

浅谈水下地形测量技术的发展与应用

朱 玘, 李 旭, 杨发伟

华能澜沧江水电股份有限公司漫湾水电厂, 云南 临沧

收稿日期: 2024年2月28日; 录用日期: 2024年3月24日; 发布日期: 2024年4月12日

摘 要

水下地形测量对于水利水电工程而言是非常重要的测绘工作之一, 在保障水库安全运行、水资源的合理开发等方面发挥着较大的作用。随着科技的发展, 水下地形测量技术取得了新的突破, 水下机器人、无人船等新兴设备也在逐步应用与普及中。本文阐述了水下地形测量技术的发展、运用情况及存在的问题, 为水下地形测绘技术的实际应用提供一定参考。

关键词

水下地形, 测量技术, 发展应用

Introduction to the Development and Application of Underwater Topographic Survey Technology

Qi Zhu, Xu Li, Fawei Yang

Manwan Hydropower Plant, Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Lincang Yunnan

Received: Feb. 28th, 2024; accepted: Mar. 24th, 2024; published: Apr. 12th, 2024

Abstract

Underwater topographic survey is one of the most important technologies and mapping work for water conservancy and hydropower projects, which plays a great role in ensuring the safe operation of reservoirs and the rational development of water resources. Actually, with the development of science and technology, underwater topographic survey technology has made new breakthroughs, underwater robots, unmanned ships and other emerging equipment are also gradually applied and popularized. This paper describes the development, utilization and problems of underwater topographic survey technology, which provides certain reference for the practical ap-

Application of underwater topographic mapping technology.

Keywords

Underwater Topography, Mapping Technology, Development and Application

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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. 引言

水下地形测量是指利用测绘手段,获取水下测点定位、水深及高程信息,以进一步绘制地形图或数字高程模型的工作[1]。目前,水下地形测量技术被广泛用于海洋、内陆河湖、水库库区等不同水域的开发利用及管理治理。在国家大力发展梯级电站的背景下,如何保证水利水电工程的安全运行和可持续发展,已成为一项重要课题。水利水电项目一般开展水下地形测量工作主要是为了测量水下泥沙的淤积形态。梯级水库筑坝拦沙产生的泥沙沉积问题为水利水电工程安全运营的重要问题及普遍问题之一[2],泥沙沉积会导致水库库容降低,防洪作用下降等问题,从而制约着水库的发挥效益及资源利用[3]。开展水下地形监测工作后,可以了解水库淤积规律和淤积物的分布状态。经水下地形和泥沙淤积形态测量分析后,选择合适的库容计算方法即可得到水下地形图和水位库容的关系曲线,据此,可结合实际情况,对水库的调度运行方式进行重新调整,在采取治理措施的同时,确保水库运行安全[3][4][5][6]。近年来,因传统的测量方法已难以满足复杂的水利工程项目,水下地形测量技术得到迅速发展,如何提高水下地形测量的精确性和效率性是当前该研究领域的研究热点。国外许多学者将研究聚焦于如何从各个环节提高水深测量的精度及效率上,如研究开发高精度的数据采集技术及水深开发模型[7][8][9]。此外,还有学者评估了不同插值算法在不同水域条件下水深测量中的适用性、可靠性和准确性[7][10][11]。国内学者则是聚焦于无人船,水下机器人等新兴定位设备与现代测量技术的结合和应用[12]。本文对目前水下地形的发展、运用现状及存在的问题进行总结分析,为水下地形测绘技术的实际应用提供一定参考。

2. 水下地形测量技术的发展与应用

2.1. 传统测量技术

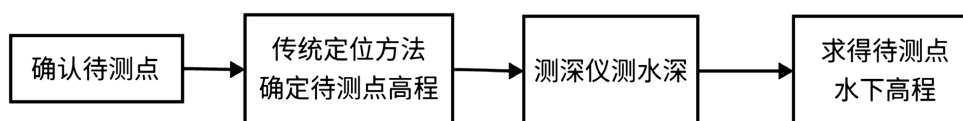


Figure 1. Brief measurement process of traditional measurement technology

图 1. 传统测量技术简要测量流程

水下地形测量主要分为实时定位及测量水下高程两项工作,如图 1 所示。传统的测量过程是根据设置在已知点上的角度仪进行测量:确定目标舰的平面位置后,在水下以高程求得高程值,再以静面高程、目标舰的水深高度则可得到实际水深[6]。传统定位方法即采用传统光学定位方法进行测量,主要分为前后方交会法和极距法,主要仪器包括经纬仪、测距仪、全站仪等。此方法虽与陆地上的测绘方法类似,具有操作简单等显著优势,但因其测站需定位在已知坐标点上,受距离限制明显。其中,最为传统的两

种水下高程测量方法是利用测深杆和测深锤进行测量，其原理为通过测深杆或测深锤测量水面高程后获得水深，进一步便可求得水下高程。但，由于该方法只能单点测量，工作效率上非常不理想，且测量精度还有待复核[13]。

2.2. 现代测量技术

2.2.1. 定位测量技术

目前水下地形测绘进行测量定位主要采用 GPS、GNSS 全球卫星定位系统，RTK 实时动态载波相位差分定位技术，CORS、PPK 态后处理定位技术。其中 RTK、GNSS、CORS 等精度高达厘米级。定位系统结合应用也成为当前发展趋势，如 GPS-RTK、GNSS-RTK 系统，其基本原理为：基准站利用数据链将所采集的观测数据传至流动站或移动站，流动站或移动站实时对数据进行差分处理后便可得到三维点的观测坐标。基于此，再结合水深测量技术获取水深深度，可实现水下地形图的绘制目标[14]。目前，CORS-RTK、GNS-PPK 技术已多次被运用到在国内水下地形的测量中[15]-[20]。

2.2.2. 水深测量技术

回声探测技术是水深测量技术的最主要测量方法。主要包括单波束测量、多波束测量技术。单波束测量技术最早于 20 世纪 20 年代出现，可进行一系列连续的水下点非单点测量。但在实际应用中，难以实现测量区域的全覆盖，容易产生地形信息遗漏。基于上述问题，多波束测深技术于 20 世纪 60 年代开始出现，它以带状的方式进行测量，实现了“由线到面”的作业方式，克服了单波束测深难以实现全覆盖的缺点，是水下地形测量技术的重要突破[21] [22]。另外，水体中的含盐量、水压都与深度测量密切相关，测量深度一般是采用音速的测量方法，该测量方法会对测量深度产生一定的必要误差。有学者提出如果采用单光束深度法测深，则需要用已知的水深高比来修订作业现场的实测音速值以提高其精确度；若采用多波束测深法测深，音速曲线测量的精确度追踪则需要通过声线潜航法来实现[23]。

事实上，定位方法的快速发展在一定程度上也促进着回声测量技术(单束波、多束波测量技术)的发展[24]，研究表明，定位技术已与回声测量技术实现了高度融合，且得到了相应的应用，如：商建伟将基于 GNSS 的单波束测深系统应用于山东省东平湖水下地形测量中[25]；李宇辉结合多波束测深仪，将 GNSS 应用于多波束测深系统中扫描水底，实现三维模型的构建，并将其成功用于常规航道的测绘工作[26]；雷利元等人将 GNSS 与多波束测深系统成功应用于大连市某海域的海底地形测量[27]。

2.2.3. 新型设备的结合测量技术

为进一步消除作业人员需要进行水下作业而会产生的安全隐患，减少人工难以测量的位置导致的测量误差，提高测量效率，越来越多的研究及实际应用将无人船、水域机器人等新型设备与水下地形的测量系统相结合。如图 2 所示。

如结合定位系统及测深仪用无人遥控船搭载现场测量设备可实现水库淤积自动化测量，其中将 GNSS-RTK、GPS 定位系统、单波束或多波束测深仪与无人船结合应用的测量技术方法在实际中被广泛使用，目前无人船已经过十多年的技术积累发展到较为成熟的阶段，具有轻便、高效、航行稳定等优点[28]。经多年应用证明，利用无人驾驶船舶水下测量技术获取水下地形数据的精确度，可满足测绘人员在复杂水域条件下，大幅度降低劳动强度的大比例尺地形图水下地形测量精度要求，使外业测量效率成倍提高，同时还能够避免外业人员水上作业的危险[29]。当然，无人船测量存在一些问题，未来需进一步研究解决：一、其抗流水能力较弱，面对涌浪、回旋水等情况会影响其测量的状态及计划的线路，影响测量的精度；二、测量数据易受水环境中的漂浮物、杂物等干扰，在面对这些较为棘手的情况下往往无法准确、真实反映实际的水下地形；三、设备如何全自动化运行还需进一步深入研究[29]。

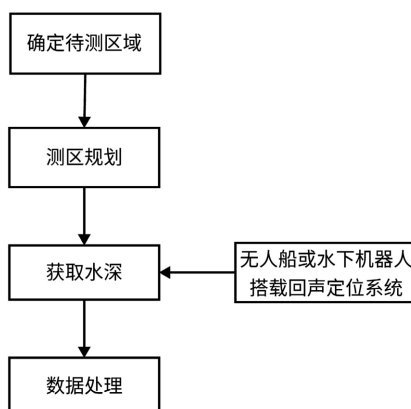


Figure 2. Brief process of combining new equipment with measurement technology

图 2. 新型设备结合测量技术简要流程

除无人船以外，水下机器人的应用也较为广泛。过去，水下机器人在大坝检测、水下勘探、航道安全监测等方面应用较为频繁[30] [31]。不过，随着水下机器人的发展，现在已经可以作为探测地下地形地貌的一个重要工具，如李维平等人开发的基于水域机器人的水下地形测量系统[28]。目前水下机器人在应用上也存在着一些问题，主要有两点：一是水下机器人要实现定位系统的搭载需要去搭载无人驾驶的船只，所以要保证设备的兼容性；二是水下机器人的维护，从技术上来说，难度更大，成本也更高，对后续设备的维护也有着更高的要求 and 标准。

也有学者尝试将多元的技术手段相互融合以实现水下地形测量，并已取得良好的应用效果。如陆平[12]提出基于 CORS 定位系统，综合利用互联网、数据通信等技术，采用无人船与多波束系统，分高度、分区域进行测量的方法，其中 0~5 m 利用无人船测量，5 m 以上深水用多波束测深仪进行。同时与无人航测技术相结合，滩涂和河岸线就以无人机航摄进行数据获取，这样即可迅速获得水上和水下的三维点云数据。以这种方式，可以充分发挥无人船及多波束测深仪的优势及特点，可实现覆盖全面、消灭盲区、有效解决浅水和沼泽区难度大、精度差等困难。当然，无人船测量存在一些问题，未来需进一步研究解决：一、其抗流水能力较弱，面对涌浪、回旋水等情况会影响其测量的状态及计划的线路，影响测量的精度；二、测量数据易受水环境中的漂浮物、杂物等干扰，在面对这些较为棘手的情况下往往无法准确、真实反映实际的水下地形；三、设备如何全自动化运行还需进一步深入研究[32]。

3. 结语

水下地形正处于高速向数字化、智能化发展的阶段，目前除了在水下地貌调查、地质勘探、河道治理等方面可以实际应用外也可应用于水环境污染监测预警[33]等领域，未来应用前景极其广阔。文章结合实际探讨了几种常见且可以被广泛使用的测量方法，为不同生产需求提供了水下测量的有益参考。

参考文献

- [1] 杨雪飞. 水下地形测量的集成技术及应用[J]. 民营科技, 2016(2): 22.
- [2] 李浩. 水库淤积形态测量方法与工程应用研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2020.
- [3] 程启亮, 张蕾. 漳泽水库水下地形测量以及库容曲线分析[J]. 山西水土保持科技, 2021(2): 34-37.
- [4] 徐祎凡, 栾震宇, 陈炼钢, 等. 基于实测水下地形数据的澄通河段冲淤时空分布特征[J]. 江苏水利, 2020(12): 35-38.
- [5] 陈中汉, 江能. 水利工程测量技术的发展与应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2014(21): 4816.

- [6] 王硕. 河道测量数据采集与处理技术研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2018.
- [7] Li, Z., Peng, Z., Zhang, Z., *et al.* (2023) Exploring Modern Bathymetry: A Comprehensive Review of Data Acquisition Devices, Model Accuracy, and Interpolation Techniques for Enhanced Underwater Mapping. *Frontiers in Marine Science*, **10**, Article ID: 1178845. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1178845>
- [8] Kim, S.S. and Wessel, P. (2016) New Analytic Solutions for Modeling Vertical Gravity Gradient Anomalies. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **17**, 1915-1924. <https://doi.org/10.1002/2016GC006263>
- [9] Neumann, T., Brenner, A., Hancock, D., Robbins, J., Saba, J., Harbeck, K., *et al.* (2020) Atlas/Icesat-2 L2a Global Geolocated Photon Data, Version 3. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Boulder.
- [10] Drouin, A. and Saint-Laurent, D. (2010). Comparison of Interpolation Methods Toproduce High Precision Digital Elevation Models (DEM) for the Representation of Floodplain Micro-Topography. *Hydrological Sciences Journal*, **55**, 526-539. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.481088>
- [11] Zhang, J.M. (2013). Research on DEM Interpolation Algorithm Adaptability with Local Terrain Features. 2013 21st International Conference on Geoinformatics, Kaifeng, 20-22 June 2013, 1-8. <https://doi.org/10.1109/Geoinformatics.2013.6626194>
- [12] 陆平. 基于多元技术手段的大中型水库水下地形测量方法研究[J]. 测绘标准化, 2020, 36(3): 36-39.
- [13] 廖伟杰. 水利工程测量技术的发展与应用[J]. 四川水泥, 2019(6): 155.
- [14] 甄龙, 付江缺, 欧阳亚, 等. GNSS-RTK 与数字测深集成系统在电力工程水下地形测量中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(12): 133-135.
- [15] 杨娟娟. CORS-RTK 与测深仪联合作业在水下地形数据采集中的应用探究[J]. 科技创新与应用, 2017(17): 192.
- [16] 赵保成, 肖潇, 徐健, 等. GNSS-PPK 技术在山区水库水下地形测量中的应用[J]. 人民黄河, 2021, 43(S1): 176-178.
- [17] 郑伟, 李炜. GPS-RTK 三维水下地形测量的应用与误差分析[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(7): 42-45.
- [18] 夏龙. GPS-RTK 技术在水库水下地形测量中的应用[J]. 价值工程, 2013, 32(35): 212-213.
- [19] 张芳. GPS-RTK 三维水下地形测量的应用[J]. 江西建材, 2016(23): 209, 214.
- [20] 甄龙, 付江缺, 欧阳亚, 等. GNSS-RTK 与数字测深集成系统在电力工程水下地形测量中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(12): 133-135.
- [21] 丁玉江, 付兆明, 李云, 等. 多波束测深技术在漫湾电站水库安全管理中的运用[C]//水电 2013 大会——中国大坝协会 2013 学术年会暨第三届堆石坝国际研讨会. 中国大坝协会 2013 学术年会暨第三届堆石坝国际研讨会论文集: 2013 年卷. 北京: 中国水力发电工程学会, 2013: 194-201.
- [22] 饶光勇, 陈俊彪. 多波束测深系统和侧扫声呐系统在堤围险段水下地形变化监测中的应用[J]. 广东水利水电, 2014(6): 69-72.
- [23] 史磊. 单波束测深系统与浅水多波束测深系统在水下地形测量中的对比分析[J]. 黑龙江水利科技, 2018, 46(5): 32-34.
- [24] 刘经南, 赵建虎. 多波束测深系统的现状和发展趋势[J]. 海洋测绘, 2002, 22(5): 3-6.
- [25] 商建伟. 基于 GNSS 的单波束测深系统在大中型水库水下地形测量中的应用[J]. 山东国土资源, 2022, 38(1): 65-69.
- [26] 李宇辉. 航道测绘中多波束测深仪的应用分析[J]. 江西测绘, 2021(4): 12-14+60.
- [27] 雷利元, 于旭光, 胡超魁, 等. 基于 GNSS 的多波束测深系统在海底地形测量中的应用[J]. 城市勘测, 2020(1): 167-169.
- [28] 郭新国. 无人船在水下地形测量中的应用与探讨[J]. 科技创新导报, 2018, 15(6): 42+44.
- [29] 高艳. 无人船在水下地形测量中的应用与探讨[J]. 城市勘测, 2019(4): 173-175, 179.
- [30] 何亮, 马琨, 李端有. 多波束联合水下机器人在大坝水下检查中的应用[J]. 大坝与安全, 2019(5): 46-51.
- [31] 张阳, 陈晨, 张一, 等. 水下机器人航道安全检测应用设计[J]. 人民长江, 2019, 50(6): 1-5.
- [32] 李维平, 方忠旺. 基于水域机器人的水下地形测量系统研究与应用[J]. 北京测绘, 2019, 33(9): 1098-1101.
- [33] 陈娜日苏. 基于水下地形的突发性地下水污染事件应急监测方法研究[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(5): 93-98.