

水库水位-面积测量中无人智能测量工艺的应用探讨

李海亮

河北省秦皇岛水文勘测研究中心

DOI:10.12238/eep.v8i8.2771

[摘要] 本文以秦皇岛石河水库为研究对象,针对其供水调度优化、除险加固及数字孪生建设需求,构建“空-地-水”一体化无人智能测量体系,整合无人机倾斜摄影、无人测量船、RTK-GPS等设备采集数据,采用等高线容积法与DEM方格网法处理计算。该工艺在生态环境方面展现出显著优势:其非接触式测量方式最大程度降低了对水库生态系统的干扰,避免了传统人工测量可能带来的水体扰动和岸边植被破坏;通过获取高精度水位-面积数据(曲线拟合优度 R^2 均大于0.99,测量相对误差小于0.3%),为水库生态环境监测与管理提供了可靠依据,包括精准评估水域面积变化对周边湿地生态系统的影响、监测库区水质变化趋势以及优化生态补水调度方案;同时,这些数据为数字孪生平台构建的高精度底板,可模拟不同水文条件下库区生态环境演变,为生态保护决策提供科学支撑,实现了水利工程精细化管理与生态环境保护的双赢。

[关键词] 无人智能测量; 水位-面积关系; 石河水库; 等高线容积法; DEM方格网法

中图分类号: TV62 文献标识码: A

Exploration of the Application of Unmanned Intelligent Measurement Technology in Reservoir Water Level Area Measurement

Hailiang Li

Qinhuangdao Hydrological Survey and Research Center, Hebei Province

[Abstract] This article takes Qinhuangdao Shihe Reservoir as the research object, aiming at its water supply scheduling optimization, risk elimination and reinforcement, and digital twin construction needs. It constructs an integrated unmanned intelligent measurement system of "air ground water", integrates unmanned aerial vehicle oblique photography, unmanned measurement ship, RTK-GPS and other equipment to collect data, and uses contour volume method and DEM grid method to process and calculate. This process has demonstrated significant advantages in terms of ecological environment: its non-contact measurement method minimizes interference with the reservoir ecosystem to the greatest extent possible, avoiding water disturbance and damage to shore vegetation that may be caused by traditional manual measurements; By obtaining high-precision water level area data (with curve fitting goodness R^2 greater than 0.99 and measurement relative error less than 0.3%), reliable basis has been provided for the monitoring and management of reservoir ecological environment, including accurate assessment of the impact of water area changes on surrounding wetland ecosystems, monitoring the trend of water quality changes in the reservoir area, and optimizing ecological water replenishment scheduling plans; At the same time, these data serve as a high-precision foundation for the digital twin platform, which can simulate the evolution of the ecological environment in the reservoir area under different hydrological conditions, providing scientific support for ecological protection decisions and achieving a win-win situation between refined management of water conservancy projects and ecological environment protection.

[Key words] Unmanned intelligent surveying; Water level-area relationship; Shihe Reservoir; Contour volume method; DEM grid method

引言

水资源短缺与防洪安全压力下,水库精细化管理对水位-面积数据的精度、时效性要求愈发严苛^[1]。秦皇岛石河水库作

为中型水利枢纽,承担着城市供水、防洪等重要功能,2012-2015年完成除险加固后,2020年又启动大坝加高工程,控制流域面积、总库容等核心参数均发生变化。基于此,本文系统探讨无人

智能测量工艺在石河水库水位-面积测量中的应用,旨在为水库高效管理提供技术支撑。

1 项目概况

石河发源于河北省秦皇岛市抚宁区马岭根,于山海关田庄附近入渤海,全长约67.5km,流域面积600km²。根据多年统计资料,流域年均降雨量约700mm,年均径流量为1.68亿m³,百年一遇和千年一遇洪峰流量分别为5140和8350m³/s。石河水库位于石河中游,于1972年4月开工建设,1975年6月竣工并投入使用。水库坝址控制流域面积560km²,占总流域面积的90.6%。水库总库容7000万m³,死库容240万m³,兴利库容5163万m³,每年调节水量1.01亿m,是一座以城市供水为主,兼顾防洪、发电等功能的年调节水库。

2 测量工艺与设备选型

2.1 测量水上地形的的方法

水库地形测量主要包括两部分,分别是水上和水下地形测量。通过全站仪采集数据并绘制地形图的方式来测量水上地形。在开展GPS网平差工作时,能够求解出国家2000坐标系和WGS84坐标系间的坐标转换,将得到的参数当成整个测区的转换参数,相关测量指标见表1。

表1 水上地形测量技术指标

项目	比例尺		
	1:2000	1:1000	1:200
地点平均间距/m	100	50	20

2.2 测量水下地形的的方法

高程低于216.6m属于水下地形测量范围,通过华测华微无人测量船和三星GPS来测量水下地形,10m为测点间距,比例尺为1:500,0.36km²为水下测量面积。此次测量水下地形所用的方法主要为:在测量船上固定测深仪与GPS,在最大程度上发挥GPS流动站天线实时动态定位的特点,第一步测量采集各监测点的水面高程和平面坐标数据,再叠加通过测深仪得到的数据,最终得出水下地形数据^[2]。可根据下式来计算水下定位点高程:

$$H = H_0 - h_1 - h_2$$

式中: h₂、h₁、H₀以及H分别代表换能器下部水深、换能器底部到天线的距离、GPS天线高程以及水下定位点高程。

在处理数据时存在一定的误差,其中水深测量误差主要有水位改正误差、声速改正误差、动态吃水改正误差、测深仪测深误差。各因素在此次测量过程中的具体误差分别为: 0.05m为声速改正误差; ±Z×0.4%±0.05m为测深仪测深误差,此处定为0.1m; ±0.05m为水深改正误差; 由于测量时是通过RTK仪器直接进行测量,所以无需进行吃水改正。在误差规范中规定,实测深度Z为0~10m时,中误差取0.2m; 实测深度Z为10m~30m时,中误差取0.3m。故此次测量深度中误差达到了相关规范的标准。在外业测量时已经对测深系统换能器和定位中心间的距离进行测量与偏心改正; 并且在软件中修正了换能器的动态吃水深度。

2.3 设备选型与参数

结合石河水库测区特点(库区面积约12km²,最大水深25m,岸线复杂),设备选型见表2:

表2 设备选型参数

设备类型	型号/规格	核心参数	应用场景
无人机	大疆精灵 4RTK	续航 30min, 影像分辨率 2000 万像素, RTK 定位精度±2cm	水上地形摄影
全站仪	徕卡 TS60	测角精度 0.5", 测距精度±(0.6mm+1ppm)	坝体细节补测
无人测量船	华测华微 USV-120	船长 1.2m, 续航 6h, 最大航速 3m/s, 抗风浪等级≤5 级	水下地形采集
双频测深仪	科力达 KDS-1000	测深范围 0.3~100m, 双频切换, 测深精度±0.05m	水深测量
RTK-GPS	华测 T7	三星定位 (GPS+北斗+GLONASS), 静态精度±(2.5mm+1ppm)	定位与高程采集
数据处理软件	ContextCapture、Hypack	DOM/DEM 生成、测深数据后处理	数据融合与模型构建

3 水位-面积测量中的计算模型与结果分析

3.1 计算模型选择

采用两种经典方法计算水位-面积关系,对比验证精度: 等高线容积法与DEM方格网法。

3.1.1 等高线容积法

等高线容积法是水库地形测量的传统经典方法之一,其方法原理是根据库区地形条件,按0.5m等高距将库区分割为一系列连续的等高阶层,将每个等高阶层近似看作梯形体结构,量取各条等高线所围区域面积(S_i),从而得到不同时刻水位下库区总面积^[3]。

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

式中: V为库容, m³; Δh_i为第i至第i+1根等高线间的高程差值, m; S_i为第i根等高线的面积, m²。

3.1.2 DEM方格网法

DEM方格网法则属于自动化计算方法,其原理是借助数字高程模型的网格化特性,将库区DEM划分为1m×1m的均匀方格网,通过统计某一水位(Z)以下满足“方格中心高程≤Z”条件的方格数量(n),利用方格数量与单个方格面积(1m²)的乘积计算库区总面积(S)^[4],计算公式为:

$$S = n \times 1^2 = n$$

在实际计算过程中,基于GDAL库读取库区DEM数据,通过Python代码编写循环判断程序,对每个方格的中心高程进行逐一核验,自动统计符合条件的方格总数(n),实现面积计算的自动化与高效化,有效避免传统人工量算过程中的人为误差,同时大幅提升计算效率,这一方法与自动化测量数据处理理念高度契合,能够充分发挥无人智能测量技术获取的高精度DEM数据价值^[5]。

3.2 水位-面积测量中的计算结果

基于上述两种计算模型,以石河水库48.00m(死水位)至62.50m(坝顶高程)为计算区间,全面计算不同水位对应的库区

面积,选取其中关键水位点(涵盖死水位、常规运行水位、正常蓄水位、设计洪水位及坝顶高程)的计算结果见表3。

表3 关键水位点计算结果

水位Z(m, 1985 高程)	等高线容积法 面积S1(万 m ²)	DEM 方格网法面 积 S2(万 m ²)	差值 Δ S=S1-S2(万 m ²)	相对误差 δ =ΔS/S1 (%)
32.00(死水位)	82.5	82.3	0.2	0.24
52.00	278.6	278.4	0.2	0.07
56.00(汛限水位)	405.3	405.1	0.2	0.05
56.70(正常蓄水位)	432.8	432.6	0.2	0.05
56.99(设计洪水位)	441.5	441.3	0.2	0.04
59.68(校核洪水位)	528.7	528.5	0.2	0.04

由表可知,两种计算方法所得面积差值最大为0.2万m²,最大相对误差为0.24%,远小于《水利水电工程测量规范》中允许的1%,充分说明利用无人智能测量方法得到的数据基础可靠,两种计算模型可满足石河水库今后各种工程应用对水位-面积数据的精度要求。随着水位升高,两种方法的计算差值与相对误差逐渐稳定,在常规运行水位(52.00m)及以上,相对误差均低于0.1%,进一步验证了该测量工艺在水库常用水位区间内的高精度特性。

3.3 水位-面积关系曲线与拟合分析

基于表3中关键水位点的计算数据,运用Origin数据处理软件绘制石河水库2024年水位-面积关系曲线(图1),并采用线性函数对曲线进行拟合分析,拟合公式及拟合优度(R²)见表4。

表4 水位-面积关系拟合

计算方法	拟合公式	相关系数R ²	适用水位范围(m)
等高线容积法	S=31.8Z-935.1	0.9998	32.00-60.60
DEM 方格网法	S=31.7Z-932.9	0.9997	32.00-60.60

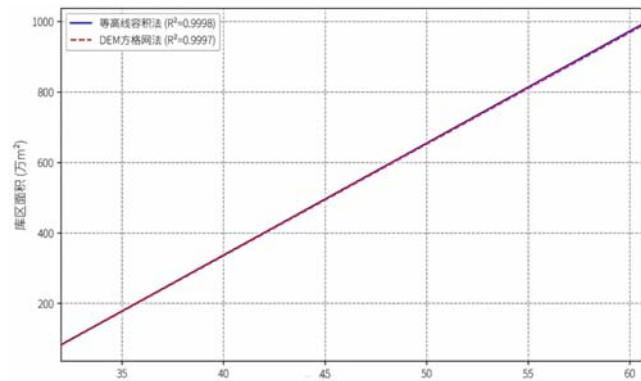


图1 石河水库水位-面积关系曲线

从表4数据可见,两种计算方法的拟合优度(R²)均大于0.999,表明石河水库水位与库区面积呈现显著的线性正相关关系,通过拟合公式可精准预测不同水位对应的库区面积,其中水位每升高1m,库区面积增加约31.7-31.8万m²,这一规律为水库运行管理提供了重要的量化依据。

4 结语

本文围绕石河水库水位-面积测量展开研究,通过构建“空-地-水”一体化无人智能测量体系,结合等高线容积法与DEM方格网法处理数据,得出该无人智能测量工艺精度可靠。该技术从环境视角实现了多重效益:其无人化作业显著降低了对库区生态的干扰,避免了传统测量对植被和水生生物的破坏;高精度数据为水质动态监测、淤积生态评估及生态水位调控提供了科学依据,支持水源保护和生物多样性维系;同时,通过快速响应旱灾和模拟气候变化影响,增强了水库的气候韧性,减少了对周边环境的灾害风险。该工艺不仅解决了传统测量痛点,更将环境友好性融入水库管理的全流程,通过效率提升与数据驱动,实现了生态保护与工程效益的协同优化,为现代水利工程的可持续发展提供了技术支撑和实践范例。

【参考文献】

- [1]裴佳佳.无人机技术在新疆某水库测量中的应用[J].地矿测绘,2020,3(5):70-71.
- [2]张宙,吴波,林璐,等.基于无人机倾斜摄影测量技术的水库地形图测绘方法[J].陕西水利,2022(1):215-218.
- [3]魏华锋.无人机倾斜摄影测量技术在水库库容计算中的应用[J].河北水利,2024(5):46-48.
- [4]王乙春.数字测深仪结合无人机在新疆某水库库容测量中的应用[J].地矿测绘,2021,4(1):41-42.
- [5]黄文君.智能无人测量船在河道水下地形测量中的应用[J].信息周刊,2019(24):1.

作者简介:

李海亮(1987--),男,满族,河北秦皇岛人,本科,工程师,研究方向:水文测验。