

复杂水域下无人船测深系统的测深精度评价方法及分析研究

王正洋^{*#}, 李梦博, 柳 青

长江水利委员会水文局汉江水文水资源勘测局, 湖北 襄阳

收稿日期: 2025年10月28日; 录用日期: 2025年12月3日; 发布日期: 2025年12月11日

摘 要

本文介绍无人船测深系统工作原理及华微3号无人船测深系统, 研究无人船测深系统在水下地形测量中的应用, 应用检查线法和重合断面法评价系统的测深内符合精度, 应用重合断面法和DEM栅格运算对比分析评价该系统的测深外符合精度, 通过比测分析两套测深系统存在测深差异的原因, 为无人船测深系统在复杂水域的河道水下地形测量应用提供了一定的研究基础。

关键词

无人船测深系统, 水下地形测量, 精度评价, 测深差异

Research on the Evaluation Method and Analysis of Bathymetric Accuracy for Unmanned Surface Vehicles in Complex Waters

Zhengyang Wang^{*#}, Mengbo Li, Qing Liu

Hanjiang Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology of Changjiang Water Resources Commission, Xiangyang Hubei

Received: October 28, 2025; accepted: December 3, 2025; published: December 11, 2025

^{*}第一作者。

[#]通讯作者。

Abstract

This article introduces the working principle of the unmanned surface vessel (USV) bathymetric system and the Huawei 3 USV bathymetric system. It explores the application of the USV bathymetric system in underwater topographic surveying, evaluates the internal depth measurement consistency of the system using the check line method and the overlapping profile method, and assesses the external depth measurement consistency through the overlapping profile method and DEM raster operations. By conducting comparative analysis, the reasons for depth measurement discrepancies between the two bathymetric systems are examined, providing a research foundation for the application of USV bathymetric systems in underwater topographic surveys of river channels in complex waters.

Keywords

Unmanned Surface Vessel (USV) Bathymetric System, Underwater Topographic Survey, Accuracy Evaluation, Depth Measurement Discrepancy

Copyright © 2025 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

水下地形测量是水文泥沙观测的重点工作，现阶段常采用多模式的协同作业方式进行水下地形测量，在大水深区域采用 GNSS-RTK 与单波束测深仪的自动化测量系统，或者采用集成度较高的多波束测量系统进行水下地形数据的获取[1]-[3]。在人类活动频繁、水流复杂的河段，受宽浅河道、零星分布的封闭水域等复杂地形条件限制，给河道的水陆一体化测量技术带来了巨大的困难。经常针对复杂的水域单独进行 RTK 涉水测量，不仅存在极大的安全风险，还不能够保证连续的河床地形获取精度[4] [5]。

无人船测深系统为复杂区域的水下地形测量提供了解决方案，国内外在无人船近海水深测量领域的研究相对较少，实践应用较多[6] [7]。利用该平台搭载 GNSS 定位系统、测深仪、摄像头等多种设备，可实现无人工干预的自动化航行和数据采集，能够有效提高作业效率，减少测量作业人员的涉水风险，是目前人工水下地形测量的有效补充手段，随着无人船智能化的发展也必将成为水下地形测量的重要技术方法。本文主要介绍华微 3 号无人船测深系统的应用流程，研究不同的无人船测深系统精度评价方法，探讨无人船测深系统的内符合精度和相对常规单波束测深系统外符合精度及分析，为无人船测深系统应用于水下地形测量提供一定的参考依据。

2. 无人船测深系统技术实施

2.1. 无人船测深系统作业原理

无人船测深系统以无人船为载体，集成 GNSS、水深测深仪、姿态传感器，以及 CCD 相机等多种高精度传感设备，通过岸基系统接收并处理所采集的数据。由换能器向水中垂直发射具有一定空间指向性的短脉冲声波(波束)，声波遇到水底后，发生散射、透射和折射。反射的回波被换能器接收，同时会保存在模拟记录仪器和数字记录介质中。通过换能器发射和接收到回波的时间间隔 T 与声波在水体中的传播平均速度 V ，即可计算出声波的单程距离 H_r ，加上船的吃水深度 H_d ，可得水深值，如图 1。根据 GPS-RTK 测量值，考虑船体姿态修改参数 ΔH_z ，GNSS 顶端到换能器的高差 H_3 ，即可得到水面的高程。

2.2. 华微 3 号无人船测深系统简介

华微 3 号无人船硬件系统主要由 GNSS 天线、D230 单波速换能器、GD100 主控系统、声呐避障设备、摄像头及其他数据连接天线组成[8]，见图 2。

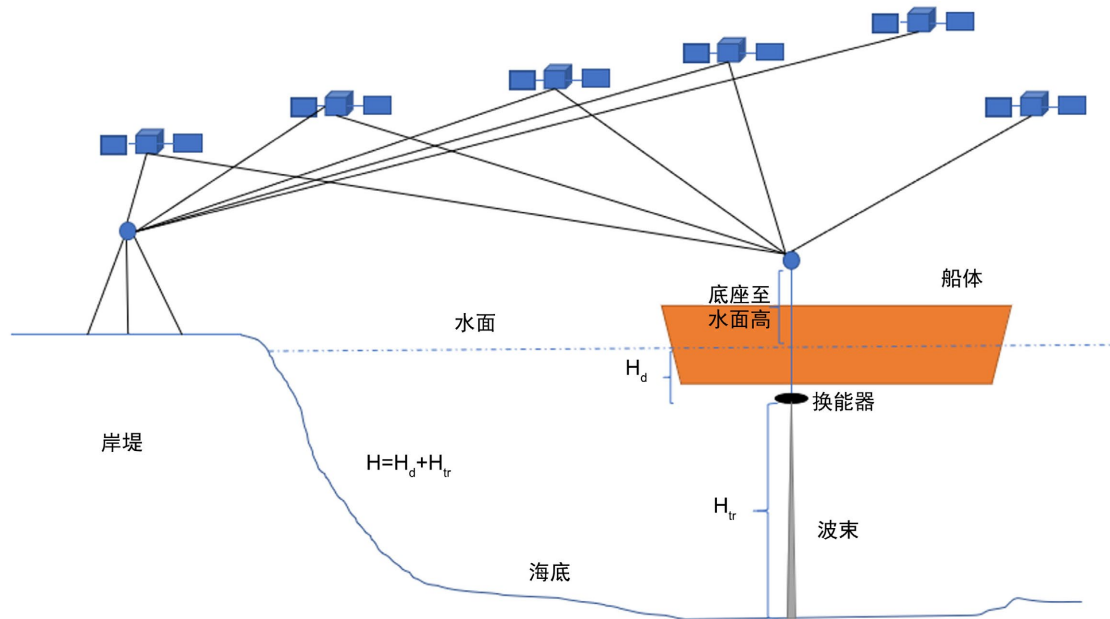


Figure 1. Schematic diagram of unmanned ship underwater terrain measurement principle
图 1. 无人船水下地形测量原理示意图

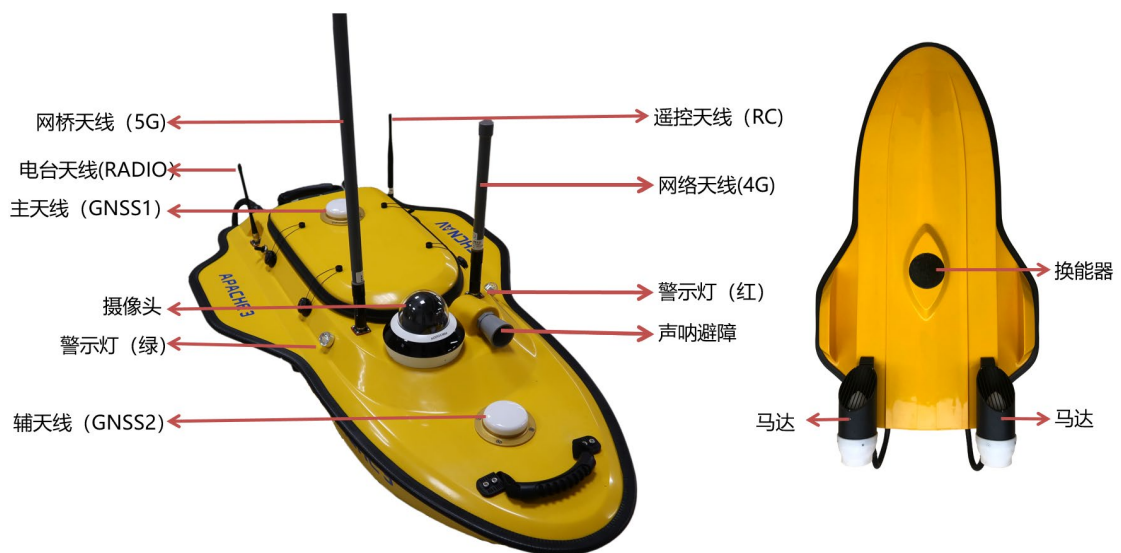


Figure 2. Hardware schematic diagram of the depth measurement system of the Huawei 3 unmanned ship
图 2. 华微 3 号无人船测深系统硬件示意图

无人船软件系统由 AutoPlanner 软件(以下简称 AP 软件)和 HydroSurvey (以下简称 HS 软件)软件组成。AutoPlanner 软件为无人船控制软件,可以控制无人船的摄像头、声呐、自动航行等功能。HydroSurvey 软件为数据采集与处理软件。

2.3. 华微 3 号无人船测深系统作业流程(如图 3)

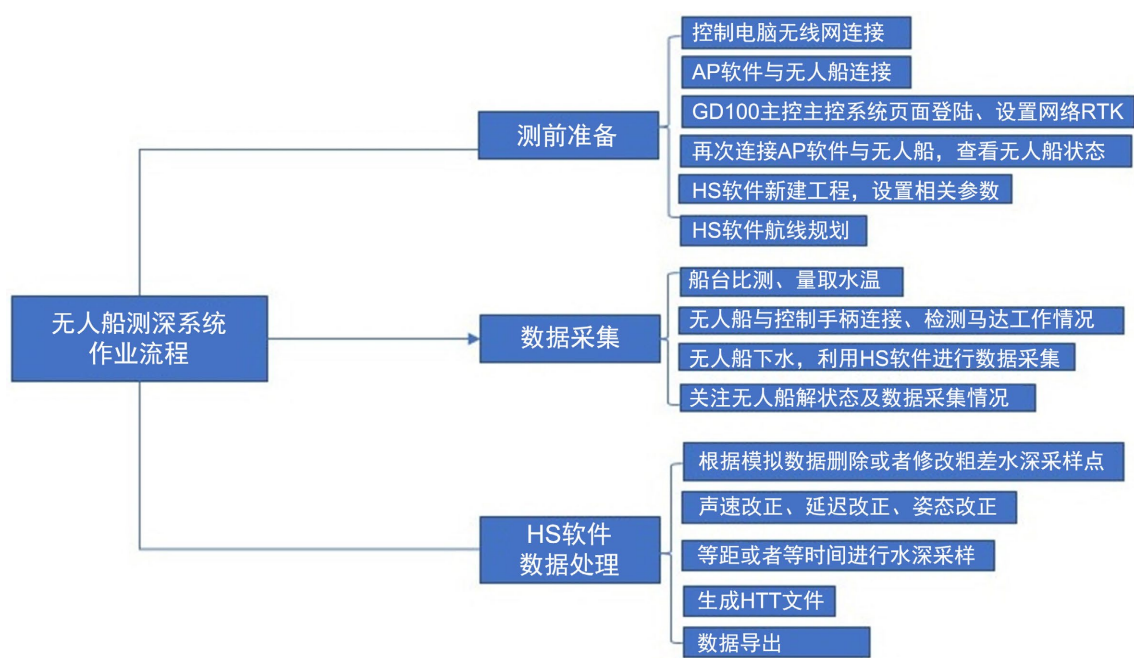


Figure 3. Operating process of the depth measurement system on the Huawei 3 unmanned ship
图 3. 华微 3 号无人船测深系统作业流程

3. 无人船测深精度评价的研究及分析

3.1. 基于缓冲区匹配重合点较差的评价方法及分析

选取某水库库区部分大型测量船无法到达的库尾、浅水、封闭水域以及电站下游等复杂水域，利用无人船测深系统进行比测研究。比测采用的仪器设备均经过鉴定，参数见表 1。

Table 1. Statistical table of parameters using depth measurement system
表 1. 采用测深系统参数统计表

参数 \ 仪器	HY1601 测深仪	HY1603 测深仪	华微 3 号测深系统
工作频率	208 K	208 KHZ	200 KHZ
输出功率	200 W	200 W	350 W
采集增益	高频自动增益	高频自动增益	高频自动增益
测量范围	0.3 m~300 m	0.3 m~300 m	0.3 m~300 m
测量精度	1 cm ± 0.1% h (测深)	1 cm ± 0.1% h (测深)	1 cm ± 0.1% h (测深)

根据复杂水域特点制定水下地形测量计划线，对每个有条件的复杂水域采集横断面线以及纵断面检查线，根据无人船测深系统获取的测点数据。基于 GIS 技术，将无人船测深系统获取的测点数据转换为地理空间数据，采用空间分析功能能够快速统计横断面线的测点数据与纵断面检查线上的测点水深较差，仅统计能够满足 2 m 以内的重合点较差。根据表 2 可知，无人船测量系统测深数据与检查线数据内符合精度能够满足 SL257-2017 规范的要求。

Table 2. Statistical table of differences between inspection lines within 1 mm and main measurement points or contour lines on the diagram

表 2. 图上 1mm 内检查线与主测点或等高线较差统计表

统计项	图上 1 mm 内与主测点或等高线较差(m)				总点数	最大差值(m)	中误差(m)
	0.0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	大于 0.3			
点数	133	105	58	0	296	0.28	±0.15
所占百分比	44.9	35.5	19.6	0			

3.2. 基于重合断面比较的评价方法及分析

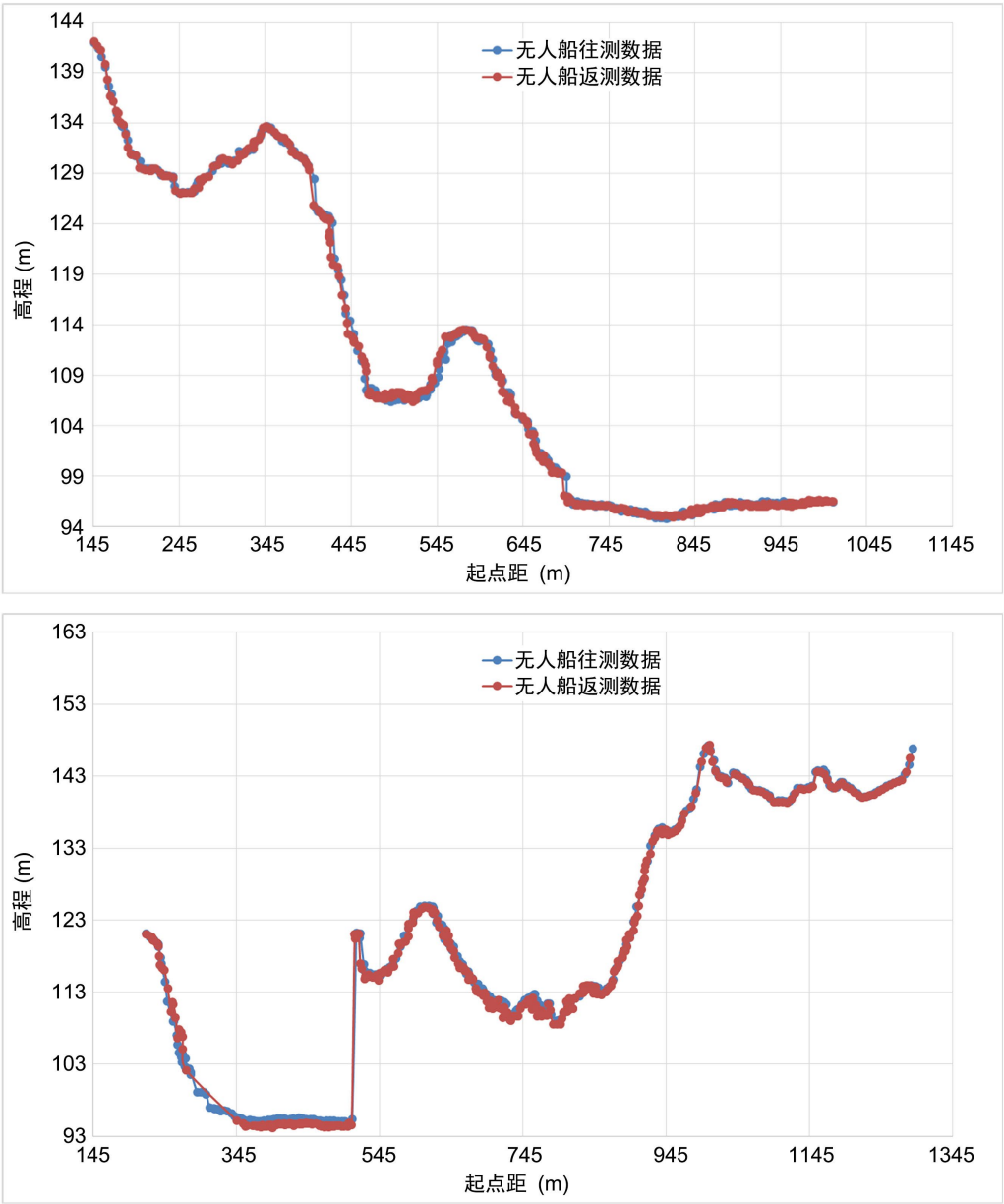


Figure 4. Comparison of poor underwater overlap cross-section of unmanned ship measurement system
图 4. 无人船测量系统水下重合断面较差对比图

选择某水库坝区的水流复杂深水区域，设定了重合断面来检验无人船测量系统的内符合精度。如图 4 所示，无人船重合断面吻合较好，在 50~60 米的深水区域个别点最大互差小于 0.3 米，设定的 8 个重合断面面积最大较差 3.9‰，最小仅为 0.8‰。

经以上分析无人船的内符合精度满足河道测量的要求。为进一步验证无人船测深系统的适用性，利用重合断面面积较差法，对比无人船测深系统与海鹰 1601 测深系统重合断面数据，验证无人船测深系统外符合精度。

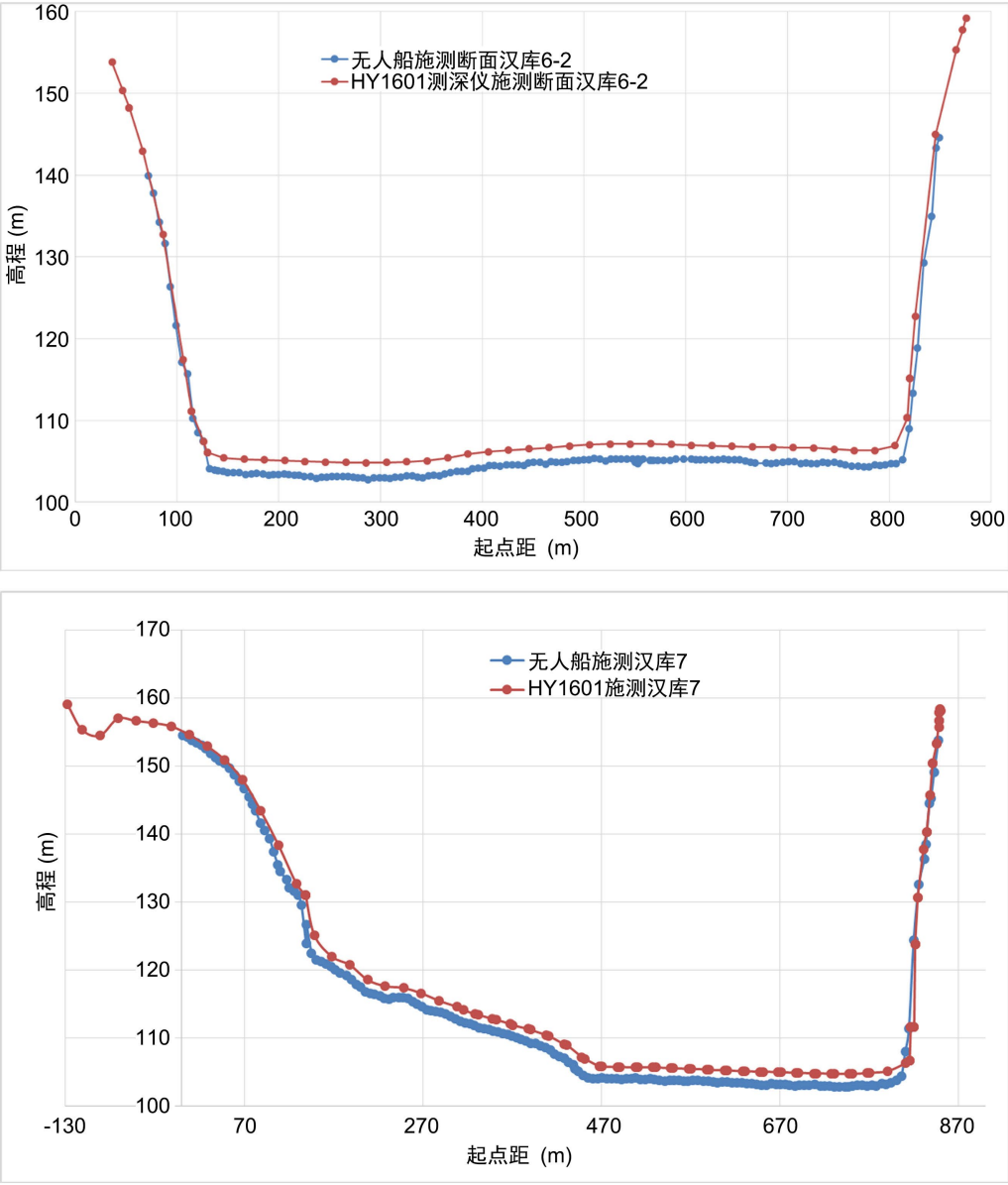


Figure 5. Schematic diagram of comparative analysis of overlapping sections between unmanned ship measurement system and sea eagle depth measurement system

图 5. 无人船测量系统与海鹰测深系统重合断面对比分析示意图

由图 5 可知，第一幅图中红色线代表的无人船测量系统比蓝色线代表的 HY1601 测量系统测得的 50~60 米水深值，测深接近 1.5~2 米；第二幅图中红色线代表的无人船测深系统比蓝色线代表的 HY1601

测量系统在 50~60 米的水深时同样测深近 1.5~2 米。面积较差超过测量要求限制。

3.3. 基于地形格网差异值分布的评价方法及分析

为了避免个例断面数据样本较少,而产生错误判断,在某库区 1:500 坝上地形测量中,利用无人船测量 80% 地形数据,利用 HY1603 测量全部地形数据,利用 HY1603 数据生成 DEM 模型,采用 0.2 米格网,利用无人船测量数据提取相同平面位置河底高程,进行分析。

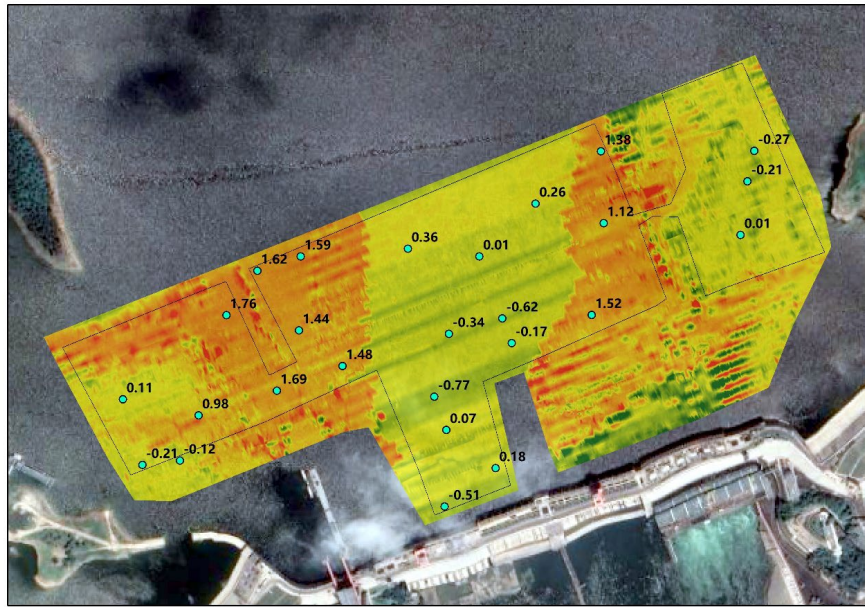


Figure 6. Schematic diagram of DEM difference extracted from HY1603 data by MiG network 0.2
图 6. 0.2 米格网提取 HY1603 数据 DEM 差值示意图

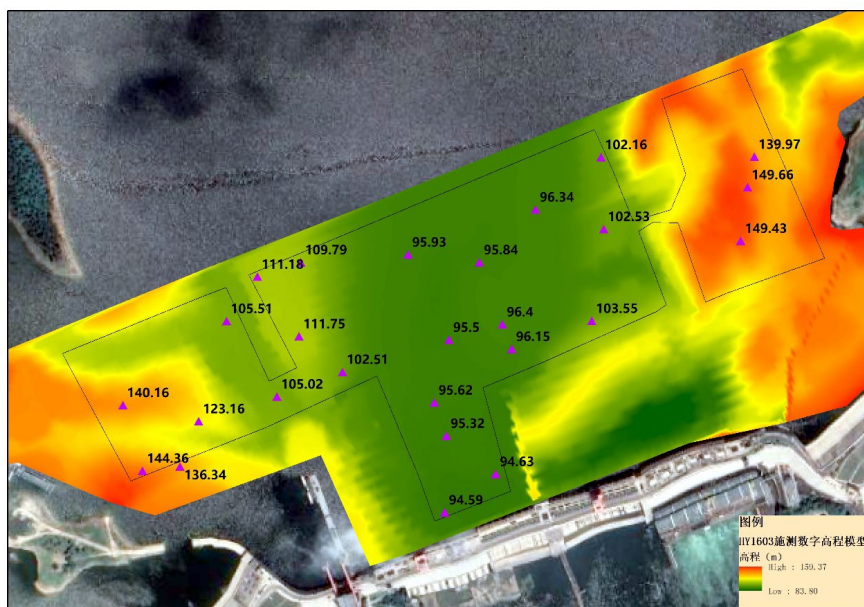


Figure 7. Schematic diagram of riverbed elevation at the same location in DEM model
图 7. DEM 模型相同位置点位河底高程示意图

由图 6、图 7 可得：(1) 排除线框外因 DEM 差值引起较大差值的区域，线框内 DEM 差值有大有小，分布不均匀；(2) 在主洪河道上以及浅水区域两套测深系统差值较小，在主洪两边深水区差值较大。

3.4. 测深差异评价方法及分析

回声测深仪利用回声测距原理测量深度，换能器向水底垂直发射声波脉冲，声波传播到水底就会发生反射，进而回到换能器，测定换能器从发射声波至接收到水底发射回波所用的时间，就可以计算出水深。回声测深仪的主要性能指标与其工作频率、波束角等参数有着密切的关系[9]。本文实验所采用的测深系统都经过 100 米水深的仪器检定，波束角都在最适宜的状态，两套系统的换能器工作频率不同。

根据测深仪测深原理，其在实际使用过程中存在的问题可以分为三大类，包括测量误差、外界影响、操作使用影响。其中测量误差主要包括声速、时间、零位误差等，测量前声速设置一致，而零位误差为系统误差可以通过鉴定及测前比测排除，时间延时可能造成测量误差；外界影响包括水中气泡、水底底质、水底坡度等影响；操作使用技术成熟，且测前水深比测基本可以排除操作误差[10]。

为了找出两套测深系统测深误差原因，在某大坝坝前以及坝区平坦区域分别进行静态水深比测，排除运动状态下气泡、水底坡度、不当操作等误差因素后，观察水深测量精度。

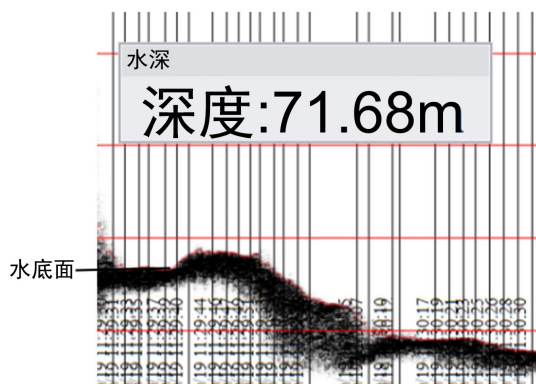


Figure 8. Schematic diagram of echo lines on hard underwater surfaces

图 8. 硬质水底回声线示意图

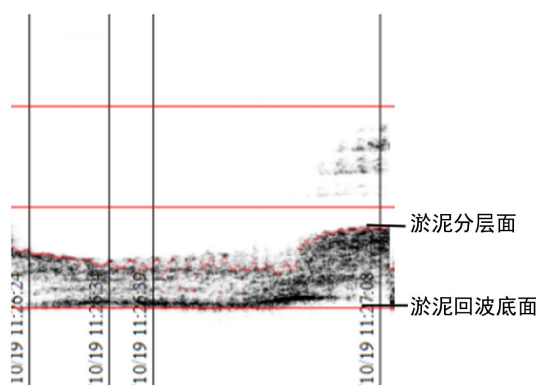


Figure 9. Schematic diagram of layered underwater echo lines

图 9. 分层水底回声线示意图

首先选择坝区水泥、石头或者稳定冲刷区等硬质底面平坦区域静态比测。经对比，当水底底质较硬，回声线较密实如图 8，即比测数据见表 3：

Table 3. Statistical table of static depth measurement comparison data of two sets of depth sounding systems on hard water bottom**表 3.** 硬质水底两套测深系统静态测深比测数据统计表

序号	仪器	HY1601 测深(m)	华微 3 号测深(m)	差值(m)
1		25.43	25.46	-0.03
2		39.88	39.85	0.03
3		55.37	55.41	-0.04
4		71.68	71.62	0.06

选择坝区淤泥底质、平坦区域静态比测，水底回声线较散如图 9，即河底有淤泥分层时比测数据见表 4:

Table 4. Statistical table of static depth comparison measurement data of two sets of depth sounding systems at the stratified bottom**表 4.** 分层水底两套测深系统静态测深比测数据统计表

序号	仪器	HY1601 测深(m)	华微 3 号测深(m)	差值(m)
1		38.93	39.32	-0.39
2		56.74	58.33	-1.59
3		62.55	64.31	-1.76

综上比测，经分析，测深差值主要由如下几个方面引起：

(1) 工作频率。无人船测深系统采用 D230 测深仪，工作频率 200 KHZ，海鹰系列测深仪工作频率为 208 KHZ。声速的计算公式为 $v = f\lambda$ ，当声速 v 一定，频率 f 越大，波长越短。由于在水下除了水体与浮泥层之间有分界面之外，还有浮泥层与淤泥层、各个密度不同的淤泥层之间存在许多的分界面。声波信号如果传递到这些分界面上也同样能产生回波信号。低频声波波长较长能穿透浮泥层及密度较小的淤泥层继续向深处传递，而高频声波则波长较短被吸收，无法穿越浮泥层，这是由于不同频率的声波在介质中的衰减情况不同引起。在水下测量工作中，声波在传递过程中的衰减、反射等声波的物理特性受水底底质因数影响较大。

(2) 不同测深仪的水深计算算法不同。一般分为回波面积算法、距离波门算法、多次回波算法三种模式。而水深计算的关键是延时，不同的水体介质，由于回波识别错误、水底深度突变及水底障碍物凸现都可以引起延时计算错误，而导致水深错误，所以不同测深仪深度门限设置等可能不同，最终导致水深计算不一致。

图 6 的 DEM 差值数据证明，河床质稳定淤泥分层不明显的主槽冲刷区、浅水区及大坝浇筑坝体等区域差值较小，而主槽两边的区域淤泥区差值较大。因此，在常规测量项目中，尤其是长期监测项目，仪器设备必须统一，消除因仪器设备引起的系统误差。

4. 结论与展望

本文详细介绍了华微 3 号无人船测量系统在水下地形测量中的应用技术实施流程；利用缓冲区匹配重合点较差法、重合断面对比分析法，确定了无人船测量系统的内符合精度满足河道测量的技术要求；利用重合断面分析以及 DEM 差值分析法评价了无人船测量系统与海鹰系列测深仪的精度误差；通过比

测分析找到了无人船测深系统与海鹰系列测深系统产生水深测量误差的原因；说明了仪器比测的重要性，以及仪器统一的必要性。

通过本文论证分析，对推动无人船测量技术在河道水下地形测量的应用产生了积极的促进作用，为无人船测深系统应用于项目实际提供了一定的技术参照。

但是无人船技术的广泛应用还需要进一步的研究。

(1) 本文虽然找到了无人船测深系统与其他测深系统产生误差的一些原因，但还应进一步深挖研究，减小系统误差对测深的影响，进一步提高无人船测深系统的应用前景。

(2) 本文着重分析了静态状态下产生误差的原因，怎样在动态测量中进一步提高测深精度，还需深入研究。

本文对无人船测量系统这种新的测量手段在测绘中的应用起到了很好的科技示范作用。无人测量船在抢险救灾、河道清淤、水库库容等工作中必将得到更广泛的应用，具有良好的市场前景和发展趋势。

参考文献

- [1] 关雷, 郑宝华, 赵琳, 勾昆, 袁红. 浅析无人船在水下地形测量中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(11): 202-204.
- [2] 兰星. 无人船的导航定位和路径规划的研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆邮电大学, 2021.
- [3] 聂玲, 张玲玲. 无人船艇关键技术及未来发展趋势[J]. 船舶物资与市场, 2022, 30(7): 12-14.
- [4] 王冬敏, 杨国兴, 李春林, 刘昆, 由明明. 无人船水下测量技术在溪洛渡库区的应用[J]. 人民黄河, 2022, 44(S1): 269-270.
- [5] 蔡文兰. 无人船水下测量技术的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌工程学院, 2019.
- [6] Specht, M., Specht, C., Szafran, M., Makar, A., Dąbrowski, P., Lasota, H., *et al.* (2020) The Use of USV to Develop Navigational and Bathymetric Charts of Yacht Ports on the Example of National Sailing Centre in Gdańsk. *Remote Sensing*, **12**, Article 2585. <https://doi.org/10.3390/rs12162585>
- [7] 杨柳, 王超, 吴忠明. 多波束测深系统与单波束测深仪在长江河道测量应用中的比较与分析[J]. 水利水电快报, 2021, 42(5): 23-25, 29.
- [8] 华微3号无人船[DB/OL]. https://obs-web.huace.cn/华微3号_20250530.pdf, 2025-05-30.
- [9] 毕彦, 张德会, 宋厦. 单波束测深仪波束角的仿真分析与设计[J]. 船舶电气与通信, 2021, 32(3): 67-76.
- [10] 谷东亮, 李明海, 马海瑞, 纪守博. 回声测深仪典型问题与对策分析[J]. 船电技术, 2024, 44(8): 62-65.