



无人船测深系统在浅水河道测量中的应用

李 勇, 洪 剑, 朱春春

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060)

摘要: 针对传统测深方法在浅水区测量实施困难的问题, 基于无人船测深系统的组成及原理, 重点研究了无人船姿态对测深的影响、测深数据粗差探测与滤波方法。分析得出: 无人船姿态在浅水区对测深的影响有限, 可采用中值滤波、加权平均法、趋势面滤波方法进行测深数据粗差处理。结合项目应用, 证实无人船满足浅水河道测量需求、测深精度满足规范要求, 可为类似工程提供借鉴。

关键词: 浅水河道; 无人船测深; 姿态影响; 粗差探测

中图分类号: U 675.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)04-0020-05

Application of unmanned boat sounding system in shallow water channel survey

LI Yong, HONG Jian, ZHU Chun-chun

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

Abstract: For the difficulty of the traditional sounding method in shallow water areas, based on the composition and principle of the unmanned boat sounding system, we studied the influence of the attitude of the unmanned boat on the sounding, and the method of gross error detection and filtering of sounding data. The analysis shows that the influence of attitude in shallow water area on depth sounding is limited, and medium filtering method, weighted average method, and trend surface filtering method can be used to process the gross error of sounding data. Combined with the application of the actual project, it is proved that unmanned boat systems can meet the demand of shallow water channel surveys and the accuracy of sounding can meet the specification requirements, which can provide a reference for similar projects.

Keywords: shallow water channel; unmanned boat sounding; influence of attitude; gross error detection

随着我国经济社会的发展, 涉及水环境改善的项目越来越多, 项目的设计需要开展水下地形测绘。在自然资源管理方面, 国家积极倡导利用大数据为经济建设服务, 对于各种河沟湖泊也应获取相关数据, 水深测量是一种必不可少的数据来源。

传统的水深测量作业中, 在深水区一般采用单波束或多波束测深系统, 需要采用有人操控的船舶作为平台, 由于船体体积大、吃水深, 无法实现浅水区测量; 在浅水区通常采用测深杆或测深锤等方法, 一般结合工作船、橡皮艇、竹筏等

运载工具, 但是存在搁浅、侧翻等安全风险, 作业效率也非常低下; 在非通航水域没有运载工具的情况下, 为获取地形数据, 工作人员只能涉水测量, 作业劳动强度大、工作效率低、安全隐患大, 尤其在潮间带和淤泥区域作业危险性更大^[1-2]。

随着人工智能、无线通讯、自动传感器等技术的不断进步, 出现了无人船测深系统。由于无人船灵活高效、吃水浅, 降低了人员的安全风险, 因此在浅水河道测量中有着独特的优势, 受到越来越多的关注^[3-5]。

收稿日期: 2020-07-24

作者简介: 李勇(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 注册测绘师, 研究方向为工程测量与海洋测绘。

1 无人船测深技术

1.1 无人船测深系统组成及原理

无人船测深系统包括硬件和软件两大部分。硬件主要包括定位设备、测深设备、无人船体、动力推进设备等, 软件主要包括智能导航软件、通讯控制软件、数据采集软件、数据处理软件等^[6-7]。

与传统有人船测深相比, 无人船通过配备的定位系统和智能导航软件, 在规划好测线后可实现自主导航测深, 特别是一些非通航河道和浅水河道, 无人船可大幅度提高数据采集的效率。无人船通过岸基通讯控制系统实现无人船远程控制, 必要时也可以人工操控以保证安全。测深工作原理见图 1。

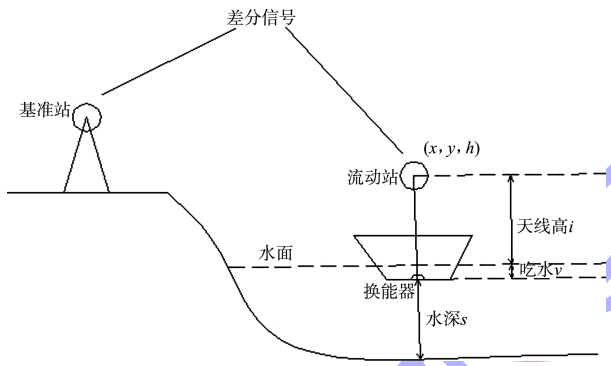


图 1 无人船测深系统工作原理

采用 RTK(实时动态)三维水深测量时, 对于某一时刻, 通过 RTK 技术可以获得 GNSS(全球导航卫星系统)天线所在位置的坐标和高程 (x,y,h) , 测深仪换能器通过向水底发射超声波并接收其反射信号, 根据发射和接收时差测得水深 s , 通过提前量取可得到 GNSS 天线高 i 和测深仪换能器吃水 v , 则相应水底点位的高程为 $H=h-i-v-s$ 。无人船水深测量也可以采用后处理水位改正模式, 但须提前在测区布设水尺, 外业时同步进行水位观测, 在数据后处理时再进行水位改正, 进而得到水底点的三维坐标。

1.2 无人船姿态对测深的影响

由于无人船体积小、质量轻, 因此更容易受到水流和风等因素的影响, 导致无人船姿态无法保持理想状态, 船体姿态包括航偏角、横摇、纵

摇、涌浪共 4 个因素, 船姿的变化将引起 GNSS 定位天线和测深仪换能器偏离垂线位置, 给测量结果带来影响。如图 2 所示, 理想状况下, 定位天线和测深仪换能器处于 AB 垂线位置, 但受船体姿态的影响, 其与垂线方向产生了偏角 ϕ , 真实位置为 $A'B'$ 位置, 导致测量结果包含误差。

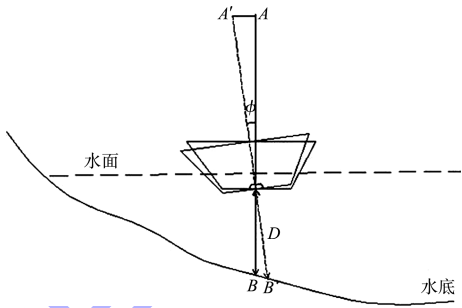


图 2 无人船姿态对测深的影响

由于无人船 GNSS 定位天线一般不会很高, 船姿引起的天线偏移可以忽略不计, 但船姿引起的水深测量误差需要酌情考虑。一般船体涌浪将导致水深测量结果偏大或偏小, 在天气较好、船速稳定时, 其影响一般很小, 船体横摇和纵摇引起水深测量误差与深度有关, 假设某个时刻, 测量深度为 D , 则船姿引起的水深测量误差可近似表达为:

$$\Delta h = \Delta s + D(1 - \cos\phi)$$

(1)

式中: Δh 为水深测量误差; Δs 为船体涌浪引起的误差, 向上为正, 向下为负。由公式可知水深误差的大小与水深 D 、偏角 ϕ 成正比。

为便于定量分析, 根据式(1), 假设某时刻 Δs 为 0, 按规范规定, 水深不大于 20 m 时, 深度误差应不大于 0.2 m, 由于船姿引起的偏角一般不大于 5° , 即使按 5° 考虑, 在水深 20 m 时引起的水深测量误差为 0.08 m, 完全在规范要求的范围之内, 因此对于几米的浅水河道, 船姿对测量结果的影响均满足规范要求。

1.3 测深数据的粗差探测与滤波

无人船在水深测量过程中, 即使各项参数均设置准确, 也可能因为水体产生的气泡、浅水多次回波以及水下漂浮物等因素的影响, 导致测量结果中包含一些伪观测值, 即水深粗差。为保证

测量成果的质量，需要对无人船获取的水深数据进行粗差探测和滤波，常用的方法有中值滤波、加权平均法、趋势面滤波等^[8]。

中值滤波法的基本原理是围绕所关心的水深点进行邻域选择滤波。假设获取的某个水深序列为 h_1, h_2, \dots, h_m ，则在序列范围内选择长度为某个奇数 $2n+1$ 的窗口，将水深序列按大小排列，取中间点作为结果输出。

加权平均法是对中值滤波法的改进，该法考虑了不同水深数据的可靠性，并以此对窗口内的水深值定权，进而求取水深序列的加权平均值，在此基础上计算各水深值的标准偏差，并根据 2σ 或 3σ 原则探测粗差点。

趋势面滤波法是用精度评定的思路探测粗差并滤波。假定水下地形曲面连续，根据水深 z 和平面位置 (x,y) ，采用多项式函数 $z=f(x,y)$ 来拟合小区域的水底地形，一般采用如下拟合函数：

$$z=m_0+m_1x+m_2y+m_3x^2+m_4xy+m_5y^2 \tag{2}$$

式中：系数 $m_0 \sim m_5$ 根据水深点建立方程组进行求解，确定拟合函数后，水深粗差则按下式进行探测和滤波：

$$\begin{cases} z_i-f(x_i,y_i) \leq k\sigma, \text{合格} \\ z_i-f(x_i,y_i) > k\sigma, \text{不合格} \end{cases} \tag{3}$$

式中： $k=2$ 或 3 ， z_i 为 (x_i,y_i) 点位置的深度， σ 为根据邻域内的测点深度和拟合函数确定的均方差。

以上 3 种方法操作起来简单方便，可根据情况选用。前两种方法基于邻域内水深数据的统计特征进行，模型中的参数需要人为确定，应注意中值滤波处理连续粗差时存在不足，加权平均法得到的水深可能会受粗差影响；近年来应用较多的是趋势面滤波法，但该法多项式阶数过高或过低都不利于粗差的探测，建议根据水底地形变化的复杂程度综合确定。

2 应用案例

2.1 项目概况

对雄安新区孝义河河口湿地水质净化工程部

分河段及排水渠进行 1:500 比例尺的水下地形测量工作。通过现场初步踏勘，测区河道内水流较小，无可船舶，测区河道中间水深大多在 2~3 m，近岸不足 1 m，部分区域淤泥较厚，不便人工涉水测量。此外本项目对测量工期要求比较紧。决定采用无人船进行水深测量。

2.2 作业流程

首先进行测前准备工作，包括对测区的总体踏勘、天气查询、作业规划等。无人船测深系统运抵现场后应对各软硬件模块进行设备调试，确保在作业过程中功能稳定，作业开始前须设置软硬件参数，一切正常后才能根据规划好的测线开始测深作业。测深作业主要流程见图 3。

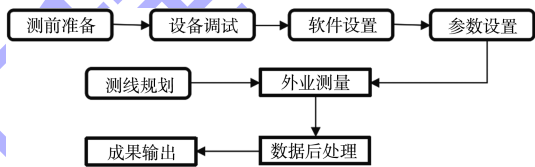


图 3 无人船测深作业流程

2.3 实施情况

本项目采用的无人船测深系统为中海达 iBoat 系列，见图 4，同时搭载了高精度的 RTK 定位系统和专业级测深仪，适应浅水河道的水深测量。



图 4 无人船测深系统

为保证测量成果的可靠性，水深测量采用水位后处理改正和 RTK 三维水深测量双模式进行。提前在测区合适位置设置水尺并进行水位接测，并于测量期间每 10 min 记录水位，以保证数据后处理水位改正的准确性。

外业测量中, 对坐标系参数、天线高、换能器吃水、声速等进行设置, 确保平面位置和水深精度满足要求, 同时布设一定比例的测深检查线。在测量过程中, 开阔水域采用自动导航测量模式, 特殊水域采用手动控制模式。

3 成果处理及应用分析

3.1 数据处理及成果验证

无人船测深数据处理采用配套的软件进行, 由于本项目测区水较浅, 河水平静, 测量时天气较好, 船体姿态的影响可忽略不计。但由于水深较浅容易多次回波, 加上河道中存在一些水草等影响, 因此测深数据中存在一些粗差, 需进行粗差探测和滤波, 图 5 为进行粗差探测和滤波前后的对比。

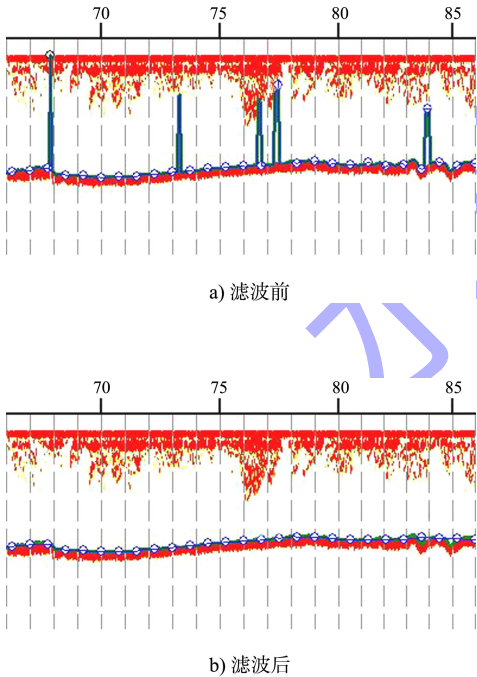


图 5 粗差探测和滤波前后对比

在完成测深数据的粗差探测与滤波后, 对水深数据按一定的间隔取样并进行水位改正, 最后进行数据成果输出, 即可得到所需要水底地形点三维坐标数据, 图 6 为根据三维坐标数据采用 CIVIL 3D 构建的地形三维模型。



图 6 三维地形模型

为检验无人船测深成果的精度, 按规范选取图上 1 mm 范围内的主测线和检查线的数据进行比对, 统计结果见表 1。

表 1 主测线和检查线测深成果比对统计

差值/cm	点数/个	百分比/%
0~5	85	89
5~10	8	8
10~20	3	3
>20	0	0

根据统计, 本项目测量的最大水深值为 3.7 m, 主测线与检查线差值绝大部分在 5 cm 以内, 最大差值为 13 cm。根据规范要求, 比对限差应不大于 40 cm, 说明无人船测深精度较高, 测量成果满足规范要求。此外, 为进一步验证成果的可靠性, 在确保安全的前提下, 采用人工涉水作业的方式实测了一些水底点数据, 比对结果见表 2。

表 2 人工实测和无人船测深成果比对

差值/cm	点数/个	百分比/%
0~5	28	54
5~10	18	35
10~20	6	11
>20	0	0

根据统计, 大部分差值均在 10 cm 以内, 比对差值最大为 18 cm, 满足规范规定要求不大于 40 cm 的要求, 说明无人船测深成果整体可靠、满足项目需求。对部分差值相对偏大的点位进行分析, 发现主要是人工测量时受到河底淤泥的影响, 可能包含了部分测量误差, 但仍然满足规范规定的精度要求。

3.2 应用分析

1) 要保证无人船与控制站的通讯良好。作为无人船的岸基控制单元,控制站尽量选择地势较高且相对空旷区域,否则容易产生通讯中断无人船无法跟踪的隐患。本项目实施过程中,为确保安全,在河道作业范围的上下游安排作业人员进行瞭望,以保证设备安全。

2) 在进行设备参数设置时,应按照规范要求进行检测比对。由于水体声速对测深结果存在影响,不同水温和盐度下水体声速存在差异,特别是海水和淡水中的声速差异较大,因此有必要对测区的声速进行测定,以保证水深测量结果的准确性。

3) 对于无人船的作业区域应有充分的踏勘调查。虽然无人船能够实现智能导航测量,但由于船体轻、发动机推力有限,水底下的渔网或水草可能会困住船体,影响设备安全,因此在测量过程中仍须实时监控行船区情况,在渔网和水草密集区域建议人工控制。

4 结语

1) 无人船测深系统具有灵活智能、安全高效的特点,是对载人船水深测量的一个有效补充,在浅水河道测量中能够取代传统方法,具有明显的优势,可为工程提供可靠的成果。

2) 无人船体积小、便于携带,船体较轻导致船体姿态容易受水流和风浪的影响,建议选择合适的天气进行测深作业,在测量水流较急、水深较深的

项目时,尤其注意船体姿态对测深成果的影响。

3) 采用滤波方法对无人船测深数据进行处理,可以探测出粗差并进行滤波处理,保证测深成果的质量。

4) 作为一个智能操控平台,无人船可搭载水深测量、水文观测、环境检测等设备,随着技术的不断发展和完善,在其他领域的应用也将越来越广泛。

参考文献:

[1] 许开勇,徐世毅.无人船在航道测量及维护中的应用与展望[J].中国水运·航道科技,2018(5):39-42.

[2] 钱辉,舒国栋,王露.无人船测深系统在潮间带地形测量中的应用[J].水利水电快报,2019,40(10):19-20,41.

[3] 李威.浅谈无人船测绘技术在上海市某湖泊疏浚工程中的应用[J].矿山测量,2019,47(6):81-83,126.

[4] 张锡越,朱照荣,齐永良,等.结合无人测量船的什刹海西海水下地形测绘[J].测绘通报,2018(S1):121-123,175.

[5] 史磊.iBoat BM1 型无人测量船在松花江哈尔滨段浅水区水下地形测量中的应用[J].水利科技与经济,2019,25(4):45-48.

[6] 余歆睿,李志峰.智能化 iBoat_ BS2 无人船在现代水利工程观测中的应用与拓展[J].江苏水利,2018(9):64-67.

[7] 赵薛强.无人船水下地形测量系统的开发与应用[J].人民长江,2018,49(15):54-57.

[8] 王君婷,王振杰.单波束无验潮测深数据滤波方法[J].工程勘察,2018,46(3):48-52,74.

(本文编辑 武亚庆)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部