

基于声学多普勒频差法的 自动测流设备应用

程建敏¹, 刘沂轩¹, 颜秉龙², 徐天文³, 赵国辉⁴

(1. 江苏省水文水资源勘测局连云港分局, 江苏 连云港 222004;
2. 连云港市水利规划设计院有限公司, 江苏 连云港 222003; 3. 连云港市水利局, 江苏 连云港 222002;
4. 雄安新区水文勘测研究中心筹备处, 河北 保定 071000)

摘要: 实现流量在线监测是提高水文测报现代化水平的重要前提, 目前水文自动测流技术研究中多普勒频差原理广泛应用, 自动测流设备适用程度较高, 能够实现自动化监测, 但不同设备又都有其局限性与应用范围, 具体自动测流方案的选择要充分考虑测流断面的特性, 同时必须根据历史数据与资料进行充分论证和精准分析。结合石梁河水文站测流断面, 从技术方面对垂直式声学多普勒流速剖面仪和侧扫雷达设备进行充分论证和精准分析。

关键词: 声学多普勒; 频差; 自动测流; 设备应用

中图分类号: TV131.66

文献标识码: A

文章编号: 1007-7839(2024)06-0033-0004

Application of automatic current measuring equipment based on acoustic Doppler frequency difference method

CHENG Jianmin¹, LIU Yixuan¹, YAN Binglong², XU Tianwen³, ZHAO Guohui⁴

(1. Lianyungang Bureau of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Lianyungang 222004, China; 2. Lianyungang Planning and Design Institute of Water Conservancy Co.ltd., Lianyungang 222003, China; 3. Lianyungang Water Conservancy Bureau, Lianyungang 222002, China; 4. Xiongan New Area hydrologic survey research center preparatory office, Baoding 071000, China)

Abstract: The realization of online flow monitoring is an important prerequisite for improving the modernization level of hydrologic measurement and prediction. At present, the research on hydrological automatic flow measurement technology mainly uses the principle of Doppler frequency difference. Automatic flow measurement equipment has a high degree of applicability and can achieve automatic monitoring. However, different equipment has its limitations and application scope. The specific selection of automatic flow measurement scheme should fully consider the characteristics of the flow measurement section, and must be fully demonstrated and accurately analyzed based on historical data and information. Combined with the flow measurement section of Shiliang River hydrological station, a comprehensive demonstration and accurately analysis of the vertical acoustic Doppler velocity profiler and side scanning radar equipment are conducted from a technical perspective.

Key words: acoustic Doppler; frequency difference; automatic current measurement; equipment application

收稿日期: 2024-01-04

作者简介: 程建敏(1979—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事水文水资源相关工作。E-mail: 43985484@qq.com

随着社会的发展,各级部门对水文信息的实效性和多样性提出更高要求,流量测验是水文工作的关键前提,其数据对防汛抗旱、水资源管理及水行政主管部门相关工作具有重要的作用。改进水文测报手段提升监测能力,实现流量在线监测是水文测报现代化的重要前提,对提高水文自动化程度和测流效率具有重要的意义。目前,自动测流技术研究主要集中在运用多普勒原理,主要有频差法和时差法两种。时差法仅适用于中速和低含沙量的水中,安装探头的河岸要求陡直且稳定,不易淤积,且需要两岸对向安装^[1],限制条件较多,应用比较少。频差法原理是较成熟的测流技术,应用较多。自动测流设备安装前一般会结合设备的使用条件进行定性的适用性判断,然而结合测站历史数据以及必要的比测数据进行定量的适用性分析经常被忽略,很大程度上造成了先进测流设备安装的盲目性。

本文以石梁河水库溢洪道测流断面为例,对几种较成熟的声学多普勒频差测速原理自动测流设备进行评价。

1 声学多普勒频差法简述

声学多普勒频差测速原理是建立在平稳随机过程基础之上的,声学多普勒传感器发射的超声波遇到水中和水一起流动的悬浮物产生反射,当水存在流动时,发射回来的信号频率和发射时的电磁波的频率是有差别的,所产生的这种偏移就是多普勒频差,根据反映频差大小的偏移来确定水流流速^[2]。

运用声学多普勒频差测速原理进行水文流速测量的设备主要有V-ADCP^[3],H-ADCP^[4]、侧扫雷达^[5]等,设备安装位置、工作模式有所不同。不同声学多普勒频差测速原理设备适用范围见表1。

表1 不同声学多普勒频差测速原理设备适用范围

名称	接触形式	安装位置	工作原理	适用范围
H-ADCP	接触式	河岸、桥墩等建筑物侧壁上	监测指标流速,计算断面流速	河宽小于100 m的规则河道,无滩地,岸坡较陡,流场稳定,水位变幅不大
V-ADCP	接触式	河底	监测代表垂线流速,推算断面平均流速	河道宽10~500 m的规则河道,冲刷变化小,适用流速范围大,适用水深为0.2~20.0 m
侧扫雷达	非接触式	河岸边	监测表面流场、网格点流速,推算断面平均流速	河道宽6~650 m,适用流速范围大,不受水面漂浮物等影响

2 自动测流方案选取实例分析

2.1 研究区概况

石梁河水库位于新沭河中游,承泄新沭河上游和沂河、沭河部分来水,集水面积15 365 km²,其中大官庄至水库区间集水面积915 km²,沭河大官庄以上集水面积4 350 km²,分沂入沭集水面积10 100 km²。石梁河水库总库容5.31亿m³,是一座具有防洪、灌溉、供水等综合功能的大(2)型水库,承担沂沭泗河洪水东调南下的行洪任务,工程枢纽包括主坝1座、副坝2座、泄洪闸2座、涵洞4座。石梁河水库北泄洪闸(老闸)30孔×4 m,设计流量3 000 m³/s,最大流量5 000 m³/s;南泄洪闸(新闸)建成于2001年,10孔×10 m,设计流量4 000 m³/s,最大流量5 131 m³/s。石梁河水库水文站在溢洪道总断面设有缆道测流断面。测验河段基本顺直段长度约900 m,下游约200 m处有弯道。测验河段上下游为人工河段,河

床和岸壁稳定,河底平整。

2.2 自动测流设备适用性分析

2.2.1 水平式声学多普勒流速剖面仪(H-ADCP)

选取2018—2021年共37次实测流量资料作水位流量关系分析,经过线性回归分析,水位流量关系相关系数 R^2 为0.9858,随机不确定度51.70%,相关关系尚好,但水位流量关系不稳定。

经综合分析,石梁河水库溢洪道测流断面宽280 m,断面左岸为块石护坡,右岸为沙壤土,断面位于新、老泄洪闸汇口下游约200 m处。当老泄洪闸单独开闸泄洪时,断面水流流向稳定。当新泄洪闸单独泄洪或新老泄洪闸同时开闸泄洪时,断面水流流向不正,横向流速不稳,且H-ADCP不具备安装条件,因此H-ADCP不适合作为石梁河水库溢洪道测流断面自动测流方案。

2.2.2 垂直式声学多普勒流速剖面仪(V-ADCP)

对于石梁河水库溢洪道,由于溢洪闸为2座,闸

下溢洪道以23.3°交角汇合后流经溢洪道测流断面,如果没有良好的单断关系或选取代表垂线单断关系代表性不佳,则可能导致自动测流系统建设失败。

对本断面历史流量资料进行分析,运用二线坡能法的垂线流速计算模型^[6]进行垂线优化分析。选取石梁河水库溢洪道2018—2021年共37次实测流量资料作为分析依据,其中涵盖了南溢洪闸、北溢洪闸单独开闸及南北溢洪闸同时开闸工况,涵盖了历时最大流量,测次及工况满足校测样本要求,37次实测流量资料为资料整编资料,未进行删减,质量可靠。石梁河水库溢洪道流量施测一般布置10条测速垂线,从起点距60~240 m,垂线间距20 m,采用一点法施测。选取起点距80~220 m测速垂线作单断关系分析,见表2。

由表2可以看出,100 m垂线单断关系良好,200 m垂线单断关系次之,80 m、220 m垂线单断关系不佳。考虑到设2个单波束声学多普勒剖面流速仪,确定起点距100 m固定,并考虑第二条垂线与100 m垂线有一定的间距,按2条垂线平均优选第二条垂线。2条垂线平均组合与断面平均流速关系见表3。

由表3可以看出,100 m垂线与200 m垂线平均与断面平均流速关系良好,随机不确定度仅11.4%,据此选定100 m垂线与200 m垂线作为V-ADCP安装位置。

根据石梁河水库溢洪道水位流量历史资料,实测流量44.8~4 540 m³/s,相应水位8.73~14.7 m。所选代表垂线对应的水深1.41~7.56 m。根据水位流量关系分析,在保坝最大溢洪流量10 131 m³/s情况下,最高水位18.19 m,相应最大水深11.05 m,现有的单波束声学多普勒剖面流速仪可以涵盖上述测量范围。因此,V-ADCP作为石梁河水库溢洪道测流断面自动测流方案可行。

2.2.3 侧扫雷达

在石梁河水库上游大兴镇测流断面安装侧扫雷达,流速传感器射频通道包含多个收发通道,成一定角度向水面发射,超声波与运动的水波发生共振,在雷达的回波多普勒谱上会有2个峰,分别对应正负的布拉格频率。以此原理对河流表面流场、网格点流速进行监测,通过水位、过流面积、断面表面流速比的相关关系计算断面流速。采用线性调频连续波雷达工作体制,雷达主机进行调制波形的发送及特定距离单元的回波接收^[7]。

自动测流设备数据采用缆道流速仪进行比测,实测流量范围354~2 280 m³/s。根据测流断面情况,选取起点距80~250 m共18条垂线作为分析依据。经试算,各条垂线流速与断面平均流速相关系数在0.949~0.969之间,相关性相近。直接用起点距80~250 m共18条垂线算术平均值作为侧扫雷达水面流速测速仪测的平均流速,根据缆道测流时间,时间

表2 石梁河水库溢洪道单断关系成果

序号	起点距/m	公式	R^2	随机不确定度/%
1	80	$y=0.8041x+0.0290$	0.9172	37.45
2	100	$y=0.8223x-0.0077$	0.9916	15.17
3	120	$y=0.8755x-0.0183$	0.9736	23.70
4	140	$y=0.8866x+0.0541$	0.9813	19.18
5	160	$y=0.9048x+0.0600$	0.9830	24.63
6	180	$y=0.9111x+0.0678$	0.9842	20.81
7	200	$y=0.9174x+0.0561$	0.9747	18.10
8	220	$y=0.8942x+0.1829$	0.9567	42.26

表3 石梁河水库溢洪道2条垂线平均组合与断面平均流速关系

序号	起点距/m	公式	R^2	随机不确定度/%
1	100与160组合	$y=0.8676x+0.0159$	0.9944	16.68
2	100与180组合	$y=0.8704x+0.0196$	0.9949	13.39
3	100与200组合	$y=0.8745x+0.0120$	0.9919	11.40

差在 10 min 以内的直接取用水面流速测速仪测的整点时间流速,时间差大于 10 min 的采用 2 个整点流速内插。流速率定优化关系式为 $y=0.003x^2+0.952x+0.069$,随机不确定度为 14.38%,可以满足资料整编要求。

石梁河水库溢洪道流量施测一般布置 10 条测速垂线,从起点距 60~240 m,垂线间距 20 m,采用 0.6 m 水深一点法施测。侧扫雷达根据需要,可布置 24~80 条垂线,对于石梁河水库溢洪道南北溢洪闸不同开闸组合、水流不稳情况更为有利,石梁河水库溢洪道断面稳定,侧扫雷达作为自动测流方案可行。

3 结 语

几种基于多普勒频差法的自动测流设备适用程度较高,不同设备都有其局限性与应用范围。具体自动测流方案的选择要结合具体的断面环境,通过水深、流速分布、含沙、水面漂浮物等定性的综合情况,确定设备类型是自动化设备选择必要的步骤。要使先进设备真正成为在线测流系统开展基本测流工作,必须要根据设备的工作原理和工作方式与测站的历史资料进行融合,深度意义上的因地制宜才能避免自动测流设备安装的盲目性,满足水文资料精度要求,真正实现自动化监测代替人工监测,提高监测能力,推进实现水文现代化。

要实现先进仪器符合水文测站的实际情况必须根据历史数据与资料进行分析,且不同的设备分析的侧重点不同。本文结合石梁河水文站测流断

面,从技术方面对垂直式声学多普勒流速剖面仪和侧扫雷达设备进行充分论证和精准分析。不同的垂线组合会使垂直式声学多普勒流速剖面仪测流系统得到不同的结果,因此进行单断关系分析,进行垂线组合优化是系统能否成功运行的一项关键工作,合适的垂线组合才能充分发挥出设备应有的功能。侧扫雷达测流系统的安装受限因素相对少,但是不同的使用方法、不同的算法会导致测验结果差异较大,因此进行必要的适用性评估,解决精度和算法问题才能保证侧扫雷达测流系统的精度和可靠性。

参考文献:

- [1] 苏海松,梁军,崔军,等.江苏省中小河流流量自动监测方案分析[J].江苏科技信息,2015(13):65-67.
- [2] 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.
- [3] 曹春燕,任凤仪.流量在线监测实用性分析及实现技术研究[J].人民黄河,2020,42(增刊2):11-13.
- [4] 郑月光,张丹凤,吴云浩.基于H-ADCP的天然河道流量测验分析[J].水利水电快报,2022,43(增刊2):8-9.
- [5] 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.
- [6] 陈艳,杨逸,姚红军,等.二线能坡测流法能坡测速垂线组合分析[J].水文,2022,42(5):62-64.
- [7] 赵占峰,王广青,丁建国.雷达测速仪在水文监测中的应用[J].内蒙古水利,2021(8):36-37.