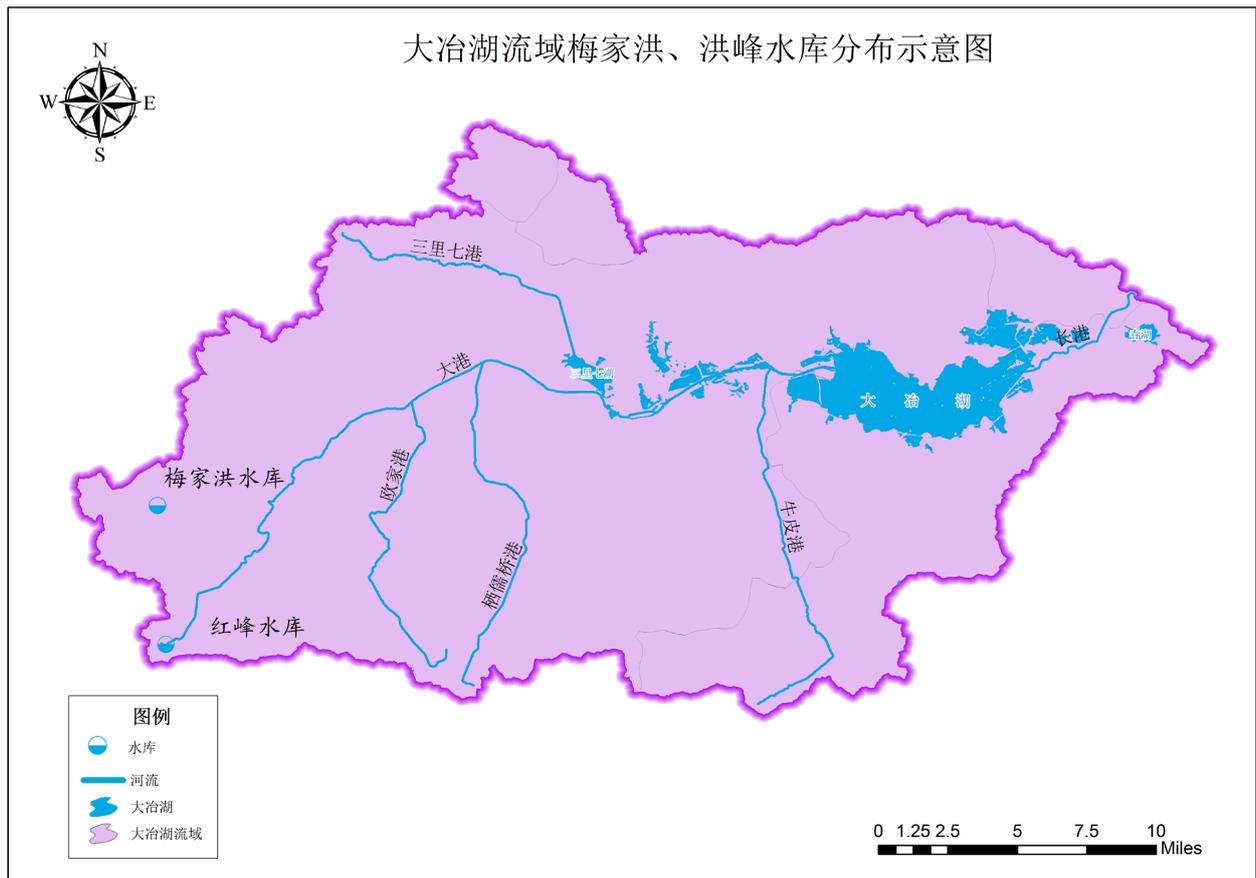


图 8. 黄石市大冶湖流域梅家洪、红峰水库分布示意图

梅家洪水库位于湖北省黄石市大冶市灵乡镇坳头村,属于大冶湖大港流域,坐标为东经 114°42'47.2"、北纬 30°0'41.6",属于小(一)型水库,于 1966 年建成,控制流域面积 1.79 km²,校核洪水位 87.61 m,正常蓄水位 85.70 m,死水位 69.27 m(1985 国家高程基准,下同),总库容为 104.4 万 m³,调洪库容 19.9 万 m³,兴利库容 79.9 万 m³,死库容 4.6 万 m³。

红峰水库位于黄石市大冶市灵乡镇红峰村,属于大冶湖大港流域,坐标为东经 114°43'30.2"、北纬 29°57'49.0",属于小(一)型水库,于 1971 年 10 月建成,控制流域面积 1.47 km²,校核洪水位 95.12 m,正常蓄水位 94.02 m,死水位 80.62 m,总库容 207 万 m³,兴利库容 159 万 m³,死库容 2 万 m³。

考虑计算原理和数据量,文章选择对比南方 CASS [6]、CoProcess2、LiDAR360 这三类软件在后期库容计算差异,见表 1。

表 1. 部分库容计算软件特性对比表

软件名称	库容计算原理	水边线改正操作	优缺点
南方 CASS	方格网法、三角网法、等高线线法等	容易	计算速度一般、计算结果最可靠,能通过等高线反向矫正数据,支持抽稀后的 dat 数据
LiDAR360	三角网法	不易	计算速度快,计算结果可靠,有可视化渲染效果,可直接使用 las 数据
CoProcess2	三角网法、方格网法 (基于三角网法内插方格网定点)	不易	计算速度一般,计算结果较可靠,有可视化渲染效果,可直接使用 las 数据

水库库容计算所采用的地形数据由无人机航拍数据(水上部分,去除水面数据)和无人船(水下部分)合并而成,其中 CoProcess2、LiDAR360 可使用抽稀为 1 m 的 LAS 数据,而南方 CASS 针对现 1:1000 比例尺一般使用 10~20 m 间隔的 dat 数据,并增设水边线高程数据。

对梅家洪水库、红峰水库特征库容进行分析(图 9、图 10),两座水库出现截然不同的结果见表 2、表 3。梅家洪水库较原死库容、兴利库容、总库容均出现了较大幅度的减少,以多种方式的均值对比,死库容减少了 87.22%,兴利库容减少了 30.53%,总库容减少了 31.64%;以 CASS 三角网法对比,死库容减少了 87.61%,兴利库容减少了 28.91%,总库容减少了 30.13%。红峰水库较原死库容、兴利库容、总库容均出现了不同幅度的增

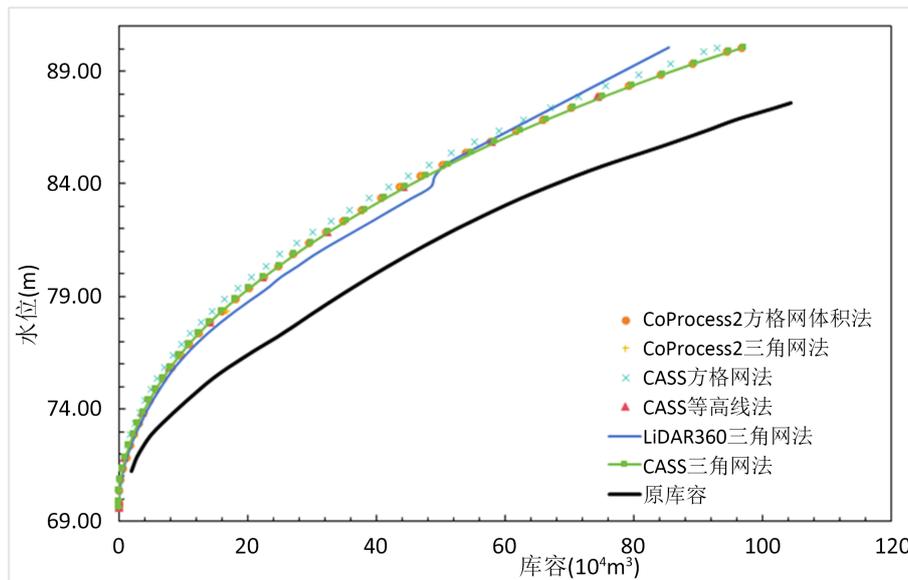


图 9. 梅家洪水库水位库容曲线

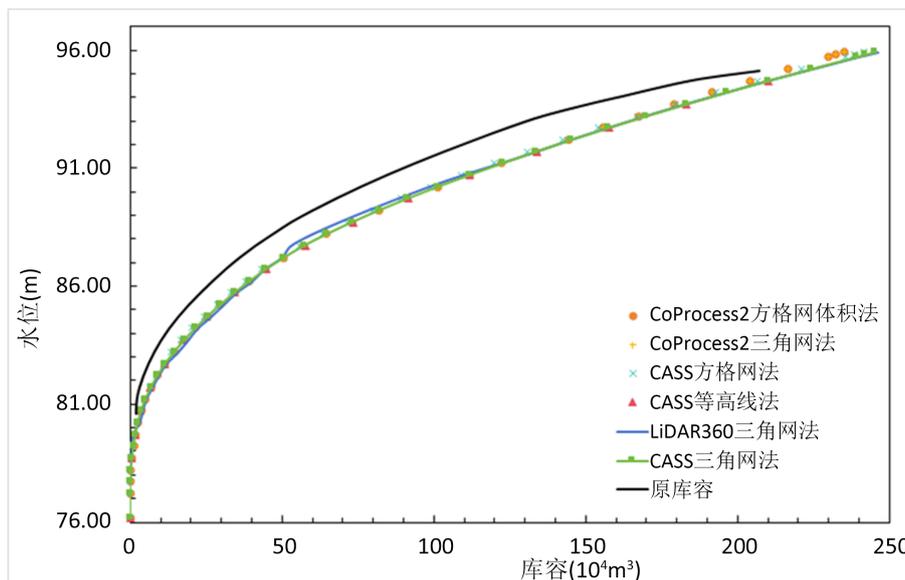


图 10. 红峰水库水位库容曲线

加，以多种方式的均值对比，死库容增加了 64.58%，兴利库容增加了 16.74%，总库容增加了 6.32%；以 CASS 三角网法对比，死库容增加了 66.50%，兴利库容增加了 18.00%，总库容增加了 8.06%。梅家洪水库主要受库尾开发及工程建设影响，导致总库容出现了减少 31.64%，而红峰水库整体保持了天然状态，总库容较原库容变幅较小。CASS 等高线法在计算梅家洪水库死库容时仅一根等高线无法计算库容，在红峰水库高水位时受溢洪道影响等高线无法闭合也无法计算校核洪水位以下的总库容。以多种方式的均值对比，在梅家洪水库兴利库容和总库容分析中，计算兴利库容最大偏差为 CASS 方格网法的-3.30%，计算总库容最大偏差为 LiDAR360 三角网法的-3.44%；在红峰水库兴利库容和总库容分析中，计算兴利库容最大偏差为 CASS 等高线法的 1.48%，计算总库容最大偏差为 LiDAR360 三角网法的 1.82%。整体而言，结果多种算法的结果整体较为接近。

表 2. 软件计算梅家洪水库特征库容对比表

梅家洪特征库容	原库容	LiDAR360 三角网法	CoProcess2 方格网体积法	CoProcess2 三角网法	CASS 三角网法	CASS 方格网法	CASS 等高线法	均值
死库容(万方)	4.60	0.71	0.61	0.62	0.57	0.43	-	0.588
兴利库容(万方)	79.90	55.4	55.83	55.82	56.8	53.67	-	55.50
总库容(万方)	104.40	68.91	72.43	72.43	72.94	69.2	72.28	71.36

表 3. 软件计算红峰水库特征库容对比表

红峰特征库容	原库容	LiDAR360 三角网法	CoProcess2 方格网体积法	CoProcess2 三角网法	CASS 三角网法	CASS 方格网法	CASS 等高线法	均值
死库容(万方)	2.00	3.98	3.32	3.33	3.33	3.05	2.74	3.29
兴利库容(万方)	159.00	186.72	183.22	183.21	187.62	184.54	188.35	185.61
总库容(万方)	205.00	221.94	214.17	214.17	221.53	218.02	-	217.97

为了进一步对比各类软件的计算各个水位级下库容结果，对梅家洪水库 72~88 m、红峰水库 80.5~96 m 水位级(死水位至校核洪水位，0.5 m 间隔)下的库容进行分析，以南方 CASS 三角网法计算结果为参照对象(整体多个

结果趋近南方 CASS 三角网法计算的库容值且市场较为认可), 分析各软件计算库容较参照对象偏差。计算发现整体而言 LiDAR360 差异性较 CASS 三角网法最大, 且在梅家洪水库 84 m 左右库容增量出现了突然变小(图 11), 由偏差 8.57% 变为 2.53%, 后在 85 m 水位级变为负偏差, 在图 9 表现为明显的折点, 说明 LiDAR360 三角网法在部分水位级下的库容计算结果不够平滑; 在红峰水库低水位级下 LiDAR360 三角网法计算库容较其他方式偏差明显偏大, 较 CASS 三角网法最大偏差达到了 23.69% (图 12)。

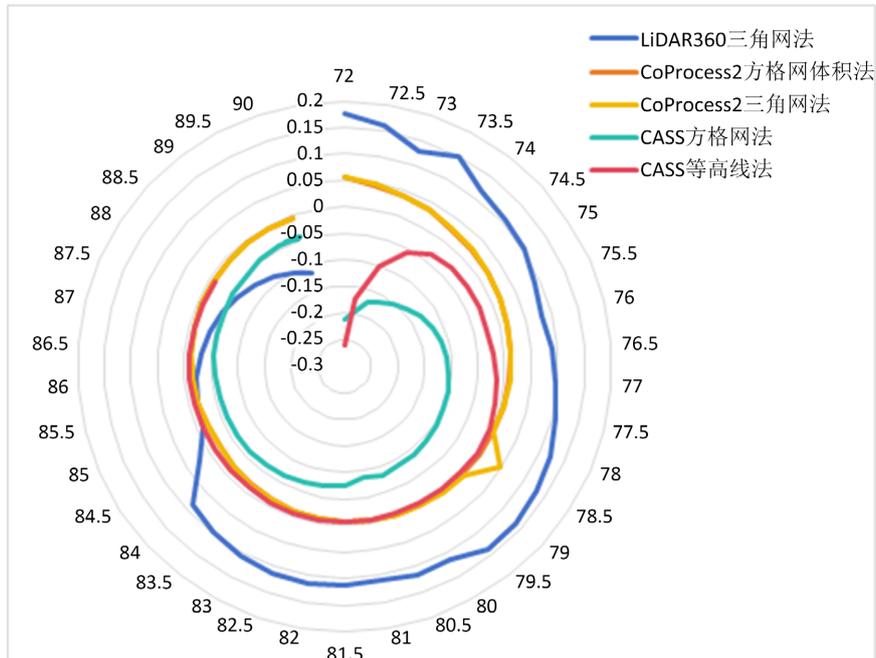


图 11. 不同模式计算梅家洪水库库容对比图

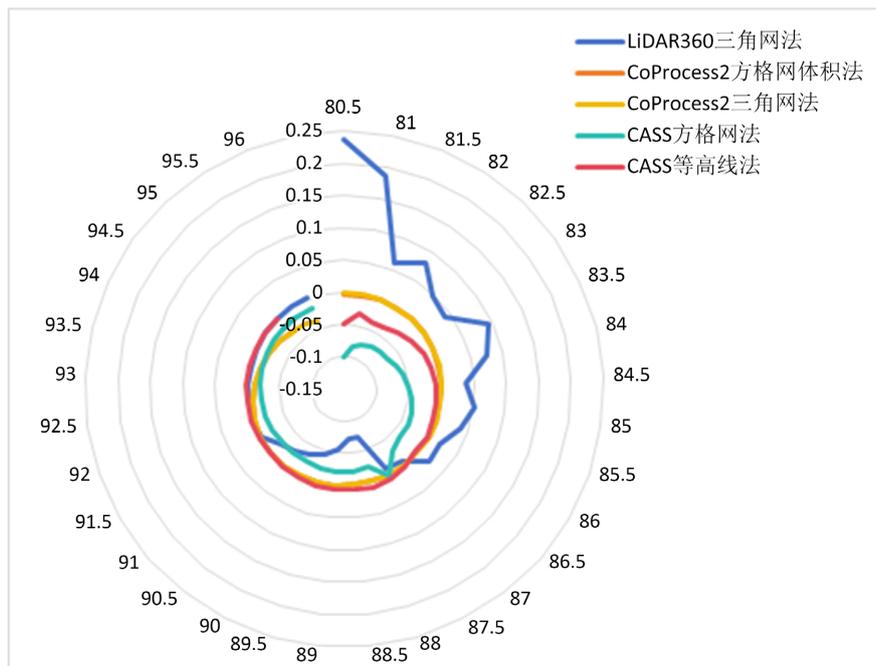


图 12. 不同模式计算红峰水库库容对比图

表 4. 软件计算梅家洪水库库容偏差值对比表

相对偏差	LiDAR360 三角网法	CoProcess2 方格网体积法	CoProcess2 三角网法	CASS 方格网法	CASS 等高线法
平均偏差	8.16%	0.32%	0.55%	-9.68%	-2.82%
最大库容偏差	-6.08%	-0.65%	-0.64%	-5.00%	-1.09%
最大相对偏差	17.59%	5.56%	5.56%	-21.30%	-25.93%
均方差	9.86%	1.89%	2.13%	9.99%	5.61%

表 5. 软件计算红峰水库库容偏差值对比表

相对偏差	LiDAR360 三角网法	CoProcess2 方格网体积法	CoProcess2 三角网法	CASS 方格网法	CASS 等高线法
平均偏差	2.01%	-0.61%	-0.57%	-3.66%	-0.69%
最大库容偏差	0.30%	-3.86%	-3.86%	-1.49%	-
最大相对偏差	23.69%	-3.86%	-3.86%	-10.04%	-4.82%
均方差	6.63%	1.23%	1.23%	4.32%	1.57%

根据表 4 和表 5 分析，以 CASS 三角网法计算结果为参照对象，最大相对偏差值均为低水位级时出现，其中 LiDAR360 三角网法计算梅家洪水库最大相对偏差值为 17.59%，红峰水库最大相对偏差值为 23.69%；CoProcess2 方格网法、三角网法在梅家洪水库、红峰水库计算最大相对偏差值一样，分别为 5.56%和-3.86%；CASS 方格网法、等高线法与三角网法偏差较大，且低水位时计算库容偏小，两种库容计算梅家洪水库偏差值分别为-21.30%和-25.93%，计算红峰水库偏差值分别为-10.04%和-4.82%。整体而言，从最大库容偏差值和均方差为主的维度分析，CoProcess2 方格网法、三角网法在分析两座水库库容时更接近 CASS 三角网法结果，其次是 CASS 方格网法，最后是 LiDAR360 三角网法，而 CASS 等高线法均误差在两座水库仅为 5.61%和 1.57%，效果应该较好，但是受到等高线闭合的要素控制，正常蓄水位以上库容无法正常算出(无闸门控制溢洪道)，必须提前在溢洪道处增加等同大坝高的边界数据和加密等高线，这导致实际应用时较少使用该方式来计算水库库容，在部分存在多个溢洪道时更加复杂，修改溢洪道数据后导致后期真假数据难以区分。

4. 结论

1) 基于无人机、无人船相结合的方式在水库库容测量是切实可行的，以多种方式的均值对比，现梅家洪水库、红峰水库较原总库容变幅分别为-31.64%和 6.32%，说明现小型水库库容受工程建设等影响较大。

2) 以三角网法内插数据点后通过方格网法和三角网法计算库容差异较小，这点通过使用 1 m 间隔 LAS 数据的 CoPrecess2 方格网法和三角网法在梅家洪水库和红峰水库库容计算中得以验证，两种算法在两座水库中的相对 CASS 三角网法最大库容偏差值、最大库容相对偏差值一致，仅在低水位时有一定的差异。

3) 原始数据的抽稀对后续计算库容影响较小，这点可以通过 CASS 三角网法和 CoPrecess2 三角网法对比差异得出，其梅家洪水库平均偏差值、最大库容偏差值、最大相对偏差值、均方差分别为 0.55%、-0.64%、5.56%、2.13%，其红峰水库平均偏差值、最大库容偏差值、最大相对偏差值、均方差分别为-0.57%、-3.86%、-3.86%、1.23%。

4) 等高线法在计算库容精度与三角网法较为接近，但是它在计算库容有本身的劣势，尤其是湖北大量的无闸门控制的溢洪道，未处理的原始数据无法计算正常蓄水位以上库容(或者计算结果失真)，这对水库后续的特征水位计算较为不利，尤其部分水库还会多个溢洪道，处理困难加剧，除 CASS 软件，主流软件较少使用该方法来计算库容。

5) 整体而言，三角网法在各个软件使用的最为频繁，其中 CASS 为现库容计算的首选，而基于大数据的

LAS 数据 CoProcess2 精度基本等同于 CASS 三角网法计算结果, 考虑后续计算结果的可视化, CoProcess2 效果更佳, 其软件三角网法和方格网法计算结果基本一致。

6) 对于库容计算涉及多个水位级, 对于后续的重复计算, CoProcess2 和 CASS 计算速度有待改进, 后期可选择 python 类的脚本语言进行改进来进行自动化处理, 以便提高工作效率。

参考文献

- [1] 包善文. 基于新型测绘技术的山区水库测量[J]. 测绘标准化, 2022, 38(4): 97-101.
- [2] 刘磊, 杨玉波. 基于地面三维激光扫描技术与无人船测深系统的水库库容计算[J]. 吉林水利, 2023(6): 45-50.
- [3] 唐卓君, 唐继利, 薛小松, 等. 基于无人智能技术的水库地形测量与库容计算研究[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(11): 114-118.
- [4] 李浩, 许霞, 李凌云. 两种水库库容计算方法的比较分析[J]. 山东水利, 2021(9): 58-59+65.
- [5] 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.
- [6] 程海港. 南方 CASS 软件在土方量计算中的应用[J]. 农业与技术, 2021, 41(24): 40-43.