

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2024266

胡鸿儒. H-ADCP 在线流量监测系统在广东仁化站的应用分析[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(12): 85-89. HU Hongru. Application analysis of H-ADCP online flow monitoring system in Renhua Station of Guangdong Province[J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(12): 85-89. (in Chinese)

H-ADCP 在线流量监测系统在广东仁化站的应用分析

胡鸿儒

(广东省水文局韶关水文分局, 韶关512026)

摘要: 河道断面的在线流量数据对水利工程调度及洪水预警预报有着重要意义, 部分水文站受地形和河道通航限制, 无法安装测流缆道, 存在着测流耗时费力、高洪时测流危险性大等问题。对 H-ADCP(水平声学多普勒流速剖面仪)在线流量监测系统在广东仁化站的应用进行研究, 介绍了 H-ADCP 的测流原理, 采用实测流量计算的断面平均流速与在线设备测得的代表流速进行率定分析, 得到以仁化站断面代表流速推算断面平均流速的率定关系式, 据此进行断面流量计算, 并将断面流量与实测流量及流量过程进行比较分析, 得出 H-ADCP 在仁化站具有良好的测验精度, 满足水文测验的要求。仁化站 H-ADCP 的应用提升了锦江及广东仁化县城区域的流量在线监控水平, 也为未来智慧水利系统中智慧水文站的智能化监测、数字化整编及现代化管理提供了经验借鉴。

关键词: H-ADCP; 广东省; 仁化站; 率定分析; 应用分析

中图分类号: TV123

文献标识码: A

文章编号: 1673-9264(2024)12-85-05

0 引言

在智慧水利系统的建设中, 大量的流域水文要素构成了系统的数据底板, 其中流量是水文监测中一个重要的监测要素^[1]。目前, 水文现代化发展提出了在智能化建设方面“自动测报, 巡驻结合”的目标^[2], 且近年来水文站点建设增多、水文基层技术人员不足, 传统缆道测流监测手段耗时费力等问题对水文现代化发展有着较大的影响与制约^[3]。H-ADCP(水平声学多普勒流速剖面仪)在线流量监测系统的投产应用, 可以弥补偏远山区河流监测的空缺, 为水文信息化、智能化建设提供持续可靠的水文数据, 有效解决在遭遇大洪水抢测洪峰流量时面临的人员不足和生命安全得不到保障等问题^[4]。此外, 对国产 H-ADCP 的应用研究能有效促进国产水文自动化监测设备的研究发展。仁化站在 2022 年 9 月安装了一套 HST-600 型 H-ADCP, 仪器整体运行情况良好。

1 测站概况

1.1 基本情况

仁化站位于广东韶关仁化丹霞街道水南村, 设立于 1953 年 2 月, 是国家二类精度站及国家基本水文站、北江上游浈江支流锦江区域代表站, 集水面积 1 476 km², 距河口 40 km, 测验项目包括水位、流量、降水量等。仁化站收集的水文基础信息, 为分析锦江水文特性规律、研究河道演变和治理、实施水利工程的综合调度、促进水生态修复和保护、保障锦江流域防洪安全与供水稳定等提供支撑。

1.2 水文特性

仁化站测验河段约 400 m 顺直, 上游约 3.3 km 处有急弯、急滩, 站舍设在左岸, 基本水尺断面位于自记台旁, 测流断面位于基本水尺断面。该站左右岸为河堤, 不易冲刷。河床为砾石、沙组成, 河床较稳定。基本水尺断面上游 7 km 处有大型水库锦江水库, 集水面积 1 410 km², 中间有小支

收稿日期: 2024-07-29

作者信息: 胡鸿儒, 男, 助理工程师, E-mail: hongru_hu@qq.com。

流康溪水(集水面积 52.1 km²)汇入,下游约 2.4 km 处有永久性闸坝 1 座(黄屋电站),对该站形成回水影响。

仁化站全年使用遥控船搭载 ADCP(声学多普勒流速剖面仪)进行流量测验,水位流量情况主要受洪水涨落及上游锦江水梯级电站水利枢纽工程运行调节、调度的影响^[5],且锦江水库控制了本站集水面积的 95.5%,因此采用锦江水库逐日平均出库流量作为仁化站流量,仁化站水文特征值如表 1 所示。

表 1 仁化站水文特征值

项目	特征值	时间(年-月-日)
历史最高水位/m	92.95	1973-06-28
历史最低水位/m	85.41	2014-11-07
历史最大流量/(m ³ ·s ⁻¹)	2 020	1973-06-28
历史最小流量/(m ³ ·s ⁻¹)	0	1993-07-09

2 H-ADCP 测流系统

2.1 H-ADCP 测流基本原理

ADCP 是根据声波频率在声源移向观察者时变高,在声源远离观察者时变低的多普勒频移原理测量水体流速的。换能器既是发射器又是接收器。每个换能器发射某一固定频率的声波,然后接收被水体中颗粒物(如泥沙、气泡)散射回来的声波。假定水体中颗粒物与水体流速相同,当颗粒物的移动方向是接近换能器时,换能器接收到的回波频率比发射频率高;当颗粒物的移动方向是背离换能器时,换能器接收到的回波频率比发射频率低,发射频率与回波频率存在差值,差值确定如下:

$$f_d = 2f_s(v/c) \quad (1)$$

式中: f_d 为声学多普勒横移频率, kHz; f_s 为回波频率, kHz; v 为颗粒物沿声束方向的移动速度, m/s; c 为声波在水中的传播速度, m/s。

H-ADCP 的声波换能器位于同一平面,采用代表流速法进行水道断面流量自动监测。代表流速法的本质是由局部流速推算断面平均流速,一般可采用单点流速、垂线平均流速或水平平均流速作为代表流速^[6]。为减少岸边紊乱水流对代表流速的影响,本次分析将仪器盲区设置为 5.0 m,波束测量开始距离为 8.0 m;为了让仪器的代表流速与实际更相符,设置的波束范围应尽可能包含断面主流区域;

测量距离超过 46.0 m 时,波束有突变情况,所以测量结束距离设置为 46.0 m。因此本次分析将 8.0 ~ 46.0 m 的水平平均流速作为代表流速。

为了得到断面平均流速与代表流速的关系,需测出断面流量和断面面积,从而计算得到断面平均流速。这种同步采样需要在不同的流量或水位情况下进行,这样就得到一组断面平均流速与代表流速及水位的数据。对数据进行回归分析或点绘相关图,即可得到断面平均流速 V 与代表流速 V_{sL} 的回归方程或关系曲线^[7]。

回归方程的一般形式如下:

$$V = f(V_{sL}) \quad (2)$$

水道断面流量计算的公式如下:

$$Q = AV \quad (3)$$

式中: Q 为流量, m³/s; A 为断面过水面积, m²。

2.2 仪器安装及参数指标

H-ADCP 探头安装在仁化站基本水尺断面下游 15 m,起点距为 0.5 m 的河道堤岸支架上(图 1),断面河床为沙及砾石,冲淤变化小,河道顺直,主流稳定,左右岸均为混凝土河堤。该断面安装 H-ADCP 后,截至 2024 年 6 月 16 日实测水位变幅 4.70 m。RTU(远程终端单元)机箱等其余设备安装在仁化站水位自记台,可以有效防止被盗或人为破坏,移动信号和太阳能板采光条件都较好。

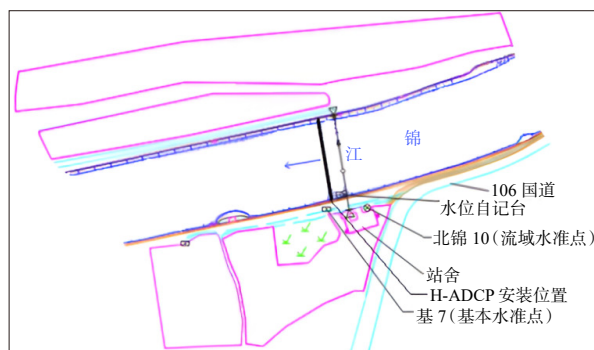


图 1 仪器安装位置示意图

根据安装位置实际情况,对 H-ADCP 系统软件的参数指标进行设置(表 2),保证测量范围有效覆盖主流位置^[8]。

表 2 仪器主要参数指标

安装 高程/m	测量 范围/m	流层剖 面数/层	采样 间隔/s	采样 时间/s	纵摇/(°)	横摇/(°)
86.41	8.0 ~ 46.0	13	300	60	0.65	-0.11

3 资料整理分析

3.1 比测资料率定

2022年9月30日至2024年6月16日,仁化站共收集了32组比测率定数据,满足《河流流量测验规范》中不少于30个数据点的要求。实测流量数据中有28组在仁化站基本水尺断面兼流速仪测流断面采用遥控船搭载走航

式ADCP测量得到,有4组在仁化站下游1600m的桥梁(与H-ADCP安装断面之间无支流汇入)牵引无动力三体船搭载走航式ADCP桥测得到。率定过程中,仁化站实测最大流量682.0 m³/s;水位变幅85.65~90.17 m。所有率定测次流量除以相应断面面积计算得到断面平均流速0.10~1.76 m/s,对应代表流速0.07~1.96 m/s。表3为部分比测率定数据资料。

表3 比测率定数据资料

序号	日期(年-月-日)	实测流量数据				基本水尺断面数据			
		开始时间	结束时间	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	测流断面位置	水位/m	面积/m ²	断面平均流速/(m·s ⁻¹)	代表流速/(m·s ⁻¹)
1	2022-09-30	10:24	10:44	40.9	基本水尺断面	88.94	291	0.14	0.08
2	2022-12-12	13:54	14:06	85.6	基本水尺断面	89.00	297	0.29	0.29
3	2023-01-12	12:15	12:21	39.0	基本水尺断面	89.03	299	0.13	0.12
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
32	2024-06-16	13:40	13:58	682.0	基本水尺断面下游1600m	90.17	387	1.76	1.96

对实测断面平均流速资料率定时段进行分析^[9],对应的H-ADCP代表流速为0.072~1.520 m/s,根据H-ADCP的测流原理,高流速时声波由于受到洪水中泥沙等悬浮颗粒的影响,探测距离比低流速时短,主流占比相对较少,仪器得出的代表流速会相对实际断面平均流速偏小,因此相关关系在高流速延伸时更适宜用后端有上翘的二次函数关系拟合。建立代表流速与断面平均流速相关关系式,相关关系式如下:

$$V_{\text{断面平均}} = 0.0563V_{\text{代表}}^2 + 0.746V_{\text{代表}} + 0.0635 \quad (4)$$

决定系数 R^2 为0.9955,两组数据建立的关系式有良好的相关关系(图2)。

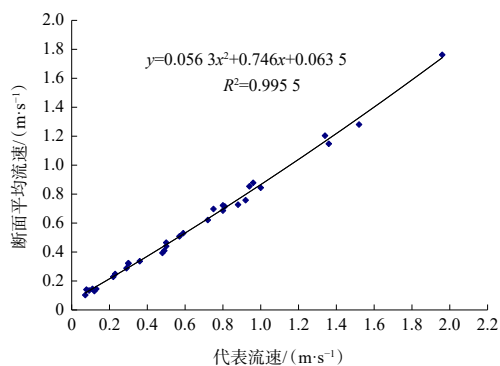


图2 代表流速与断面平均流速相关关系图

对代表流速与断面平均流速关系曲线的随机不确定度、符号、适线和偏离数值进行检验^[10-11]。

(1)随机不确定度检验: $V_{\text{代表}} \sim V_{\text{断面平均}}$ 测点标准差 $Se=6.8%$,随机不确定度为 $13.6\% \leq 14\%$,达到规范规定的精度要求;系统误差为 $0.02\% \leq \pm 1\%$,达到精度要求^[12]。

(2)符号检验: $n=32, K=17$ (K 为正号个数), $u=-0.18 < 1.15$,认为合理,符号检验通过。

(3)适线检验: $n=32$,不变换符号“0”次数为14,变换符号“1”次数为17,变换符号次数大于不变换符号次数,免作适线检验。

(4)偏离数值检验: $n=32$,平均相对偏离值 $\Delta P=-0.02\%$, P 的标准差 $S=6.68$, ΔP 的标准差 $Sp=1.18$,统计量 $t=-0.02$, $|t|=0.02 < 1.31$,认为合理,偏离数值检验通过。

上述检验均达到规范要求,认为定线正确。

3.2 流量精度对比分析

将32份实测流量与H-ADCP流量进行对比,结果如表4所示。其中实测流量与H-ADCP流量相对误差的绝对值平均为4.59%,最大为17.90%,最小为0.27%,相对误差 $\leq \pm 12\%$ 的比例达到90.6%, $\leq \pm 10\%$ 的比例达到87.5%,说明代表流速和断面平均流速的率定关系可靠,可以应用在日常的流量测验工作中^[13]。

3.3 逐时流量过程线合理性分析

选取仁化站2023年6月的洪水进行逐时流量过程线对比(图3)。从流量过程线来看,H-ADCP流量相较于整编流量基本一致偏大,因为仁化站整编流量为上游锦江水库

表4 H-ADCP 流量与实测流量比较表

测次	水位/ m	实测流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	断面面积/ m^2	平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	H-ADCP 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差 绝对值(%)
1	88.94	40.9	291	0.12	35.5	13.20
2	89.00	85.6	297	0.29	84.5	1.29
3	89.03	39.0	299	0.15	45.1	15.64
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
32	90.17	682.0	387	1.74	674.1	1.15
最大值	90.17	682.0	387	1.74	674.1	17.90
最小值	88.83	28.0	272	0.12	32.0	0.27

出库流量推流得到,而锦江水库出库与仁化站之间存在一定的集水面积差并且两个断面间有一处康溪水支流汇入导致实际仁化站断面流量高于锦江水库出库流量。

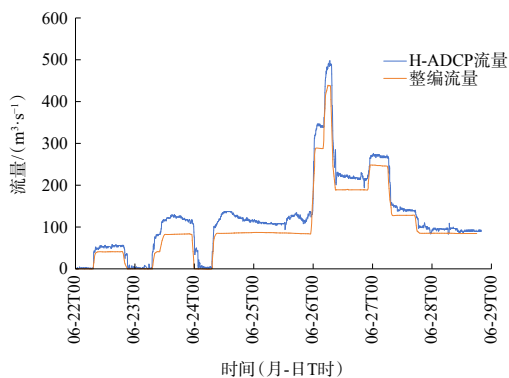


图3 H-ADCP 流量与整编流量过程对比图

4 效益分析

采用 H-ADCP 进行流量监测,增强了仁化站的自动化监测能力,具有流量资料连续性好、监测运行成本低、资料整编效率高等优点。流量测验的在线化,为智能水文站的建设提供了良好的数据基础,也为水文行业从人工缆道测流、人工纸质整编测流资料,向自动化实时流量监测、流量数据在线整编的信息化转型升级提供了有力的支撑。近年来广东省短时间小范围强降水频发,“2024.4 韶关洪水”“2024.6 梅州洪水”等大多发生在人员无法快速抵达的粤东西北的山区性河流,具有汇流形成快、水位涨落差大等特点,H-ADCP 能够持续有效地监测洪水发生过程,为山区河流的预警预报提供支撑。在枯水期时,可以持续监测水库下泄流量,为生态流量保障的考核提供依据;在汛期时,能够有效监测洪峰流量,为水库的精准调度削减洪峰提供有力支撑,同时也能节约水文测验人力投入其他监测任务,并且可以有效减少洪水期间

的水文人员测验工作时的安全问题。H-ADCP 的推广应用有利于减轻水文行业不断增加的水文数据收集工作,从而将主要的生产力放在后续水文数据加工,水文产品提升等方面。因此,H-ADCP 作为一个安装简单使用方便的流量监测设备,在未来洪水预警预报和水文现代化发展中有着重要应用前景。

5 结语

通过对流速的比测分析及在线流量与实测流量的精度对比分析,H-ADCP 代表流速与断面平均流速的率定关系式 $V_{\text{断面平均}}=0.0563V_{\text{代表}}^2+0.746V_{\text{代表}}+0.0635$ 合理可靠,达到规范规定的精度要求,可以在仁化水文站投产应用。

采用 H-ADCP 进行水文测验时应注意以下几点:①仪器安装时应考虑安装高程尽可能满足各级水位的水深,选取仪器安装断面应尽量选择水位、流速、流态稳定及冲淤变化小的断面,以防使用过程中率定公式频繁失准需要重新校测。②在设备应用期间需持续做好各级水位和流量下的比测分析,以拓宽设备测验应用的流速范围,确保仪器的测验精度。③应做好防雷措施并安装“禁止电鱼保护水文设施”等标语,在河道水位降低至仪器探头露出水面前应及时关闭探头,以防设备损坏。

对比 H-ADCP 流量与整编流量洪峰涨落过程发现,洪峰流量越大时,H-ADCP 流量与整编流量的差值越大,说明相同河流上下游不同断面的集水面积差并不一定能够代表断面流量的差值。断面流量受到不同集水区域的径流系数影响,山区和城镇在降水强度相同的情况下,城镇对降水的留置明显小于山区。近年来小区域内短时强降雨多发,城市内涝加重,山区性河流易发超历史洪水,应该加强对不同区域的径流实验及相关分析,以提升极端洪涝灾害情况下的水文测报及预警防汛能力。

参考文献

- [1] 庞家锋,林凯荣,郑炎辉,等.小流域数字孪生建设关键技术研究及应用——以广东佛山市三水区大塘引涌为例[J].中国防汛抗旱,2022,32(7):19-23.
- [2] 王彩玲,郭新伟.水文现代化在智慧水利中的重要作用[C]//2023(第十一届)中国水利信息化技术论坛论文集.2023:572-578.
- [3] 李琛亮,高滢钦.滦河流域防洪形势分析及应对策略研究[J].中国防

- 汛抗旱, 2024, 34(5): 69-73.
- [4] 丘蔚天, 孙锋. H-ADCP 在山溪性河流水文站流量测验中的应用研究[J]. 人民珠江, 2015(4): 67-69.
- [5] 林伟平. 水利工程影响下锦江流域水文情势变化研究[J]. 广东水利水电, 2022(2): 1-6.
- [6] 吕宗城. H-ADP 在线测流系统在乐昌站的应用分析[J]. 人民珠江, 2014(4): 105-107.
- [7] 冯万里, 苏楚雄. 博白水文站双轨全自动雷达波在线测流系统比测分析[J]. 广西水利水电, 2023(1): 50-54.
- [8] 吴燕梅, 杨吉护. 信都水文站水平式 ADCP 在线测流系统比测分析[J]. 广西水利水电, 2020(1): 73-77.
- [9] 邓山, 胡立, 左建, 等. H-ADCP 代表流速与断面平均流速拟合精度研究[J]. 人民长江, 2020(10): 100-104.
- [10] 董畅. 影响 H-ADCP 在合江水文站应用的环境因素分析[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(6): 183-185.
- [11] 丁琳, 邓世德, 张臣, 等. 安徽省自动测流系统比测研究及实践[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(9): 62-66.
- [12] 中国水利学会. 声学多普勒流量测验规范: T/CHES 61—2021[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- [13] 中华人民共和国水利部. 水文资料整编规范: SL/T 247—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.

Application analysis of H-ADCP online flow monitoring system in Renhua Station of Guangdong Province

HU Hongru

(Shaoguan Hydrological Branch of Guangdong Provincial Hydrological Bureau, Shaoguan 512026)

Abstract: The online flow data of river sections is of great significance for water works regulation and flood warning and forecasting. Some hydrological stations are limited by terrain and river navigation, and cannot install flow measurement cable channels, which poses problems such as time-consuming and laborious flow measurement, and high risk of flow measurement during major flood periods. A study was conducted on the application of online H-ADCP flow monitoring system at Renhua Hydrological Station (hereinafter referred to as Renhua Station), and the flow measurement principle of H-ADCP was introduced. The calibration analysis of the average flow velocity of the cross-section calculated by the measured flow rate and the representative flow velocity measured by the online equipment was used to obtain the calibration relationship between the average flow velocity of the cross-section calculated by the representative flow velocity of Renhua Station. Based on this, the cross-section flow rate was calculated and compared with the measured flow rate and flow process. It was found that online H-ADCP has good measurement accuracy at Renhua Station and meets the requirements of hydrological testing. The application of H-ADCP at Renhua Station has improved the online monitoring level of flow in the Jinjiang river and Renhua County areas, and also provided experience and reference for the intelligent monitoring, digital compiling, and modern management of smart hydrological stations in future smart systems in water sector.

Keywords: H-ADCP; Guangdong Province; Renhua Hydrological Station; calibration analysis; application analysis 编辑 江 密