

· 信息技术 ·

高精度水深测量的误差影响因素及控制措施



王小龙, 朱文泉, 李亚东, 张汉康

(中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300202)

摘要: 针对水运工程中高精度水深测量的要求, 本文以单波束测深系统为研究对象, 介绍了水深测量的测深原理及主要误差影响因素。分别从定位误差、测深误差、水位误差、环境效应等角度对高精度水深测量的主要误差来源进行了分析, 提出相应的控制措施, 并通过实验进行验证。建议利用 RTK 三维水深测量技术消除水位误差的影响, 进行导航延时的改正减少定位误差的影响, 利用姿态传感器消除横摇、纵摇姿态角对水深测量误差的影响, 最终降低水深测量过程中的误差影响, 提高水深测量的精度。

关键词: 高精度; 水深测量; 影响因素; 控制措施

中图分类号: U 612

文献标识码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S2-0103-05

Influencing factors of errors in high precision bathymetry and control measures

WANG Xiao-long, ZHU Wen-quan, LI Ya-dong, ZHANG Han-kang

(CCCC(Tianjin) Eco-Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300202, China)

Abstract: Regarding the requirements of high precision bathymetry in waterway engineering, this paper takes the single-beam bathymetry system as the research object and introduces the bathymetry principle and main influencing factors of bathymetric errors. Moreover, this paper analyzes the main error sources of high precision bathymetry from the perspectives such as positioning errors, bathymetric errors, water level errors, and environmental effects and puts forward corresponding reduction measures, which are subsequently verified by experiments. We recommend using RTK three-dimensional bathymetry technology to eliminate the influence of water level errors, correcting the navigation delay to reduce the influence of positioning errors, and utilizing attitude sensors to remove the influence of roll and pitch attitude angles on bathymetric errors. Finally, the influence of errors in the bathymetry process is reduced, and the accuracy of bathymetry is improved.

Keywords: high precision; bathymetry; influencing factors; control measures

1 测深系统及其原理

1.1 单波束测深系统

单波束测深系统广泛应用于水运工程建设项目中, 主要有如下几部分组成: 1) 定位仪, 为水深测量提供准确的平面位置坐标; 2) 测深仪, 有单、双频 2 种类型, 单频主要获取水深数据, 双频可以测量水底淤泥厚度; 3) 姿态传感器 (motion reference unit, MRU), 安装于船体中心, 可为船体提供横摇、纵摇、涌浪姿态改正数据; 4) 导航软

件, 为水深测量提供设备连接测试、参数求取、数据采集、显示和编辑处理功能。

单波束测深仪的工作原理是通过换能器发射声波触及水底后, 进行反射回传至换能器, 见图 1, 假设声波以声速 v 在水中传播, 传播时间 t , 则换能器到水底的距离 $H = (1/2)vt$ 。实际需要的水深数据往往为深度基准面下的距离 $H_{\text{水深}}$, 需要考虑潮位问题, 计算公式为:

$$H_{\text{水深}} = D + h_{\text{吃水}} - h_{\text{潮位}} \quad (1)$$

收稿日期: 2022-02-10

作者简介: 王小龙(1987—), 男, 高级工程师, 从事海洋测绘、工程测量、航空摄影测量工作。

式中： D 为测深仪所测水深； $h_{吃水}$ 为换能器到水面的距离； $h_{潮位}$ 为受潮汐影响周期性涨落的水位高度。

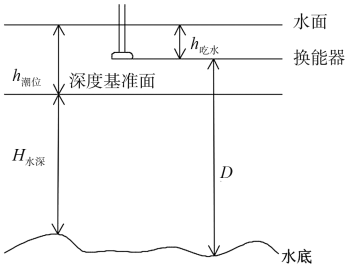


图 1 测深仪工作原理

1.2 多波束测深系统

多波束测深系统是条带全覆盖测量，主要由甲板处理单元、发射换能器、接收换能器和工作站、辅助姿态传感器、秒脉冲 (PPS) 时间同步、定位系统和声速剖面仪等组成。工作时发射换能器以一定频率发射沿测船航向开角窄、垂直航向开角宽的波束，对应每个发射波束，由接收换能器获得多个沿垂直航向开角窄、沿航向开角宽的接收波束。将发射波束和接收波束先后叠加可获得垂直航向上上千个窄波束。通过每个窄波束的入射角和传送时间可计算出水下地形点的位置和水深。

多波束测深系统安装时严格按照系统设备与采集软件要求建立合适的船体坐标系，然后进行安装偏差校准，主要校准内容包括横摇、纵摇、艏向、延时等，现代多波束测深系统多配备有 PPS 时间同步可进行延时改正，换能器安装有实时表面声速可对声速进行实时改正，横摇、纵摇、艏向可通过特定区域、特定航线求得。

2 影响水深测量精度的因素

水深测量误差主要来自以下几方面：水深测量误差、测深延时效应、波浪效应和船舶摇摆引起换能器的姿态变化等引起的测量误差^[1-3]。

1) 水深测量误差。通过测深原理可知，在水深测量作业中，对测深数据有影响的是声速和船只吃水。测量船只通过螺旋桨转动推进，过程中

势必会造成吃水变化，动吃水是系统误差和随机误差的组合。

2) 测深延时效应。是定位时刻与测深时刻不一致所引起的误差，后果是造成水深等深线呈锯齿状走势^[4]。在水深测量作业中需要确定深度基准面，水位观测的精度直接影响深度基准面的确定，必须进行水位改正将水深测量的实际值转换为相对于理论深度基准面数据。

3) 波浪效应对水深测量的影响。波浪效应指测量船只受风、浪影响，引起固定在船上的换能器及全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 接收天线随船一起横纵摇动、上下浮动，不能使换能器法线始终垂直水面，进而影响水深测量点的平面位置和深度测量精确度^[5]。

4) 换能器的姿态变化。船舶横向摇摆引起换能器的姿态变化，使发射波束相对船只向左或向右倾斜，与垂直方向偏离产生误差。如图 2 所示，假设船体在某一时刻发生横摇角度为 α ，测量出深度为 s ，测深仪的半波束角为 θ ，实际水深为 d ，横滚产生垂直方向的误差为：当 $|\alpha| < \theta$ 时，横摇角引起的测深偏移在波束角的范围之内，不需要改正；当 $|\alpha| > \theta$ 时，产生水平位移 $S = s \cdot \sin(\alpha - \theta)$ ，测深误差 Δd 的表达式如下：

$$\Delta d = TA_2 - TA = s - d = s - s \cdot \cos(\alpha - \theta) = s[1 - \cos(\alpha - \theta)] \tag{2}$$

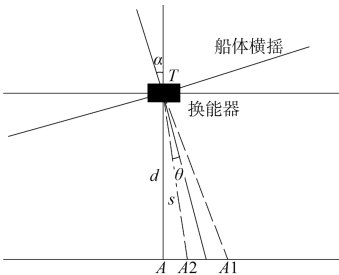


图 2 横摇角产生的误差

船舶纵向摇摆引起换能器的姿态变化与横摇的变化相似，区别在于使发射波束相对船只向前或向后倾斜，与垂直方向偏离产生误差。

取横摇角与半波束角差值分别为 5°、7°、10°, 采用公式(2)计算出不同水深观测值由横摇、纵摇所产生的测量误差, 见表 1。由此可知, 当姿态角与半波束角差值大于 5°、水深大于 10 m 时, 宜进行姿态改正。

表 1 波浪效应产生的测量误差

横摇角	水深/m	效应误差/m	
		S	Δd
5°	5	0.34	0.01
	10	0.60	0.02
	20	1.13	0.03
	50	2.70	0.07
7°	5	0.57	0.02
	10	1.00	0.04
	20	1.87	0.08
	50	4.49	0.20
10°	5	0.79	0.05
	10	1.40	0.09
	20	2.62	0.16
	50	6.28	0.38

注: 天线中心至换能器距离 L 取 1.5 m。

3 提高水深测量精度的控制措施

随着实时动态 (real-time kinematic, RTK) 三维水深测量技术的快速普及应用, 该技术已成为当前水深测量的主要模式。RTK 可以实时获取高精度的全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 天线的三维坐标, 但其采用的是大地高程, 需将其转换成水运工程中常用的当地理论深度基准面中的高程, 无需验潮就能直接测定水底泥面的高程, 这种方法称为 RTK 三维水深测量^[6-7], 其工作原理见图 3。

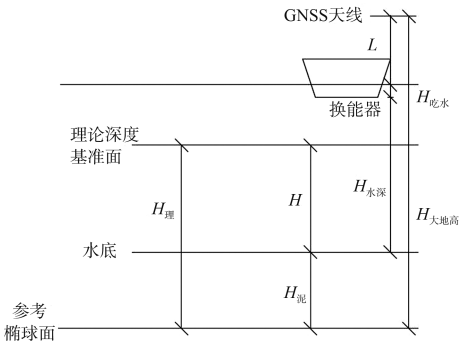


图 3 RTK 三维水深测量工作原理

水底相对参考椭球面的高程是:

$$H_{\text{泥}} = H_{\text{大地高}} - L - H_{\text{吃水}} - H_{\text{水深}} \tag{3}$$

水底相对理论深度基准面的高程是:

$$H = H_{\text{理}} - H_{\text{泥}} = H_{\text{理}} - (H_{\text{大地高}} - L - H_{\text{吃水}} - H_{\text{水深}}) = (H_{\text{理}} - H_{\text{大地高}}) + L + H_{\text{吃水}} + H_{\text{水深}} \tag{4}$$

如果将式(4)的深度基准面比作似大地水准面, $H_{\text{理}}$ 即为似大地水准面与椭球面之间的高差, 也就是高程异常 ξ , 则公式可简化为:

$$H = L + H_{\text{吃水}} + H_{\text{水深}} - H_{\text{大地高}} + \xi \tag{5}$$

式中: $H_{\text{水深}}$ 可以利用测深仪测得; $H_{\text{大地高}}$ 可以用 RTK 接收机测得; $H_{\text{吃水}}$ 为换能器吃水; L 为 GNSS 天线到水面的高, 可以直接测得。只需知道 ξ 值, 即可实时测得水下地形在理论基准面下的深度 H 。

位置偏差对水深测量的影响主要体现在延时效应上, 直接反映是对相同测线往返测量时相同目标出现错位。RTK 水深测量中采样率可达 50 Hz, 保证往返断面采集的水深数据足够充足, 在船速稳定的情况下, 完好保留往返断面的细部特征。对往返断面进行匹配得出最佳偏移量, 除以船只速度即可得出延时, 此方法称为断面法, 是目前计算导航延时采用的主要方法。

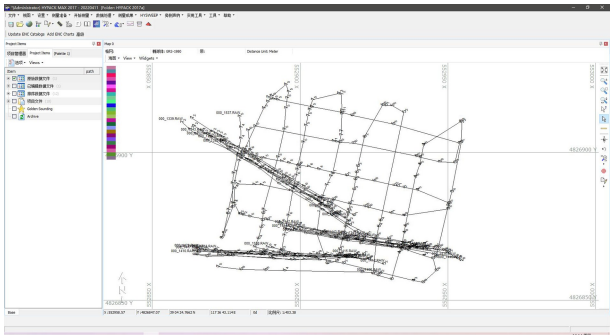
传统的水深测量需要潮位数据, 采用 RTK 三维水深测量技术实时获取厘米级高精度的三维坐标信息数据, 无需验潮即能得到深度基准面下的水深数据, 从根本上避免了水位观测误差对水深测量的影响, 是当前水深测量主要采用的方法。

4 试验测试及分析

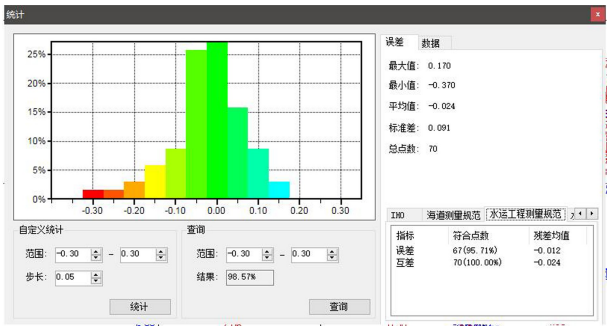
目前多波束测深系统均配备姿态传感器和 PPS 时间同步设备, 水深测量时均进行严格的延时和姿态改正, 但对单波束高精度水深测量系统的延时效应和姿态对测深的影响研究较少, 本文主要基于单波束测深系统讨论延时效应和姿态效应对测深的影响。

测试区域选在某湖泊水域, 水深变化明显, 最大水深约 10 m, 采用无人船搭载海鹰 HY1601 测深仪、集成姿态仪, 组成精密水深测量系统。

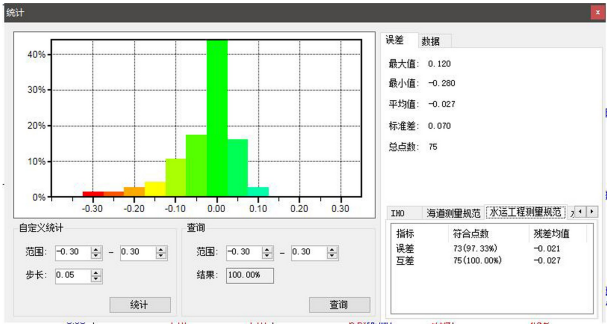
采用 RTK 实时定位，在沿坡度变化明显的测线，设置无人船以 1 m/s 的速度自动匀速多次往返航行，以求得系统延时，然后以井字形测线采集数据，比对交叉点水深值验证延时效应对测深的影响。本次求得系统延时为-0.5 s，为了检验延时效对测深的影响，分别以不改正延时和改正延时比对交叉点，见图 4。对其中的不符值进行统计分析，具体数值见表 2。



a) 数据采集



b) 无延时校正



c) 延时校正

图 4 湖泊水域数据采集与分析

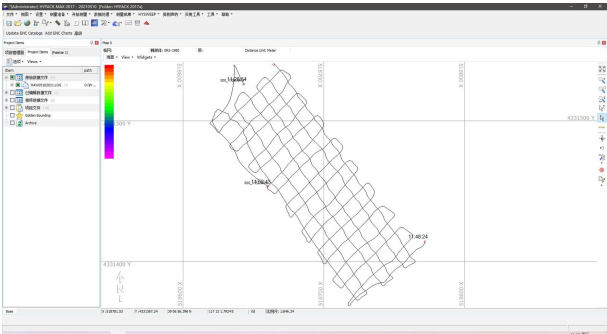
表 2 湖泊水域数据交叉点不符值及误差占比统计

延时校正	最大值/m	最小值/m	平均值/m	标准差/m	±0.05 m 占比/%	±0.10 m 占比/%	±0.20 m 占比/%
无延时校正	0.17	-0.37	-0.02	0.09	54.3	80.0	95.7
延时校正	0.12	-0.28	-0.02	0.07	69.3	86.7	97.3

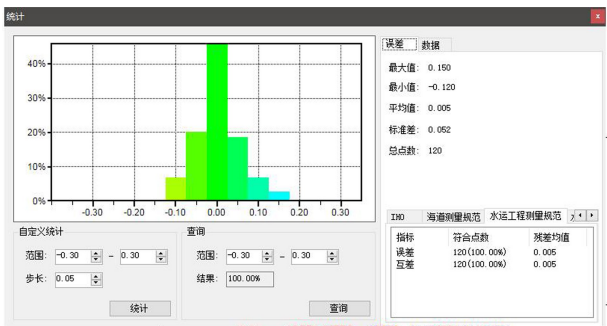
从图 4 和表 2 可以看出，RTK 三维水深测量方式图上 1 mm 交叉点互差远低于水运工程测量规范 0.4 m 的要求，经过延时改正后，数据正态分布更加收敛，交叉点最大值、最小值、标准差减小，互差±0.05 m、±0.10 m 占比明显提高。

对比测深仪记录的姿态数据可知，由于无人船在湖面自动行驶姿态数据变化很小，横摇角最大偏差 4°，纵摇角最大偏差-2.9°，HY1601 测深仪半波束角 4°，姿态数据变化均在波束角的改正范围内，对测深数据没有影响，与软件记录计算的结果一致。

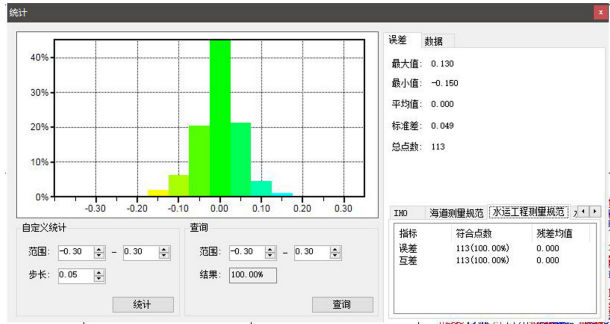
另外，在海河某段水域进行了测试，测试区域最大水深 8 m，河水处于流动状态，有船舶经过，对姿态数据变化有一定的影响。采用无人船控制软件以 2 m/s 的速度自动匀速航行，采用 10 m 测线间距井字形往返采集数据，利用井字形交叉点检查数据质量，分别以不改正姿态和改正姿态比对交叉点，检验姿态对测深的影响，见图 5。对其中的不符值进行统计分析，具体数值见表 3。



a) 数据采集



b) 无姿态校正



c) 姿态校正

图 5 海河水域数据采集与分析

从图 5 和表 3 可以看出, RTK 三维水深测量的 1 mm 交叉点互差远低于水运工程测量规范 0.4 m 的要求, 经过姿态改正后, 数据正态分布有一定收敛, 标准差有一定的减小, 互差 ± 0.05 m、 ± 0.10 m 占比有一定的提高。

对比测深仪记录的姿态数据, 横摇角最大偏差 9° , 纵摇角最大偏差 -8.5° , HY1601 测深仪半波束角 4° , 姿态数据对测深结果有一定的影响, 与软件记录计算的结果一致。

表 3 海河水域数据交叉点不符值及误差占比统计

姿态校正	最大值/m	最小值/m	平均值/m	标准差/m	± 0.05 m 占比/%	± 0.10 m 占比/%	± 0.20 m 占比/%
无姿态校正	0.15	-0.12	0.005	0.05	73.3	95.0	100
姿态校正	0.13	-0.15	0.000	0.04	77.9	95.6	100

5 结语

1) 水深测量是一项综合性较强的工作, 传统的水深测量方式影响因素多, 精度不高。从水深测量的原理出发, 分析了多种因素对水深测量的误差影响, 得出延时效应、姿态变化对测量精度的影响较大。

2) 采用 RTK 三维水深测量技术无需验潮, 可以有效避免船舶动吃水、水位观测误差对测深的影响, 是目前水深测量采用的主要方法。

3) 针对高精度水深测量的需求提出了相应的措施, 配合延时改正和姿态改正可以达到更高的水深测量精度。对延时效应可以采用断面法求得延时误差; 对于横摇、纵摇姿态角度变化的影响, 宜接入姿态仪来提高水深测量精度。

参考文献:

[1] 崔坤生, 曹正伟, 宋晓蛟, 等. RTK 无验潮水深测量误差分析及控制方法[J]. 测绘地理信息, 2019, 44(3): 38-41.

[2] 王真祥, 刘世振. 多传感器集成下的精密无验潮水深测量方法研究[J]. 人民长江, 2019, 50(12): 60-65.

[3] 冯传勇, 胥洪川, 冯国正, 等. 顾及水深的单波束测深系统误差改正方法[J]. 海洋测绘, 2021, 41(3): 19-23, 33.

[4] 梁武南, 杨保岑, 舒晓明. 一体化单波束精密测深方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(3): 27-29.

[5] 吴敬文, 潘与佳, 高健, 等. 复杂水域精密单波束测深关键技术研究[J]. 人民长江, 2019, 50(12): 51-54.

[6] 刘会宾, 李亚东. 实时动态(RTK)三维水深测量质量控制措施[J]. 水运工程, 2019, (S2): 6-9.

[7] 张国利, 时小飞, 杨开伟, 等. 网络 RTK 支持下的无验潮水深测量方法及其应用[J]. 测绘通报, 2016, (12): 140-141.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 63 页)

参考文献:

[1] 黄世全, 王雪梅. 超磁分离组合工艺在城市溢流污水处理应用工程实例[J]. 低碳世界, 2020, 10(6): 35-36.

[2] 刘孝利, 刘德春, 李志云. 赵官能源矿井水处理超磁分离净化工艺的应用[J]. 山东煤炭科技, 2012(4): 42, 44.

[3] 周建忠, 靳云辉, 罗本福, 等. 超磁分离水体净化技术在北小河污水处理厂的应用[J]. 中国给水排水, 2012,

28(6): 78-81.

[4] 肖军, 朱有光, 陈大双, 等. 浅析超磁混凝 BAF 工艺在污水处理中的应用[J]. 资源节约与环保, 2019(7): 61, 66.

[5] 龚宣亦, 王哲晓, 胡宇, 等. 超磁分离水体净化技术处理煤矿矿井水的应用研究[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(10): 104-106.

(本文编辑 王传瑜)