

V-ADCP指标流速法在线测流方法研究

胡立, 朱汉华, 陈晓, 付康

长江水利委员会水文局长江下游水文水资源勘测局, 江苏 南京

收稿日期: 2025年2月21日; 录用日期: 2025年3月28日; 发布日期: 2025年4月28日

摘要

为适应时代的发展, 实现无人值守和自动测报, 对流量在线监测的方法和原理进行了研究, 通过对V-ADCP获取的流速进行预处理得到较为真实可靠的垂线平均流速, 然后对断面平均流速与V-ADCP获取的实测垂线平均流速进行多元线性回归分析, 可得到断面平均流速与代表垂线平均流速的相关关系, 并以V-ADCP垂线流速计算流量与走航式ADCP实测流量为率定样本, 验证了该方法的适用性。结果表明: 基于V-ADCP指标流速法的在线测流方法能达到流量监测的精度, 其系统误差为-0.035%, 随机不确定度为5.7%。研究成果可为流量在线监测推流方法的选择提供参考。

关键词

在线监测, V-ADCP, 垂线流速, 多元回归

Research on Online Flow Measurement Method Using V-ADCP Index Flow Rate Method

Li Hu, Hanhua Zhu, Xiao Chen, Kang Fu

Lower Changjiang River Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology, CWRC, Nanjing Jiangsu

Received: Feb. 21st, 2025; accepted: Mar. 28th, 2025; published: Apr. 28th, 2025

Abstract

To meet the demands of technological advancement and achieve unmanned operation and automated reporting, this study investigates methods and principles for online flow monitoring. The proposed approach involves preprocessing velocity data acquired by V-ADCP to obtain reliable vertical line average velocities. Through multivariate linear regression analysis between cross-sectional average velocity and measured vertical line velocities from V-ADCP, a correlation relationship was established. Calibration samples consisting of V-ADCP-derived discharge and moving-vessel ADCP measurements were used to

作者简介: 胡立, 出生于1992年, 湖北黄梅人, 本科, 工程师, 研究方向为水文与水资源工程, Email: 489625239@qq.com

validate its applicability. Results demonstrate that the online flow measurement method based on the V-ADCP index velocity achieves satisfactory monitoring accuracy, with a systematic error of -0.035% and random uncertainty of 5.7% . These findings provide valuable reference for selecting discharge estimation methods in online flow monitoring systems.

Keywords

Online Monitoring, V-ADCP, Vertical Flow Velocity, Multiple Regression

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. 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

流量在线监测是水文行业发展的必然趋势,是更快更好地开展水文服务的必要前提,随着时代的进步和社会的发展,水资源开发利用、水生态建设管理、水功能区管理控制、水文防汛测报等对水文发展提出了更高要求,传统需要测员现场监测的水文测验方式既耗时耗力还效率低,水文监测方式创新已经成为迫切需要。

在水文行业现代化建设中,水位、水温、雨量等要素已实现在线监测,如何实现流量在线监测仍是水文行业的重点和难点。充分利用现有的设施设备,结合当今国内外比较成熟的技术手段、仪器设备和各单位投资及地方配套能力,合理进行监测方法选择、技术装备选型优化,可以推动水文现代化建设的进程[1]。仙桃站用 UHF 雷达测流系统与常规缆道流速仪开展比测研究分析,采用适宜的流量反演方法可得到较好的推流精度[2],汉江流域白河水文站用 H-ADCP,引入代表性较好的单个流速网格,建立断面平均流速与 H-ADCP 流速的相关关系,构建的推流方案通过了符号检验、适线检验和偏离数值检验[3],南京水文实验站将 H-ADCP 和垂向定点式 ADCP 相结合,分别得到水平平均流速和垂线平均流速,与断面平均流速建立多元线性回归模型,计算结果比较理想[4],南水北调工程陶岔水文站基于声学时差流量计,提出了多元回归的多声路时差法断面平均流速计算方法,并以实测流量为率定样本,验证了该方法的适用性[5]。攀枝花水文站研究了雷达测流系统在不同水位级下的适用情况[6]等等以上案例根据测站和水流特性选择不同的技术手段和仪器设备对在线推流的适用性进行了分析验证。目前现有的 H-ADCP、雷达测流等技术只能测得某一水层或某一点的流速,关于 V-ADCP 在线流量监测的计算原理、多垂线协同测量断面平均流速关系拟合方法的研究相对较少,根据流量测验 III 型误差分析,在一定数量的测速垂线内,每多增加一条测速垂线可以显著提高流量测验精度,特别是在有较好的代表性位置[7],因此多垂线协同测量可以进一步提升模型拟合效果。基于此,本文对 V-ADCP 垂线平均流速的测流原理、流量计算方法等进行了详细阐述,通过技术手段对 V-ADCP 采集的垂线平均流速数据进行平滑处理,叠加船速抵消动底的影响,从而获取较为真实的垂线平均流速,结合 V-ADCP 多垂线协同测量,提出基于多元回归的断面平均流速计算方法。然后以九江水文站实测流量为率定样本,建立相关关系,使回归系数通过最小二乘法估计,并使残差平方和最小化,其复相关系数为 0.9877。根据建立的关系分析九江站 V-ADCP 指标流速法的测验精度,精度满足相关规范要求,研究成果可为长江中下游河道流量在线监测推流方法的选择提供参考。

2. 原理及方法

2.1. V-ADCP 测流原理

换能器发射一定频率的电磁波,接收水体中细小颗粒和微小气泡与换能器之间的相对运动,使换能器接收到来自水中细小颗粒反射回的辐射波频率会发生变化。这种由于换能器和观察者之间的相对运动而产生的接收

信号相对于振源频率的频移现象被称为多普勒效应。测出此频移就能测出物体的运动速度, ADCP 测量水流的速度就是运用声学多普勒这一原理。

V-ADCP 法是将声学多普勒流速仪安装在河底或水面, 固定在某一位置进行流速、流量的监测。受水流、水面漂浮物、河道通航, 河床冲淤变化等情况影响, 综合考虑把 V-ADCP 安装在航道水面浮标的尾部穿透船体的井内, 声束向下发射。V-ADCP 测流系统如图 1 所示, 该套系统由传感器、信号传输线缆和数据存储系统将采集的水流速度数据通过移动通信网络传输到水情分中心, 水情分中心通过配套的应用软件对流速数据进行实时读取、查询和存储, 显著提高了测验的自动化程度和数据时效性。系统由 ADCP 换能器、电源、RTU(远程终端单元)、太阳能电板等组成。

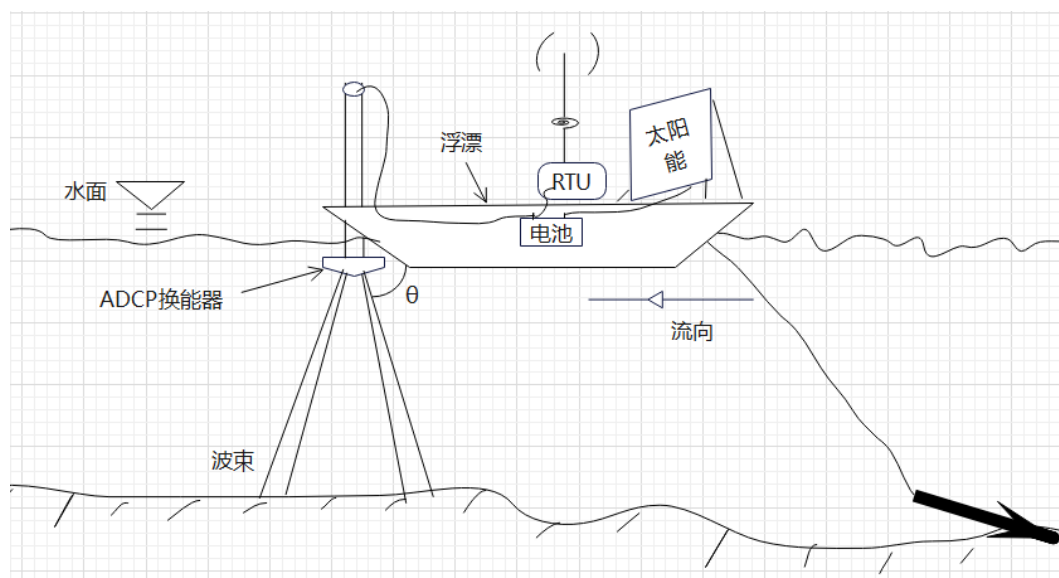


图 1. V-ADCP 安装示意图

ADCP 在测量时, 换能器发射某一固定频率的声波, 然后接收被水体中颗粒(如泥沙、小气泡等)悬浮物散射回来的声波, 测出频移, 即可计算出被测物体的速度。频移计算公式如下:

$$F = 2f \frac{V}{C} \cos \theta \quad (1)$$

式中: F 为声学多普勒频移 Hz; f 为 ADCP 换能器发射频率 Hz; V 为颗粒物(如泥沙、小气泡等)沿声束方向的移动速度即水流速度, m/s; C 为声波在水中的传播速度, m/s; θ 为水流运动方向与入射波之间的夹角。

2.2. 流量计算原理

V-ADCP 计算流量采用的是面积流速法, 面积 A : 通过实时监测水位, 采用基本断面水尺处自记水位, 结合最新的大断面成果推求断面面积。流速 V : 通过实测垂线平均流速, 利用比测建立的垂线平均流速与常规测验方法获取的断面平均流速相关关系, 推求断面平均流速。流量计算公式如下:

$$Q = A * V \quad (2)$$

式中: Q 为断面流量, 单位 m^3/s ; A 为断面面积, 单位 m^2 ; V 为断面平均速度, 单位 m/s 。

2.3. V-ADCP 垂线流速预处理

1) V-ADCP 安装在航道的浮标上, 5 分钟采集一组数据, 因水流的脉动影响, 根据流量测验 I 误差研究分析,

设置为 100~120 s 采集一次垂线平均流速，由于浮标受到水面自身波浪和过往船只激起的波浪影响，处于小幅摇晃震荡的状态，导致 V-ADCP 采集的垂线平均流速过程线呈锯齿状。由图 2 流速过程线图可以看出，垂线流速过程线中的流速大部分数据在 0.1 m/s 范围以内窄幅震动，为消波去噪，可采取滑动平均的方法，来平滑数据中的短期波动，保留数据的长期变化趋势。根据垂线流速过程线图分析，震动一个周期(比如波谷与相邻波谷为一个周期)大约为 5 个数据左右，即震动频率为 1/5，采样数据是连续进行的，故其采样间隔为 1，由公式③窗口大小与截止频率相关的公式，可计算出滑动平均的窗口大小 n 为 6，故对垂线流速过程线取 6 组数据平均可得到较平滑且保留数据变化趋势的垂线流速(见图 3)。走航式 ADCP 在九江水文站测验一个测回的时间约为 20~30 分钟，V-ADCP 可挑选与走航式 ADCP 测验时间一致的 6 组数据平均，可获取与走航式 ADCP 测验过程相应的垂线平均流速。

$$f_c = \frac{1}{n-T} \tag{③}$$

式中： f_c 为震动频率， n 为窗口大小， T 为采样间隔。



图 2. 1 组数据的水流速度过程图

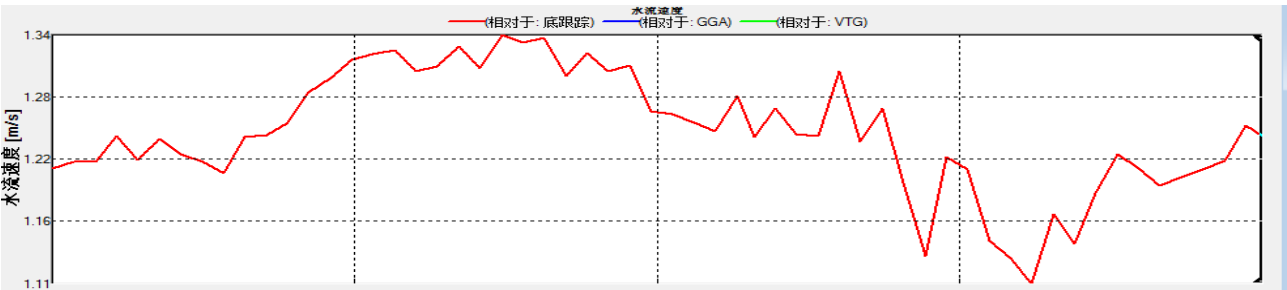


图 3. 6 组数据平均水流速度过程图

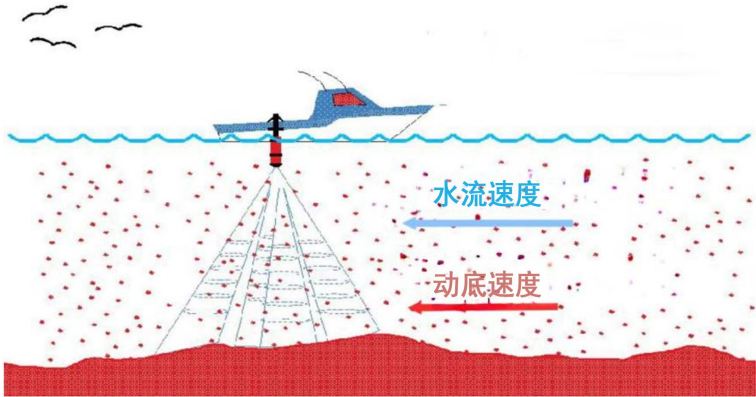


图 4. 动底示意图

2) 考虑到 V-ADCP 系统没有挂载 GNSS 系统, V-ADCP 采集的数据是相对于底跟踪的数据。ADCP 发射声波, 接收声波被河底反射的回波信号, 可以测量其相对于“河底”的速度, 该功能叫做“底跟踪”。浮标船是抛锚固定在航道中原则上的位置是固定不变(航迹线为一个固定点), 当河底有“动底”走沙时, 可以看到航迹图上航迹有明显的走动(航迹线为一条随时间向前移动的线)。如图 4 所示水流带动河底使河底产生与水流方向一致向下游的速度 $V_{底}$, 通常默认河底是不动的, 当有“动底”又以河底为参照物时, 浮标船会有一个与河底运动方向大小一致的速度 $V_{船}$, 此时 $V_{船} = V_{底}$ 。V-ADCP 采集的数据是测量其相对于河底的速度, 故这时 V-ADCP 采集的垂线流速数据为 $V_{V-ADCP} = V_{真} - V_{底}$, 其数据比实际真实的流速偏小, 为了抵消“动底”的影响挑选垂线流速时应加上相应的船速即动底的速度。其真实流速为 $V_{真} = V_{V-ADCP} + V_{船}$ 。

2.4. 建立指标流速与断面平均流速的关系

V-ADCP 测流系统获取数据时, 当表层流速受到漂浮物水草扰流、风速等气象环境的影响时测得的流速误差较大, 通过 ADCP 后处理软件处理数据时应根据流速剖面图和流速时间过程图判断表层和底层流速是否合理, 本文采用前人分析研究的经验值底跟踪垂向流速误差阈值 0.5 m/s 来进行判断垂线流速是否合理, 误差阈值选取与精度呈反比, 阈值选取越小精度越高[8], 不合理时应根据水层深度和 ADCP 的测深单元尺寸剔除一到两层的不合理数据, 采用经验值幂指数 0.1667 推求垂线平均流速, 可以获取较高精度的垂线平均流速。通过与传统方法走航式 ADCP 或流速仪实测的断面平均流速建立相关关系, 利用此关系可以得到断面平均流速, 从而推求出实时断面流量。断面平均流速与指标流速的拟合公式如下:

$$V_{平} = aV_1 + bV_2 + c \quad (4)$$

式中, $V_{平}$ 为断面平均流速; V_1 为 1 号 V-ADCP 的垂线平均流速; V_2 为 2 号 V-ADCP 的垂线平均流速; a , b 为回归系数(反映变量间的权重关系); c 为随机误差项(为常数)。

3. 应用实例

3.1. 九江水文站测验情况

九江水文站 1904 年 01 月设立, 流域集水面积 152 万平方公里, 为国家一类站, 是百年老站。其测验河段较顺直, 主槽靠右岸, 测验断面形态呈偏“V”型, 流速横向分布与断面形状基本相应, 无岔流、串沟、逆流、回水、死水等情况。断面上游约 6 km 处建有九江长江二桥, 受其影响, 汛期出现大洪水后, 断面偏左部分会出现局部冲淤现象; 下游 30 km 有鄱阳湖入汇长江, 对本站水位、流量有顶托影响。根据测验任务书的规定, 其水位级的划分及宽深比(见表 1), 九江站水位级的划分采用的是年特征值法。

表 1. 九江站水位级的划分及宽深比

水位级	高水期	中水期	低水期	枯水期
水位	17.70 m 以上	17.70~14.00 m	14.00~8.90 m	8.90 m 以下
宽深比	68.5	84.0	106.4	131.7

根据测站控制和水流特性, 九江水文站两台 V-ADCP 均选择为 600 khz, 受通航影响, 结合实际情况 V-ADCP 安装在航道的浮标上, 且尽量布置在有代表性的中泓位置, 安装布置位置如图 5 所示。

采用走航式 ADCP 法进行比测, 共收集比测流量 62 次, 比测水位范围 8.53~21.85 m, 基本涵盖九江站水位级范围, 资料代表性较好。比测时间为 2023 年 10 月 26 日至 2024 年 7 月 10 日。

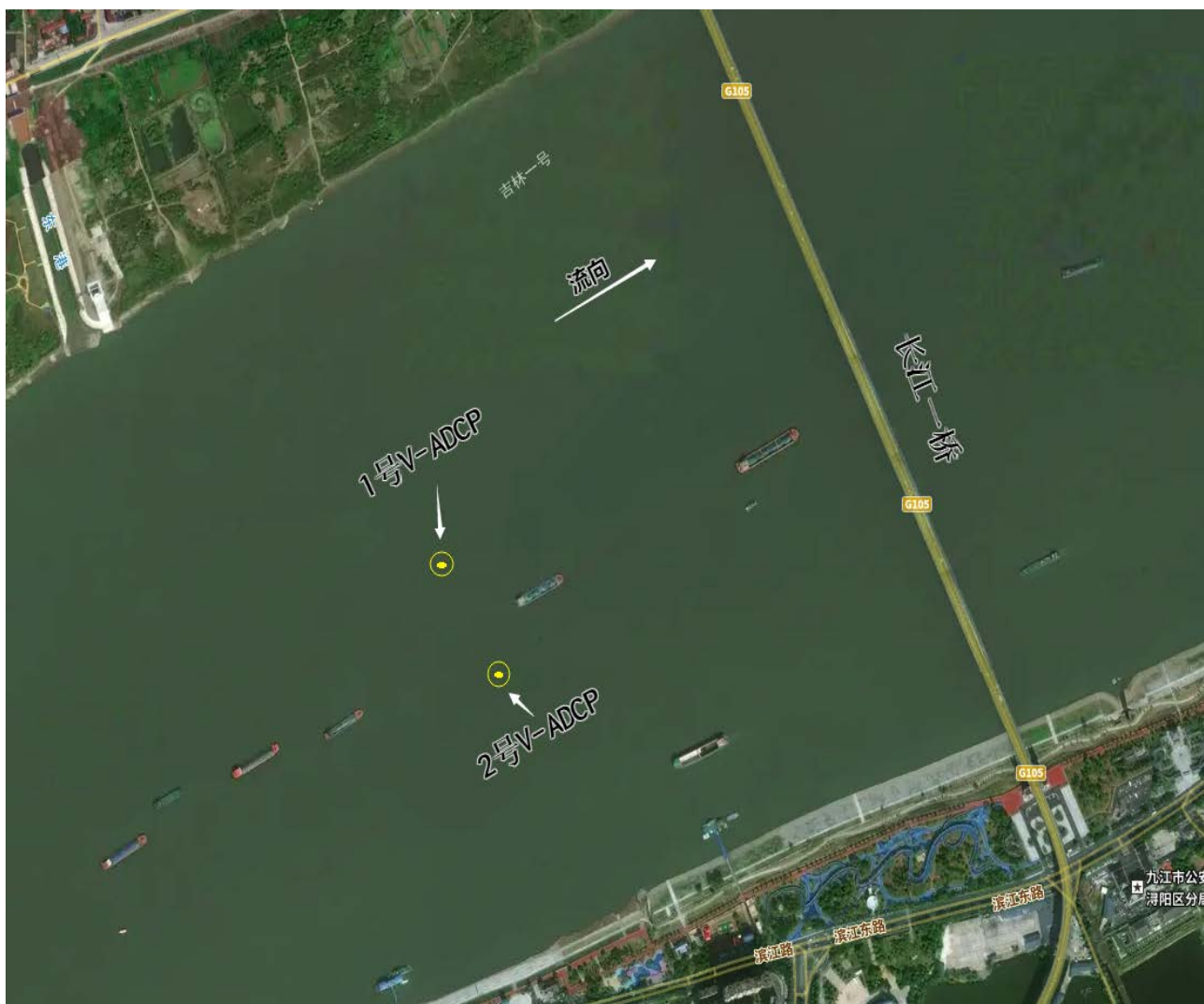


图 5. V-ADCP 布置图

3.2. 制定拟合方案

1) 断面面积计算, 根据九江水文站 2014~2023 年最近 10 年的大断面资料分析, 2020 年受特大洪水影响汛后冲淤变化较大, 大断面面积变化为 11.12%, 其余年份大断面面积变化均在 -3.91%~5.83%, 为更好地控制水位流量关系曲线应适当增加水道断面的测量次数, 以减少借用断面带来的误差[9]。分析时应统一采用水位查大断面计算断面过水面积, 以消除断面面积不一致带来的流量计算误差。

2) 断面平均流速计算。按照规范要求对实测流量资料进行处理, 计算出来实测流量, 实测流量除以断面过水面积, 得到断面平均流速:

$$V_{\text{平}} = Q_{\text{实}} / A \quad (5)$$

3) V-ADCP 垂线流速处理。将每次与测流相应时间的 V-ADCP 采集的垂线流速经过 ADCP 后处理软件处理, 得到相对精度较高的垂线平均流速 V_1 , V_2 。

4) 进行关系拟合。将断面平均流速和对应的垂线平均流速 V_1 , V_2 按照公式⑥进行拟合, 采用多元回归进行求解。

3.3. 拟合精度评价

按照制定的方案进行关系拟合，计算出拟合结果，得出如下公式：

$$V_{\text{拟}} = 0.586993V_1 + 0.196705V_2 + 0.024195 \quad (6)$$

把拟合断面平均流速与走航式 ADCP 实测的断面平均流速进行对比分析，其变化趋势基本一致，拟合效果较好(见图 6)。

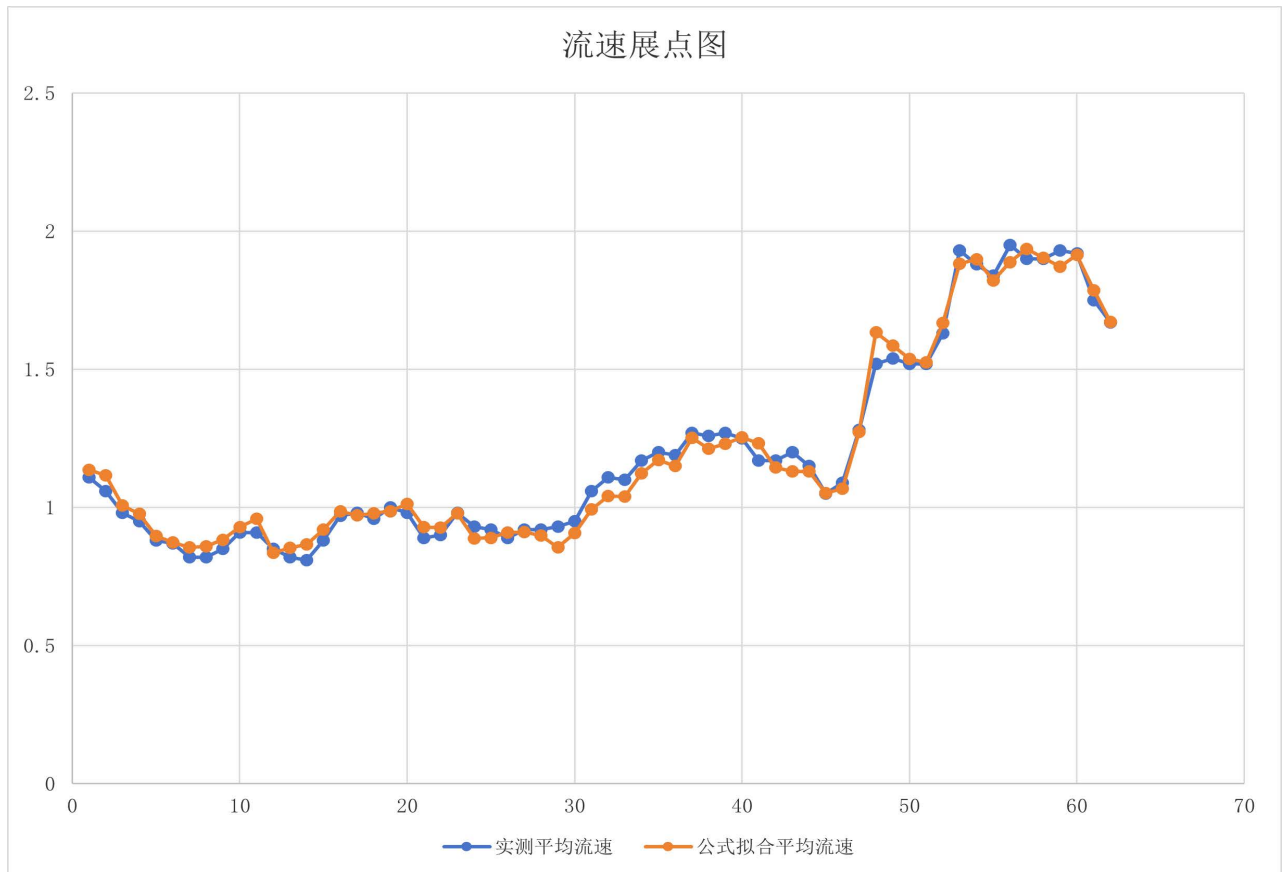


图 6. 流速展点图

根据误差的分布情况，统计水位 - 拟合流速相对残差分布情况(见图 7)，可以看出误差基本控制在 $\pm 4\%$ 以内；根据数据统计分析结果，其中枯水期有 3 次相对误差超过 5%，对应的水位为 8.92 m、8.53 m、8.72 m；中水期也有 2 次超过 5%，对应的水位为 14.86 m，15.44 m。

把实测 V_1 、 V_2 代入公式得到断面拟合平均流速，断面拟合平均流速乘以断面过水面积即可得出相应的拟合流量，把拟合流量与走航式 ADCP 实测的流量进行随机不确定度和系统误差分析检查，结果见表 2，随机不确定度计算公式如下：

$$S_e = \left[\frac{1}{n-2} \sum \left(\frac{Q_i - Q_{ci}}{Q_{ci}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$X_Q = 2S_e \quad (8)$$

式中： Q_i 为第 i 实测点流量； Q_{ci} 为 Q_i 相应的拟合流量； S_e 为标准差； X_Q 为随机不确定度。

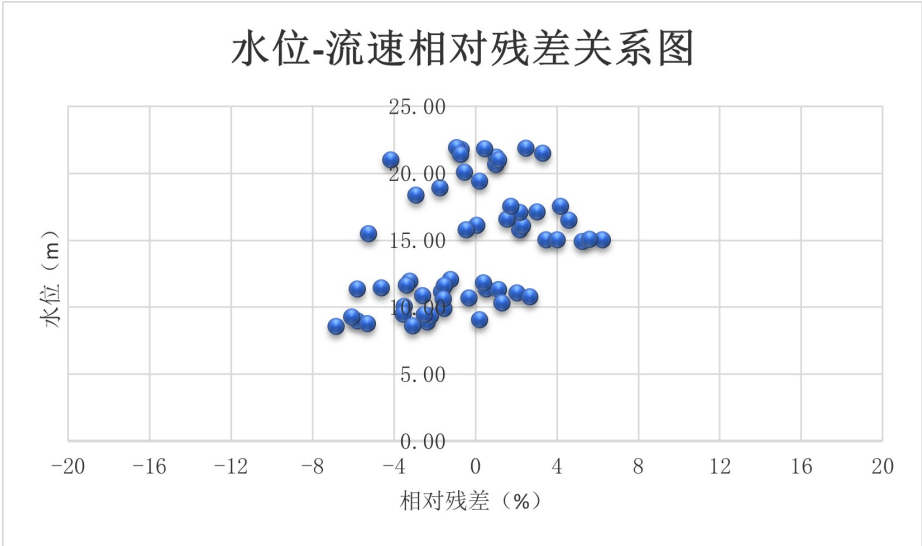


图 7. 水位 - 拟合流速相对残差图

表 2. 误差统计

方案	算法	系统误差	随机不确定度	最大相对误差	复相关系数
1	PD0	-0.035%	5.7%	-6.8%	0.9877

1) 精度评价。由表 2 可以看出 V-ADCP 指标流速法的在线测流方法精度较高，系统误差为-0.035%，随机不确定度为 5.7%，满足一类站定线要求，最大相对误差为-6.8%，大于 5%。进一步分析，分别统计误差 $\leq \pm 2\Delta$ ， $> 2\Delta$ ， $< -2\Delta$ 分布情况，见图 8，其误差在 $\leq \pm 2\Delta$ ， $> 2\Delta$ ， $< -2\Delta$ ，分别占比为 87.1%，8.1%，4.8%。不能满足置信水平 95% 的随机不确定度要求。根据《SL_T 247-2020 水文资料整编规范》规定，采用 ADCP 测流的随机不确定可增大 2%，则满足 $\pm 2\Delta$ 置信水平为 95%的要求(2Δ 为 2 倍的标准差)。

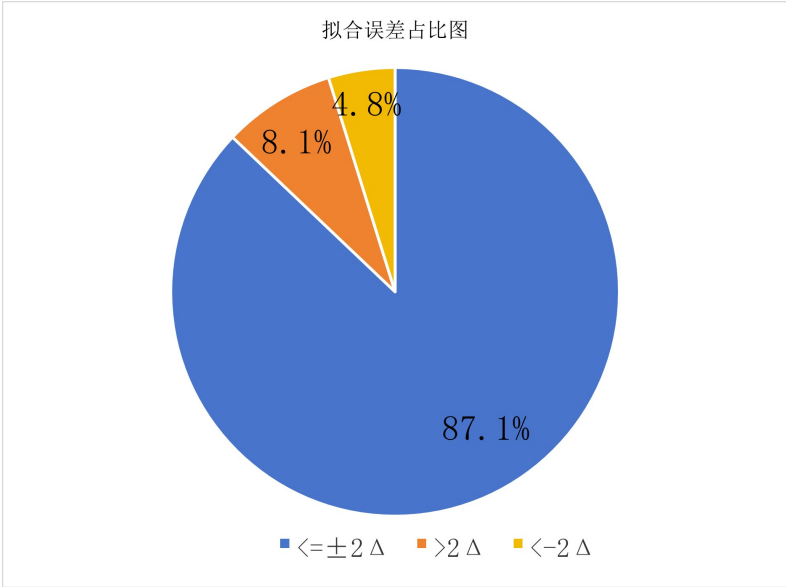


图 8. 拟合误差占比分布图

2) 成果检验。根据《九江水文站测验任务书》水位级的划分要求，分别随机挑选高、中、低、枯水部分数据进行检验，统计检验误差，结果如下表 3 所示。结果表明：本文提出的拟合方案检验误差均不超过 5.0%，能够满足水文测验精度要求。

表 3. 检验样本流量计算结果

日期(2024)	水位级	水位(m)	实测流量(Q/m³)	拟合流量(Q/m³)	相对误差(100%)
7.28	高水	19.74	49,900	47,400	-0.050
8.09		18.74	42,300	44,100	0.043
8.12		18.21	38,900	39,700	0.021
8.15	中水	17.69	35,500	34,800	-0.020
8.30		15.45	25,800	24,600	-0.047
9.03		14.52	23,400	22,300	-0.047
9.09	低水	12.74	18,700	19,100	0.021
9.30		9.74	13,400	13,600	0.0149
10.04		9.33	12,100	12,400	0.0248
10.21	枯水	8.80	10,600	10,500	-0.009
11.11		8.40	10,200	10,200	0

4. 结论

本文对九江水文站 V-ADCP 指标流速法的在线测流原理、流量计算方法进行了研究，在传统走航式 ADCP、流速仪法流量计算方法的基础上，提出了基于多元回归拟合计算断面平均流速及流量计算方法；然后以九江水文站为例，制定了其代表流速关系拟合方案，分析了其拟合精度及推流精度，得到如下结论：

1) V-ADCP 指标流速法的在线测流精度满足规范，能达到一类站定线推流要求，在枯水期误差稍微偏大，应进一步分析论证或加装相应的设备加以改善。考虑到枯期流速较小在同样的残差情况下相对误差更大，河道糙率的轻微变化，都能导致误差反映敏感，针对枯水期误差偏大问题，建议结合水文条件(如低雷诺数效应、河道糙率变化)和仪器特性(如 600 kHz ADCP 的低流速测量精度)进行机理分析。

2) 经过对 V-ADCP 垂线流速分析，其数据有波动，需要人工进行干预处理，如果经济条件和科技水平达到要求，可以考虑加装 GNSS 和姿态改正系统，GNSS 系统可以解决“动低”的问题，姿态改正系统可以解决受波浪影响的小幅摇晃震荡对流速测量的影响。

研究成果可为 V-ADCP 指标流速法在线监测应用中代表流速关系的拟合计算提供参考，对于长江中下游天然河道的流量在线监测均有一定的应用价值。

参考文献

[1] 曹春燕, 任凤仪. 流量在线监测实用性分析及实现技术研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(S2): 11-13.

[2] 梅军亚, 陈静, 香天元. 侧扫雷达测流系统在水文信息监测中的比测研究及误差分析[J]. 水文, 2020, 40(5): 54-60.

[3] 左建, 邓山, 张洪霞, 等. 白河水文站表面流速代表性研究[J]. 水文, 2021, 41(3): 19-24.

[4] 韦立新, 蒋建平, 曹贯中. 南京水文实验站 ADCP 流量测验方法改进研究[J]. 水利水电快报, 2017, 38(6): 11-14.

[5] 邓山, 赵昕, 张莉, 等. 南水北调工程陶岔站时差法流量计推流技术研究[J]. 人民长江, 2022, 53(4): 86-90.

[6] 陈细润, 石永恩. 攀枝花水文站移动式智能雷达测流系统应用[J]. 水利水电快报, 2023, 44(S1): 61-64.

- [7] 夏志培, 晋涛. 流量 III 型误差的分析[J]. 水文, 2015, 35(6): 67-71.
- [8] 蒋建平, 张孝军, 刘汉伟. 走航式声学多普勒流速仪流量测验质量管理[C]//水利部水文局, 国际水文计划(IHP)中国国家委员会, 国际水文科学协会(IAHS)中国国家委员会, 中国水利学会水文专业委员会. 中国水文科技新发展——2012 中国水文学术讨论会论文集. 长江水利委员会水文局长江下游水文水资源勘测局, 长江水利委员会水文局, 2012: 410-417.
- [9] 柯莉莉, 谢雅蕾, 谢波. 流量在线监测在九江水文站的可行性分析[J]. 江西水利科技, 2023, 49(5): 365-369+390.