

武大AiFlow视觉测流技术在南水北调中线工程渠首陶岔水文站的应用研究

董斌¹, 杨鑫¹, 陈兴农¹, 张莉¹, 郭生练², 高成阳³, 高珂鑫³, 周衍廷³

¹长江委水文汉江局, 湖北 襄阳

²武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉

³武汉大水云科技有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年5月9日; 录用日期: 2024年6月5日; 发布日期: 2024年6月27日

摘要

南水北调中线调水主干渠陶岔出水口的流量监测数据, 对于丹江口水库水资源跨流域水量调度具有重要意义。本文将武大AiFlow视觉测流产品在陶岔水文站应用, 针对陶岔水文站复杂水流流态和夜间光线不足的问题, 提出了多算法融合策略和夜间补光方案。研究结果表明: 基于多算法融合策略可提高视觉测流流量测验精度, 通过一定角度红外补光及特定相机可提高相机在夜间对水面纹理的捕捉能力, 视觉测流换算流量与ADCP实测流量相比, 相对误差在±7%以内。

关键词

南水北调, 视觉测流技术, 多算法融合, 夜间补光, 陶岔水文站

Wuhan University's AiFlow Visual Flowmeter Technology: An Application Study at the Taocha Hydrological Station of the South-to-North Water Diversion Project's Middle Route Headworks

Bin Dong¹, Xin Yang¹, Xingnong Chen¹, Li Zhang¹, Shenglian Guo², Chengyang Gao³, Kexin Gao³, Yanting Zhou³

¹Yangtze River Commission Hydrological Hanjiang Bureau, Xiangyang Hubei

²State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan Hubei

³Wuhan Dashuiyun Technology Co., Ltd., Wuhan Hubei

作者简介: 董斌(1990-12), 籍贯湖北宜昌, 硕士研究生, 工程师, 主要从事水文仪器设备研发和管理, Email: 13035223001@163.com

文章引用: 董斌, 杨鑫, 陈兴农, 张莉, 郭生练, 高成阳, 高珂鑫, 周衍廷. 武大 AiFlow 视觉测流技术在南水北调中线工程渠首陶岔水文站的应用研究[J]. 水资源研究, 2024, 13(3): 265-272. DOI: 10.12677/jwrr.2024.133031

Abstract

The flow monitoring data of the Taocha outlet of the main channel of the South-to-North Water Diversion Project is of indispensable importance for the water resources allocation of Danjiangkou Reservoir. In this paper, Wuhan University's AiFlow visual flowmeter product is applied at the Taocha hydrological station. A multi-algorithm fusion strategy and nighttime light supplement scheme were proposed to address the complex flow regime and insufficient nighttime light at the Taocha hydrological station. The results show that based on the multi-algorithm fusion strategy, the accuracy of visual flowmeter can be improved, and through infrared light supplement at a certain angle and specific cameras, the ability of the camera to capture water surface texture at night can be improved. Compared with that of the ADCP measured flow, the relative error of the visual flowmeter conversion flow is within $\pm 7\%$.

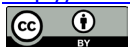
Keywords

South-to-North Water Diversion Project, Visual Flowmeter Technology, Multi-Algorithm Fusion, Nighttime Light Supplement, Taocha Hydrological Station

Copyright © 2024 by author(s) and Wuhan University.

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

水资源是维系社会经济发展和生态系统健康的基础要素，尤其是在幅员辽阔、地形地貌复杂多变的中国，水资源的分布不均的问题显得尤为突出[1]。我国拥有丰富的水资源总量，据历年统计数据，水资源总量位居世界前列，然而，由于地域广大、降水时空分布极不均匀，形成了显著的南涝北旱、东多西少的分布格局[2]。鉴于此种严峻的水资源失衡局面，我国启动了南水北调工程[3]，这一工程线路长、水流量大，为确保该工程运行的安全与高效，建立科学、高效的全线自动化调度系统显得尤为关键[4]。而在这一系统中，水流量的精确测量成为不可或缺的一环。

常规的流量测验方法，如流速仪法[5]和声学多普勒法[6]等，具有较高的测验精度，但这些方法依赖大量的人工操作，工作强度大，且测验间隔时间较长，无法满足对水量进行实时、在线监测的迫切需求。为实现实时在线流量监测，长距离输水管网中常采用电磁流量计[7]、超声波流量计[8]、雷达流量计[9]等设备进行流量测验，这些设备均可实现在线流量监测，但电磁流量计只能测量导电介质的液体流量，且对现场上下游管道工况有较高要求；超声波流量计对直管段要求严格，抗干扰能力差，易受气泡、结垢、泵及其他声源混入的超声杂音干扰、影响测量精度，且设备及安装成本较高；雷达流量计中多普勒频差与流速是呈正相关，流速越小时，频差越小，此时较难保证测量精度，且雷达每次只能测量得到单点表面流速，往往需要布置多台仪器同时工作，并且断面越宽，需要的台数越多，测流成本过高。相比于传统测流手段，基于图像识别技术且融合多种算法的AiFlow视觉测流产品具有明显优势，不仅可实时在线进行流量测验，而且监测精度高、可回溯历史视频，安装运维简单、成本低等。为此，在南水北调中线工程渠首闸下 1.4 km 处的陶岔水文站，安装武大 AiFlow 视觉测流产品进行在线流量监测。

2. 陶岔水文站与视觉测流产品

陶岔水文站为长江流域汉江中游南水北调中线输水总干渠陶岔渠首水量控制基本站，也是鄂豫省界水量控制站，为南水北调中线水量计量和流域水资源管理服务。流量测验断面在基下 1.4 km (如图 1 所示)。断面上游约 1.3 km 为南水北调中线输水总干渠陶岔渠首枢纽工程，上游约 1.0 km 有弯道，下游 3.0 km 有肖楼分水闸，13.3 km 有刁河渡槽，渡槽上下均有闸门控制。



图 1. 陶岔水文站地理位置图

因此，陶岔水文站测流断面的水位和流量受上下游各闸门调节控制，水流流态复杂，水面存在区域紊流现象，且在夜间外部光线不足时，水面纹理更难以被摄像机捕捉，如图 2 所示。

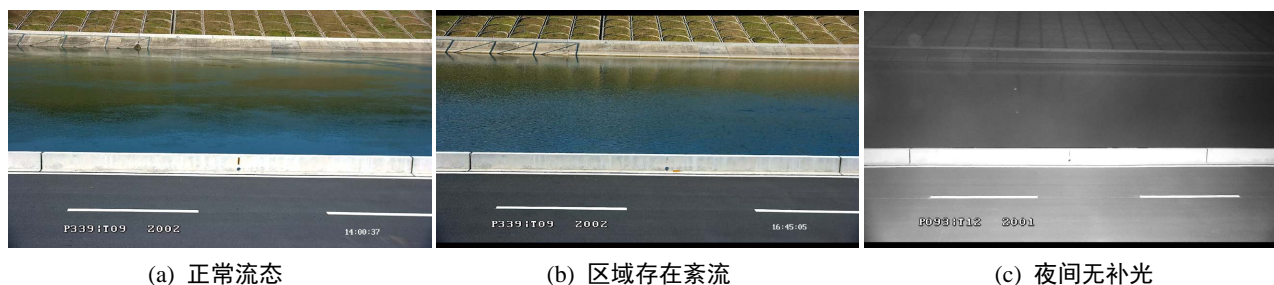


图 2. 陶岔水文站测流断面多种流态示意图

针对上述复杂场景，本文提出了多算法融合策略和夜间补光方案，并以陶岔水文站为例，结合 ADCP 采集的断面流量数据，分析了陶岔水文站武大 AiFlow 视觉测流产品测验精度及该方法的适用性。

3. 复杂场景下的视觉测流方案研究

3.1. 多算法融合策略的方案研究

时空影像法[10]适用于流向顺直的大部分天然河道，针对流速分布较均匀的河流、表面纹理明显的河流和光照条件较好的河流的应用场景能够实现较高精度一维流场监测；但对于水力因素复杂或外部因素干扰而导致的局部紊流的场景监测精度不高。而光流法[11]适用于自然河流长河段表面流场的测量，尤其适用于紊流流态场景，可以满足二维流场监测的需求。为了克服单一方法的局限性，本文结合了时空影像法(STIV)与光流法(OP)的算法优势，通过数据融合的方式，提高测流精度，其实现过程如下图 3。

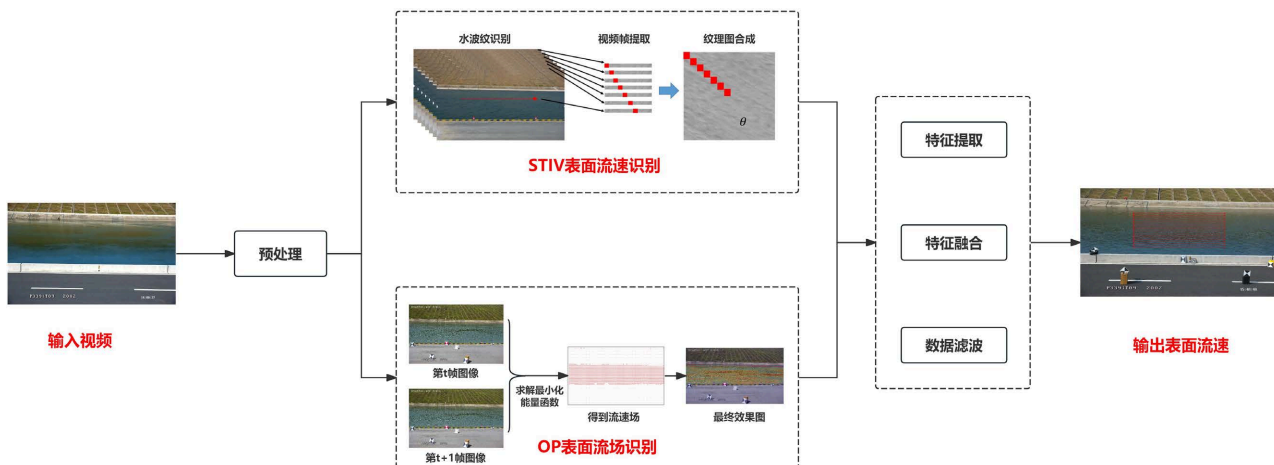


图 3. 多算法融合实现流程图

图 4 给出了在局部存在紊流的场景下，单独采用 STIV 算法和采用 STIV 与 OP 算法融合后所输出的表面流速横向分布图。

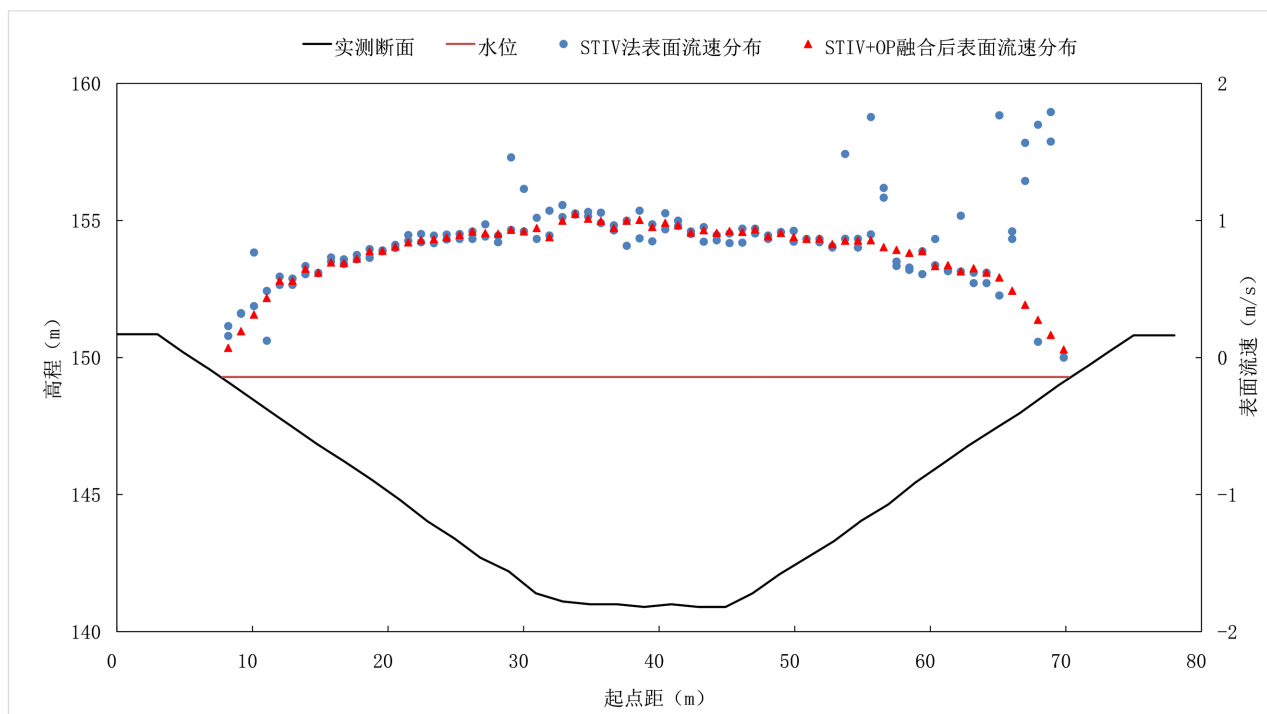


图 4. 单算法与多算法融合输出的表面流速分布图

从图 4 可以看出，单独采用 STIV 法的表面流速横向分布存在明显突变，STIV + OP 融合后的表面流速更加稳定集中，相邻测速线流速间无突变、无异常流速。

3.2. 夜间补光方案研究

在夜间补光过程中，为确保光源能够高效反射至视频影像采集设备，补光灯的照射方向应与设备的拍摄方向保持适当的夹角。安装时，需根据实际情况灵活调整补光灯的位置和角度，以扩大照射范围，并使更多光线

反射至视频影像采集设备，从而优化夜间拍摄效果。

陶岔水文站河宽约 60 m，结合现场实际情况，综合考虑采用海康 800 万像素、40 倍智能红外网络球机，同时结合红外补光技术进行夜间测流，其夜间补光效果如图 5 所示，河流水面的流动纹理清晰可见。



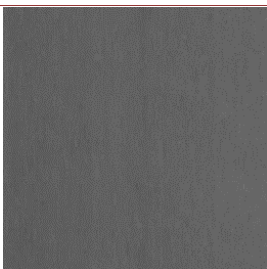
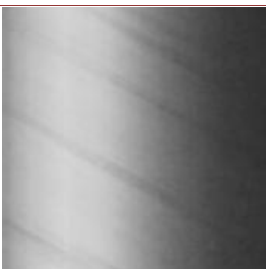
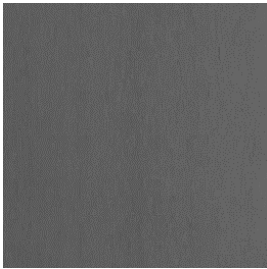
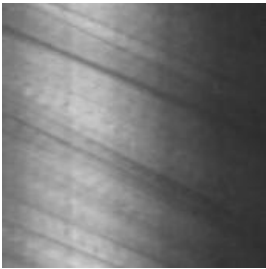
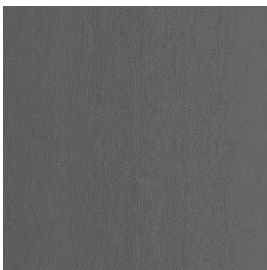
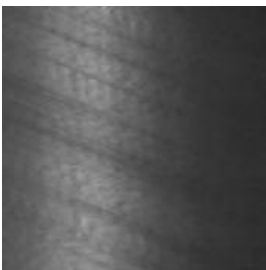
图 5. 陶岔夜间补光效果图

分别计算在夜间无补光场景和夜间有补光场景下的纹理图，部分测速线结果如下表 1 所示。

通过对比这两种不同场景下的纹理图，我们可以明显观察到以下差异：

在夜间无补光的场景中，纹理图几乎无法呈现出有效的纹理特征，由于光线不足，图像质量较差，几乎无法分辨出纹理角。相比之下，在夜间有补光的场景中，纹理图的纹理特征清晰可见，补光设备为测流场景提供了足够的光线，使得相机在夜间捕捉水面纹理能力得到了显著提升。

表 1. 有无补光场景下的测速线时空图像对比

测速线序号	起点距(m)	无补光时空图像	有补光时空图像
10	16.74		
20	26.23		
30	35.71		

4. 视觉测流成果分析

4.1. 断面综合流量系数计算

陶岔水文站于 2023 年 9 月 21 日至 2023 年 11 月 28 日,在不同水流条件下通过走航式 ADCP 进行了流量数据采集。在此期间,共取得 9 组走航式 ADCP 测流数据,期间水位变化范围为: 149.38~149.56 m; 流量变化范围为: 217~259 m³/s。走航式 ADCP 施测断面在视觉测流断面上游约 200 m 处,其间无其他河流汇入和流出,故采用视觉测流虚流量与走航式 ADCP 流量进行断面综合流量系数计算。武大 AiFlow 视觉测流选取与走航式 ADCP 测流同时刻数据,共组成 9 组率定样本。断面综合流量系数的计算方程如下:

$$K = \frac{1}{n} \sum K_i = \frac{1}{n} \sum \frac{Q_{ADCP流量}}{Q_{视频测流虚流量}} \quad (1)$$

其计算结果如下表 2 所示:

表 2. 断面综合流量系数计算表

测次	走航式 ADCP 测流数据			武大 AiFlow 视觉测流数据			K _i
	测流时间	水位(m)	断面流量(m ³ /s)	视觉测流时间	水位(m)	虚流量(m ³ /s)	
1	2023/9/21 9:30	149.38	217	2023/9/21 9:30	149.38	270	0.80
2	2023/10/9 10:30	149.42	232	2023/10/9 10:30	149.42	283	0.82
3	2023/10/22 15:15	149.53	237	2023/10/22 15:15	149.53	303	0.78
4	2023/11/1 17:15	149.52	248	2023/11/1 17:15	149.52	295	0.84
5	2023/11/2 13:30	149.56	252	2023/11/2 13:30	149.56	303	0.83
6	2023/11/11 16:00	149.39	259	2023/11/11 16:00	149.39	301	0.86
7	2023/11/12 10:45	149.42	259	2023/11/12 10:45	149.42	301	0.86
8	2023/11/24 10:00	149.51	253	2023/11/24 10:00	149.51	318	0.80
9	2023/11/28 9:30	149.54	228	2023/11/28 9:30	149.54	297	0.77
断面综合流量系数							0.82

表 3. 误差分析表

测次	测流时间	水位(m)	走航式 ADCP 测流流量(m ³ /s)	武大 AiFlow 视觉测流换算流量(m ³ /s)	相对误差
1	2023/9/21 9:30	149.38	217	221	1.84%
2	2023/10/9 10:30	149.42	232	232	0.00%
3	2023/10/22 15:15	149.53	237	248	4.64%
4	2023/11/1 17:15	149.52	248	242	-2.42%
5	2023/11/2 13:30	149.56	252	248	-1.59%
6	2023/11/11 16:00	149.39	259	247	-4.63%
7	2023/11/12 10:45	149.42	259	247	-4.63%
8	2023/11/24 10:00	149.51	253	261	3.16%
9	2023/11/28 9:30	149.54	228	243	6.58%

4.2. 成果精度评定

根据上述计算断面综合流量系数结果,将视觉测流虚流量换算为断面流量,因样本数量只有 9 组,不满 10 组,按《水文资料整编规范》(SL/T247-2020) [12]规定,可不做精度检验及三项检验,故只进行误差分析,结果见表 3,所有测次相对误差均在 $\pm 7\%$ 以内,除第 9 测次外,其余测次均在 $\pm 5\%$ 以内。

4.3. 误差来源分析

流量测验误差主要分随机误差、未定系统误差、已定系统误差和伪误差[13],经分析,武大 AiFlow 视觉测流测量误差来源主要有以下几个方面:

1) 比测试验中以走航式 ADCP 流量测验结果为基准,但其测验结果同样存在误差,且误差范围无法精准评估。

2) 比测试验中,两种测验方式所处的外部条件,如水流状况、时间同步等因素,难以完全保持一致,对测验结果产生一定影响,导致误差产生。

3) 大气散射、水面反射、水下散射及光线不足带来的水面目标可见性误差。

5. 结论

本文针对陶岔水文站因受上下游各闸门调节控制而导致水面出现区域紊流现象,和在夜间外部光线不足等问题进行研究,提出了针对武大 AiFlow 视觉测流的多算法融合策略及夜间补光方案,并与 ADCP 实测数据进行比测率定,得到以下结论:

1) 本文提出的多算法融合策略进一步提高了陶岔水文站流量测验精度,相比单一时空影像法输出结果更加稳定可靠,具有较大实用价值。

2) 本文提出的夜间补光方案,提高了摄像机在夜间对水流纹理的捕捉能力,满足全天候测量需求。

3) 武大 AiFlow 视觉测流与走航式 ADCP 实测流量进行误差分析,其测算相对误差均在 $\pm 7\%$ 以内,能够满足水文测验要求,具有实时在线,高效安全,经济便捷、稳定普适、运维简单等特点,实现了南水北调工程的流量自动化监测需求,为水资源管理和决策提供了重要的数据支持。

4) 视觉测流作为一种非接触式的新型仪器测验方法,其测速原理基于时空图像法,但这种方法容易受到水面反射、光线和视频画面遮挡等因素的影响,为了确保测量结果的准确性,须确保测验环境水面纹理清晰、光线充足,并且测流画面无障碍物遮挡干扰。

本研究成果为优化视觉测流在复杂环境和夜间补光场景下的在线监测方案,提供了有效的理论与实践支持。有力证明了视觉测流在大规模渠道流量实时监控领域的广泛应用潜力与实践意义。

参考文献

- [1] 刘茜,王岳. 水安全保障与水资源利用策略探究[J]. 水上安全, 2024(1): 22-24.
- [2] 周雨,张育嘉,苗昌盛. 中国降水特征及拟合参数时空分布研究[J]. 人民珠江, 2024, 45(3): 48-58.
- [3] 李奕杰. 南水北调工程与区域协调发展研究[J]. 城镇供水, 2023(S1): 9-13.
- [4] 董新亮,杜宇峰,马玉霞. 南水北调中线干线工程自动化调度系统现状及优化建议[J]. 河北水利, 2015(5): 12-13.
- [5] 梁璐. 浅谈转子式流速仪在流量测验中的应用[J]. 内蒙古水利, 2009(5): 102-104.
- [6] 马厚标,胡灿华,崔海涛. 走航式 ADCP 在水文测验中的应用[J]. 山东水利, 2023(9): 54-56.
- [7] 张贵芳. 雷达流量计在灌区渠首在线计量中的应用[J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52(8): 134-135.
- [8] 彭金辉. 浅析南水北调中线调水工程中的水量计量技术应用[J]. 城镇供水, 2023(S1): 43-47.
- [9] 陈小航. 电磁流量计在供水系统中的应用探讨[J]. 大众标准化, 2023(20): 180-182.

- [10] 陈华, 陈梦, 赵浩源, 等. 基于时空影像法的河道流速流量计算应用研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024(4): 1-11.
- [11] 邵绪强, 杨艳, 刘艺林. 流体运动估计光流算法研究综述[J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(2): 355-367.
- [12] SL/T247-2020. 水文资料整编规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- [13] 侯学彬, 曹凤艳. 浅谈控制流速仪测流法误差的方法[J]. 水利科技与经济, 2011, 17(2): 78-79.