

# 非接触式河流流量监测技术研究

黄 炜,王 丽,王聪聪

(江苏省水文水资源勘测局,江苏 南京 210013)

**摘要:**非接触式流量测验技术在现代水文测验中具有时效性强、测量量程大、安全性高等天然优势。通过梳理视频图像测流、电磁波测流、卫星测流等非接触式流量监测技术研究,总结分析了各种监测技术方法的优、劣势和适用条件。研究认为非接触式测流技术将在水文测验领域发挥越来越多的作用,同时也指出其存在表面流速换算误差、受外界环境影响较大等局限性,需要在实际应用中逐步优化。

**关键词:**测流技术;非接触式;流量测流;水文测验

**中图分类号:**[TV123]

**文献标识码:**B

**文章编号:**1007-7839(2022)09-0019-0004

## Research on non-contact river flow monitoring technologies

HUANG Wei, WANG Li, WANG Congcong

(Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210013, China)

**Abstract:** The non-contact flow measuring technology has the natural advantages of strong timeliness, large measurement range and high safety in modern hydrological measurement. By combing the research progress of non-contact flow monitoring technologies such as video image flow measurement, electromagnetic wave flow measurement and satellite flow measurement, the advantages, disadvantages and applicable conditions of various monitoring technologies are summarized and analyzed. It is considered that the non-contact flow measuring technology will play an increasingly important role in the field of hydrometry. At the same time, it is pointed out that it has some limitations, such as the conversion error of surface velocity, and is greatly affected by the external environment, which need to be gradually optimized and solved in practical application.

**Key words:** flow measuring technology; non-contact type; flow measurement; hydrologic test

## 1 概 述

河流水体的流速和流量是水文测验的重要项目,如何快速、准确地开展河流水体流量监测是现代水文监测工作的主要任务<sup>[1]</sup>。按传感器与待测水流的相对位置关系,流量测验可以分为接触式和非接触式两类<sup>[2]</sup>。接触式流量测验技术是通过监测水体内部水流或物质运动速度来推求断面流量,其中缆

道流速仪测流方法由于测量精度较高,被认为是水文行业流量测验最可靠的方式之一,但其在建站成本、测验时效性以及涉水测验安全性等方面存在不足<sup>[3]</sup>。近年来成功兴起的基于声学多普勒原理的固定式 ADCP 测流系统,解决了测验时效性问题<sup>[4]</sup>,但也存在安装维护成本高,适用条件苛刻,无法实现全量程测验等局限性<sup>[5-6]</sup>。非接触式流量测验是利用声、光、电及图像处理等技术测定水面上某点或

收稿日期: 2022-03-30

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020059)

作者简介:黄炜(1981—),男,高级工程师,博士,主要从事水文测验及站网管理工作。E-mail:664054945@qq.com

某个区域的速度来推求断面流量,由于不需要接触水体,提高了测验的安全性,因此在水文测验中具有天然优势。本文将重点梳理视频图像测流、电磁波测流以及卫星测流等目前应用和研究较多的几种非接触式河流流量测验技术研究进展,总结分析各种测验技术的优劣势和适用条件,分析非接触式测流技术在当前水文测验中的应用潜力,为该技术的进一步推广应用提供借鉴。

## 2 视频图像测流

视频测流是假设河流表面特征与河流水体遵循相同的运动模式,通过获取河流表面图像并基于图像处理技术进行流量测验的一种非接触式测流方法,其在快速获取瞬时断面速度分布、流场信息、流动模式等方面具有明显优势,并能实现全量程测验。按图像处理方式的不同可分为大尺度粒子图像法、时空分辨率法<sup>[7]</sup>、坐标图像处理法等<sup>[8]</sup>。

### 2.1 大尺度粒子图像法

大尺度粒子图像法是从粒子图像测速发展而来,主要以水面漂浮物为示踪物,通过对获取的2帧待测水面的图像序列进行互相关运算<sup>[9-10]</sup>,引入图像校正、畸变消除和流场定标等技术处理方法<sup>[11-14]</sup>,得到流场粒子运动的位移,然后根据位移和连续2帧之间的时间间隔获得二维流场的表面流速分布,再将表面流速通过流速系数转化为断面平均流速,根据流速—面积法求得断面流量。图1显示了基于互相关分析的估计流速矢量的过程。

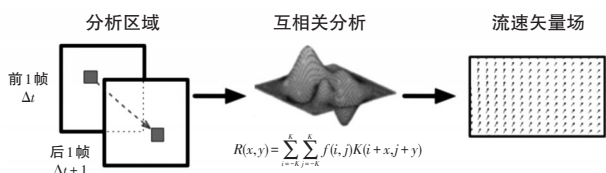


图1 基于互相关分析的流速矢量估计

大尺度粒子图像法在应用过程中其测量可靠性完全依赖于水流示踪物的存在性。水面示踪物包括天然和人工2种模式。天然模式是以树叶、塑料或其他水面漂浮物为示踪物,或者以波纹、泡沫、尾迹等水面运动为示踪物,容易获取,但随机性强,示踪性能相对较差<sup>[15]</sup>。人工抛洒示踪物是对天然示踪物的有益补充,但在选择时要考虑其形状、密度特性、环保性以及性价比<sup>[16]</sup>。目前在野外测验环境下的视频图像测流中示踪方式仍应以天然模式为主,但也造成测量精度受大气散射、水面反射及

水下散射等环境因素影响较大。

目前,大尺度粒子图像法在山区河道或大流速河道断面流量测验中应用较多,其测量时效性强、测量范围广、成本低廉、机动性高等特点,决定了大尺度粒子图像法在河道流量测验,特别是高洪应急监测的应用潜力巨大。

### 2.2 时空分辨率法

时空分辨率法是利用水面示踪物在水面形成的具有方向性纹理特征,通过建立测速线流速与纹理方向间的函数关系得到具有高空间分辨率的一维时均流速矢量场,在河流测速中,对一段时间 $t$ 内获取的沿河顺流方向的图像像素值通过时空图像合成为二维时空图像。顺流方向像素值 $q$ 与二维时空图像表现的纹理特征关系式为

$$q = \frac{\Delta p}{n\Delta t} = \frac{\tan \theta}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: $\Delta p$ 为 $n$ 帧内该空间方向上的像素位移; $\Delta t$ 为每一帧的时间间隔; $\theta$ 为时空图像中的纹理特征对应的纹理角。

通过式(1)可以将断面速度矢量监测转化为图像中的纹理特征主方向的监测,从而实现流速测量。

时空分辨率法已成功应用于国外多条河流的实际测流方案中。在国内也已开展部分应用研究,其中王慧斌等<sup>[7]</sup>提出了基于时空图像频谱的时均流场重建方法;张振等<sup>[17]</sup>开展了时空分辨率法测验精度敏感性研究,并通过参数设置实现将测验不确定度控制在1%以内。

时空分辨率法相对于大尺度粒子图像法,其算法效率更快,空间分辨率更高。但由于在纹理方向检测上算法过于复杂,并且对示踪物的可见性和稳定性要求较高、对视场中倒影和局部噪声较为敏感等因素,使得该方法野外测验环境中的应用程度不高。

### 2.3 坐标图像处理法

坐标图像处理法可以看作是对传统浮标法的一种改进。通过在测验河段内布设浮标,一定时间内对浮标摄像2次,并记录摄像时间间隔 $\Delta T$ ,从2张照片中求出示踪剂移动的距离 $L$ ,得到水面流速 $v_s$ ,计算式为

$$v_s = \frac{L}{\Delta T} \quad (2)$$

坐标摄像法应用可以分为地面布设与航空布设2种。地面布设在河流一岸布设相机采集设备,以倾斜视角拍摄水面,安装较为方便,但存在远场

分辨率不足的问题。航空布设是通过航天飞机、热气球等对测验河段进行摄像以获取近似垂直的视角拍摄水面<sup>[18-19]</sup>,视场角度更好,但稳定性不足。

坐标图像处理若采用地面布设,测验方式较为简单,测验成本也相对较低。但由于需要在上下游断面布置2套摄影设备,当测验间距过大时,上下游断面相机和计时器的同步控制误差会影响测验精度。若采用航空布设,由于需要搭载其他高空设备,测验成本相对较高,只适用于应急监测或极端情况下临时使用,不能作为一种常规监测手段。

### 3 电磁波测流

电磁波测流是一种远程遥感技术,在河流流速测量中已有较广泛的应用,主要适用于极端天气、复杂测验环境以及应急监测等特殊情况下的流量测验。电磁波测流大体可以分为2种方式,以获取点流速为主的电波流速仪测流,以获取流速场为主的侧扫雷达测流系统。

#### 3.1 电波流速仪法

电波流速仪法测流原理基于微波多普勒效应,利用仪器测量水体表面流速,通过水面流速系数的换算达到测量河流流量的目的<sup>[7]</sup>。当电磁波照射水面时,部分能量被表面波或漂浮物散射形成回波,回波产生的多普勒频移 $f_D$ 和水面流速 $v_s$ 之间满足如下关系式:

$$v_s = \frac{Cf_D}{2f_s \cos \theta} \quad (3)$$

式中: $\theta$ 为发射波和水流方向的夹角; $C$ 为电磁波在空气中的传播速度。

点流量电波流速仪由于原理上是利用表面波及漂浮物的回波信息,因此对于平滑水面或紊流剧烈水面均难以得到稳定的测量值,其测量精度也受波束角、方位角及俯仰角等因素的影响。此外,该方法需要借用或实测断面面积后才能计算流量,限制了其应用范围。由于只能获取单点流速数据,若河面较宽则需要多个仪器同时工作。

点流量电波流速仪在测流过程中操作安全,测量速度快且不受水质和漂浮物的影响,特别适用于监测漂浮物较多的湍急河段和抢测洪峰流量。

#### 3.2 侧扫雷达测流

侧扫雷达测流是一种近年从测量海面涌流分布发展来用于河流表面流场测量的方法。在测定海水水面时,由于布拉格散射原理,在雷达的回波多普勒谱上会产生与雷达频率相关的布拉格频

率。若水面发生流动,根据多普勒效应,对应的多普勒频率会相对布拉格频率发生偏移,其偏移的大小就表征为水流流速的大小,因此可以通过多普勒频率与速度的关系式计算得到径向水面流速。由于内河河道水面波浪波长较小,无法与雷达电磁波形成布拉格散射,20世纪初,350 MHz的超高频雷达被用于淡水表面流速测量,并经过一系列试验验证了超高频雷达测速在内河中应用的可行性。

侧扫雷达测流系统安装和使用条件方便,既可以安装在河岸,也可以安装在车辆上实现应急移动监测,测量时不受含沙量和水面漂浮物的影响,适用于高洪或携带大量漂浮物时的大流量测验任务。侧扫雷达测流系统在国内已有成果应用案例,但大部分测验存在比测时间短、测次较少、比测结果不具有代表性等问题,而且对小流速和通航河道上的测验适用性还需进一步研究。

### 4 卫星测流

卫星测流是一种新兴的遥感探测手段,通过遥感图像分析技术或遥感信号反演技术来实现地面河流表面流速信息的获取,并可结合地面测量值和水文模型估计河流流量。

#### 4.1 卫星遥感测流

卫星遥感测流是伴随高分辨率成像以及合成孔径雷达(SAR)技术发展而来的。对于具有稳定的水位-流量关系的河段,可以通过卫星监测河段水位,根据水位数据计算断面流量。但水位监测的误差在10 cm以上,精度无法满足实际测验要求。Preuss<sup>[20]</sup>曾利用河宽与流量之间的关系来推求断面流量,通过对SAR图像进行标准化处理,然后将遥感图像内的像素点数除以河段长度得到有效河宽,并利用河宽与流量近似关系求出河段流量,试验证明方法可行,但相对误差近200%。针对这种以水位或河宽单一信息估算流量存在误差大的问题,有研究者提出了多变量估算方法<sup>[21]</sup>,即通过遥感手段获取水面宽度、高程及流速等数据,并进行多元线性回归分析,建立了多变量河流流量估计方程,实验表明流量估计的不确定度小于20%。

卫星遥感测流不受泥沙含量、漂浮物限制,可实现全天候、全天时自动化采集数据。但是目前基于卫星遥感测流的研究结果表明,该方法测验精度无法满足常规水文测验规范要求,而且测验过程中对地面信息和历史数据过度依赖,使之暂时不能满足实际测流需求。



## 4.2 卫星反演测流

全球导航系统(GNSS)不仅可用于导航定位,其反射信号也可以用来接收和利用,并因此衍生出GNSS反演测量(GNSS-R)手段。近年来的一些研究表面GNSS-R技术可以用于水文物理特征的探测。白伟华等<sup>[22]</sup>研究实现了将河流流速的信息从GNSS反射信号的残差相位谱中分离出来,证明了GNSS-R流速测量的可行性和有效性。

卫星反演测流采取的是区域测量,相对于单点测量,其测得的是区域平均流速,更能反映真实情况,特别适用于大范围流速、流量估计,在应对高洪、大流速以及泥石流等极端环境下的应急监测方面也具有重要意义。卫星反演测流还处于初步研究阶段,还需要更多的深入研究和实践证明其测验精度能够满足要求。

## 5 结 论

随着水文现代化进程推进以及防汛测报精准预报要求的提出,传统的转子流速仪、走航式ADCP等接触式流量测验技术已逐渐不能适应。相对于接触式测流技术,非接触测验方法在测验效性、测验便利性、复杂环境适应性以及测验安全性等方面优势明显。视频测流技术更突破了单点测速技术的局限性,能在同一瞬态记录下大量空间点上的速度分布信息,提供丰富流场信息,并能实现全量程测验。因此,有理由相信非接触式测流技术将在水文测验领域发挥越来越多的作用。

当然,非接触式测流技术也存在不足,如测验受外界环境影响较大,非接触式测流技术理论上可实现全量程测验,但其在流速较小时的测验精度问题也使其应用受限,表面流速换算误差等问题也会影响测验精度,这些问题都需要在实际应用中进行逐步优化来加以解决。

### 参考文献:

- [1] 吴志勇,徐梁,唐运忆,等.水文站流量在线监测方法研究进展[J].水资源保护,2020,36(4):1-7.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 唐洪武,黄淑君,袁赛瑜,等.长江-鄱阳湖交汇处三维水流结构研究[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):128-135.
- [5] 丁昌言,徐明,司存友.泾河水文站HADCP流量关系率定校正及应用[J].人民长江,2009(16):22-24.
- [6] 韩友平,黄双喜,魏进春.ADCP在长江内河流量比测试验与精度研究[J].水利水文自动化,2005(3):5-16.
- [7] 王慧斌,董伟,张振,等.基于时空图像频谱的时均流场重建方法[J].仪器仪表学报,2015,36(3):623-631.
- [8] 王子臣.几种水文测验新方法综述[J].水利水文自动化,1996(2):11-22.
- [9] AYA S. Refinement of LSPIV Technique for Monitoring River Surface Flows[Z]. 2000.
- [10] 高东阳,赵西安,潘昕.基于稀疏快速傅里叶的互相关图像配准[J].北京建筑大学学报,2017,33(2):25-28.
- [11] DRAMAIS G. Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions[J]. Flow Measurement and Instrumentation,2008(2):117-127.
- [12] MOSTAGHIMI S. Stream Discharge Measurement Using A Large-Scale Particle Image Velocimetry Prototype[J]. 2004.
- [13] 杨圭.基于CNN与图像处理的河道测流研究[D].济南:山东大学,2021.
- [14] 冯全,张彦洪,赵晓刚.基于机器视觉的河水表面流速估计[J].农业工程学报,2018,34(19):140-146.
- [15] 张振,徐立中,王慧斌.河流水面成像测速中的水流示踪物综述[J].水利水电科技进展,2014,34(3):81-88.
- [16] 杨聃,邵广俊,胡伟飞,等.基于图像的河流表面测速研究综述[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(9):1752-1763.
- [17] 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.
- [18] 王子臣.几何测速仪的研究及应用[J].水利水文自动化,2002(3):12-15.
- [19] KUNITA Y. Application of aerial LSPIV to the 2002 flood of the Yodo River using a helicopter mounted high density video camera[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2011(4):323-331.
- [20] PREUSS I. Estimation of discharge from braided glacial rivers using ERS 1 synthetic aperture radar: first results [J]. Water Resources Research, 1995(5):1325-1329.
- [21] BECHLE A J, WU C H, LIU W C, et al. Development and application of an automated river-estuary discharge imaging system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(4): 327-339.
- [22] 白伟华,夏俊明,万玮,等.中国GNSS-R机载实验综合评估:河流遥感[J].科学通报,2015,60(24):2356.