

大尺度粒子图像测流系统在崇阳水文站的应用研究

饶 森, 陈思恺

长江水利委员会水文局长江中游水文水资源勘测局, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年4月25日; 录用日期: 2025年5月15日; 发布日期: 2025年6月27日

摘 要

大尺度粒子图像测流系统是基于图像识别技术而产生的一种非接触式的测流方式, 具有实时在线、无人值守等特点, 是在线监测的重要工具。本文通过大尺度粒子图像测流系统在崇阳水文站的应用研究, 与流速仪法对比分析, 相互关系良好, 精度较好。该系统在实际运行中具有较好适用性和可靠性, 为大尺度粒子图像测流系统的应用与推广提供了有效的技术支撑。

关键词

大尺度粒子图像测流系统, 流量系数, 误差

Application of a Large-Scale Particle Image Velocimetry System at the Chongyang Hydrological Station

Miao Rao, Sikai Chen

Middle Changjiang River Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, BOH, CWRC, Wuhan Hubei

Received: Apr. 25th, 2025; accepted: May 15th, 2025; published: Jun. 27th, 2025

Abstract

The large-scale particle image velocimetry (PIV) system is a non-contact flow measurement method based on image recognition technology. It features real-time online monitoring and unattended operation, making it an important tool for online monitoring. This paper presents a case study of the application of the

作者简介: 饶森, 出生于1998年7月6日, 籍贯: 湖北武穴, 助理工程师, 研究方向为水文与水资源工程, Email: 543281336@qq.com

文章引用: 饶森, 陈思恺. 大尺度粒子图像测流系统在崇阳水文站的应用研究[J]. 水资源研究, 2025, 14(3): 311-318.

DOI: 10.12677/jwrr.2025.143033

large-scale PIV system at the Chongyang Hydrological Station. The results show a good correlation and high accuracy compared with the current meter method. The system demonstrates good applicability and reliability in practical operation, providing effective technical support for the application and promotion of the large-scale PIV system.

Keywords

Large-Scale Particle Image Velocimetry System, Flow Coefficient, Error

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,现代水文监测技术高速发展,流量在线监测技术取得了一定的成果,声学多普勒流速剖面仪法、雷达测速法、声学时差法测流得到广泛的应用;特别是基于图像识别技术的在线监测,提高了水文测验的实时性和效率,保障了人员和仪器设备的安全。但这些监测方法对监测环境条件均有一定的要求,需结合实际选择不同的监测方式。其中,大尺度粒子图像识别技术作为一种非接触式的测流方式,可以实时监测水流的表面流速,在有可利用的固定断面,率定水面流速系统后,可求得实时流量。该法安装维护方便,特别适用于中小河流、水文巡测等[1]。大尺度粒子图像测量流速时仪器不接触水体,以可视性和稳定性较差、但分布更均匀的天然漂浮物及水面纹理作为水流示踪物(例如植物碎片、泡沫、细小波纹等天然水面漂浮物及水面纹理等),更具有野外天然河道表面流速流量监测的能力,实现快速测量,适用断面复杂多变的水流特性,提高测验精度和保障人员的安全[2]。

2. 大尺度粒子图像测流系统工作原理

大尺度粒子图像测流系统的基本原理是通过光学方法,获取河流表面运动图像,遵循“所见即所得”的测量理念。采用机器视觉的图像处理方法,对河流表面运动图像进行分析,计算水流表面流速分布。结合河流断面信息,计算河流断面流量信息。视觉测流技术本质上是一种图像分析技术,该技术通过对流体中不同模态与示踪的有效识别,达到一种全场、动态、非接触的测量目标[3]。

图1是技术应用的简单原理图。通过对流场中的跟随性及反光性良好的示踪或河流表面模态的跟踪,在CCD(CMOS)成像设备进行成像。在相邻的两次测量时间 t 和第二次时间 t' ,系统对这两幅图像进行互相关分析,就能得到流场内部的二维速度矢量分布,即图2。

PIV测速是基于最直接的流体速度测量方法。在已知的时间间隔 Δt 内,流场中某一示踪或者模态在二维平面上运动,它在 x 、 y 两个方向的位移是时间 t 的函数。该示踪粒子所在处流体质点的二维速度可以表示为:

$$v_x = \frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t} = \overline{v_x}$$

$$v_y = \frac{dy(t)}{dt} \approx \frac{y(t+\Delta t) - y(t)}{\Delta t} = \overline{v_y}$$

式中, v_x , v_y 为流体质点沿 x 、 y 方向的瞬时速度, $\overline{v_x}$, $\overline{v_y}$ 为流体质点沿 x 、 y 方向的平均速度, Δt 为测量的时间间隔。

上式中,当 Δt 足够小时, $\overline{v_x}$, $\overline{v_y}$ 的大小可以精确地反映 v_x , v_y 。PIV技术就是通过测量示踪或者模态的瞬时平均速度实现对二维流场的测量。

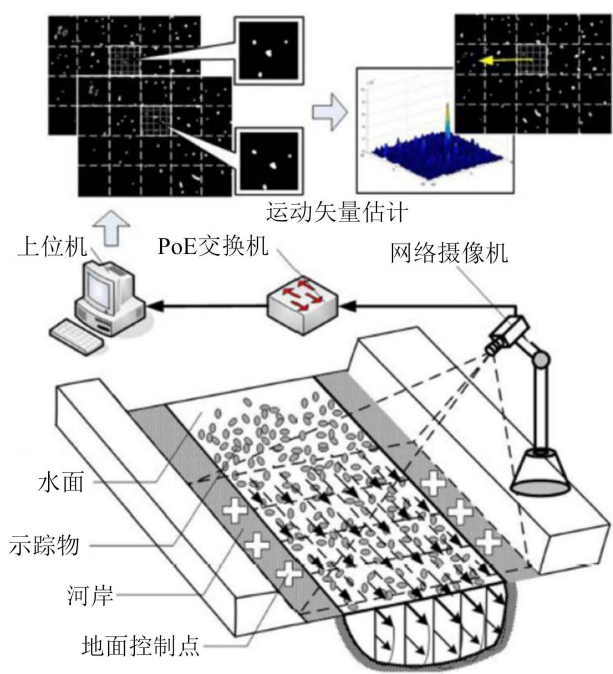


图 1. PIV 原理图

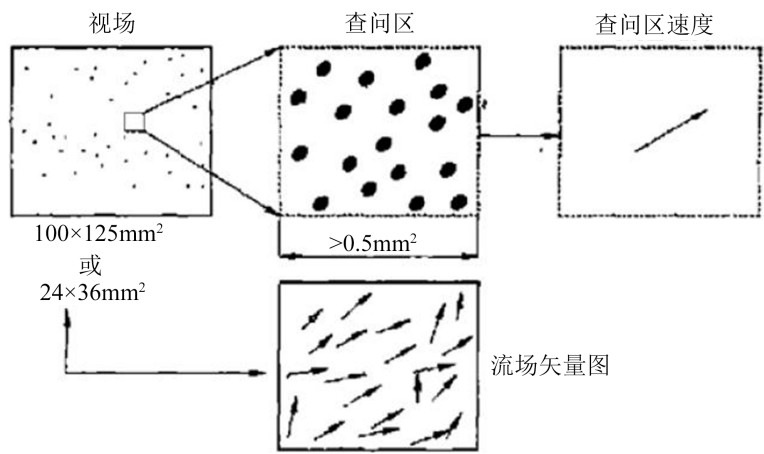


图 2. PIV 测速原理图

3. 研究区域与系统安装

3.1. 研究区域应用站点概况

试验研究站点设于陆水河崇阳水文站，测验项目有水位、流量、降水量。崇阳(二)站始建于 1983 年，是大型水库陆水水库上游入库站。集水域面积为 2200 km³。为典型的山溪性河流小河站，属国家基本水文站。该站测验断面河段顺直，顺长约 800 m，主槽宽约 170 m，断面呈 U 形，较为稳定，测站控制良好。断面主泓居中，流速分布与主泓相应，高水时主泓略有摆动。断面上游 700 m 处有径流式电站；断面上游 300 m、下游 120 m、下游 900 m 处分别建有崇阳公路一桥、三桥、四桥。水位在 59.50 m (冻结基面) 以上时右岸出现漫滩。当不受下游水库顶托时，Z~Q 关系曲线一般为单一线，当顶托较为明显时，Z~Q 关系曲线簇左偏并形成绳套[4]。

3.2. 安装位置

大尺度粒子图像测流系统的测验设备布置在崇阳水文站上游约 300 m 的崇阳一桥上，在崇阳一桥布置了 5 个摄像头进行水面流速测验，具体情况见图 3~5。



图 3. 大尺度粒子图像测流系统位置图



1#测量点位 2#测量点位 3#测量点位 4#测量点位 5#测量点位



图 4. 现场照片

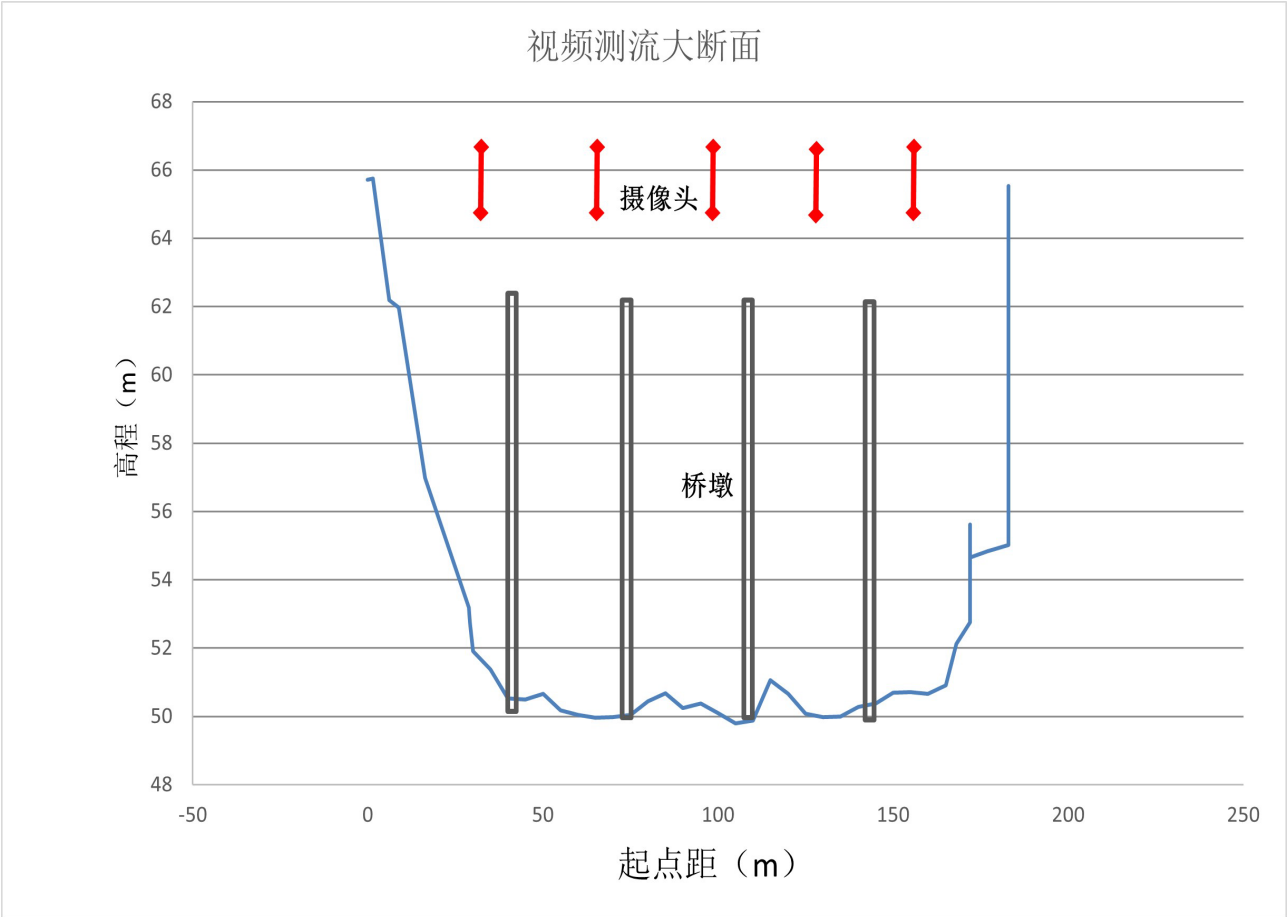


图 5. 测流点位分布图

4. 系统的应用与分析

4.1. 系统数据采集

由于崇阳站测流断面与大尺度粒子图像测流断面相隔 300 m，两个断面面积存在一定差异，由于河段顺直，两者关系近乎固定，分析比较时，其差异可在计算虚流量系数中反映。故此只对流量数据进行比测分析。本文选取同一时间大尺度粒子图像测流系统采集计算的虚流量与流速仪法实测流量进行对比分析。

4.2. 原始资料整理

流速仪法实测流量：在流速仪测流断面上采用缆道流速仪法施测，通过面积流速法推算出断面实测流量。
大尺度粒子图像测流系统虚流量：在崇阳公路一桥上布设了 5 个视频探头，设置了 5 条测速垂线，每 1 小时自动测量各垂线的表面流速，并根据水位变幅增加测量次数，通过面积流速法推算出断面虚流量。

4.3. 比测资料分析

2022 年 1 月 1 日至 2023 年 8 月 1 日，崇阳站流量变幅 107~1510 m³/s，水位变幅 51.16~54.58 m，同步测流成果 35 份。将 35 份实测资料与同时间大尺度粒子图像测流系统采集计算的虚流量进行回归分析，拟合回归方程式。即 $K = Q/Q_f$ 式中，K 为流量系数；Q 为断面实测流量(流速仪法实测流量)；Q_f 为断面虚流量(大尺度粒子图像测流虚流量)，断面流量 Q 和虚流量 Q_f 点绘散点图(见图 6)。

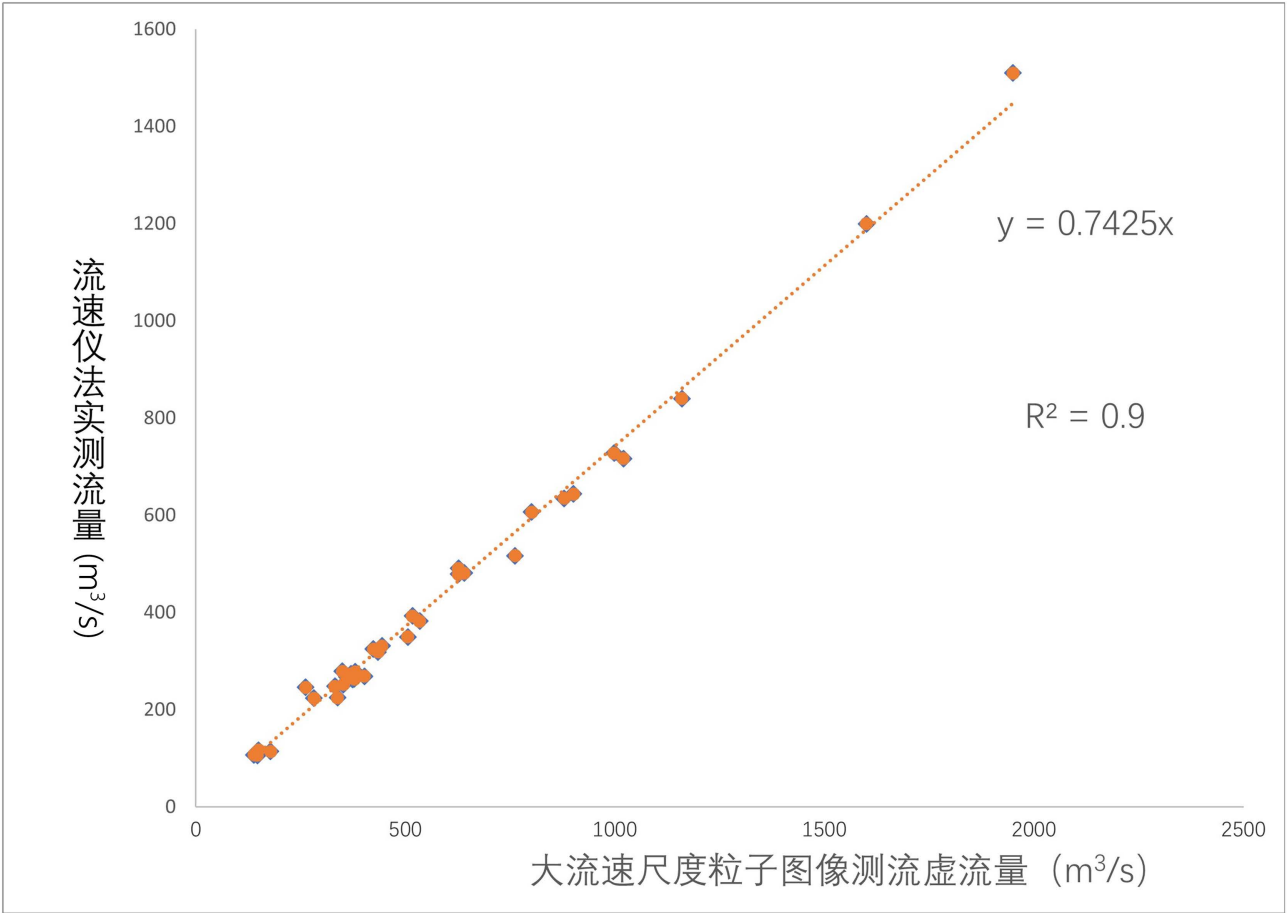


图 6. 断面流量 Q 和虚流量 Qf 点绘散点图

经回归计算，水面流速系数按 0.7425，效率系数 $R^2 = 0.9946$ ，两者相互关系很好。误差分析表明虚流量乘以该系数后与流速仪实测流量比较，相对误差 $\leq 10\%$ 的共 30 份，占有效测流 35 份的比例为 94.59%；相对误差 $\leq 5\%$ 的共 22 份，占有效测流 35 份的比例为 54.05% (见表 1)。系统误差 0.8%，标准差 6.7%，相对随机不确定度 13.4%，满足水文资料整编规范要求[5]。

表 1. 图像测流系统与流速仪测流水位—流量关系线比测数据

序号	时间	水位(m)	视频虚流量(m³/s)	视频流量(m³/s)	流速仪实测流量(m³/s)	误差(%)
1	2022 年 06 月 03 日 11 时 50 分	52.32	762	566	517	9.44
2	2022 年 06 月 03 日 15 时 48 分	53.22	1160	861	840	2.54
3	2022 年 06 月 03 日 19 时 52 分	53.02	998	741	728	1.79
4	2022 年 06 月 05 日 06 时 29 分	53.36	1020	757	717	5.63
5	2022 年 06 月 05 日 11 时 14 分	53.10	879	653	635	2.78
6	2022 年 06 月 06 日 16 时 30 分	52.21	282	209	224	-6.52
7	2022 年 07 月 05 日 17 时 22 分	51.90	506	376	350	7.34
8	2022 年 07 月 24 日 12 时 07 分	51.82	360	267	268	-0.26
9	2023 年 04 月 14 日 06 时 59 分	52.58	627	466	479	-2.81

续表

10	2023 年 04 月 14 日 08 时 40 分	51.90	402	298	269	10.96
11	2023 年 04 月 14 日 10 时 24 分	51.96	444	330	331	-0.40
12	2023 年 04 月 14 日 11 时 40 分	51.92	435	323	319	1.25
13	2023 年 04 月 14 日 15 时 26 分	51.70	352	261	252	3.71
14	2023 年 04 月 14 日 16 时 38 分	51.68	338	251	225	11.54
15	2023 年 04 月 14 日 17 时 42 分	51.68	332	247	248	-0.60
16	2023 年 04 月 19 日 10 时 41 分	51.23	150	111	117	-4.81
17	2023 年 05 月 05 日 15 时 24 分	51.22	147	109	114	-4.26
18	2023 年 05 月 06 日 12 时 10 分	51.75	378	281	263	6.72
19	2023 年 05 月 06 日 15 时 18 分	52.09	517	384	393	-2.32
20	2023 年 05 月 07 日 15 时 55 分	51.29	178	132	114	15.93
21	2023 年 05 月 17 日 09 时 54 分	51.18	139	103	107	-3.54
22	2023 年 05 月 21 日 13 时 58 分	51.18	147	109	106	2.97
23	2023 年 05 月 21 日 16 时 30 分	52.68	901	669	644	3.88
24	2023 年 05 月 21 日 17 时 33 分	53.77	1600	1188	1200	-1.00
25	2023 年 05 月 21 日 19 时 30 分	54.58	1950	1448	1510	-4.11
26	2023 年 05 月 22 日 05 时 26 分	52.82	801	595	607	-2.02
27	2023 年 05 月 22 日 06 时 56 分	52.10	424	315	325	-3.13
28	2023 年 05 月 22 日 08 时 04 分	52.40	640	475	481	-1.21
29	2023 年 05 月 22 日 09 时 30 分	52.57	627	466	491	-5.18
30	2023 年 05 月 22 日 11 时 12 分	51.76	262	195	246	-20.92
31	2023 年 05 月 22 日 12 时 06 分	52.12	534	396	382	3.79
32	2023 年 05 月 22 日 15 时 04 分	51.88	350	260	279	-6.85
33	2023 年 05 月 22 日 16 时 11 分	51.88	380	282	278	1.49
34	2023 年 05 月 22 日 18 时 06 分	51.90	370	275	274	0.26
35	2023 年 05 月 22 日 18 时 42 分	51.88	374	278	262	5.99

4.4. 大尺度粒子图像测流系统与流速仪测验方式的比较分析

通过上述数据处理过程及成果，整理出大尺度粒子图像测流系统与流速仪测验方式的比较分析[6]，见表 2。

表 2. 大尺度粒子图像测流系统与流速仪测验方式的比较分析

	大尺度粒子图像测流系统	流速仪法
原理	视频图像识别、动态测速	机械识别、单点测速
启用时间	21 世纪 10 年代	20 世纪 40 年代
工作时间	实时在线监测	人工现场测验
安装环境	安装在桥梁上	安装在铅鱼或测深杆上，断面较宽较深另需缆道或船只等
作业环境	非接触测量	入水测验

续表

后期维护	简单便捷	到使用时间或次数定期检查
测验范围	捕捉区域流场数据	测验断面垂线数据
数据整理	原始数据为视频数据，可以随时通过优化算法对测验数据进行还原	前期需断面资料，后期数据处理无法还原现场情况
应用场景	固定断面、中高水流、光线较好的情况下	不受场地光线水流速度限制

4.5. 大尺度粒子图像测流系统的特点

- 1) 大尺度粒子图像测流系统安装简单，安全可靠、维护成本低、不受泥沙影响等。
- 2) 原始数据为视频数据，可以随时通过优化算法对测验数据进行还原，便于现场河流流态观察、参数优化调整。
- 3) 收集大尺度粒子图像测流系统测验有效测流成果约 5000 份，占全部成果 15,000 份的比例为 33.33%，有效占比低，其因为一是夜间测验精度低，二是低水小流速条件下测验精度不高。
- 4) 试验测次安排基本涵盖了比测试验期间出现的各种水流流态，试验数据基本能够满足分析的要求，符合规范规定的相应条款。试验期间流量变幅 107~1510 m³/s，水位变幅 51.16~54.58 m，有效测流成果 35 份。经回归计算，流速系数按 0.7425， $R^2 = 0.9946$ ，虚流量乘以该系数后与流速仪实测流量比较，相对误差 $\leq 10\%$ 的共 30 份，占有效测流 35 份的比例为 94.59%；相对误差 $\leq 5\%$ 的共 22 份，占有效测流 35 份的比例为 54.05%。系统误差 0.8%，标准差 6.7%，相对随机不确定度 13.4%。
- 5) 可实时在线监测，无人值守。
- 6) 与流速仪法对比分析，相互关系良好，精度较好。该系统在实际运行中具有较好适用性和可靠性。

5. 结论

大尺度粒子图像测流系统运行情况良好，设备采集数据正常，在线实时监测，无需人力专门操作，与流速仪法对比相互关系良好，精度较高。在高水期白天可以作为常规测流的辅助手段。大尺度粒子图像测流系统在低水小流速条件下测验精度不高，夜间测量计算方法稳定性还需要进一步加强，其应用前景广阔，但在全面推广前还需要持续改进。下一步可以考虑加装辅助照明设备提高夜间测量的精度。在水位流量关系稳定的河流断面进一步验证该系统的稳定性。

参考文献

[1] 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.

[2] 黄河, 邓山. 视觉测流技术在中小河流洪水流量监测中的应用研究[J]. 长江技术经济, 2023, 7(4): 112-117.

[3] 黄炜, 王丽, 王聪聪. 非接触式河流流量监测技术研究[J]. 江苏水利, 2022(9): 19-22.

[4] 王力, 瞿兰兰, 张弛. 非接触缆道雷达波流量测验系统在崇阳(二)水文站的应用[J]. 水利水电快报, 2020, 41(12): 13-16.

[5] 嵇海祥, 李春华, 束庆林, 等. 非接触式在线测流系统数据相关性及误差分析——以岗岗水文站为例[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(9): 65-69.

[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.