

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250206

热成像技术在视频图像河段流速监测中的应用研究

蔡 钊¹, 廖敏涵², 刘九夫¹, 刘宏伟¹, 储少志¹, 闵 星¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 广州市白云区龙水库管理所, 广东 广州 510540)

摘要: 视频图像流速监测技术在水文监测、灌区监测中已有一定的应用,但由于受到光的限制,视频图像流速监测在夜晚和低光照条件下的监测存在局限性。为此,利用热成像增加视频测流的光谱适用范围,弥补视频测流在夜晚条件适用性不高的缺点,通过无人机搭载可见光和热成像双面摄像装置,对比了可见光条件下和夜晚条件下可见光和热成像摄像装置的流速场反演结果与流速仪监测数据。结果表明,在白天可见光充足条件下,使用可见光视频图像流速反演的效果较好,除去个别点监测精度误差可达到 -5% 以内;热成像相机由于自身分辨率的限制,对河道水面天然示踪物有一定的捕获能力,具有河道表面流速场的反演能力和潜力,若在河段中加入冷冰块失踪粒子,可明显提高热成像在夜间的监测精度,除去1个点监测精度的相对误差为 8.4% 外,其他3个点的精度较高,均在 -1% 左右。研究结果为提高视频测流在夜间和光照低条件下的监测精度提供了重要参考。

关键词: 视频测流; 大尺度粒子图像测速; 热成像; 流速仪

中图分类号: [TV123]; P332.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0011-04

Application Research of Thermal Imaging Technology in Video Image River Flow Velocity Monitoring

CAI Zhao¹, LIAO Min-han², LIU Jiu-fu¹, LIU Hong-wei¹, CHU Shao-zhi¹, MIN Xing¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Guangzhou Baiyun District and Long Reservoir Management Office, Guangzhou 510540, China)

Abstract: The video image flow monitoring technology has been applied in hydrological monitoring and irrigation area monitoring. Due to the limitation of received light, video image flow monitoring method has limitations in monitoring at conditions of night and low light. The thermal imaging was used to increase the spectral applicability of video flow measurement and compensate for the low applicability of video flow measurement under night conditions. By using a visible light and thermal imaging double-sided camera device mounted on a drone, the flow velocity field inversion results of visible light and thermal imaging camera devices under conditions of visible light and night were compared with the flow velocity monitoring data. The results show that under the condition of sufficient visible light during the day, the inversion effect of visible light video image flow velocity is better, and the accuracy error can reach within -5% except for a few monitoring points; Due to the limitation of its resolution, thermal imaging camera has a certain ability to capture natural tracers on the river surface, and has the ability and potential to invert the flow velocity field on the river surface. If missing particles of cold ice are added to the river section, the monitoring accuracy of thermal imaging at night can be significantly improved. Except for one monitoring point, the relative error of monitoring accuracy is 8.4% , and the accuracy of the other three monitoring points is relatively high, all around -1% . The research results can provide important references for improving the monitoring accuracy of video velocity measurement under conditions of nighttime and low light.

Key words: video image flow monitoring; large scale particle image velocimetry; thermal imaging; current meter

收稿日期: 2025-02-08, 修回日期: 2025-04-10, 接受日期: 2025-04-17

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3204500); 国家自然科学基金青年科学基金项目(42201048)

作者简介: 蔡钊(1991-), 男, 高级工程师, 研究方向为水文试验与水文仪器, E-mail: caizhao@nhri.cn

通讯作者: 刘宏伟(1982-), 男, 正高级工程师, 研究方向为水旱灾害, E-mail: hwliu@nhri.cn

1 引言

视频图像流速监测技术主要利用视频图像的帧变化,通过大尺度粒子图像法(LSPIV)、时空图像法(STIV)等图像匹配和识别手段^[1]完成水面流速的监测,进而推求河段的流量,该技术因具有简易、便捷化、低成本的非接触式测流等优点^[2-3]而在流量监测和防洪预备等方面应用广泛,特别是山区中小河流的监测,非接触的视频测流提供了良好的技术手段^[4]。在国内,视频流速监测侧重于技术的应用,张振等^[5]针对 STIV 开展了频域扇形滤波器方向角、通带夹角及半径参数的敏感性分析,得出采用椭圆形积分区域检测方向可使表面流速测量的相对误差小于 6.2%;罗杰阳^[6]分析了 STIV 法在中小河流域中的适用性。在国外,视频流速监测侧重于算法的改进和应用,BODART G 等^[7]分析了 LSPIV 法在时间间隔、网格点和图像滤波等方面对减小流速反演误差的作用。TAURO F 等^[8]比较了热成像图像和常规可见光图像估计的河流表面流场,认为热成像图像和 PTV(Particle Tracking Velocimetry)算法相结合可减少图像预处理时间,并能精确地重建表面流场。与可见光或近红外成像相比,热成像图像受水面反射和照明条件的影响更小,且可在白天和夜间条件下进行感应。鉴此,为了提高视频测流多光谱的获取能力,解决视频测流缺乏在夜间获取河流表面流速的问题,本文通过无人机搭载可见光和热成像双目摄像装置进行试验,探究了可见光条件下和夜晚条件下可见光和热成像摄像装置的流速场反演结果与流速仪监测数据,获得了一些有益的结论,为视频测流更为广泛应用环境提供了参考。

2 材料与方法

2.1 试验场地概况

本研究在南京水利科学研究院滁州水文实验基地(118°12'E 32°17'N)花山流域出口处开展,该流域出口处建有人工修筑的倒 T 型护坡,并在流域出口处建立人工堰,可进行低水测流,在非汛期流速相对较低,水深较浅,汛期河流水位涨幅明显,为方便流速监测,在非汛期进行试验,在试验区城内混凝土护坡设立有视频图像流速的标定,用于视频图像像素点和空间坐标的匹配及流速反演。

2.2 研究材料与方法

为获取热成像河流表面视频,并反演河段表面流速场,试验主要使用无人机获取河流的视频图像,型号为精灵 4(RTK),搭载热成像双镜头的 Wiris pro 相机,其中热成像相机为非制冷专业温度探测相机,试验使用帧率为 30 Hz,可同时记录热成像和可见光图像,其主要参数见表 1,双面热成像与搭载无人机图见图 1。

表 1 热成像相机具体参数

Tab. 1 Specific parameters of thermal imaging camera		
参数	类别	详细参数
热成像模块	热成像的温度敏感度	640×512 pixel
		标准:0.05 ℃ (50 mK)
		可选:0.03 ℃ (30 mK)
	帧率	30 Hz 或 9 Hz
	光谱范围/探测器	7.5~13.5 μm
可见光模块	可见光影像分辨率	1 920×1 080 pixel

注:拍摄模式为热成像+可见光。



图 1 双面热成像与搭载无人机图

Fig. 1 Binocular thermal imaging and unmanned aerial vehicle imagery

为了验证热成像技术反演流速测量的精度,河流流速测量采用 LS1206B 型旋桨式流速仪进行监测,测量方式为测杆法安装测流(使用计数器进行读数),由于流速仪需完全浸入水中监测水流流速,因此在无空气中风速影响时,采用水面下约 5 cm 的监测流速代替水面流速的真值。

3 结果与分析

3.1 可见光天然条件下流速监测结果分析

光照充足条件下通过可见光摄像头获取视频图像和流速场反演结果,图 2 为可见光图像天然示踪表面流场计算结果,表 2 为自然光条件下流场计算结果与试验值对比,图 2 中白色标记数值

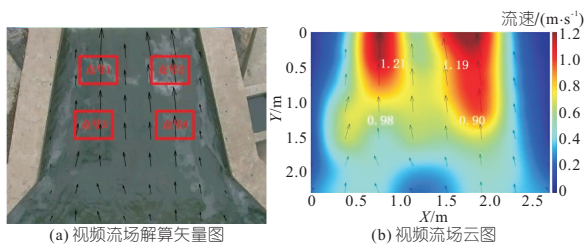


图 2 可见光图像天然示踪表面流场计算结果

Fig. 2 Calculation results of surface flow field naturally traced by visible light image

表 2 自然光条件下流场计算结果与试验值对比

Tab.2 Comparison of flow field calculation results and experimental values under natural light conditions

示踪情况	点号	LSPIV	流速仪	相对误差
		$/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
天然示踪	1	1.16	1.21	-4.13
	2	1.17	1.19	-1.68
	3	0.89	0.98	-9.19
	4	0.85	0.90	-5.56

为流速仪监测的表面流速。由图 2、表 2 可知,由于河道中水面存在一定的树叶、浮沫等漂浮物,具有良好的天然示踪物,除去点 3 的误差达到-9.19%外,其余位置流速场反演结果的误差较小。

3.2 热成像天然条件下流速监测结果分析

图 3 为热成像反演流速图,表 3 为热成像图像 LSPIV 计算结果与流速仪测量表面流速结果对比。由图 3、表 3 可知,由于河面存在浮沫等天然示踪物,从热成像图像中可明显区分出部分水面失踪物的区域范围和形态,流速值的大小也与流速仪实测的表面流速值大小很接近,因此在天然示踪物充足的区域,热成像图像也能够较好地反映出流场的形态,说明热成像图像具备一定的

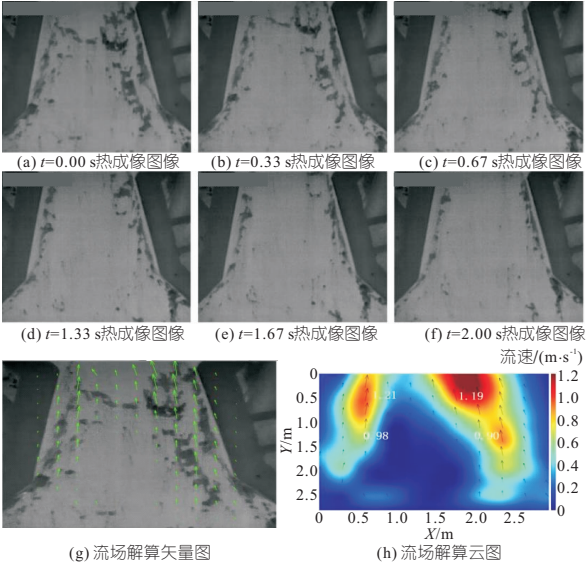


图 3 热成像反演流速图

Fig. 3 Thermal imaging inversion flow velocity map

表 3 热成像图像 LSPIV 计算结果与流速仪测量表面流速结果对比

Tab.3 Comparison between LSPIV calculation results of thermal imaging images and surface flow velocity measurement results of flow meters

示踪情况	点号	LSPIV	流速仪	相对误差
		$/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
天然示踪	1	0.97	1.21	-19.83
	2	1.17	1.19	-1.68
	3	0.70	0.98	-28.57
	4	0.85	0.90	-5.56

测量河流表面流场的能力。

3.3 热成像在有温度示踪物条件下流速监测结果分析

为进一步凸显热成像在视频流速反演方面的作用,在水中加入加热的橡胶球及冰块等带有温度的人工示踪剂完成对热成像相机在不同环境条件下流速监测精度分析,包括加热的橡胶球模拟水面的热粒子及冰块模拟水面的冷粒子(图 4)。

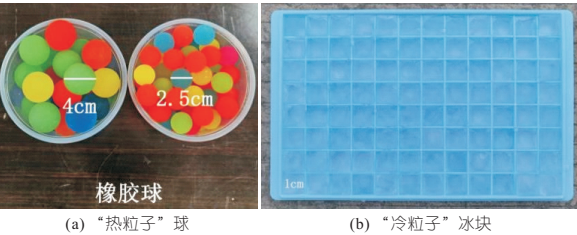


图 4 示踪物实物图

Fig. 4 Binocular thermal imaging and unmanned aerial vehicle imagery

图 5 为不同“冷”和“热”粒子成像和反演结果对比图,表 4 为加入温度粒子后表面流速测量结果对比。由图 5、表 4 可知,河段中加入热小球后的表面流场计算结果与流速仪的监测结果相比,在点 1、2 处的流速反演精度不够高,主要原因是热小球由于水流流速携带作用出现在高流速区域

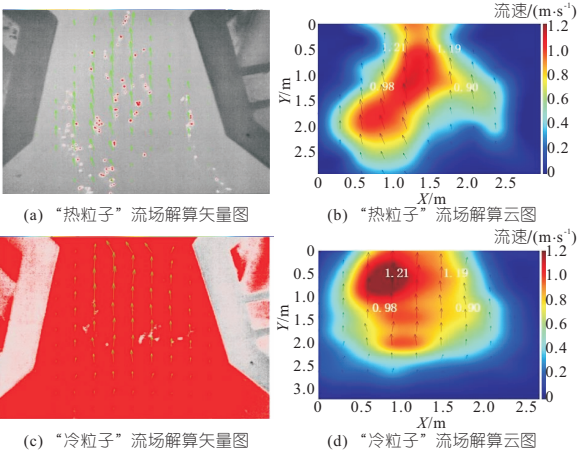


图 5 “冷”和“热”粒子成像和反演结果对比图

Fig. 5 Comparison of imaging and inversion results of "cold" and "hot" particles

表 4 加入温度粒子后表面流速测量结果对比
Tab. 4 Comparison of surface flow velocity measurement results after adding temperature particles

示踪情况	点号	LSPIV	流速仪	相对误差
		$/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\%$
“热”粒子	1	0.99	1.21	-18.18
	2	1.00	1.19	-15.97
	3	0.96	0.98	-2.04
	4	0.78	0.90	-13.33
“冷”粒子	1	1.20	1.21	-0.83
	2	1.09	1.19	-8.40
	3	0.97	0.98	-1.02
	4	0.89	0.90	-1.11

的概率较大,在点 1、2 这两处的数量较少。加入冷冰块粒子后河段的表面流场计算结果与流速仪监测结果相比,除了点 2 的监测精度的相对误差为 8.4%处,其他 3 个点的精度较高,均在 -1% 左右。

4 结论

a. 本文利用热成像和可见光双目相机,通过对比天然条件及人工温度失踪粒子条件下的流速场反演精度,研究了热成像在视频测流监测中的应用。

b. 在白天可见光充足条件下,由于河道水面存在波纹、漂浮物等天然示踪物,使用可见光视频图像流速反演的效果较好,除去个别点,精度误差可达到 -5% 以下。

c. 热成像相机由于自身分辨率的限制,对河道水面天然示踪物有一定的捕获能力,具有河道表面流速场的反演能力和潜力,但受限于分辨率和天然示踪物的分布特征,在个别区域误差较大,因此建议在白天光照充足情况下使用可见光进行河段表面流速场的反演。

d. 在河道中加入热小球和冷冰块,温度示踪物后可明显提高热成像相机流速场的反演精度,而加入冷冰块的效果更好,因此在夜晚和光照不充足时,可使用热成像相机完成视频图像流速监测,在监测精度方面,可向水中投入部分冰块冷粒子提高视频图像的监测精度。若在大江大河测流中无抛洒冰块冷粒子示踪粒子的条件时,可考虑使用热成像与可见光图像进行融合来提高视频流速监测的全天候监测能力。

参考文献:

[1] 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. (ZHANG Y H, LI F X, DONG T T, et al. Research on the application of space-time image method video flow measurement technology based on UAV platform[J]. China rural water and hydropower, 2024 (10): 1-6. (in Chinese))

[2] 朱蕾,徐凌,王冬梅,等. 视频测流技术在都江堰灌区的应用研究[J]. 人民长江, 2023, 54(10): 235-242. (ZHU L, XU L, WANG D M, et al. Application of video-based flow measurements in Dujiangyan irrigation district[J]. Yangtze river, 2023, 54(10): 235-242. (in Chinese))

[3] 杜红娟,王文种,唐炜,等. 基于稠密光流法的平原河网区视频测流技术[J]. 水电能源科学, 2022, 40(12): 47-49, 88. (DU H J, WANG W Z, TANG W, et al. Video current measurement technology in plain river network area based on dense optical flow method[J]. Water resources and power, 2022, 40(12): 47-49, 88. (in Chinese))

[4] 廖敏涵,刘九夫,廖爱民,等. 基于无人机遥感的山区中小河流表面流场测量[C]//2020 年中国地球科学联合学术年会论文集. 重庆, 2020: 22-25. (LIAO M H, LIU J F, LIAO A M, et al. Surface flow field measurement of small and medium-sized rivers in mountainous areas based on drone remote sensing [C]//Proceedings of the 2020 China Earth Science Joint Academic Conference Nanjing Institute of Water Resources, Chongqing, 2020: 22-25. (in Chinese))

[5] 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. (ZHANG Z, LI H B, YUAN Z, et al. Sensitivity analysis of image filter for space-time image velocimetry in frequency domain[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2022, 43(2): 43-53. (in Chinese))

[6] 罗杰阳. 基于时空图像测速的视频测流法在中小河流域的适用性分析[J]. 大众科技, 2024, 26(2): 65-70. (LUO J Y. Applicability analysis of video flow measurement method based on spatio-temporal image velocity measurement in zhongxiahe river basin[J]. Popular science & technology, 2024, 26(2): 65-70. (in Chinese))

[7] BODART G, LE COZ J, JODEAU M, et al. Quantifying and reducing the operator effect in LSPIV discharge measurements [J]. Water resources research, 2024, 60(2): e2023WR034740.

[8] TAURO F, GRIMALDI S. Ice dices for monitoring stream surface velocity[J]. Journal of hydro-environment research, 2017, 14: 143-149.