

巫溪水文站雷达波测流系统流量关系率定分析

黄河, 曹磊, 赵晓云

长江水利委员会水文局上江上游水文水资源勘测局, 重庆

收稿日期: 2022年8月12日; 录用日期: 2022年10月21日; 发布日期: 2022年10月28日

摘要

介绍巫溪测站特性及雷达波测流系统构成、测流原理等。通过同步比测, 根据传统流速仪法和雷达波测流所得系列进行对比分析, 建立雷达波测流系统适用的流量相关关系。分析结果表明, 传统流速仪法流量与雷达波测流系统流量相关关系良好, 还原的雷达波测流系统流量满足防洪报汛和资料收集相关精度要求, 有效解决巫溪(二)站中高水流量测验耗时长, 劳动强度大的困难, 是实现水文自动化监测的一种有效手段。

关键词

雷达波测流, 流量关系, 对比分析, 巫溪测站

Analysis of Flow Relation of Radar Wave Flow Measuring System in Wuxi Hydrologic Station

He Huang, Lei Cao, Xiaoyun Zhao

Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of the Upper Yangtze River, Changjiang Water Resources Commission, Chongqing

Received: Aug. 12th, 2022; accepted: Oct. 21st, 2022; published: Oct. 28th, 2022

Abstract

This paper introduces the characteristics of Wuxi Hydrologic station, the composition and principle of radar wave flow measuring system, and analyzes the flow series measured by the traditional current meter method and the flow series of radar wave flow measuring system through synchronous measurement, and establishes the applicable flow correlation relationship of radar wave flow measuring system. The results show that the traditional current meter flow method has a good relationship with radar wave flow measuring system, the reduction of the radar wave flow measuring system satisfies the accuracy requirements of flood control data collection, which can effectively solve the difficulties of time-consuming and high labor intensity in middle and high-water flow measurement of the Wuxi Hydrologic station. It is an effective method to realize the automation of hydrologic monitoring.

作者简介: 黄河, 重庆万州人, 1988年11月生, 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事水文测验管理与水资源监测研究。
Email: hhywstd2008@126.com

Keywords

Radar Wave Flow Measurement, Flow Relation, Comparative Analysis, Wuxi Hydrologic Station

Copyright © 2022 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

水文流量监测为水资源管理、防汛抗旱及水利工程服务,为我国经济社会建设和生态文明系统的构建提供强有力的保障。传统的流量测验方法如流速仪法,主要依靠人工操作,劳动强度大,效率低,自动监测能力不足,不能满足水文现代化发展的要求[1] [2] [3]。近年水利部要求今后水文站原则上按照自动站建设,实现无人值守和自动测报[4]。为满足新时期建设水文现代化测报系统的要求,水文站要创新水文监测手段和方法,充分利用先进声、光、电技术及自动化监测手段,推进新技术新仪器应用[5]。雷达波自动测流系统是根据多普勒雷达测速原理,对水流的表面流速进行测量,它是一种全自动、非接触式测流系统,具有安全高效、无人值守的特点,目前已经在水文行业广泛应用[6] [7]。

2. 基本情况

巫溪水文站于1972年由四川省水文总站设立,现隶属长江水利委员会。该站位于重庆市巫溪县城厢镇北门坡28号,109°38'E, 31°24'N,集水面积2001 km²,为控制大宁河水情的流量二类、泥沙二类精度的水文站,属国家基本水文站,现有水位、流量、单位含沙量、悬移质输沙率、降水、颗分等测验项目。

2.1. 河段特征

巫溪水文站测验河段顺直长约200 m,上、下游均有急弯道。基本水尺断面上游约110 m处有北门沟大桥,基下约100 m处有卵石滩,为本站的低水控制;高水由下游弯道控制。基本水尺断面下游约160 m的右岸有北门沟汇入,遇特大暴雨涨洪水时,受短暂顶托影响。根据该站历史资料分析,206.2 m以下为低水水位,206.2~210 m为中水水位,210 m以上为高水水位。

2.2. 断面变化

巫溪测站断面呈“U”字型,两岸岸坡均为石灰岩,河床为宽浅型,由卵石夹沙组成,河床受冲淤影响有一定变化,主要表现为冲刷下切。从2011年至2021年大断面的对比分析可以看出,水位在204 m以上时,断面由坚固岩石组成,断面形状无明显改变;204 m以下时表现为逐步冲刷,起点距在20~50 m范围变化较大,最大变化幅度在0.8 m以内,起点距在50~90 m范围变化幅度在0.4 m以内。大断面比较图见图1。

3. S3 SVR 雷达波测流系统

3.1. 系统简介

雷达波流速仪测量水体流速系统由雷达波测速传感器、数据采集传输系统、供电系统,无线通讯系统及相关安装防护措施组成。通过非接触式的雷达流速探头获得流速数据,通过有线或无线的方式,将流速信息输出到RTU或者中心站,通过中心站软件可以实时获取流速数据。

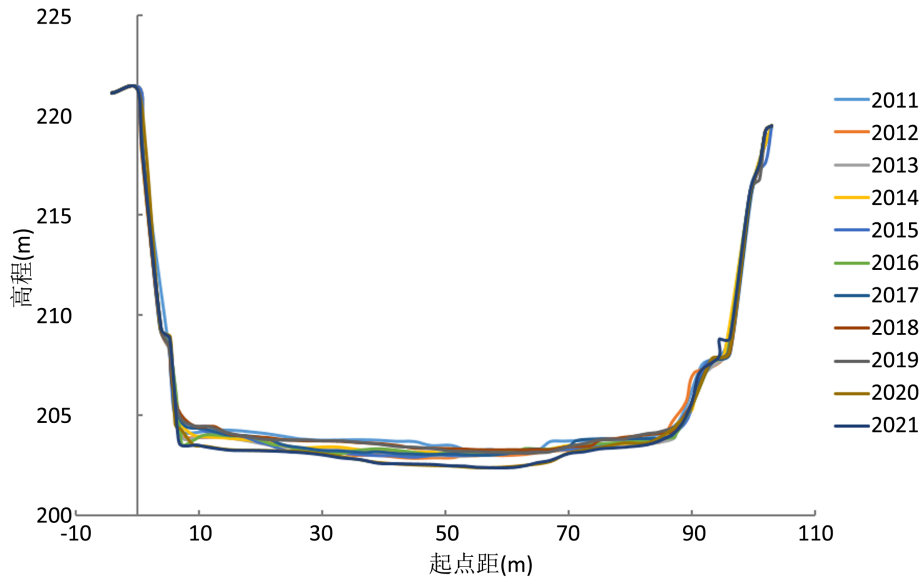


Figure 1. Schematic diagram of section changes at the Wuxi hydrologic station
图 1. 巫溪站断面变化示意图

巫溪站雷达波测流系统外部设备由行车缆道、流速传感器、自动行车、测流控制器、太阳能供电系统和水位计组成。巫溪站雷达波测流系统利用钢丝绳做缆道导轨，雷达测速控制器接收到运行指令后驱动自动行车搭载流速传感器在轨绳上运行，停留在逐条测流垂线位置上，测量垂线表面流速，测完所有垂线后，自动返回停泊点，进行充电。所测流速和水位数据通过电台发送到测流控制器(RTU)，经过计算得到流量。所有数据经 GPRS 模块发送到数据处理平台(远端服务器)，无需人工操作。

用户通过网页形式访问服务器，查看最终数据，根据测站情况，设置断面数据、测流点位、测流时间、水位变化涨落，自动加测幅度和间隔，根据时间导出流量计算结果表等报表。

3.2. 测流原理

雷达波测流原理为当雷达流速仪与水体以相对速度 V 发生相对运动时，雷达流速仪所收到的电磁波频率与雷达自身所发出的电磁波频率有所不同，此频率差称为多普勒频移。通过解析频移与 V 的关系，得到流体表面流速。雷达波在线测流系统是采用非接触方式测验水道断面上若干条垂线的水面流速，其流量计算方法与转子流速仪一样，即部分流速乘以部分面积得部分流量， n 个部分流量之和即为整个断面虚流量。公式如下：

$$Q_{\text{雷}} = \sum_{i=1}^n q_i = \bar{V}_i A_i \quad (1)$$

$$\bar{V}_i = (V_{i-1} + V_i) / 2 \quad (2)$$

式中： $Q_{\text{雷}}$ ——雷达波测流系统实测流量； q_i ——部分流量； V_i 、 V_{i-1} ——各垂线水面流速； \bar{V}_i ——部分平均流速； A_i ——部分面积。

4. 雷达波测流系统比测情况

4.1. 比测方案

采用缆道流速仪法与雷达波测流系统同步比测，雷达波测流系统在流速仪法测验同样的垂线位置施测水面流速，采用规范“平均分割法”计算断面流量[8]。雷达波测流系统借用流速仪测流断面和水位计算虚流量。

1) 水位

雷达波测流系统水位采用巫溪(二)站气泡压力式水位计自记水位, 与流速仪测流系统为同一套水位数据。

2) 仪器

雷达波测流系统和 LS25-3A 型旋浆式流速仪。

3) 断面

基本水尺断面兼流速仪断面, 为借用最近一次断面测量数据。

4.2. 比测情况

巫溪站雷达波测流系统 2019 年 11 月安装, 经过调试后(包括测试、接入匹配自记水位、调整轨道高度、率定参数、搭建数据平台等), 于 2020 年 5 月可正常采集数据。比测期间收集到与流速仪法同步施测的有效测次 56 次。因 204 m 以下受断面变化影响较大, 本次仅采用 204 m 以上 40 次比测流量资料建立模型率定雷达波流量关系。

5. 雷达波测流系统流量关系率定分析

5.1. 关系率定

采用 40 次实测雷达波流量资料与对应的流速仪法流量资料建立相关关系, 比测率定资料水位变幅 204.01~209.96 m; 流量变幅 149~2590 m³/s。考虑到雷达波法类似于浮标法测得的是虚流量, 最直接的方法是率定流量系数(类似于浮标系数)。初步选用直线关系拟合, 根据样本数据建立相关关系, 经回归分析, 用单一直线拟合还原误差较大, 而采用二次多项式拟合相关关系较好, 还原误差满足整编定线精度要求。因此, 确定相关关系式为

$$Q = 0.00007 \times Q_{雷}^2 + 0.7058 \times Q_{雷} + 9.296 \tag{3}$$

率定结果及误差分析详见表 1、图 2、图 3。

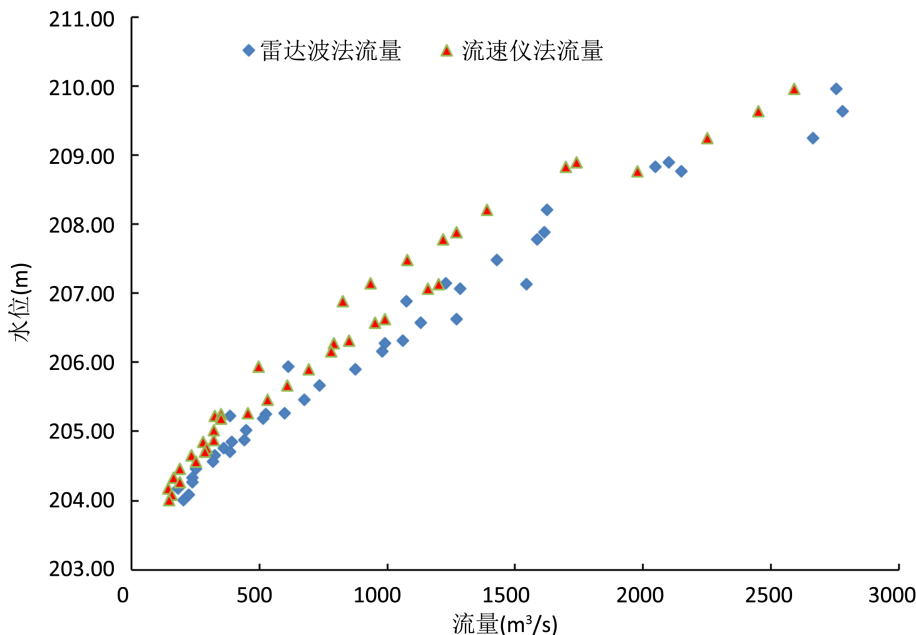


Figure 2. Flow distribution measured by current meter method and radar wave
图 2. 流速仪法流量和雷达波实测流量分布

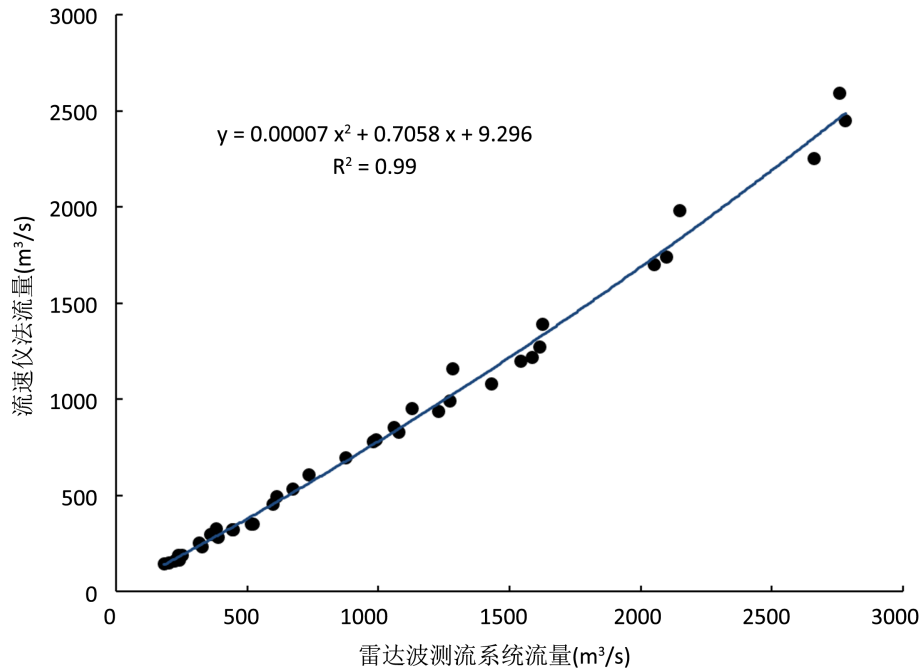


Figure 3. Relationship between flow rate of current meter method and flow rate of radar wave measurement system

图 3. 流速仪法流量和雷达波测流系统流量关系

Table 1. Analysis of flow rate error of current meter and radar wave measuring system

表 1. 流速仪法流量与雷达波测量系统率定流量误差分析

序号	日期	平均时间	基本水尺水位(m)	雷达波法流量(m ³ /s)	流速仪法流量(m ³ /s)	还原流量(m ³ /s)	还原误差(%)
1	2020-06-12	1:37	206.89	1077	827	851	2.90
2	2020-06-12	9:00	205.94	614	496	469	-5.44
3	2020-06-12	14:21	208.83	2050	1700	1750	2.94
4	2020-06-12	16:36	208.21	1625	1390	1341	-3.53
5	2020-07-15	9:56	207.78	1585	1220	1304	6.89
6	2020-07-15	13:05	208.89	2100	1740	1800	3.45
7	2020-07-15	22:22	207.48	1430	1080	1162	7.59
8	2020-07-16	9:55	207.88	1615	1270	1332	4.88
9	2020-07-22	10:31	207.15	1230	935	983	5.13
10	2020-08-21	23:50	205.22	384	326	291	-10.74
11	2021-05-03	16:37	204.18	184	143	141	-1.40
12	2021-05-15	17:43	204.46	254	189	193	2.12
13	2021-06-18	17:39	204.33	240	166	183	10.24
14	2021-07-05	17:47	205.25	524	352	399	13.35
15	2021-07-06	10:19	205.02	447	324	339	4.63
16	2021-07-06	13:30	204.85	391	281	296	5.34
17	2021-07-07	14:35	206.58	1130	953	896	-5.98

Continued

18	2021-07-07	17:05	206.27	990	792	777	-1.89
19	2021-07-08	10:09	204.65	327	234	248	5.98
20	2021-07-10	17:35	205.18	516	352	392	11.36
21	2021-08-09	14:40	204.76	360	296	272	-8.11
22	2021-08-09	17:40	204.57	318	251	241	-3.98
23	2021-08-09	22:52	204.26	239	189	182	-3.70
24	2021-08-11	19:29	205.26	598	455	457	0.44
25	2021-08-12	22:51	204.08	224	159	171	7.55
26	2021-08-13	17:41	205.46	676	533	518	-2.81
27	2021-08-14	8:48	204.88	443	324	335	3.40
28	2021-08-23	10:36	205.90	876	694	682	-1.73
29	2021-08-23	12:34	206.62	1273	993	1022	2.92
30	2021-08-23	16:31	206.32	1060	852	836	-1.88
31	2021-08-23	23:35	205.66	737	608	567	-6.74
32	2021-08-29	9:54	209.24	2663	2250	2385	6.00
33	2021-08-29	13:12	209.64	2780	2450	2512	2.53
34	2021-08-29	16:59	209.96	2757	2590	2487	-3.98
35	2021-08-30	1:24	208.77	2150	1980	1850	-6.57
36	2021-08-30	11:55	207.07	1285	1160	1032	-11.03
37	2021-09-04	11:04	204.70	385	286	291	1.75
38	2021-09-07	9:42	206.16	982	782	770	-1.53
39	2021-09-10	10:53	204.01	203	149	155	4.03
40	2021-09-19	10:16	207.13	1545	1200	1267	5.58

注：还原流量为实测雷达波虚流量通过关系 $Q = 0.00007 \times Q_{\text{雷}}^2 + 0.7058 \times Q_{\text{雷}} + 9.296$ 转换的实流量。

5.2. 水位流量关系检验

通过对雷达波法样本还原流量与巫溪(二)水位流量关系作检验分析, 巫溪(二)水文站属于二类精度水文站, 根据《水文资料整编规范》(SL/T 247-2020)定线精度指标, 单一曲线系统误差不超过 $\pm 1\%$, 随机不确定度不超过10%。由于雷达波测流方式为非接触测水面流速, 类似于水面浮标法测流, 因此, 参考 5.3.2 b) “采用水面浮标法测流定线随机不确定度可增加 2%~4%” 条款, 雷达波法测量随机不确定度可增加 2%~4%, 即 12%~14%, 最大不超过 14% [9]。统计曲线检验成果, 雷达波法还原流量的随机不确定度为 10.2%, 系统误差 0.3%, 检验结果满足规范要求, 成果详见表 2。雷达波测流系统还原流量离线偏差全部在 $\pm 10\%$ 以内, 最大偏差为-9.06%, 雷达波测流系统率定流量离线偏差分布见图 4。

Table 2. Check and calculate the relation curve of rate constant flow of radar wave measurement system
表 2. 雷达波测量系统率定流量关系曲线检验计算

序号	测流时间	基本水尺水位(m)	雷达波法还原流量(m ³ /s)	查线流量(m ³ /s)	偏差(%)
1	2021-09-10 10:53	204.01	155	149	4.03
2	2021-08-12 22:51	204.08	171	162	5.56
3	2021-05-03 16:37	204.18	141	140	0.71
4	2021-08-09 22:52	204.26	182	192	-5.21
5	2021-06-18 17:39	204.33	183	175	4.57
6	2021-05-15 17:43	204.46	193	190	1.58
7	2021-08-09 17:40	204.57	241	256	-5.86
8	2021-07-08 10:09	204.65	248	235	5.53
9	2021-09-04 11:04	204.70	291	287	1.39
10	2021-08-09 14:40	204.76	272	295	-7.80
11	2021-07-06 13:30	204.85	296	281	5.34
12	2021-08-14 8:48	204.88	335	331	1.21
13	2021-07-06 10:19	205.02	339	321	5.61
14	2021-07-10 17:35	205.18	392	369	6.23
15	2020-08-21 23:50	205.22	291	320	-9.06
16	2021-07-05 17:47	205.25	399	376	6.12
17	2021-08-11 19:29	205.26	457	454	0.66
18	2021-08-13 17:41	205.46	518	528	-1.89
19	2021-08-23 23:35	205.66	567	601	-5.66
20	2021-08-23 10:36	205.90	682	698	-2.29
21	2020-06-12 9:00	205.94	469	493	-4.87
22	2021-09-07 9:42	206.16	770	801	-3.87
23	2021-07-07 17:05	206.27	777	805	-3.48
24	2021-08-23 16:31	206.32	836	866	-3.46
25	2021-07-07 14:35	206.58	896	962	-6.86
26	2021-08-23 12:34	206.62	1022	990	3.23
27	2020-06-12 1:37	206.89	851	829	2.65
28	2021-08-30 11:55	207.07	1032	1132	-8.83
29	2021-09-19 10:16	207.13	1267	1211	4.62
30	2020-07-22 10:31	207.15	983	933	5.36
31	2020-07-15 22:22	207.48	1162	1098	5.83
32	2020-07-15 9:56	207.78	1304	1228	6.19
33	2020-07-16 9:55	207.88	1332	1256	6.05
34	2020-06-12 16:36	208.21	1341	1413	-5.10

Continued

35	2021-08-30	1:24	208.77	1850	1991	-7.08
36	2020-06-12	14:21	208.83	1750	1711	2.28
37	2020-07-15	13:05	208.89	1800	1745	3.15
38	2021-08-29	9:54	209.24	2385	2248	6.09
39	2021-08-29	13:12	209.64	2512	2439	2.99
40	2021-08-29	16:59	209.96	2487	2590	-3.98
样本数: N = 40			标准差: 5.1%		系统误差: 0.3%	
符号检验: u = 1.11			允许 1.15 (显著性水平 $\alpha = 0.25$)		合格	
适线检验: u = 1.28			允许 1.64 (显著性水平 $\alpha = 0.05$)		合格	
偏离数值检验: t = 0.36			允许 1.69 (显著性水平 $\alpha = 0.10$)		合格	

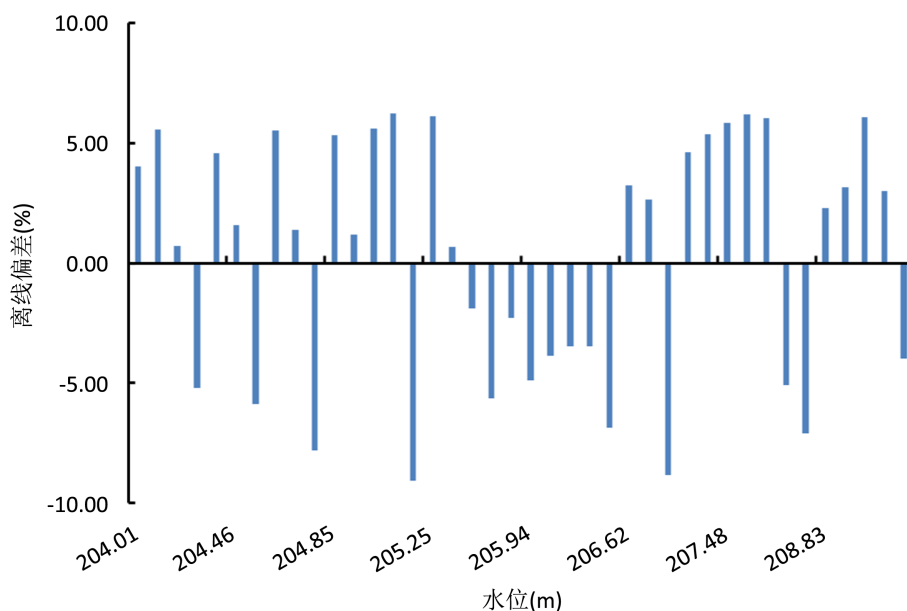


Figure 4. Off-line deviation distribution of constant flow rate in radar current measurement system
图 4. 雷达波测流系统还原流量离线偏差分布

6. 结论与建议

6.1. 结论

1) 雷达波测流系统能够按照设定的测验方案自动完成测流断面各设定垂线水面流速的监测，并通过后台处理软件快速计算出流量，是解决巫溪(二)水文站中高水流量自动测验的较好方案，为巫溪(二)水文站实现水文现代化、自动化提供有效技术支撑。

2) 通过分析，雷达波测流系统流量与流速仪法流量两者相关关系良好，雷达波测流系统率定流量定线精度指标满足规范要求，巫溪(二)水文站雷达波测流系统在水位 204~210 m 范围内可投产使用，推荐使用公式 $Q = 0.00007 \times Q_{\text{雷}}^2 + 0.7058 \times Q_{\text{雷}} + 9.296$ 作为雷达波测量系统流量换算关系。

6.2. 建议

1) 运用该系统实现无人值守测量时，工作人员要通过软件控制平台监控该系统设备的稳定状态，确保数据

采集、传输、处理、存储等功能正常。应经常检查更新借用水位及断面数据,分析水位流量过程以及流量误差,定期对设备进行维护检查。

2) 注意风、雨对测验精度的影响,定期对轨道钢缆进行检查加固,增强抗风性能及稳定性。测验过程中,密切关注水雨情环境因素,如遇大风大雨环境,应重点分析测量数据合理性,谨慎使用。

3) 水位采集系统目前为外接巫溪站自记水位系统,测量时采用前 5 min 的数据,水位有延迟,特别是洪水期急涨急落时,容易造成借用面积误差较大。在使用资料时,要通过后台中心软件对水位进行改正后重新计算并生成流量成果表。

4) 比测期间收集的同步率定资料有限,后续应每年收集一定数量的比测样本,对雷达测流系统流量关系进行检验,适时对推流方案进行优化,确保雷达波测量系统流量资料的准确性。

参考文献

- [1] 娄利华. 我国水文现代化建设现状及对策探讨[J]. 地下水, 2018, 40(3): 224-225.
LOU Lihua. Current situation and countermeasures of hydrological modernization in China. *Ground Water*, 2018, 40(3): 224-225. (in Chinese)
- [2] 刘代勇, 邓思滨, 贺丽阳. 雷达波自动测流系统设计与应用[J]. 人民长江, 2018, 49(18): 64-68.
LIU Daiyong, DENG Sibin and HE Liyang. Design and application of radar wave automatic current measurement system. *Yangtze River*, 2018, 49 (18): 64-68. (in Chinese)
- [3] 曹春燕. 水文现代化建设之水文站流量要素现代化监测及实现途径[C]. 第八届中国水利信息化技术论坛. 2020: 654-660.
CAO Chunyan. Monitoring and realization of hydrological station flow factor modernization in the construction of hydrological modernization. The 8th China Water Information Technology Forum. 2020: 654-660. (in Chinese)
- [4] 水利部水文司. 关于印发水文现代化建设技术装备有关要求的通知[Z]. 2019.
Department of Hydrology, Ministry of Water Resources. Notice on the issuance of hydrological modernization construction technology and equipment related requirements. 2019. (in Chinese)
- [5] 魏新平. 建立现代水文测报体系的实践与思考[J]. 中国水利, 2020(17): 4-6.
WEI Xinping. Practice and consideration on the establishment of modern hydrological survey and prediction system. *China Water Resources*, 2020(17): 4-6. (in Chinese)
- [6] 温川, 周启明. 雷达设备在水文应用中的探析[J]. 分析仪器, 2020(4): 144-148.
WEN Chuan, ZHOU Qiming. Analysis of radar equipment in hydrology. *Analytical Instrumentation*, 2020(4): 144-148. (in Chinese)
- [7] 欧阳鑫, 吕青松. 雷达波流速仪流量测验水面流速系数分析[J]. 地下水, 2022, 44(1): 245-247.
OUYANG Xin, LV Qingsong. Analysis of surface velocity coefficient in radar wave velocity meter discharge test. *Ground Water*, 2022, 44(1): 245-247. (in Chinese)
- [8] 河流流量测验规范: GB 50179-2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
Code for liquid flow measurement in open channels: GB 50179-2015. Beijing: China Planning Press, 2016. (in Chinese)
- [9] 水文资料整编规范: SL/T247-2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
Code for hydrologic data processing: SL/T247-2020. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2021. (in Chinese)