

智能无人测量船在水下地形测量中的应用分析

——以某项目为例

文 / 江 鹏 安徽省地质矿产勘查局 311 地质队

摘要: 文章以某水域生态修复工程为例,从系统构成、基本测量原理、应用优势这几方面入手,论述了无人船水下地形测量系统的情况。在此基础上,以无人船选择、无人船水下数据采集、数据处理与成果编绘、精度检查为切入点,着重阐述了水下地形测量中无人船的具体应用要点,提升了水下地形测量工作的效率效果以及结果精度,降低了测量中安全问题的发生概率,为同类项目的展开提供参考借鉴。

关键词: 无人船; 水下地形测量; 数据采集; 数据处理; 精度检测

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.16.088

引言

无人船综合应用了现代传感器技术、通信技术和数据处理能力,能够替代技术人员展开复杂环境条件下的地形测量工作,应用优势明显,是当前水下地形测量的主流方法。实践中,为充分发挥出无人船的作用,必须明确把握基于无人船展开水下地形测量工作中的操作要点,以此提升水下地形测量作业的效率、安全和结果可靠性。

一、项目概述

第一,项目来源。安庆市城区沿江两湖三河坡岸缓冲带与水域生态修复工程(二期)的内容主要为:西小湖、新河、康熙河的部分坡岸缓冲带与水域生态修复工程及运维。2022年9月我单位受托对西小湖进行了水下地形测量。

第二,测区概况。西小湖水面高程约11m,水深约3-4m,水底地形倾角 $< 2^\circ$ 水面面积约 0.5km^2 。

第三,数学基础。采用2000国家大地坐标系和1985国家高程基准。

第四,作业方法。采用智能无人测量船(iBoat BS3)对西小湖进行了水下地形测量,采用常规GNSS-RTK测量对陆地岸线进行测绘。

第五,主要技术要求。测图比例尺采用1:500、基本等高距为0.5m。

水域点位中误差 $\leq \pm 1.5\text{mm}$ 、高程中误差 $\leq \pm 0.25\text{m}$ 、测点深度中误差 $\leq \pm 0.15\text{m}$ 。水域断面间距平均为10m,断面上测点最大间距为5m。

二、智能无人测量船测量系统的基本情况

(一)系统的构成

第一,船体。选用iBoat BS3智能无人船。

第二,导航与定位模块。在GNSS-RTK部分,使用中海达V30系列双模GNSS,获取船体位置、航向、速度等信息;使用Honeywell三维电子罗盘,实时监测船体俯仰角、横滚角,用于数据校正。

第三,通信模块。通过射频点对点通讯实现船机交互,传输工作状态、航行数据及测深结果至岸基控制单元。

第四,传感器与感知模块。在测深与地形测量部分,应用HY1500测深仪,通过声波原理测量水下深度,数据精度达厘米级;应用声呐换能器,集成侧倾抑制装置,实现多角度声波发射与接收,提升测量覆盖范围。在环境感知与避障部分,应用避障雷达,实时监测水体漂浮物、暗礁等障碍物,保障航行安全;应用流速传感器,集成流速测量功能,辅助分析水流特性^[1]。

第五,数据采集模块。实时记录水位、高程、水深等参数,生成离散的点位数据,数据格式包含经纬度、水面/水下高程及时间戳。

第六,数据处理模块。通过专业软件将离散数据构建成不规则三角网(Tin)或点阵模型,生成可视化地形图;结合GIS技术进行河势变化、洪水模拟等应用。

(二)基本原理

第一,声学测量原理。无人船搭载单波束或多波束回声测深仪。测深仪发射声波,声波在水中传播到水底,然后反射回来被换能器接收。通过测量声波从发射到接收的时间间隔,结合声波在水中的传播速度,计算出换能器到水底的垂直距离(即水深),根据天线高程计算水下高程。

第二,定位原理。无人船通过全球导航卫星系统(GNSS)实时获取自身的位置信息。同时,结合姿态传感器(如陀螺仪、加速度计等)测量无人船的姿态参数,对测量的水深数据进行姿态改正,确保水深数据与准确的平面位置相对应,从而绘制出水下地形图。

(三)无人船水下地形测量系统的优势

第一,高效性优势。高效的航线规划,按照最优路径自动航行,大大提高了测量速度。快速的数据采集,无人船搭载的单波束测深系统等先进测量设备,能够在航行过程中快速、连续地采集水下地形数据。长时间连续作业,无人船无需考虑人员疲劳和安全问题,可以在设定的条件下长时间连续作业。减少人员投入,只需少数技术人员在岸上或远程控制中心进行监控和操作即可。实时数据传输与处理,通过无线通信技术将采集到的数据实时传输到岸上的控制中心能够快速生成高精度的水下地形图。

第二，安全性优势。无人船无需人员直接操作，有效避免因恶劣天气、水流湍急等环境因素引发的安全事故，同时减少人为风险。同时，轻便小巧的船体设计使其可适应浅滩、急流等复杂水域，而无需担心吃水深度限制，进一步保障作业安全。

第三，可靠性优势。先进的测量设备，无人船搭载高精度的测深仪等测量设备，这些设备经过严格的校准和测试，能够精确测量水下地形的深度和地貌特征。稳定的导航与定位系统，无人船配备了高精度的全球定位系统（GNSS）和惯性测量单元（IMU）等导航定位设备，能够实时准确地确定无人船的位置和姿态。数据质量控制与处理，无人船采集的数据通常会经过严格的质量控制和处理流程。在数据采集过程中，会实时对数据进行滤波、去噪等处理，去除异常值和干扰信号，提高数据的质量。多次测量与验证，无人船可以根据需要对同一

区域进行多次测量，通过对比和分析不同次测量的数据，能够发现并纠正可能存在的误差和异常情况。

三、水下地形测量中无人船的具体应用要点

（一）无人船选择

选择合适无人船是保证水下地形测量作业质量与结果精度的重要举措，在本水域生态修复工程的水下地形测量作业中，主要选用了 iBoat BS3 智能无人船，能够在水下复杂环境中完成可靠、高效、安全的作业^[2]。

（二）无人船水下数据采集控制

为确保无人船在水下地形测量中的可靠性，在本项目实际展开无人船水下数据采集作业前，进行了包括设备安装与校准、环境评估与航线规划等工作在内的前期准备，主要包括测深仪校准（零点校准、量程校准）、定位系统校准（三维坐标）、姿态传感器校准（横摇、纵摇和艏摇）和声速校正。本项目航线规划如下图 1。

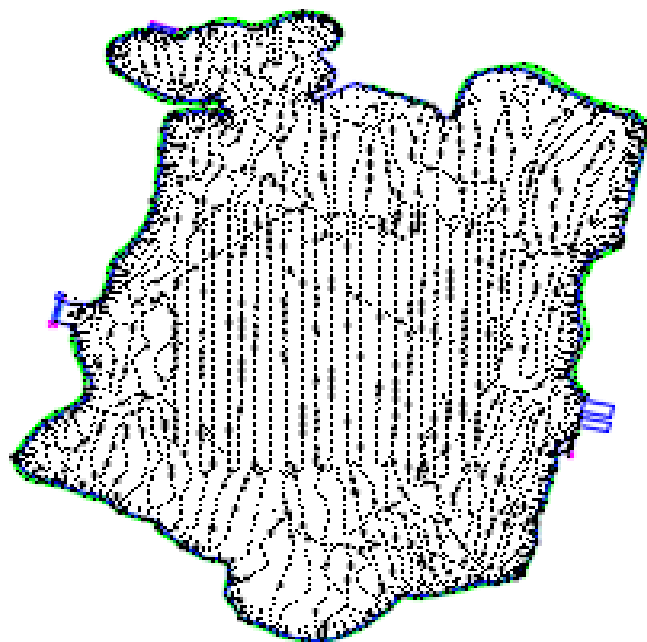


图 1 航线规划

水深定位测量采用基于“安徽省卫星定位综合服务系统（AHCORS）”的 GNSS-RTK 测量方式。高程拟合参数采用我单位在市区求取的经检验合格参数。

在数据采集中，采用按距离自动采样以及手动采样相结合方法，且先进行自动采样，具体应用如下：

第一，按距离自动采样。在本水下地形测量作业中，设定按距离间隔采样，自动展开定标与累加点号作业，同时落实对相应信息的统一记录。

第二，手动采样。由于近岸边的深度偏低，且存在着一定的杂质，所以难以使用自动采样的方式完成对应区域的样本采集^[3]。基于此，在自动采样难以作业的湖边区域，安排专业人员展开手动采样作业，搭配采样点的适当增设，实现对本区域水位变化情况的全面性展现。实践中，选定系统中的“添加采样”功能，由系统自动

在技术人员选定的位置生成采样线标识。

在实际的数据采集阶段，出于确保结果精度与输出结果质量的考量，重点对以下节点进行了控制：

第一，测量前对已知水深点进行测深对比，求取总改正数，对陆地上已有的控制点位置和高程的检查。

第二，测量过程中对船体姿态进行控制，当风浪引起回声线波形起伏值 $> 0.3\text{m}$ ，暂停测深作业。

第三，定位数据与测深数据同步采集，不同步时进行延时改正^[4]。

（三）数据处理与成果编绘

选用 Himax 软件实施数据预处理，在中值滤波法的支持下，实施对数据的滤波处理，参考模拟信号以及数字信号调整杂波数据。在实际生成的采样线内，落实对坐标高程有异常的数据的有效剔除，在成果预览期间进

行对采样处理后的测线的选择，选定合适的格式 (.dat)，在此基础上导出数据，并参考绘图软件格式实现坐标数据文件的生成与输出。

在南方 CASS9.1 制图软件内操作经过处理的数据，以此实现对断面图、等深线等地图元素的自动化创建。在此基础上，实施对相关水下地理特征的标注，描绘水下地形。合理实施区域划分，安排专业质检人员进行统一核验处理，在确定核验结果达标后实施图像的转化，生成并输出高精度的水下地形图。

数据处理与成果编绘阶段重点对以下进行了控制：

第一，数据预处理。对采集到的原始数据进行预处理，包括滤波去噪等操作。通过设定合理的阈值，识别并剔除明显偏离正常范围的野值；采用数字滤波算法，如低通滤波、中值滤波等，去除数据中的噪声，提高数据的质量。

第二，水下地形建模。根据处理后的数据，进行水下地形建模。在建模过程中，选择合适的插值算法和地形表达方式，同时对地形模型进行平滑处理，避免出现不合理的锯齿状或突变现象。

第三，地形图绘制。在绘制水下地形图时，严格按照相关测绘标准和规范进行。包括地图的投影选择、比例尺和等高距等要求。同时，对地图上的各种要素，如岸线绘制，确保地图的完整性和可读性^[5]。

(四) 精度检测

本水域生态修复工程的水下地形测量作业中，出于保证测量结果精度的考量，组织展开了成果质量的过程检查和最终检查。在实际的无人船测量作业期间，实施了对多条检查线的同时布设，控制所设定的所有检查线长度均保持在不低于 5% 主测线长度的水平，且始终与主测线维持在相互垂直的状态下。在测量过程中，使用与主测线相同的方法、精度实施对检查线的测量，对比分析主测线、检查线交叉点位置的图解数据、实测数据，以此完成结果精度检查。

在本项目的实践中，选定的检查点数量为 300 个，检测高程差值（图上 1mm 范围内高程较差）最大为 0.53m，最小为 0.04m，检测误差总体呈正态分布，检测高程中误差达到要求，检测精度统计如下表 1：

表 1 检测高程误差分布

误差区间	$\Delta \leq m$		$\Delta \leq 2m$		$\Delta > 2m$	
	点数	%	点数	%	点数	%
点数与占比	207	69.0	296	98.7	4	1.3
检测高程中误差	±0.18m					
注：m 为中误差允许值（即：±0.25m）						

结合《工程测量标准》（GB 50026-2020）和委托方相关要求，可以确定出本项目的测量结果精度满足标准规范。

四、实践经验

在无人船水下地形测量实践过程中，积累了诸多宝贵经验，也吸取了不少教训。

第一，前期规划。包括对测量区域的详细调研，了解其水域范围、水下地质情况、周边环境特点、潜在干扰因素（如电磁干扰源、湖面等），依据这些信息合理制定测量方案，规划无人船的航线。

第二，实时数据监控便于及时调整。一旦发现数据异常，如某区域水深突然大幅变化、传感器故障报警等，能迅速做出反应，暂停测量、排查问题或远程操控无人船改变航线，保障测量工作的连续性与数据质量。

结语

综上所述，将智能无人测量船作为水下地形测量的主要载体，集成控制系统、动力、无线通讯、卫星定位导航、测深等多个功能系统的应用，可以实现对水下地形数据的快速、精确获取。实践中，依托对等作业要点的强化把控，提升了测量结果数据的可靠性，提高

水下地形测量工作的效率与质量，实现了复杂水域条件下地形测量工作难题的有效解决。

参考文献

[1] 魏净静, 俞瑾, 冯露. 无人船测量系统在水闸工程水下地形测量中的应用 [J]. 治淮, 2024, (10): 36-38.
 [2] 顾洁. 智能无人船在水下地形测量中的应用——以中海达 iBoat BS3 智能无人船龙子湖水下地形测量为例 [J]. 经纬天地, 2025, (01): 65-67.
 [3] 史俊超, 李新杰, 王强, 等. 无人船技术在汛期峡谷型河道地形测量中的应用 [A] 2023 中国水利学术大会论文集 (第一分册) [C]. 中国水利学会, 中国水利学会, 2023: 6.
 [4] GB 50026-2020 工程测量标准. 中国计划出版社. 2020.
 [5] 陈鼎豪, 任杰, 孙玉超, 等. 基于无人船组合编队的河口地区水下地形测绘技术及实践 [J]. 海洋技术学报, 2022, 41 (04): 36-42.
 作者简介：江鹏（1969.12-），男，大专，测绘高级工程师，从事测绘地理信息工作。