

DOI:10.26974/j.cnki.XBGC.2026.01.003

基于图像智能识别的引黄灌区干渠视频测流方法

尹婷

(宁夏回族自治区汉延渠管理处,宁夏银川 750001)

摘要:为探究视频测流技术的测量精度和适应性,以宁夏引黄灌区干渠为对象,根据2个典型断面的视频测流数据,提出基于视频图像智能识别的灌区干渠实时动态测流方法,并结合垂直声学多普勒流量剖面仪(V-ADCP)所得同步流量数据进行对比分析与检验。结果表明,在宽浅断面条件下,视频测流方法具有更好的监测识别精度,偏差范围在-21.5%~15.2%;当水面存在丰富的纹理和漂浮物时,视频测流精度得到提高,适应性不断增强。研究结果可为宁夏引黄灌区干渠视频测流提供技术参考。

关键词:视频测流;图像智能识别;比测分析;相对偏差;引黄灌区

中图分类号:P332.4 **文献标志码:**A

明渠灌溉系统的精准计量与实时监测是灌区实现节水增收,提升灌溉效益的核心环节,也是实现精准引水、输水及配水的关键技术保障^[1-3]。宁夏引黄灌区总灌溉面积达65.5万hm²,作为国内四大古老灌区之一,该区域集聚了全区66%的人口,80%的城镇,贡献了全区85%的经济总量和94%的财政收入,同时承担着74%的粮食生产任务,是宁夏回族自治区经济社会发展的核心区域^[4]。近年来,宁夏引黄灌区依托信息化建设,积极引入视频测流技术,积累了丰富的实测数据。然而,该技术在理论方法体系构建、精度评价体系完善及复杂工况适应性验证等方面仍存在短板,亟待通过系统性研究与全面实践检验,进一步提升其技术可靠性与应用水平。

回顾灌区测流技术,传统测流方法主要包括流速仪法、浮标法,除此之外,还可以通过量水建筑物或特设量水设施(如量水堰、量水槽)等实现测流^[5-6]。这些测流方法在长期实践中发挥了重要作用,但也存在明显局限:高度依赖人工值守、作业效率偏低、应用场景受限等^[7],因而难以满足现代灌区对数据获取时效性与智能化的要求。近些年,声学多普勒流速剖面仪(acoustic doppler current profiler, ADCP)实现了高效率、高精度的自动化测流,雷达技术则拓展了恶劣环境下的远距离无接触式自动化测流能力^[8-9],而无人机平台更突破了偏远

复杂地形及应急监测的可达性自动化测流瓶颈。然而,这些先进设备普遍存在采购与维护成本高,需专业技术人员操作等问题,而且,ADCP还存在一些特定的原理性缺陷,如其声学信号会受到含沙水体的影响^[10]。因此,这些设备的大规模推广受到明显制约。与此同时,计算机视觉与图像处理技术的快速发展为表面流速的非接触式测量开辟了新路径^[11-12]。视频测流新技术具有非接触、布置简便、适应性强、精度合理、可视化程度高、安全性高、数据可溯源等优势,在河道与灌区流量监测中逐步展现出应用潜力^[13-16]。值得关注的是, Li等^[17]利用图像测速技术对灌溉渠道系统流量分布进行了分析,验证了视频测流的可行性与可靠性; Zhou等^[18]提出了一种基于图像处理的干渠表面流速测量算法,该方法在不同流速条件下均能保持较高的测量精度。尽管如此,现有研究多聚焦于方法验证与个案应用,针对不同水流流态与含沙量、复杂流场等典型渠道条件的系统性、适应性评估仍显不足,理论深度与实践广度均有待提升。

基于上述技术背景与研究现状,本文选取宁夏引黄灌区汉延渠的2个典型测流断面为研究对象,开展视频测流技术的精度分析与适应性评价,旨在为引黄灌区节水灌溉提供智能化、实时动态测流技术支持,同时为灌区信息化、现代化建设提供辅助支撑。

收稿日期:2025-09-30

作者简介:尹婷(1972—),女,高级工程师,主要从事农田水利工程建设及水资源管理研究(502189438@qq.com)。

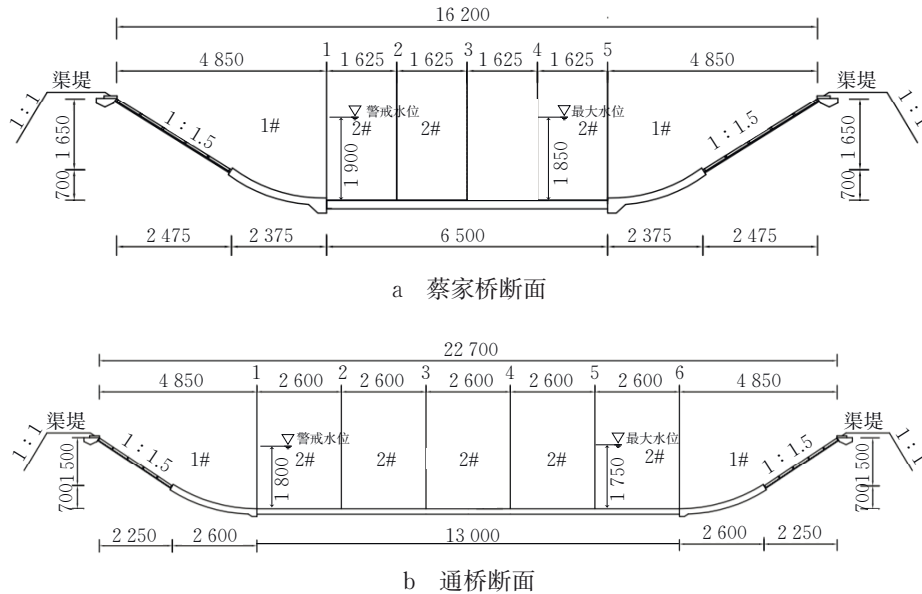
引用格式:尹婷.基于图像智能识别的引黄灌区干渠视频测流方法[J].西北工程技术学报(中英文),2026,25(1):19-26,32.

1 数据与方法

1.1 测流断面选取及设备布置

1.1.1 测流断面选取 以宁夏引黄灌区汉延渠为研究对象,该渠道位于黄河宁夏段中下游西岸,地理坐标为北纬 $38^{\circ}01'36''-38^{\circ}57'36''$,东经 $106^{\circ}04'08''-106^{\circ}27'18''$,灌域走向自南偏东向北,

地跨青铜峡市、银川市兴庆区、永宁县、贺兰县 4 个区域,控制灌溉面积 2.75 万 hm^2 。选取汉延渠干渠 2 个标准化测流断面,即蔡家桥断面与通桥断面(图 1),其在汉延渠上的位置如图 2 所示。这 2 个断面均为弧梯形断面结构,渠段顺直,水流通畅,泥沙淤积程度较低,断面形态相对稳定。



注:图中标注尺寸均以 mm 计;比例为 1:100;每个 1#断面的面积一致,每个 2#断面的面积一致;测流点水尺零点高程与渠底一致;蔡家桥测流断面分为 5 个测点,通桥测流断面分为 6 个测点。

图 1 标准化测流断面图

Fig.1 Standardized flow-gauging cross-section



图 2 汉延渠视频测站位置分布

Fig.2 Spatial distribution of video gauging stations within the Hanyan Canal system

1.1.2 布置视频测流设备 本研究采用的测流设备适用于宽河/渠道流量测量,整套设备布设于渠道左岸渠堤顶(图 3a~3b)。该设备体系由智能云平台与 2 个视频前端测站构成,前者承担数据分析、可视化呈现及预警功能;后者负责数据采集,其配置包括水位识别球机、流速识别球机、太阳能供电系统、数据储存及传输模块(图 4)。水位测量则依托布设于岸坡混凝土圆柱杆上的桩式水尺完成。该测流设备主要技术指标包括:流速测量范围

为 0.5~15 m/s,有效测流距离达 100 m,水位监测识别误差在 ± 2 cm 以内,测流精度 $\leq 10\%$ 。两断面视频测流设备在完成布设和参数率定后,可实现水位、断面平均流速及流量的实时在线连续监测,测量频次为每 30 min 1 次。另外,测流断面安装了垂直式声学多普勒流速剖面仪(vertical acoustic doppler current profiler, V-ADCP)自动测流设备,用于支持断面水位流量与视频测流精度和适应性的对比分析。

1.2 方法

本文提出一种融合方法,该方法集成 3 项核心技术:基于视频图像的流速识别、图像水位的智能监测,以及耦合特征点流速-面积法的流量测算。

1.2.1 视频图像流速识别 图像测速系统作为一种非接触式、全局化、定量化的智能检测手段,其工作原理是利用高清监控摄像机采集渠道表面视频图像,运用特征点匹配测速算法(feature matching velocimetry, FMV)追踪 2 帧图像间水面同一特征点



图 3 汉延渠测流系统安装效果

Fig.3 Installation of the flow-gauging system at the Hanyan Canal site



图 4 视频测流系统实物图及安装示意图

Fig.4 Field setup and installation schematic of the video-based flow monitoring system

的位移变化,从而计算出表面流场信息。具体的计算流程为:首先,采集实时图像(RI,图 5a),选择计算区域(图 5b),与其高斯滤波图像(BI)相减,生成增强图像(PI,图 5c)。接着,基于连续帧的增强图像[PI1,PI2](图 5d),采用 FMV 算法计算像素位移 $[x,y,dx,dy]$ (图 5e),再根据投影转换关系,将像素位移 $[x,y,dx,dy]$ 转换为实际空间的物理位

移 $[X,Y,dX,dY]$ 。位移转换公式为

$$\begin{cases} x = \frac{A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1}, & (1) \\ y = \frac{B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1}. & (2) \end{cases}$$

式中: $A_1 \sim A_4, B_1 \sim B_4, C_1 \sim C_3$ 为投影系数,通常采用至少 6 个地面控制点(ground control points, GCPs),以最小二乘法来确定投影系数。已知投影系数和世界坐标系下的水位值 h ,即 $Z = h$,可将像素坐标 (x,y) 转换至世界坐标 (X,Y) 。最后,进行流场网格化(图 5f)。结合视频采样频率 f ,计算得到世界坐标系下的表面流场 $[X,Y,U,V]$,进而得出水面流速。水流在 X 方向和 Y 方向上的流速公式为

$$U = dX \cdot f, \quad (3)$$

$$V = dY \cdot f. \quad (4)$$

式中: U 表示流体在 X 方向(通常是水平方向)上的速度分量,反映了流体在该方向上的流动速度; V 表示流体在 Y 方向(通常是垂直于 X 方向)上的速度分量,反映了流体在该方向上的流动速度。

1.2.2 图像水位智能监测 图像水位智能识别是一种基于视频水尺读数检测的方法。首先,运用高斯滤波对采集的视频图像进行滤波降噪预处理,以消除图像噪点;继而采集水尺样本,基于局部二值模式(local binary patterns, LBP)特征级联分类器进行训练,实现对视频图像中的水尺检测,并通过反复迭代训练,选用检测性能最优的分类器,以确定水尺在图像中的具体位置。之后,对水尺数字区域实施二值化操作,结合水平与垂直投影确定水尺各数字精确位置,采用 Gabor 特征与神经网络进行数字识别,获取数字位置及其识别结果。水位线检测则通过二值化梯度图像的水平投影实现:求解整幅图像的梯度图并进行二值化,对所得二值图像作水平投影,以确定水位线位置。最终,综合数字分割识别结果、水位线检测结果,以及距水位线最近数字的识别信息,推算出当前水位读数。具体水位识别算法流程见图 6。

1.2.3 基于流速-面积法的渠道流量测算 基于断面流速分布特征及已知过水断面几何信息,采用流速-面积法推求流量,计算公式为

$$Q = \sum_{i=1}^n C_i V_i S_{i0} \quad (5)$$

式中: Q 为断面流量, m^3/s ; V_i 为第 i 部分断面水面流速, m/s ; C_i 为对应部分断面平均流速折算系数; S_{i0} 为该部分断面面积, m^2 ; n 为断面划分的单元总



a 实时采集的影像



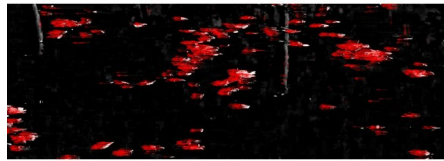
b 分析区域



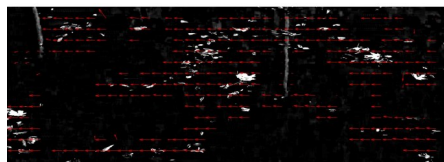
c 增强图像



d 连续帧融合图像



e FMV 计算得到的流场



f 网格化流场

图 5 视频图像流速识别步骤

Fig.5 Workflow for video-image velocity estimation

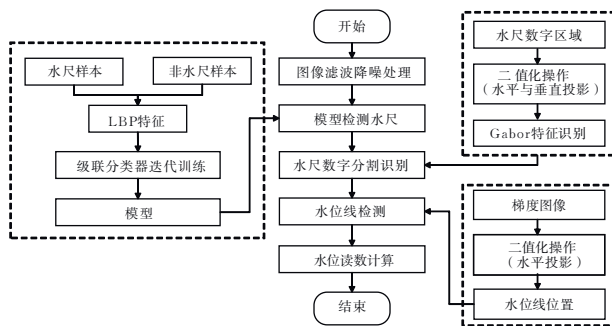


图 6 水位识别算法流程图

Fig.6 Flowchart of the water-level recognition algorithm

数。以图 7 为例,断面设置为 n 条测速垂线(编号记为 $r_1 \sim r_n$),据此将渠道断面分成 $n-1$ 个计算单元。图 8 为汉延渠通桥断面的水位、流量、流速的实时测量画面。

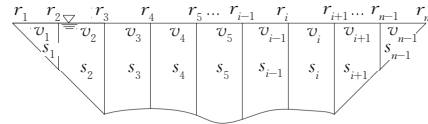


图 7 渠道测流断面划分示例图

Fig.7 Example of cross-section subdivision for channel discharge computation



a 水位



b 流量

图 8 通桥断面视频测流系统实时测流画面

Fig.8 Real-time discharge display from the video gauging system at the Tongqiao cross-section

2 结果与分析

2.1 典型时段视频测流结果

分阶段开展视频测流算法的训练与优化工作。应用 2020 年冬灌初期(11 月 1—5 日)的 V-ADCP 测流数据对视频测流算法进行初步调试与训练;基于 2020 年 11 月 6—19 日的的数据对视频测流算法进行优化及重新训练,重点解决水位识别受倒影干扰导致水深测量失效,视频测流算法不适应渠道内相应时刻流态场景等问题。选取 2021 年 5—10 月期间蔡家桥断面和通桥断面的 V-ADCP,将其与视频测流同期观测资料(图 9 a~9b)进行对比分析。

2.2 测量数据拟合检验

依据《河流流量测验规范》(GB 50179—2015)和《灌溉渠道系统量水规范》(GB/T 21303—2017)中的比测规定进行拟合检验。图 10 为 2 个典型断面视频测流结果 (Q_{video}) 与 V-ADCP 实测结果

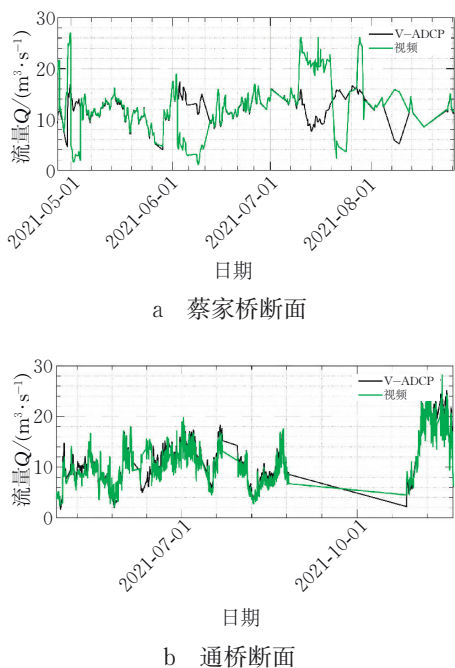


图 9 典型断面 V-ADCP 和视频测流数据的长时间序列
Fig.9 Long-time series of discharge from video-based and V-ADCP measurements at typical cross-sections

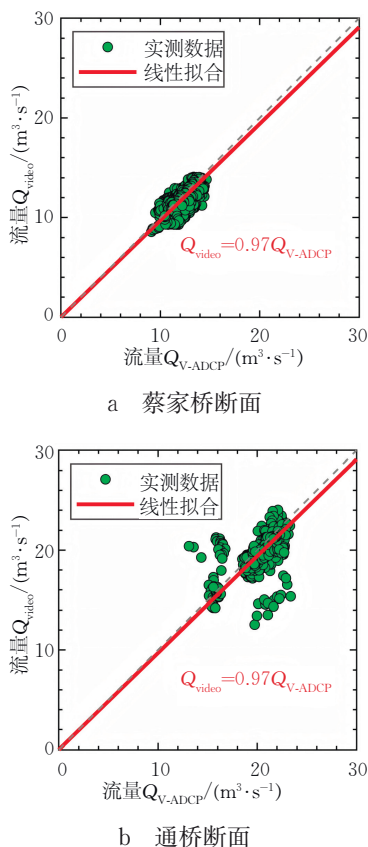


图 10 典型断面视频测流结果与 V-ADCP 实测结果的线性拟合

Fig.10 Linear fit between video-derived and V-ADCP-measured discharge at typical cross-sections

(Q_{V-ADCP})的线性拟合结果。可知,两断面视频所流量的线性拟合直线斜率均为 0.97,与理想斜率值 1 高度接近,表明该视频测流系统所得测流数据满足对比分析的准确性要求。

2.3 视频测流精度与适应性分析

采用相对偏差指标与偏差频率分布对视频测流数据的精度和适用性进行分析。以 V-ADCP 测流结果为基准真值,则视频测流结果的相对偏差计算公式为

$$\delta Q = \frac{Q_{\text{video}} - Q_{V-ADCP}}{Q_{V-ADCP}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: δQ 为相对偏差,%; Q_{video} 为视频测量流量值, m^3/s ; Q_{V-ADCP} 为 V-ADCP 测量流量值, m^3/s 。利用公式(6)计算视频测量流量的相对偏差 δQ ,并绘制其频率分布直方图(图 11)。对比分析表明,蔡家桥断面视频测量流量的相对偏差范围由校正前的 $-93\% \sim 380\%$ 缩小到校正后的 $-46\% \sim 23\%$,平均偏差从 25% 下降到 14%。通桥断面视频测量流量的相对偏差范围由校正前的 $-40\% \sim 193\%$ 缩小到校正后的 $-21.5\% \sim 15.2\%$,平均偏差从 15% 下降到 6%。相比而言,视频测流设备在通桥断面表现出更好的精度和适应性,但在蔡家桥断面的精度和适应性相对较低,需要进一步的校正和改进。

2.4 视频测流偏差差异原因分析

2.4.1 渠道断面形状影响 根据通桥断面与蔡家桥断面图(图 1)可知,通桥断面宽深比约为 10 (22 700 mm/2 350 mm),蔡家桥断面宽深比约为 7 (16 200 mm/2 350 mm)。由此判断,通桥断面相对宽浅,而蔡家桥断面相对窄深。就视频测量流量的相对偏差值而言,通桥断面为 6%,蔡家桥断面为 14%。可见,断面形状对视频测流精度与适应性有影响,其中,宽浅型断面表现较好。

2.4.2 水流流态影响 以弗劳德数(Fr)作为水流流态影响的量化指标,基于不同 Fr 下的测量偏差探讨水流流态对视频测流的影响。 Fr 的计算公式为

$$Fr = U / \sqrt{g \cdot h} \quad (7)$$

式中: U 为水流的特征流速,即过流断面上流体的平均流速, m/s ; g 为重力加速度, $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$; h 为水流深度,对于明渠一般指水深, m 。对断面视频测流水位相对偏差 δH ,以及断面视频测流流量相对偏差 δQ 随着弗劳德数 Fr 的变化进行对比分析,发现蔡家桥和通桥断面视频测流水位相对偏差 δH 的均值随着弗劳德数 Fr 的增大并未呈现明显的趋势性变

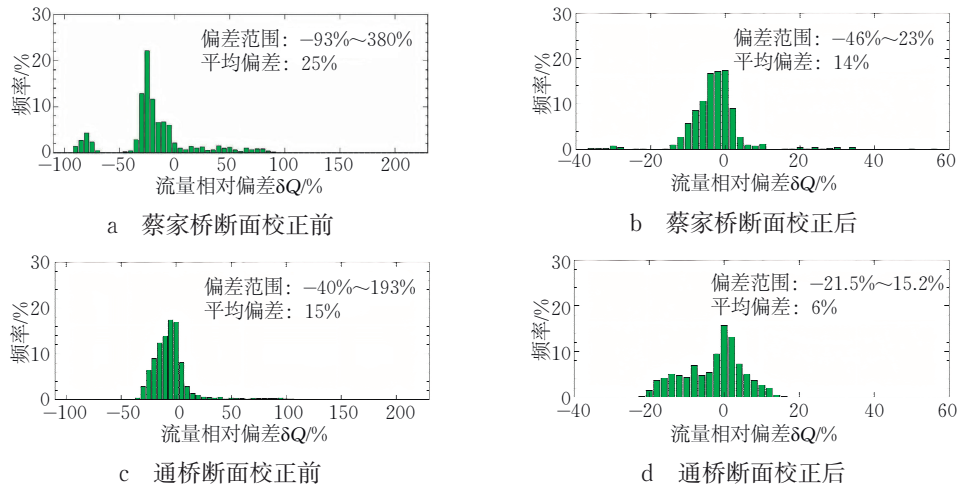


图 11 典型断面视频流量测量的相对偏差频率分布直方图

Fig.11 Histogram of relative deviation frequencies for video-based discharge at typical cross-sections

化;而断面视频测流流量相对偏差 δQ 随着弗劳德数 Fr 的增大略有下降趋势,在 $Fr=0.15\sim 0.16$ 时由正转负,之后基本维持水平。基于蔡家桥和通桥断面有限的流态范围,可以认为视频测流的结果随流态变化不明显,误差波动较小。

2.4.3 含沙量影响 根据青铜峡水文站 1969—2020 年泥沙含量监测资料,本研究统计了逐月平均含沙量数据变化。该站 6—10 月含沙量处于较高水平,平均值介于 $2.38\sim 12.17\text{ kg/m}^3$,其中,7—8 月含沙量尤为突出,峰值可达 40 kg/m^3 以上;其余月份的含沙量较低,均值不足 1.23 kg/m^3 ,且最大值亦未超出 6.09 kg/m^3 的阈值。汉延渠渠首距离青铜峡水文站约 30 km,其渠道的含沙量与青铜峡水文站含沙量相当。以蔡家桥断面监测资料为例,无论是含沙量较高的 6—8 月,还是含沙量较低的 4—5 月,水位与流量的相对偏差围绕均值上下波动,均未呈现对含沙量的显著依赖。由此推断,含沙量变化对视频测流技术不会产生系统的趋势性影响。

2.4.4 水面纹理及漂浮物影响 为进一步分析水面纹理及漂浮物对流量偏差的影响,以蔡家桥断面为例,根据 2021 年冬灌期(10 月 26 日至 11 月 20 日)V-ADCP 与视频测流的水位与流量时间序列变化过程,绘制水位与流量过程线对比图,结果见图 12。可知,用 2 种技术手段获取的水位数据具有高度一致性,未呈现显著差异;然而,流量测算值则表现出一定程度的离散性。基于此,分别提取流量绝对偏差最大的 50 组数据及偏差最小的 50 组数据,对其控制因素展开探讨。

将视频测量流量绝对偏差最大的 50 组数据(图

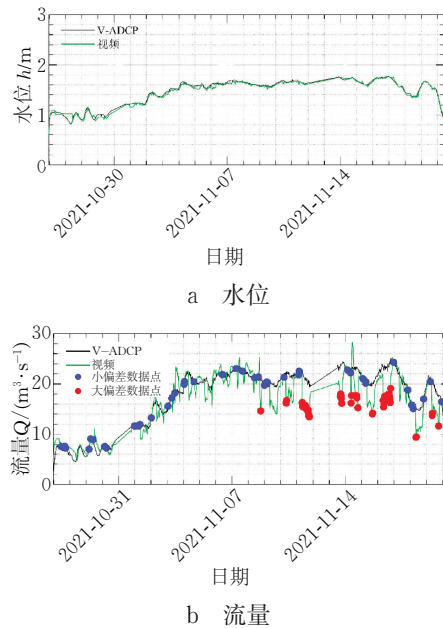


图 12 蔡家桥断面 2021 年冬灌期 V-ADCP 与视频测量结果的时间序列

Fig.12 Time series of V-ADCP and video-derived discharge at the Caijiqiao cross-section during the 2021 winter irrigation period

12b 中红色标记点)与对应时刻的视频测流原始图像进行对比分析,发现当水面缺乏漂浮物,仅有水面纹理,或水面漂浮物主要为气泡,或水面存在较大的树枝漂浮物等 3 种情形时,视频测流偏差较大。这可能主要是因为水面纹理受风速、水面波的影响,其流速变化具有较大的不稳定性,导致视频测流在对水面纹理的流速进行追踪计算时容易存在较大偏差。另外,由于气泡与水体的跟随性较差,以其流动速度表征水面流速存在固有偏差;而树枝等较大漂浮物与水体的跟随性欠佳,其运动速度与水面流速

存在差异,且树枝较大时通常伴随着旋转运动,造成不同部位的速度分布极不平衡、均匀,因此,视频测流呈现较大的偏差。

将视频测流流量绝对偏差最小的 50 组数据(图

12b 中蓝色标记点)与对应时刻的视频测流原始图像进行对比,发现当图像中具有丰富的水面纹理及漂浮物(图 13),且漂浮物一般为尺寸较小的树叶时,测流偏差较小。

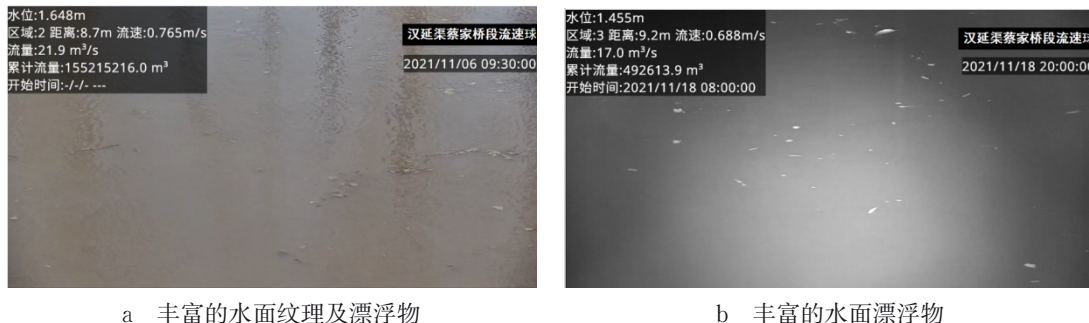


图 13 视频测流流量偏差较小时的典型图像

Fig.13 Typical image conditions under which video-based discharge exhibits minimal bias

同时,绘制蔡家桥断面 2025 年冬灌期(11 月 13 日至 11 月 25 日)V-ADCP 与视频测流的水位与流量时间序列变化过程,结果见图 14。可知,水面纹理及漂浮物的相关特征直接影响视频测流结果的

精度,当水面存在丰富的纹理和漂浮物时,视频测流的精度较高,而当水面缺乏漂浮物,仅有水面纹理,或水面漂浮物主要为气泡,或水面存在较大的树枝漂浮物等时,视频测流的精度相对较差。

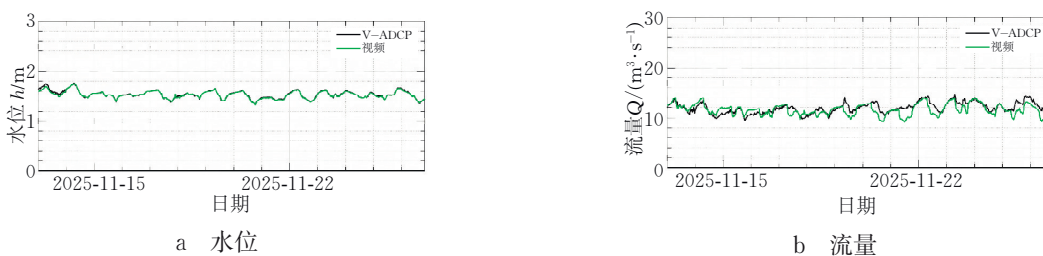


图 14 蔡家桥断面 2025 年冬灌期 V-ADCP 与视频测量结果的时间序列

Fig.14 Time series of V-ADCP and video-derived discharge at the Caijiaqiao cross-section during the 2025 winter irrigation period

2.4.5 水面流速算法分析 基于视频测流系统率定采集的数据,采用算法识别漂浮物速度以表征水体表面流速。以蔡家桥断面为例,选取预置位为区域 0 时的视频片段(图 15)进行流场分析,该场景中 A1 和 A2 区域可见清晰的漂浮物运动。

采用大尺度粒子图像测速算法 (large-scale particle image velocimetry, LSPIV), 选取 64 px × 64 px

计算窗口,获取漂浮物区域的流向速度 U_{LSPIV} ; 采用 FMV, 通过 Kaze 特征点算法提取并匹配漂浮物特征点, 获得漂浮物区域的流向速度 U_{FMV} 。基于经验值, 假定表面流速与垂线平均流速之比的转换系数 $\alpha_1=0.85$, 水面中点流向速度与水面平均流速之比的转换系数 $\alpha_2=0.827$ 。据此, 进一步推算出当前区域流速为水面最大流速时, 对应断面平均流速 $U_m = U \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2$ 。



图 15 连续帧融合图像示例

Fig.15 Examples of a fused image from temporal integration of consecutive video frames

不同区域的流向速度对比见表 1。由表 1 可知, LSPIV 与 FMV 2 种算法在各区域计算得到的流向速度分量基本一致。就漂浮物流速对应的断面平均流速而言, $U_{m,LSPIV} = 0.671$ m/s, $U_{m,FMV} = 0.716$ m/s, 与 V-ADCP 给出的断面流速值 0.695 m/s 相比, 误差在 $\pm 4\%$ 范围内。因此, 利用视频测流技术得到的表面流速能有效表征水体的表面流速。

表 1 不同区域的流向速度对比
Tab.1 Comparison of flow direction velocity
across different regions

示踪体	区域	LSPIV		FMV	
		U	U_m	U	U_m
漂浮物	A1S1	0.969	0.681	1.000	0.703
	A1S2	0.992	0.697	1.019	0.716
	A1S3	0.927	0.652	1.081	0.760
	A2	0.931	0.654	0.974	0.685

3 结论

选取宁夏引黄灌区汉延渠的蔡家桥与通桥 2 个典型断面为研究对象,通过与 V-ADCP(垂直声学多普勒流速剖面仪)同步测流数据对比分析,探讨了基于图像智能识别的精度和适用性。主要结论如下:

(1)相较于 V-ADCP 的测量值,蔡家桥断面的视频测流相对偏差为 14%,而通桥断面则为 6%。综合结果表明,视频测流在整体上具备一定的测量精度,且在通桥断面(宽浅型断面)的精度和适应性更好。

(2)水面纹理和漂浮物对视频测流精度和适应性具有显著影响。当水面上存在丰富的纹理和漂浮物(尤其是尺寸较小的树叶等)时,视频测流的精度较高;相反,当水面漂浮物稀少,仅表现为水面纹理,或水面漂浮物主要为气泡,或水面存在较大的树枝漂浮物时,视频测流的精度下降。因此,视频测流时宜优先选择纹理丰富,且漂浮物(主要为小树叶等)较多的渠道或断面。

视频测流受环境因素影响较大,难免出现偏差较大的数据组。为此,后续工作将进一步在视频测流的人工智能理论框架内开展系统性优化研究,并结合流场数据实施校正,降低偏差,提升视频测流的可靠性和适应性。

参考文献:

[1] 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.
[2] 常睿,马彦亮,文桂伏.一种超声波明渠方筒流量测量方法[J].现代农机,2020(2):28-30.
[3] 王怀博,徐利岗,刘学军,等.宁夏引黄灌区斗渠量测

水设备比测试验研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(6):250-255.

[4] 金文阳,祁瀛涛,蒋萍.宁夏引黄古灌区:时光之河灌溉千年传奇[EB/OL].(2024-06-27)[2025-09-03].
<https://www.nx.chinanews.com.cn/nxwx/2024-06-28/doc-ihcecrqq7465412.shtml>.
[5] 王晋锋,周涛.浅析农业灌区用水管理中量水技术的应用[J].农村实用科技信息,2012,212(8):71.
[6] 吴鹏飞,王猛.基于多断面水位-流量法的渠道流量测量技术[J].测控技术,2019,38(3):92-96.
[7] 郝树荣,任瑞英,郝树刚.灌区量水技术的发展与展望[J].人民黄河,2003,25(11):41-43.
[8] 姚章民.声学多普勒水流剖面仪在河流流量测量中的应用[J].人民珠江,2002,23(6):23-24.
[9] 田玉昆.声学多普勒测速在灌区渠道量水中的应用[J].河南水利与南水北调,2020,49(10):21-22.
[10] 杨聘,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.
[11] 王万良,邱虹,郑建炜.基于压缩感知图像分析的河流表面流速估计方法[J].水力发电学报,2018,37(5):69-79.
[12] Heitz D, Mémin E, Schnörr C. Variational fluid flow measurements from image sequences: Synopsis and perspectives[J]. Experiments in Fluids, 2010, 48(3): 369-393.
[13] Fujita I. Discharge measurements of snowmelt flood by space-time image velocimetry during the night using far-infrared camera[J]. Water, 2017, 9(4): 269.
[14] 赵浩源,陈华,刘维高,等.基于河流表面时空图像识别的测流方法[J].水资源研究,2020(1):1-11.
[15] Peña-Haro S, Carrel M, Lüthi B, et al. Robust image-based streamflow measurements for real-time continuous monitoring [J]. Frontiers in Water, 2021, 3: 766918.
[16] 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),2024,57(7):872-880.
[17] Li S, Liu H H, Wang S Y, et al. Study on flow distribution of irrigation canal system based on image velocimetry[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 195: 106828.
[18] Zhou Y H, Wu X J, Li Y M, et al. Algorithm for surface flow velocity measurement in trunk canal based on improved YOLOv8 and DeepSORT [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 148: 110344.