

侧扫雷达测流系统在湘潭水文站的 比测分析及应用研究

刘思维

(湖南省湘潭水文水资源勘测中心, 湖南 湘潭 411100)

【摘要】 受上、下游水利枢纽运行的影响,湘潭水文站原有的流量测验规律改变,同时为避免高洪的影响亟需转变测流方式。本文对侧扫雷达测流系统与声学多普勒流速剖面仪实测数据进行比测分析,研究不同水位条件下的水位流量模型,通过误差评价、合理性评价、精度分析等确定了侧扫雷达测流系统在一定条件下应用于湘潭水文站流量监测的可行性。结果表明,在水位高于 32.590m 时,采用关系模型 $Q_{\text{率定}} = 0.7509Q_{\text{雷达}} + 63.431$ 进行率定,雷达流量与声学多普勒流速剖面仪流量整体趋势吻合,测验精度符合规范要求,可为相似水情条件下的水文测站提供参考依据。

【关键词】 侧扫雷达测流系统;比测分析;水位流量模型;率定

中图分类号: P332

文献标志码: B

文章编号: 2096-0131(2023)11-059-08

Comparative Analysis and Application Research of Side-Scan Radar Flow Measurement System at Xiangtan Hydrological Station

LIU Siwei

(Hunan Xiangtan Hydrology and Water Resources Survey Center, Xiangtan 411100, China)

Abstract: Due to the influence of upstream and downstream water control structures, the original flow measurement patterns at Xiangtan Hydrological Station have been altered. Therefore, it is necessary to change the flow measurement method to avoid the impact of high floods. This paper presents a comparative analysis of the measured data between the side-scan radar flow measurement system and the acoustic Doppler velocity profiler. It studies the stage-discharge models under different water level conditions. Through error evaluation, rationality assessment, and precision analysis, the feasibility of the side-scan radar flow measurement system in flow monitoring at Xiangtan Hydrological Station under certain conditions is determined. The results show that when the water level is above 32.590m, the calibration can be performed using the relationship model $Q_{\text{calibrated}} = 0.7509Q_{\text{radar}} + 63.431$. The radar flow and the acoustic Doppler velocity profiler flow demonstrate consistent overall trends, and the measurement accuracy meets the requirements specified by the standards. This paper provides a reference for hydrological stations under similar hydrological conditions.

Key words: Side-scan radar flow measurement system; comparative analysis; stage-discharge model; calibration

收稿日期: 2023-05-05

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1326.TV.20230905.1534.012.html>.

基金项目: 湖南省国家基本水文测站提档升级建设项目

作者简介: 刘思维(1988—),男,工程师,硕士,主要从事水文水资源方面的工作。

湘潭水文站(以下简称湘潭站)属国家重点水文站,是湘江流域总控制站,上、下游的大坝破坏了原本处于天然河道的水文测站的测验规律,出现了回水、顶托等现象,多年积累下来的流量测验成果与新情况不符,而传统的测验方法在流速过小、回水、顶托等情况下不能对整个流量变化过程进行实时监测,因此亟需一种测量方式,实现实时在线监测^[1],确保测验人员在高洪条件下的安全,以实现对流流量变化过程的及时掌握,发挥水文监测应有的作用。

《全国水文基础设施建设“十四五”规划》和《水文现代化建设规划》的印发实施,明确了水文现代化建设目标、主要任务和重点项目,为当前和今后一段时期我国水文现代化建设提供了重要依据^[2-3]。

侧扫雷达测流系统,与常规测流方式相比,实现了无接触、自动化、连续性的流量测验,是目前非接触式测流设备中应用较为成功的仪器之一。长江水利委员会水文局专家梅军亚等^[4]证实了利用 UHF 雷达测流系统在仙桃水文站有较好的流量测验精度,对该系统在水文测验中的应用提供了方向。但此类研究成果仍未有在大江大河主要控制断面正式应用的案例。

综上,本文以国家基本水文测站提档升级建设项目为依托,利用侧扫雷达测流系统与声学多普勒流速剖面仪(以下简称 ADCP)实测数据开展比测工作,分析该系统在湘潭站流量监测中应用的可行性,旨在解决湘潭站特殊水情条件下的测流难题,为相似水文测站提供参考。

1 概况

1.1 测站特性

湘潭站位于湖南省湘潭市雨湖区沿江中路,是湘江流域总控制站,属国家重点水文站。该站设立于 1936 年 1 月 7 日,集水面积 81638km²,干流长 948km,距河口 102km,警戒水位为 38.00m,保证水位为 39.50m。测验项目有水位、流量、降水量、悬移质泥沙、悬移质泥沙颗粒组成、水质、水温。

设站以来实测最大洪峰流量为 26400m³/s,出现时间为 2019 年 7 月 10 日;实测最大含沙量为 2.10kg/m³,出现时间为 1994 年 6 月 18 日;实测最高水位为 41.95m,出现时间为 1994 年 6 月 18 日。实测多年平均流量为 2090m³/s,多年平均年径流量为 659.6 亿 m³,流域多年平均年降水量为 1490mm。

湘江流域为暴雨洪水高发区,降水多以暴雨形式出现,年内分配很不均匀,湘江流域内降水主要集中在 4—9 月,降水量占全年降水量的 70% 以上,而 10 月至次年 1 月降水量不到全年的 15%^[5]。洪水来势平缓,峰型肥胖,单次较大洪水历时普遍在 10 ~ 18 天;在长江及洞庭湖涨水期间,水位流量关系主要受洪水涨落、回水顶托影响,受冲淤影响较小。湘潭水文站水位级划分见表 1。

表 1 湘潭水文站水位级划分

高水位/m	中水位/m	低水位/m
≥36.28	30.94 ~ 36.27	≤30.93

1.2 雷达安装位置

2019 年 3 月 30 日湘潭站完成侧扫雷达安装,设备安装在站房楼顶,水泥浇筑基础,供电方式为交流 220V 转直流 12V。安装位置在断面 0m 处,相对高度 25m。4 月 1 日完成调试后开始正常运行。侧扫雷达现场见图 1。



图 1 侧扫雷达现场

2 侧扫雷达测流系统介绍

2.1 基本情况

侧扫雷达测流系统适用于大江大河的流量实时自动化监测,采用非接触式测流技术,全天候对河流断面的表面流速进行连续监测,每 10min 完成一次全自动测量(可根据测站实际情况更改),沿断面线每 10m 给出一个段流速(视作用距离,最小 5m,最大 40m),水文基础数据通用平台(以下简称“数据平台”)将接收到的基础数据存储至数据库,同时根据相关数据信息进行网络流量合成,为测站提供数据接收、存储处理及成果浏览等功能^[6]。该设备安装在河岸上,安装简单,环境适应性强。产品对于恶劣天气、高洪多漂浮物、漫滩、河面结冰(初期薄冰)、汛期(大洪水)、堤防决口、应急监测等特殊情下的流量测验更具优势。

侧扫雷达主要技术参数:最大探测河面宽度为 800m,连续水面宽度不低于 60m,测速范围为 0.1 ~ 20m/s,距离分辨率最小可设置为 5m,速度分辨率不高于 0.01m/s,中心频率为 403MHz,脉冲峰值功率不高于 10W,采用 4G 无线 GPRS 通信。

2.2 工作原理

雷达测流主要是利用多普勒效应通过接收回波与发射波的时间差来测定距离,利用多普勒频率的变化测量计算目标的运动速度。此外,侧扫雷达测流还运用了 Bragg 散射理论,当雷达电磁波与其波长一半的水波作用时,同一波列不同位置的后向回波在相位上差异值为 2π 或 2π 的整数倍,因而产生增强性 Bragg 后向散射^[7-8]。通过判断一阶 Bragg 峰位置偏离标准 Bragg 峰的程度,计算波浪的径向流速。

侧扫雷达测流系统由测流仪、数据平台、射频线缆、综合机箱(包含电磁波收发组件、中频信号处理机、工业控制计算机和稳压直流电源)、通信设备组成。测流仪测量断面流速并将流速数据发送到云端的数据平台,数据平台通过断面资料、水位和流速数据合成流量数据。测流仪有发射和接收天线,由电磁波收发组件实现发射机和接收机的功能,中频信号处理机和计算机实现信号处理、数据转发等功能,数据存储在云数据

服务器上,数据显示由访问云数据服务器的计算机实现^[9]。

3 数据描述

3.1 数据来源

本文使用的数据来源于湘潭站 2021 年 4 月 1 日 0:00 至 2022 年 9 月 4 日 0:00 期间侧扫雷达运行数据和 ADCP 实测数据。

3.2 数据初步分析

侧扫雷达测流系统于 2021 年 4 月 1 日 0:00 至 2022 年 9 月 4 日 0:00 运行期间,在 2021 年 5 月 22 日 7:10 水位为 38.54m 时出现最大流量 $23407\text{m}^3/\text{s}$,对应平均流速为 2.43m/s ;在 2021 年 10 月 19 日 9:05 水位为 31.97m 时出现最小流量 $315\text{m}^3/\text{s}$,对应平均流速为 0.06m/s 。图 2 为雷达在测流期间水位动态范围图。

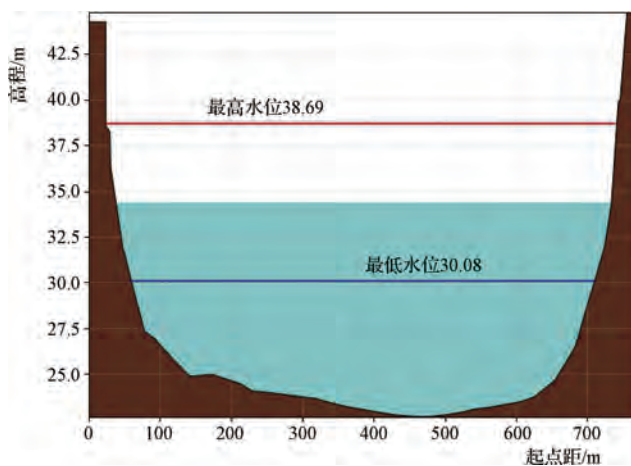


图2 水位动态范围

3.3 数据完整率

数据完整率表示测验时段数据是否完整,主要因为侧扫雷达测流系统在实际运行过程中会受到物联网卡限额、工控机未正常启动等其他影响导致部分时段缺失。其计算公式为

$$\text{完整率} = \text{实际接收数据数量} / \text{预期数据接收数量} \quad (1)$$

其中

$$\text{预期数据接受数量} = 144 \times \text{测验时段总天数}$$

(湘潭站测次频率为 10min 一组,一天理论数量为 144 组)

3.4 数据可信度分布区间

2021年4月1日0:00至2022年9月4日0:00,侧扫雷达预期数据共75222条,受物联网卡限额影响,实际上传数据68510条,数据完整率为91.07%。另外,统计测得数据可信度,以河流断面最深处信噪比为参考(信噪比指信号与噪声的比例),数据可信度小于80.00%的数据,应给予剔除,剔除后数据占比为97.77%。整体数据有效率为89.03%。

3.5 雷达数据成果

3.5.1 侧扫雷达流量成果

选用2021年4月1日0:00至2022年9月4日0:00期间共68510组数据,绘制雷达水位流量散点图和时序图,见图3和图4。从图3可看出,测站水位流量关系不稳定,高水位下存在明显绳套情形,中低水位

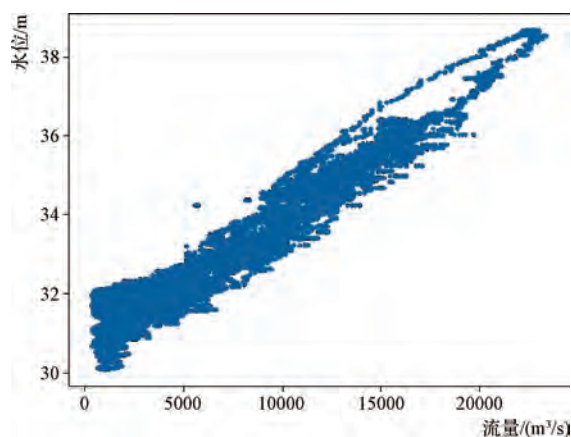


图3 雷达水位流量散点图

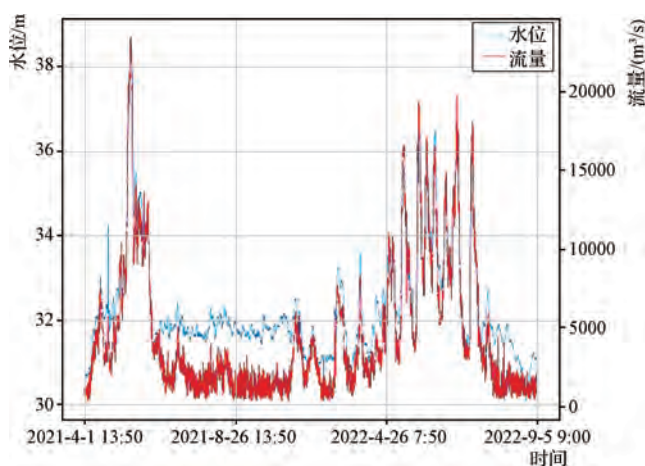


图4 雷达流量时序图

下受其他水利因素影响,有顶托情形,同水位下流量跨度较大,符合测站实际情况。从图4可看出,流量随水位变化趋势基本一致。

3.5.2 流速成果

考虑到流量计算结果受流速的影响,需进一步对流速分布及信号强度进行分析,结果见图5。结合大断面图可以看出,河流最深处大约在450m处左右,最大流速基本出现在450m处,与实际情况相符。

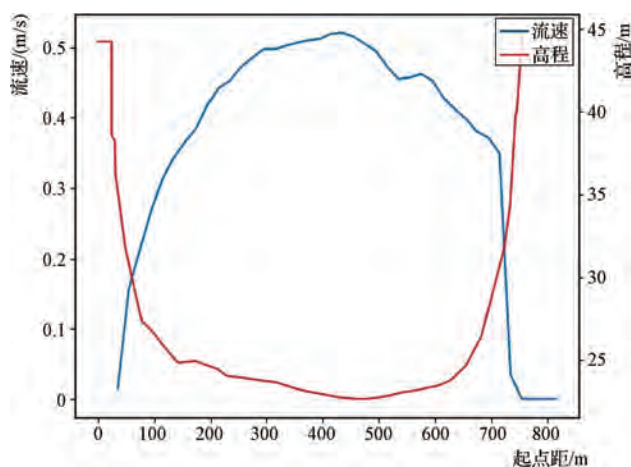


图5 流速分布

参照图3、图4,对水位流速关系进行分析,结果见图6和图7。从图6、图7中可看出,流速随水位变化趋势基本一致,流速水位关系基本与流量水位关系一致,符合实际情况。

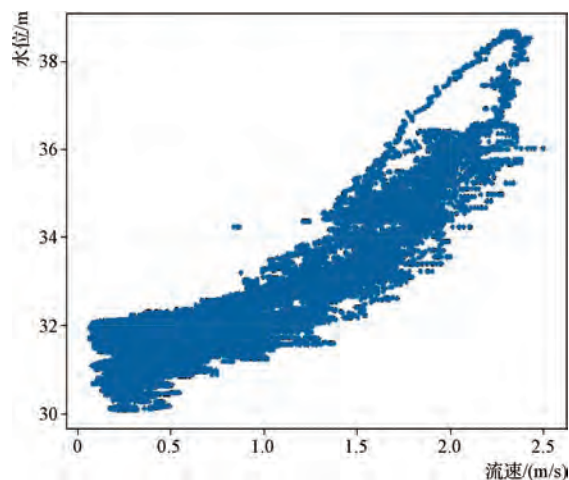


图6 雷达水位流速散点图

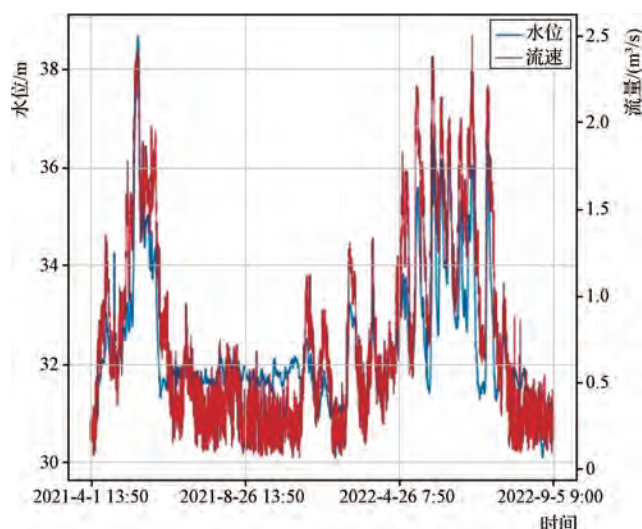


图7 雷达流速时序图

4 数据比测分析

4.1 比测方法

湘潭站现有主要测流方式为 ADCP 测流,考虑到后续测站根据水位确认侧扫雷达测流系统的适用场景,采用 ADCP 实测流量与侧扫雷达推算流量进行比测。

根据测站每次 ADCP 测验的起始时间、结束时间,通过选取对应时间内侧扫雷达所有测次的表面流速,计算出断面平均流速,从而用推算出的断面平均流量与 ADCP 实测流量进行比测。利用线性回归分析方法建立流量关系模型,通过比较各模型可决系数(R^2),判断最优雷达虚流量与断面流量关系方程式(系数),最终根据水文资料整编规范相关要求,以 ADCP 实测流量作为真实值,计算率定后测扫雷达流量的系统误差以及随机不确定度,检验模型精度。

4.2 流量计算方法说明

侧扫雷达测流系统利用流速面积法进行断面流量的计算,依据测得的各距离段表面流速分布,加上已知的河流断面及根据测站自记水位计查得相应水位,从而计算出河流流量。侧扫雷达测流系统的默认水面系数设置为“1”。断面流量的计算方法与流速仪法测流计算方法相同,部分平均流速、部分面积、部分流量逐

条测段累加。具体计算公式为

$$Q = \sum_{i=1}^n v_i s_i \quad (2)$$

式中: Q 为雷达虚流量, m^3/s ; v_i 为部分流速, m^3/s ; s_i 为分段面积, km^2 。

4.3 人工数据选取

a. 资料收集时间范围:2021 年 4 月至 2022 年 9 月。

b. 资料收集的水位、流量及代表性:全部 213 组人工数据,涵盖低、中、高水位。

4.4 雷达数据选取

a. 资料收集时间范围:2021 年 4 月至 2022 年 9 月。

b. 资料收集的水位、流量及代表性:全部 68510 组雷达数据,涵盖低、中、高水位。

4.5 比测分析

选取 ADCP 对应时间雷达虚流量,根据水位排序,两者比测系统误差为 45.0%,从图 8、图 9 可看出,雷达测得的流量与 ADCP 测得的流量整体趋势吻合,但是雷达测得的流量偏大,因为雷达测得的为表面流速,雷达测得的虚流量需进一步率定。

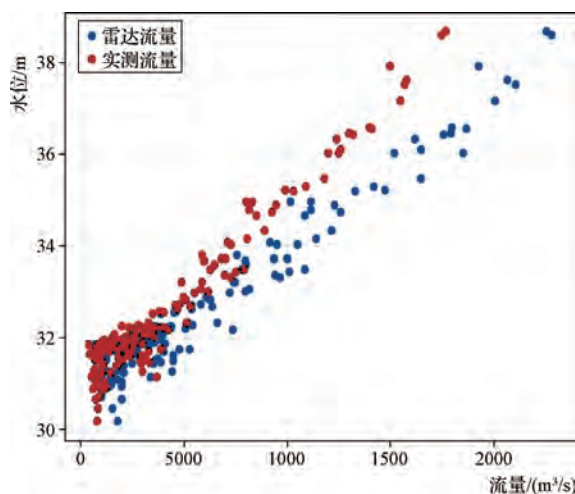


图8 水位流量散点图(率定前)

4.6 率定分析

考虑到侧扫雷达实测虚流量为河流表面流量,相较断面流量偏大,故需对侧扫雷达实测数据进一步率

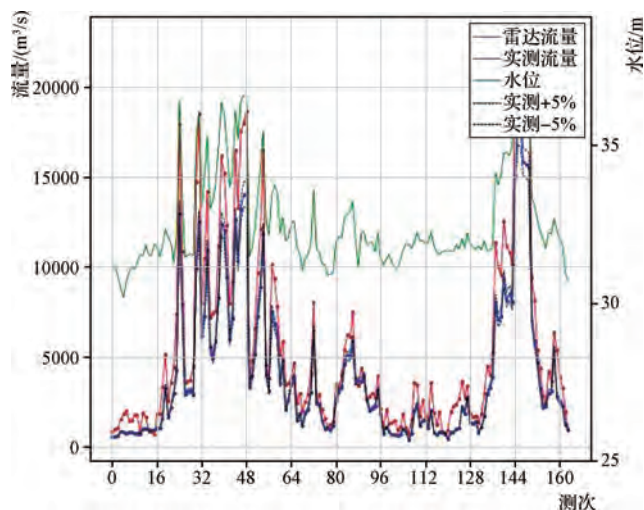


图9 人工、雷达流量折线图(率定前)

表2 流量关系模型及分析统计

序号	水位区间	相 关 方 程	R^2	系统误差/ %	随机不确定 度/%	误差区间占比		
						0~5%	5%~10%	10%以上
1	全水位	$Q_{\text{人工}} = 0.7521Q_{\text{雷达}}$	0.99	9.3	58.2	33.3	18.8	47.9
2	全水位	$Q_{\text{人工}} = 0.7643Q_{\text{雷达}} - 133.68$	0.99	3.9	51.0	35.2	15.5	49.3
3	全水位	$Q_{\text{人工}} = 0.7625Q_{\text{雷达}} + 16.63\Delta Z - 135.22$	0.99	4.0	50.4	35.2	16.0	48.8
4	32.59m 以下	$Q_{\text{人工}} = 0.7464Q_{\text{雷达}} - 105.22$	0.86	6.1	62.9	15.7	11.2	73.1
	32.59m 以上	$Q_{\text{人工}} = 0.7509Q_{\text{雷达}} + 63.431$	0.98	-0.2	11.6	69.6	8.4	21.9

注 ΔZ 为湘潭站与下游长沙(三)站落差。

结合测站实测数据进一步推断分析,导致模型精度较低的主要原因是:湘潭站在中低水位时,侧扫雷达与 ADCP 所测流量关系较为散乱,误差较大,并且低水位流量与高水位流量相差较大,导致模型 R^2 较高,实际精度较低,见图 10。进一步对比测数据分水位进行拟合,从第 4 个模型可以看出,水位在 32.59m 以上,采用方程 $Q_{\text{率定}} = 0.7509Q_{\text{雷达}} + 63.431$ 进行率定,见图 11。其中,相对误差 5.0% 以内占比升至 69.6%,系统误差为 -0.2%,随机不确定度为 11.6%,可以达到整编规范中一类精度站要求。从图 12、图 13 可以看到,率定后的雷达流量与实测流量整体趋势吻合,效果令人满意。

4.7 误差评价

根据《河流流量测验规范》(GB 50179—2015)中关系曲线检验标准,考虑到 32.59m 水位以下两者相关性较差,对湘潭站 32.59m 水位以上关系曲线分别做符

定。选取湘潭站 ADCP 所测断面流量与对应雷达虚流量建立线性回归关系模型,并进行比测精度分析,见表 2。从表 2 中第 1、第 2 个模型中可以看出,在全水位下,雷达测得的流量与 ADCP 测得的流量拟合度均较高, R^2 达到 0.99。从第 3 个模型中可以看出,在带入落差 ΔZ 时,拟合度并没有较大提升,说明雷达测得的流量与落差 ΔZ 无明显关联。另外,从第 1、第 2、第 3 个模型中可以看出,虽然拟合度较高,但率定后雷达测得的流量与 ADCP 测得的流量相对误差 5.0% 以内总占比均在 30.0% 左右,系统误差与随机不确定度较高,即精度较低,达不到整编要求。

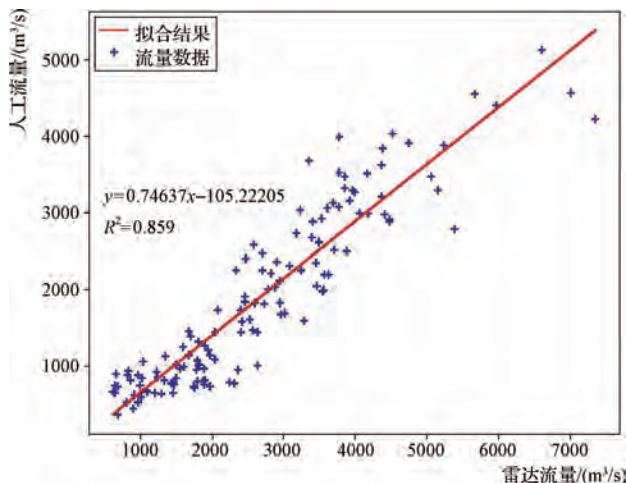


图10 32.59m 水位以下流量拟合

号检验、适线检验和偏离检验。计算其与湘潭站 ADCP 实测流量的相对误差,用系统误差和随机不确定度来进行误差评价,计算公式如下:

$$P = \frac{1}{n} \sum P_i \quad (3)$$

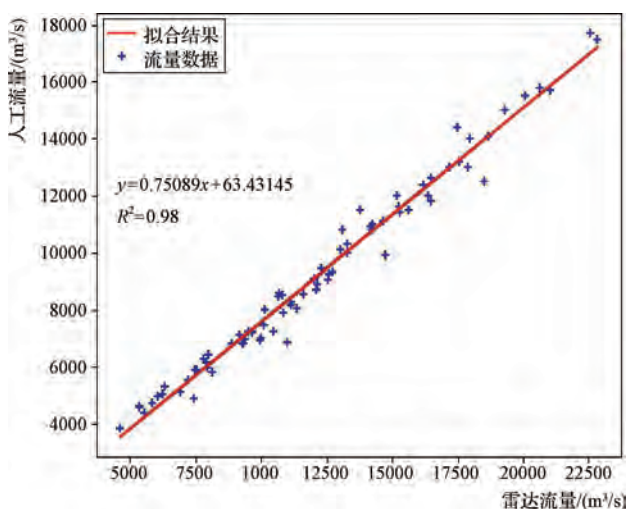


图 11 32.59m 水位以上流量拟合

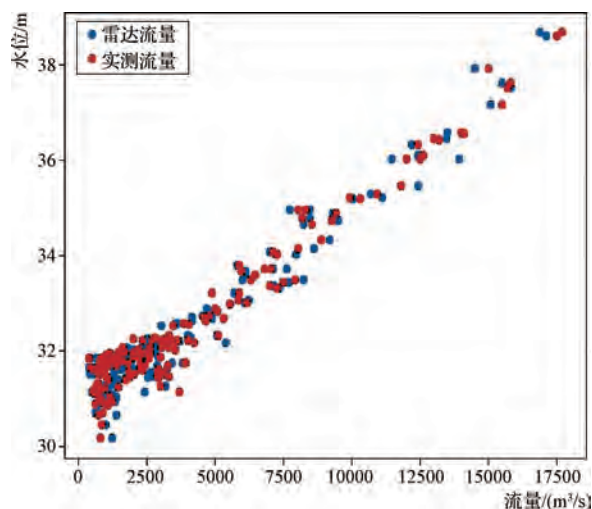


图 12 水位流量散点图(率定后)

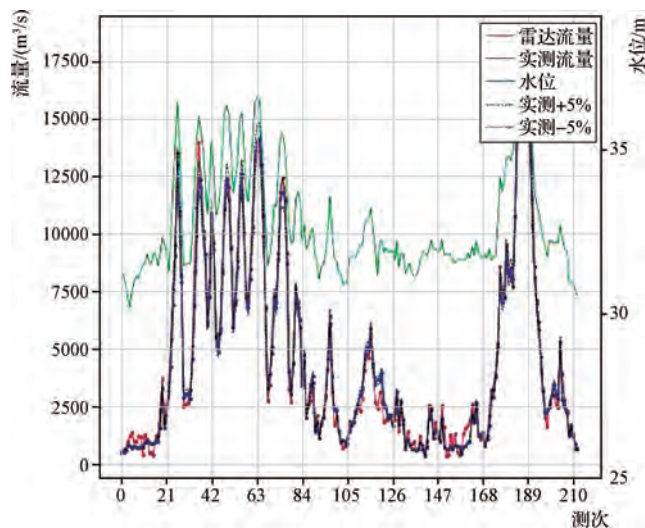


图 13 人工、雷达流量折线图(率定后)

$$S_e = \left[\frac{1}{n-2} \sum \left(\frac{Q_i - Q_{ci}}{Q_{ci}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$X'_Q = 2S_e \quad (5)$$

式中: P 为系统误差, %; P_i 为相对误差, %; S_e 为实测点标准差, %; Q_i 为第 i 实测点流量, m^3/s , 取侧扫雷达率定流量数据; Q_{ci} 为第 i 实测点的流量 Q_i 在相应的曲线上的流量, m^3/s , 取湘潭站实测流量数据; X'_Q 为置信水平为 95.0% 的随机不确定度。

根据以上所绘制的关系曲线, 依据《水文资料整编规范》(SL/T 247—2020) 进行曲线检验, 一类精度站单一曲线法系统误差在 $\pm 1.0\%$ 以内, 随机不确定度在 8.0% 以内^[11]。结果显示雷达系统误差为 -0.2% , 标准差为 5.8%, 随机不确定度为 11.6%, 雷达测得的为表面流速, 可参照浮标法测流定线, 随机不确定度可增大 2.0% ~ 4.0%, 满足一类精度站要求。

4.8 流量过程线合理性分析

对测站日均水位大于 32.59m 的流量进行日均流量统计分析, 从侧扫雷达推算流量与整编流量对比图(见图 14)可知, 侧扫雷达推算出的流量基本落在整编流量 $\pm 5\%$ 范围内, 说明侧扫雷达推算出的流量是合理的。雷达日均流量计算采用式(6), 其中 Q_i 和 Q_{i+1} 为不同时间段流量观测值。日均水位采用面积包围法, 按式(7)计算, 其中 Z_1 为日平均水位, $a, b, c, \dots, n$ 为观测时距, Z_0, Z_1, Z_2 为相应时刻的水位。

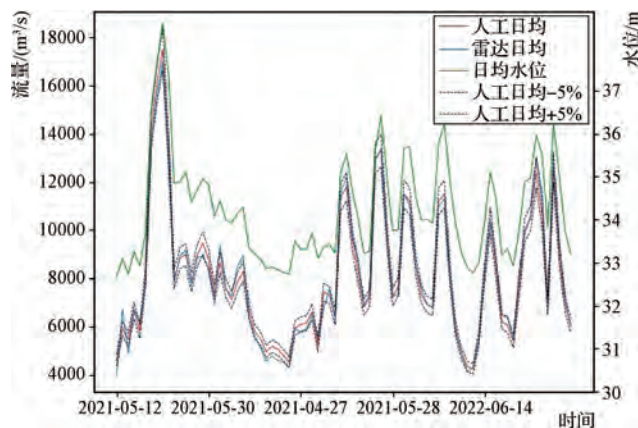


图 14 侧扫雷达推算流量与整编流量对比

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n [(Q_{i+1} + Q_i)/2] \times 10}{24 \times 60} \quad (6)$$

$$\bar{Z} = \frac{1}{48} [Z_0 a + Z_1(a+b) + Z_2(b+c) + \cdots + Z_{n-1}(m+n) + Z_n n] \quad (7)$$

4.9 日平均流量精度对比分析

将侧扫雷达推算的日平均流量与湘潭站流量整编成果进行逐日对比分析,并进行合格率统计。

将整编流量与侧扫雷达推算流量对比分析可知,日平均流量误差不超过±5%的合格率为69.00%,误差不超过±10%的合格率为100%,系统误差为-0.23%。推算的侧扫雷达日流量与整编值基本一致。

5 结论及展望

5.1 结论

a. 通过对湘潭站侧扫雷达测流系统和ADCP实测数据的比测分析,不同水位条件下的水位流量关系模型拟合度存在较大差异。当水位高于32.59m时,采用 $Q_{\text{率定}} = 0.7509Q_{\text{雷达}} + 63.431$ 关系模型对侧扫雷达测流系统进行流量率定,适线检验、符号检验和偏离值检验均合格,率定后流量系统误差、随机不确定度、测验精度均符合规范要求,推算的日平均流量与整编值基本一致,可作为同级水位条件下的重要流量成果。

b. 本次研究尚缺乏较为全面的数据资料,例如按照湘潭站水位级划分,本次所取数据主要集中在中、高水位,尚缺乏低水位数据对比,需补充比测资料。同时由于条件限制,关系模型有待进一步优化。

5.2 展望

从比测结果可以看出,在正常流态下,系统工作正常;在非正常流态下,即测站存在变动回水、顶托等情

形时,雷达测验结果与ADCP实测结果趋势吻合,但是精度偏低,此时侧扫雷达测验结果仅供率定水位流量过程参考。此外,需尽可能准确地确定测流断面尺寸和界面,从而通过圣维南方程推算出断面流量,这也是目前雷达测速的软肋。

随着5G网络的快速发展,侧扫雷达测流系统有望结合测站的断面数据进行流量合成,降低非人为原因造成的系统误差,或者在未来开发可视化操作软件,实现远程实时流量监控。

参考文献

- [1] 李自立,王才军,李永辉.基于超高频雷达的流量测量算法研究:以长江武汉段为例[J].武汉大学学报(理学版),2013,59(3):242-244.
- [2] 姬战生,王玉明,张振林.杭州水文现代化发展的思考与展望[J].安徽农业科学,2023,51(1):250-252.
- [3] 香天元,熊珊珊.论水文监测信息生产现代化体系的构建[J].人民长江,2015,46(3):65-69.
- [4] 梅军亚,陈静,香天元.侧扫雷达测流系统在水文信息监测中的比测研究及误差分析[J].水文,2020,40(5):54-60.
- [5] 朱毅.湘江流域水资源安全问题分析[J].湖南水利水电,2009(4):35-37,43.
- [6] 莫建英,吴树诚,徐茜.阳朔水文站侧扫雷达在线流量监测系统比测率定成果分析[J].广西水利水电,2021(6):84-87.
- [7] 陈静,江海力,程遥.岸基雷达比测方案设计与应用[J].水利水电快报,2021,42(5):33-38.
- [8] 黄健,方益铭,李三平,等.超高频雷达在河流在线测流中的应用探讨——基于兰溪水文站的案例分析[J].浙江水利科技,2021,49(1):66-69.
- [9] 林思夏,曾仲毅,朱云通,等.侧扫雷达测流系统开发与应用[J].水利信息化,2019(1):31-36.