

· 航道及通航建筑物 ·



# 水流监测技术在长江上游危险滩 航道的应用研究\*

邓良爱<sup>1</sup>, 朱代臣<sup>2</sup>, 金健灵<sup>3</sup>

(1. 长江航道局, 湖北 武汉 430010; 2. 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147;  
3. 重庆交通大学, 重庆 400074)

**摘要:** 长江上游航道危险滩众多, 通航安全问题突出, 通航船舶对航道水流要素的监测与服务需求迫切, 但缺乏适宜监测技术的应用实践。选取多种水流监测技术进行适应性分析, 开展无人机雷达测流和无人机水面成像测流与传统测流方式进行现场比测试验, 并提出智能应用思路。结果表明: 无人机雷达测流方案可同步测量流速和水位, 流速精度高于96%, 水位误差在0.1 m以内, 测流精度较高, 适用于急滩水流要素监测; 无人机成像测流方案能够较好地反映平面流场, 更适用于不良流态险滩水流要素监测; 通过研发智能服务系统, 利用现场监测水流数据和数学模型计算数据融合应用, 可为船舶航运提供及时、准确和更全面的水流信息支持。

**关键词:** 长江上游航道; 急滩; 险滩; 水流要素; 监测技术; 智能服务

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0149-10

## Application of water flow monitoring technology in rapids and hazardous rapids of upper navigation channel in the Yangtze River

DENG Liang'ai<sup>1</sup>, ZHU Daichen<sup>2</sup>, JIN Jianling<sup>3</sup>

(1. Changjiang Waterway Bureau, Wuhan 430010, China;

2. Chongqing Shipping Engineering Survey and Design Institute of the Yangtze River, Chongqing 401147, China;

3. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The upper reaches of the Yangtze River feature numerous rapids and hazardous rapids, where navigable safety poses significant challenges. There is an urgent demand for monitoring hydraulic parameters and providing services to vessels navigating these channels, but there is a lack of practical application of suitable monitoring technologies. We analyze multiple flow monitoring technologies and their adaptability, conducting field comparison tests between unmanned aerial vehicle(UAV) radar-based flow measurement and UAV surface imaging velocimetry. Then we propose a framework for intelligent application. The results demonstrate that the UAV radar-based method can simultaneously measure flow velocity and water level with high accuracy, velocity measurements achieve over 96% precision, and water level errors are within 0.1 m, making it suitable for monitoring hydraulic parameters in rapids. The UAV imaging velocimetry method effectively captures planar flow fields, proving more applicable for monitoring complex flow patterns in hazardous rapids. By developing an intelligent service system and applying the integrated use of on-site water flow monitoring data and mathematical model calculations, timely, accurate, and more comprehensive water flow information support can be provided for shipping.

**Keywords:** upper channel of the Yangtze River; rapids; hazardous rapids; hydraulic parameter; monitoring technology; intelligent service

收稿日期: 2025-08-07 录用日期: 2025-09-16

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3212500); 长江航道局重点科技项目(2024030007)

作者简介: 邓良爱(1974—), 女, 硕士, 正高级工程师, 从事航道养护与整治技术研究工作。

长江上游航道是中国重要的水运通道，航道尺度和水流条件是船舶安全通航的基础，但因地形复杂、水流湍急，存在众多危险滩段，给航运安全带来了极大挑战。目前，航道尺度(包括航道水深、宽度及弯曲半径)的测量及信息发布技术应用已很成熟<sup>[1]</sup>，水面比降、流速、流向、流态及波浪<sup>[2]</sup>等水流条件测量还主要采用比降水尺、浮标法等传统监测方法，这些方法存在效率低、难以实时采集、智能服务水平不高等问题。利用多功能航标监测水流虽在长江中下游平原河流进行过试验性应用，但也只能对局部水流进行监测，是否适用上游危险滩需要进一步分析。2023年11月交通运输部印发的《关于加快智慧港口和智慧航道建设的意见》<sup>[3]</sup>提出，到2027年，长江干线航道基本建成智能感知网，全面提升内河高等级航道公共服务智慧化水平。故研究一套适用于长江上游危险河段高效、准确、智能的水流要素监测与服务技术，对于提高船舶航行安全性、减少事故发生具有重要现实意义。

### 1 长江上游危险滩水流特点及监测要素的确定

#### 1.1 长江上游危险滩水流特点

长江上游属于山区河流，坡陡流急、流态差，滩险多<sup>[4]</sup>，经统计，长江上游有急滩11处、险滩8处、危险滩18处。急滩主要是因为过流面积不足而流速大、比降陡，见图1。峡谷或窄深型河段大都属于洪水急滩，如铜锣峡、黄草峡、大渡口等。险滩主要是由于石梁、突嘴等不规则礁石河床引起的滑梁水、泡漩水等不良流态碍航，见图2，如过兵滩、虾子梁、大箭滩等。而大部分属于危险滩，如枯水急滩往往伴有横流、乱水，比较典型的有筲箕背、落锅滩、叉鱼碛等；中洪水急滩往往伴有泡水、漩水、剪刀水等不良流态，如小米滩、瓦窑滩、外梁等。

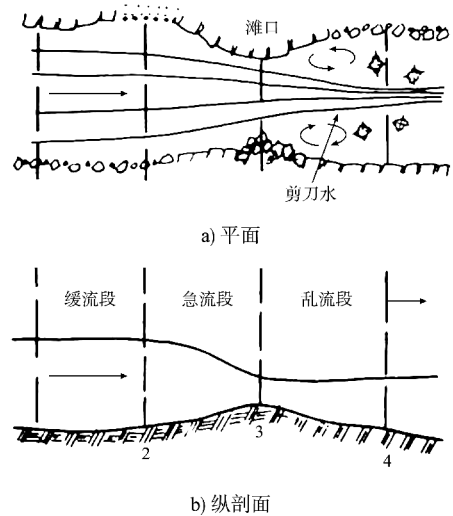


图1 典型急流滩水流特征

Fig. 1 Flow characteristics in typical rapids



图2 险滩水流特征

Fig. 2 Flow characteristics in hazardous rapids

长江上游航区划分以C级航区J2航段<sup>[5]</sup>为主，这些航段水流条件总体较差，滩上流速超过3.5 m/s，局部最大超过5 m/s。危险滩引起的通航安全隐患十分突出，每年都有因水流条件恶劣引起船舶搁浅、触礁或翻沉等海损事故。

#### 1.2 水流监测要素

影响船舶通航的滩险有浅滩、急滩和险滩三大类。浅滩主要问题是航道尺度不足；急滩是指天然河流中水流急、比降陡，标准船舶(队)自航上滩困难的区段，上行船舶需要寻找缓流航路或通过助托上滩，下行船舶操纵困难，安全隐患大；险滩突出问题是水流呈现泡水、漩水、滑梁水、扫湾水等不良流态，船舶航行或航道部门设置航标需要避开此类位置或加强安全操作。急滩的水流条件主要通过表面流速和水面比降反映，其中比降可通过流场中两个测点的水位差和距离计算

出来;险滩的不良流态主要通过表面流速大小和方向综合反映。因此,为了给船舶安全航行和航道养护部门布设航标提供参考,危险滩水流主要监测该河段的水位、流速、流向3个要素即可。

## 2 水流监测技术适应性分析

### 2.1 监测条件

长江上游危险滩的水流环境复杂,流速大、流向多变,洪水期漂浮物多。另外,长江上游山区河道宽窄相间,地形变化复杂,两岸植被丰茂,或者崖壁陡峭,交通和基础设施条件差。人工携带监测设备经陆路进入现场存在诸多困难甚至不可行,通过水路进入现场监测可行,但是需要动用船舶交通工具,实施监测不够机动灵活。监测环境对水流监测技术的适应性提出了极高要求。

### 2.2 监测技术适应性

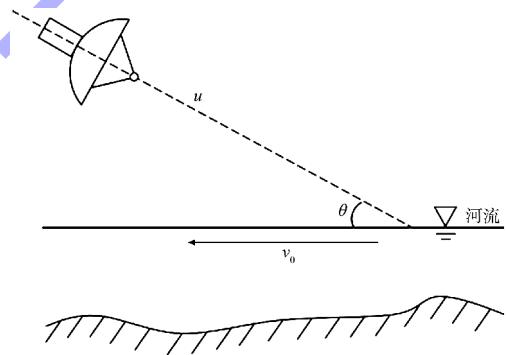
现有水流监测方式按照监测设备与监测水体是否接触分为接触式和非接触式两种。接触式监测技术主要包括转子式流速仪测流、声学多普勒流速剖面仪(acoustic Doppler current profiler, ADCP)测流、浮标流向法测流速;非接触式监测技术主要有雷达测流及水面成像测流。

#### 2.2.1 ADCP 测流

ADCP是一种基于声学多普勒频移原理测量水流速度剖面的仪器。与传统的机械式或电磁式流速仪不同,ADCP采用水体内部遥测技术,其流速测量点并不位于仪器本身所在的位置,而是测量其周围一定范围内多个点的流速,适用于定点测量或走航式测量流速的场景。目前长江航道中下游试验性应用中,多以浮标船为载体,安装ADCP作为流速流向传感器,配上数据采集、存储控制器,通过航标遥测遥控终端进行无线传输。融入水位、水质、含沙量等多种监测设备,即组成一套基于浮标船的航道水文多要素监测终端<sup>[6]</sup>。这种测流技术和方式是定点测量水深方向的流速流向,结合水位监测设备,可实现流速和水位同步测量,具有实时性和测量精度高的优点,但由于长期接触水体,设备易受水环境影响,运行不稳定,以及测点分散、稀少,从而数据应用价值有限。

#### 2.2.2 雷达波测流

雷达波流速仪与ADCP类似,也是一种利用多普勒原理的测速仪器,即根据回波频率的改变对目标物体的速度进行计算。区别在于ADCP是利用超声波在水中的传播特性测速,其频率范围一般在数万至数十万赫兹,且由于超声波在空气中传播时衰减很快,故不能应用于较远距离的测量。而雷达流速仪使用电磁波,频率高达10 GHz以上,可以很好地在空气中传播,衰减较小。因此使用雷达流速仪监测流速时,仪器不必接触水体,即可远距离测得水面流速,属非接触式监测,见图3。雷达测流设备可实现流速和水位同步测量,见图4,其优势是不受测验河道的漂浮物和水环境等影响,且适合实现水文测验自动化,提高水文资料的时效性和可靠性,目前在一些有固定安装或缆道式安装条件的中小河流或沟渠水文测验中应用较多<sup>[7-8]</sup>,在长江中游枝江河段开展过固定安装式的河面流场雷达监测研究试验<sup>[9]</sup>。



注:  $u$  为雷达波速;  $\theta$  为雷达波速与水水平的夹角;  $v_0$  为流速。

图3 雷达测流速

Fig. 3 Radar-based velocity measurement

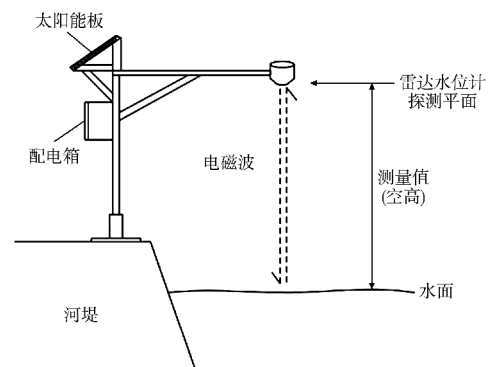


图4 雷达测水位工作原理

Fig. 4 Operational principle of radar water level gauging

### 2.2.3 水面成像测流

水面成像测流技术是通过无人机搭载或固定机位高频高分辨率相机连续获取目标水域水面监测图像数据,然后通过图像处理,采用特征点跟踪测速的粒子图像测速法 (particle image velocimetry, PIV) 和全动态视频 (full motion video, FMV) 速度场耦合算法,计算得到水面速度场<sup>[10-11]</sup>。室内试验多通过布撒人工示踪粒子,增强速度场的辨识度。天然河道水面漂浮物、浪花等与周围水体的颜色梯度较大,是良好的天然示踪物。长江上游山区河道尤其是急险滩,具有天然的示踪物,光照条件适宜的情况下,水面成像测流效果较好,测流成果包括能够反映流速大小和方向的水面二维流场,反映斜流、回流等不良流态。因此这个技术在长江上游不良流态险滩河段应用具有明显优势。其不足之处在于测流效果受天气影响,以及目前图像处理需要人工介入。

综上所述,对长江上游急险滩采用人工测流,工作量大、安全风险高,不适合推广应用。需要测量处正是流速大、流态差的位置,接触式测量方式,如浮标船搭载 ADCP 测流,因浮标设置安全风险高且不稳定而难以施测,即便在相对安全处施测,因测点有限,数据应用价值也不高。因此人工测流方式与接触式测流方式均不适合长江上游急险滩应用。非接触式的雷达波测流和水面成像测流技术则有效避免了人工施测安全风险,测量覆盖面广、自动化程度高,既能满足监测内容要求,又大幅提升了数据采集的效率。

## 3 无人机搭载雷达测流和水面成像测流试验

为进一步验证非接触式雷达波测流和水面成像测流技术在长江上游急险滩水流要素监测的适应性与可靠性,故开展现场试验,并与传统的浮标法测表面流速流向成果进行对比评估。

近几年无人机技术飞速发展,可选择稳定性、

安全性、便携性和定位精度、配重等方面均可满足要求的无人机作为监测设备搭载平台。通过研发对应的水流要素监测任务分配云平台,可实现水流要素的智能监测。

### 3.1 雷达测流试验

#### 3.1.1 试验条件

试验地点:长江上游铜鼓滩水道油榨碛滩段;测流时间:2024年10月14日下午;测时水位:滩段内油榨碛自动水位站(右岸)水位为航基面上3.36~3.52 m,测验期间天气晴朗,水位基本稳定。

#### 3.1.2 试验设备和方式

雷达测流设备与测流方式:设备包括大疆 Matrice350RTK 无人机、三合一雷达测流仪(流速、水位和视频三位一体)。在重点水域垂直主流流向布置多个断面,见图5,每个断面确定多个测点。通过无人机操控系统规划好由测流断面组成的航线,输入测点坐标,无人机挂载测流仪,沿规划航线先后采集各个测点的表明流速大小和水位数据。无人机飞至某测点上方后下降至设定高度(40 m 以内)悬停,约 30 s 完成一个测点的数据采集,然后飞往下一个测点。



图5 油榨碛滩段雷达测流断面布置  
Fig. 5 Layout of radar hydrometric survey cross-section at Youzhaqi section

浮标法比测设备与测流方式:设备包括浮筒、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)接收机、航道维护交通船。测量前先进行GNSS初始化,然后再将该河段的七参数

输入手簿, 在已知点上进行比较并满足要求后, 将仪器设置为根据时间间隔自动定位记录的模式, 定位时距为 5 s。GNSS 设置完成后放入浮筒内做好防水处理, 在测区上游抛投入水, 顺水流出测区后收回浮筒。现场测流工作结束后, 导出数据计算连续记录点间的流速, 定位点连线即流向线。采用浮标法测流方式测得左、中、右 3 条流速流向线。浮标法测流施测时间与无人机雷达测流时间基本同步。

### 3.1.3 试验结果分析

采用多普勒雷达测流技术测得油炸碛滩段 8 个断面, 平均间距约 100 m, 每个断面上基本均匀分布 5 个测点的表面流速和水位。采用浮标法技

术在油炸碛滩段测得左、中、右 3 条流速流向线。

1) 流速大小和断面分布对比。将浮标法流速流向线与雷达测流各断面测点流速放在同一个河势图上, 见图 6。从平面上来看, 测点位置基本一致(位置偏差在 5 m 以内)的测点, 两种方法采集的流速数据吻合较好, 流速大小 2.4~3.7 m/s, 误差小于 0.15 m/s, 相较于浮标法测流结果, 精度高于 96%。

两种测流结果的断面流速分布对比见图 7, 通过分析得出: ①两种测流结果均表现出河心流速大, 靠近两岸侧流速略小, 分布规律一致, 符合断面流速分布一般规律; ②同一测点或邻近测点流速大小有高有低, 差值较小。

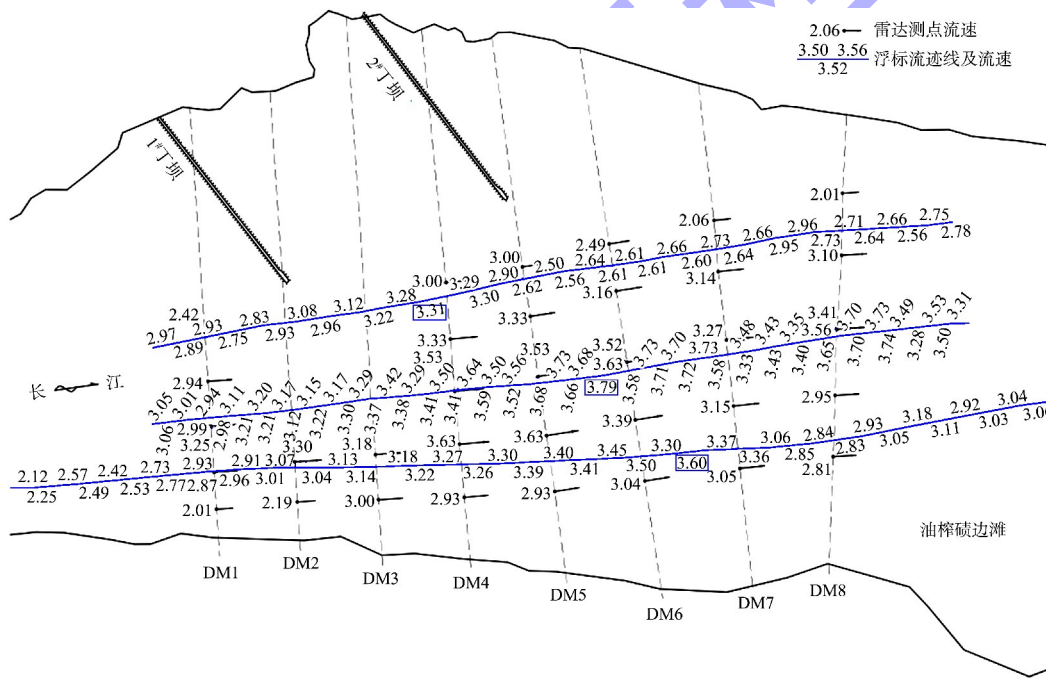
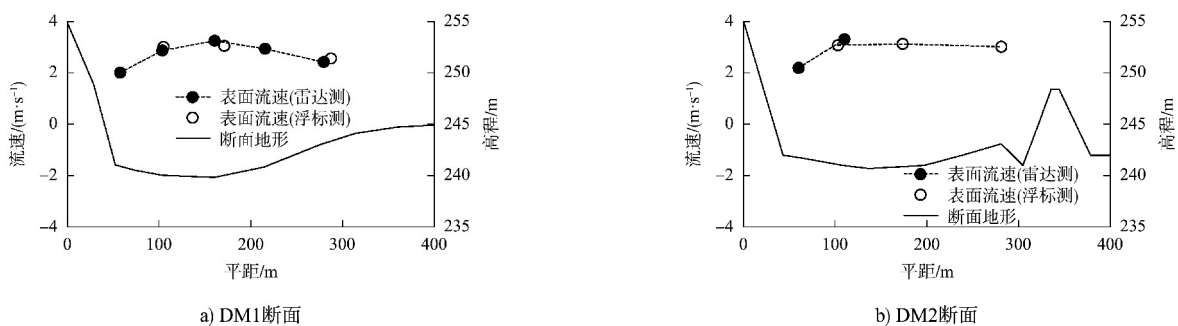
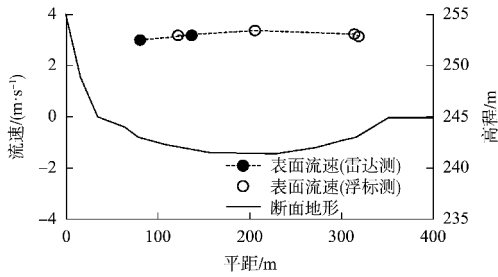


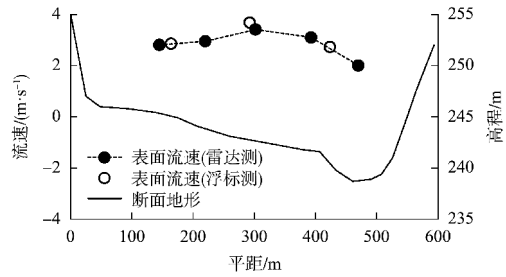
图 6 油炸碛表面流速/流向测验结果对比(单位:m/s)

Fig. 6 Comparison of surface flow velocity/direction survey results at Youzhaqi (unit:m/s)

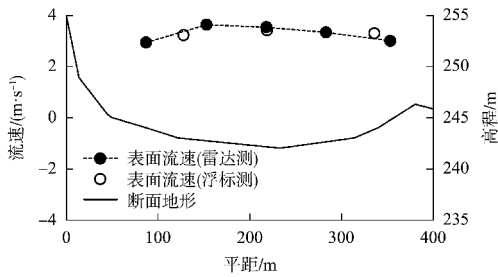




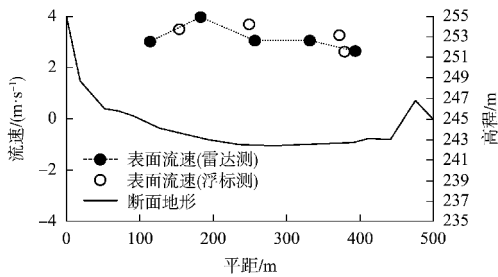
c) DM3断面



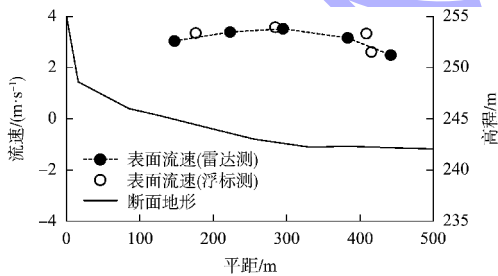
h) DM8断面



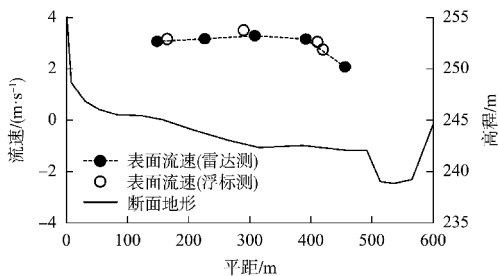
d) DM4断面



e) DM5断面



f) DM6断面



g) DM7断面

图7 油榨碛各断面测点表面流速对比  
Fig.7 Surface velocity comparison at survey points across sections of Youzhaqi

2) 水位与比降对比。在油榨碛监测了8个断面,共34个有效测点的水位。油榨碛自动水位站位于DM2断面右岸,可作为监测水位的比测站。DM2断面靠近右岸的1号测点雷达监测水位为250.20 m(2024-10-14T15:51:29),此时油炸碛水位站的水位为250.25 m(2024-10-14T15:50:00),水位差值0.05 m。考虑船行波影响、测点位置、监测时间非完全一致等外部因素影响,水位差在合理范围之内。

断面平均、1号测点、2号测点沿程水位连线见图8。结合河道地形分析得出沿程水位变化:①上半段水位均沿程下降,下半段水位波动,河心偏右1、2号测点沿程甚至有倒比降,这与右岸侧油炸碛边滩壅水挑流影响相符;②局部水位变幅较大,如断面3、4之间水位降幅较大,原因在于左侧油榨碛丁坝的存在,测时水位刚好坝上1 m左右,在丁坝束流作用下形成跌水。

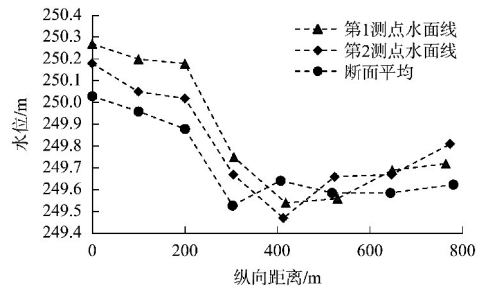


图8 雷达测油榨碛沿程水位  
Fig.8 Longitudinal water level profile of Youzhaqi by rada

基于测点水位和间距计算并绘出沿程比降线见图9。经分析得出:1)断面间平均比降0.0‰~3.4‰,大比降主要出现在油榨碛1#丁坝下游DM3与DM4断面之间,即丁坝束水后的跌水段;2)下段在油榨碛边滩束水作用下水流平缓,局部存在负比降。以上比降特征与监测河段的地形条件吻合,说明无人机雷达水位监测结果合理可信。

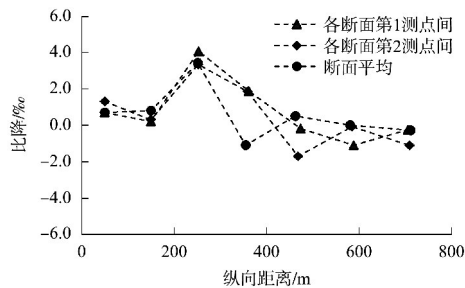


图9 雷达测油榨碛沿程比降  
Fig. 9 Longitudinal gradient profile of Youzhaqi riffle by radar survey

从无人机雷达测流现场比测试验结果分析看,无人机雷达测流方法可同时测得滩上流速和水位,结果均合理可信,准确度较高,因此可以作为急滩水流要素监测所用。

### 3.2 水面成像测流试验

#### 3.2.1 试验条件

试验地点:长江上游龙门水道甄柄碛滩段弯道;测流时间:2024年10月29日下午;测时水位:滩段内郑家梁水位站水位为航基面上2.0m,测验期间天气晴朗,水位基本稳定。

#### 3.2.2 试验设备和方式

摄影测流设备:大疆Zenmuse X5S数码相机,大疆M210 RTK无人机。

摄影测流方式与后处理:将测流重点水域划分为多个测区,每个测区内采集数据3次,单次拍摄时间3min,各测次间隔2min,共获取33组数据,共11.88万帧图像。根据河段宽度和流速测量分辨率要求,试验设定飞行高度为80m。根据当地河道形态,设置与沿河道流向平行的测线,弯道下游水域放宽,则增加一条测线,旨在摄影图像完整覆盖航道范围。

浮标法比测设备与测流方式与雷达测流比测

试验时相同,施测时间与无人机摄影测流时间基本同步。

#### 3.2.3 试验结果分析

水面成像测流结果是水面二维流速场,具有流速大小和方向,因此试验结果从流速大小和流速方向两方面进行对比分析。

1) 流速大小对比。为保证数据量的丰富,选取两条贯穿主流及回流区的较长测线进行流速值结果验证。两种方法在测线A与测线B沿程流速值大小的对比见图10。

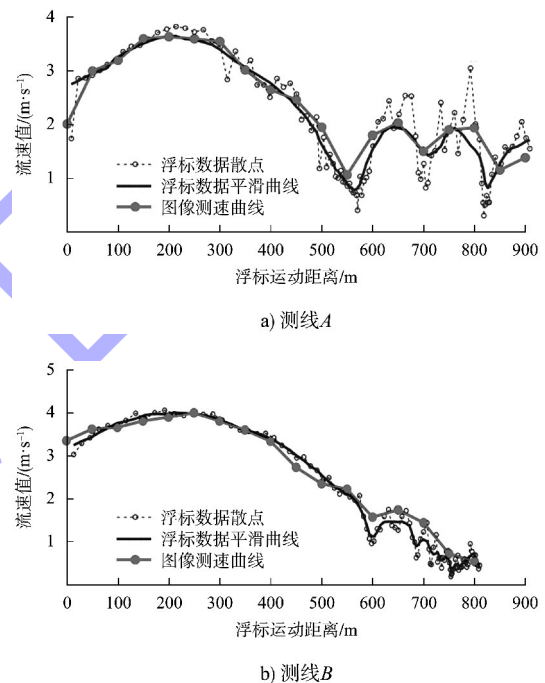


图10 无人机图像测速与浮标测速结果对比  
Fig. 10 Velocity measurement comparison between UAV image velocimetry and buoy method

因浮标法测流获取的数据为瞬时散点数据,数值波动较大,为便于比较,此处采用移动平滑处理,平滑窗口为5~10个采样点。通过对比浮标法瞬时速度平滑曲线与图像测流法时均速度曲线,两种方法在水流稳定区域的流速数据吻合较好,流速为3~4m/s时,误差小于0.1m/s,相较于浮标法单次瞬时值结果,精度高于96%。在甄柄碛弯道礁石处,由于水流紊乱,浮标法测得的瞬时流速波动较大,与时均值差异较为明显,最大差异达到1m/s。但经过对浮标波动数据的平滑拟合后,两者趋势基本一致,数值大小基本吻合,在

流速为 2 m/s 区间段时, 误差为 0.2~0.3 m/s, 相较于浮标法单次瞬时值结果, 精度高于 85%。能够反映出测线沿程流速大小的变化特点。

2) 流向结果对比。浮标法测得流速流向线与无人机图像测流处理后的二维流场重叠见图 11,

图中虚线部分为浮标法测得流向, 矢量箭头为无人机图像测流结果, 对比可见, 两种测流方法在水流流向上的结果基本一致, 均能够反映航道内的主流方向, 并良好地反映出斜流、回流区的水流形态。

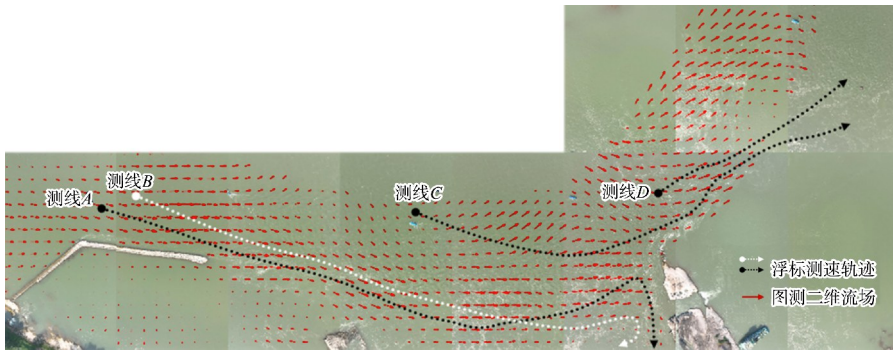


图 11 无人机图像测流与浮标法测流的甄柄碛流向对比

Fig. 11 Flow direction comparison at Zhenbingqi between UAV image velocimetry and buoy method

#### 4 长江上游危险滩水流要素监测方案推荐

针对长江上游危险滩水流要素监测需求, 对以上几种水流监测技术进行适应性分析和现场试验评估, 见表 1。

经综合考虑认为: 1) 无人机搭载多普勒雷达测流方案, 满足急流滩段的流速大小和比降同步监测需要, 主要适用于急流滩段水流监测; 2) 无

人机搭载高清高分相机水面成像测流方案, 满足复杂平面二维流场监测的需要, 主要适用于流态差的险滩河段水流监测; 3) 对于危险滩, 急流和不良流态同时存在, 船舶单位和航道部门相对更关注急流要素, 可以优先考虑无人机搭载雷达测流方案, 具备条件时采用两种方案互为补充。

表 1 危险滩水流要素监测方案评价

Tab. 1 Assessment for monitoring schemes of flow parameters in rapids and hazardous rapids

评价项目	方案 1: 无人机搭载雷达测流	方案 2: 无人机搭载水面成像测流	结论
监测内容	表面点流速大小、水位	表面流速大小与方向	方案 1 满足急滩监测, 方案 2 满足险滩监测, 急险滩优先采用方案 1
监测范围	一个架次可测 3~5 个断面, 一个断面上多个测点	一个架次可拍约 500 m×500 m 的水面	方案 1 可监测范围更宽, 对流场的反映更精细
设备稳定性	断面、测点、航线、数据采集模式预设好后可稳定运行	地面参照物、面域中心和航线选定及设定好, 数据采集模式预设好后, 可稳定运行	两种方案均能稳定运行
环境适应性	可承受风速 12 m/s (7 级风), 工作温度 -20~50 ℃, 可在小雨、中雨等恶劣气候条件下测流	抗 6 级强风 (10.8~13.8 m/s), 工作温度 -20~50 ℃, 白天阳光斜射时成像效果最佳	两种方案施测时均需要天气满足无人机安全作业的要求, 且方案 2 还需要适宜的光照条件
测验工作量	设备安装、设定好, 并联网运行以后, 可周期性自动监测与数据对接	目前需要飞手现场安装设备、选定地面参照物后进行图像采集, 后期处理计算需要人工介入	目前方案 1 后期处理工作量略大
测验精度	受飞行平台悬停定位精度、系统误差、测流环境影响, 试验水位误差 0.05 m, 流速误差 0.15 m/s	除悬停精度、系统误差以外, 测速精度还与光照条件、水面示踪物和特征点的数量等有关, 试验流速误差 0.3 m/s	影响方案 2 精度因素更多, 测流精度较方案 1 低
实时性	设备联网运行后可以实时反馈监测数据	需要一定的后期处理时间, 数据反馈延迟	方案 1 反馈更及时
建设成本	无人机飞行平台+雷达测流仪	无人机飞行平台+高频高分相机	目前方案 1 设备成本较方案 2 高
可维护性	设备可配合无人机场库固定安装, 自动周期性出航监测, 或工作人员定期巡航时监测, 设备维护难度低	设备可配合无人机场库固定安装, 自动周期性出航监测, 或工作人员定期巡航时监测, 设备维护难度低	方案 1、2 可维护性良好

### 5 水流监测数据与计算数据融合应用思路

无人机搭载雷达测流或搭载高频高分相机水面成像测流技术能实现长江上游急险滩水流数据快速自动采集的目标, 有较好的应用前景, 但由于其测流成本相对较高, 且无人机作业受气候、

空域管控等限制, 测量频次有限, 单纯依赖水流监测数据难以满足实时更新的要求。为了实时反映急险滩水流变化情况, 更好服务航运, 针对此问题, 可采取水流监测数据与计算数据融合的应用思路, 见图 12。

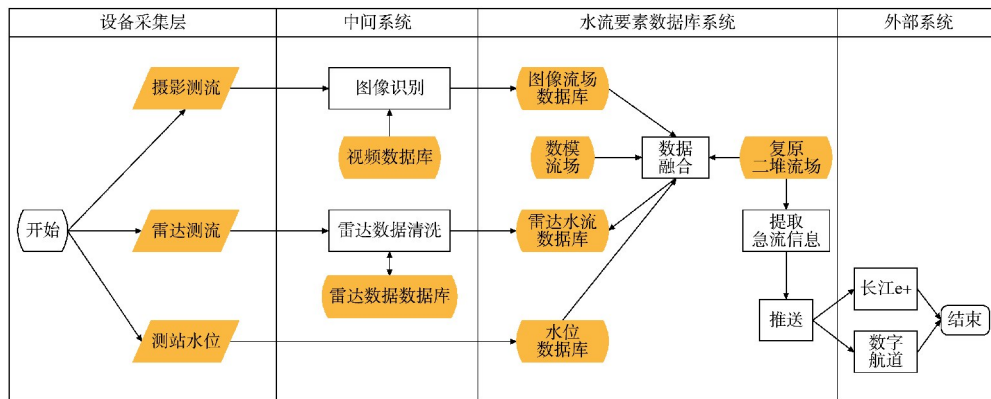


图 12 监测与模型数据融合应用流程

Fig. 12 Flowchart of monitoring and model data fusion application

运用数值模拟技术, 计算急险滩河段全年洪中枯多级流量条件相应的平面二维流场, 转换为表面流场(有条件时直接通过三维数值模拟计算表面流场), 建立一段时间内的表面流场数据库。依据滩段内或邻近水位站实时监测水位, 实时调用数据库中相应流场, 与水流监测数据进行匹配与融合计算, 复原实时流场, 并提取急流区或不良流态水域要素信息; 同时, 流场数据库随着水流监测数据的丰富不断被优化, 流场真实性不断提高。长江上游急险滩水流要素信息, 一方面可通过长江 e+ 服务平台对外发布, 服务于过往船舶; 另一方面, 可通过长江数字航道管理平台, 辅助航标配布与调整决策。

### 6 结论

1) 无人机搭载多普勒雷达测流仪测流方案, 试验流速大于 2 m/s, 流速误差 0.15 m/s, 精度高于 96%, 水位误差 0.1 m。无人机搭载高频高分相机测流方案, 试验流速大于 2 m/s 时, 流速误差 0.2~0.3 m/s, 精度高于 85%, 流速越大精度越高。两种测流方案的测流精度均能满足急险滩河段水流要素服务于船舶通航和航道养护生产的

需要。

2) 无人机雷达测流方案可同步测量流速和水位, 且测流精度较高, 适用于需要同步测量流速和比降的急滩水流要素监测; 无人机水面成像测流方案能够较好地反映平面流场, 更适用于不良流态险滩水流要素监测。

3) 水流监测数据与计算数据的融合应用, 可实时反映急险滩水流变化情况, 相关信息既可服务过往船舶, 也可辅助航标配步与调整决策。

### 参考文献:

[1] 刘怀汉, 张圣丽, 沈思, 等. 长江干线数字航道建设进展及展望[J]. 水道港口, 2025, 46(2): 165-170.  
LIU H H, ZHANG S L, SHEN S, et al. Effect and application of Yangtze River digital channel construction[J]. Journal of waterway and harbor, 2025, 46(2): 165-170.

[2] 航道工程基本术语标准: JTS/T 103-2—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.  
Basic terminology standards for waterway engineering: JTS/T 103-2-2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.

[3] 交通运输部. 关于加快智慧港口和智慧航道建设的意

见: 交水发[2023]164号[EB/OL]. (2023-11-24)[2025-05-15]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content\\_6918874.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content_6918874.htm).

Ministry of Transport. Guidelines on accelerating the construction of smart ports and smart waterways: Jiaoshuifa [2023]No. 164[EB/OL]. (2023-11-24)[2025-05-15]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content\\_6918874.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content_6918874.htm).

[4] 长江重庆航运工程勘察设计院. 长江干线宜宾—重庆河段生态航道建设方案研究报告[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2018.

Chongqing Shipping Engineering Survey and Design Institute of the Yangtze River. Research report on ecological waterway construction scheme for Yibin – Chongqing section of the Yangtze River trunk line[R]. Chongqing: Chongqing Shipping Engineering Survey and Design Institute of the Yangtze River, 2018.

[5] 中华人民共和国海事局. 航区划分规则 2021[R]. 北京: 中华人民共和国海事局, 2021.

Maritime Safety Administration of the People's Republic of China. Rules for Navigation Zone Classification 2021[R]. Beijing: Maritime Safety Administration of the People's Republic of China, 2021.

[6] 朱紫薇, 陆雨晨, 肖翔, 等. 基于浮标船的航道水文要素监测系统布设方案研究[J]. 中国水运, 2022, 22(10): 38-39.

ZHU Z W, LU Y C, XIAO X, et al. Deployment Strategy of hydrological monitoring system based on buoy vessels for waterways[J]. China water transport, 2022, 22(10): 38-39.

[7] 雷鸣, 姜满川. 雷达波流速仪在拓石水文站水文测验中的比测及应用分析[J]. 地下水, 2023, 45(5): 233-235.

LEI M, JIANG M C. Comparative testing and application analysis of radar wave current meter in hydrological survey at Tuoshi hydrological station [J]. Underground water, 2023, 45(5): 233-235.

[8] 黄剑, 刘铁林, 王贞荣, 等. 非接触式雷达测流系统在吉安地区中小河流的应用研究[J]. 珠江水运, 2018(18): 53-54.

HUANG J, LIU T L, WANG Z M, et al. Application of non-contact radar flow measurement system in medium-small rivers of Ji'an Region [J]. Pearl River water transport, 2018(18): 53-54.

[9] 张楚. 阵列式雷达河面流场监测系统研究[J]. 水运工程, 2025(6): 167-176.

ZHANG C. Arrayed radar river surface flow field monitoring system [J]. Port & waterway engineering, 2025(6): 167-176.

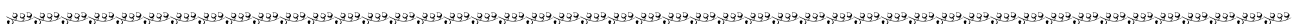
[10] 黄河, 邓山. 视觉测流技术在中小河流洪水流量监测中的应用研究[J]. 长江技术经济, 2023, 7(4): 112-117.

HUANG H, DENG S. Application of visual flow measurement technology in flood discharge monitoring of small and medium rivers [J]. Technology and economy of Changjiang, 2023, 7(4): 112-117.

[11] 金健灵. 长江上游铜锣峡河段泡漩结构监测技术研究及应用[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020: 20-39.

JIN J L. Development and application of the monitoring technology of the bubbling structure in Tongluoxia Reach of the upper reaches of the Yangtze River [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020: 20-39.

( 本文编辑 王璵 )



### 著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司等以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部