

自驱移动雷达在线双向流量测验技术 在常州石堰闸的应用

孔令启¹, 仲兆林², 潘 杰², 王 鹏³

(1. 江苏省水利数字中心, 江苏 南京 210012; 2. 江苏省水文水资源勘测局常州分局, 江苏 常州 213022;
3. 南京美科华仪信息科技有限公司, 江苏 南京 210017)

摘要: 自驱移动雷达波在水文测流中的运用越来越广泛, 尤其在山区或航运等条件受限的河道, 常规接触式设备难以开展流量测验, 可以运用雷达这类非接触式设备开展监测。为了新沟河石堰闸水文站双向流量在线测验, 研发流向仪, 改造双向流量测验硬件和软件, 安装自驱移动雷达在线双向流量监测系统, 并开展双向流量测验比测率定, 进行运行精度和误差分析。研究成果可为新沟河调度运行以及移动雷达波技术运用提供技术参考。

关键词: 移动雷达波; 流量测验; 在线测流; 比测率定

中图分类号: TV131.66

文献标识码: A

文章编号: 1007-7839(2024)05-0011-0006

Application of self-propelled mobile radar online bidirectional flow test technology in Changzhou Shiyan Gate

KONG Lingqi¹, ZHONG Zhaolin², PAN Jie², WANG Peng³

(1. Jiangsu Water Resources Digital Center, Nanjing 210012, China;

2. Changzhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau,

Changzhou 213022, China; 3. Nanjing MIKE Huayi Information Technology Co., Ltd., Nanjing 210017, China)

Abstract: Self-propelled mobile radar wave is more and more widely used in hydrological flow measurement, especially in mountainous areas, shipping and other conditions restricted river, conventional contact equipment is difficult to carry out flow test, can use radar such non-contact equipment to carry out monitoring. In order to carry out online bidirectional flow test of Xingou River Shiyan Gate Hydrological Station, the flow direction instrument is developed, the bidirectional flow test hardware and software are transformed, the self-propelled mobile radar online bidirectional flow monitoring system is installed, and the bidirectional flow test is carried out to compare and calibrate, and the operation accuracy and error analysis are studied. The research results can provide technical reference for Xingou River dispatching operation and mobile radar wave technology application.

Key words: mobile radar wave; flow test; online flow measurement; comparison and calibration

水文站应用雷达测速技术进行水文断面流量监测, 从20世纪80年代开始, 雷达在线由1组(视断面宽及流态确定位置及个数)定点安装在桥梁或过河缆索上雷达传感器和测流控制器、水位计、无线

远传模块、太阳能供电系统、流量测验软件及中心水文站软件, 组成定点雷达在线测流系统。把雷达测流传感器(只需1个)安装在自驱移动行车上, 代替固定安装的雷达组, 在空中架设的钢丝绳轨道

收稿日期: 2024-02-04

作者简介: 孔令启(1986—), 男, 工程师, 本科, 主要从事水文自动测报、水利数字孪生及信息化管理工作。E-mail: 1437581110@qq.com

上,自驱移动到设定的测流垂线位置测速,形成自驱移动雷达测流方法^[1-2]。

水文站雷达测流技术属于非接触式。山区河道因为河道比降大且水流流速快,悬移质、推移质泥沙含量大及水面漂浮物体大面多,使得接触式的在线测流设施及水文缆道都不适用。非接触式技术的雷达及侧扫雷达在山区河道上游洪水监测中取得了巨大的成功。随着水文监测全要素全过程的高要求,测报技术现代化改造要求重点水文站建设第二套、第三套测验新技术保障设施。雷达在线测流因其技术成熟、稳定可靠,非接触式安全性高,监测中高洪水准确性及时性强备受关注,逐步应用到中下游平原地区的中、高洪水监测保障措施中^[3-4]。

平原水网区许多河道往往同时负担着汛期排洪及枯水干早期补水、调水任务,使得水文站需要双向流量测验,于是雷达波双向在线测流技术应运而生。单向自驱移动雷达测流方法自驱行车只需要安装1个雷达传感器,双向测流时需要在移动自驱行车上安装2个雷达传感器,加上流向仪监测流向,控制正负流向传感器的使用,就实现了自驱移动雷达测流方法的双向在线流量测验^[5]。

1 流量测验方法

1.1 自驱移动雷达测流

自驱移动雷达在线测流系统早期都是单向测流,在中、上游河道来洪水时施测中、高洪水流量。

1.1.1 设备组成结构

悬挂于钢丝绳缆道上的自驱行车,沿缆道轨道行走,停留在逐条垂线位置测量表面流速和相应水位。测完所有垂线后自动返回机箱里的停泊点,有充电桩由太阳能系统的蓄电池给行车电池充电(图1)。流量计算以多条垂线流速乘以垂线间面积得到部分流量,累加所有部分流量得到全断面流量。

设备安装完成后,在测流控制器上预设(也可远程设置)测站参数,包括大断面、测速垂线、水面流速系数、岸边系数、测速历时、加测条件、停测条件等测流参数。

系统根据配置参数,按以下4种测流模式启动测流:①根据预设的时间间隔定时测流;②根据预设的水位变率启动测流;③从远程服务器招测(需4G网络支持);④现场操作测流控制器启动测流(断网时)。

现场设备在网络中断时,可作为独立的雷达测

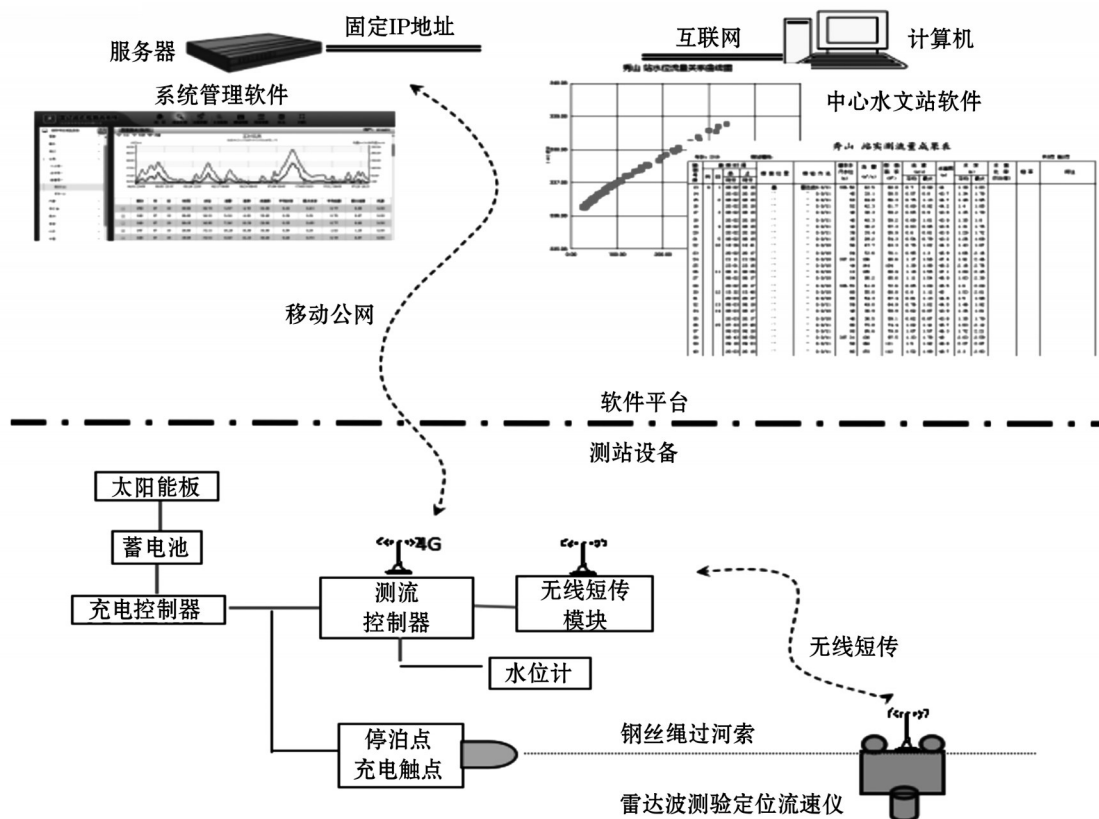


图1 自驱移动雷达在线测流系统结构

流设备使用,获得垂线流速并计算流量,完成流量测验任务。

1.1.2 安装方式

自驱移动雷达测流系统采用立杆安装方式,即设备安装在钢支架立柱上(图2)。

立柱顶端设计有仪器仓(雨棚),面向对岸方向有1个矩形孔(600 mm×500 mm),方便行车自由进出。测流控制器、太阳能板都固定在立柱上,自驱行车、电池及充电桩放在仪器仓内。对岸钢支架立柱杆固定简易缆道钢丝绳。

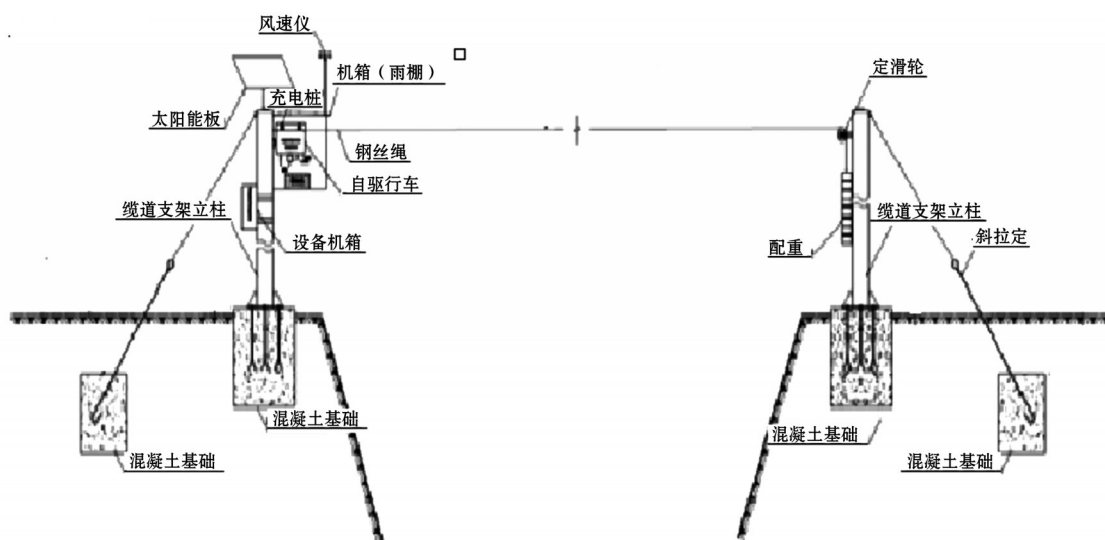


图2 自驱移动雷达在线测流设备安装示意

测流控制器机箱安装在水位井观测室或立柱上。测流控制器与行车采用无线电台方式通讯,采集行车起点距、流速、水位数据,并根据预置大断面、垂线组、岸边系数等测流参数计算流量。

2 双向自驱移动雷达测流

为克服早期自驱移动雷达在线测流系统只能单向测流的不足,研发了流向仪,构建雷达波双向在线测流方法。

2.1 设备组成结构

自驱移动雷达测流的双向在线流量测验方法,是在原有单向测流的基础上,增加流向仪和1个与原有反向的共2个雷达传感器(图3)。全自动流向仪每次测流前监测来水方向,测流控制器依照来水

方向指挥启动相对应的雷达传感器监测流速,得到相应的正流量或负流量。

2.2 流向仪技术简介

水流流向仪整体结构由流向度盘、流向标、流向轴、流向轴套管及流向传感器保护壳等组成,装在流向度盘上的磁棒与流向度盘组成磁罗盘的流向传感器用来确定流向方位。

流向传感器采用铝合金材料,使用特种模具精密压铸工艺,尺寸公差较小,表面精度较高,内部电路均经过防护处理,整个传感器具有很高的强度、防腐蚀和防水性。电缆接插件为军工插头,具有良好的防腐、防侵蚀性能,能够保证仪器长期使用,同时配合内部优质轴承系统,确保了流向采集的精确性。

电路PCB采用A级材料,确保了参数的稳定和电气性能的品质,电子元件均采用可靠的工业级芯片,使得整体具有极可靠的抗电磁干扰能力,能保证主机在-20℃~60℃,湿度在10%~95%范围内均能正常工作。

流向标、流向轴及流向轴套管采用不锈钢制作,按照水流流速仪的标准制作,保证灵敏度及耐用性。流向传感器用于监测流向的方向值,并转换为电信号,此信号可直传送到记录设备上进行处理。

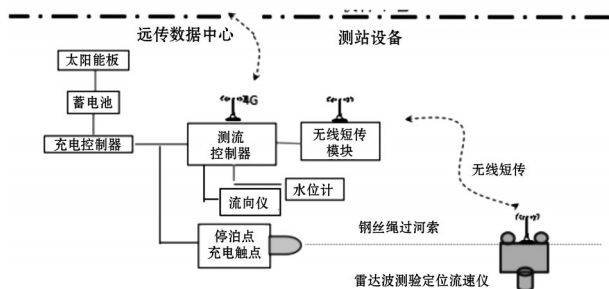


图3 自驱移动雷达双向在线测流测站设备

理。可测量水中东、西、南、北、东南、西南、东北、西北等多个方向。

3 设备应用

3.1 水系概况及水文特征

新沟河北接长江,向南至新建的石堰节制闸,分为东、西2支。西支利用已有的舜河、三山港向南偏西拓浚至大运河遥观北枢纽,过大运河后疏浚武进港至太湖武进港闸和雅浦港闸。其主要功能是在区域水位较高情况下,承担上游区域的涝水排江,水流方向主要由南向北至长江。在区域水位较低情况下,引长江水补充内河水网,水流方向为由北向南,其中石堰节制闸上游140 m处左岸为北塘河口。

石堰闸站为新设站,没有系列水文资料。根据常州(三)站水文资料和历史巡测资料推算,本站多年平均水位3.41 m,历史最高水位5.62 m(2017年9月25日,吴淞基面,下同),最低水位2.42 m(1968年6月24日)。根据石堰闸雷达波用水位计2023年1—9月的水位监测资料,本站平均水位3.58 m,最高水位4.68 m(6月19日),最低水位3.11 m(1月2日)。

3.2 设备安装及参数设置

石堰闸站承担上游区域的涝水,也承担区域水位较低情况下,引长江水补充内河水网,需要双向测流,采用自驱移动雷达双向在线流量测验方法。

石堰闸站采用井房与立柱相结合的安装方式。

(1)在新沟河西支东岸已建水位观测房内设有水位观测井,测流控制器和压力式水位计安装在水位观测房内。

(2)在新沟河西支两岸埋设立柱,立柱之间架设水文简易缆道,钢丝绳高度为石堰节制闸闸孔顶端以上0.5 m,满足通航要求。行车(含探头)等设备安装在东岸立柱顶端的仪器箱内,仪器箱面向对岸方向有一个矩形孔(600 mm×500 mm),允许行车自由进出。

(3)在观测场内埋设立柱安装太阳能板,通过

预埋线路连接站房仪器电池及立柱顶端机箱里的电池,分别给测流控制器及自驱行车充电桩供电。

(4)新沟河西支东岸安装流向计,通过预埋线路将流向信号传输到测流控制器。

石堰闸站测流设备采用定时、水位增量、电脑或手机远程召测及现场测流控制器召测4种测流启动方式(表1)。

当1次测流结束后,上传时间、水位、流量、断面面积、各垂线表面流速及各种工况等多个参数至常州分局内网服务器平台,可从平台首页上直接查看,并根据面积反算断面平均流速。为了流量的准确性,设定1次测流至少3条垂线有散射信号大于规定强度(一般的流速大于0.4 m/s)时,才进行流量计算,该次测验流量作为有效测次进行统一流量测次编号。1次测流少于3条垂线有大于规定强度的散射信号时,不进行流量计算,该次测验不列入统一测次编号,工作信息计入未编号测次备查。石堰闸2022年11月28日至2023年7月12日水位流量过程线(图4),清晰显示正负流量过程。

3.3 资料收集

3.3.1 走航式ADCP比测资料

石堰闸站2023年6—9月采用走航式ADCP比测流量共31测次,主要集中在6月暴雨洪水排涝期间和9月较大的排涝期间。其中,正流量2次,负流量29测次;实测最高水位4.34 m,最低水位3.48 m;按绝对值统计,实测最大流量 $-138\text{ m}^3/\text{s}$,最小流量 $27.8\text{ m}^3/\text{s}$;最大流速 -0.81 m/s 、最小流速 0.17 m/s 。比测的时空分布和新沟河西支水位及流速的大、中、小变化基本保持一致。

3.3.2 雷达在线测流同步资料

同步收集了比测期间雷达在线测流成果共31次,按绝对值统计,流速大于 0.40 m/s 的测次共21次。

3.4 关系率定

根据在石堰闸雷达在线测流的经验,雷达测流在流速小于 0.2 m/s 时,不能得到有效数据,基本不能采用;在流速大于 0.2 m/s 、小于 0.3 m/s 时,能测到

表1 测流设备运行方式参数设置

序号	运行种类	运行方式
1	定时设定	每日0、4、8、12、16、20时等6个时间点自行进行流量测验
2	水位增量	当水位比上一次流量测验时涨落0.10 m(可自行定),自行进行流量测验
3	远程召测	通过在线方式直接在常州分局服务器平台网页上点击“启动测流”,下发指令远程控制行车进行测流
4	现场召测	直接操作测流控制器,启动测流系统
5	垂线条数	设置7条垂线,垂线起点距依次为10、14、18、22、26、30、34 m

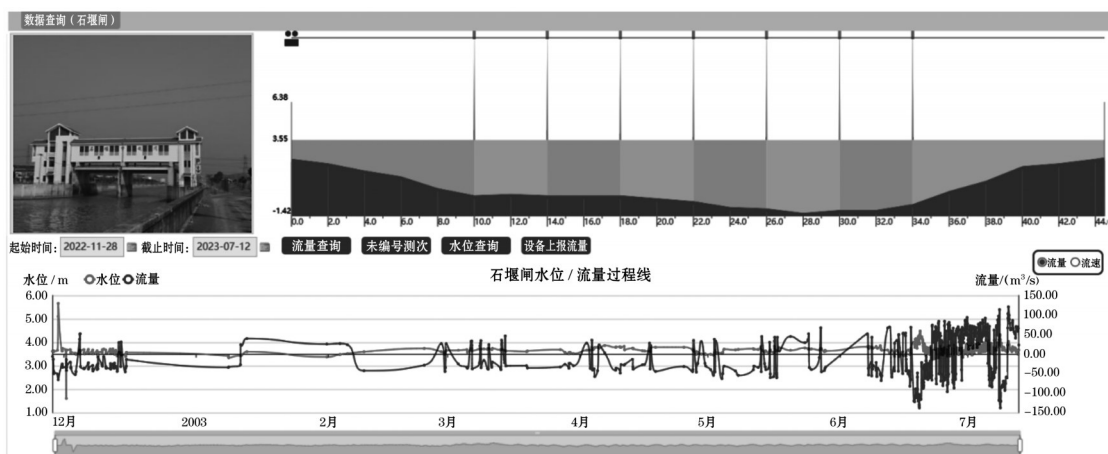


图4 石堰闸水位(正负)流量过程线示意

流速,但无规律性,仍不能使用;在流速大于0.3 m/s、小于0.4 m/s时,测得流速可以参考使用,但不可靠;当流速大于0.40 m/s,可以正常测流。因此仅对石堰闸流速大于0.40 m/s的21个测次进行关系线率定。

采用线性函数对2023年6月以来石堰闸站引、排水比测的21次有效数据进行综合定线,得到线性关系计算式为

$$\bar{V}=0.97 \times V_{\text{cp}} \quad (1)$$

式中: \bar{V} 为走航式 ADCP 实测断面平均流速, m/s; V_{cp} 为雷达在线测流代表流速, m/s。

石堰闸站雷达在线测流代表流速关系定线计算图如图5所示。从图5可以看出,正负流速小于0.40 m/s的测次,基本能够满足定线需求。

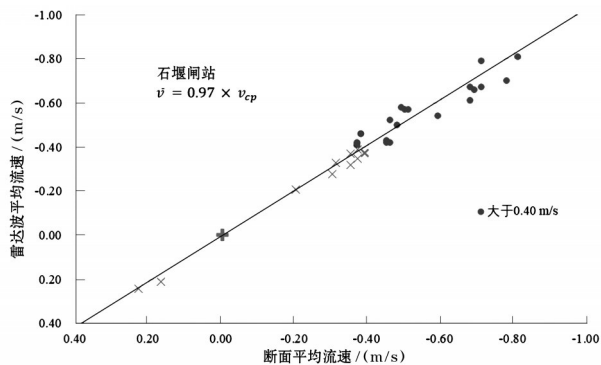


图5 石堰闸站雷达在线测流代表流速关系定线计算

3.5 流速关系线检验

根据《水文巡测规范》(SL195—2015),依据石堰闸站的流速关系线定线精度指标,对本站率定的雷达在线测流代表流速与全断面平均流速关系进行定线精度和合理性评定,结果符合相关规范。

3.5.1 定线精度检验

经分析计算,石堰闸站雷达在线测流代表流速

与全断面平均流速关系线系统误差-0.13%,随机不确定度 16.86%,符合《水文巡测规范》规定的三类精度水文站定线精度指标相关要求。

3.5.2 关系曲线检验

经分析计算,石堰闸站雷达在线测流代表流速与全断面平均流速关系线全部通过符号检验、适线检验和偏离数值检验,因此流速关系定线合理。

3.6 误差分析

3.6.1 ADCP比测资料误差分析

石堰闸站比测资料误差主要影响因素包括比测断面与雷达仪器箱的距离、流量比测时机、走航式 ADCP 流量自身的误差、水利工程调度、河网不同来水及受潮汐影响等。走航式 ADCP 法比测断面与雷达在线测流断面相距 70 m,分别位于石堰闸前后。走航式 ADCP 各次实测流量的2个测回的平均流量值的标准差和随机不确定度见表2。

表2 石堰闸站走航式 ADCP 单次流量测验误差精度评定

类别	标准差/%	随机不确定度/%
最大值	3.9	7.8
最小值	0.2	0.4
平均值	1.6	3.2
临界值	4~6	8~12
评价结果	合格	合格

测验河段主要受新沟河江阴水利枢纽和石堰节制闸的调度影响。采用走航式 ADCP 进行流量比测测验时,基本选择新沟河江阴水利枢纽开启节制闸或泵站引排水的时段,在江阴水利枢纽开启 2 h 后或关闭 2 h 前,以减小工程运用对水流影响导致流量测验误差。

测验河段属于感潮河段,水流为往复流。根据新沟河江阴水利枢纽的调度规则,新沟河主要以排涝为主。因此,新沟河西支水流主要是以北向为主(负流量),水流相对较大;向南流(正流量)历时较短,且水流相对较小。考虑到新沟河西支的感潮特性,用走航式 ADCP 进行流量比测时,基本选择较大的排水潮次。

3.6.2 雷达在线测流误差分析

石堰闸站雷达在线测流实测的是测验断面的表面流速,其测流误差因素主要包括设备特性、设备安装条件及受天气影响等。

雷达在线测流是通过发射特定频率的电磁波,将其照射到水面上,这些电磁波会在水面上发生反射、折射和散射。雷达接收系统接收到散射回来的电磁波,分析其回波信号频谱,可以计算出水流的速度。当测验断面水面流速较慢时,雷达波的折射、散射信号弱,测量误差相对增大。

石堰闸站雷达安装高度(通航要求)11.35 m,距离多年平均水位下的水面大约 7.94 m。同样条件下,安装高度越高,回波越弱,信号质量越差,特别是对水流速度低、波纹小的场景。雷达在线测流实测的是水体表面流速,不可避免受风力的影响。

3.6.3 率定成果误差分析

石堰闸站为三类精度的专用站。根据本站雷达在线测流流速的率定分析成果,定线的随机不确定度为 16.86%,系统误差为-0.13%,符合定线精度指标的要求,并通过流速关系线的 3 项检验。因此,本站率定成果误差较小,符合《水文巡测规范》(SL195—2015)中定线精度指标要求。

4 结论与建议

4.1 结论

(1)石堰闸站雷达在线测流代表流速与全断面平均流速的相关关系,是单一线法定线。在测流断面、流态没有较大变化的条件下,从较少测次到较多测次的率定分析结果均较为稳定,因此定线具有较好的代表性。本次率定的雷达在线测流代表流速与全断面平均流速关系,可应用于本站中、高洪水流量测验和报讯。

(2)石堰闸站雷达在线测流代表流速关系率定中,实测水位在 3.48~4.34 m 之间,实测断面引排水平均流速为-0.81~0.17 m/s。2023 年 1—9 月期间,本站平均水位 3.58 m、最高水位 4.68 m、最低水位 3.11 m。新沟河西支引水较少,正流量测次稍显不

足,虽然与排水综合分析,关系基本一致,还是需要进一步比测,收集引水大流量、大流速资料。

(3)比测期间,雷达在线测流代表流速范围基本在-0.41~-0.81 m/s 之间。《水文资料整编规范》(SL195—2015)规定,雷达在线测流代表流速与全断面平均流速关系线高水可上延 30%,低水可下延 15%应用。本站低水按-0.40 m/s 应用,高水上延 30%按-0.93 m/s 应用,代表流速法应用的范围为绝对值在 0.40~0.93 m/s 之间。

4.2 建议

(1)石堰闸站雷达在线测流投入生产应用后,需要抓好系统的运行维护工作,制定系统设备运行状态日常检查及维护保养办法,落实运行维护单位,确保系统能够正常运行并经常查看平台工况信息,及时掌握设备运行状况。

(2)流向仪是针对石堰闸双向测流新研发的设备,需要密切观察其工作状态,提升工作的可靠性,确保双向测流测验成果的可信度和精准性。

(3)雷达在线测流采用太阳能供电,需要定期检查太阳能供电情况,尤其在长期阴雨天气情况下,密切关注电池充电量,适当减少定时测次,除非大水不要召测,节省电量以保证测流仪器设备的正常运行。

(4)雷达在线测流的压力式水位计、流向计长期在水里运行,需专门运维单位对其及相关设备定期检查保养,对一些易损件要定期更换,确保测流数据的完整性和准确性。

(5)雷达在线测流中立柱及悬索等设备,长期在露天状态,容易产生锈蚀,需定期进行检查,必要时进行更换,以保证测流设备的安全运行。

参考文献:

- [1] 张培甫,罗碧喜. 缆道式雷达波自动测流系统在喀麦隆曼维莱水电站中的应用[J]. 水利水电工程设计, 2019(2):33-34.
- [2] 贺丽阳,刘代勇,邓思滨,等. 自驱式雷达波测流系统在西藏大江大河中的应用探讨[J]. 科学与信息化, 2020(12):22-27.
- [3] 梁后军,刘小虎,蔡国成,等. 二垂线式 ADCP 流量测量系统[J]. 水利信息化, 2013(4):26-29.
- [4] 封一波,武宜壮,胡菲菲,等. 小许庄水文站二线能坡法自动测流系统应用与分析[J]. 治淮, 2019(9):14-16.
- [5] 王德维,胡必要,周云,等. 基于二线能坡法的自动测流系统设计与应用研究[J]. 江苏水利, 2016(5):33-38.