

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.04.001

水文站流量在线监测方法研究进展

吴志勇¹, 徐 梁¹, 唐运忆², 何 海¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省水资源服务中心, 江苏 南京 210029)

摘要:在分析现有水文站流量在线监测实现途径的基础上,综述了流量在线监测中流速面积法和水力学法的最新研究进展。依据通过局部流速计算断面流量原理的不同,将基于流速面积法的水文站流量在线监测方法分为指标流速法、流速分布模型法和表面流速法 3 类。并对比分析 H-ADCP 法、V-ADCP 法、二线能坡法、雷达法、粒子图像法、量水建筑物法及水工建筑物法的优缺点,指出在提高在线监测精度、改善稳定性和促进应用 3 方面应进行进一步深入的研究。

关键词:流量;水文测验;在线监测;流速面积法;水力学法;水文站

中图分类号:P332.4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)04-0001-07

Research progress of on-line discharge monitoring methods in hydrometry stations // WU Zhiyong¹, XU Liang¹, TANG Yunyi², HE Hai¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Water Resources Service Center, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the analysis of the existing methods of on-line discharge monitoring of hydrometry stations, this paper summarizes the latest research progress of velocity-area method and hydraulic method in on-line discharge monitoring. Cross section discharge was calculated based on local flow velocity, and the on-line discharge monitoring method based on velocity-area method is divided into three categories: index-velocity method, velocity distribution model method and surface velocity method. This paper analyzes the advantages and disadvantages of H-ADCP method, V-ADCP method, two-line energy slope method, radar method, particle image method, water measuring building method and hydraulic building method, and points out that further research will be carried out in improving online discharge monitoring accuracy, improving stability and promoting application.

Key words: discharge; hydrometry survey; online monitoring; velocity-area method; hydraulic method; hydrometry station

流量是单位时间内通过江河某一横断面的水体体积,是反映江河等水体水量变化的基本数据,也是河流最重要的水文特征值^[1-2]。传统的流量测验方法是将测验断面分成多个部分,并在每部分上布设测速垂线,利用流速仪等设备测量各垂线上测点的流速,得到垂线平均流速并计算该部分流量,进而累加得到整个断面的流量。这种测验方法虽能在精度上满足流量测验规范的要求,但操作复杂、历时长、工作强度大,效率低下,已跟不上我国水文站点快速增加和功能扩展的需求。随着社会、经济和科技的快速发展,水文监测现代化的重要性日渐凸显,其中河流量监测自动化是当今社会发展对水文工作的必然要求之一,而水文测验方式和方法的自动化又是整个水文信息化的前提和保障。为此,改进传统

流量测验方式,广泛推进流量在线监测,提高水文自动化程度和效率,具有十分重要的意义。

流量在线监测是指结合水位及大断面数据,根据采集到的实时流速信息,计算断面实时流量,并将这些数据保存到数据库中的过程。在线监测系统主要由水位和流速数据的自动采集、数据传输和分析处理 3 部分组成,涉及现代传感技术、自动测量技术、自动控制技术、计算机应用技术以及相关的专用分析软件和通信网络^[3-4]。其中,现代信息技术的蓬勃发展推动了整个水文测验行业的进步,新测流技术的出现不仅提高了测流的时效性,采集到的数据量也大大增加。与此同时,计算机处理技术的发展让我们可以充分地挖掘数据中的信息,对断面水流特性有更好的把握。在线监测技术虽经几十年的发

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0405701);江苏省水利科技项目(2018035)

作者简介:吴志勇(1979—),男,教授,博士,主要从事水文物理规律及水文预报等方面研究。E-mail: zywu@hhu.edu.cn

展,逐渐走向生产应用,但其核心问题还未完全解决,如何通过局部流速计算断面平均流速依然是个难点。

在线流量监测的不断推进将极大提高测流效率,提升我国水文测验行业的能力和水平。水利部水文司资料显示,2018年全国水文系统已装备在线测流系统1616套、声学多普勒流速仪(acoustic doppler current profiler, ADCP)2665台,先进仪器设备较2016年显著提升。然而,目前我国流量在线监测设备主要还依赖进口,由于在线监测技术本身成熟度不高,加之测站工作人员水平限制、专业运维团队匮乏,在线监测设备及系统在许多水文站点应用效果并不好^[5-9],流量的精度、测流设备的稳定性及应用的问题依然突出。本文在总结现有几种在线监测方法优点及局限性的基础上,依据流量在线监测中流量计算的核心技术,对在线监测方法中的流速面积法进行分类,并针对精度、稳定性和应用等问题对流速面积法及水力学法进行深入探讨。

1 研究现状

从测验原理来看,流量在线监测可通过流速面积法和水力学法来实现。流速面积法是目前应用最广泛的方法,该方法通过实测断面流速与断面面积来推求流量;在流速面积法中,电磁流速仪、多普勒流速仪等仪器被广泛应用于流量在线监测工作中。水力学法利用水位流量关系,由测得的水位通过水力学公式计算得到流量,分为量水建筑物法和水工建筑物法^[10];水力学方法多用于较小的河流,大江大河流量在线监测中应用较少。

1.1 基于流速面积法的在线监测方法

现阶段基于流速面积法的流量在线监测方法还没有一个明确的分类,通常采用测流仪器进行命名,例如水平式 ADCP(H-ADCP)法、坐底式 ADCP(V-ADCP)法、雷达法等。这种分类方法虽能直观地显示各仪器测流方式之间的差异,但却无法反映流量计算方法及适用性之间的差异,不利于在线监测的推广应用。基于以上原因,本文依据断面平均流速计算原理提出分类方法,将现有在线监测方法分为3类:指标流速法、断面流速分布模型法和表面流速法。该分类方法能够突出在线流量监测的原理和关键技术,有利于在线流量监测技术的完善和推广应用。

1.1.1 指标流速法

目前,国内外使用最多的在线监测方法为指标流速法^[11],该方法专指要通过建立指标流速与断面平均流速相关关系计算断面流量的方法。这里的指

标流速通常指难以明确具体对象或物理含义的实测局部流速,例如 H-ADCP 采集的断面某一层的局部流速,该流速一般为某一深度下 H-ADCP 量程范围内一个锥形水体对象的平均流速。

现阶段,结合 H-ADCP 开发流量在线监测系统的研究较多,越来越多测流方案的提出,也使解决大型感潮河段以及大江大河测流难点问题成为可能^[12-16]。通常情况下,指标流速与断面平均流速直接构建线性相关关系^[15]。研究发现,受水位变化的影响,不同水位级下建立的回归方程通常有所差异。为解决此问题,也有将水位作为变量考虑,构建基于指标流速、水位的回归方程;杜耀东等^[17]则建议将仪器安放在周期性转动的平台上,使测量范围由线变成面获取指标流速。对于特别复杂的河流,也可同时采用多个指标流速,例如南京水文试验站采用 H-ADCP 与定点 ADCP 结合的方式获取指标流速,构建多变量相关方程实现在线监测^[18-19]。总体而言,国内对 H-ADCP 的应用研究多停留在单站试验,尚未有系统的测验误差控制及参数优化方法。

1.1.2 断面流速分布模型法

断面流速分布模型法是指通过采集到的水层或垂线流速,结合流速分布模型,进行流量实时在线监测的工作。该方法又可分为水平流速法和垂线流速法,前者采用水层平均流速通过逐层流速积分或流速模型计算断面流量,后者则直接采用垂线流速模型计算断面流量。

a. 水平流速法。该方法通过获取测流断面上的水层流速,采用流速分布模型计算得到断面平均流速,进而得到流量。目前水层流速的获取方法主要采用超声波时差法,该法利用超声波在河段上、下游两个固定点之间顺水和逆水传播的时间差,计算得到水层平均流速^[1,20],该法有单层测流法和多层测流法两类^[10]。在计算流量时,若断面规则,可直接通过逐层流速积分计算;反之,则要通过断面水深-面积模型,根据水层流速和水深自动计算。水平流速分布模型法适用于较宽的河流,能够实现实时流量监测,适合无人值守的测站^[21],但该方法土建成本高,运行维护不便,水草较多对其精度也有一定的影响。日本、英国、美国、德国、加拿大、瑞士、法国、韩国、荷兰等国均采用该法测流^[8,10],国内对其应用也有研究,但都集中在人工渠道上,天然河道上的成功应用鲜有报道^[22-24]。

b. 垂线流速法。该方法主要通过实测一条或多条垂线平均流速,通过流速模型反演其他垂线流速,或建立与断面平均流速相关关系,结合断面面积,计算断面流量。尽管这类方法中也有与指标流

速法类似构建的相关关系,但用于建立相关的变量有着本质的区别,即垂线平均流速具有明确的物理意义。垂线流速法通常配合 V-ADCP 使用^[25],可有效解决 H-ADCP 法流量在线监测时存在的相关线建立时间周期长、受航运影响大、低水位时探头外露和高水外延等问题^[26-27]。典型的垂线流速法有两种:代表线法和二线能坡法。代表线法通过历史资料,选定至少一条与断面平均流速相关性较好的测速垂线作为代表线,并建立相关关系,结合断面面积,计算断面流量。国内对该方法有较多应用,例如徐六泾水文站用该方法解决潮流量测验问题^[28]、前埠村水文站利用该方法为寻找典型点流速提供支撑^[29]、龙门水文站利用该方法降低高洪作业风险^[30]。但国内大部分应用还存在原始资料系列较短、断面稳定性及流量精度评价指标不完整、流速相关关系使用条件不明确等问题。二线能坡法以曼宁公式为基础,通过虚拟矩形、三角形断面中垂线平均流速与断面平均流速之间关系,建立垂线流速模型。实际计算中,以实测的两条垂线流速为已知条件,代入垂线流速模型,反求得能坡,作为均匀流条件下曼宁公式中的水面比降。最后通过垂线流速计算模型,结合水位面积关系计算断面流量,国内已有少量应用成功的例子^[31-32]。

1.1.3 表面流速法

表面流速法指通过获取测流断面上水面流速,并通过转换得到特征垂线平均流速或断面平均流速进行流量计算的方法。表面流速的获取可以采用缆道雷达、侧扫雷达、粒子图像法等非接触式测流仪器。非接触式仪器不受污水及泥沙影响、不影响水流状态,尤其在陡涨险落的山区性河流的监测中具有明显优势^[33-35]。现阶段国内应用较广的表面流速法测流有雷达法和粒子图像法。

a. 雷达法。该法又称电波法,是基于微波多普勒效应测量水面流速的一种方法,主要通过雷达波传感器自动发射和接收电磁波,利用多普勒原理测定水面流速,通过流速系数或回归分析得到断面平均流速,从而得到断面流量。雷达法测流不受含沙量及漂浮物的影响,可用于巡测,其测验精度高于浮标法,可以较好地应用于在线监测工作中。但雷达法对测量条件敏感,易受大风大雨及测量角度影响,低流速测量误差大^[33]。非接触式雷达测速仪的应用可有效提高测流效率,但目前大部分测验均存在比测时间短、测次少、比测结果不具有代表性等缺陷,而且这些站多是中小河流水文站,在大江大河上适用性还有待验证^[36-38]。国产侧扫雷达的研究也取得一定成果,并已在黄河兰州站、花园口站、长江

南京站、广西南宁站等站点得到良好应用^[39]。该设备环境适应性强,受气象条件影响很小,适用于恶劣天气、高洪多漂浮物、漫滩等恶劣环境。国产侧扫雷达性能优良,表面流速测验精度较高,但由于自然河道流体运动的复杂性,绝大部分情况相关性较差,流量精度还难以满足测验要求。

b. 粒子图像法。粒子图像法利用拍摄到的河流水面视频,估计示踪物在图像序列中运动矢量的大小,分析测流区域内局部流体的运动规律,通过流速系数将水面流速转换为断面平均流速,从而得到断面流量^[40]。该方法在快速获取水面流场及紊动特性、高洪及极端条件流量监测有明显优势。目前,日本、韩国等国家正在大量开展该方法的试验研究工作^[35]。粒子图像法又包括极坐标摄影浮标法、卫星遥感图像法、大尺度粒子图像测速法和时空图像法。极坐标摄影浮标法采用摄影照片代替人工目测,虽然精度和自动化程度较高,但由于部署工作量较大,实际应用较少。卫星遥感图像法对地面信息和历史数据的依赖过大,同时测量误差较大,还无法实用化。大尺度粒子图像测速法具备时空分辨率高、测量范围广、成本低廉等优点^[8],不仅可用于常规条件下测流工作,更具有极端条件下河道水流监测的应用潜力^[33,41],韩国^[8]以及我国吉安市垌下坪水文站^[42]已开展相关研究。时空图像法是一种高空间分辨率的一维时均运动矢量估计方法,目前也处于试验阶段^[43-45]。

1.2 基于水力学法的在线监测方法

水力学法不受人为因素及河流特性的影响,无须建设测流缆道,容易实现遥测,是一类重要的方法并且具有推广价值。该方法可进一步分为量水建筑物法和水工建筑物法。量水建筑物法通常采用量水堰、量水槽、量水池等量水建筑物测流;英国有一半水文站采用量水建筑物法,该方法对建筑物的建设要求比较严格,适用于小型河流,需在实验室做模拟试验计算流量系数,或者在典型水文站上校测流量系数^[46]。水工建筑物法采用堰、水电站、泵站等水工建筑物测流^[4],该法根据能量转换和守恒原理,通过实测水头差、闸门开启高度等水力因素,确定流量系数或效率系数,用水力学公式计算流量。水工建筑物法精度较高,程序简便,但同时存在泄水建筑物造价昂贵的缺点,韩国大量利用该方法开展流量测验和在线监测工作^[9],我国三河闸^[47]、柳河^[48]、琚湾^[49]、飞来峡^[50]等水文站均有相关研究;近年来,许多省份有在适宜的河流上推广该方法的意向,在引黄灌区、多地供水设施还采用不同形式的堰闸在线测流设施设备^[51]。

2 研究展望

2.1 提高在线监测的精度

没有一种设备是可以满足所有断面和水流情况的,具体应用时应结合测站任务及河道自然属性,选择合适的测流方法,从而确定所需的设备仪器。流量测验首要保证测流的精度,但现阶段在线测流技术在该方面还存在不足。例如,中泓最大水面流速低于 0.2 m/s 时,暂时还没有一个精准的测流方法;如何进行点流速比测也是一个难点问题;侧扫雷达使用时可能受回水及船只影响,造成流速测量误差较大,还需不断优化流量计算模型;同时,当地水文条件、测站工作人员水平等问题也是影响测验精度的重要因素。

无论采用哪种测流方法,如何通过实测的局部流速获得断面平均流速一直是个难点。要提高流量测验精度,关键还是要根据测验河段的水力学特性,充分应用现代化测流手段和数值计算技术,确定特定测站的流量计算方法和模型,率定其所需要的参数。随着声学多普勒测流技术及三维水动力模型的逐渐成熟,可将固定式 ADCP 与水力学模型结合,建立三维流速模型来推求断面上每一处水流影响因子和程度^[52-54]。结合 ADCP 采集到的流速,进行流量在线监测,这将是解决在线监测精度问题的突破方向。对于非接触测流技术尤其需要注意风速的影响,未来还需建立风场与水面流场的相关关系,以提高设备精度。

2.2 改善在线监测的稳定性

在线监测仪器的运行稳定性受流量、流速、风速等外界条件影响。雷达法、二线能坡法等在水量较小时测量误差较大,并且水量较小也会加大风速的影响。侧扫雷达还可能受到周边相同频率的干扰源的影响,大大增加测流误差。声学多普勒测流技术已相当成熟,但 H-ADCP 只能测得仪器安装处水层的局部流速分布,而且是近岸一段,而水位不断变化势必会造成水层流速代表性的变化;若多次移动仪器,不仅增加了测流工作量,还可能影响测流精度。因此,可基于历史水文资料构建水位与 H-ADCP 安装位置及倾角之间的相关关系,采用可自动调整倾角的底座,大大减轻工作量。大江大河的宽度远大于 H-ADCP 的测流范围,除采用组合式监测系统外,还可将采集到的数据与历史水文数据结合,补全断面流速,再计算得到断面流量^[55]。

2.3 促进在线监测的应用

在线监测技术已经历几十年的发展,但缺乏专业技术人员进行比测率定、定期维护等工作,造成测

验设备在应用过程中问题层出^[9,33,56]。同时,感潮河段水文现象复杂,河口区河面宽阔、航运繁忙,国内虽有相关研究,但河口流量测验还需寻找具有快速全场测量的能力并能适应复杂的测流环境的测流方案。我国非接触测流设备主要依赖于进口,许多国产 ADCP 性价比有待提高,高端仪器产品基本为空白^[7],缺少更加系统全面的技术依据及相关技术指标,这些问题限制了该设备的广泛应用。侧扫雷达、国产 ADCP 等技术还未成熟,配置技术参数还不够明晰,比测时均存在水位变幅较小的问题。

卫星遥感图像法以及低空遥感无人机测流技术^[57]虽有相关研究,但测流精度依然较低,仅在试验河段及站点测流结果较好,无法满足实际测流需要,还需一段时间的研究发展,短期内无法为在线监测服务,但这些方法对于洪水、堰塞湖、泥石流等条件下的应急监测具有重要意义。

在自动采集水文信息后通过现代通讯技术进行数据传输,利用计算机自动接受、处理、存储分发水文信息,是水文信息化的发展方向^[58]。为了加快水文信息化的发展,要走在在线监测、远程控制、巡驻结合的道路,应用多源传感器信息融合技术^[28],加快物联网和 5G 数据传输技术的研究,加快水文仪器国产化进程,真正实现“有人看管,无人值守”,实现互联网+水文深度融合。

3 结 语

本文总结了目前大江大河流量在线监测中广泛采用的几种方法,依据流速数据采集及流量计算原理对监测方法进行了分类。目前在线监测推广应用工作正在如火如荼地展开,但缺乏专业的技术团队对监测仪器误差控制、精度分析等方面进行深入研究,这种失衡是导致在线监测推广应用停滞不前的一大原因。本文针对在线监测精度、稳定性和应用方面的问题进行详细论述,并指出固定式 ADCP 与水力学模型结合将是解决我国在线监测问题的突破方向;同时,在具备条件的地区,使用测流建筑物的水力学法测流也是一条可行的途径。

参考文献:

- [1] 谢悦波. 水信息技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- [2] 张轩,张行南,江唯佳,等. 秦淮河流域东山站水位预报研究[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 41-46. (ZHANG Xuan, ZHANG Xingnan, JIANG Weijia, et al. Study on water level forecast of Dongshan Station in Qinhuai River Basin[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 41-46. (in Chinese))

- [3] 周怀宇,刘滋菁,刘海龙,等. 雨洪管理设施的监测与智慧景观设计结合的跨学科实证[J]. 水资源保护,2019,35(6):82-88. (ZHOU Huaiyu, LIU Zijing, LIU Hailong, et al. Interdisciplinary demonstration of combination of stormwater management facilities monitoring and smart landscape design[J]. Water Resources Protection,2019,35(6):82-88. (in Chinese))
- [4] 鲁青,周波,雷昌友. 实时流量在线监测系统开发与实现[J]. 人民长江,2014,45(2):90-92. (LU Qing,ZHOU Bo, LEI Changyou. Development and realization of real-time discharge monitoring system [J]. Yangtze River, 2014,45(2):90-92. (in Chinese))
- [5] 夏军,左其亭. 国际水文科学研究的新进展[J]. 地球科学进展,2006(3):256-261. (XIA Jun, ZUO Qiting. Advances in international hydrological science research [J]. Advances in Earth Science,2006(3):256-261. (in Chinese))
- [6] 徐宗学,李景玉. 水文科学研究进展的回顾与展望[J]. 水科学进展,2010,21(4):450-459. (XU Zongxue, LI Jingyu. Progress in hydrological sciences: past, present and future[J]. Advances in Water Science,2010,21(4):450-459. (in Chinese))
- [7] 章树安,张留柱,马湛. 中美水文测验技术比较研究[J]. 水文,2007,27(6):70-87. (ZHANG Shuan,ZHANG Liuzhu, MA Zhan. A comparative study of Chinese and American hydrometry techniques [J]. Journal of China Hydrology,2007,27(6):70-87. (in Chinese))
- [8] 赵昕,陈红云,熊明. 中韩水文测验及管理体制对比分析[J]. 人民长江,2017,48(9):30-34. (ZHAO Xin, CHEN Hongyun, XIONG Ming. Comparative analysis of hydrometry and management systems in China and South Korea [J]. Yangtze River, 2017, 48 (9): 30-34. (in Chinese))
- [9] 魏新平,张淑娜. 从水文行业统计看水文事业发展[J]. 水文,2013,33(5):23-27. (WEI Xinping, ZHANG Shuna. Interpreting development of hydrologic services based on hydrologic statistics [J]. Journal of China Hydrology,2013,33(5):23-27. (in Chinese))
- [10] 王俊,王建群,余达征. 现代水文监测技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2016.
- [11] RANTZ S E, OTHERS A. Measurement and computation of streamflow: volume 1, measurement of stage and discharge [J]. Irrigation & Drainage Systems, 1982, 1: 1-10.
- [12] CHEN Z, WANG Z, LIU Y, et al. Estimating the flow velocity and discharge of ADCP unmeasured area in tidal reach [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2016, 52:208-218.
- [13] 肖林. 组合式流量在线监测系统在变动回水断面的应用 [J]. 水文, 2018, 38 (3): 69-72. (XIAO Lin. Application of combined on-lin flow monitoring system in variable backwater section [J]. Journal of China Hydrology,2018,38(3):69-72. (in Chinese))
- [14] 曾雅立,张伟革,樊丽娜,等. 宜昌站 H-ADCP 流量关系率定及应用 [J]. 水利水电快报,2019,40(2):14-16, 25. (ZENG Yali, ZHANG Weige, FAN Lina, et al. Calibration and application of flow relation of H-ADCP in Yichang station [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2019, 40 (2): 14-16, 25. (in Chinese))
- [15] 杜兴强,沈健,樊铭哲. H-ADCP 流量在线监测方案在高坝洲的应用与改进 [J]. 水文,2018,38(6):81-83. (DU Xingqiang, SHEN Jian, FAN Mingzhe. Application and improvement of H-ADCP online monitoring program at Gaobazhou Station [J]. Journal of China Hydrology,2018,38(6):81-83. (in Chinese))
- [16] 王发君,黄河宁. H-ADCP 流量在线监测指标流速法定线软件“定线通”介绍与应用 [J]. 水文,2007,27(4):63-65. (WANG Fajun, HUANG Hening. “IVC-Creator”: an index-velocity rating creation program for H-ADCP online discharge monitoring [J]. Journal of China Hydrology,2007,27(4):63-65. (in Chinese))
- [17] 杜耀东,宋星原,王俊. H-ADCP 在复杂环境下的应用 [J]. 人民长江,2008,39(3):57-59. (DU Yaodong, SONG Xingyuan, WANG Jun. Application of H-ADCP in complex environment [J]. Yangtze River, 2008, 39 (3): 57-59. (in Chinese))
- [18] 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. (WEI Lixin, JIANG Jianping, CAO Guanzhong. Study on the improvement of ADCP flow measurement method in Nanjing hydrological experimental station [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2017,38(6):11-14. (in Chinese))
- [19] 陈健健,凌飞. 南京水文实验站指标流速的选择分析 [J]. 东北水利水电,2018,36(5):33-35. (CHEN Jianjian, LING Fei. Selection analysis of indicator velocity for Nanjing hydrological experimental station [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2018, 36 (5): 33-35. (in Chinese))
- [20] 李广峰,刘昉,高勇. 时差法超声波流量计的研究 [J]. 电测与仪表,2000,37(9):13-19. (LI Guangfeng, LIU Fang, GAO Yong. Study on travel-time-difference ultrasonic flowmeter [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2000, 37 (9): 13-19. (in Chinese))
- [21] 蔡守允,戴杰. 时差式超声波流量计测流控制系统 [J]. 水利水电科技进展,2009,29(5):71-73. (CAI Shouyun, DAI Jie. Time-difference-type ultrasonic flow meter and control system for discharge measurement [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29 (5): 71-73. (in Chinese))
- [22] 赵德友. 运河水文站流量自动监测系统建立与实现技

- 术[J]. 水利信息化, 2011(3): 68-72. (ZHAO Deyou. Construction and techniques for automatic discharge monitoring system at Gaunging Station on Yunhe River [J]. Water Resources Informatization, 2011(3): 68-72. (in Chinese))
- [23] 刘正伟, 张丽花. 超声波时差法在流量自动监测中的应用: 以牛栏江-滇池补水工程为例[J]. 人民长江, 2016(增刊 1): 53-55. (LIU Zhengwei, ZHANG Lihua. Application of ultrasound time difference method in automatic discharge monitoring: a case study of Niulanjiang-Dianchi Water Supplementary Project [J]. Yangtze River, 2016(Sup1): 53-55. (in Chinese))
- [24] 姜勇. 时差法超声波流量计设计与研发[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [25] 杜亚南, 张良平, 游目林. 钢铁材质浮标对 ADCP 水文监测系统流量测验精度的影响[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(1): 55-59. (DU Yanan, ZHANG Liangping, YOU Mulin. Effects of steel buoy on flow measurement accuracy of ADCP hydrological monitoring system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(1): 55-59. (in Chinese))
- [26] 梁后军, 刘小虎, 蔡国成, 等. 二垂线式 ADCP 流量测量系统[J]. 水利信息化, 2013(4): 26-29. (LAING Houjun, LIU Xiaohu, CAI Guocheng, et al. Two-vertical-line type ADCP flow measurement system [J]. Water Resources Informatization, 2013(4): 26-29. (in Chinese))
- [27] 刘正伟, 张丽花, 华立敏. 底座式多普勒测流仪在渠道自动监测中的应用[J]. 人民长江, 2017, 48(1): 29-31. (LIU Zhengwei, ZHANG Lihua, HUA Limin. Application of base type Doppler flow meter in channel flow automatic monitoring [J]. Yangtze River, 2017, 48(1): 29-31. (in Chinese))
- [28] 朱巧云, 高健, 刘桂平, 等. 长江河口段徐六泾水文站潮流量整编代表线法研究[J]. 水文, 2008, 28(4): 61-64. (ZHU Qiaoyun, GAO Jian, LIU Guiping, et al. Study on representative vertical method for tidal discharge processing of Xujingliu Gauging Station in Yangtze River Estuary [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(4): 61-64. (in Chinese))
- [29] 郭红丽, 谢悦波, 胡健伟, 等. 水文站在线流量测验方法初探[J]. 水文, 2018, 38(1): 41-45. (GUO Hongli, XIE Yuebo, HU Jianwei, et al. Discussion on online discharge measurement method for hydrometry station [J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(1): 41-45. (in Chinese))
- [30] 刘炜, 王怀柏, 段雯, 等. 水文站流量测验代表垂线分析原理及应用[J]. 人民黄河, 2019, 41(4): 7-10. (LIU Wei, WANG Huaibai, DUAN Wen, et al. Principle and application of flow measurement representative vertical line analysis [J]. Yellow River, 2019, 41(4): 7-10. (in Chinese))
- [31] 熊珊珊, 潘卉, 王光磊. 二线能坡法流量测验方法探讨[J]. 水文, 2015, 35(6): 87-89. (XIONG Shanshan, PAN Hui, WANG Guanglei. Discussion on flow test by two line energy gradient method [J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(6): 87-89. (in Chinese))
- [32] 韩新庆. 能坡法流量实时在线自动监测系统在沈丘水文站的应用[J]. 水文, 2017, 37(1): 79-82. (HAN Xinqing. Application of real-time flow monitoring system with energy grade method at Shenqiu Station [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(1): 79-82. (in Chinese))
- [33] 徐立中, 张振, 严锡君, 等. 非接触式明渠水流监测技术的发展现状[J]. 水利信息化, 2013(3): 37-44. (XU Lizhong, ZHANG Zhen, YAN Xijun, et al. Advance of non-contact instruments and techniques for open-channel flow measurements [J]. Water Resources Informatization, 2013(3): 37-44. (in Chinese))
- [34] 王文华. 雷达测流仪比测分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(5): 6-9. (WANG Wenhua. Comparing test and analysis of radar measuring instrument [J]. Yellow River, 2016, 38(5): 6-9. (in Chinese))
- [35] 张振, 徐枫, 王鑫, 等. 河流水面成像测速研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(7): 1441-1450. (ZHANG Zhen, XU Feng, WANG Xin, et al. Research progress on river surface imaging velocimetry [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(7): 1441-1450. (in Chinese))
- [36] 景波云, 陈向飞, 王震, 等. 电波流速仪流量自动在线监测装置设计与应用[J]. 人民长江, 2015, 46(1): 61-64. (JING Boyun, CHEN Xiangfei, WANG Zhen, et al. Design and application of automatic on-line flow monitoring device of electric wave flow meter [J]. Yangtze River, 2015, 46(1): 61-64. (in Chinese))
- [37] 李光录, 王秀莲. 电波流速仪在青海三江源区水文监测中的应用[J]. 人民长江, 2010, 41(14): 48-50. (LI Guanglu, WANG Xiulian. Application of electric wave current-meter in hydrological monitoring of three-river source region in Qinghai Province [J]. Yangtze River, 2010, 41(14): 48-50. (in Chinese))
- [38] 朱治雄, 谢永勇, 高夏阳, 等. 雷达(RG-30)流量在线监测系统应用研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(1): 12-14, 22. (ZHU Zhixiong, XIE Yongyong, GAO Xiayang, et al. Application research of radar (RG-30) flow online monitoring system [J]. Yellow River, 2018, 40(1): 12-14, 22. (in Chinese))
- [39] 林思夏, 曾仲毅, 朱云通, 等. 侧扫雷达测流系统开发与应用[J]. 水利信息化, 2019(1): 31-36. (LIN Sixia, ZENG Zhongyi, ZHU Yuntong, et al. Development and application of tangent sweeping radar flow measurement system [J]. Water Resources Informatization, 2019(1): 31-36. (in Chinese))
- [40] ADRIAN R J. Twenty years of particle image velocimetry

- [J]. Experiments in Fluids, 2005, 39(2): 159-169.
- [41] MUSTE M, FUJITA I, HAUET A. Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments [J]. Water Resources Research, 2010, 44(4): 5121-5127.
- [42] 张振, 王慧斌, 严锡君, 等. 时空图像测速法的敏感性分析及不确定度评估 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1763-1771. (ZHANG Zhen, WANG Huibin, YAN Xijun, et al. Sensitivity analysis and uncertainty evaluation of space-time image velocimetry [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1763-1771. (in Chinese))
- [43] KEMPCZYNSKI A, GRZEGORZEWSKI B, KEMPCZYNSKI A, et al. Estimation of red blood cell aggregate velocity during sedimentation using the Hough transform [J]. Optics Communications, 2008, 281(21): 5487-5491.
- [44] ICHIRO F, WATANABE H, RYOTA T. Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: the space-time image velocimetry (STIV) [J]. International Journal of River Basin Management, 2007, 5(2): 105-114.
- [45] FUJITA I, NOTOYA Y, SHIMONO M A. Development of uav-based river surface velocity measurement by stiv based on high-accurate image stabilization techniques [M]. Madrid: Iahr-Int Assoc Hydro-Environment Engineering Research, 2015.
- [46] 王锦生. 关于水文站的工作方式问题: 几个国家的有关情况介绍 [J]. 水文, 1985(3): 50-51. (WANG Jinsheng. On the working mode of hydrometric stations: a brief introduction of several countries [J]. Journal of China Hydrology, 1985(3): 50-51. (in Chinese))
- [47] 楚恩国. 三河闸水工建筑物测流应用探讨 [J]. 水文, 2000, 20(4): 48-50. (CHU Guoen. Discussion on flow measurement application of Sanhe Sluice hydraulic structure [J]. Journal of China Hydrology, 2000, 20(4): 48-50. (in Chinese))
- [48] 王琮璞, 张国辉. 水工建筑物法测流在柳河的应用 [J]. 东北水利水电, 2003, 21(5): 27-28. (WANG Zongpu, ZHANG Guohui. Application of flow measurement by hydraulic structure method in Liuhe River [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2003, 21(5): 27-28. (in Chinese))
- [49] 林云发, 廖长路, 闫建波, 等. 水工建筑物测流法在碛湾水文站的应用 [J]. 江西水利科技, 2011, 37(4): 261-265. (LIN Yunfa, LIAO Changlu, YAN Jianbo, et al. Application of the hydraulic structure method for testing discharge on Juwan Hydrological Station [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2011, 37(4): 261-265. (in Chinese))
- [50] 黄霞娣. 水工建筑物测流方法在飞来峡站的应用 [J]. 甘肃水利水电技术, 2013, 49(5): 8-10. (HUANG Xiadi. Application of flow measurement method of hydraulic structure in Feilaixia station [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2013, 49(5): 8-10. (in Chinese))
- [51] 唐跃平, 戴建国. 引黄涵闸流量自动监测技术的研究 [J]. 气象水文海洋仪器, 2002(1): 1-5. (TANG Yueping, DAI Jianguo. Research of automatic technology for flow discharge in Yellow River Flow Diversion Channels [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2002(1): 1-5. (in Chinese))
- [52] SASMAL K, MASUNAGA E, WEBB A, et al. A three-dimensional numerical study of river plume mixing processes in Otsuchi Bay, Japan [J]. Journal of Oceanography, 2018, 74(2): 169-186.
- [53] CHEN C L H, BEARDSLEY R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(1): 159-186.
- [54] CASULLI V, WALTERS R A. An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2015, 32(3): 331-348.
- [55] 芮孝芳. 水文学与“大数据” [J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(3): 1-4. (RUI Xiaofang. Hydrology and big data [J]. Advances in Science and Technology of water Resources, 2016, 36(3): 1-4. (in Chinese))
- [56] 赵辉, 徐海东, 张志林. ADCP 横渡法测流克服环境因素影响的技术措施 [J]. 人民黄河, 2016, 38(3): 5-8. (ZHAO Hui, XU Haidong, ZHANG Zhilin. Technical measures to overcome environment factors of cross flow measurement by using ADCP [J]. Yellow River, 2016, 38(3): 5-8. (in Chinese))
- [57] 赵长森, 潘旭, 杨胜天, 等. 低空遥感无人机影像反演河道流量 [J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1392-1408. (ZHAO Changsen, PAN Xu, YANG Shengtian, et al. Measuring streamflow with low-altitude UAV imagery [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1392-1408. (in Chinese))
- [58] 朱晓原. 我国水文测验技术的回顾与发展 [J]. 水文, 2006, 26(3): 45-47. (ZHU Xiaoyuan. Review and development of hydrometry technology in China [J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26(3): 45-47. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-01-13 编辑: 王芳)

