

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200066

白河水文站表面流速代表性研究

左建¹, 邓山², 张洪霞¹, 顾盼¹, 连雷雷¹, 唐柏平¹

(1.长江水利委员会水文局 汉江水文水资源勘测局,湖北 襄阳 441022;

2.长江水利委员会水文局,湖北 武汉 430010)

摘要:白河水文站为汉江上游控制站,测验河段为山区性河道,洪水陡涨陡落、历时短,高洪流量测验难度较大,为推进测站自动化水平,实现流量监测在线化是必经之路。采用规划求解对白河水文站不同垂线组合下的表面流速与断面平均流速关系进行研究,确定了白河水文站不同测点表面流速测验的最优布设方案及对应的断面平均流速计算公式。结果表明:在白河水文站(河宽 296.4m),利用表面流速推求断面平均流速进而实现流量在线监测的方案是可行的,除“一垂线法”随机不确定度不能满足要求外,其余方案均能满足误差要求;垂线数越多,误差越小;不同垂线表面流速对断面平均流速的计算敏感度由高到低依次为 190m>165m>242m>120m>65m,其中起点距 190m 垂线和 165m 垂线对断面平均流速的计算重要程度基本相当。以上分析结论中不同测点表面流速的代表性及对应的断面平均流速计算公式可为推进测站自动化水平、提高白河站超标准洪水测验能力和测验时效性,实现流量在线监测提供支撑。

关键词:水文测验;流量在线监测;测点组合;表面流速

中图分类号:TV123 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0852(2021)03-0019-06

0 引言

随着水文设施装备和监测技术的自动化、现代化、信息化以及智能化发展,水文测验在线化是水文监测自动化的重要一环,目前流量在线监测技术渐趋成熟,推广应用前景较为明朗。

流量在线监测方式主要有接触式和非接触式两大类,其中接触式主要有声学时差法和固定式声学多普勒流速剖面仪等^[1],此类仪器测验精度较高,应用较为广泛,但是对断面形态、断面冲淤变化、水深等均有要求,应用范围受到限制;非接触式测流技术是一种新型的全天候流速流量自动监测技术,它不同于传统的转子流速仪、ADCP 等必须浸于水体的测验方法,该项技术主要通过传感器自动发射和接收功能,利用多普勒原理测定水面流速,辅以流速关系率定成果,进而实现非接触式的流量在线自动监测功能^[2-3]。非接触式在线

测流设备主要有固定式雷达测速仪、雷达侧扫测流系统、电波流速仪、大尺度粒子图像测速等,其对断面形态、流速等要求不高,适用范围较广。但非接触式测流设备只能测得表面流速,需要表面流速与断面平均流速有较好的相关关系才能准确推算出断面平均流速,进而计算出流量,实现流量在线监测^[4]。因此,非接触式在线监测设备投产前必须进行表面流速与断面平均流速的关系分析,确定表面流速与断面平均流速的关系,选定最优的表面测点布设方案,提高流量测验精度,同时节约投资^[5-6]。

水文站在引进现代化设备时,如未进行特性分析,仅凭经验安装,会造成代表性不佳,不能正式投产等问题。因此,长江委水文局提出,设备配备前应按照“一站一策”的思路进行测站特性分析,根据测站代表性配备相应在线监测设备。

本文对白河站表面流速与断面平均流速的代表

收稿日期:2020-01-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U20A20317)

作者简介:左建(1990—),女,湖北广水人,硕士研究生,中级工程师,主要从事水资源分析及水文测验方面的工作。E-mail:917404679@qq.com

性进行分析,确定白河站表面流速测点的最优布设方案,同时计算表面流速与断面平均流速的关系及误差指标。以期为推进白河站现代化水平、提高超标准洪水测验能力和测验时效性、实现流量在线监测等提供支撑。

1 研究区概况

白河水文站位于陕西省白河县(东经 $110^{\circ}07'$,北纬 $32^{\circ}49'$)距汉江河口 868km ,集水面积 $59\,115\text{km}^2$,占汉江流域面积的 37.18% ,是汉江中游的基本站,南水北调中线工程水源地——丹江口水库汉江入库控制站。控制断面测验河段较顺直,两岸临山,河床系沙、卵石组成,有冲淤变化。洪水主要由上游暴雨形成,一般集中在 $5\sim 10$ 月,水位暴涨暴落,变幅大。水位流量关系呈绳套曲线或临时曲线^[8]。

根据水文测验任务书,白河水文站常规测流方案,垂线起点距布设为 30m 、 45m 、 65m 、 85m 、 100m 、 120m 、 145m 、 165m 、 190m 、 210m 、 230m 、 242m 、 254m 、 274m ;高洪测验方案中流速仪法垂线起点距布设为 45m 、 85m 、 120m 、 165m 、 210m 、 242m 、 274m 。

2 测点组合方案

2.1 方案确定

白河水文站下游孤山电站建成蓄水后,白河站将受其顶托影响,中低水流量代表性丧失,垂线流速分布将变得紊乱,分析中低水实际意义不大,因此本文重点研究白河站高洪情况下($6\,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上)的表面流速代表性,同时为扩大样本容量,随机选取多次中低水流量加入分析。

根据测流成果及高洪测验垂线布设,考虑设备安装实际情况及多线多点法测验成果,通过后处理提取出5条测速垂线(起点距分别为 65m 、 120m 、 165m 、 190m 、 242m)的11点流速数据,利用规划求解分析率定不同测速垂线组合条件下(五垂线法、四垂线法、三垂线法、二垂线法、一垂线法)的垂线表面流速与断面平均流速的关系,并进行误差统计。白河水文站大断面及测验垂线布置如图1。

利用流速仪多线多点法资料,对率定的表面流速与断面平均流速的关系进行验证。

2.2 资料收集

(1)分析数据:2017年全年走航式ADCP测验数据包含了高中低水各水位级,资料代表性较好。2017年白河站全年实测流量110次,其中 $6\,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上20次

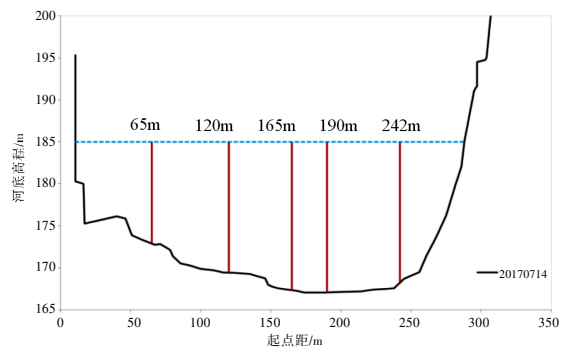


图1 白河水文站大断面及测验垂线布置
Fig.1 The section profile and hydrometry vertical layout of Baihe hydrological station

(浮标法1次)。重点选取白河站高洪情况下($6\,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上)的测次19次,同时为扩大样本容量,随机选取了14次中低水流量加入分析。

进行表面流速代表性分析时,由于流速仪多线多点法测验资料较少,本次采用走航式ADCP测验资料进行分析。由于走航式ADCP安装存在入水深及顶部盲区,并不能实测表面流速,进行流速提取时为拟合外延数据。

现有常规流量测验方法流速仪法、走航式ADCP法均不能实测水面流速,流速仪精测法采用的 0.0 相对水深实际上在水面以下 0.2m 处,走航式ADCP提取的水面流速为根据垂线流速分布外延而来的水面以下 0.2m 处流速,两者理论上位置一致,但均与严格意义上的水面流速有一定差别。同时雷达测速仪、侧扫雷达等表面流速测验设备在测量表面流速时也会穿透一定深度的水体,因此本文方法提取的表面流速进行的代表性分析可以作为表面流速测验设备是否适用的判定准则之一,但与实际情况会有一定程度的差别。

(2)验证数据:2010~2017年流速仪多线多点法测验数据。本次主要分析高洪条件下的垂线表面流速代表性,故验证数据选择大水年(2010年、2011年、2013年)的6个测次,流量均大于 $6\,000\text{m}^3/\text{s}$ 。

本文所采用的资料由汉江局提供并进行质量控制,资料完整无缺失。

3 表面流速代表性分析

3.1 率定关系及误差公式

对白河水文站2017年实测的走航式ADCP数据,选取5条常规测速垂线(起点距分别为 65m 、 120m 、 165m 、 190m 、 242m)的11点法数据,选用各垂线水面流速。采用五垂线法、四垂线法、三垂线法、二垂

线法、一垂线法,分别分析不同测速垂线组合条件下的表面流速与断面平均流速的关系,并进行误差统计。

垂线表面流速与断面平均流速的关系采用以下公式进行分析率定:

$$V_{\text{平}}=a \times v_{65}+b \times v_{120}+c \times v_{165}+d \times v_{190}+e \times v_{242}+f \quad (1)$$

式中: $V_{\text{平}}$ 为断面平均流速计算值; v_l 为实测的起点距为 l 的垂线水面流速,即水面测点流速; $a \sim e$ 为不同测点流速的系数; f 为常数。

进行规划求解时,以实测断面平均流速与计算断面平均流速的相对误差平方和最小为目标,在不同约束条件下,拟定计算值与实测值的最优关系,同时计算计算值与实测值的系统误差及随机不确定度,最终以系统误差和随机不确定度确定最优的测点布设方案。

相对误差平方和计算公式如下:

$$\delta=\sum_{i=1}^n\left(\frac{V_{i0}-V_i}{V_{i0}}\right)^2 \quad (2)$$

系统误差计算公式如下:

$$s=avg\left(\frac{V_{i0}-V_i}{V_{i0}}\right) \quad (3)$$

随机不确定度计算公式如下:

$$X'_v=2\left[\frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^n\left(\frac{V_{i0}-V_i}{V_{i0}}\right)^2\right]^{1/2} \quad (4)$$

式中: δ 为相对误差平方和; n 为测验次数,本文 $n=33$; V_i 为断面平均流速计算值(m/s); V_{i0} 为断面平均流速实测值(m/s); s 为系统误差; X'_v 为置信水平为95%的随机不确定度。

测点布设共31种方案,约束条件以三垂线的一种为例说明。规划求解步骤见式(5)~(6)。

目标函数:

$$\min\delta=\sum_{i=1}^n\left(\frac{V_{i0}-V_i}{V_{i0}}\right)^2 \quad (5)$$

约束条件:

$$\begin{cases} a-c \geq 0 \\ d=0 \\ e=0 \end{cases} \quad \text{其中 } a \sim c \text{ 为可改变变量} \quad (6)$$

3.2 结果及误差分析

通过公式(1)进行规划求解各垂线相关方案,以实测断面平均流速与计算值的相对误差平方和最小(见式(2))为目标,求解目标公式中的系数 $a \sim f$ 。各方案的系统误差及随机不确定度计算如表1所示,不同垂线组合条件下的最优方案的拟合关系见图2,不同流量条件下的实测流速与计算流速相关见图3。分析可知:

(1)随着相关垂线数的减少,断面平均流速实测值与计算值的系统误差和随机不确定度越大,即表面流速测点越多,表面流速与断面平均流速关系拟合越好。

(2)垂线组合方案中,五垂线法方案最优,其系统误差为0.08%,随机不确定度仅5.75%;四垂线、三垂线、二垂线组合的最优方案其随机不确定度均小于10%,一垂线法随机不确定度均大于10%(根据《水文资料整编规范》(SL 247-2012),一类精度水文站定线精度规定其随机不确定度应小于10%)。因此在选择测点垂线组合时,应尽量避免选择一垂线法。

(3)对比五垂线法和四垂线法最优方案可知,起点距65m的垂线表面流速对断面平均流速的计算敏感度最差,当选用4条垂线(120m,165m,190m,242m)测点流速计算断面平均流速时,其系统误差不变,随机不确定度仅增加了0.07%。故在使用非接触式测流设备进行测流时,可采用四垂线法推求断面平均流速。

(4)对比不同垂线组合方案中各垂线的系数可知,不同垂线表面流速对断面平均流速的计算敏感度由高到低依次为190m>165m>242m>120m>65m,其中190m垂线和165m垂线其敏感度基本一致,对断面平均流速的计算重要程度相当。因此,在不同测验条件下,可依据此敏感度选择不同垂线组合下的表面流速测验方案。

(5)断面平均流速与不同垂线组合表面流速的最优关系如表1所示,其中五垂线最优关系如下:

$$V_{\text{平}}=0.02 \times v_{65}+0.11 \times v_{120}+0.20 \times v_{165}+0.23 \times v_{190}+0.19 \times v_{242}+0.04$$

3.3 表面流速代表性验证

利用白河站流速仪多线多点法测验资料,对率定的最佳测速垂线组合下的表面流速与断面平均流速的关系进行验证。

由表2可知,当流量大于10 000m³/s时,五垂线、四垂线、三垂线、二垂线法最优关系计算的断面平均流速精度均较高,其中二垂线法计算误差最小,其最小绝对误差达0.03m/s;当流量小于10 000m³/s时,五垂线法计算值与实测值更为接近。

综合验证结果可知,白河水文站利用垂线表面流速推求断面平均流速是可行的。

4 结语

对高洪情况下白河水文站不同测速垂线组合方案的表面流速与断面平均流速的关系进行了研究,结果表明:白河水文站利用多垂线表面流速推求断面平

表1 不同测速垂线组合方案下的表面流速与断面平均流速关系及误差统计
Table1 Relationship between surface and average velocity and error statistics under different measuring schemes

起点距/m	65	120	165	190	242	—	系统误差 s	随机不确定度 X_r
系数	a	b	c	d	e	f		
五垂线法	0.02	0.11	0.20	0.23	0.19	0.04	0.08%	5.75%
四垂线	0.00	0.11	0.21	0.21	0.22	0.03	0.08%	5.82%
	0.03	0.00	0.26	0.26	0.21	0.00	0.10%	6.48%
	0.05	0.18	0.00	0.34	0.20	0.07	0.11%	6.92%
	0.00	0.16	0.30	0.00	0.31	0.08	0.11%	6.90%
	0.08	0.10	0.21	0.36	0.00	0.01	0.11%	6.81%
三垂线	0.00	0.00	0.28	0.24	0.25	0.00	0.10%	6.56%
	0.00	0.18	0.00	0.32	0.25	0.06	0.12%	7.13%
	0.00	0.16	0.30	0.00	0.31	0.08	0.11%	6.90%
	0.00	0.14	0.24	0.33	0.00	0.00	0.14%	7.72%
	0.06	0.00	0.00	0.51	0.19	0.00	0.17%	8.51%
	0.00	0.00	0.45	0.00	0.33	0.02	0.16%	8.24%
	0.13	0.00	0.25	0.38	0.00	0.00	0.15%	7.87%
	0.01	0.34	0.00	0.00	0.44	0.18	0.21%	9.46%
	0.11	0.17	0.00	0.48	0.00	0.04	0.15%	7.86%
	0.09	0.22	0.46	0.00	0.00	0.07	0.24%	10.15%
二垂线	0.00	0.00	0.00	0.47	0.28	0.00	0.18%	8.83%
	0.00	0.00	0.45	0.00	0.33	0.02	0.16%	8.24%
	0.00	0.00	0.37	0.33	0.00	0.00	0.29%	11.11%
	0.00	0.33	0.00	0.00	0.45	0.18	0.21%	9.47%
	0.00	0.18	0.00	0.52	0.00	0.00	0.20%	9.13%
	0.00	0.21	0.52	0.00	0.00	0.03	0.27%	10.77%
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.14	0.62%	16.28%
	0.16	0.00	0.00	0.61	0.00	0.00	0.21%	9.48%
	0.11	0.00	0.67	0.00	0.00	0.00	0.33%	11.88%
	0.20	0.59	0.00	0.00	0.00	0.26	0.53%	15.04%
一垂线	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.14	0.32%	15.03%
	0.00	0.00	0.00	0.68	0.00	0.00	0.31%	10.66%
	0.00	0.00	0.70	0.00	0.00	0.08	0.33%	10.90%
	0.00	0.62	0.00	0.00	0.00	0.47	0.52%	13.73%
	0.81	0.00	0.00	0.00	0.00	1.04	0.96%	18.68%

注:粗体为不同垂线组合的最优方案。

表2 不同垂线组合方案的计算断面平均流速误差分析
Table2 Error Analysis of average velocity in calculation section of different vertical combination schemes

时间	流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	实测流速/ $m \cdot s^{-1}$	计算流速/ $m \cdot s^{-1}$				
			五垂线法	四垂线法	三垂线法	二垂线法	一垂线法
20100719	21500	3.91	3.77	3.73	3.72	3.76	3.59
		绝对误差(m/s)	0.14	0.18	0.19	0.15	0.32
		相对误差(%)	3.48%	4.51%	4.87%	3.77%	8.29%
20110919	20100	3.84	3.71	3.69	3.69	3.77	3.48
		绝对误差(m/s)	0.13	0.15	0.15	0.07	0.36
		相对误差(%)	3.28%	4.00%	4.00%	1.87%	9.45%
20110914	15000	3.46	3.37	3.34	3.37	3.43	3.18
		绝对误差(m/s)	0.09	0.12	0.09	0.03	0.28
		相对误差(%)	2.73%	3.52%	2.68%	0.88%	7.96%
20100724	11200	3.44	3.29	3.27	3.25	3.31	3.07
		绝对误差(m/s)	0.15	0.17	0.19	0.13	0.37
		相对误差(%)	4.22%	5.05%	5.58%	3.77%	10.79%
20130723	7840	2.83	2.70	2.68	2.66	2.69	2.57
		绝对误差(m/s)	0.13	0.15	0.17	0.14	0.26
		相对误差(%)	4.70%	5.27%	5.98%	5.01%	9.36%
20130723	6950	2.71	2.45	2.43	2.39	2.42	2.30
		绝对误差(m/s)	0.26	0.28	0.32	0.29	0.41
		相对误差(%)	9.55%	10.19%	11.84%	10.65%	15.13%

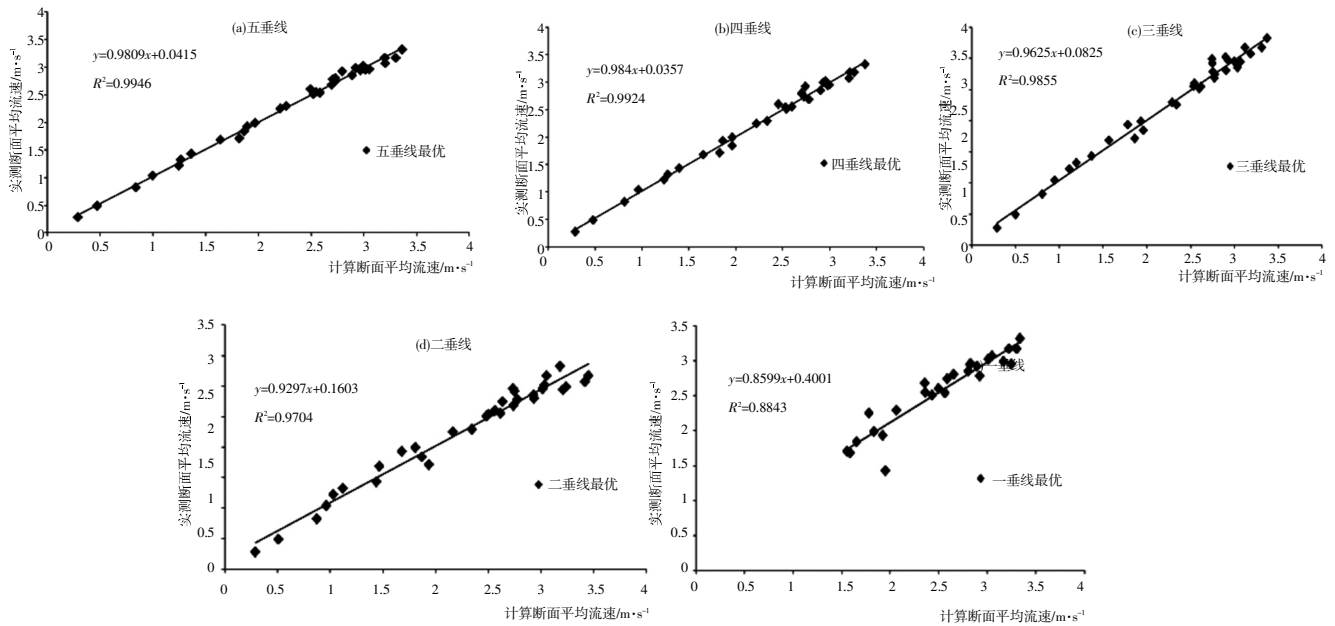


图2 不同垂线组合条件下的最优方案拟合
Fig.2 Optimal scheme fitting diagram under different vertical line combination conditions

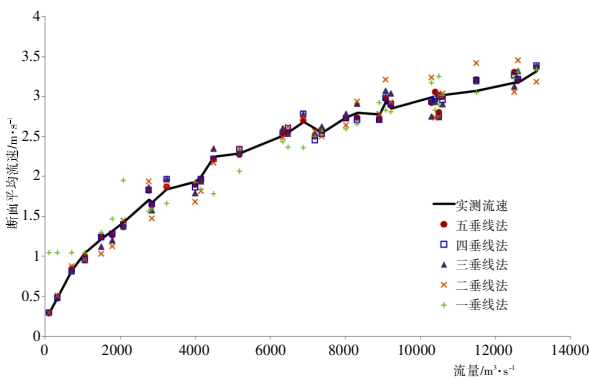


图3 不同流量条件下的实测与计算流速对比
Fig.3 Comparison of measured and calculated Velocity under different flow conditions

均流速进而实现流量在线监测是可行的,同时得到了不同测点的最优布设方案和相应的断面平均流速计算公式,为实现本站流量测验在线化提供参考。

(1)不同垂线组合中,断面平均流速的计算公式以五垂线法最优;四垂线、三垂线、二垂线组合的最优方案其系统误差均小于1%,随机不确定度均小于10%,一垂线法随机不确定度大于10%。因此在选择测点垂线组合时,应尽量避免选择一垂线法。

(2)不同垂线表面流速对断面平均流速的计算敏感度由高到低依次为190m>165m>242m>120m>65m,其中190m垂线和165m垂线对断面平均流速的计算重要程度相当。在测验条件较恶劣的环境下,可依据此敏感度选择不同垂线组合下的表面流速测验方案。

(3)选用四条垂线(120m,165m,190m,242m)测点流速计算断面平均流速时,其系统误差与五垂线法相同。故使用非接触式测流设备时,可应用四垂线法计算公式推求断面平均流速;测验条件恶劣情况下,可选用二垂线法计算公式进行推求。

(4)垂线表面流速推求断面平均流速精度较高,白河水文站可推广用于抢测高洪测验工作中。非接触式在线测流设备投产前,需进行必要的比测实验。可根据测站测验研究需要,增加流速仪多线多点法测次,以精测法数据对表面测点流速与断面平均流速的关系作进一步分析研究。

参考文献:

[1] 林祚顶. 水文现代化与水文新技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008. LING Zuoding. Hydrological Modernization and New Hydrological Technology [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2008. (in Chinese)
 [2] 周凌芸, 潘仁红. 非接触式雷达测流技术在阳朔水文站的应用[J]. 广西水利水电, 2014(2):56-59. (ZHOU Lingyun, PAN Renhong. Application of non-contact radar current measurement technology in Yangshuo hydrological station [J]. Guangxi Water Resources and Hydropower, 2014(2):56-59. (in Chinese))
 [3] 黄剑, 刘铁林, 王贞荣, 等. 非接触式雷达测流系统在吉安地区中小河流的应用研究[J]. 珠江水运, 2018,466(18):55-56. (HUANG Jian, LIU Tielin, WANG Zhenrong, et al. Application of non-contact radar current measurement system to small and medium rivers in Ji'an area [J]. Zhujiang Water Transport, 2018,466(18):55-56. (in Chinese))
 [4] 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.

- (LI Zili, WANG Caijun, LI Yonghui. Research on flow measurement algorithms based on UHF radar: Taking the Wuhan section of the Yangtze River as an example [J]. Wuhan University Journal (Science Edition), 2013,59(3):242-244. (in Chinese))
- [5] 谢运山, 赵德友, 张泉荣, 等. 单波束声学多普勒流速仪垂向在线测流应用研究[J]. 水利信息化, 2018,147(6):44-48. (XIE Yunshan, ZHAO Deyou, ZHANG Quanrong, et al. Application of vertical online flow measurement of Single Beam Acoustic Doppler Velocimeter [J]. Water Resources Informationization, 2018,147(6):44-48. (in Chinese))
- [6] 王伟. 天然河道垂线流速分布类型及其影响因素初探[D]. 重庆:重庆交通大学, 2017. (WANG Wei. Preliminary Study on Types of Natural River Channel Vertical Velocity Distribution and Its Influencing Factors [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [7] 汉江局十堰分局. 白河水文站瑞江声学多普勒流量测验比测分析报告[R]. 2014. (Shiyan Branch of Hanjiang Bureau. Comparative analysis report of Ruijiang Acoustic Doppler Flow test at Baihe hydrological station [R]. 2014. (in Chinese))

Representative Study of Surface Velocity at Baihe Hydrological Station

ZUO Jian¹, DENG Shan², ZHANG Hongxia¹, GU Pan¹, LIAN Leilei¹, TANG Baiping¹

- (1. *Hanjiang Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Changjiang Water Resources Commission, Xiangyang 441022, China;*
2. *Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China*)

Abstract: Baihe Hydrological Station is a control station of the upper reaches of the HanJiang River that is a typical mountainous river. The flood characteristics are steep ups and downs, and the duration is short. In order to deal with the complex water flow relationship, realizing the online monitoring is a vital way. The paper studied the relationship between the surface and the average flow velocity under the combination of different vertical lines of velocity measuring of Baihe Hydrological Station, and finally determined the optimal layout of different measuring points for non-contact flow measuring. The results show that it is feasible for Baihe Hydrological Station to use the surface flow velocity to estimate the average flow velocity of the section and carry out the online monitoring of flow rate. Other than ‘one perpendicular method’, the other schemes could all meet the error requirements. The more the number of vertical lines, the smaller the error; The calculation sensitivity order of different vertical lines to the average flow velocity of the section is 190m>165m>242m>120m>65m, of which the starting point of 190m and 165m vertical lines are equivalent. The surface velocity of the 65m vertical line is the least sensitive to the calculation.

Key words: hydrometry; online flow monitoring; measuring point layout; surface flow velocity

(上接第 56 页)

TOKASIDE Model and Its Application in Flood Forecasting

LIU Zhiyu^{1,2}, KONG Xiangyi¹, LI Zhijia²

- (1. *Information Center (Hydrology Monitor and Forecast Center), Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China;*
2. *Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Distributed hydrological physical model is a hot and difficult problem in current international hydrological research, and it is an effective way to solve the problem of hydrological forecast in the basin with insufficient data. Based on the research of orthogonal grid rainfall runoff model, in view of the problems existing in the distributed Topkapi model, such as generalization of confluence direction, singleness of runoff generation mode, and influence of reservoir regulation and storage, a grid distributed hydrological model TOKASIDE based on terrain movement and over infiltration runoff generation model is proposed. In this paper, the principle and structure of TOKASIDE model and the determination of model parameters were described. The 24 flood processes in the basin above Xixian of Huaihe River in humid area from 2007 to 2018, and 12 floods in Dali River basin between Shanshan section of Yellow River in semi-arid area from 2010 to 2017 were simulated. The results show that the TOKASIDE model has high simulation accuracy in humid basin, and it could improve the accuracy of simulation and calculation. It is of great significance to study hydrological simulation and flood forecast in semi-arid area. The TOKASIDE model could be used in flood forecasting, land use impact assessment, hydrological simulation in areas without data, and design flood calculation in small and medium-sized basins.

Key words: distributed hydrological model; TOKASIDE; flood forecast; humid; semi-arid