

一种新型水下地形测量装置的应用研究

周延波¹, 曹维昂¹, 袁晓洒²

¹西京学院, 土木工程学院, 陕西 西安

²西京学院, 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2023年12月18日; 录用日期: 2024年1月22日; 发布日期: 2024年1月30日

摘要

为解决水下地形测量中全站仪测量精度不足、工作效率低、定位精度低等问题, 基于GNSS-RTK和声纳技术, 本文设计了一种便携式水下河床地形测量装置。本文介绍了该装置的组成部分, 并结合试验分析了该装置在中小河床地形测量中的测量误差, 研究了该装置在水下地形测量中的应用可行性。研究表明, 该装置在河床断面测量中测量精度可达12 mm, 便携式水下地形测量装置的工作效率较全站仪提高了94.42%, 该设备自动收集的数据可以通过5G技术传输到计算机, 并绘制成河床的横断面视图。

关键词

河床段, 测量精度, 工作效率, 便携式装置

Research on the Application of a New Device in the Underwater Topographic Survey

Yanbo Zhou¹, Weiang Cao¹, Xiaosa Yuan²

¹School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

²Shanxi Key Laboratory of Concrete Structure Safety and Durability, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 18th, 2023; accepted: Jan. 22nd, 2024; published: Jan. 30th, 2024

Abstract

In order to solve the problems of low measuring accuracy, low working efficiency and low positioning accuracy of total station in underwater topographic survey, a portable underwater riverbed topographic survey device was designed based on GNSS-RTK and sonar technology. This article introduces the components of the device, analyzes the measurement error of the device in small and medium-sized riverbed terrain measurement through experiments, and the feasibility

of the application of the device in underwater topographic survey is studied. The results show that the measuring accuracy of the device can reach 12 mm in the riverbed section measurement. The working efficiency of the portable underwater topographic survey device is 94.42% higher than that of the total station. Data automatically collected by the device can be transmitted to a computer via 5G technology and plotted into a cross-sectional view of the riverbed.

Keywords

River Bed Section, Measurement Accuracy, Working Efficiency, Portable Device

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

在土木工程和水利工程建设中,经常需要对河流进行水文调查。在获得河流的相关测量信息后,可应用于河流防洪建设、跨河桥梁建设、河底管道建设等。因此,河床断面的测量是水文调查工作的重要组成部分。在常规的小尺度河床断面测量项目中,常用的测量方法是采用全站仪或 RTK 进行断面测量[1] [2] [3]。

使用常规测量方法测量河床横截面时,需要将棱镜杆或 RTK 移动站测量杆的底部放置在河床顶面上,测量人员需要下水或乘船到河面工作。由于测量程序复杂,测量人员在操作中存在一定的危险性,因此迫切需要使用更安全可靠的装置进行河床断面测量[4] [5] [6] [7]。本文采用 500kHz 声波传感器作为水下距离探测装置,安装 GNSS-RTK 平面定位模块,构成水下河床断面测量装置。通过对实测数据的分析,得出了水下超声波测距的基本规律,为中小河床断面测量提供了一些参考意见。

2. 装置设计

随着测量技术的不断发展,市场上出现了许多先进的工程水下地形观测装置[7]-[13]。结合工程测量需要,利用超声波原理和 GNSS-RTK 平面定位原理设计了该装置,该装置包括定位系统、测量系统和数据存储系统[14]-[19]。

2.1. 超声波测距传感器的原理

超声波是一种频率高于 20 kHz 的机械波,它具有反射率强、能量集中、方向性好等特点,被广泛应用于各个领域[20] [21] [22] [23] [24]。超声波可以简单地分为横波和纵波,它们在水下以一定的速度传播。当超声波碰到障碍物时,会反弹回来,然后传感器捕捉到的一部分超声波被转换成电信号。传感器与前方障碍物之间的距离可由式(1)计算。

$$S = T \cdot V / 2 \quad (1)$$

式中, S 为传感器与前方障碍物之间的距离, T 是超声波从发射到接收的时间, V 是超声波的速度。

超声波传感器主要由压电晶体或镍铁铝合金组成。该传感器的输出能量相当可观,机电耦合系数相当大,因此工作灵敏度高,可满足高负荷工况下的运行要求。主要技术指标如表 1 所示。超声波传感器数据传输如图 1 所示。

Table 1. Ultrasonic sensor specifications
表 1. 超声波传感器技术指标

技术指标			
产品	500F35TR-1F	分辨率	1 mm
频率	500 kHz	角度	8°
范围	30~10000 mm	工作电压	5~24 V
精确度	±1 mm + 0.1%	空载供电电流	≤20 mA

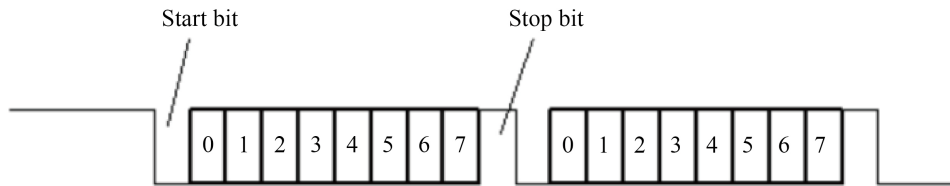


Figure 1. Schematic diagram of data transmission for ultrasonic sensors
图 1. 超声波传感器数据传输原理图

2.2. 高程测量系统

高程测量系统由传输频率为 500 kHz 的超声波传感器和 USB-TTL 信号转换器组成。采集到的数据通过 STM32 芯片和无线传输设备传输到计算机。其芯片主控程序电路图如图 2 所示。

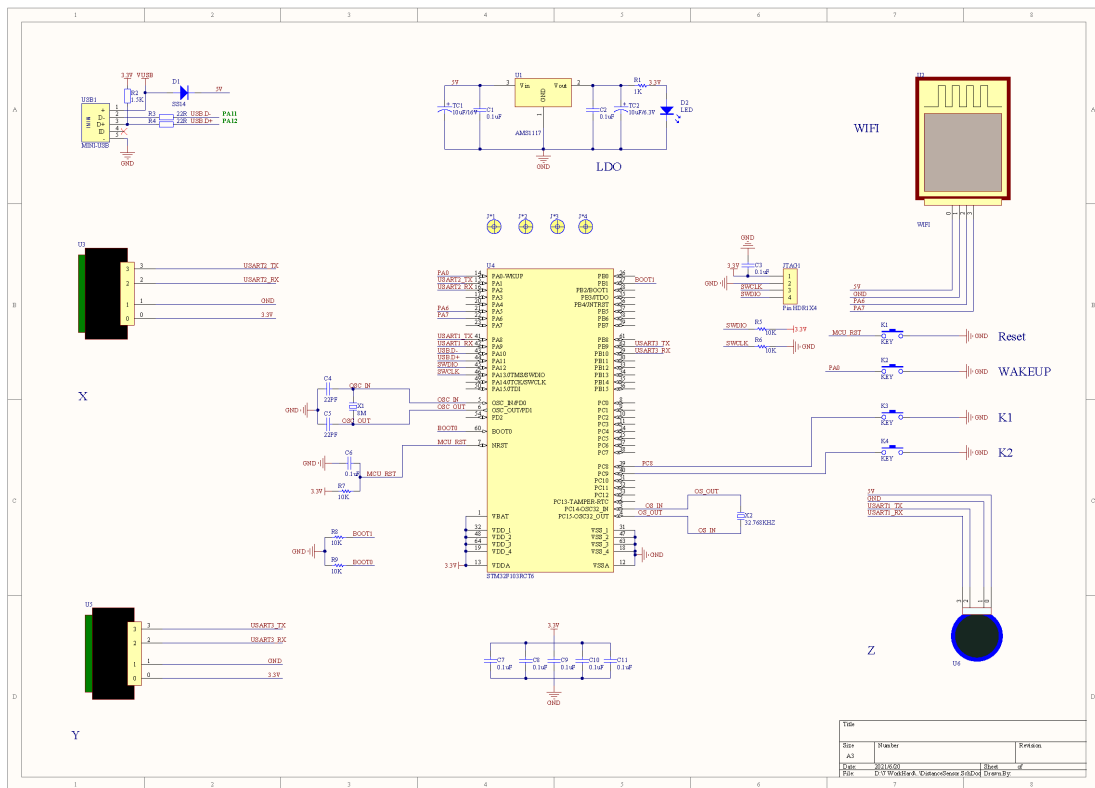


Figure 2. Circuit diagram of the STM32 chip's main control programs
图 2. STM32 芯片主控程序电路图

2.3. 测量误差及校正与平面定位系统

根据 GB50026-2007 对水下河床空间坐标仪的测量误差进行了修正。修正后的测量误差见表 2。水下河床空间坐标自动装置如图 3 所示。平面定位系统根据 RTK 定点差分法原理工作，其电路逻辑框图如图 4 所示。

Table 2. Water depth error at the same measuring point
表 2. 同一测点水深误差

序号	水深范围(m)	测点深度误差(m)
1	0~4	0.10
2	0~10	0.15
3	0~20	0.20
4	>20	$H \times 1.5\%$



Figure 3. Automatic device for spatial coordinates of underwater riverbed

图 3. 水下河床空间坐标自动装置

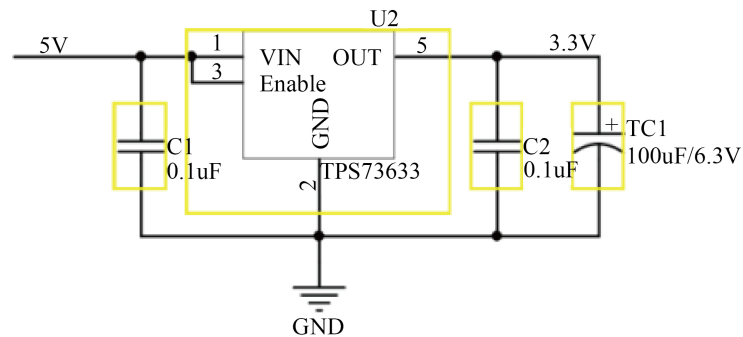


Figure 4. RTK circuit logic block diagram

图 4. RTK 电路逻辑框图

3. 软件设计

软件设计的目的是将超声波传感器修改后的水深数据与 GNSS-RTK 的大地测量数据组成三维坐标。软件设计过程如图 5 所示。该软件采用了远程传输系统的设计，可实现 5G 高速网络进行数据传输。

通过在 STM32 芯片上编写定位程序，实现对控制单元平面定位的实时控制。仰角系统中超声波传感器采集的信号通过 STM32 芯片传输到计算机。

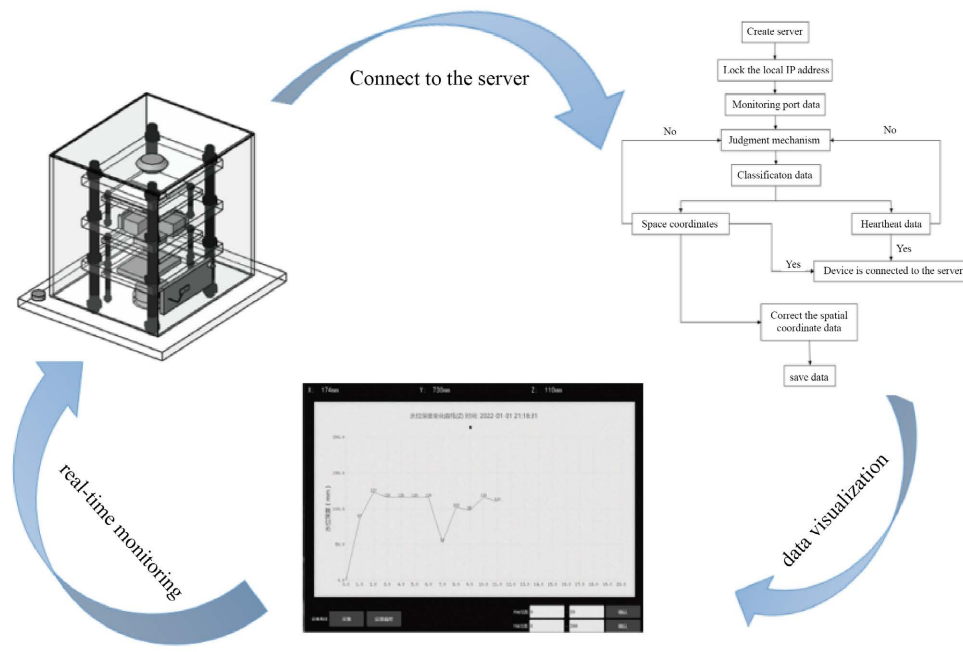


Figure 5. Demo program display interface
图 5. 演示程序显示界面

4. 结果与讨论

4.1. 全站仪的测量

使用全站仪进行测量需要皮划艇、棱镜、测手器等，全站仪调平校正后，选取一个坐标基点作为岸上测量基准点，开始测量操作。从图 6 可以看出，全站仪所测量的河床误差分布较为分散，不利于测量数据的修正。从图 6 和图 7 可以看出，高程呈先降低后升高的趋势，与真实河床相比，全站仪测得的河床高度有较大差异，其中误差组的标准差高达 12.229。原因可能是由于淤泥的存在、测量员的技术、河流流速等原因造成的。

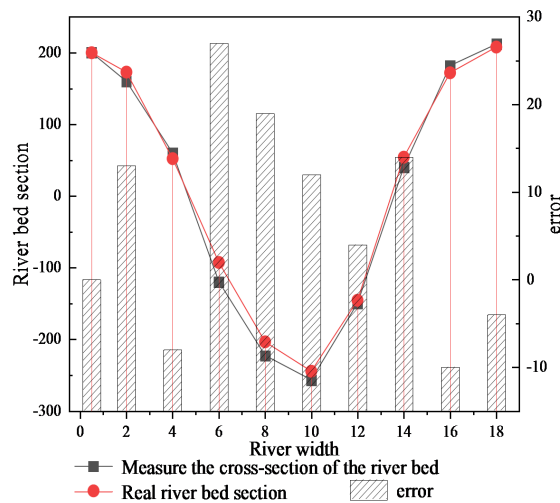


Figure 6. Total station riverbed measurement error map
图 6. 全站仪河床测量误差图

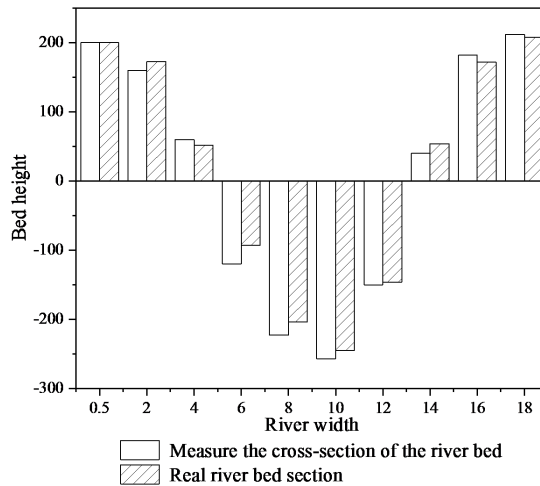


Figure 7. Total station riverbed survey map
图 7. 全站仪河床测量图

全站仪测得的河床断面如图 8 所示。结果表明，全站仪测得的河床断面与实际河床断面存在较大误差，其中最大误差为 632 mm，最小误差为 100 mm。通过测量数据发现，全站仪测量数据均高于实际河床断面，原因可能是全站仪在测量河床断面时，会受到河床水流波动的影响，形成较大误差，而且河道杂物多，导致测量时信号反馈的较快。

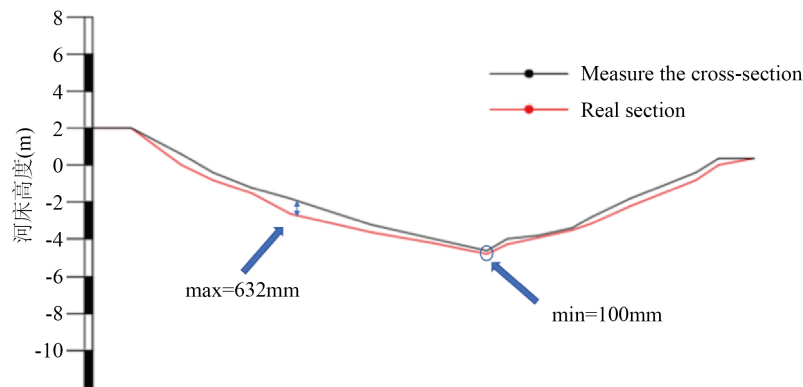


Figure 8. Total station measurement section difference map
图 8. 全站仪测量断面差异图

4.2. 新装置的测量

在采集水下河床空间坐标之前，确保设备连接的计算机能够接收到超声传感器的实时数据[13] [14]。在 Demo 软件中显示自动绘制的河床剖面图。处理后的河床剖面图如图 9 所示。从图 9 可以发现，新装置测量的曲线与实际河床的曲线几乎重合，说明新装置在测量河床上具有一定的可靠性和实用性。

新装置的测量过程如下：首先对便携式装置进行了调试。其次，将 Demo 软件中的误差设置调整为零。然后将该装置放置在流速不大于 2.5 m/s 的河面上。最后，开始测量操作。测量所需的工具包括一个电源单元、一个新设备、一台计算机等，相较于全站仪所需的测量的工具，相对更简单和方便，在测量河床上节省大量的人力和物力，且可以为实际测量时提供可持续检测。

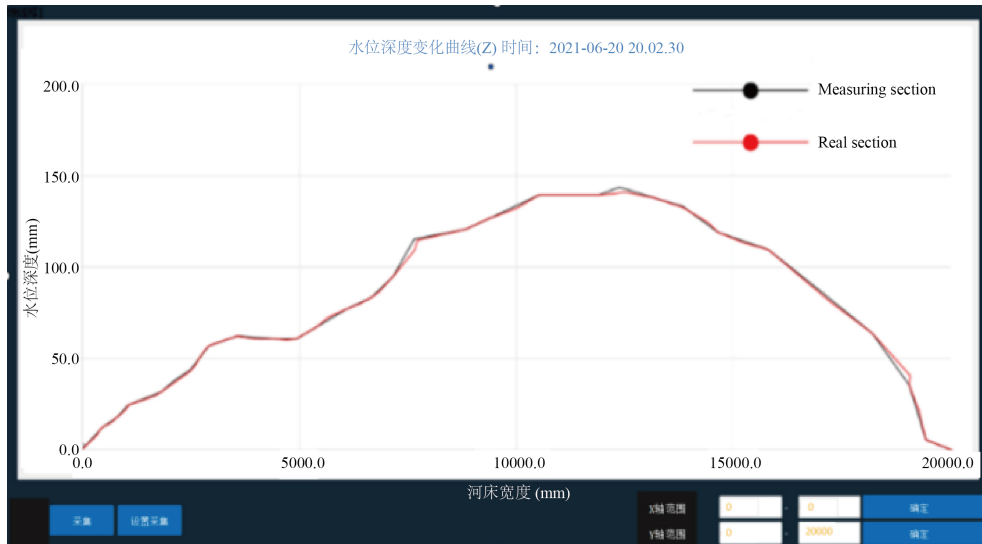


Figure 9. The difference between the measured riverbed section and the measured section
图 9. 实测河床断面与实测断面的差值

图 10、图 11 分别为装置河床测量示意图和装置河床测量误差图。从图 10 可以看出，真实河床高程与该新装置测得的河床高程相似。从图 11 可以看出，河床高程测量误差两侧高、中间低。结果表明：测量的最大误差为 12 mm。误差组的标准差为 3.749，相较于全站仪，测量数据的波动性较小，测量结果更为可靠。

经过反复的测量研究，新装备发现出现较大的误差的主要原因是由于装置受到河流速度的影响，如图 12 所示。在测量河床时，装置采集到的河床高程(H')与实际河床高程(H)的关系如(2)所示。

$$H = H' \cdot \cos \theta \tag{2}$$

式中， H' 为装置采集到的河床高程， θ 为与垂直角度值的偏差， H 为河床的仰角距离。还安装了一个水平气泡，以确保装置的绝对垂直度。

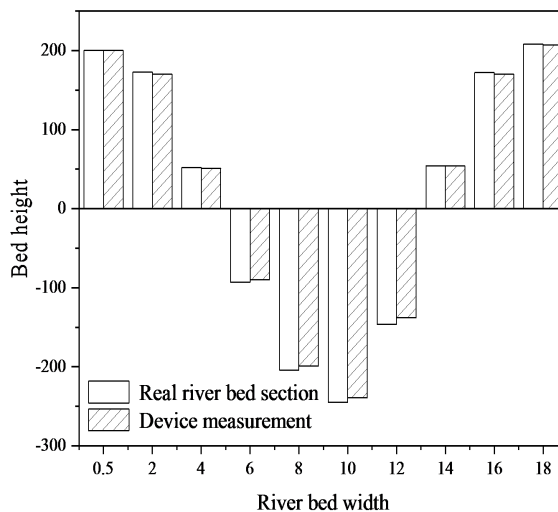


Figure 10. Schematic diagram of the device measurement
图 10. 装置测量示意图

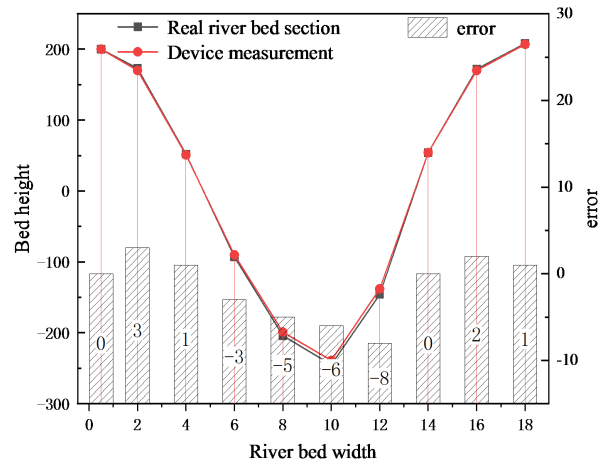


Figure 11. Measurement error diagram of the device riverbed
图 11. 装置河床测量误差图

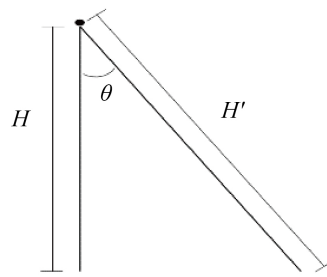


Figure 12. Error graph
图 12. 误差图

通过测量的结果，研究发现出现不同误差数值后，可对不同水深测量后的误差进行修正，见表 3。

Table 3. Ultrasonic sensor specifications
表 3. 超声波传感器技术指标

序号	水深范围(m)	斜率(°)	误差(mm)
1	0~3	0.5	1
2	0~5	1	2
3	0~7	1.5	5
4	0~9	2	10

全站仪测得的河床断面如图 8 所示。结果表明，全站仪测得的河床断面与实际河床断面存在较大误差，其中最大误差为 632 mm，最小误差为 100 mm。通过测量数据发现，全站仪测量数据均高于大于实际河床断面，原因可能是全站仪在测量河床断面时，会受到河床水流波动的影响，形成较大误差，而且河道杂物多，导致测量时信号反馈的较快。

4.3. 工作效率与精度

新装置在河道测量时，测量员只需要通过无线装置远程控制装置，就可以在不同的点获取数据。图

13 为全站仪与新装置的工作效率差异。时间分布如图 13(a)所示。从图 13(a)可知,新设备测量各点河床标高相较于全站仪测量的所需时间较短,最高仅仅只需要 30 秒,而全站仪最高可达 600 秒,新装置所需要测量时间远小于全站仪,从而提高工作效率。测量总时间如图 13(b)所示。通过图 13(b)可知,采用新装置的总效率较全站仪提高了 94.42%。

图 14 为基于全站仪和新装置的测量误差图。从图 14 可知,新装置的数据误差远小于全站仪的数据误差,如图 14 所示,装置的标准数据偏差为 3.749,全站仪的数据标准差为 12.229,可见该装置相较于全站仪的测量更为稳定,误差更少。

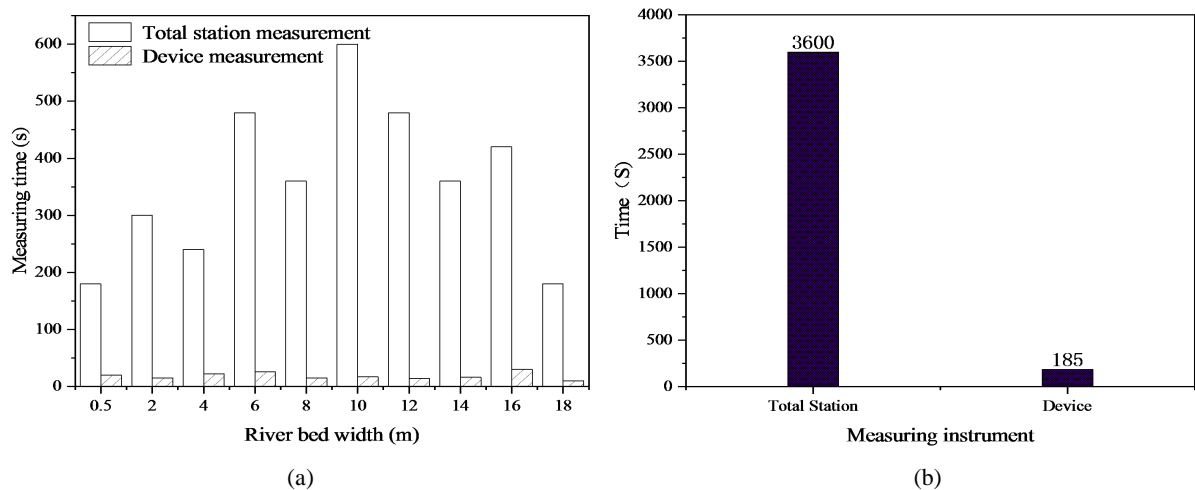


Figure 13. Efficiency comparison chart
图 13. 效率对比图

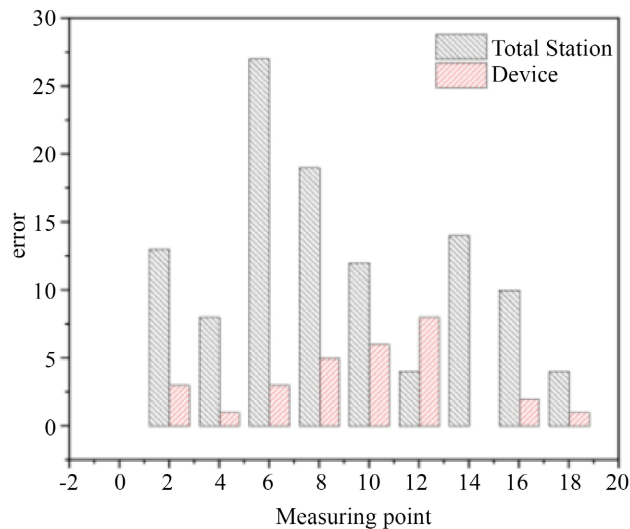


Figure 14. Measurement error based on total station and new equipment
图 14. 基于全站仪和新装备的测量误差

4.4. 新装置的平面定位系统

通过初步的试验验证,平面定位系统的平面坐标误差主要与测量过程中的现场天气和测量位置有关。

通过 20 个不同测量点位, 分别在晴朗天气与恶劣天气时进行数据测量, 得出误差数据。其中 1~7 号为河流急流位置(大于 1 m/s), 8~14 号为河道缓流位置(小于 0.3 m/s), 15~20 号为河道中速流位置(0.3~1 m/s)。其误差数据如图 15 所示。从图 15 可以看出, 在晴朗天气下, 河流急流的位置的平均误差值远大于河道中速流位置与缓流位置, 分别提高了 31.78%、59.61%, 说明在晴朗天气下, 河道的流速会使误差数值增大。再次观察图 15 可知, 在恶劣天气和晴朗天气下, 测量的数据整体趋势基本一致, 其中在天气晴朗时, 误差最大为 8 毫米, 而在恶劣天气时误差最小为 12 毫米, 最大可达到 21 毫米。原因可能是恶劣天气会带来较高的风速, 导致测量设备的振动或移动, 从而影响测量结果的稳定性。此外, 较高的风速还可能携带灰尘、颗粒物等, 而从降低传感器的清晰度, 进一步影响定位系统的性能。

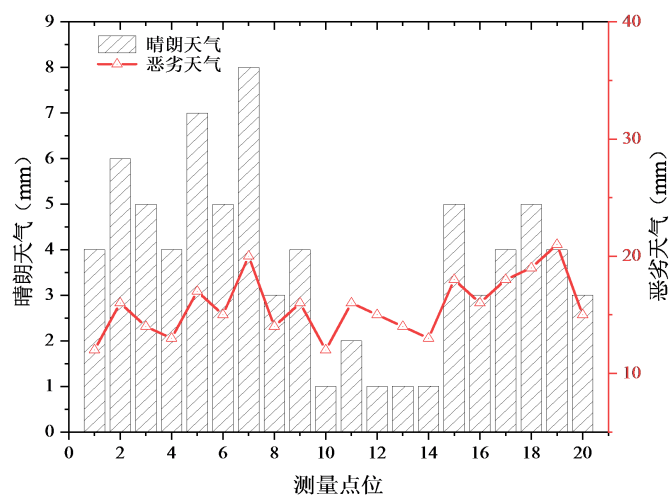


Figure 15. Schematic diagram of plane coordinate error
图 15. 平面坐标误差示意图

5. 结论

全站仪的测量

该装置对河床断面进行测量, 并在测量过程中自动捕获信息。该装置的应用解决了全站仪在水下测量中测量误差大、工作效率低等问题, 并且该装置目前是一种体积较小、重量较轻的便携式装置。本研究主要得出以下结论:

- 1) 采用该装置进行河床断面测量。测量数据精度可达 12 mm, 这远高于现有全站仪的精度。
- 2) 该装置用于河床断面测量时, 工作效率较全站仪提高了 94.42%。

与全站仪测量的标准差 12.229 的测量稳定性相比, 新装置的测量稳定性提高了 69.34%。数据分析表明, 该装置的测量误差波动比全站仪小得多, 具有较高的稳定性。

参考文献

- [1] 范百兴, 夏治国. 全站仪无棱镜测距及精度分析[J]. 北京测绘, 2004(1): 28-31.
- [2] Luo, Y., Chen, J., Xi, W., et al. (2016) Analysis of Tunnel Displacement Accuracy with Total Station. *Measurement*, **83**, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.01.025>
- [3] 孙飞, 吴新明, 吕鸿燕. Excel 函数图表在河床横断面资料整编中的应用[J]. 江苏水利, 2010(6): 13-14.
- [4] 何茂清. 河工险段中河床断面测量方法[J]. 东北水利水电, 2004(1): 48-50.
- [5] 刘子龙. 一种河床断面图控件的绘制方法[J]. 电子世界, 2020(8): 76-77.

- [6] Sun, H.T., Du, H. Li, M.G., *et al.* (2021) Study on Ray-Tracing-Based 3D Reconstruction Method for Underwater Measurement in Glass-Flume Experiments. *Measurement*, No. 3, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.108971>
- [7] 徐开兴. GGC-401A 型河床断面测绘仪通过验收[J]. 应用声学, 1992(1): 49.
- [8] 徐开兴. GGC-401A 型河床断面测绘仪[J]. 技术经济信息, 1991(5): 9.
- [9] 谈国君. 超声波测深仪和 GPS 定位系统在河道河床水下地形测量中的应用[J]. 江苏水利, 2010(6): 28-29.
- [10] 郭志毅, 侯敏, 徐佳培. 全数字回波测深仪结合 GPS-RTK 在三河闸引河河床断面观测中的运用[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(8): 184-185.
- [11] Klopfer, F., Hammerle, M. and Hofle, B. (2017) Assessing the Potential of a Low-Cost 3-D Sensor in Shallow-Water Bathymetry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **14**, 1388-1392. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2713991>
- [12] 张振军, 杨松, 杨建. 基于 GNSS 三维测量的河床空间信息一站式获取技术[J]. 水力发电, 2019, 45(9): 75-79.
- [13] 秦亮亮. 无人船在水下地形测量中的应用[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(15): 169-171.
- [14] Xu, X., Qian, Z., Bi, Y., *et al.* (2022) Underwater Dynamic Distance Measurement Using a Cross-Sampling Dual-Comb. *Optics Communications*, **2022**, Article ID: 128319. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2022.128319>
- [15] 宁新龙. 浅析无人测量船在水下地形测量中的应用前景[J]. 水利建设与管理, 2021, 41(3): 47-50.
- [16] 周尚伟. 测深仪与 GPS 组合在水下地形测量中的应用[J]. 中国住宅设施, 2020(12): 85-86.
- [17] Chourasiya, S., Mohapatra, P.K. and Tripathi, S. (2017) Non-Intrusive Underwater Measurement of Mobile Bottom Surface. *Advances in Water Resources*, **104**, 76-88. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.03.009>
- [18] 陈俊任, 周晓华. 无人船测量系统在水下地形测量中的应用[J]. 测绘技术装备, 2020, 22(4): 65-68.
- [19] 关雷, 郑宝华, 赵琳, 等. 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.
- [20] Sánchez, P.J.B., Papaalias, M. and Márquez, F.P.G. (2020) Autonomous Underwater Vehicles: Instrumentation and Measurements. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, **23**, 105-114. <https://doi.org/10.1109/MIM.2020.9062680>
- [21] Giordano, F., Mattei, G., Parente, C., *et al.* (2015) Integrating Sensors into a Marine Drone for Bathymetric 3D Surveys in Shallow Waters. *Sensors*, **16**, Article No. 41. <https://doi.org/10.3390/s16010041>
- [22] 齐珺, 马刚, 任宪伟, 等. 海洋测量水下拖曳设备的位置计算方法研究[J]. 海洋测绘, 2020, 40(5): 15-20.
- [23] Kozyra, A., Skrzypczyk, K., Stebel, K., *et al.* (2017) Remote Controlled Water Craft for Water Measurement. *Measurement*, **111**, 105-113. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.018>
- [24] Gatti, M. (2022) Measurement of Vibration Frequencies of Ties in Masonry Arches by Means of a Robotic Total Station. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **21**, 489-500. <https://doi.org/10.1007/s11803-022-2099-y>