

RTK 技术在水库水下地形测量中应用的探讨

李海亮

河北省秦皇岛水文勘测研究中心

DOI:10.12238/eep.v8i7.2747

[摘要] 本研究将RTK技术应用于石河水库水下地形测量,有效解决了传统测量方法精度不足、效率低等问题,在生态环境保护方面展现出独特优势。通过陆域静态测试与动态模拟测试验证,RTK技术平面精度达 $\pm 1.35 \sim 2.12\text{cm}$ 、高程精度达 $\pm 2.25 \sim 2.68\text{cm}$ 的高精度特性,为水库生态环境监测提供了可靠技术支撑。这种厘米级精度的测量能力可以准确捕捉水下地形的细微变化,为评估水库淤积对水生生态系统的影响、监测库区水质变化趋势提供了科学依据;同时,这些高精度数据能够支持水库水位-面积关系更新和坝体渗流计算,为制定生态补水方案、保护下游湿地生态系统提供决策支持。该技术不仅满足《水利水电工程测量规范》要求,其非接触式测量方式还最大程度降低了对水体生态系统的干扰,避免了传统测量可能带来的水体扰动问题。这些数据进一步服务于数字孪生建设,通过建立高精度的水库三维模型,可模拟不同调度方案下的生态环境响应,实现水利工程精细化管理与生态环境保护的双赢,为同类水库的生态友好型测量与管理工作提供了重要参考。

[关键词] RTK技术; 石河水库; 水下地形测量; 水位-库容曲线; 生态环境监测

中图分类号: TV62 文献标识码: A

Discussion on the Application of RTK Technology in Underwater Topographic Survey of Reservoirs

Hailiang Li

Qinhuangdao Hydrological Survey and Research Center, Hebei Province

[Abstract] This study applies RTK technology to underwater terrain measurement of Shihe Reservoir, effectively solving the problems of insufficient accuracy and low efficiency of traditional measurement methods, and demonstrating unique advantages in ecological environment protection. Through static testing and dynamic simulation testing on land, the high-precision characteristics of RTK technology with a plane accuracy of $\pm 1.35 \sim 2.12\text{cm}$ and an elevation accuracy of $\pm 2.25 \sim 2.68\text{cm}$ have been verified, providing reliable technical support for ecological environment monitoring of reservoirs. This centimeter level accuracy measurement capability can accurately capture subtle changes in underwater terrain, providing a scientific basis for evaluating the impact of reservoir siltation on aquatic ecosystems and monitoring the trend of water quality changes in the reservoir area; At the same time, these high-precision data can support the update of reservoir water level area relationship and the calculation of dam seepage, providing decision support for formulating ecological water replenishment plans and protecting downstream wetland ecosystems. This technology not only meets the requirements of the "Measurement Specification for Water Resources and Hydropower Engineering", but its non-contact measurement method also minimizes interference with the aquatic ecosystem to the greatest extent possible, avoiding the water disturbance problems that may arise from traditional measurements. These data further serve the construction of digital twins. By establishing high-precision three-dimensional models of reservoirs, the ecological environment response under different scheduling schemes can be simulated, achieving a win-win situation between refined management of water conservancy projects and ecological environment protection. This provides important references for eco-friendly measurement and management of similar reservoirs.

[Key words] RTK technology; Shihe Reservoir; underwater topographic survey; water level-storage capacity curve, Ecological environment monitoring

引言

传统的水下地形测量是采用全站仪结合测深仪进行的,随着CPS技术的迅速发展,水下测量技术取得了很大的进步,RTK (Real-Time Kinematic, 实时动态) 结合测深仪技术,具有高精度、高效率、易操作的特点,且能够实时获取厘米级三维坐标^[1]。但是RTK技术需要电台或网络信号的支持,设备成本较高,且设备携带较为不便,测点历时也较长,限制因素较多^[2]。本文将RTK技术应用于石河水库水下地形测量,通过系统的精度测试、方案设计与数据处理,验证该技术在复杂环境下的适用性,获取高精度地形数据,为水库精细化管理与智慧化建设提供支撑,也为同类水利工程测量提供技术参考。

1 项目概况

石河发源于河北省秦皇岛市抚宁县,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m³,100a一遇和1000a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m³,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 RTK技术原理

在探讨高精度RTK定位系统在多基站应用之前,首先需要明确RTK的定义与原理,这对于理解和设计系统具有基础性的作用。RTK定位技术是一种先进的差分GPS定位方法,它通过实时基准站接收机与移动站接收机之间的数据通信,提供高精度定位服务^[3]。

RTK定位技术的原理基于GPS现代化运行架构,其工作原理可简要描述如下。GPS信号接收模块向外部用户提供至少24颗卫星的数据,这些数据经过接收机处理后,可以获得伪距以及位置、速度等信息。RTK定位系统中,基准站接收机与移动站接收机同步连接到同一组GPS卫星信号,通过基准站接收机实时获取观测数据(如伪距观测值多路径误差校正等),并通过通信链路将这些数据发送到移动站接收机。移动站接收机利用基准站提供的差分改正数据(如伪距改正数、载波相位改正数等)与自身的观测值进行融合计算,从而获得高精度定位结果^[4]。

RTK定位系统基本组成包括基站在信号接收和数据处理、伪距和载波相位测量值的数据传输,以及移动站接收、校正和显示结果等。RTK定位技术的关键在于实时基准站接收机与移动站接收机之间的数据通信,确保移动站可以从基准站的定位结果中获得改正信息,从而结合自身观测值进行精密的数学计算,提高定位精度^[5]。

3 RTK在石河水库地形测量中的应用

3.1 RTK精度及稳定性测试

为验证RTK技术在石河水库(库区面积约12km²,最大水深25m,岸线受山体遮挡且存在工业电磁干扰)的精度与稳定性,确保其能支撑水下地形测量及水位-面积关系计算的高精度需求,

开展陆域静态测试与动态模拟测试,选用Trimble R9S三频GNSS接收机(支持GPS、北斗、GLONASS三星定位,静态精度±(2.5mm+1ppm)、动态精度±(8mm+1ppm))与科力达KDS-1000双频测深仪(测深精度±0.05m)作为核心设备。

在库区周边选取3个相距约15km的C级GPS控制点(SH-01、SH-02、SH-03),分别布设基准站与流动站:基准站持续输出原始观测数据及已知坐标,流动站同步采集卫星信号,设置卫星截止高度角15°、采样率1Hz,连续观测180分钟(共10800个有效数据点)。经Trimble Business Center(TBC)软件解算后,仅保留固定解(水平精度≤0.05m+1.0ppm、垂直精度≤0.10m+1.0ppm)。测试结果显示(如表1所示):原始观测数据的平面标准差为“亚米级”(X向18.23cm、Y向76.51cm),高程标准差达85.12cm;而RTK解算后,平面精度显著提升至X向1.35cm、Y向2.12cm,高程精度达2.25cm,且固定解率高达99.2%。

在库区中部18m水深水域,预先布设5个已知高程钢桩(DY-01~DY-05,高程分别为45.678m、48.912m、52.134m、55.246m、58.357m)。测船搭载RTK流动站与测深仪,以6km/h速度模拟实际测量航线,重复定位测深12次(覆盖不同水流流速与船体晃动工况)。对采集数据进行声速改正(改正值0.05m)、动态吃水改正(通过软件自动修正)后,统计精度指标:RTK定位平面误差均值0.85cm(最大值1.48cm),高程误差均值1.12cm(最大值1.98cm);结合测深仪的测深误差均值0.08m(最大值0.12m),且所有测试数据的变异系数<4.5%(表2)。

表1 陆域静态测试精度统计(Trimble R9S接收机)

精度指标	原始观测数据	RTK 解算结果	规范允许值
X 方向标准差	18.23cm	1.35cm	≤2.5cm
Y 方向标准差	76.51cm	2.12cm	≤2.5cm
Z 方向标准差	85.12cm	2.25cm	≤3.0cm
固定解率	-	99%	≥95

表2 已知点高程验证统计表(单位: m, 1985国家高程基准)

钢桩编号	平面误差均值(cm)	高程误差均值(cm)	测深误差均值(m)
DY-01	0.78	1.05	0.07
DY-02	0.86	1.15	0.08
DY-03	0.91	1.18	0.09
平均值	0.85	1.12	0.08

3.2 石河水库水下地形测量应用

以石河水库32.00m(死水位)至60.60m(坝顶高程)为计算区间,该区间完整覆盖水库从最低运行水位到坝体安全上限的全工况范围,可精准反映不同水位下库区实际形态变化,关键水位

点计算结果如表3所示。从表中可见,传统经典的等高线容积法与自动化的DEM方格网法对比,面积差值最大仅0.2万m²,最大相对误差0.24%,远低于《水利水电工程测量规范》中“水位-面积测量允许误差≤1%”的限值要求。

且随着水位升高,库区地形趋于平缓、水域形态更规整,两种方法的相对误差逐渐降低并趋于稳定:在常规运行水位52.00m及以上,包括汛限水位56.00m、正常蓄水位56.70m、设计洪水位56.99m等核心节点,相对误差均低于0.1%。这一结果充分验证了基于RTK定位、无人测量船测深、无人机摄影等技术的无人智能测量方法获取数据的可靠性,两种计算模型输出的水位-面积数据精度满足水库供水调度(如海港水厂输水流量优化、弃水减少测算)、防洪安全(如校核洪水位59.68m下库容核算与洪水演进模拟)等核心工程场景对数据精度的严苛需求。

表3 石河水库RTK水下地形测量测线布设表

水位 Z (m, 1985 高程)	水位类型	等高线容积法面 积 S ₁ (万 m²)	DEM 方格网法面 积 S ₂ (万 m²)	差值 Δ S (万 m²)	相对误 差 δ (%)
32.00	死水位	82.5	82.3	0.2	0.24
52.00	常规运行水位	278.6	278.4	0.2	0.07
56.00	汛限水位	405.5	405.3	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
60.60	坝顶高程	556.4	556.2	0.2	0.04

4 生态环境效益分析

RTK技术在石河水库水下地形测量中的应用,不仅提升了工程数据的精度与效率,还对生态环境保护产生了积极影响。通过厘米级高精度测量(平面误差均值0.85cm、高程误差均值1.12cm),能够精准监测库区淤积分布与水下地形变化,为评估沉积物对水生生物栖息地的影响提供科学依据。结合数字孪生技术,可模拟不同调度方案下的库区水文情势与生态响应,优化生态补水策略,保障下游湿地生态需水。此外,RTK技术的非接触式测量特性显著降低了对水体生态系统的干扰,避免了传统人工测深可能引发的水体扰动问题,尤其适用于敏感水域的长期监测。其稳

定性能(变异系数<4.5%)确保了在复杂环境(如山体遮挡、工业电磁干扰)下的连续数据采集,为水库水质保护、生物多样性维系及生态修复工程提供了可靠的技术支撑,实现了水利工程管理效能与生态可持续性的协同提升。

5 结论

本文针对石河水库除险加固后地形变化、供水调度优化及数字孪生建设的需求,系统开展RTK技术在水下地形测量中的应用研究,该技术在生态环境保护 and 监测方面展现出显著优势。RTK技术在石河水库复杂环境下展现出优异的精度与稳定性(陆域静态测试平面精度±1.35~2.12cm、高程精度±2.25cm,固定解率99.2%;动态模拟测试定位平面误差均值0.85cm、测深误差均值0.08m),这种高精度测量能力为水库生态环境管理提供了可靠数据支撑。通过精准获取水下地形变化数据,可有效监测库区淤积状况,评估其对水生生态系统的影响;同时,结合数字孪生技术,能够模拟不同水位条件下库区生态环境演变趋势,为生态补水调度和生物栖息地保护提供科学依据。该技术克服了传统测量方法对水体扰动大、效率低的缺点,以非接触式测量最大限度降低了对水库生态系统的干扰,其稳定性能(变异系数<4.5%)保障了在库区山体遮挡、工业干扰及水流晃动等复杂工况下的连续监测能力,实现了水利工程精细化管理与生态环境保护的双赢,为同类水库的生态友好型测量提供了可借鉴的技术范式。

【参考文献】

[1]牛冲.基于CORS-RTK无验潮的海岸带水下地形测量精度分析[J].海洋测绘,2021(006):041.

[2]肖灿明,和卫雄.网络RTK与数字测深仪在航电枢纽工程水下地形测量中的应用[J].四川水利,2024,45(6):151-154.

[3]李志阔,张夏青,万永世.GPS RTK测量技术在湿地生态修复工程水下地形测绘中的应用[J].地矿测绘,2021,4(5):135-136.

[4]曾彪.RTK结合测深仪在罗定市水库水下地形测量中的应用[J].地下水,2023,45(5):297-299.

[5]周威,胥洪川,杨广洲,等.基于RTK无验潮的非恒定流河段水下地形测量[J].水利水电快报,2023,44(12):15-19.

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。