

# 超声波时差法测流研究—以北碚站为例

白雅滢 朱琳

长江水利委员会水文局长江上游水文水资源勘测局, 中国·重庆 400000

**摘要:** 为满足北碚水文站流量全量程、全天候在线监测的水文现代化建设需求, 针对该站受电站影响、水位流量关系复杂的特点, 对新增的 TY-7200-D 型超声波时差法流量监测设备开展比测率定研究。2024 年 7 月至 2025 年 9 月期间, 以缆道流速仪法测验成果为基准, 完成 46 次有效比测, 系统分析设备稳定性、断面稳定性及成果精度。结果表明: 在水位 176.51~190.87m、含沙量 $\leq 3.75\text{kg/m}^3$  范围, 超声波时差法指标流速与断面平均流速的率定关系为计算时差法时差法(相关系数  $R^2=0.9924$ ); 率定样本系统误差 0.35%、标准差 3.03%、随机不确定度 6.06%, 验证样本系统误差 1.39%、标准差 2.07%、随机不确定度 4.15%, 均满足《水文资料整编规范》一类精度站要求。该设备可有效弥补传统测流方式不足, 为北碚水文站中高水流量在线监测提供可靠技术支撑, 对推动流域水文测验现代化具有重要实践意义。

**关键词:** 超声波时差法; 流量监测; 比测率定; 北碚水文站; 精度分析

## Study of Flow Measurement Using Ultrasonic Time-Difference Method: A Case Study of Beibei Station

Bai Yaying, Zhu Lin

Yangtze River Water Resources Commission Hydrology Bureau, Upper Yangtze River Hydrology and Water Resources Survey Bureau, China Chongqing 400000

**Abstract:** To meet the requirements of modernised hydrological construction for full-range, all-weather online monitoring of flow at the Beibei Hydrological Station, and considering the station's characteristics of being affected by the dam and having a complex water level-flow relationship, a comparative calibration study was conducted on the newly added TY-7200-D ultrasonic time-difference flow monitoring equipment. From July 2024 to September 2025, using the cableway velocimeter test results as a reference, 46 effective comparative measurements were completed, systematically analysing equipment stability, cross-section stability, and result accuracy. The results indicate that within the water level range of 176.51 to 190.87m and sediment concentration  $\leq 3.75\text{kg/m}^3$ , the calibration relationship between the ultrasonic time-difference method index flow velocity and the cross-sectional average flow velocity corresponds to the time-difference calculation method (correlation coefficient  $R^2=0.9924$ ); the systematic error of the calibration sample is 0.35%, the standard deviation 3.03%, and the random uncertainty 6.06%, while the systematic error of the verification sample is 1.39%, the standard deviation 2.07%, and the random uncertainty 4.15%, all meeting the requirements for Class I precision stations in the 'Code for Compilation of Hydrological Data'. This equipment can effectively compensate for the shortcomings of traditional flow measurement methods, providing reliable technical support for online monitoring of medium-to-high flow at Beibei Hydrological Station and holds significant practical importance for promoting the modernisation of watershed hydrological measurement.

**Keywords:** Ultrasonic time difference method; Flow monitoring; Comparative calibration; Beibei hydrological station; Accuracy analysis

## 0 引言

北碚水文站断面受上游草街电站蓄放水影响, 中低水水位流量关系易波动; 下游受三峡水库顶托作用, 洪水期水位流量关系呈绳套曲线, 传统流速仪测流难以实现全量程、全天候连续监测, 无法满足水文现代化对流量数据实

时性、连续性的需求。超声波时差法作为新型在线测流技术, 具有测量精度高、覆盖范围广、抗含沙能力强等优势, 与河流声层析测流技术相比, 传统超声波时差法通过固定角度发射声波采集路径上线平均流速, 虽在复杂流态适应性上略有差异, 但在常规河道监测中更具部署灵活性<sup>[1]</sup>,

超声波时差法具有测量精度高、覆盖范围广、抗含沙能力强等技术优势,及在水文监测中的应用基础<sup>[2]</sup>。国外在河流声层析测流技术应用方面也有相关研究成果,为该领域技术发展提供了参考<sup>[3]</sup>。为验证该技术在北碚水文站复杂水沙条件下的适用性,长江水利委员会水文局长江上游水文水资源勘测局于2024年6月部署TY-7200-D型超声波时差法流量监测设备,开展系统比测率定研究,旨在确定设备运行参数、流量推算方案及适用范围。针对受梯级电站影响、顶托作用显著的河道特性,构建超声波时差法指标流速与断面平均流速的率定模型,补充复杂水文条件下新型测流技术的应用理论,为类似流域的流量在线监测提供方法参考。解决北碚水文站中高水期流量监测难题,实现流量数据实时采集与传输,提升水情预警预报时效性;优化测站监测模式,减少人工测验强度与高水测验安全风险;为嘉陵江流域水资源管理、防汛调度提供高精度流量数据,支撑川渝两省市水资源考核评价工作。

### 1 研究区域概况

北碚水文站位于重庆市北碚区龙凤桥街道(东经106° 27' 34",北纬29° 48' 50"),距嘉陵江河口53km,主要测验项目包括水位、水温、流量、悬移质输沙率、降水等,测验精度为一类流量站、一类泥沙站。河道特性:测验河段顺直长约7km,断面呈“U”形,最大水面宽285m;含沙量变化平稳,淤积较少,断面稳定。根据变动河床断面研究理论,断面形态与流速分布的稳定性是保障流量测验精度的重要基础,北碚站的断面条件为率定模型建立提供了可靠支撑<sup>[4]</sup>。干扰因素:断面上游12km草街电站影响中低水,下游三峡水库顶托导致水位流量关系偏小,洪水涨落期呈绳套曲线。现有测流方式:H-ADCP测流与转子式流速仪测流。

### 2 超声波时差法原理与设备安装

超声波时差法系统主要分为三部分:时差法主、从机,遥测终端机。声呐信号从主机发出后,在约48度夹角范围内,声学直达波与多途波混响,被从机获取到完整的信号;互易后,从机声波经由同样通道声波,被主机接收到的声信号基本可以完整反映出换能器高程水层的流速场属性,通过水层流速代表性模型,可以计算出一定水深的流速情况。仪器分布与平面示意图如图1所示,A、B两点为两岸安装的两个声脉冲发射和接收的换能器,V为水流速度,L为两个换能器之间的距离,α为两换能器之间连线与水流方向的夹角。公式如下:

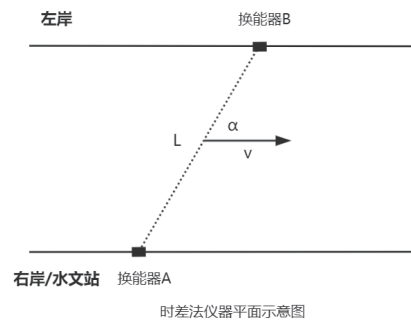


图1 时差法仪器平面示意

换能器之间的距离, α 为两换能器之间连线与水流方向的夹角。公式如下:

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

$$V_g = (cw^2 / (2 * L * \cos(\alpha))) * \Delta t$$

$$V_m = K_1 * K_2 * V_g$$

$$Q = V_m * A$$

式中, Δ t 代表超声波传输时间差, L 为换能器间的距离, a 代表声道与水流向间的夹角, cw 代表该水温和盐度下的声速。Vg 为层流速, Vm 代表断面平均流速, A 为过水面积。

### 3 设备安装情况

安装位置:左岸换能器位于基本水尺断面上游30m,右岸位于上游140m,换能器安装高程175.00m,覆盖中高水位(175.00m以上);

运行情况:2024年6月完成安装调试,2024年7月至2025年9月运行稳定,数据缺失率<0.5%,无设备故障;含沙量≤3.75kg/m<sup>3</sup>时数据穿透性良好。

### 4 技术路线

#### 4.1 比测方案设计

依据《水文测验规范》(GB 50179-2015),以缆道流速仪法作为比测基准。比测时间为2024年7月至2025年9月,覆盖中高水期、平水期及洪水涨落期,水位平稳期每月比测2-3次,水位剧烈变化时段加密至1-2天1次,共完成46次有效比测。数据采集严格遵循同步性要求,时间同步误差控制在±5min内,同步记录水位、水温、含沙量等环境参数。北碚站采用超声波时差法单层测流,通过单层平均流速V<sub>时差法</sub>与实测平均流速建立关系,将V<sub>时差法</sub>带入关系求出计算流速V<sub>计算</sub>,再通过V<sub>计算</sub>与该水位下基本断面面积的乘积求得断面流量。

结合站上情况和河道情况采用的比测方法是缆道流速仪法与时差法比测,用LS25-3A型转子式流速仪、LS78型旋杯式流速仪测流完成后,超声波时差法流速监测系统

取实测开始时间到结束时间这一段期间所测得数据的平均值与实测流量的断面平均流速进行对比，建立单层流速关系。

### 4.2 关系率定

采用时差法的指标流速与常规流速仪的流速进行分析，率定 2024 年 07 月 06 日~2025 年 09 月 24 日的指标流速，该时段共有 46 次参与比测的流量测次，根据实测平均流速，按流速从小到大重新排序，每 4 个数据挑前 3 个数据分组为率定测次，最后剩余 11 个数据组成比测数据进行检验，确保分析结果可靠性。根据指标流速  $V_{时差法}$  和流速仪断面平均流速  $V_{实测}$  建立的计算流速关系见图 2。

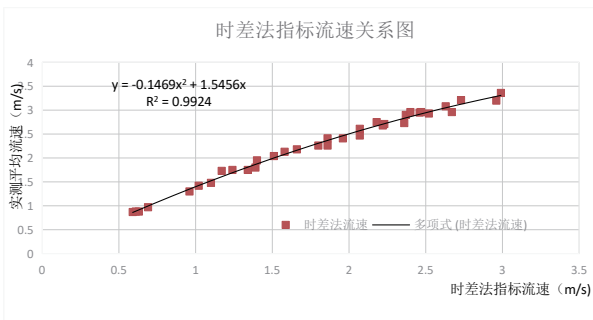


图2 时差法指标流速关系

得到关系公式， $R^2=0.9924$ ，

$$V_{计算} = -0.1469V_{时差法}^2 + 1.5456V_{时差法}$$

## 5 结果与分析

### 5.1 成果精度分析

流速带入公式计算后，流速系统误差 0.35%，标准差 3.03%，随机不确定度 6.06%，均满足《水文资料整编规范》(SL/T247-2020) 一类精度站水力因素法定线精度要求。根据图 3 所绘制的关系曲线，进行曲线检验，三项检验系统误差 -0.2%，标准差 3.0%，随机不确定度 6.0%。剩余 11 次作为验证样本，代入率定方程计算的推算值与实测值对比显示：系统误差 1.39% (满足一类站  $\pm 2\%$  要求)，标准差 2.07%，随机不确定度 4.15% (满足一类站

$\pm 10\%$  要求)。不同水沙条件下精度统计表明，在水位 176.51~190.87m、含沙量  $\leq 3.75\text{kg/m}^3$  范围，各区间系统误差与随机不确定度均满足规范要求。

### 5.2 整编精度分析

将北碚水文站缆道 2025 年 7、8、9 月流速仪法流量采用 H-ADCP、转子式流速仪测量方式，临时曲线法、连时序法定线整编推求的流量和时差法的代表流速按率定的关系推求的流量过程相对比，通过对比，7、8、9 月北碚水文站逐日平均流量基本相同，特征值无较大偏差，两种整编方式计算出来的月经流无较大偏差。通过两种整编方式流量过程线对照，定线推流方式流量过程线相对平滑，时差法流量过程线在水位流量平稳时有小幅度正常的脉动现象，在大的趋势上两种方式流量过程变化是基本吻合的。汛期使用两种方式推求流量对比图见图 3，两种整编方式流量过程、特征值基本一致，月经流量相差较小，因此两种整编方式较相应。北碚水文站 2025 年 7、8、9 月整编精度分析流量成果见表 1。

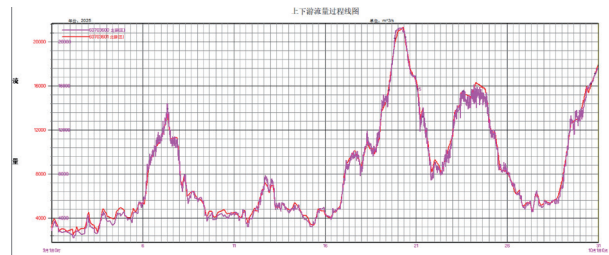


图3 整编推求流量过程线对比图 (红线为时差法过程线)

## 6 结语

### 6.1 研究结论

TY-7200-D 型超声波时差法设备在北碚水文站运行稳定，数据缺失率  $< 0.5\%$ ，适应性良好，满足监测需求。在水位 176.51~190.87m、含沙量  $\leq 3.75\text{kg/m}^3$  范围，设备测量精度满足《水文资料整编规范》一类精度站要求，可用于中高水流量在线监测。

表1 整编精度分析流量成果表

年份: 2025		站码: 60703600					
日期		7月		8月		9月	
流速仪法流量 (m³/s)		Q计算 (m³/s)	流速仪法流量 (m³/s)	Q计算 (m³/s)	流速仪法流量 (m³/s)	Q计算 (m³/s)	流速仪法流量 (m³/s)
月统计	平均	3410	3440	1980	1990	8080	8230
	最大	11800	12300	7980	7300	21200	21300
	日期	9	9	29	29	19	20
	最小	472	471	448	448	2210	2470
	日期	23	23	17	17	2	2
月经流		91.33 (10 <sup>8</sup> m³)	92.13 (10 <sup>8</sup> m³)	51.32 (10 <sup>8</sup> m³)	51.58 (10 <sup>8</sup> m³)	209.43 (10 <sup>8</sup> m³)	213.32 (10 <sup>8</sup> m³)

采用公式:

$$V_{\text{计算}} = -0.1469V_{\text{时差法}}^2 + 1.5456V_{\text{时差法}}$$

## 6.2 应用价值与展望

该设备可弥补传统测流方式的不足,实现中高水流量实时采集传输,提升水情预警时效性,减少人工测验强度与安全风险,为嘉陵江流域水资源管理、防汛调度提供高精度数据。未来可优化换能器安装位置,拓展低水位监测范围;结合高含沙洪水过程,开展设备在更高含沙量条件下的适应性研究;探索与 H-ADCP、雷达测流等技术的融合应用,构建多源数据融合监测体系,进一步提升监测精

度与可靠性。

### 参考文献:

- [1] 吴谕, 冼永成, 朱小华. 河流声层析测流系统在感潮河流应用研究 [J]. 水文, 2025, 45 (6): 45-51.
- [2] 王广军, 李庆国, 刘荣华. 超声波时差法在河道流量监测中的应用 [J]. 水文, 2022, 42 (3): 68-72.
- [3] Kawanisi K, Hirose K. Application of river acoustic tomography to discharge measurement in tidal rivers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146 (8): 04020057.
- [4] 张红武, 陈江南, 李勇. 变动河床水文测验断面借用体系的适用性研究 [J]. 人民黄河, 2018, 40 (6): 1-6.