

# ADCP 流量生成模型及相应计算方法研究

韩继伟,符伟杰,唐跃平,邵 军

(南京水利水文自动化研究所 水利部水文水资源监控工程技术研究中心,江苏 南京 210012)

**摘 要:**如何快速准确监测河道流量,一直是水文学者研究的对象。ADCP 是一种先进的流量测验仪器。本文分析 ADCP 流量测验机理,提出 ADCP 流量生成模型的概念,分析出 ADCP 流量生成模型的结构,构建了 ADCP 流量生成模型。根据流量生成模型研制的 ADCP 流量计算程序计算结果和目前应用广泛的 Winriver 软件计算结果极其相似。ADCP 流量生成模型概念准确、结构合理,数据处理计算方法得当、研制的程序可靠。这为 ADCP 国产化奠定了坚实的基础。

**关键词:**ADCP 流量生成模型;流量计算方法;Winriver;编程

中图分类号:P335+.1

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)06-0009-05

## 1 引言

为了研究掌握江河流量变化的规律,为国民经济建设服务,必须积累不同地点、不同时间的流量资料,它既是防汛抗旱的基础数据,也是水利工程设计建设的重要数据。流量是单位时间内流过江河某一横断面的水量,单位为  $m^3/s$ 。流量是反映水资源和江河、湖泊、水库等水量变化的基本资料,也是河流最重要的水文要素之一。受自然条件和其他因素的影响,天然河流的流量大小悬殊,如我国北方河流旱季有断流现象,使得江河的流量变化错综复杂。如何快速准确监测河道流量,一直是水文学者研究的对象。

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 是声学多普勒剖面流速仪的简称,是一种先进的流量测验仪器。本文中的 ADCP 是指走航式声学多普勒剖面流速仪。国内水文学者对 ADCP 的研究主要是在应用层面。彭万兵等研究了 ADCP 系统中如何使用 GPS 和测深仪<sup>[1]</sup>,解决了高水期或高含沙条件下 ADCP 计算流量偏低,载体轨迹偏向上游的问题;蒋建平等研究了 ADCP 在泥沙扩散中的应用<sup>[2]</sup>,建立了回波强度与含沙量的关系;王爱军等研究了 ADCP 盲区数据处理及其在长江口等地应用<sup>[3]</sup>,对顶部和底部盲区流速做了初步探索。ADCP 流量计算方面的研究偏少。本文主要研究 ADCP 流量生成模型,根据流量生成模型研制的 ADCP 流量计算程序计算结果可靠,和目前应用广泛的 Win-

river 软件计算结果极其相似。为 ADCP 国产化奠定了坚实的基础。

## 2 ADCP 测流原理<sup>[4-6]</sup>

ADCP 是利用声学多普勒效应测量剖面水流速度的。ADCP 流量测验就是将航迹断面在水平方向分成  $m$  个微断面,每个微断面又沿垂直方向分成  $n$  个微单元,在每个微单元上施测面积和流速,得到微单元的流速和流量。根据微断面所有实测微单元的流速来计算微断面顶部盲区和底部盲区的流速,再根据换能器的入水深、航行速度和时间等参数计算出相应盲区的面积,得到顶底部盲区的流量,从而计算出微断面的流量,各微断面的流量及边沿盲区流量累加得到整个断面的流量。

## 3 ADCP 流量生成模型

ADCP 流量生成模型是为了得到断面流速分布、流量分布等特征值,利用 ADCP 测量的水跟踪、底跟踪、水深、纵横摇、罗经数据和航行时间等数据,建立起来的数学模型。

ADCP 流量生成模型具体研究内容包括:有效数据的判断及处理;导航数据的处理;纵摇横摇的补偿;罗经校准及补偿;波束坐标、仪器坐标和地球坐标之间的流速相互转换;边沿区和测量盲区流量的估算方法及处理。各个研究内容之间的关系,见图 1。

收稿日期:2013-11-12

基金项目:南京水利科学研究所基金资助项目(Y512008)

作者简介:韩继伟(1981-),男,江苏徐州人,硕士,研究方向为水文学及水资源。E-mail:zxhjwei2005@126.com

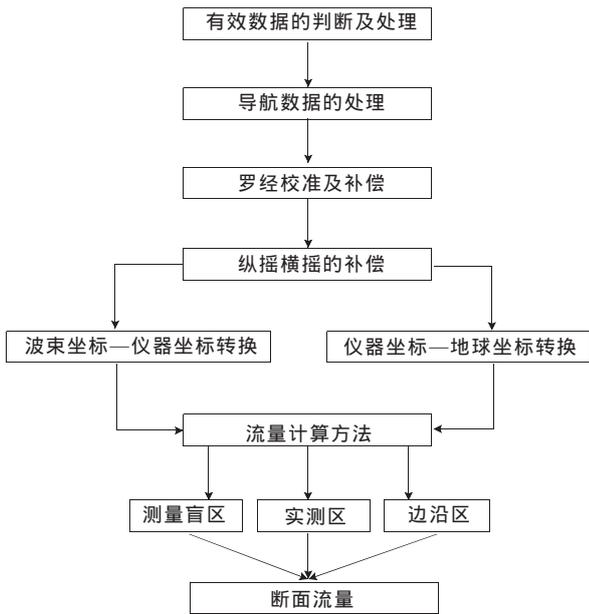


图1 ADCP 流量生成模型结构

Fig.1 ADCP flow generation model structure

有效数据的判断及处理就是对实测数据进行三种质量监控,相关性检测、鱼类影响的剔除、误差检测,其方法是将每个波束实测值与测流或测底命令所设的门限值进行比较,如果低于门限值,则将该数据标记为坏数据。导航数据处理的核心就是确定磁北与真北的夹角,水跟踪数据基准是磁北,而导航数据的基准是真北,计算时需统一基准。纵摇横摇的补偿主要是针对监测的水深、流速等数据,根据纵、横摇进行改正。罗经校准及补偿、坐标转换见参考文献[4]。

#### 4 ADCP 流量计算方法<sup>[4,7-9]</sup>

ADCP 流量计算主要是采用单元流速与船速矢量和微断面的深度平均流速矢量来推导公式的。

定义  $f$  为单元流速与船速的矢量积。

$$f=(u \times V_b)=u_x V_{by}-u_y V_{bx} \quad (1)$$

式中:  $u$  为微单元流速矢量;  $V_b$  为船速矢量; 角标  $x$  和  $y$  分别表示  $x$  和  $y$  方向的速度矢量。注意到叉乘积的结果与坐标无关,即:  $x-y$  可以是任意固定坐标。其结果是与船速和水流速度都垂直的一个矢量,大小等于以船速矢量和流速矢量为邻边的平行四边形的面积。

微断面航迹计算:

$$\begin{cases} HJ_x=V_{bx} \cdot \Delta t \\ HJ_y=V_{by} \cdot \Delta t \\ HJ=V_b \cdot \Delta t \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $HJ$  为微断面航迹长度, (m);  $HJ_x$  为微断面  $x$  方

向航迹长度, (m);  $HJ_y$  为微断面  $y$  方向航迹长度, (m);  $\Delta t$  为相应于微断面的测量时间平均步长, (s); 其余符号意义同前。

实测区流速流量计算:

$$V_{xM}=\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_{xj} \quad (3)$$

$$Q_M=\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_j D_c \Delta t=\sum_{i=1}^m [V_{xM} V_{by}-V_{yM} V_{bx}] \cdot (Z_1-Z_2) \Delta t \quad (4)$$

式中:  $V_{xM}$  为微断面实测区  $x$  方向的所有微单元平均流速, (m/s);  $u_{xj}$  为单元  $j$  中所测的  $x$  向流速分量, (m/s);  $Q_M$  为断面实测区流量, (m<sup>3</sup>/s);  $D_c$  为微单元深度, (m);  $V_{yM}$  为微断面实测区  $y$  方向的所有微单元平均流速, (m/s), 计算公式和  $V_{xM}$  一样;  $Z_1$  为微断面实测区底的水深, (m);  $Z_2$  为微断面实测区顶的水深, (m); 其余符号意义同前。

顶部和底部盲区流速和流量的计算, 有指数流速剖面法和常数流速剖面法, 指数流速剖面法应用比较普遍, 常数流速剖面法应用较少。这里是按指数流速剖面法计算的。其计算公式如下:

$$V_{xT}=\frac{D_c(H-Z_2^{b+1}-Z_1^{b+1})}{(H-Z_2)(Z_2^{b+1}-Z_1^{b+1})} \sum_{j=1}^n u_{xj} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Q_T &= \sum_{i=1}^m \left[ \frac{\Delta t D_c (H-Z_2^{b+1}-Z_1^{b+1})}{Z_2^{b+1}-Z_1^{b+1}} \sum_{j=1}^n f_{ji} \right] \\ &= \sum_{i=1}^m [V_{bx} V_{yT} - V_{by} V_{xT}]_i \cdot (H-Z_2)_i \Delta t \end{aligned} \quad (6)$$

$$V_{xB}=\frac{D_c Z_1^{b+1}}{Z_1(Z_2^{b+1}-Z_1^{b+1})} \sum_{j=1}^n u_{xj} \quad (7)$$

$$Q_B=\sum_{i=1}^m \left[ \frac{\Delta t D_c Z_1^{b+1}}{Z_2^{b+1}-Z_1^{b+1}} \sum_{j=1}^n f_{ji} \right] = \sum_{i=1}^m [V_{bx} V_{yB} - V_{by} V_{xB}]_i \cdot (Z_1)_i \Delta t \quad (8)$$

式中:  $V_{xT}$  为微断面顶部盲区  $x$  方向的平均流速, (m/s);  $H$  为微断面的水深, (m);  $b$  为指数, 据经验取 0.1667;  $Q_T$  为断面顶部盲区流量, (m<sup>3</sup>/s);  $V_{yT}$  为微断面顶部盲区  $y$  方向的平均流速, (m/s), 计算公式和  $V_{xT}$  一样;  $V_{xB}$  为微断面底部盲区  $x$  方向的平均流速, (m/s);  $Q_B$  为断面底部盲区流量, (m<sup>3</sup>/s);  $V_{yB}$  为微断面底部盲区  $y$  方向的平均流速, (m/s), 计算公式和  $V_{xB}$  一样; 其余符号意义同前。

对于岸边盲区, ADCP 不能测出其流速和流量, 利用经验方法按式(11)估算。岸边区域根据底坡可以近似为三角形或矩形, 程序中近似为三角型。

$$V_x = \frac{1}{H} [Z_1 V_{xB} + (Z_2 - Z_1) V_{xM} + (H - Z_2) V_{xT}] \quad (9)$$

$$V_m = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (10)$$

$$Q_{ab} = \alpha A_\alpha V_m \quad (11)$$

式中:  $V_x$  为岸边盲区  $x$  方向的深度平均流速, (m/s);  $V_m$  为岸边盲区的深度平均流速, (m/s);  $V_y$  为岸边盲区  $y$  方向的深度平均流速, (m/s), 计算公式和  $V_x$  一样;  $Q_{ab}$  为岸边盲区流量, ( $m^3/s$ );  $\alpha$  为岸边流速系数, 依据《河流流量测验规范》取值;  $A_\alpha$  为岸边盲区面积, ( $m^2$ ); 其余符号意义同前。

断面流量计算:

$$Q = Q_{ab} + Q_T + Q_M + Q_B \quad (12)$$

式中:  $Q$  为断面流量, ( $m^3/s$ );  $Q_{ab}$  为岸边盲区流量, 包含左岸盲区流量和右岸盲区流量( $m^3/s$ ); 其余符号意义同前。

### 5 和 Winriver 计算结果的比较分析

Winriver 是 RDI 公司开发的 ADCP 数据采集处理软件。目前 ADCP 基本都使用这款采集软件。根据 ADCP 河道流量测量原理和方法及相关文献采用 C 语

言编制了 ADCP 流量计算程序。

现以四川阆中站 2008 年的测验数据为例, 编制程序计算的断面流量为  $413.053m^3/s$ , 其中顶部盲区  $59.09m^3/s$ , 实测区  $314.792m^3/s$ , 底部盲区  $39.171m^3/s$ ; 曲线航迹长度  $426.31m$ ; 直线航迹长度  $420.43m$ ; Winriver 软件计算的断面流量  $413.1m^3/s$ , 其中顶部盲区  $59.1m^3/s$ , 实测区  $314.8m^3/s$ , 底部盲区  $39.2m^3/s$ ; 曲线航迹长度  $426.31m$ ; 直线航迹长度  $420.43m$ 。两者流量相差甚微, 其中断面总流量相差  $0.041m^3/s$ , 相对误差为  $0.010\%$ 、顶部盲区相差  $0.01m^3/s$ , 相对误差为  $0.017\%$ 、实测区相差  $0.08m^3/s$ , 相对误差为  $0.025\%$ 、底部盲区相差  $0.029m^3/s$ , 相对误差为  $0.074\%$ ; 这说明研制的计算程序和 winriver 相比流量结果稍微偏小点; 航迹长度一点不差, 完全一样。

对整个断面的顶部盲区、实测区、底部盲区、微断面的流量差值做了统计, 顶部盲区最大差值  $0.463m^3/s$ , 相对误差为  $0.890\%$ ; 实测区最大差值  $2.035m^3/s$ , 相对误差为  $0.734\%$ ; 底部盲区最大差值  $0.268m^3/s$ , 相对误差为  $0.922\%$ ; 微断面最大差值  $2.739m^3/s$ , 相对误差为  $0.769\%$ 。

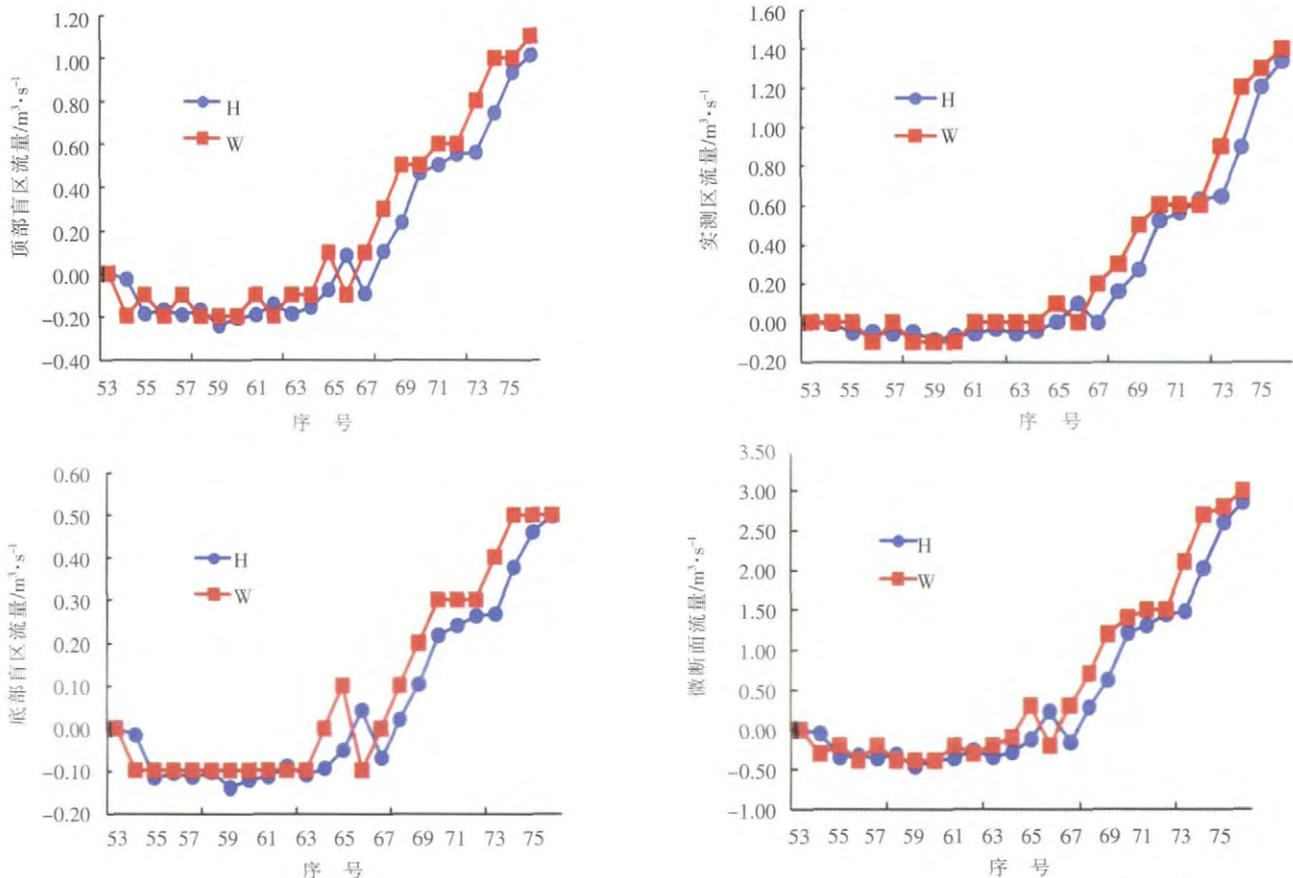


图2 岸边附近各区域流量对比图

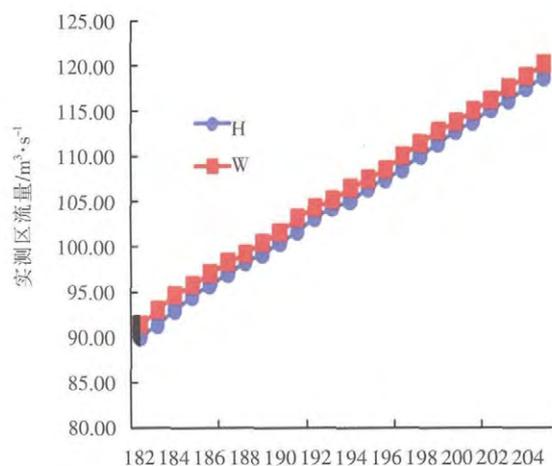
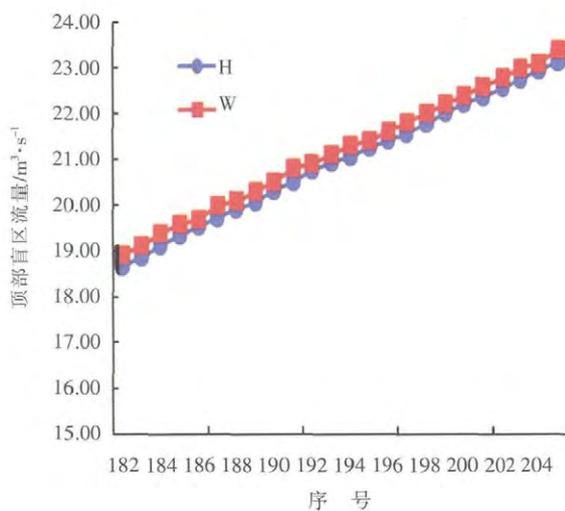
Fig.2 Comparison between the area flows near the shore

为了更全面的对比分析两种计算结果的差异,特选取两部分断面数据进行对比分析,一部分是断面的岸边附近的测验数据,数值较小见表1,表中H表示编制程序计算结果,W表示Winriver软件计算结果(以

下图表中H、W均表示此含义);另一部分是断面中泓附近的测验数据,数值较大见表2,这样选取就能更全面的分析两者的差异。点绘每部分每个区域的对比图,见图2~3。

表1 岸边附近计算结果对比表  
Table1 Comparison between the calculated results using the data got near the shore.

序号	顶部流量		实测流量		底部流量		微断面流量	
	H	W	H	W	H	W	H	W
53	0	0	0	0	0	0	0	0
54	-0.026	-0.2	-0.007	0	-0.016	-0.1	-0.05	-0.3
55	-0.191	-0.1	-0.054	0	-0.117	-0.1	-0.361	-0.2
56	-0.173	-0.2	-0.049	-0.1	-0.105	-0.1	-0.327	-0.4
57	-0.193	-0.1	-0.06	0	-0.114	-0.1	-0.367	-0.2
58	-0.171	-0.2	-0.048	-0.1	-0.104	-0.1	-0.323	-0.4
59	-0.245	-0.2	-0.089	-0.1	-0.139	-0.1	-0.473	-0.4
60	-0.209	-0.2	-0.069	-0.1	-0.121	-0.1	-0.399	-0.4
61	-0.195	-0.1	-0.061	0	-0.114	-0.1	-0.37	-0.2
62	-0.146	-0.2	-0.034	0	-0.09	-0.1	-0.27	-0.3
63	-0.188	-0.1	-0.057	0	-0.111	-0.1	-0.356	-0.2
64	-0.159	-0.1	-0.041	0	-0.095	0	-0.295	-0.1
65	-0.079	0.1	0.004	0.1	-0.052	0.1	-0.127	0.3
66	0.086	-0.1	0.096	0	0.043	-0.1	0.225	-0.2
67	-0.093	0.1	-0.004	0.2	-0.069	0	-0.167	0.3
68	0.101	0.3	0.156	0.3	0.019	0.1	0.277	0.7
69	0.238	0.5	0.271	0.5	0.103	0.2	0.612	1.2
70	0.464	0.5	0.521	0.6	0.217	0.3	1.202	1.4
71	0.5	0.6	0.561	0.6	0.239	0.3	1.3	1.5
72	0.55	0.6	0.629	0.6	0.261	0.3	1.44	1.5
73	0.56	0.8	0.642	0.9	0.266	0.4	1.468	2.1
74	0.744	1	0.897	1.2	0.375	0.5	2.016	2.7
75	0.931	1	1.204	1.3	0.458	0.5	2.592	2.8
76	1.01	1.1	1.335	1.4	0.497	0.5	2.842	3



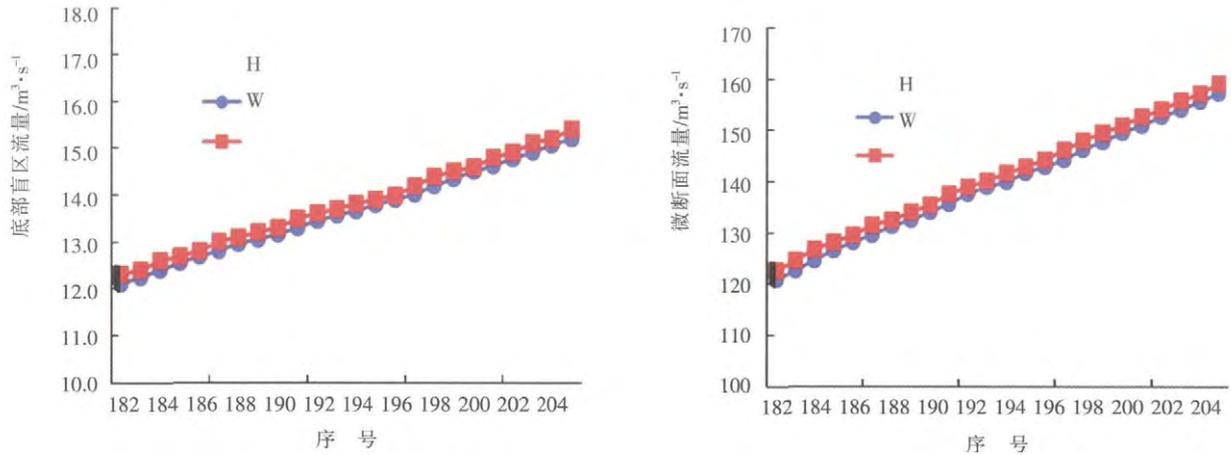


图3 中泓附近各区域流量对比图  
Fig.3 Comparison between the area flows in the river center

表2 中泓附近计算结果对比表  
Table2 Comparison between the calculated results using the data got in the river center

序号	顶部流量		实测流量		底部流量		微断面流量	
	H	W	H	W	H	W	H	W
182	18.666	18.9	90.106	91.4	12.112	12.3	120.88	122.6
183	18.866	19.1	91.405	93	12.242	12.4	122.51	124.5
184	19.108	19.4	92.989	94.6	12.405	12.6	124.5	126.6
185	19.35	19.6	94.566	95.8	12.566	12.7	126.48	128.1
186	19.54	19.7	95.804	97	12.693	12.8	128.04	129.5
187	19.722	20	96.988	98.3	12.812	13	129.52	131.3
188	19.923	20.1	98.303	99.2	12.949	13.1	131.18	132.4
189	20.059	20.3	99.185	100.4	13.039	13.2	132.28	133.9
190	20.315	20.5	100.409	101.6	13.169	13.3	133.89	135.4
191	20.503	20.8	101.635	103.2	13.293	13.5	135.43	137.5
192	20.745	20.9	103.213	104.3	13.454	13.6	137.41	138.8
193	20.918	21.1	104.337	105.2	13.572	13.7	138.83	140
194	21.041	21.3	105.144	106.5	13.658	13.8	139.84	141.6
195	21.243	21.4	106.458	107.5	13.798	13.9	141.5	142.8
196	21.404	21.6	107.513	108.5	13.911	14	142.83	144.1
197	21.554	21.8	108.494	110	14.021	14.2	144.07	146
198	21.788	22	110.021	111.4	14.191	14.4	146	147.8
199	22	22.2	111.405	112.8	14.348	14.5	147.75	149.5
200	22.212	22.4	112.792	113.8	14.509	14.6	149.51	150.8
201	22.36	22.6	113.763	115.1	14.621	14.8	150.74	152.5
202	22.569	22.8	115.128	116.2	14.777	14.9	152.47	153.9
203	22.738	23	116.235	117.6	14.902	15.1	153.88	155.7
204	22.945	23.1	117.586	118.8	15.058	15.2	155.59	157.1
205	23.122	23.4	118.746	120.2	15.193	15.4	157.06	159

通过对上述计算结果的对比分析,可以得出如下结论:根据流量生成模型研制的 ADCP 流量计算程序结算结果可靠,和目前应用广泛的 Winriver 软件计算结果极其相似。这说明理解了 ADCP 流量测验机理,提出了 ADCP 流量生成模型的概念,分析了 ADCP 流量生成模型的结构,掌握了 ADCP 流量计算方法,为 ADCP 国产化奠定了坚实的基础。

## 6 结论

(1)根据流量生成模型研制的 ADCP 流量计算程

序结算结果可靠,和目前应用广泛的 Winriver 软件计算结果极其相似。

(2)解析了 ADCP 流量测验机理,提出了 ADCP 流量生成模型的概念,分析了 ADCP 流量生成模型的结构,掌握了 ADCP 流量计算方法,为 ADCP 国产化奠定了坚实的基础。  
参考文献:

[1] 彭万兵,官学文,赵东. ADCP 与 GPS 在内河流态测量中的应用问题及对策[J]. 地理空间信息, 2004,10(5):42-44. (PENG Wanbing, GUAN Xuewen, ZHAO Dong. Application of combined ADCP and GPS techniques to inner river flow pattern [J]. Geospatial Information, 2004,10(5):42-44. (in Chinese)) (下转第 20 页)

## Study on SPI Index Based on Maximum Entropy Theory

WU Xiaoqing<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaohong<sup>1,2</sup>, HE Yanhu<sup>1,2</sup>, FANG Chunyan<sup>1,2</sup>

(1. Center for Water Resources and Environment, SunYat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong Higher Education Institutes, SunYat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** In order to fill in the gaps of the current standardized precipitation index (SPI) obeying a certain distribution, the SPI index was calculated according to the distribution of the maximum entropy theory. Taking the Dongjiang River Basin as a study case, the theory of maximum entropy distribution, Gamma distribution, Weibull distribution and lognormal distribution probability density function were used to fit for different time scales of precipitation data respectively. And AIC, KS, AD were used to test the results of fit goodness. The calculation of SPI with the maximum entropy theory and the Gamma distribution were comparatively analyzed. The results show that: when being compared with other three kinds of distribution, the distribution of the maximum entropy theory probability density function fits better for 3, 6, 12 months of precipitation data from 15 stations in the Dongjiang River Basin; in the case of extreme drought (flood), relative to the Gamma distribution, the SPI calculated with the distribution of the maximum entropy theory is smaller (larger), which suggests that the distribution of the maximum entropy theory is more sensitive to deal with the extreme drought (flood).

**Key words:** SPI; maximum entropy; fitting distribution; extreme disaster; Dongjiang River Basin

(上接第 13 页)

- [2] 蒋建平,李树明. ADCP 在泥沙扩散测验中的应用[J]. 水利水文自动化, 2005,9(3):38-40. (JIANG Jianping, LI Shuming. Application of ADCP in sediment diffusion tests [J]. Automation in Water Resources and Hydrology, 2005,9(3):38-40. (in Chinese)).
- [3] 王爱军,汪亚平,王抒.声学多普勒仪器盲区处理及其在长江口区域的应用 [J]. 水利学报, 2004,9 (9):77-82. (WANG Aijun, WANG Yaping, WANG Shu. Determination of current velocity in blank layer of ADCP [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,9(9)77-82. (in Chinese))
- [4] 田淳,刘少华. 声学多普勒测流原理及其应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.12. (TIAN Chun, LIU Shaohua. Acoustic Doppler Current Principles and Applications [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2003.12. (in Chinese))
- [5] 王元叶,何青. 声学多普勒流速剖面仪近底有效流速数据处理初步研究[J]. 水科学进展, 2008,19(3):395-397. (WANG Yuanye, HE Qing. Near bed velocity treatment of Acoustic Doppler Current Profiler [J]. Advance in Water Science, 2008,19(3):395-397. (in Chinese))
- [6] 林辉勇. 声学多普勒流速剖面仪在河流水文测验中的应用[J]. 中国水利, 2003,9B:37-39. (LIN Huiyong. Application of ADCP in river hydrology test [J]. China Water Resources, 2003,9B:37-39. (in Chinese))
- [7] 程琛,王鹏飞. 两种测流设备的测量结果对比分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2011,9(3):25-27. (CHENG Chen, WANG Pengfei. Comparisons for measurement results between two current measures[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2011,9(3):25-27. (in Chinese))
- [8] 黄河宁. ADCP 流量测验随机误差分析 I:随机不确定度预测模型[J]. 水利学报, 2006,5, 37 (5):619-624. (HUANG Hening. ADCP discharge random error analysis I: random uncertainty prediction model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,5,37(5):619-624.(in Chinese))
- [9] 马峥,陈红勋. 曲面拟合和曲面积分在流量计算中的应用[J]. 排灌机械, 2013,22 (3):18-21. (MA Zheng, CHEN Hongxun. Application of surface-fitting and surface numerical integration on calculation of flow [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2013,22(3):18-21. (in Chinese))

## ADCP Flow Generation Model and Corresponding Calculation Method

HAN Jiwei, FU Weijie, TANG Yueping, SHAO Jun

(Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology,

Research Center of Hydrology and Water Resources Monitoring, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China)

**Abstract:** How to quickly and accurately monitor the river flow, it has been always the study object for many hydrologists. ADCP is an advanced flow test equipment. This paper analyzed the ADCP's mechanism, proposed the concept of ADCP flow generation model, analyzed the structure of ADCP flow generation model and constructed ADCP flow generation model at last. According to flow generation model developing the ADCP flow calculation program, calculated the data by this program, and the result is very similar with that by Winriver software. It confirmed that this flow generation model is correct. And it has made a good beginning of ADCP's localization.

**Key words:** ADCP flow generation model; flow calculation method; Winriver; programming