

浅谈无人机无人船 GPS-RTK 在叶城县某水库库容曲线测量中的应用

朱清

新疆疆南水利勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i6.7025

[摘要] 针对喀什地区叶城县山区水库地形复杂、传统库容曲线测量效率低、精度差、作业受限的问题,本文以叶城县某水库为研究对象,融合无人机航空摄影测量、无人船水下地形扫描与GPS-RTK高精度定位技术,构建空水一体化库容曲线测量体系。通过梳理该水库流域概况与工程特征,优化多设备协同作业流程,完成库区岸上地形、水下地形全覆盖数据采集,采用水平分层法精准计算库容,绘制高精度水位-库容、水位-面积曲线。

[关键词] GPS-RTK; 无人机测量; 无人船测量; 水库库容曲线; 山区水利测绘

中图分类号: O4-34 **文献标识码:** A

Brief Discussion on the Application of UAV, Unmanned Surface Vehicle and GPS-RTK in Storage Capacity Curve Survey of a Reservoir in Yecheng County

Qing Zhu

Xinjiang Jiangnan Water Conservancy Survey, Design and Research Institute Co., Ltd.

[Abstract] Aiming at the problems of complex terrain of mountain reservoirs in Yecheng County, Kashgar Prefecture, low efficiency, poor precision and restricted operation in traditional storage capacity curve survey, this paper takes a reservoir in Yecheng County as the research object. By integrating UAV aerial photogrammetry, underwater topographic scanning of unmanned surface vehicles and high-precision positioning technology of GPS-RTK, an integrated air-water survey system for reservoir storage capacity curves is established. The watershed overview and engineering characteristics of the reservoir are sorted out, the collaborative operation process of multiple devices is optimized, and full-coverage data collection of onshore and underwater topography in the reservoir area is completed. The horizontal layering method is adopted to accurately calculate the reservoir storage capacity, and high-precision water level-storage capacity curves and water level-area curves are plotted.

[Key words] GPS-RTK; UAV Surveying; Unmanned Surface Vehicle Surveying; Reservoir Storage Capacity Curve; Mountain Water Conservancy Surveying and Mapping

引言

新疆喀什地区叶城县地处昆仑山北麓、塔里木盆地西南边缘,属于典型的大陆性干旱气候,区域水资源时空分布不均,地表水主要依托乌鲁克河、提孜那甫河等流域径流供给。本案例水库作为叶城县乌鲁克河流域核心控制性水利工程,承担着灌溉、防洪、人饮供水等综合功能。库区地处山区与平原过渡地带,地形起伏大、岸坡陡峭、水域地形复杂,且区域风沙、温差变化显著,给水库地形测绘与库容测算工作带来极大难度。鉴于此,本文引入GPS-RTK高精度定位、无人机航空摄影及无人船水

下测量技术手段。三者优势互补,既能实现岸上地形的快速建模,又能精准获取水下地形数据,从而形成一体化的高精度测绘方案,从根本上克服了复杂工况与恶劣环境对作业的限制。

1 工程概况

本次测量研究对象为喀什地区叶城县某水库,水库位于叶城县乌夏巴什镇境内的乌鲁克河中游河段,坝址地处乌鲁克水管站上游9km处,距离叶城县城约74km,隶属于叶尔羌河流域水系。本水库为不完全年调节水库,工程核心任务为灌溉、防洪及城乡人饮供水,是乌鲁克河流域灌区的核心调蓄工程,服务灌区

面积17.58万亩,承担着叶城县乌夏巴什镇、宗朗乡等区域农业灌溉用水保障任务,同时兼顾下游河道生态流量调节功能。库区地处昆仑山北麓低山丘陵区,地势南高北低,库区两岸山体陡峭、地形起伏剧烈,岸坡植被稀疏,荒漠草地广布,水土流失与局部岸坡坍塌现象时有发生;水域内部受河道径流冲刷、泥沙淤积影响,水下地形凹凸不平,局部区域存在深浅不一的淤积坑洼,导致库区地形地貌复杂多变,为库容精准测量带来极大挑战。

2 技术原理

2.1 GPS-RTK。GPS-RTK(实时动态差分定位)技术是基于全球卫星定位系统的高精度实时定位测绘技术,核心原理为基准站与流动站差分定位修正。作业过程中,在库区已知高精度控制点架设GPS基准站,持续接收卫星定位信号并生成差分修正数据,通过无线传输模块实时发送至流动站设备;流动站同步接收卫星信号与基准站差分数据,实时解算测点的三维坐标(X、Y、H),实现厘米级高精度定位。相较于传统静态GPS定位,RTK技术无需事后数据解算,可实时输出测量数据,定位精度平面 $\pm 1\text{cm}$ 、高程 $\pm 2\text{cm}$,完全满足水库地形测绘、控制点布设、设备校准的高精度要求。

2.2 无人机航空摄影测量。无人机航空摄影测量技术依托多旋翼无人机搭载高清可见光航摄相机,按照预设航线对库区岸上地形、岸线边界、周边地貌进行全覆盖连续拍摄,获取高分辨率影像数据。通过影像畸变校正、影像拼接、空三加密、三维建模等数据处理流程,生成库区正射影像图(DOM)、数字高程模型(DEM),精准还原库区岸上三维地形地貌。该技术具备机动灵活、作业速度快、覆盖范围广、无地形盲区的优势,可完美适配本水库陡峭岸坡、复杂山地的测绘场景。还可有效解决人工无法抵达区域的地形数据采集难题,高效获取库区岸上地形高程、岸线边界、地形起伏特征等核心数据,为水陆一体化地形建模提供岸上数据支撑。

2.3 无人船水下地形测量。无人船水下地形测量系统集成GPS-RTK定位模块、单波束测深仪、姿态传感器、数据传输模块,专门用于水库水下地形数据采集。作业时,无人船按照预设航线自主巡航航行,RTK模块实时获取船体精准三维坐标,测深仪通过超声波探测技术实时采集测点水深数据,姿态传感器实时修正船体颠簸、倾斜产生的测量误差,系统自动整合坐标、水深、姿态数据,解算出水下测点真实高程,生成水下地形点云数据。该技术可实现无人化、自动化水下作业,不受水深、水域地形限制,能够精准采集库区全域水下地形数据,规避人工涉水作业安全风险,解决传统测深方法效率低、测点稀疏、精度差的问题。

3 测量方案

本次测量采用“GPS-RTK统一基准+无人机岸上测绘+无人船水下测绘”的空水一体化协同模式,以GPS-RTK构建全域统一测绘坐标系,消除不同设备、不同区域的数据偏差;无人机负责库区陆地、岸坡、边界地形全覆盖采集,无人船负责水下全域地形密集采集,两类数据通过坐标匹配、无缝拼接,形成库区完整三维地形数据集。

3.1 准备工作。全面收集本水库工程可行性研究报告、设计图纸、原始库容曲线、历年水位观测数据、泥沙淤积监测资料、区域地形地貌及气象水文资料,梳理水库设计特征水位、库容参数、流域水文特征等基础信息,确保所有工程参数均符合本水库官方公示数据。结合库区地形特点、作业环境、测量精度要求,编制专项测量实施方案,明确设备参数、作业航线、测点密度、数据处理标准及精度控制指标。

基于喀什地区叶城县统一测绘基准,采用GPS-RTK技术布设库区二级平面控制网与高程控制网,选取库区周边视野开阔、无遮挡、稳固的位置布设8个永久控制点,确保控制点覆盖库区全域,无信号遮挡、无地形干扰。对所有控制点进行重复观测校准,平面定位精度控制在 $\pm 1\text{cm}$ 以内,高程精度控制在 $\pm 2\text{cm}$ 以内,为后续航测、水下测量、地形采集提供统一精准的坐标基准。同时,在库区岸线布设20个像控点,采用RTK精准测量三维坐标,用于无人机航测数据校正。

本次测量所用设备均经过计量校准,主要设备包括:多旋翼高精度航测无人机、智能无人测量船、GPS-RTK接收机、高清相机、单波束测深仪、数据处理工作站。作业前完成设备全面调试,校准无人机航摄参数、无人船测深精度、RTK差分信号稳定性,根据库区水域面积、地形起伏情况,设定无人机飞行高度120m、航线重叠度80%、旁向重叠度75%,无人船航行间距5m、测点采样间隔0.5s,确保数据采集密度满足高精度建模与库容计算要求。

3.2 无人机岸上地形数据采集。完成控制网布设与设备调试后,开展库区岸上全域无人机航测作业。作业选择天气晴朗、无风或微风、无沙尘的窗口期开展,规避风沙、逆光、阴影对影像质量的影响。无人机按照预设航线自动巡航拍摄,全覆盖采集库区陆地、岸坡、坝体、溢洪道周边及库区边界地形影像,重点捕捉陡峭岸坡、沟壑、台地等复杂地形区域,确保无拍摄盲区。航测作业完成后,将采集的影像数据导入专业测绘软件,结合RTK像控点数据,开展影像拼接、畸变校正、空三加密、纹理映射处理,生成库区DOM正射影像、高精度DEM数字高程模型,提取岸上地形高程数据、库区岸线边界矢量数据,完整还原库区陆地三维地形地貌。

3.3 无人船水下地形数据采集。水下地形测量作业前,通过RTK设备实时测量库区当前水位高程,作为水下地形高程计算的基准数据,消除水位波动对测量精度的影响。启动无人船测量系统,导入库区水域边界矢量数据,系统自动生成全覆盖航行航线,采用平行往复式航线作业模式,航线间距严格控制为5m,重点加密水库中心区域、淤积严重区域、深浅水交界区域的测点密度。无人船自主巡航过程中,实时采集水深数据、船体坐标、姿态数据,系统自动换算水下地形测点高程,同步存储数据,全程实现无人化自主作业,规避陡峭岸坡、深水区域的作业风险。作业完成后,剔除异常噪声数据,生成库区水下地形点云数据集。

3.4 GPS-RTK辅助精细化测量。在本次库容测量工作中,GPS-RTK技术贯穿于数据采集与精度控制的各个环节:一方面,它被用于布设库区首级控制网、标定无人机航测像控点、校准无人船作业定位,并采集岸上地形特征点,从而为全域测绘数据建

立统一且精准的坐标基准;在此基础上,针对无人机与无人船难以覆盖的水岸衔接带、小型沟槽及坝体周边细部地形等盲区,采用RTK进行人工补测,同时对库区重点地形突变区域、淤积典型区域和岸坡变形区域加密测点,确保全域地形数据连续完整、无遗漏无偏差;此外,还利用RTK技术对无人机航测DEM模型和无人船水下地形数据进行精度校验,通过随机抽取50个实测特征点进行比对校正,有效修正系统误差,最终实现水陆地形数据的精准衔接。

4 数据处理与库容曲线绘制

4.1多源数据预处理。本次测量获取无人机岸上地形DEM数据、无人船水下点云数据、RTK精细化补测数据三类数据,需开展统一预处理,消除系统误差、偶然误差与异常数据。一是点云数据去噪,通过统计滤波、半径滤波算法剔除无人船测量中的波浪扰动、设备抖动产生的异常点、噪声点;二是影像数据优化,校正无人机航测影像畸变、色差问题,提升地形建模精度;三是数据坐标统一,将所有地形数据统一转换为当地2000国家大地坐标系与1985国家高程基准,消除坐标系统偏差;四是水陆数据融合,通过岸线边界匹配、高程衔接校正,实现岸上地形与水下地形数据无缝拼接,构建库区完整三维地形数据集。

4.2库容精准计算方法。本文采用水利工程主流的水平分层法开展库容计算,该方法精度高、贴合工程应用标准,适配山区水库地形复杂的工况。结合本水库设计参数,确定计算水位区间为死水位2140m至校核洪水位2165m,按照1m高程间隔进行分层,逐层计算各高程对应的库区水域面积与分层库容,累计得到各水位对应的总库容。计算流程为:基于全域三维地形模型,提取各分层水位对应的水域边界轮廓,计算单层水域平均面积,采用梯形公式计算单层库容,逐层累加得到对应水位总库容,公式如下:

$$\Delta V_i = \frac{S_i + S_{i+1}}{2} \times \Delta H$$
$$V = \sum_{i=1}^n \Delta V_i$$

式中: ΔV_i 为第*i*层分层库容(m^3); S_i 、 S_{i+1} 分别为上下层水域面积(m^2); ΔH 为分层高程差(1m); V 为对应水位总库容(m^3)。

通过分层计算,精准获取2140m~2165m区间内每1m水位对应的水域面积、总库容数据,形成完整的水位-面积、水位-库容对应数据集,为曲线绘制提供精准数据支撑。

4.3库容曲线绘制与成果优化。基于预处理后的水位、面积、库容数据集,采用专业水利测绘软件绘制本水库高精度库容曲线,包含水位-库容曲线、水位-水域面积曲线两类核心成果。绘制过程中,通过数据平滑拟合处理,消除测点微小波动带来的曲线毛刺问题,保证曲线连续、平滑、贴合实际地形特征。同时,结合本水库历年运行淤积资料、设计参数,对曲线成果进行合理性校验,修正局部异常数据,确保曲线能够真实反映水库当前库容现状,精准体现库区泥沙淤积、地形变形带来的库容变化规律。最终生成的库容曲线可直接用于本水库水资源调度、防汛

管控、库容复核、工程效益评估等实际工作。

5 测量成果

为验证本次空水一体化测量成果的精准性,采用传统断面法与本次组合测量法进行对比校验,随机选取库区10个典型断面、50个高程测点开展精度比对。结果表明:本次测量地形高程最大偏差 $\leq \pm 0.2m$,远优于传统测量 $\pm 0.5m$ 的精度标准;库容计算相对误差 $\leq 1.2\%$,而传统断面法测算误差普遍在5%~8%,测量精度提升显著(见表1)。同时,本次测量实现库区100%全域覆盖,无数据盲区,相较于传统断面法仅能获取断面数据、存在大量地形盲区的缺陷,数据完整性、连续性大幅提升。通过与本水库最新工程复核数据比对,本次绘制的库容曲线能够精准反映水库实际库容状态,有效修正了原始设计曲线与实际工况的偏差,成果精度满足《水库库容曲线修测及特征值复核修正技术导则》规范要求。

表1 不同水位下库容计算成果对比表

水位高程(m)	设计批复库容(万 m^3)	一体化测量计算库容(万 m^3)	一体化测量相对误差(%)	断面法计算库容(万 m^3)	断面法相对误差(%)
2140(死水位)	124.5	123.12	-1.11	116.2	-6.67
2145	386.2	381.85	-1.13	360.5	-6.65
2150	742.8	734.26	-1.15	692.3	-6.8
2155	1186.5	1173.18	-1.12	1105.6	-6.82
2160	1702.3	1683.25	-1.12	1586.4	-6.81
2162(正常蓄水位)	1974.9	1952.78	-1.12	1841.5	-6.76
2165(校核洪水位)	2421.6	2394.52	-1.12	2258.3	-6.74
全库区平均	—	—	1.12	—	6.75

6 结束语

本次实测生成的本水库库容曲线成果,精准量化了水库现状库容参数与泥沙淤积分布特征,修正了原有老旧库容数据的偏差,为水库科学化、精细化运行管理提供核心数据支撑。在水资源调度方面,可依据精准库容数据优化乌鲁克河流域水资源配置,合理调控灌溉、供水、生态补水水量,提升水资源利用效率,助力叶城县落实最严格水资源管理制度;在防汛抗旱方面,精准的水位-库容对应关系可提升汛期洪水预报、调洪演算、防汛调度的准确性,降低流域洪涝灾害风险;在工程运维方面,可基于淤积分布数据制定针对性清淤方案,恢复水库有效库容,延长工程使用寿命;在生态保护方面,精准的库容与水文数据可保障下游河道生态流量稳定,维护乌鲁克河流域湿地、绿洲生态稳定,助力区域荒漠化防治生态功能区建设。

[参考文献]

[1]王天奕,徐奕蒙,刘海彪,等.无人船与无人机协同作业复核水库库容技术研究[J].人民长江,2025,56(S1):134-139.
[2]杨雪峰.无人机和无人船测绘技术在库容曲线计算中的应用[J].水科学与工程,2023(1):60-62.
[3]马军军,赵登锋,潘明轩.提孜那甫河莫莫克水利枢纽工程环境影响分析[J].西部探矿工程,2025,37(02):187-190.

作者简介:

朱清(1986—),男,汉族,湖北枣阳人,本科,工程师,研究方向为水利工程测绘。