

宁桥水文站双缆定点雷达波测流系统应用分析

兰峰^{1,2}, 徐杨^{1,2*}, 熊浩淼¹

¹长江水利委员会长江上游水文水资源勘测局, 重庆

²重庆交通大学河海学院, 重庆

收稿日期: 2023年8月21日; 录用日期: 2023年9月18日; 发布日期: 2023年10月17日

摘要

本文围绕宁桥水文站双缆定点雷达波在线测流系统实际应用展开分析, 系统梳理了宁桥水文站特性和S3 SVR I型双缆定点雷达波在线测流系统的工作原理、显著优势和应用中的不足及对策, 并将其与转子式流速仪同步测验成果进行比测率定和关系验证分析, 结果表明, 二者相关关系良好, 雷达波自动测流系统测验成果满足相关规范要求, 是解决宁桥水文站中高水流量自动测验的较好方式之一。

关键词

雷达波测流, 宁桥水文站, S3 SVR I型, 比测分析, 投产应用

Application Analysis of Two-Cable Fixed Point Radar Velocity Measurement System in Ningqiao Hydrology Station

Feng Lan^{1,2}, Yang Xu^{1,2*}, Haomiao Xiong¹

¹Upper Changjiang River Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Chongqing

²School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

Received: Aug. 21st, 2023; accepted: Sep. 18th, 2023; published: Oct. 17th, 2023

Abstract

This paper analyzes the practical application of the two-cable fixed-point radar waveonline velocity measurement system, systematically reviews the characteristics and the working principle, advantages

作者简介: 兰峰(1972-), 男, 高级工程师, 从事水文水资源水环境相关研究工作。Email: 471914934@qq.com

*通讯作者 Email: 790335192@qq.com

文章引用: 兰峰, 徐杨, 熊浩淼. 宁桥水文站双缆定点雷达波测流系统应用分析[J]. 水资源研究, 2023, 12(5): 530-537.

DOI: 10.12677/jwrr.2023.125058

and shortcomings in application and countermeasures of the S3 SVR type I dual-line fixed-point radar waveonline velocity measurement system, and compares the measurement rate and relationship verification analysis with the synchronous test results of the rotating-element current-meter. The results show that the correlation between the two is good, and the test results of radar wave automatic current measurement system meet the requirements of relevant specifications, which is one of the better ways to solve the automatic test of middle and high-water flow in Ningqiao hydrological station.

Keywords

Radar Wave Velocity Test, Ningqiao Hydrology Station, S3 SVR I Type, Comparison Analysis, Production Application

Copyright © 2023 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

随着我国水文现代化的加速发展,为构建“驻巡结合、巡测优先、测报自动、应急补充”的水文监测体系[1],国家不断加大水文投入力度[2],提升水文测站自动化水平,对流量测验时效性要求也越来越高。在此背景下,实现流速流量的实时在线监测成为一项关键任务。雷达波自动测流技术应运而生,它是目前国内水文流量测验应用广泛的新型非接触式测流技术之一,集成自动监测、传输、计算等功能,具有非接触性、实时性、高精度等优点[3][4],可远距离定点测量水流流速,实现流量自动监测[5][6][7],为防汛抗旱和水资源管理提供有力支持,因此,加强其实际应用分析具有重要现实意义。

宁桥水文站常规测流方法为流速仪法,由于所在西溪河为山溪性河流,河水陡涨陡落,流量大,流速快,测量时间紧迫,涨水时上游冲来树木、杂草和巨石,易损坏测验设备,对测验工作者人身安全带来极大隐患,此外,过多漂浮物使浮标不易分辨,浮标测流难以实现。为解决宁桥站中高水流量施测问题,积极响应新时期建设水文现代化测报系统的要求[8],宁桥水文站于2021年4月1日在基本水尺断面下游15m处安装了S3 SVR I型双缆定点雷达波在线测流系统,调试后于2021年6月1日开始收集流量数据,截至2023年7月,共收集有效测流测次5138次,水位变幅294.26~298.48m,覆盖投产以来水位变幅的99%。

本文系统梳理了宁桥水文站特性和S3 SVR I型双缆定点雷达波在线测流系统的工作原理、显著优势和应用中的不足及对策,并将其与转子式流速仪同步测验成果进行比测率定和关系验证分析,以明确其实际投产应用的可行性,促进不同测流系统之间的有效衔接[9]。

2. 宁桥水文站概况

2.1. 宁桥站基本情况

宁桥水文站是大宁河西溪河控制站,于1988年3月由长江水利委员会设立,属国家基本水文站,位于重庆市巫溪县宁桥乡青坪村,109°34'E,31°34'N,集水面积685 km²,是为落实最严格的水资源管理制度、支撑“用水总量控制红线”等的监督考核、控制大宁河支流西溪河水情的三类流量测验精度的巡测水文站,现有水位、流量等测验项目。

2.2. 测站特性

宁桥水文站测验河段顺直长100m左右,距离河口8.3km,河槽为宽浅型,历年水位流量关系为单一曲

线。根据宁桥站历史资料分析, 295.00 m 以下、298.00 m 以上分别为低水、高水水位, 期间为中水水位。宁桥站常规测流方案是用水文缆道流速仪法按 3~9 线二点法施测测点流速。由于宁桥站来水现受上游梯级电站调蓄影响, 无较大洪水, 每年水位变幅较小, 近 10 年最大水位变化幅度为 2.88 m, 最大涨落率 1.5 m/h。由 2020 年至 2023 年大断面对比分析可看出, 宁桥站测流大断面近年无较大变化。宁桥站近 4 年大断面比较图见图 1。

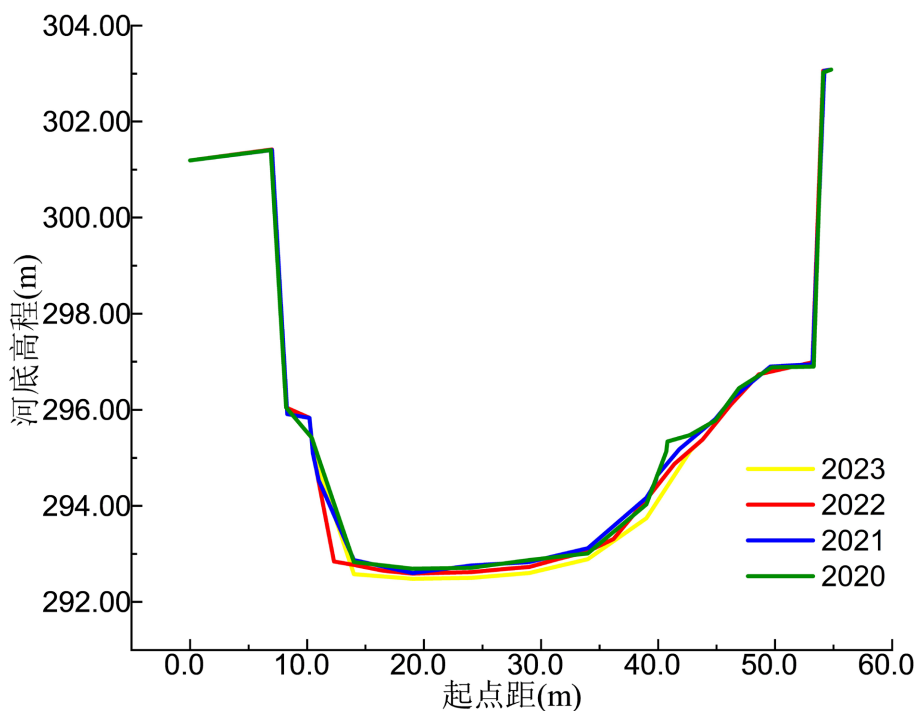


Figure 1. Change map of large section in 2020~2023

图 1. 2020~2023 年大断面变化图

3. 雷达波测流系统概况

3.1. 测流原理

宁桥水文站 S3 SVR I 型雷达波系统采用的是点流速多固定点表面测流的工作方式, 相比于单点或移动式测流方式, 多点式可实现多条垂线同步施测, 节省测量时间, 提高效率。多固定点表面测流系统与公路雷达超速监测相似, 将多个雷达波测速传感器探头用电缆连接, 探头向下倾斜约 45° 固定, 布设在断面不同起点距点位, 朝向逆水流方向。由 PLC、集成线路板及太阳能电池组成数据信号处理器, 雷达测流探头获取水流和断面数据后, 通过 GPRS 无线网络数据传输系统, 将所获信息传输至测流控制器(RTU)或中心站, 用户可通过数据集成软件可综合分析多条垂线实时流速流量数据, 实时监测、记录、传输和存储河道流量, 实现在线快速测流。还可根据水文测站和应急任务具体情况, 设置测流时间、断面参数、测流点位以及根据水位涨落自动加测等。

3.2. 设备情况

宁桥水文站双缆定点雷达波在线测流系统由简易双缆道、测流传感器总成、测流控制器、水位计和太阳能供电系统组成, 安装实景示意图如图 2 所示, 所有测流总成固定在缆道上, 定时采集流速和水位数据, 根据流速面积法计算得到流量, 适合高洪流量自动监测, 全程跟踪洪水过程。

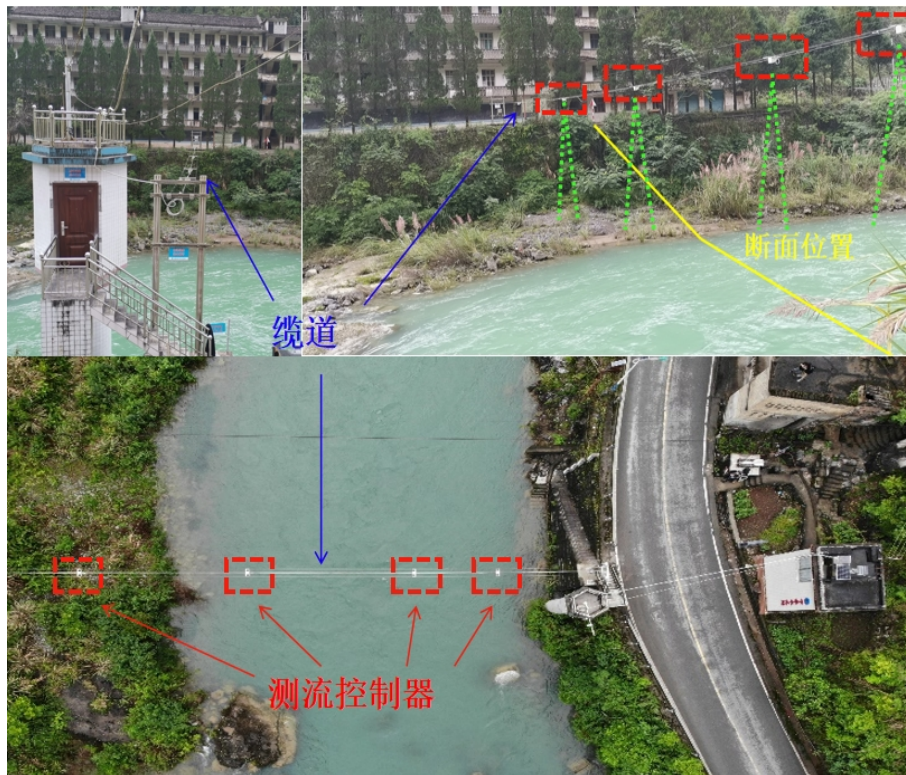


Figure 2. Schematic diagram of radar wave velocity measurement system installation at Ningqiao Station

图 2. 宁桥站雷达波测流系统安装实景示意图

宁桥站雷达波测流系统的测速范围为 0.1~20 m/s, 测速精度为 ± 0.01 m/s, 测速计时精度 1 s, 测速历时为 0~99.9 s (可人工调节), 波束宽度为 12° , 有效测程为 0~100 m。2021 年 6 月采集收集数据至今, 遭遇一次雷击导致供电模块烧坏, 但通讯芯片完好无损。在暴雨狂风环境下, 水面卷起风浪, 缆道和轻量测流控制器因气流和雨水滴落而无规律震摇, 数据采集与实测资料相比误差较大, 但系统运作状况总体稳定, 雷达波测流程序仪器故障率为 0%, 设备投产应用后应注意暴雨天气采集实测数据进行验证。

3.3. 系统特点

3.3.1. 自动化操作

雷达波测流系统通常具有自动化的操作过程, 可以长时间稳定地工作。它可以实现远程监控和远程数据传输, 减少了人工干预的需求, 系统可以根据水位实时变化情况和断面实际参数自行调整测流垂线数, 测流、无线传输、数据库管理和水文站业务处理于一体, 系统组件模块化, 运行、维护方便快捷。

3.3.2. 非接触性测量

雷达波测流系统无需物理接触水流, 可以在一定距离上进行测量。这意味着系统可以安全地在不可及或危险的区域进行测量, 减少了操作的复杂性和风险。

3.3.3. 实时连续监测

雷达波测流系统可以实时连续地监测水流的速度和流量。传统的测流方法通常是间歇性的, 而雷达波测流系统能够提供连续的数据, 全天候, 雨天、夜间可正常测流。24 V、8 Ah 专用电池组供电, 可连续运行 3 h 以上, 且有电量保护装置, 当电量不足时自动回泊进行充电。

3.3.4. 多种测流模式

具有按预设时间间隔定时测流、按预设水位变幅加测测流、远程操作监控软件启动测流、现场操作测流控制器启动测流等多种模式。

3.3.5. 后台中心水文站软件功能强大

每次测完流量后，系统将测流数据传输至后台中心水文站软件平台进行后处理，中心软件可对水位、断面等参数进行重新设置和计算，按照水文规范要求生成流量记载表、月报表、整编等表项，直接下载使用十分方便，每季度进行现场电瓶等基础维护即可。

3.4. 实际应用中的不足与对策

1) 雷达波测流成果易受水流条件、断面变化、风力和仪器自身因素影响，导致数据异常，尤其是暴雨狂风条件下，水流紊动无常，气流和雨水滴落导致缆道和轻量测流控制器无规律震摇，亦或是枯水条件下，水流缓慢，风力作用显著，通常情况下，顺风加速水流流动导致测量结果偏大，逆风阻碍水流流动导致测量结果偏小。对此，设备研发单位应加快开展风向风速对流量测验结果影响的相关研究，升级设备在恶劣天气和风力作用显著条件下的自动感知和率定功能。用户在投产使用过程中也应密切关注上述因素的特性变化，着重分析非常规工况下的数据合理性，必要时开展流速仪比测工作；

2) 比测数据在水位级和气象条件方面的局限性使得拟合关系不足以支撑任何工况下的流量换算，在今后的生产中应尽可能收集流量精测资料，尤其是大流量、极端天气、枯水等工况资料，不断优化换算关系；

3) 设备的稳定有效运行直接影响回传数据的精确性和可靠性，缆道和测流控制器长时间使用易变形和松动，影响垂线定位精度和测流角度，应定期进行设备、缆道、软件的维护与监管，保持探头角度稳定、在缆道上固定牢固，确保测流系统的长期有效运行；

4) 水位采集系统目前为外接宁桥站自记水位系统，测量时采用前 5 min 的水位数据，水位延迟造成借用面积误差较大，在洪水期急涨急落时尤为明显。实际生产中可通过后台中心软件对不同步的水位进行修改，然后重新计算生成流量成果表；

5) 目前测流仪器设备的电量回充装置仍需人工检查，建议扩展电量自动检查功能，搭载电量自检模块，减轻维护工作量。

4. 雷达波系统与传统转子式流速仪比测分析

4.1. 稳定性分析

为保证雷达波实测流量连续系列资料分析的一致性，本文对 2023 年 3 月 16 日至 2023 年 6 月 18 日间的 138 次雷达波流量进行稳定性分析。不同水位条件下各次雷达波流量相对偏差分布情况如图 3 所示，稳定性分析统计表见表 1，误差在 10% 以内的 137 次，占总样本的 99.3%，说明雷达波系统测流稳定性较好。

4.2. 率定分析与验证

本文将雷达波测流系统测验数据与传统转子式流速仪测验数据进行比测率定，采用宁桥站 2021 年 7 月 7 日至 2023 年 6 月 18 日间的 30 次实测雷达波流量数据与转子式流速仪实测流量建立相关关系，比测数据包含完整的丰平枯周期。率定期间的水位变幅为 294.88~299.22 m，流量变幅为 38.9~898 m³/s，雷达波流量和转子式流速仪实测流量在不同水位条件下的点绘图如图 4 所示。

回归分析结果表明雷达波流量和实测流量相关关系良好，其拟合关系式为 $Q_{实} = 0.9276 * Q_{雷} - 5.7596$ ，拟合关系图、率定误差分布图，分别如图 5 和图 6 所示。

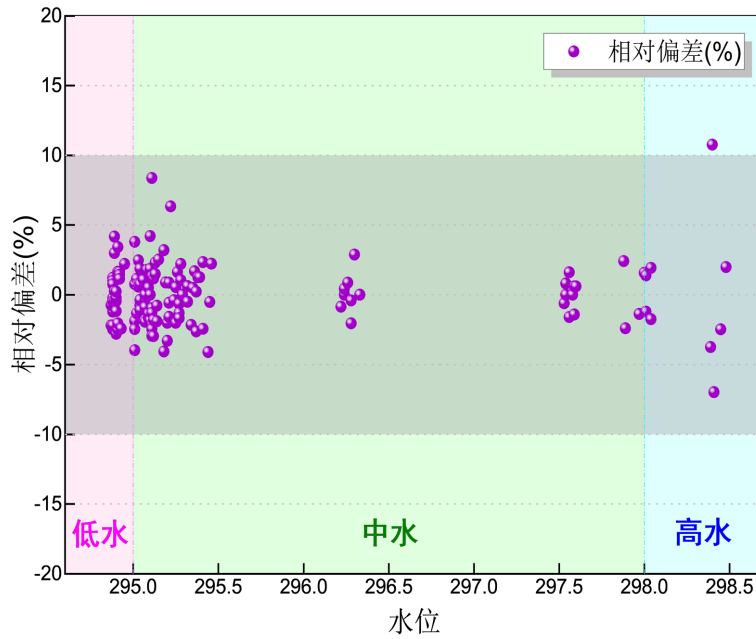


Figure 3. Radar wave measured flow relative deviation distribution
图 3. 雷达波实测流量相对偏差分布图

Table 1. Radar wave test stability analysis statistics
表 1. 雷达波测验稳定性分析统计表

相对偏差	<10%	10%~15%	15%~20%
次数	137	1	0
样本占比(%)	99.3	0.7	0

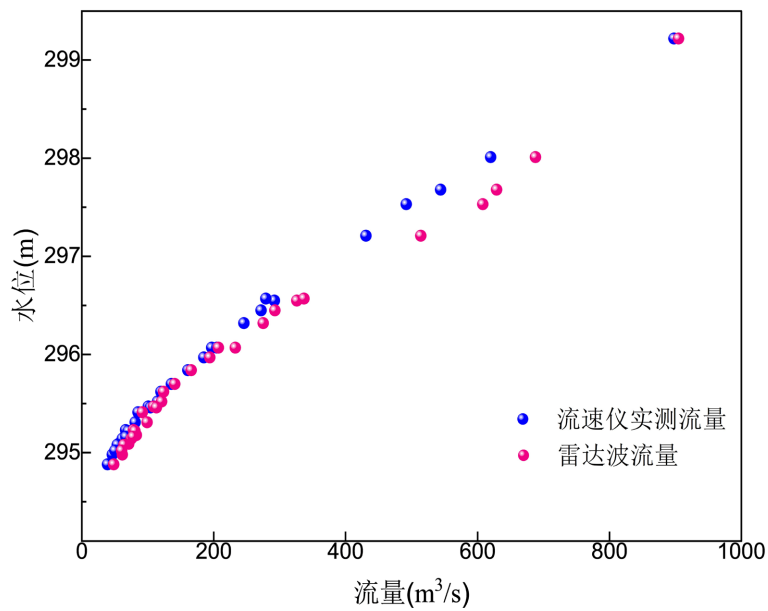


Figure 4. Water level and rotating current meter test flow/radar wave flow point plotting
图 4. 水位与流速仪流量/雷达波流量点绘图

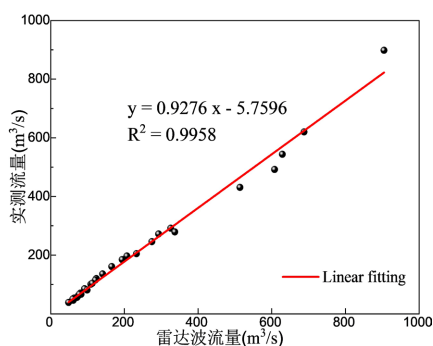


Figure 5. Fitting relationship graph
图 5. 实测与雷达波流量拟合图

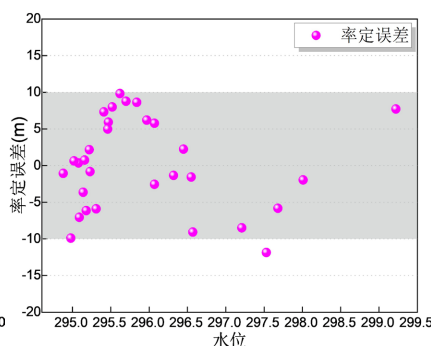


Figure 6. Rate error distribution
图 6. 率定误差分布图

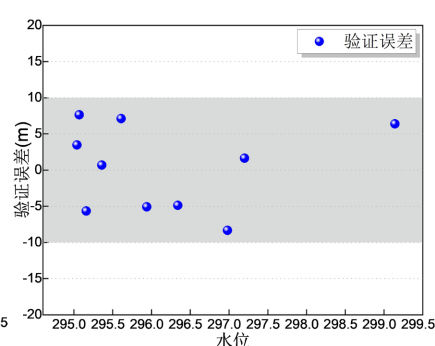


Figure 7. Verification error distribution
图 7. 关系验证误差分布图

为验证前文所得雷达波流量和实测流量的拟合关系,本文另选在率定周期内的 10 次雷达波流量资料对已率定的相关关系进行检验,率定计算表见表 2,验证资料水位变幅为 295.04~299.14 m,流量变幅为 60.8~903 m³/s,验证误差分布图如图 7 所示。

率定分析和验证的误差情况如表 3 所示,由表可知,雷达波流量与实测流量率定关系还原点据系统误差为 0.07%,随机不确定度为 12.4%。验证样本系统误差 0.30%,随机不确定度 11.2%,均满足水文资料整编规范[10] (SL/T247-2020)规定的单一曲线系统误差不超过±2%和随机不确定度不超过 14%等定线精度指标要求。

Table 2. The measured flow and the radar wave flow rate calculation

表 2. 实测流量和雷达波流量率定计算表

序号	水位(m)	实测流量(m ³ /s)	雷达波流量(m ³ /s)	率定实测(m ³ /s)	还原误差(%)
1	295.04	60.8	52.4	50.6	3.48%
2	295.07	62.8	56.5	52.5	7.63%
3	295.16	83	67.2	71.2	-5.66%
4	295.36	106	93.2	92.6	0.68%
5	295.61	130	123	114.8	7.12%
6	295.94	197	168	177.0	-5.07%
7	296.34	285	246	258.6	-4.87%
8	296.98	439	368	401.5	-8.33%
9	297.20	457	425	418.2	1.64%
10	299.14	903	885	831.9	6.39%

Table 3. The measured flow and the radar wave flow rate and verification error analysis

表 3. 实测流量和雷达波流量率定与验证误差分析统计表

误差类型	系统误差(%)	随机不确定度(%)	偶然误差大于 10%的个数	最大偶然误差(%)
率定误差	0.07	12.4	1	11.86
验证误差	0.30	11.2	0	-8.33

5. 结论

1) 在收集到的同时段内雷达波系统流量与实测流量的 40 次数据资料中,选取 30 次资料率定相关关系,另

外 10 次资料验证。分析可知,两者关系良好,系统误差小于 $\pm 2\%$,随机不确定度不超过 14%,满足水文资料整编规范(SL/T247-2020)相关要求。

2) S3 SVR I 型双缆定点雷达波在线测流系统建议在水位级 294.88~299.22 m 范围内投产使用,推荐使用公式 $Q_{\text{实}} = 0.9276 * Q_{\text{雷}} - 5.7596$ 作为宁桥站雷达波流量与实测流量的换算公式。

3) 雷达波在线测流系统在宁桥站的实际应用中易受水流气象条件影响,暴雨、狂风、枯水等条件均易导致数据异常,使用过程中应密切关注水流气象变化,必要时开展流速仪比测工作。

4) 雷达波在线测流系统由于自身测量的非接触性、实时连续性、高精度和可靠性,以及自动化操作功能,能够较好完成宁桥站测流断面各设定垂线水面流速的监测,是解决宁桥水文站中高水流量自动测验的较好方案之一。

基金项目

重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(CSTB2022TIAD-GPX0045)。

参考文献

- [1] 香天元,梅军亚.效率优先:近期水文监测技术发展方向探讨[J].人民长江,2018,49(5):26-30.
XIANG Tianyuan, MEI Junya. Efficiency first: A discussion on the development direction of hydrological monitoring technology in the near future. Yangtze River, 2018, 49(5): 26-30. (in Chinese)
- [2] 李敏欣,鲁祥.新模式下水文监测技术的现状及未来发展趋势[J].黑龙江水利科技,2020,48(2):257-260.
LI Minxin, LU Xiang. Current situation and future development trend of hydrological monitoring technology under new model. Heilongjiang Water Science and Technology, 2020, 48(2): 257-260. (in Chinese)
- [3] 雒仪. S3-SVR 型雷达波流速仪在泾河上游流域测验适用性分析[J]. 陕西水利, 2020(9): 27-28+31.
LUO Yi. Applicability analysis of S3-SVR radar wave current meter in the upper watershed of Jinghe River. Shanxi Water Resources, 2020(9): 27-28+31. (in Chinese)
- [4] 刘运珊,刘明荣.雷达波在线测流系统在崇义水文站的应用[J].江西水利科技,2020(4):286-291.
LIU Yunshan, LIU Mingrong. Application of radar wave online current measurement system in Chongyi Hydrographic Station. Jiangxi Water Science and Technology, 2020(4): 286-291. (in Chinese)
- [5] 曾佑聪,石瑞格,陈晨.雷达波在线测流及远程集控系统的应用[J].水力发电,2017(11):70-74,85.
ZENG Youcong, SHI Ruige and CHEN Chen. Research and application of radar wave on-line current measurement and remote centralized control system. Hydraulic Power Generation, 2017(11): 70-74, 85. (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 on the application of radar equipment in Hydrology. Analytical Instruments, 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, LYU Qingsong. Analysis of velocity coefficient of water surface measured by radar wave current meter. Groundwater, 2022, 44(1): 245-247. (in Chinese)
- [8] 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 thinking of establishing modern hydrological measurement and forecasting system. China Water Resources, 2020(17): 4-6. (in Chinese)
- [9] 詹戈. RG-30 型雷达波流速仪在后峡水文站适用性分析[J].地下水,2021,43(3):193-194.
ZHAN Ge. Applicability analysis of RG-30 radar wave current meter in Houxia Hydrographic station. Groundwater, 2021, 43(3): 193-194. (in Chinese)
- [10] SL/T247-2020 水文资料整编规范[S].北京:中国水利水电出版社,2021.
SL/T247-2020 code for compilation of hydrological data. Beijing: China Water & Power Press, 2021. (in Chinese)