

视频测流技术研究现状与应用

姜 瑶¹, 黄 乾¹, 冀长兴²

(1. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250014; 2. 沃达建设集团有限公司, 山东 泰安 271600)

【摘要】随着计算机视觉与遥感技术的快速发展, 视频图像测流技术逐渐成为水文测量领域的研究热点。文章介绍了大尺度粒子图像测速法(LSPIV)、时空图像测速法(STIV)及基于深度学习的流量估算测流方法的技术原理、研究进展与应用场景, 对比分析了各类方法的优势与局限性。研究发现, LSPIV 适用于高精度需求场景, STIV 在宽河道监测中效率突出, 而深度学习技术为复杂环境下的非接触式测流提供了新思路。未来研究需要突破环境干扰与算法效率的瓶颈, 推动多源数据融合与自适应算法的发展。

【关键词】视频测流; 图像识别; 深度学习技术; 水文; 洪水预报

【中图分类号】P336

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-06-0068-03

Research Status and Application of Video-based Flow Measurement Technology

JIANG Yao¹, HUANG Qian¹, JI Changxing²

(1. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan, Shandong 250014, China;

2. Woda Construction Group Co., Ltd., Tai'an, Shandong 271600, China)

Abstract: With the rapid development of computer vision and remote sensing technologies, video image flow measurement has become a research hotspot in hydrological measurement. This paper expounds the technical principles, research progress and application scenarios of Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV), Space-Time Image Velocimetry (STIV) and deep learning-based flow estimation methods, and compares their advantages and limitations. The results show that LSPIV is applicable to scenarios requiring high precision, STIV boasts outstanding efficiency in wide river channel monitoring, and deep learning provides new ideas for non-contact flow measurement under complex environments. Future studies shall break through the bottlenecks of environmental interference and algorithm efficiency, promote the integration of multi-source data and the development of adaptive algorithms.

Key words: Video-based flow measurement; Image recognition; Deep learning technology; Hydrology; Flood forecasting

测流技术在整个水资源调度和洪水预报方面发挥着至关重要的作用。随着技术的发展, 测流逐渐从传统接触式测量向非接触式、高时空分辨率的视频测流技术转变。视频测流技术通过分析河流表面图像或视频序列, 结合计算机视觉与深度学习算法, 实现了表面流速、断面流量等参数的快速提取, 在洪水应急监测、偏远地区水文数据采集等领域展现出显著优势。文章系统综述基于视频图像的河道测流技术, 重点分析大尺度粒子图像测速法(Large-scale particle image velocimetry, LSPIV)、时空图像测速法(spatio temporal image velocimetry, STIV)及基于深度学习的

流量估算测流方法的研究进展, 总结技术优劣与应用场景, 并展望未来发展方向。

1 主要技术方法

1.1 大尺度粒子图像测速法(LSPIV)

LSPIV 是一种基于图像匹配的非接触式流速测量技术, 其通过追踪水体表面天然或人工示踪粒子的运动轨迹, 结合图像分析算法提取位移量, 进而重构二维流场并计算流速与流量。该技术具有显著的尺度适应性, 可覆盖从实验室模型

收稿日期: 2025-11-09

作者简介: 姜瑶(1990—), 女, 工程师

(厘米级)到自然河流、大气流动(数十米甚至千米级)的测量场景。其核心流程包括图像采集与标定、特征匹配与流场计算、流量估算。在国内该领域的研究中,张振团队的研究在实际应用中取得了显著成果^[1-2]。2012年,该团队研制出一款基于近红外成像技术的便携式大尺度粒子测速仪,通过提升对微小示踪粒子的检测能力与图像采集定时精度,增强了在复杂水面流速测量中的测流稳定性和准确性。2014年,他们进一步提出一种基于变高单应关系的视觉测量方法。该方法通过设计一种像差校正的线性变换算法,求解变高单应矩阵,在三维透视投影模型基础上,结合水位及比降系数构建的水面高程模型,建立了图像平面与待测水面之间的变高程映射关系。此外,张振团队以LSPIV为核心,针对野外实际环境中的水流示踪物分布、复杂光学成像条件及测点布置限制等问题,进行了系统集成与创新,形成了一套完整的河面成像测流作业体系,并验证了该模式的可行性。同年,采用快速哈特利变换互相关(FHT-CC)作为相关测度,与傅里叶变换互相关(FFT-CC)相比,此方法在保证精度的同时提升了计算效率并降低了成本。

1.2 时空图像测速法(STIV)

STIV是通过水流表面波纹与涟漪的时空特征替代传统粒子示踪技术,实现对河流表面流速的非接触式测量。国内关于STIV的研究主要以河海大学和武汉大学的团队为代表,研究重点集中在算法优化、环境适应性增强以及误差控制等方面。在测量技术与设备开发方面,张振团队于2017年设计了一套滚动画幅装置,用于模拟河流水面运动,并对STIV方法进行了定量评估。研究指出,测速线长度和示踪条件是影响精度的主要因素,通过合理设置参数可将测量不确定度控制在 $\pm 1\%$ 以内。2024年,该团队进一步提出一种基于断面水边线定向的摄像机姿态角标定方法,并将其与频域时空图像测速法(FFT-STIV)结合,实现了对200 m宽河流的免像控表面流速测量^[3]。此外,针对应急测量中测点设备稳定性不足的问题,张永宏^[4]等基于时空图像法开发了视频测流计算方案,采用无人机搭载视频测流系统进行流量监测,并在终端界面实现可视化。但试验中发现,该方法的灰度数据易受日光照射干扰。

在算法与模型优化方面,2015年王慧斌^[5]等提出了一种基于时空图像频谱的时均流场重建方法(FFT-STIV),将空域中纹理主方向的识别问题转换到频域中通过频谱图像主方向加以识别,并在极坐标系下识别明亮条纹的主导方向。2020年,赵浩源^[6]通过融合水文、数字影像处理、摄影测量与工程测量等多学科方法,对时空图像法中的关键环节与核心算法进行了系统优化,提出了一种抗干扰能力强、精度高的新型时空图像去噪算法,适用于光照变化、水面倒影及障碍物干扰等多种复杂场景,显著提升了该方法的鲁棒性与准确性。2022年,张振等^[7]分析了不同场景下时空图像在空域和频域中的特征,并对频域扇形滤波器的方向角、通带夹角及半径等参数开展了敏感性实验。2024年,江赛男等^[8]在研究中考虑了水位和流速两个变量对流量的不确定性影响,在通过视频图像计算断面水位、STIV计算断面流速的基础上,推算了水位与流速的测量误差、流量估算误差及其主要来源,指出未来STIV研究应着力降低水位和流速的测量误差,以提升实际应用的准确性。

1.3 基于深度学习的流量估算测流方法

BP神经网络是多层神经网络的早期重要算法,实现了两层乃至多层神经网络的训练。2006年,深度学习的基本框架被确立,通过设计含有多个隐藏层的机器学习模型,利用海量数据,先以无监督方式初始化网络权重,再通过有监督策略微调参数,从而学习数据中的深层特征。深度学习以卷积神经网络(Convolutional neural network, CNN)为代表算法之一,在纹理识别与分类中广泛应用。而视频测流中涉及的水流图像识别,本质上可归类为纹理识别问题。2018年,鞠振宇等^[9]融合双流卷积神经网络对水流图像数据实现了有效的识别与分类。2019年,王万良^[10]引入生成对抗网络构造更多流速图像以扩充数据集,进而利用多融合的卷积分类网络完成河流流速等级划分,该方法在面对差异较小的河流图像时表现出良好的鲁棒性。2021年,杨圭^[11]探索了利用卷积神经网络对河道水流图像进行特征识别,以估算水面流速,并通过参数调优获取最适合水面图像处理的模型。

在关键技术突破方面,2020年,Kim等^[12]进一

步深化了深度学习在水文监测中的应用,提出了一种集成场景分离与图像配准的建模方法。该模型首先利用自编码器抑制外部环境干扰,提取视频中纯粹的波浪动态特征;进而借助空间变换网络建立非线性运动映射关系,最终输出水面流速矢量场。经验证,该算法在海岸实景数据中表现出良好的工程适用性。2024年,乔广超^[1]以FFT-STIV为研究对象,针对极坐标法在频谱图像主方向识别中抗干扰能力弱、对复杂城乡环境适应性不足等问题,设计了一种融合深度学习的主方向识别技术,显著提高了方向的辨识精度与模型鲁棒性。

2 技术对比

LSPIV的优势在于精度高、分辨率高及大范围测量能力强,可同步获取多点流速与流量数据。但其对示踪物分布、光照条件及摄像机视角要求较高,且参数标定复杂,操作学习成本较大。STIV相对于LSPIV,在算法效率和空间分辨率上优势显著,但是纹理方向检测算法较为复杂,对示踪粒子的可见度与稳定分布有较高要求,同时对视野中的倒影及局部噪声较为敏感,因而在实际野外测验环境中适用性较低。今后应将抑制日照对流速数据的干扰作为研究重点,进一步提升测流装备精度,并增强无人机自动化采集能力与运行稳定性,以实现更简便、更精确的测量,推动该技术更快投入实际水文站的业务应用中。深度学习法自适应性更强,鲁棒性更高,在复杂光照环境、低流速场景下均适用,但深度学习需要大量的训练数据,且模型泛化性仍有待验证。

3 结论与建议

LSPIV适用于高精度需求场景,STIV在宽河道监测中效率突出,而深度学习技术在复杂环境下适用性更强。但任何一种测流技术都有其优点和局限性,无法满足所有的测流场景。未来,测流技术必然会向着精度更高、不确定性更小的方向发展。首先,在测流设备方面,要减少对国外非接触式测流设备的进口,研发高分辨率、低照度、宽动态范围的专用摄像设备,集成惯性导航和自动标定模块,降低设备部署的复杂性。同时在数据采集方面还可以推动仿生学与新材料在示踪物设计中的应用。其次,在多元数据融合、实时性

提升与智能化突破方面,可以通过整合卫星遥感、无人机航拍以及地面传感器网络,构建多源数据采集及传输系统,同时结合多模态数据,增强复杂场景的适应性。再次是针对现有深度学习模型计算量大、实时性不足等问题,应侧重于研发轻量化网络结构与边缘计算设备,开发自监督学习算法,减少对标准数据的依赖。同时,结合强化学习构建动态化系统,使算法能够根据实时环境变化自助调整参数,提升鲁棒性。此外,需融合人工智能与数字孪生技术,构建智慧水文平台,实现流量预测、风险预警与人机协同决策。最终,通过跨学科协同创新与工程化实践,推动视频测流技术向高精度、智能化、可持续方向演进,为水文监测提供更强支撑。

参考文献

- [1] 张振,严锡君,樊棠怀,等.近红外成像的便携式大尺度籽粒图像测速仪[J].仪器仪表学报,2012,12(33):2840-2850.
- [2] 严锡君,张振,陈哲,等.基于FHT-CC的流场图像自适应运动矢量估计方法[J].仪器仪表学报,2014,35(1):50-58.
- [3] 张振,姜天生,赵丽君,等.基于断面水边线定向的视频测流摄像机标定[J].电子与信息学报,2024,46(4):1428-1437.
- [4] 张永宏,李飞翔,董天天,等.基于无人机平台的时空影像法视频测流技术应用研究[J].中国农村水利水电,2024(10):1-6.
- [5] 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.
- [6] 赵浩源.基于改进时空影像法的河道表面流速与流量计算[D].武汉:武汉大学,2021.
- [7] 张振,李华宝,袁章,等.频域时空图像测速法的图像滤波器敏感性分析[J].仪器仪表学报,2022,43(2):43-53.
- [8] 江赛男,刘德地,徐永新,等.基于时空图像法监测流量的测量误差分析[J].中国农村水利水电,2024(3):62-68.
- [9] 鞠振宇.基于视频图像识别的水流测速方法研究[D].杭州:浙江工业大学,2018.
- [10] 王万良,杨胜兰,赵燕伟,等.基于条件边界平衡生成对抗网络的河流表面流速估测[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(11):2118-2128.
- [11] 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.
- [12] KIM J.Estimation of water surface flow velocity in coastal video imagery by visual tracking with deep learning [J]. Journal of Coastal Research,2020,95(S1): 522-526.
- [13] 乔广超.基于3D视觉与深度学习的STIV河流表面流速测量研究[D].长春:吉林大学,2024.

(责任编辑 崔亚男)