

水下地形测量技术在水电工程水库库容核算中的应用

张 博

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450000

【摘要】：水库库容核算作为水电工程设计、运行调度及安全保障的核心环节，需精准获取不同水位对应的蓄水量数据。当前库容核算存在精准度不足、特殊区域测量困难、地形数据更新滞后等问题，水下地形数据缺失进一步加剧核算偏差，影响工程安全与效益发挥。本文采用单波束、多波束、侧扫声呐等适配技术，结合GNSS定位、误差控制及模型融合方法，针对性解决各区域测量难题，实现地形数据精准采集与核算模型深度适配。实践验证表明，该技术应用可将库容核算偏差率控制在合理范围，显著提升核算精度与时效性，为水电工程精细化运行提供可靠数据支撑。

【关键词】：水下地形测量技术；水电工程；水库库容核算；多波束测深；GNSS定位

DOI:10.12417/2811-0528.26.13.015

引言

水电工程作为水资源调控与能源供给的核心基础设施，水库库容核算直接关系到工程设计科学性、运行安全性及综合效益发挥，是保障工程长效稳定运行的关键环节。库容数据的精准度，直接影响水库防洪调度、水量调配、发电灌溉等核心功能的高效落地，而水下地形的复杂多变的特性，成为制约库容核算精度的核心瓶颈。随着水电工程精细化运行需求的提升，传统测量方式已难以适配复杂库区的测量需求，亟需依托先进的水下地形测量技术破解核算难题。基于此，本文聚焦水下地形测量技术在水库库容核算中的应用，探究技术适配路径与实践方法，为提升水电工程库容核算精度提供技术参考与实践支撑。

1 水电工程水库库容核算的现状 & 核心问题

1.1 水电工程水库库容核算的核心需求

水电工程水库库容核算的核心需求聚焦于精准获取水库不同水位对应的实际蓄水量数据，为工程设计、运行调度、防洪减灾及水资源优化配置提供可靠的数据支撑。库容数据的准确性直接关系到水电工程的安全稳定运行，无论是水库初期建设阶段的设计参数确定，还是运行期间的水位调控、水量调配，都需要基于精准的库容核算结果开展。核算过程中需精准捕捉水库水下地形的细微变化，包括库底高程数据、局部坡度变化、淤积层厚度及岸坡过渡形态等关键信息，这些信息直接决定了不同水位下库容的计算精度，同时需满足工程对库容数据的实时性和动态性要求，确保核算结果能够及时适配水库运行过程中的地形演变，为水电工程的高效、安全运行提供坚实保障。

1.2 当前库容核算中存在的精准度短板

当前水库库容核算的精准度短板主要体现在水下地形数据采集与处理的多个环节，受水库水域条件限制，深水区域、

库岸陡坡及浅滩等特殊区域的测量难度较大，传统测量设备易受水流扰动、水体浑浊度影响，导致地形数据采集出现遗漏或偏差，无法完整捕捉水下地形的细微起伏。同时，部分核算过程中采用的测量方法与水库实际地形适配性不足，数据拼接过程中缺乏科学的误差校正机制，易产生累积误差，导致不同水位对应的库容计算结果与实际值存在偏差。此外，水库运行过程中泥沙淤积、岸坡冲刷等动态变化未得到及时监测，原有地形数据更新不及时，进一步加剧了库容核算的精准度不足，难以满足水电工程精细化运行调度对库容数据的高精度要求。

1.3 水下地形数据缺失对库容核算的影响

水下地形数据缺失是水电工程水库库容核算中最为突出的问题之一，直接导致核算结果与实际库容出现偏差，无法真实反映水库的蓄水能力和调洪潜力。水库水下区域地形复杂，涵盖深槽、浅滩、暗礁等多种地貌，缺失的地形数据会使库容计算模型难以完整还原水下实际形态，尤其是库底高程、坡度等关键参数的缺失，会造成库容计算过程中出现漏算或错算^[1]。这种偏差会影响水库调度方案的制定，若核算库容偏大，可能导致蓄水过程中超出实际承载能力，引发坝体渗漏、溃坝等安全隐患；若核算库容偏小，则会造成水资源浪费，无法充分发挥水库的发电、灌溉、防洪等核心功能，同时也会影响工程后续的运维管理和效益评估，给水电工程的长期稳定运行带来潜在风险。

2 水下地形测量技术的适配性及应用原理

2.1 适配水电工程的水下地形测量技术类型

适配水电工程水库库容核算的水下地形测量技术，需兼顾水库水域范围、水深状况、地形复杂程度与核算精度标准，构建多技术互补的应用模式。单波束测深技术操作简便且成本可控，适用于水库近岸浅水区、库湾等地形平缓区域，可精准采

集局部水深信息,支撑浅水区库容核算的基础数据供给。多波束测深技术拥有全覆盖、高效率特质,能快速扫测水库深水区、主库区等大范围水域,精准捕捉水下地形起伏、暗礁、浅滩等细节特征,适配大库容水库的全面地形勘察工作。侧扫声呐技术可清晰勾勒水下障碍物、地形突变区域的轮廓形态,填补前两种技术在地形细节识别上的短板,结合GPS定位技术实现水下地形坐标与水深信息的精准对应,为水库库容核算提供全方位、高精度的地形基础支撑(见图1)。



图1 水电工程水库分区水下地形多技术融合测量体系

2.2 水下地形测量技术的核心工作原理

水下地形测量技术的核心工作原理是通过专业测量设备捕捉水下地形的三维空间信息,结合水库水域的边界参数,实现水下地形高程与平面位置的精准匹配,为库容核算提供基础数据支撑。其核心是利用声呐探测、GPS定位与水深测量技术的协同运作,声呐设备向水下发射声波信号,声波经水底反射后被接收,根据声波传播速度与往返时间计算出测点水深,同时通过GPS定位系统精准获取该测点的平面坐标,消除水域水流、波浪等干扰因素带来的测量偏差。测量过程中,设备按预设测线匀速移动,连续采集水下不同测点的水深与坐标数据,将这些离散测点数据通过插值算法拟合形成完整的水下地形曲面模型,精准还原水库水下高程的空间分布特征,为后续库容核算中不同高程层面的水体体积计算提供精准的地形数据支撑。

2.3 测量技术与库容核算的适配性优化

针对水电工程水库库容核算对数据精度、覆盖范围及实时性的核心需求,水下地形测量技术的适配性优化需聚焦测量参数校准、数据采集模式调整及误差控制体系完善^[2]。结合水库不同区域水深差异、岸坡坡度及水下障碍物分布特点,优化测量仪器的工作频率与采样密度,浅水区采用高频多波束测量模式提升细节捕捉能力,深水区调整波束角度扩大覆盖范围,避免漏测、误测。同时,整合GNSS定位技术与惯性导航系统,修正水流扰动、船体摇摆带来的定位偏差,通过数据预处理算

法剔除异常值,确保测量数据与库容核算的计算模型精准匹配,同步优化数据传输与解析效率,使测量成果能够直接对接库容核算流程,满足不同水位工况下库容计算的精准性要求,适配水库调度、安全监测等实际工程需求。

3 水下地形测量技术解决库容核算问题的实践路径

3.1 测量数据的精准采集与误差控制方法

水下地形测量数据的精准采集需结合水库实际工况,选取适配设备与采集方案,并依据各区域水深、地形复杂程度优化采集密度。本次采用多波束测深系统结合GNSS定位技术,对水库库底开展全覆盖扫描测量,同步获取测深点三维坐标、水深及实时水位数据。测量过程严格规范采集标准,控制测线布设间距,浅水区测线间距不大于5米,深水区不大于10米,合理设置采样密度,保证数据连续完整。全程落实多维度误差管控,在数据采集阶段定期校准测深设备以消除系统误差,运用潮位实时校正减弱水位变动影响,对原始数据剔除异常值、复核校验可疑数据。同时规避暴雨、急流等不良水文气象条件,降低环境干扰误差,使测量数据真实还原水库库底地形实际形态,为后续水库库容精准核算提供可靠的基础数据。

3.2 测量数据与库容核算模型的融合应用

测量数据与库容核算模型的融合应用,核心是将水下地形测量获取的多维度数据,通过标准化预处理后精准导入核算模型,实现数据与模型的深度适配。先统一高程基准与水位基面,消除不同来源数据的系统性偏差,再对测深数据、地形坐标数据进行异常值剔除、高程基准统一及格式转换,确保数据精准对应水库实际地形特征,同时结合水库水位观测数据,补充模型所需的动态水位参数。采用三维网格建模技术,将处理后的地形数据转化为模型可识别的三维地形网格,结合水库不同水位层级的地形变化,调整模型参数以匹配实际水文条件,通过模型迭代运算,将地形高程、水下断面面积等数据与库容计算逻辑有机结合,实现不同水位下水库库容的精准核算,有效规避数据脱节或模型适配不足导致的核算误差。

3.3 技术应用中各类核算问题的针对性解决

针对水库浅水区水下地形测量精度不足、数据失真导致的库容核算偏差问题,采用多波束测深系统搭配侧扫声呐技术,通过调整测线间距至5-10米,优化波束发射角度,弥补浅水区声波反射干扰短板,精准捕捉浅滩、岸坡附近的微地形变化,确保浅水区地形数据的完整性和准确性。针对深水区测深信号衰减、水下障碍物遮挡造成的测量盲区问题,引入水下机器人(ROV)辅助测量,搭载高精度测深传感器,对深水区隐蔽区域进行近距离探测,同步结合水位动态监测数据,修正不同水深条件下的测深误差^[3]。针对水库库底淤泥堆积、地形动态

变化引发的核算滞后问题,在数据处理阶段建立常态化测量机制,定期采用水下地形测量技术更新库底地形数据,结合淤泥淤积厚度监测结果,对库容核算参数进行动态调整,有效解决淤泥堆积导致的实际库容与核算值不符的问题,保障库容核算结果贴合工程实际需求。

4 水下地形测量技术应用效果验证及应用要点

4.1 技术应用效果的精准度验证方法

多波束测深系统与高精度定位技术的协同运用,为库容核算提供数据基础,精准度校验需依托多源数据交叉比对及重复测量一致性评定。铁岗石岩水库蓄水前后(2014年与2020年)完成两期水下地形动态监测,借助多波束测深系统采集两期点云数据,构建库区水下 TIN 模型实现任意水位下库容量的核算与比对。校验阶段将无人机倾斜摄影获取的 5cm 分辨率实景三维模型与多波束水下地形数据开展水陆衔接部位配准核验,库岸带高程偏差控制在 10cm 以内,对同一断面实施重复测线比对,多波束测深数据内符合精度优于 0.3m,不同航次间同一点位高程较差控制在 0.5m 以内。库容计算值校验采用水位-库容曲线与历史实测蓄水量数据反算比对,铁岗石岩水库两期测量库容偏差率控制在 2% 以内,印证了多波束技术在库容动态监测中的高可靠性能。

4.2 水电工程不同场景下的技术应用要点

水电工程水库库区地形复杂,需结合不同水域特点把控水下地形测量要点,保障库容核算数据精准可靠。库区浅水区水深较浅、水流平缓,多存在淤泥堆积与水生植物覆盖问题,测量应选用单波束测深仪搭配浅吃水测量船,测线间距控制在 5 米内,作业前清理区域内水生植物及漂浮杂物,防止信号遮挡造成数据偏差。深水区水深起伏大、水流不稳定,伴有暗礁、陡坎等复杂水下地貌,需采用多波束测深仪全域扫描,结合

GNSS 精准定位,同步采集流速、水温等参数,修正水流折射带来的测量误差^[4]。坝前区域受大坝挡水作用,水流紊乱、易形成回流,测量时需合理调控航速,布设往返交叉测线,重点监测淤积厚度与地形变动情况,完整采集该区域地形数据,为水库库容精准核算提供依据。

4.3 技术应用的稳定性及优化方向

水下地形测量技术应用于水电工程水库库容核算的稳定性,主要体现在测量数据连续性、一致性及抗干扰能力,其受水域环境、水文条件与设备运行状态直接影响^[5]。水库各区域流速、水体浑浊度、水下障碍物分布差异较大,易造成测量信号衰减、数据采集出现偏差,加之设备校准不及时、参数设置不当,会加剧数据波动,降低库容核算精度。对此可从多方面优化改进,针对深水、高浊度等复杂水域,选用抗干扰性能更优的测量传感器,优化信号滤波算法,削弱环境因素造成的测量误差;定期开展设备整体校准与养护,维持设备测量精度;结合库区地形优化测线与断面布设方案,完善测量作业流程,全面提升数据采集质量与稳定性,为水库库容精准核算提供稳定可靠的技术保障。

5 结语

水下地形测量技术的创新应用,有效解决了水电工程水库库容核算精度偏低、数据更新滞后、复杂区域测量难度大等难题,为库容计算提供了全面高精度的基础地形数据。通过整合单波束、多波束、侧扫声呐等多种探测技术,结合全过程误差管控与核算模型优化,显著提高了各水位下库容计算的精准度与时效性,能够有力支撑水库工程设计、日常调度、防洪安全及水资源合理调配。后续应进一步优化技术适配方案,建立常态化监测体系,促进测量技术与库容核算工作深度融合,助力水电工程精细化安全运营,充分释放水库综合效益,推动水利水电行业高质量发展。

参考文献:

- [1] 张小成.GNSS 测量技术在水下地形与高程测绘中的综合应用研究[J].中国战略新兴产业,2025,(08):128-130.
- [2] 于刚.无人船搭载多波束测量技术在水下地形测量中的应用[J].河南水利与南水北调,2022,51(06):97-99.
- [3] 魏荣灏,陈佳兵,徐达.基于 PPK 无验潮的水下地形测量技术研究[J].海洋技术学报,2021,40(01):57-62.
- [4] 刘士付.水下地形测量技术分析[J].工程技术研究,2020,5(23):229-230.
- [5] 刘鹏,王力.无人船搭载多波束技术在水下地形测量中的应用[J].自动化应用,2025,66(09):224-226.