

# 内河山区航道疏浚工程水下地形 测量方法及精度控制\*

闫小平<sup>1</sup>, 卢自来<sup>2</sup>

(1. 四川港投经济技术研究有限公司, 四川 成都 610023; 2. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

**摘要:** 针对四川省内河山区航道疏浚工程中水流湍急、水位非恒定变化等复杂水文条件导致的传统验潮测量效率低、精度稳定性不足, 以及无人测量船动力与续航受限等问题, 以岷江下游航道为研究对象, 系统开展基于机动船载实时动态差分(RTK)与测深仪集成的无验潮模式水下地形测量方法及其精度控制技术的研究。通过构建RTK实时定位与数字测深仪的协同作业平台, 集成声速实时校正、仪器安装垂直度控制、多区域坐标转换参数优化、船速与船姿动态调控等关键技术, 辨识复杂水文条件下的主要误差源, 并提出多维度精度控制策略。结果表明, 该无验潮测量模式在急流与非恒定流条件下具有显著的技术优势与工程适用性, 可为类似环境下的航道疏浚提供高精度、高效率的测量技术支持, 并为智能无人测量船的研发与应用提供实践参考。

**关键词:** 内河; 航道疏浚; 水下地形测量; 精度控制

中图分类号: U612.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)03-0178-08

## Method and accuracy control for underwater topographic surveying in inland river mountain channel dredging project

YAN Xiaoping<sup>1</sup>, LU Zilai<sup>2</sup>

(1. Sichuan Port Investment Economic and Technical Research Co., Ltd., Chengdu 610023, China;

2. Sichuan Transportation Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

**Abstract:** Addressing the bottlenecks of low efficiency and insufficient accuracy stability in traditional tide gauge measurements, and the insufficient for power and endurance of unmanned survey vessel (USV) during inland channel dredging projects in Sichuan Province caused by complex hydrological conditions such as swift currents and fluctuating water levels, we systematically investigate a non-tide-gauge underwater topographic surveying method and its precision control techniques. The method integrates mobile vessel-mounted RTK (real-time kinematic) with echo sounders, using the lower reaches of the Minjiang River as a representative case study. By establishing a collaborative platform integrating the RTK real-time positioning system with digital echo sounders, and applying key technologies such as real-time sound velocity correction, precise control of instrument verticality, optimisation of multi-region coordinate transformation parameters for survey areas, and dynamic regulation of vessel speed and attitude, we thoroughly identify critical error sources affecting measurement accuracy under complex hydrological conditions, and propose a multi-dimensional accuracy control strategy. The findings demonstrate that the non-tidal gauge survey mode exhibits significant technical advantages and engineering applicability in rapid-flow and non-steady-flow bathymetric scenarios. It provides high-precision, high-efficiency surveying technical support for the similar conditions, while also offers crucial practical reference for the development and application of intelligent USV.

**Keywords:** inland river; channel dredging; underwater topographic surveying; accuracy control

收稿日期: 2025-07-11 录用日期: 2025-09-18

\*基金项目: 四川省港航投资集团有限责任公司科技项目(BS-KJ-2022-029)

作者简介: 闫小平(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事工程测量工作。

近年来,随着我国内河水运的不断发展,河道疏浚测量的重要性日益凸显。根据《四川省内河水运发展规划(2023—2035年)》<sup>[1]</sup>:2035年,基本建成“航道通江达海”的现代化内河水运体系。为进一步挖掘岷江航运潜能,下游河道开展“梯级渠化”工作,达到内河Ⅲ级航道尺度标准,常年通行1000吨级船舶<sup>[2]</sup>。目前,岷江犍为梯级电站已蓄水发电,而其上下游的老木孔、东风岩、龙溪口枢纽仍在施工,岷江中下游梯级电站调控体系仍未建成,汛期水流量大、流速急,水下环境复杂,对疏浚测量精度的控制造成不利影响。

内河航道疏浚测量中,最主要的工作是为河道疏浚提供准确的水深及地形数据。水下地形测量中地形点的河底高程一般由水位减对应的水深求得,水深则通过测深仪直接测得。传统水下地形点水位测量需通过建立测区水位模型推导而得。对于山区天然河道,流量水位非恒定,水位模型建立困难,导致测深精度难以得到有效保障。近年来,随着全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)定位技术的快速发展,利用实时动态差分(real-time kinematic, RTK)的无验潮技术逐渐成为提高水下地形测量精度和效率的重要手段。该技术通过RTK实时获取水面高程,结合测深仪数据直接计算河底高程,避免了传统验潮方式中的水位推估误差,尤其适用于水流湍急、水位变化剧烈的内河非恒定流河段<sup>[3]</sup>。田雨等<sup>[4]</sup>验证了近海区域精密单点定位( precise point positioning, PPP)-RTK模式下无验潮作业方法的可靠性;夏晓亮等<sup>[5]</sup>运用动态后处理定位(post-processed kinematic, PPK)无验潮技术解决长距离观测中RTK差分信号失锁而降低测深精度的难题;牛冲<sup>[6]</sup>利用连续运行参考站(continuously operating reference station, CORS)-RTK无验潮技术得到的成果数据内符合精度的不符值比例为2.82%,外符合精度平均值为0.11 m。然而,在内河山区河流,无验潮技术的应用仍面临诸多挑战,如复杂水情、设备安装误差、声速变化等因

素均会对测量精度产生显著影响<sup>[7]</sup>。因此,系统分析无验潮测量中的误差来源,并提出相应的精度控制措施,具有重要的工程应用价值。

虽然无人测量船+多波束测量是当前及未来一段时间水下地形测量的前沿方法,但无人船区高流速情况下仍存在动力与续航不足,无法发挥其浅水作业优势;多波束系统设备贵、内业数据处理复杂,应用仍偏少。采用机动船载RTK与测深仪相结合的无验潮作业模式设备造价低廉、安装方便、数据处理便利,在山区河流航道疏浚测量有较好的适用性,应用极为普遍,但存在复杂水环境下精度不高的不足。当前关于无验潮作业模式的研究较多,但关于适用于山区河流航道疏浚,如何系统地提高水下测量精度方面的研究较少。本文结合具体工程案例系统验证无验潮模式在山区内河非恒定流河道中的适用性与精度表现,为类似条件下的航道疏浚测量提供技术依据和工程参考。

## 1 航道疏浚水下地形测量方法

### 1.1 水下地形测量方法

传统的水深测量方法为人工使用测深锤、测深杆等工具进行测量。自20世纪80年代以来,以海洋深水测量为应用方向的各种新型测深系统相继问世,至今已经应用到浅水测量。目前内河航道水下地形测量方法主要为机动船载RTK+测深仪验潮模式测量和无验潮模式测量、无人测量船载单波束或多波束测量等。

#### 1.1.1 机动船载RTK+测深仪验潮模式测量和无验潮测量

验潮模式测量是通过附近的验潮站获取时段范围的水面高程,通过水面高程减去测量的水深计算得到水底高程。而无验潮模式测量无需验潮,具有全天候、实时快速测量、节省人工验潮成本、避免潮位观测误差等多种优势<sup>[8]</sup>。

#### 1.1.2 无人船载单波束或多波束测深系统

无人船载单波束测深仪是内河低流速库区测量主要技术手段之一,具有作业效率高、作业人

员涉水风险低的优势<sup>[9-10]</sup>。无人船载多波束系统是以无人船为载体，集 GNSS 定位、多波束和惯性导航于一体的水下三维地理信息数据采集系统，具有数据完整全面、精度高等优点<sup>[11-12]</sup>。

### 1.2 无验潮测量系统

#### 1.2.1 测量系统的组成

RTK 无验潮测深系统一般由 RTK 实时定位、测深、导航等 3 部分组成。RTK 实时定位系统包括卫星、基准站或网络基站 CORS 系统、流动站；测深系统为测深仪和声速测量仪等配套测深仪器；导航系统主要由导航载体测船、导航软件组成<sup>[13-14]</sup>。

#### 1.2.2 测量系统的测量原理

根据 GNSS 天线测得的大地高，测深设备测得的水深，通过天线大地高减去测杆长度和测深仪吃水深度，获得水底大地高，根据区域似大地水准面模型求得水底高程异常，获取水底正常高。无验潮模式测量原理见图 1。

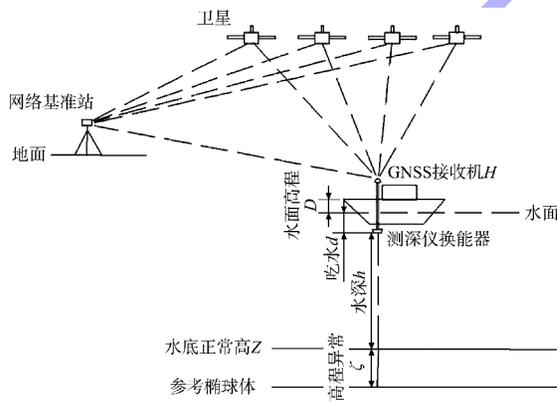


图 1 无验潮模式测量原理

Fig. 1 Measurement principle of tide-free measurement mode

图 1 中  $H$  为 GNSS 接收机大地高， $D$  为水面高， $d$  为换能器吃水深度， $h$  为测深仪测得水深， $\zeta$  为高程异常值。该点水底的正常高  $A$  的关系式为：

$$A = H - D - h + \zeta \quad (1)$$

由测量原理可知，影响无验潮测量水下地形精度的因素主要包括 GNSS 定位、测深设备安装、水传播声速、坐标转换、船速等。

### 1.3 无验潮水下地形测量的影响因素分析

#### 1.3.1 GNSS 定位

影响 GNSS 定位测量精度的因素有很多，如：受电离层影响较大可能无法得到固定解，导致测量结果的不准确；设备数据传输中存在误差等。可对 GNSS 设备预先校检，采用双频或多频接收仪等措施以提高测量的精度。夏日测量期间，宜规避正午前后、雷电活动前后时段。采用 CORS 网定位服务，平面精度为  $\pm 3$  cm，高差为  $\pm 5$  cm，能够满足航道疏浚测量的精度要求。

#### 1.3.2 仪器安装

测深仪与 GNSS 连线未处于铅垂线方向，形成偏角  $\alpha$ ，产生系统误差，仪器不垂直安装见图 2。

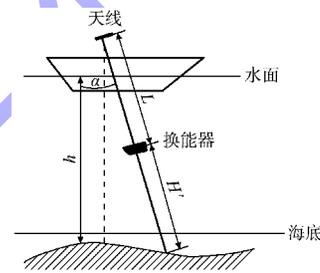


图 2 仪器不垂直安装

Fig. 2 Non-vertical instrument installation

图 2 中， $L$  为天线至换能器长度， $H'$  为测深仪实测水深， $h$  为理论水深， $\alpha$  为天线与换能器连线与铅垂方向夹角。由式(2)、(3)可以计算 GNSS 天线与测深仪平面位置不对应引起的误差。

水深值的误差公式为：

$$x = (L + H') \cos\alpha - h \quad (2)$$

水平位移的误差公式为：

$$y = (L + H') \sin\alpha \quad (3)$$

为消除或减弱此误差影响，在安装时要保证仪器连接处于铅垂线方向。

#### 1.3.3 声速

通过在不同水深条件下实测声速值试验声速变化对测深影响，试验情况见表 1。可以看出，水深越深，声速值的改变对测深精度影响越大。

表1 声速改变对水深测值影响对比

Tab. 1 Comparison of influence of sound velocity change on measured water depth

深度/m		变化值/m
声速 1 447 m/s	声速 1 482 m/s	
2.00	2.05	0.05
5.00	5.12	0.12
10.00	10.24	0.24

声速测量的主要方法有: 1) 利用河段水文资料(温盐)公式计算声速; 2) 采用声速仪直接测量。需要根据具体状况制定声速测量方案, 减弱其对测深的影响。

### 1.3.4 坐标转换

航道疏浚工程测区一般较长, 如岷江下游航道整治一期工程测区长度近 50 km。采用一套坐标转换公式投影变形较大, 难以满足整个测区水下地形精确测量的要求。因此, 可将测区分为若干个区域, 布设控制点, 采用重叠控制点衔接, 削弱误差累积效应, 提高测量精度。根据项目实践, 高程异常值精度可达到厘米级。

### 1.3.5 船速

船速对测量结果的影响是很明显, 船速与测量深度误差曲线见图 3。

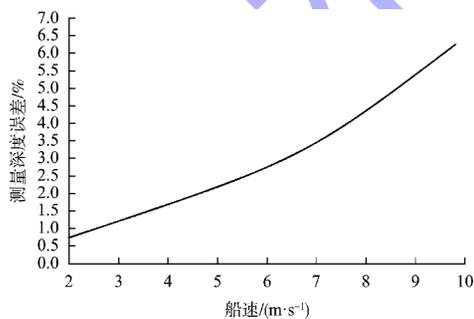


图3 船速与测量深度误差曲线

Fig. 3 Curve of vessel speed versus measured depth error

由图 3 可以看出, 深度测量误差与船速呈明显的正相关关系, 且增长趋势逐渐加快(非线性)。

当船速较低时(如 2~4 m/s), 误差增长缓慢, 误差控制在 1.6% 以内, 这是高精度测量作业的理想速度区间; 当船速超过 6 m/s 后, 误差开始显著增大; 当船速达到 10 m/s 时, 误差已高达 6%, 这对于需要高精度的水深测量来说不可接受。船速过快时, 水体扰动增加, 测深仪换能器周围湍流和气泡较多, 湍流和气泡影响换能器发射得超声波在水下的发射和接收, 造成测量得到“假水深”。

为尽量减小船行驶水浪对测量仪器的影响, 将 RTK 设备和测深仪安装在船舶中央靠前 1/3~1/2 处, 绑扎务必牢固, GNSS 设备天线高至换能器底长度应准确测量。在测量过程中, 船速宜控制在 2~4 m/s。

### 1.3.6 船姿

在大风天气或波浪较大时候开展水深测量, 测船纵摇、横摇过大。船姿的变化使测深法线不能与深度基准面垂直, 影响水下地形点测量精度。由于风力、波浪等外部环境难以控制, 该误差属随机误差。故测量时应规避大风、大浪环境, 在风浪较小时段测量, 并借助姿态传感器修正。

## 2 水下地形测量精度控制措施

为确保无验潮模式下水下地形测量的精度, 需要系统控制各类误差来源<sup>[15-16]</sup>。结合岷江下游航道实际工况, 从声速校正、仪器安装、坐标转换、船速与船姿控制、数据采集与处理等方面提出以下精度控制方法, 并体现了多项技术创新与改进。为内河急流与非恒定流河段提供了可推广的高精度测量方案, 与传统方法精度控制对比见表 2。

表2 无验潮水下地形测量方法精度控制对比

Tab. 2 Comparison of precision control measures between proposed and traditional un-tided underwater topographic surveying methods

方法	声速校正	仪器安装误差校准	坐标转换与投影控制	船速与船姿控制	数据采集与处理
传统方法	单一声速剖面或经验公式校正	未提及或简单铅垂校准	单一投影带、单一高程模型	船速固定或无自适应控制;船姿修正较弱	依赖人工判断;滤波方法较简单
本文方法	实时声速采集(每10 min 1次)、分层声速控制(每2 m水深分段)	双星仪辅助校准(偏差 $\leq 0.5^\circ$ )、动态吃水监测传感器实时调整	多分区转换(每带16 km)、高程异常精细化建模(GNSS/水准点拟合)	自适应船速控制(浅水 $\leq 4$ m/s,深水 $\leq 3$ m/s)、INS实时监测与姿态修正	实时质量预警(水深突变阈值)、后处理滑动窗口加权滤波、移动立方体(marching cube, MC)算法
精度提升效果	水深误差降低约40%	显著减少平面与高程系统误差	平面误差 $\leq 5$ cm;高程残差中误差 $\pm 2$ cm,精度提升50%	波浪高度 $\leq 0.5$ m时消除60%以上船姿误差	地形表达更可靠,有效剔除异常值

### 2.1 声速实时校正与分层控制

声速是影响测深精度的关键因素。传统方法多采用单一声速剖面或经验公式,在复杂水文条件下误差显著。作业采用实时声速采集和分层声速控制技术进行改进。

实时声速采集是采用 AML Base-X2 声速仪,每 10 min 自动采集 1 次声速剖面,实时输入测深系统进行校正,避免因水温、盐度变化引起的声速漂移。

分层声速控制是针对水深大于 10 m 的深槽区域(如新开河段),按每 2 m 水深间隔分段校正声速,减少声线弯曲误差。试验结果表明,分层校正后水深误差较单一声速校正降低约 40%。

### 2.2 仪器安装误差精密校准

仪器安装偏差(尤其是非铅垂误差)会导致平面与水深系统误差,项目采用双星仪辅助校准和动态吃水监测。

双星仪辅助校准是在安装时使用双星仪测量 GNSS 天线与换能器的相对位置,确保连线铅垂(偏差 $\leq 0.5^\circ$ ),并通过式(2)、(3)计算残差,在数据处理中予以修正。

动态吃水监测是在船首、尾设置吃水传感器,实时监测换能器吃水深度变化(如因燃油消耗或负载变化引起的船体沉降),动态调整吃水参数,避免高程误差累积。

### 2.3 多分区坐标转换与投影变形控制

针对长距离航道(如岷江 47 km 测区)投影变形问题,本项目提出分区转换策略和高程异常精细化建模。

分区转换策略是将测区划分为 3 个投影带(每带长约 16 km),各带独立计算转换参数,重叠区采用控制点强制符合,确保平面误差 $\leq 5$  cm。

高程异常精细化建模是利用测区 GNSS/水准点拟合高程异常模型,残差中误差控制在 $\pm 2$  cm 内,较传统单一模型精度提升 50%。

### 2.4 船速与船姿优化控制

船速与风浪引起的船姿变化是动态误差的主要来源。本项目创新性提出自适应船速控制和姿态传感器融合解算技术。

自适应船速控制是根据水深动态调整船速(浅水区 $\leq 4$  m/s,深水区 $\leq 3$  m/s),减少湍流与气泡对声波干扰。

姿态传感器融合解算是采用惯性导航系统(inertial navigation system, INS)实时监测纵摇、横摇角度,通过坐标旋转修正换能器平面与高程偏移。试验结果显示,在波浪高度 $\leq 0.5$  m 时,姿态修正后可消除 60% 以上的船姿误差。

### 2.5 数据采集与处理质量控制

1) 实时质量预警是在导航软件中设置水深突变阈值(如相邻点高差 $>1$  m 自动预警),实时提

示操作员复测或减速。

2) 后处理滤波与异常值剔除是采用滑动窗口加权平均滤波剔除跳点,并结合移动立方体 MC 算法生成水底曲面,提高地形表达的可靠性。

### 3 实际案例

岷江下游航道整治一期工程测区跨乐山市犍为县—宜宾市屏山县,河段长度共 47 km。其中按成图比例 1:2 000 开展 12 个滩段疏浚区域水下地形测量,面积约 1.46 km<sup>2</sup>。测区河段水下地形高差起伏大,大部分水深 5~8 m;尤以新开河、斑竹林滩段最深,水深近 20 m,河道水流湍急,给水下测量带来严峻挑战。

水下地形测量空间定位采用华测 X9 型 RTK 设备,利用四川省北斗增强系统定位,测深采用华测 D390 型数字测深仪。测量的主要工作流程如下。

#### 3.1 控制网复测和参数求取

对岷江独立坐标系进行投影长度变形值计算,确定测区投影长度变形值满足 GB 50026—2020《工程测量标准》<sup>[17]</sup>的“测区内投影长度变形不大于 25 mm/km 的要求”。经计算,本项目投影长度变形值最大为 15.598 3 mm/km,满足标准要求。

作业开始前通过已知控制点求得大地坐标与工程坐标转换参数,确立转换关系。

#### 3.2 仪器设置

测深仪设置包括数据接口与输出、声速、吃水深度等,RTK 设置包括连接 CORS 网、投影、转换参数等,设置完成后将测深仪、RTK 与软件平台连接。

#### 3.3 绘制测量范围和计划线

根据每日计划,在华测 AutoPlanner 中设置测量范围,绘计划线,指导测船航行。

#### 3.4 外业数据采集

首先对测量采用的华测 X9 型 RTK 设备利用四川省北斗增强系统进行定位,在测船上安装 RTK 和测深仪设备。将 RTK、测深仪设备开机,RTK 登录 CORS 账号,RTK 固定解确认定位成功,测深系统数据传输正常,测深数据显示。测前,在静水处采用测杆测量水深,同步检查测深

仪测量水深值比对差在 5 cm 以内。数据正常则开动测船,按照计划线匀速测量。

### 3.5 内业数据处理

外业采集的原始数据导入华测 HydroSurvey7 专业水深处理软件,依托其模块化流程进行精细化处理,确保成果可靠性。水深数据处理流程见图 4。

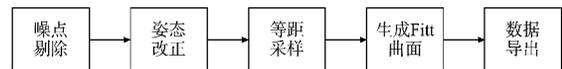


图 4 水深数据处理流程

Fig. 4 Water depth data processing flow

1) 噪点剔除。首先采用阈值法自动识别并剔除明显偏离地形趋势的粗差点(如因气泡、悬浮物导致的异常值),再通过人工交互检查进一步优化。

2) 姿态改正。融合 RTK 定位数据与 INS 记录的横摇、纵摇信息,对每个测点进行三维坐标偏移校正,消除船体晃动带来的定位与水深误差。

3) 等距采样。对非均匀采集的测点进行线性内插,生成沿测线方向等间隔(默认 0.5 m)的水深点序列,保证地形表达的均匀性与准确性。

4) 生成 Fitt 曲面。基于采样后数据,采用不规则三角网(triangulated irregular network, TIN)模型构建水底数字高程模型(digital elevation model, DEM),并利用 MC 算法进行曲面优化,有效压制冗余噪声、还原地形特征。

5) 数据导出。最终输出符合规范要求的标准化水深文本及 CAD 成图文件,供疏浚工程设计及工程量计算使用。

这个系统化处理流程显著提升了数据质量和成果可靠性。

### 3.6 精度分析

#### 3.6.1 两种测量方式精度验证

为了验证测深数据的准确性,验证点的布设遵循均匀性、代表性及覆盖主要地形特征的原则。现场选择流速小于 1 m/s 区域采用测深锤人工实测水深验证,测深锤测点与测深仪检查点平面位置控制在 0.1 m 以内。测深锤与测深仪的测量值比对结果见表 3。

表3 测深锤与测深仪的测量值比对结果

Tab.3 Measurement comparison results of depth measuring hammer and depth measuring instrument m

检测点号	测量值		差值	检测点号	测量值		差值
	测深锤	测深仪			测深锤	测深仪	
1	4.75	4.71	0.04	12	8.34	8.31	0.03
2	5.24	5.28	-0.04	13	5.65	5.62	0.03
3	4.34	4.29	0.05	14	6.67	6.70	-0.03
4	6.27	6.30	-0.03	15	4.33	4.28	0.05
5	8.79	8.74	0.05	16	7.54	7.58	-0.04
6	5.37	5.33	0.04	17	8.28	8.24	0.04
7	6.26	6.21	0.05	18	5.34	5.39	-0.05
8	4.29	4.25	0.04	19	5.67	5.65	0.02
9	7.34	7.29	0.05	20	6.61	6.57	0.04
10	8.17	8.20	-0.03	21	5.89	5.88	0.01
11	8.76	8.74	0.02	22	7.54	7.60	-0.06

在水环境理想的情况下，测深锤测量精度更高，且认为测深锤测量值为真值。由表3可知，验证结果为最大互差绝对值为0.06 m，中误差为±0.04 m，远小于标准规定的0.20 m的限值。

### 3.6.2 水底高程互差比对

岷江下游航道测区范围的最大水深在20 m以内，根据JTS 131—2012《水运工程测量规范》<sup>[18]</sup>，深度比对互差≤0.4 m为合格；比对范围为测深检查线与主测深线相交处图上1 mm范围内的水深点。水深比对互差结果见表4。

表4 水深比对互差结果

Tab.4 Results of water depth comparison difference

比对互差/m	点数/个	占总点数的百分比/%
0~0.1	302	45.4
0.1~0.2	144	31.2
0.2~0.3	16	3.5
0.3~0.4	0	0

经检查，测线和独立检查线高程互差最大为-26.4 cm，中误差为±9.4 cm，满足JTS 131—2012《水运工程测量规范》要求。

## 4 结语

1) 机动船载RTK与测深仪集成的无验潮作业模式，在山区急流、非恒定流河道中表现出良好的适用性，克服了无人船动力不足和多波束系统成本高、数据处理复杂等问题。

2) 本文系统提出了声速实时分层校正、双星仪辅助安装校准、多分区坐标转换、自适应船速与船姿控制等多项技术创新，显著提升了测量精度。实测数据表明，水深中误差控制在±4.0 cm，水底高程中误差为±9.4 cm，满足JTS 131—2012《水运工程测量规范》的限差要求。

3) 在岷江下游47 km航道范围内成功实现了高精度水下地形测量，验证了该方法在复杂水文条件下的可靠性与适应性，具备较强的工程推广价值。

4) 随着智能无人测量平台动力与续航能力的提升、多源传感器融合定位技术的发展以及实时数据处理能力的增强，内河航道水下地形测量将朝着更高水平的自动化、系统集成化和全时域动态监测方向发展，有望全面提升我国内河航道整治与运营维护的技术水平与工程效能。

### 参考文献:

[1] 四川省人民政府. 四川省内河水运发展规划(2023—2035年)[R]. 成都: 四川省人民政府, 2023.  
Sichuan Provincial People's Government. Sichuan inland water transport development plan (2023-2035) [R]. Chengdu: Sichuan Provincial People's Government, 2023.

[2] 王屹, 刘晓帆, 徐昶. 新时代四川内河水运发展思路及对策[J]. 水运工程, 2023(S1): 4-10.  
WANG Y, LIU X F, XU C. Development strategy for inland water transportation in Sichuan Province in new era[J]. Port & waterway engineering, 2023(S1): 4-10.

[3] 刘超群, 朱运权, 马学良, 等. 四川数字航道建设现状分析及未来发展策略探讨[J]. 长江技术经济, 2025, 9(2): 38-46, 81.  
LIU C Q, ZHU Y Q, MA X L, et al. Current situation of Sichuan digital waterway construction and discussion on future development strategy[J]. Technology and economy of Changjiang, 2025, 9(2): 38-46, 81.

[4] 田雨, 杨俊凯, 颜惠庆, 等. PPP-RTK技术在长江口无验潮水深测量中的应用[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(11): 42-45.  
TIAN Y, YANG J K, YAN H Q, et al. Application of PPP-RTK in bathymetric survey without tide observation in the Yangtze Estuary [J]. China harbour engineering, 2022, 42(11): 42-45.

- [5] 夏晓亮, 龚令平, 魏荣灏, 等. PPK 无验潮技术在杭州湾跨海大桥河势断面观测中的应用[J]. 浙江水利科技, 2022, 50(6): 24-26, 31.  
XIA X L, GONG L P, WEI R H, et al. Application of underwater profile survey in Hangzhou Bay Bridge based on PPK without tidal observation[J]. Zhejiang hydrotechnics, 2022, 50(6): 24-26, 31.
- [6] 牛冲. 基于 CORS-RTK 无验潮的海岸带水下地形测量精度分析[J]. 海洋测绘, 2021, 41(6): 36-39.  
NIU C. Accuracy analysis of underwater topographic survey in coastal zone based on CORS-RTK without tide survey[J]. Hydrographic surveying and charting, 2021, 41(6): 36-39.
- [7] 汪丽玲, 汪闫林, 张文强. 在长江江苏段基于 RTK 的无验潮测量及精度测试[J]. 人民珠江, 2018, 39(4): 59-61.  
WANG L L, WANG S L, ZHANG W Q. Non-tidal observation measurement and accuracy test based on RTK in Jiangsu section of Yangtze River [J]. Pearl River, 2018, 39(4): 59-61.
- [8] 刘元, 李国伟, 王新田, 等. 无验潮模式水下地形测量误差分析及优化[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(3): 130-132.  
LIU Y, LI G W, WANG X T, et al. Error analysis and optimization of tide-independent underwater topographic survey[J]. Technology innovation and application, 2022, 12(3): 130-132.
- [9] 刘超群, 卢自来, 刘敏, 等. 基于无人机和无人船的河(江)道地形测绘技术应用[J]. 水运工程, 2023(S1): 138-142.  
LIU C Q, LU Z L, LIU M, et al. Application of river channel topography mapping technology based on UAVs and unmanned ships [J]. Port & waterway engineering, 2023(S1): 138-142.
- [10] 杨少愚, 孙睿英, 任思思. 无人船在水下地形测量应用中的可靠性分析及工艺流程优化[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(S1): 233-236.  
YANG S Y, SUN R Y, REN S S. Reliability analysis and process optimization based on unmanned surface vessel in the application of underwater topography [J]. Geomatics & spatial information technology, 2021, 44(S1): 233-236.
- [11] 李庆松. 基于无人机机载激光和无人船多波束下水陆一体化三维测量技术应用和探讨[J]. 水利技术监督, 2021(11): 42-45.  
LI Q S. Application and discussion of integrated land-water 3D surveying technology based on UAV airborne LiDAR and USV multibeam system [J]. Technical supervision in water resources, 2021(11): 42-45.
- [12] 王宝江. 基于多波束测深系统的 RTK 三维水深测量技术应用研究[J]. 北京测绘, 2014(6): 48-51.  
WANG B J. Multi-beam sounding system and RTK three-dimensional bathymetric survey technology combined application analysis[J]. Beijing surveying and mapping, 2014(6): 48-51.
- [13] 魏凌飞, 魏为. 无验潮模式水下地形测量技术应用研究[J]. 人民长江, 2016, 47(S1): 56-58, 62.  
WEI L F, WEI W. Research on the application of tide-independent underwater topographic surveying technology [J]. Yangtze River, 2016, 47(S1): 56-58, 62.
- [14] 时小飞. 基于网络 RTK 的无验潮水深测量系统及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.  
SHI X F. Hydrographic surveying without tidal observation system based on network RTK and applied research [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [15] 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.  
CUI K S, CAO Z W, SONG X J, et al. Error analysis and control method of RTK non-tide bathymetric survey[J]. Journal of geomatics, 2019, 44(3): 38-41.
- [16] 卢军民, 安延云, 张东明, 等. 无验潮测深技术中影响水深测量精度的几个问题探讨[J]. 水运工程, 2010(5): 47-51.  
LU J M, AN Y Y, ZHANG D M, et al. Some issues affecting the accuracy of non-tide sounding survey [J]. Port & waterway engineering, 2010(5): 47-51.
- [17] 工程测量标准: GB 50026—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.  
Standard for engineering surveying: GB 50026-2020[S]. Beijing: China Planning Press, 2020.
- [18] 水运工程测量规范: JTS 131—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.  
Specifications for port and waterway engineering: JTS 131-2012[S]. Beijing: China Communications Press, 2012.