

Application of UAV-Based Radar Wave Flow Measurement through Comparative Analysis A Case Study of Xianfeng Hydrological Station

Zhenfei Hu Jun Lan Chengde Zhan Gang Kuang Cuiyin Wang

Xiuhe River Hydrological and Water Resources Monitoring Center, Jiujiang, Jiangxi, 332000, China

Abstract

To address the challenges of low efficiency and poor safety associated with traditional flow measurement methods at Xianfeng Hydrological Station, which is influenced by upstream reservoir regulation, a synchronous comparative experiment was conducted using a DJI M300 UAV equipped with an HP3102 radar wave flow measurement system and an LS25-1 propeller current meter. Through 16 sets of comparative data analysis under varying water levels, the optimal flight altitude (10–15 m), velocity measurement duration (30–60 s), and surface velocity coefficient (0.93) for the UAV were determined. The results show a systematic error of 0.89% and a random uncertainty of 6.0%, meeting the requirements for Class II stations specified in the Hydrological Data Compilation Specifications 1112. The study concludes that UAV-based flow measurement is suitable for scenarios with water levels ≥ 95.50 m (flow velocity ≥ 0.75 m/s), providing a technical reference for flow monitoring under complex hydrological conditions.

Keywords

Unmanned Aerial Vehicle (UAV); radar wave flow measurement; surface velocity coefficient; analysis and application

基于无人机雷达波测流比测及分析应用 —— 以先锋水文站为例

胡振飞 兰俊 占承德 匡刚 王翠银

修河水文水资源监测中心, 中国·江西九江 332000

摘要

本研究针对受上游水库调蓄影响的先锋水文站传统测流方法效率低、安全性差的问题, 采用大疆M300无人机搭载HP3102雷达波测流系统与LS25-1转子式流速仪进行同步比测实验。通过16次不同水位的比测数据分析, 确定了无人机最佳飞行高度(10-15m)、测速历时(30-60s)及水面流速系数(0.93)。结果表明: 系统误差为0.89%, 随机不确定度6.0%, 满足《水文资料整编规范》二类站要求。研究提出无人机测流适用于水位 ≥ 95.50 m(流速 ≥ 0.75 m/s)的工况, 为复杂水文条件下的流量监测提供了技术参考。

关键词

无人机; 雷达波测流; 水面系数; 分析应用

1 引言

先锋水文站作为修水水系重要监测点, 长期受上游龙潭峡电站蓄泄影响, 传统流速仪法存在测验效率低、高洪期安全隐患大等问题。近年来, 无人机雷达波测流技术在水文监测领域快速发展, 国内外学者针对其应用潜力开展了系列研究。姚代顺等^[1]通过双轨移动式雷达波系统比测试验, 验证了雷达波测速的可靠性; 杨俊等^[2]研发了无人机测流关键技术, 实现了复杂地形条件下的快速响应; 陈晨等^[3]

在北方河流的应用表明, 该技术可提升低流速区测验效率达40%。然而, 现有研究多聚焦于平原河流或稳定断面条件, 针对受水库调蓄影响的变动河床环境适应性研究尚存不足, 尤其在测流参数优化与系统误差修正方面缺乏定量分析。本研究通过系统比测实验, 验证该技术在复杂水文条件下的适用性, 为推广提供科学依据。

2 研究流域内基本概况

2.1 流域特征

先锋站位于武宁水流域, 该流域位于江西省西北部, 涉及铜鼓、修水两县。流域呈三角形, 整个流域处山岳丘陵地带, 植被状况良好。武宁水是修水上游右岸一级支流,

【作者简介】胡振飞(1976-), 男, 中国浙江奉化人, 本科, 工程师, 从事水文监测研究。

主河长 130 千米，主河道纵比降 1.60‰，流域面积 1735 平方千米，流域内面积 100 平方千米以上的一级支流 3 条。流域地处中亚热带湿润季风气候区，气候温和，雨量充沛。流域洪水由暴雨形成，每年 4 ~ 7 月为暴雨集中期，常出现静止锋型、历时长、笼罩面广的降水过程。

2.2 测站概况

基本情况：先锋水文站位于江西省九江市修水县义宁镇任家铺村，东经 114° 31′，北纬 28° 59′。设立于 1956 年 12 月，属修水水系一级支流武宁水区域代表站，国家二类水文站，省级重点站，隶属修河水文水资源监测中心修水水文大队，巡测站，集水面积 1764 平方千米，距河口 4.1 千米。水库调蓄与干流顶托影响显著，历史最大流量 5410m³/s（1973 年）。测验项目有水位、流量、降水量、水质等。

河道特性：先锋水文站水位流量关系主要受上游水库调蓄作用影响，水位变化较大且频繁；当遭遇修河干流大洪水时，水位流量关系会受干流洪水顶托影响，顶托时间一般 1 ~ 2 天，本站洪水传播时间约为 12 小时，洪峰过境时间约 1 至 2 小时。受洪水顶托期间采用连实测流量过程法定线推流，测验河段顺直长约 300 米，上游 380m 处为龙潭峡水库，下游约 4.1km 为修河干流。

测试方案：中、高水采用缆道流速仪法测流，低水采用人工涉水流速仪法，测验历时一小时左右，受上游龙潭峡电站蓄泄影响，水位变化较大且频繁，测验时机难以控制；高洪期漂浮物多，对测验造成一定影响。

3 无人机雷达波测流比测情况

3.1 技术原理

3.1.1 多普勒效应

无人机雷达波测流通过发射射频信号并接收水面反射信号，利用多普勒频移计算流速。频移量与水面流速成正比，公示为：

$$V_W = V_S \times \cos(\theta)$$

其中， V_M 为实际水面流速， V_S 为雷达测得径向流速， θ 为雷达轴线与水流方向的水平夹角。

3.1.2 非接触式测量

雷达波无需接触水体，避免了传统接触式设备（如转子流速仪）的磨损和安全隐患。

3.2 比测方案

在无人机雷达波测速的同时，采用转子流速仪同步实测流速，与转子式流速仪进行流速比测分析，确定流速系数。将大断面资料及相应的流速系数录入系统软件中，通过无人机配套软件计算流量，与流速仪法测流建立的稳定水位流量关系的线上流量进行比测分析。

为了分析无人机雷达波测流系统所测流量与该断面稳

定流量的相关关系，采用 LS25—1 转子式流速仪与无人机雷达波测流系统同时进行流量测验的成果进行对比分析。

数据采集：2019-2023 年汛前断面数据，在各级水位共进行了 16 次流量比测，涨落率大和风速较大时未进行比测，在比测的 16 次流量中，最大流量 417m³/s，相应水位 97.14m，最小流量 63.3m³/s，相应水位 95.47m，水位变幅 1.66m，包含了所有水位级。

3.3 参数优化

飞行高度：无人机雷达波测流过程中，雷达波探头距水面越近，接受反射波的强度越大，测验精度越高，但无人机旋桨转动产生的气流对水面流态的干扰也越大，流速较低时影响更加显著，因此确定合适的飞行高度是无人机雷达波测流应用中的一个重要因素。

测速历时：测速历时长短直接关系到流速测验的精度、测验历时，为选择合理的测速历时，选择同一水位、不同测点分别开展 30 秒、60、100 秒测速，以 100 秒测速为标准值，开展比测分析。

4 成果对比分析

4.1 关键参数优化

4.1.1 无人机距水面飞行高度分析

通过现场进行 20 次不同飞行高度对水面流态干扰实验，由表 1 分析可知，当流速大于 0.60m/s 时，无人机距水面高度为 5m、10m 和 15m 处与流速仪法测得流速进行对比，最大相对偏差分别为 25.93%、16.92% 和 18.46%，平均偏差为 10.48%、7.82% 和 9.85%。根据现场试验发现，当无人机距水面高度为 5m 时，无人机旋桨产生的气流对低流速区域水面或岸边水面影响明显；当无人机距水面高度大于 10m 时，无人机旋桨转动对水面影响较小，因此确定距水面高度 10-15m 为无人机雷达波测流的合适飞行高度。

4.1.2 无人机雷达波测流单点测速历时分析

为选择合理的测速历时，选择同一水位、不同测点分别开展 30 秒、60、100 秒测速，以 100 秒测速为标准值，开展比测分析，测验成果分析见表 2、表 3。

由上表可知，无人机雷达波在测速过程中，30 秒的测速成果与 100 秒测速成果最大相对误差 5.75%，系统误差为 0.9%；60 秒的测速成果与 100 秒测速成果最大相对误差 2.47%，系统误差为 0.1%，二者皆符合《河流流量测验规范》要求，因此在日常应用中，测速历时可采用 30 或 60 秒^[4]。

4.1.3 无人机测流水面系数分析

无人机测流系统系数分别为左、右岸系数和水面流速系数，其中左、右岸系数采用流速仪法岸边系数 0.70。本次分析通过无人机雷达波测得表面流速与流速仪法所测得垂线平均流速进行对比分析，确定水面系数，点绘雷达波水面流速与流速垂线平均流速相关图（图 1），计算过程见表 4。

表1 无人机雷达测速不同水面高度流速对比表

序号	流速仪流速 (m/s)	距水面高度 5m 处流速 (m/s)	距水面高度 10m 处流速 (m/s)	距水面高度 15m 处流速 (m/s)	距水面高度 5m 与流速仪法流速 相对偏差 (%)	距水面高度 10m 与流速仪法流速 相对偏差 (%)	距水面高度 15m 与流 速仪法流速流速相对 偏差 (%)
1	0.78	0.85	0.85	0.83	8.97	8.97	6.41
2	0.76	0.87	0.84	0.85	14.47	10.53	11.84
3	0.88	0.95	0.98	0.96	7.95	11.36	9.09
4	0.91	0.94	0.94	0.92	3.30	3.30	1.10
...							
17	0.98	1.18	1.05	1.09	20.41	7.14	11.22
18	1.35	1.54	1.43	1.45	14.07	5.93	7.41
19	1.28	1.43	1.38	1.53	11.72	7.81	19.53
20	1.44	1.54	1.52	1.59	6.94	5.56	10.42
平均偏差					10.48	7.82	9.85
最大偏差					25.93	16.92	18.46

表2 先锋站 30 秒测速历时成果分析表

序号	不同测速历时流速 (m/s)		绝对误差 (m/s)	相对误差 (%)
	30S	100S		
1	0.57	0.58	-0.01	-1.72
2	0.90	0.90	0.00	0.00
3	0.99	0.99	0.00	0.00
4	0.92	0.87	0.05	5.75
...				
14	1.05	1.03	0.02	1.94
15	0.75	0.77	-0.02	-2.60
16	0.42	0.43	-0.01	-2.33
17	0.31	0.30	0.01	3.33
累计频率在 75% 以上的相对误差 (%)				2.78
最大相对偏差 (%)				5.75
系统误差 (%)				1
处理意见: 经比测, 最大相对偏差 $5.75\% \leq \pm 6\%$; 系统偏差 $0.9\% \leq \pm 1\%$, 合格.				

表3 先锋站 60 秒测速历时成果分析表

序号	不同测速历时流速 (m/s)		绝对误差 (m/s)	相对误差 (%)
	60S	100S		
1	0.58	0.58	0.00	0.00%
2	0.91	0.90	0.01	1.11%
3	1.00	0.99	0.01	1.01%
4	0.89	0.87	0.02	2.30%
...				
14	1.05	1.03	0.02	1.94%
15	0.78	0.77	0.01	1.30%
16	0.42	0.43	-0.01	-2.33%
17	0.30	0.30	0.00	0.00%
累计频率在 75% 以上的相对误差 (%)				2.01
最大相对偏差 (%)				2.47
系统误差				0.1
处理意见: 经比测, 最大相对偏差 $2.47\% \leq \pm 6\%$; 系统偏差 $0.1\% \leq \pm 1\%$, 合格.				

表4 先锋站无人机雷达波水面系数计算表

序号	流速仪法垂线平均流速 V_1 (m/s)	无人机表面流速 V_2 (m/s)	$K=V_1/V_2$
1	0.74	0.86	0.86
2	0.71	0.71	1.00
3	0.61	0.61	1.00
4	2.32	2.47	0.94
...			
27	2.26	2.66	0.85
28	2.37	2.71	0.87
29	2.45	2.68	0.92
30	2.32	2.43	0.96
\bar{K}			0.93

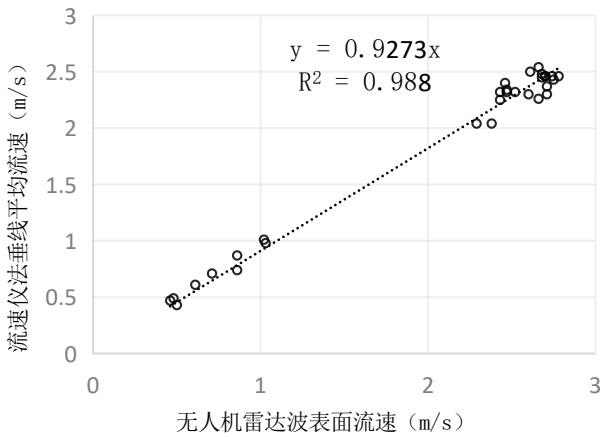


图1 无人机雷达波流速与流速仪法垂线平均流速相关图

通过30个测速样本分析计算，流速仪法垂线平均流速与无人机雷达波表面流速比值最大为1.02，最小为0.85，平均值为0.93，即水面系数取0.93。利用 $V_{垂线} = 0.93 * V_{无人机}$ 改正无人机雷达波测速结果，采用改正后的样本进行误差分析，标准差为5.7%，系统误差为0.6%，小于±1%，系统误差满足《水文资料整编规范》要求^[5]。

4.2 流量比测结果

4.2.1 适用范围分析

无人机雷达波实测流量点绘到流速仪法水位流量关系图上，由图2可知，当水位高于95.50m以上时，无人机实测流量与流速仪法水位流量关系线基本一致，而当水位低于95.50m时，无人机实测流量与流速仪法水位流量线偏差较大，分析原因当先锋站水位为95.15m时，上游龙潭峡电站仅一个孔放水，流速较小，超出无人机雷达波测速范围导致。先锋站历年水位变幅达10.82m(94.26~105.08m)，而95.50m以上水位变幅达该站水位变幅的88.5%，因此，确定95.50m以上为先锋站无人机雷达波测流适用范围，即断面平均流速为0.60m/s以上。可以作为无接触式流量测验新方法 & 高洪测验的有效补充进行推广使用。

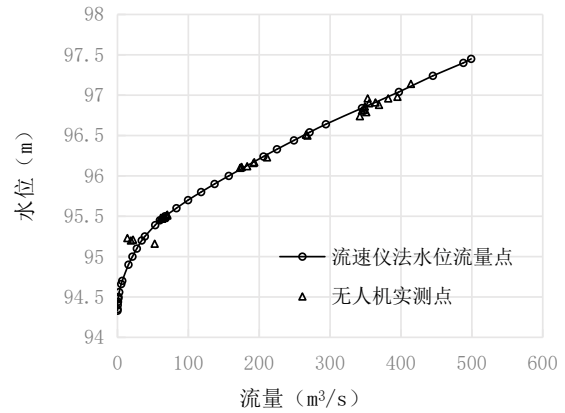


图2 无人机雷达波流量与流速仪法水位流量关系对照图

5 流速断面横向分布分析

根据无人机法实测流速和流速仪法流速同水位级实测流量资料，选取两次代表水位级(95.47m、97.14m)分别点绘两次水位级的断面流速分布图，从图3、4中可以看出，无人机法实测流速和流速仪法流速在相同水位级的断面流速分布基本一致。

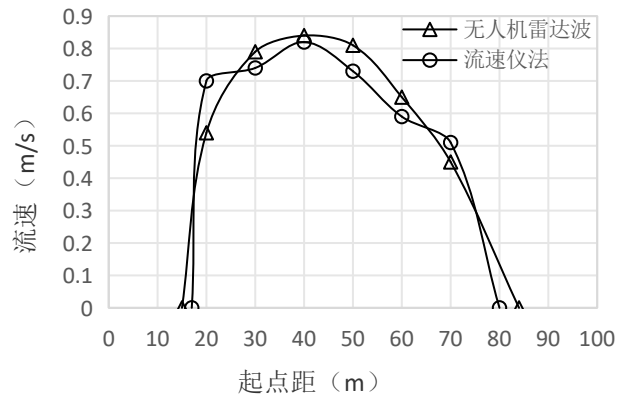


图3 无人机雷达波流速与流速仪法垂线平均流速对照图 (95.47m)

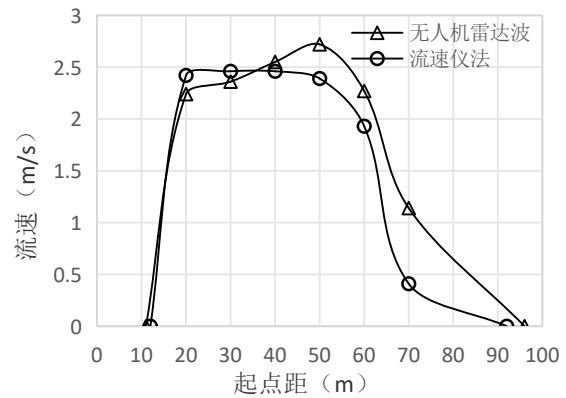


图4 无人机雷达波流速与流速仪法垂线平均流速对照图 (97.14m)

6 相关关系分析

以流速仪法实测流量建立水位流量关系，将无人机实测流量与该线线上流量进行对比分析，计算成果见表9。

通过对30个样本容量分析，低水位（≤96.60m）测点

最大相对误差 $-5.42\% \leq 12\%$ ，中水位（96.60m-98.40m）测点最大相对误差 $7.55\% \leq 8\%$ ，随机不确定 $6.0\% \leq 12\%$ ，系统误差 $0.89\% \leq 2\%$ ，符合二类精度水文站水力因素法定线精度要求。

表9 先锋站无人机雷达波流量与流速仪法线上流量比测分析表

测次	水位/m	Q 无人机/(m ³ /s)	Q 线/(m ³ /s)	Pi/(%)	pi-p _(平) /(%)	(pi-p _(平)) ² (%)
1	95.48	65.7	64.6	1.7	0.81	0.66
2	95.47	62.2	63.3	-1.74	-2.63	6.92
3	95.47	63	63.3	-0.47	-1.36	1.85
4	95.48	61.1	64.6	-5.42	-6.31	39.82
5	96.81	345	335	2.99	2.10	4.41
...						
26	96.51	266	264	0.76	-0.13	0.02
27	96.23	211	204	3.43	2.54	6.46
28	96.11	175	179	-2.23	-3.12	9.76
29	95.49	67.2	65.9	1.97	1.08	1.17
30	96.17	193	192	0.52	-0.37	0.14

备注：Q_{无人机}—无人机雷达波实测流量；Q_线—实测流量点对应在曲线上查得的流量；

p_i—测点相对偏离值；p_(平)—平均相对偏离值；p_i-p_(平)—测点相对偏离值距平均值偏差；

7 结语

本次针对武宁水先锋站对比分析中，无人机雷达波测流与传统测验方面有几个应用优势，一是适用于防汛抢险等紧急场景，可连续监测大范围水域，可以快速获取数据并支持决策；二是复杂地形区域应用安全性较高，接触性待测目标，避免人员涉水作业；三是效益成本缩小，快速部署，省去渡河实物架设成本。

综合分析：通过无人机雷达波在先锋水文站与流速仪进行比测分析，先锋站在95.50m以上的各级水位中，采用无人机雷达波测流，精度满足二类站定线要求。在水位95.50m以上时，在无雨、风力较小、视线较好情况下可采用无人机雷达波法实测流量^[6,7]。

参考文献

[1] 姚代顺,张宗元,崔力超,等.TEL-12双轨移动式雷达波测流系统

水面流速比测试验分析[J].甘肃水利水电技术,2024,60(12):1-5+13.DOI:10.19645/j.issn2095-0144.2024.12.001.

[2] 杨俊,薛运宏,刘冠华.无人机测流关键技术研究与应用[J].治淮,2022,(06):11-13.

[3] 陈晨,荣佳伟,乔铂纯.无人机测验系统在水文监测中的应用探索[J].东北水利水电,2021,39(11):69-70.DOI:10.14124/j.cnki.dbslsd22-1097.2021.11.028.

[4] 河流流量测验规范(GB50179-2015).

[5] 水文资料整编规范(SL/T 247-2020)

[6] 刘梅同单,李丹.无人机监测系统在水文应急监测中的应用[J].长江技术经济,2020,4(04):91-93.DOI:10.19679/j.cnki.cjjsj.2020.0421.

[7] 杨胜天,王鹏飞,王娟,等.结合无人机航空摄影测量的河道流量估算[J].遥感学报,2021,25(06):1284-1293.