

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2010.06.016

钱塘江河口区声学多普勒测流及资料整编

吕耀光, 黄土稳

(浙江省水文局 浙江 杭州 310009)

摘要:为了掌握钱塘江年入海径流量,应用声学多普勒流速仪在钱塘江河口区强涌潮河段开展潮流量测验,通过对实测数据的分析,采用将 2 台定点式声学多普勒流速仪所测到的流量作为一个整体考虑的方法,寻求该整体的平均流速与断面平均流速的关系,使用手工定出的曲线进行推流,并与上游站推算径流量成果进行了对比。结果表明,使用 2 台定点式声学多普勒流速仪结合走航式声学多普勒流速仪在钱塘江河口区强涌潮河段开展潮流量测验是可行的,其曲线检验结果优于单边定点式声学多普勒流速仪的结果,但需要加强负流速部分的测验,提高测验精度。

关键词:潮流量测验;声学多普勒流速仪;河口区;资料整编;之江水文站;钱塘江

中图分类号: P332.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2010)06-0682-06

潮流量是河口开发、整治与河口科学研究的一项基本资料。声学多普勒测流技术在国内普通河道已得到应用^[1],但是在感潮河段的河口区应用却很少,在我国的相关规范中,也没有关于测验潮流量和整编潮流量的完善规定,这与河口开发、治理等国民经济建设的要求是不相适应的^[2]。

国内感潮河段河口区如长江口、珠江河口地区已对声学多普勒流速仪的应用进行了研究,长江徐六泾水文站使用的是代表线法^[2],珠江的马口水文站使用的是指标流速法^[3]。但钱塘江潮型不同于上述 2 个河段,早期的研究结果^[4-7]表明,其潮型为非正规半日潮,涌潮特性明显,潮流量测验比普通感潮河段更复杂。为此,在钱塘江闻堰段闻堰—袁浦断面设立之江水文站,开展潮流量测验的研究工作。本文对钱塘江河口区特殊潮型下声学多普勒流速仪实测数据进行了分析,研究了数据的优选和插补方法,采用将 2 台定点式声学多普勒流速仪所测到的流量作为一个整体考虑的方法,建立该整体的平均流速与断面平均流速之间的关系,进行径流量推求,并使用上游站推算径流量成果对该方法进行了验证。

1 潮流量测验方法

之江水文站基本断面上有袁浦和闻堰 2 座水位台,在 2 座水位台各安装 1 台由美国 Sontek 公司生产的 Argount-SL 定点式声学多普勒流速仪(简称 SL)。SL 工作频率为 500 kHz,流速测量范围 ± 6 m/s,测量精度 0.5 cm/s,最大测量距离 120 m。设置 SL 测量断面宽度为 5~80 m,针对钱塘江涨落潮流速变化快的情况,设置每 5 min 返回 1 个流速值。另配置 1 台由美国 Sontek 公司生产的走航式声学多普勒流速仪,流速测量范围 ± 20 m/s,测量精度 0.1 cm/s,最大测量水深 30 m。在袁浦和闻堰的 2 台 SL 施测的同时使用走航式声学多普勒流速仪进行断面流量实测,以寻求 SL 所测部分流量(流速)与断面平均流量(流速)之间的关系^[8],并通过此关系进行推流,最终达到进行潮流量资料整编、掌握钱塘江入海径流量及其年内分配的目的。采用代表潮法进行潮流量测验,即每月选取大潮、小潮、寻常潮各 1 次,每次连续测验 26 h 的潮流期过程^[9]。

2 数据处理

根据之江水文站实测数据,在大潮汛涨潮时,流量由 $3200\text{ m}^3/\text{s}$ 在数分钟内迅速变为 $-6610\text{ m}^3/\text{s}$,流量变化接近 $10000\text{ m}^3/\text{s}$,可见涌潮速度之快。流速在涌潮过后约 20 min 达到最大^[10],然后由负的最大较为快速地变为零,这个流量由负变正的过程较普通感潮站要快得多。负流量持续时间短,变化速度快。为了更好地掌握钱塘江河口区这种强涌潮条件下涨落潮时断面上流速的变化情况,从 2008 年 6 月 10 日起,进行了大量流量实测工

作 实测到流量数据 283 个,基本上掌握了涨落潮时流速变化的原始资料,为分析工作打下了坚实的基础.

2.1 走航式声学多普勒流速仪流速数据的优选

通过对实测数据的分析发现,把所有实测流量数据都参与率定 SL 所测到的流速(简称 SL 流速)与断面平均流速关系是不合适的,因为 SL 所能测到的断面宽度有限(约 75 m,而所处测验断面总宽度约 955 m),有时 SL 流速不能较好地代表断面平均流速.图 1 为走航式声学多普勒流速仪在闻堰—袁浦断面不同时刻测量到的断面流速分布情况.走航式声学多普勒流速仪沿测流断面走航 1 次(左岸到右岸或右岸到左岸)就基本可以得到断面上各处的流速分布情况.图 1 中左岸到右岸的一根长直线表示走航式声学多普勒流速仪沿断面走航的轨迹,与该直线基本垂直的多条短直线为断面上各个测点上的流速矢量,短直线的指向表示流速的方向,长短表示流速的大小.图 1(a)和图 1(b)表示一个潮流期中落潮涨潮流阶段断面流速分布均匀和不均匀的情况,图 1(c)和图 1(d)表示落潮落潮流阶段断面流速分布均匀和不均匀的情况.从图 1 可以明显地看出,当断面平均流速发生较为快速且较大的变化时,左右岸 2 台 SL 流速在潮流期的某些阶段呈现出较小或滞后的变化.

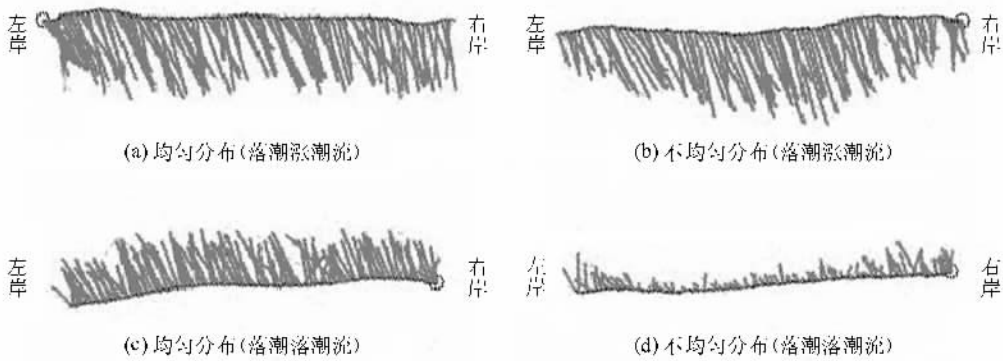


图 1 几种断面流速分布情况

Fig. 1 Velocity distribution of several cross-sections at Zhijiang hydrological station

如果让图 1 所示流速分布不均匀情况下的数据参与定线,势必会影响曲线走向.为了保证数据质量,结合相关规范要求及测验河段水流特性,确定以下 4 个数据处理原则^[11-12]:

- a. 结合测验记载表,回放测验时的情况,对于底跟踪失效、风浪太大等原因引起的不可靠数据一律不采用.
- b. 对于在水情平稳时测到的数据,严格要求 2 个测回,每半测回流量值与平均值的偏差如果大于 5%,不予采用.
- c. 对于水情变化快时测到的数据,例如涨潮时、退潮不平稳时等时段,属于规范中水情涨落变化快的情况,适当放宽至 1 个测回.
- d. 对于断面流速变化不均匀等导致左右岸 2 台 SL 流速不能较好地反应断面平均流速时的数据,不予采用.

根据以上原则处理之后,得到满足 SL337—2006《声学多普勒流量测验规范》^[11]并可用于分析定线的流量数据共 141 个.

2.2 SL 缺测数据的插补

SL 会因为供电、仪器稳定性等原因而造成数据缺失,虽然缺失的数据不到总数据的 1%,但为保持数据的完整性,研究了几种插补 SL 流速的方法.经比较,采用左右岸 2 台 SL 流速总变幅差在插补时段内平均分配的原则所插补出来的结果与实测结果拟合度最高,该插补方法如下:

假设袁浦 SL 流速缺测某日的 15 00—21 00,实际上该时段有实测数据).设插补总时段为 T ,所需插补时段内共有 n 个插补项,插补时段开始时刻和结束时刻的袁浦 SL 流速值分别为 a_1 和 a_n ,闻堰 SL 流速值分别为 b_1 和 b_n ,第 i 个插补项的 SL 流速分别为 a_i 和 b_i ,如图 2 所示.

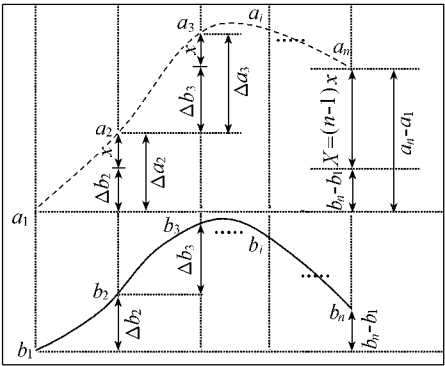


图 2 插补计算中参数设置示意图

Fig. 2 Arrangement of parameters in interpolation calculation

袁浦 SL 流速与闻堰 SL 流速从第 $i-1$ 个插补项到第 i 个插补项的变化幅度分别为 $\Delta a_i=(a_i-a_{i-1})$ 和 $\Delta b_i=(b_i-b_{i-1})$. 设左右岸 2 台 SL 流速在插补时段内的总变幅差为 X , 即

$$X=(a_n-a_1)-(b_n-b_1)$$

(1)

将时段内总变幅差 X 在 $n-1$ 个插补项上平均分配, 可得每步变幅差值 x 为

$$x=\frac{X}{n-1}=\frac{(a_n-a_1)-(b_n-b_1)}{n-1}$$

(2)

对式(2)从 2 到 i 进行累加, 得

$$(i-1)x=(a_i-a_1)-(b_i-b_1)$$

(3)

将式(2)代入式(3), 得到第 i 个插补项 a_i 的插补公式:

$$a_i=b_i+\frac{(a_n-a_1)-(b_n-b_1)}{n-1}\{(i-1)+a_1-b_1\}$$

(4)

图 3 为利用插补公式(4)对袁浦 SL 流速进行插补的结果. 插补流速和实测流速之间存在一个系统误差, 初步分析这种误差是由于插补开始及终了时刻袁浦及闻堰 SL 流速本身的差异造成的.

对走航式声学多普勒流速仪实测数据优选和 SL 数据系列的插补处理之后, 采用面积包围法分别计算在走航式声学多普勒流速仪施测 1 次流量期间左右岸 2 台 SL 对应的流速平均值.

2.3 整体考虑 2 台 SL 测到的流量

之江水文站基本测流断面处河宽 955 m, 考虑到钱塘江潮水及所处测验河段的特殊性, 单台 SL 测量范围有限, 为此把 2 台 SL 所测到的流量作为一个整体考虑, 建立整体的平均流速与断面平均流速的关系, 并与单边 SL 建立的关系进行比较.

设袁浦水位台 SL 所测到的流量为 Q_1 , 相应平均流速和水位分别为 v_1 和 A_1 , 闻堰水位台分别为 Q_2, v_2 和 A_2 , 二者的总流量为 Q_1+Q_2 , 总面积为 A_1+A_2 , 可得整体的平均流速 v 为

$$v=\frac{Q_1+Q_2}{A_1+A_2}$$

(5)

将 $Q_1=v_1A_1, Q_2=v_2A_2$ 代入式(5), 得

$$v=\frac{v_1A_1+v_2A_2}{A_1+A_2}=\frac{A_1}{A_1+A_2}v_1+\frac{A_2}{A_1+A_2}v_2$$

(6)

令 $\alpha=\frac{A_1}{A_1+A_2}$, 则 $\frac{A_2}{A_1+A_2}=1-\alpha$, 式(6)可表达为

$$v=\alpha v_1+(1-\alpha)v_2$$

(7)

很明显, α 是水位的函数, 由一个水位可得一个 α , 根据得到的 α 代入公式(7)可得 v .

2.4 率定关系曲线

图 4 为袁浦 SL 流速、闻堰 SL 流速和整体流速与断面平均流速计算机拟合关系曲线, 3 条曲线的相关系数都在 0.99 以上, 说明 2 台 SL 流速和断面平均流速之间相关性很好. 但是计算机拟合曲线的缺点是不能同时照顾到拟合最优和合理. 图 4 中, 负流速的趋势线上翘, 不满足关系曲线拟定的基本原则^[13]. 对 3 条曲线进行三性检验, 结果见表 1.

从表 1 可看出, 将 2 台 SL 所测得的流量作

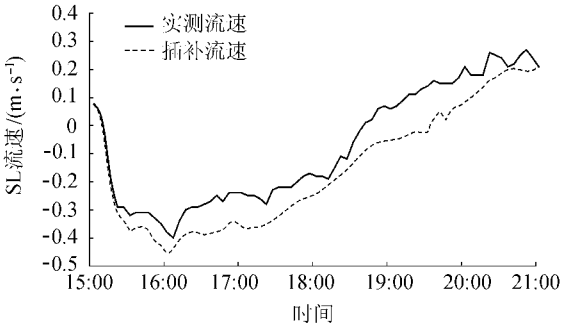


图 3 袁浦 SL 流速系列插补结果
Fig. 3 Interpolated results of SL velocity series at Yuanpu

表 1 单边 SL 流速、整体流速与断面平均流速
计算机拟合关系曲线三性检验结果

Table 1 Test results of fitting curves of SL velocity, whole velocity and average sectional velocity

数据系列	符号 检验 u	适线 检验 U	偏离 检验 t	标准差/ %	随机不 确定度/%	系统 误差/%
袁浦 SL 流速	不合格	不合格	不合格	19.82	39.64	-14.42
闻堰 SL 流速	不合格	不合格	不合格	21.43	42.86	15.16
整体流速	不合格	合格	不合格	14.32	28.64	4.64

注: 显著性水平, 符号检验取 0.25, 适线检验取 0.05, 偏离检验取 0.10.

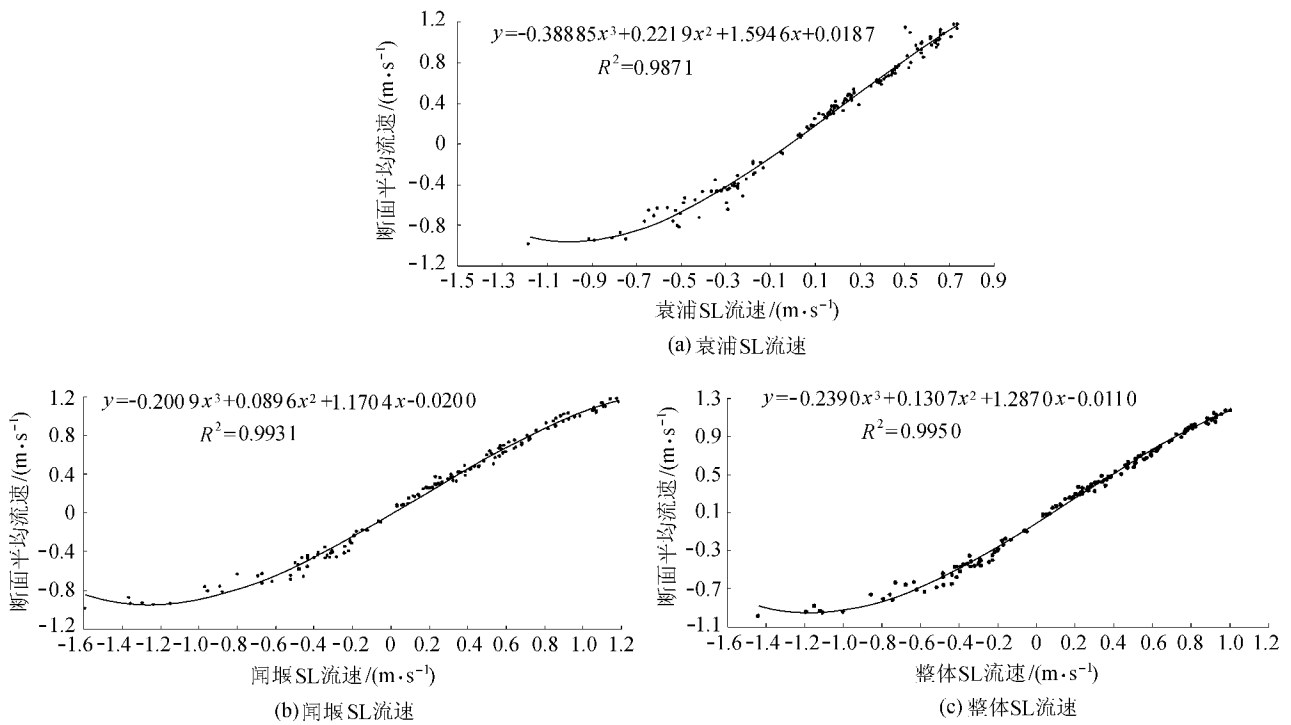


图 4 单边 SL 流速、整体流速与断面平均流速计算机拟合关系曲线

Fig. 4 Fitting curves of SL velocity , whole velocity and average sectional velocity

为一个整体考虑, 检验的各项结果均优于单边 SL, 说明将 2 台 SL 测得的流量作为一个整体考虑具有更高的精度, 适合钱塘江这种特殊的涌潮条件, 也间接反应了钱塘江涨落潮时主流不一致的情况。

将图 4(c)所示的整体流速与断面平均流速的点进行手工定线, 结果如图 5 所示。对手工定出的曲线进行三性检验, 结果如表 2 所示。

2.5 推流成果

从手工定线的三性检验结果看, 正、负流速部分均能通过三性检验, 但负流速部分与正流速部分相比, 系统误差偏大, 且随机不确定度不能满足 SL337—2006《声学多普勒流量测验规范》^[11]中“潮流量测验小于 15%”的要求, 说明要加强对负流速部分的测验。从前文的分析可知, 将左右岸 2 台 SL 所测得的流量作为一个整体考虑具有更高的精度, 而手工定线优于计算机定线, 故使用手工定出的曲线进行流量推求。通过 2 台 SL 采集到袁浦 SL 流速和闻堰 SL 流速以及测时水位, 得到每 5 min 1 个的流速系列, 依照手工定线曲线得到断面平均流速(采用一元三点插值法^[14], 按照该法要求在手工所定曲线上读取推流所需节点系列)。由于每天要处理 576 个数据组, 数据量大, 需通过程序来完成。因此, 采用 VB 开发了基于一元三点法原理的处理程序, 推求出 2008 年 6 月 1 日至 2009 年 12 月 31 日之间符合南方片《水文资料整汇编》程序要求的断面流量系列。

运行南方片《水文资料整汇编》程序的河道站水流沙模块, 进行逐日平均流量和逐日平均水位的推求, 推流方法选用连实测流量法, 得出之江站实测径流量成果(表 3)。

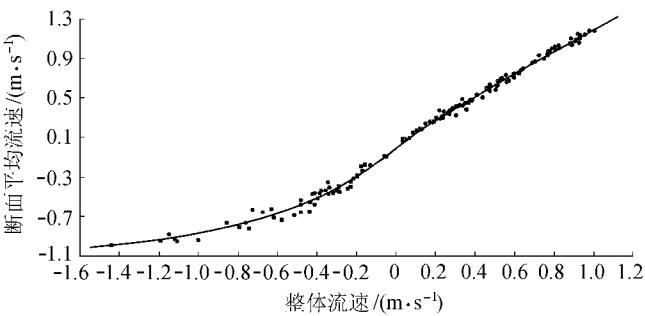


图 5 整体流速与断面平均流速的手工定线曲线

Fig. 5 Manual curve of whole velocity and average sectional velocity

表 2 手工定线曲线三性检验结果

Table 2 Test results of manual curves

整体流速数据系列	符号 检验 u	适线 检验 U	偏离 检验 t	标准差/ %	随机不 确定度/%	系统 误差/%
负流速系列(49 个)	合格	免检	合格	11.27	22.54	0.23
正流速系列(92 个)	合格	合格	合格	7.37	14.74	0.44
全系列(141 个)	合格	免检	合格	8.84	17.68	0.37

注: 显著性水平, 符号检验取 0.25, 适线检验取 0.05, 偏离检验取 0.10。

表3 之江站实测径流量成果与上游站推算径流量成果对比

Table 3 Comparison between measured discharge at Zhijiang hydrological station and calculated discharge at upstream station							
时间	之江站实测 径流量/亿 m ³	上游站推算 径流量/亿 m ³	相对 误差/%	时间	之江站实测 径流量/亿 m ³	上游站推算 径流量/亿 m ³	相对 误差/%
2008-06	94.67	92.38	2.48	2009-04	39.22	41.86	- 6.31
2008-07	32.51	32.55	- 0.12	2009-05	24.92	27.16	- 8.25
2008-08	30.21	30.12	0.30	2009-06	27.44	29.50	- 6.98
2008-09	22.03	18.27	20.58	2009-07	23.38	21.59	8.29
2008-10	12.21	9.55	27.85	2009-08	54.19	45.43	19.28
2008-11	24.21	24.63	- 1.71	2009-09	19.63	17.75	10.59
2008-12	12.94	14.13	- 8.42	2009-10	10.99	9.74	12.83
2009-01	14.64	17.81	- 17.80	2009-11	16.30	19.19	- 15.06
2009-02	24.29	24.66	- 1.50	2009-12	11.26	11.44	- 1.57
2009-03	56.11	55.76	0.63	总 计	551.15	543.52	1.40

把之江站实测径流量成果和上游站推算径流量成果进行对比分析,计算上游站推算径流量采用的是面积比例法.上游控制站有诸暨水文站、分水江水文站、富春江电站3站的集水面积分别为1719 km²、3100 km²和31645 km²,之江水文站集水面积为41769 km²,则比例系数 $A = 41769 \text{ km}^2 / (1719 \text{ km}^2 + 3100 \text{ km}^2 + 31645 \text{ km}^2) \approx 1.145$.

把诸暨水文站、分水江水文站和富春江电站的实测径流量之和乘以比例系数1.145,得到上游站推算径流量成果(表3).

从表3可看出,之江站实测径流量成果与上游站推算的径流量成果之间总体差别不大,总的径流量相对误差为1.41%,但个别月份偏差较大,初步分析主要有以下原因:(a)面积比例法在降雨时空分布均匀和下垫面条件一致时效果较好,但整个钱塘江流域内降雨时空分布情况和下垫面条件差别很大;(b)未考虑区间引水调水的水量;(c)未考虑河槽内蓄水量变化;(d)富春江电站的出库流量是根据发电出力推算出的,根据兰江-富春江-新安江之间的平衡关系,该推算资料应该乘以多年平均系数1.07后使用,存在年际误差;(e)上游站推流误差及之江站的定线推流误差.

3 结 论

- a. 声学多普勒流速仪在钱塘江河口这种强涌潮条件下是可以应用的.
- b. 将左右岸2台SL测到的流量作为一个整体考虑具有更高的精度,适合钱塘江特殊的涌潮条件,验证了钱塘江河口区强涌潮情况下涨落潮时主流不一致、流态变化复杂的情况.
- c. 左右岸2台SL测到的流量作为一个整体考虑的方法能够掌握钱塘江的年径流量及其年内分配,结束了钱塘江河口区无连续实测流量资料的历史.
- d. 从手工定线三性检验的结果看,正、负流速部分均能通过三性检验,但负流速部分系统误差比正流速部分大得多,负流速与正流速相比,流态变化更为复杂,测验难度也相应较大,需要加强负流速部分的测验,提高测验精度.

参考文献:

[1] 赵新智. 宽带 ADCP 在河流流量测验中的实用性研究[J]. 中国农村水利水电, 2007(6):72-73. (ZHAO Xin-zhi. Practical research of ADCP in liquid flow measurmen[J]. China Rural Water and Hydropower 2007(6):72-73. (in Chinese))

[2] 朱巧云, 高健, 刘桂平, 等. 长江河口段徐六泾水文站潮流量整编代表线法研究[J]. 水文, 2008, 28(4):61-64. (ZHU Qiao-yun, GAO Jian, LIU Gui-ping, et al. Study on representative vertical method for tidal discharge processing of Xuliujing gauging station in Yangtze River estuar[J]. Journal of China Hydrology 2008, 28(4):61-64. (in Chinese))

[3] 李志敏. Argonaut-SL 流量计在马口水文站的应用研究[J]. 人民珠江, 2009(2):11-14. (LI Zhi-min. Research on application of Argonaut-SL flow gauge in Makou hydrologic station[J]. Pearl River 2009(2):11-14. (in Chinese))

[4] 潘存鸿, 鲁海燕, 曾剑. 钱塘江涌潮特性及其数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2008(2):1-9. (PAN Cun-hong, LU Hai-yan, ZENG Jian. Characteristic and numerical simulation of tidal bore in Qiantang Rive[J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(2):1-9. (in Chinese))

- [5] 陈来华. 钱塘江河口大规模治江围涂后对涌潮高度的影响[J]. 水科学进展 ,2007(3):385-389.(CHEN Lai-hua. Effect of extensive regulation and reclamation of Qiantang estuary on tidal bore height[J]. Advances in Water Science ,2007(3):385-389.(in Chinese))
- [6] 韩曾萃,曹颖,尤爱菊,强涌潮河口河相关系及其验证[J]. 水利水运工程学报 ,2009(4):83-89.(HAN Zeng-cui ,CAO Ying ,YOU Ai-ju. Verification of fluviomorphology for macro-tide estuary with tidal bore[J]. Hydro-Science and Engineering ,2009(4):83-89.(in Chinese))
- [7] 潘存鸿,鲁海燕. 二维浅水间断流动数值模型在涌潮模拟中的应用[J]. 浙江大学学报 :工学版 ,2009 43(11):2107-2113.(PAN Cun-hong ,LU Hai-yan. 2D numerical model for discontinuous shallow water flows and application to simulation of tidal bore[J]. Journal of Zhejiang University :Engineering Science ,2009 43(11):2107-2113.(in Chinese))
- [8] 徐刚,胡焰鹏,樊云,等. H-ADCP 实时流量在线监测系统研究[J]. 中国农村水利水电 ,2009(9):92-95.(XU Gang ,HU Yan-peng ,FAN Yun ,et al. Research on H-ADCP online discharge monitoring system[J]. China Rural Water and Hydropower ,2009(9):92-95.(in Chinese))
- [9] 张留柱,赵志贡,张法中. 水文测验学[M]. 郑州:黄河水利出版社 ,2003 280-281.
- [10] 潘存鸿,鲁海燕,于普兵,等. 钱塘江二维涌潮数值模拟及其应用[J]. 浙江水利科技 ,2008(2):4-8.(PAN Cun-hong ,LU Hai-yan ,YU Pu-bing ,et al. 2D numerical simulation of bore on Qiantang River and its application[J]. Zhejiang Hydrotechnics ,2008(2):4-8.(in Chinese))
- [11] SL337—2006 声学多普勒流量测验规范[S].
- [12] GB50179—93 河流流量测验规范[S].
- [13] SL247—1999 水文资料整编规范[S].
- [14] 金麟,张立春,赵丽霞,等. 一元三点插值法推流误差分析及节点选取方法[J]. 黑龙江水利科技 ,1996(2):35-37.(JIN Lin ,ZHANG Li-chun ,ZHAO Li-xia ,et al. Plug flow error analysis and node selection method by one dollar three-point interpolation[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy ,1996(2):35-37.(in Chinese))

Discharge measurement and data compilation in Qiantang River estuary by use of acoustic Doppler current profiler

LÜ Yao-guang , HUANG Shi-wen

(Hydrology Bureau of Zhejiang Province , Hangzhou 310009 , China)

Abstract : In order to know the annual discharge into the sea from Qiantang River , the tidal discharge measurement in the strong tidal surge zone of Qiantang River estuary was carried out by use of the acoustic Doppler current profilers. According to the analysis of the measured data , a method regarding the discharge measured by two fixed-point acoustic Doppler current profilers as the whole was proposed so as to establish the relationship between the average velocity of the whole and that of a section. The discharge derived based on the manual curves was compared with that calculated at upstream station. The results show that it is feasible to carry out the tidal discharge measurement in Qiantang River estuary by using two fixed-point acoustic Doppler current profilers combining with walking acoustic Doppler current profiler. The results of the curve tests are better than those by one fixed-point acoustic Doppler current profiler. However , more work should be done to strengthen the measurement of negative velocity and to improve measurement accuracy.

Key words : tidal discharge measurement ; acoustic Doppler current profiler ; river estuary ; data compilation ; Zhijiang hydrological station ; Qiantang River