

钢铁材质浮标对 ADCP 水文监测系统流量 测验精度的影响

杜亚南, 张良平, 游目林

(长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局, 上海 200136)

摘要:针对钢铁材质浮标的 ADCP 水文监测系统内置罗经受船磁力影响, 导致流向测验出现偏差的问题, 通过 2009—2011 年徐六泾水文站定线比测大、中潮水文测验的实测资料, 分析采用垂直于断面的方位角作为流向(流向不修正)和采用断面各垂线实测平均流向作为流向(流向修正)两种情况下钢铁材质浮标对 ADCP 水文监测系统流量测验精度和流量、潮量计算的影响。结果表明: 无论是否修正流向, 计算得到涨落潮流量、潮量以及全潮下泄潮量和走航式 ADCP 定线比测的实测资料相比, 误差均较小, 精度都很高; 在流量和潮量计算时, 可以对钢铁材质浮标 ADCP 流向不做修正。

关键词: 钢铁材质浮标; 水文监测; 流量测验; 测验精度; ADCP; 徐六泾水文站

中图分类号: P335

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2017)01-0055-05

Effects of steel buoy on flow measurement accuracy of ADCP hydrological monitoring system//DU Ya'nan, ZHANG Liangping, YOU Mulin(Yangtze River Estuary Survey Bureau of Hydrology and Water Resource, Changjiang Water Resources Commission, Shanghai 200136, China)

Abstract: The inner compass of the acoustic Doppler current profiler (ADCP) hydrological monitoring system with steel buoys is affected by a ship's magnetism, which leads to deviation of the measured flow direction. Based on data measured at Xuliujing Hydrological Station during the spring tide and middle tide from 2009 to 2011, the effects of steel buoys on the flow measurement accuracy of an ADCP flow measurement system and the calculation results of discharge and tidal volume were investigated under the conditions when the angle perpendicular to the cross-section was used as the flow direction (without flow direction correction) and when the measured mean flow direction of the verticals on the cross-section was used as the flow direction (with flow direction correction). The results show that, compared with the data measured with the vessel-mounted ADCP, the discharge and tidal volume of flood tides and ebb tides and the sum of tidal volume show small errors and high precision, whether the flow direction is corrected or not. It is concluded that the flow direction of the ADCP system with steel buoys can be uncorrected in the calculation of discharge and tidal volume.

Key words: steel buoy; hydrological monitoring; flow test; measurement accuracy; ADCP; Xuliujing Hydrological Station

ADCP(acoustic Doppler current profiler)作为一种水文监测仪器,自从 20 世纪 70 年代出现以来得到了广泛的应用。ADCP 是一种声学测量仪器,使用声学多普勒原理进行流速测量。早期采用窄带技术的 ADCP 采用非相干脉冲速度测量,后期采用宽带技术的 ADCP 则是依靠测量声波的时间延迟而不是频率的变化来计算流速^[1-2]。流速流向是潮汐调查的基本要素之一,当前使用的流速流向仪器观测类型较多,按照流向的测量可以分为两类:一类是通过外部罗经计算得到流向。外部罗经具有不受磁场分布影响、不受速度和纬度影响、没有累积误差等优点,能稳定地提供较为准确的方向数据,得到的流

向误差较小^[3]。另一类使用仪器内部自带磁罗经。船舶上的钢铁材料,由于受地磁场磁化而产生磁性,称为船磁,船磁对安装在船上的磁罗经罗盘的作用力称为船磁力。由于船磁力的影响,罗经产生除磁差以外的指向误差,影响用于导航的磁罗经产生自差的原因很多且非常复杂^[4]。

用钢铁材料制成的水文监测浮标,对安装在浮标内部 ADCP 自带的磁罗经也会产生指向误差,实际测得的方向是地磁力和浮标磁力的合力方向即罗北方向,使观测得到的流向与实际流向产生偏差^[5-6]。李占桥等^[4]研究表明,船磁力对流速影响较小,对流向影响较大。国内外对 ADCP 内置磁罗

经受钢铁材质船磁力的流向影响研究较多^[7-11],对流量影响的研究较少。本文采用 2009—2011 年徐六泾水文站定线比测大、中潮水文测验的实测资料,分析采用垂直于断面的方位角作为流向(流向不修正)和采用断面各垂线实测平均流向作为流向(流向修正)两种情况下钢铁材质浮标对 ADCP 水文监测系统流量测验精度和流量、潮量计算的影响程度,从而分析钢铁材质浮标的 ADCP 水文监测系统流量测验精度。

1 测验情况简介

徐六泾水文站位于长江河口段,长江河口属于海陆双向性河口,徐六泾断面宽 5 881 m,为复式河床结构,采用代表线法测验与整编潮流量过程。由于徐六泾水文站测流断面在涨落潮过程中的流速分布变化比较复杂,以单线或双线组合作为代表线整编潮流量过程精度相对较差,多线组合才能满足潮流量整编精度的要求,因此在徐六泾水文断面建设了 5 条监测垂线,从左向右依次为 1 号、2 号、3 号、4 号浮标及 2 号水文平台,构成了实时监测浮标系统。徐六泾水文监测浮标由浮标浮体、监测仪器(ADCP)、数据采集、数据传输、供电系统等组成。浮标浮体采用聚脲材料制作,浮体内部填充弹性闭孔泡沫,并采用金属材料做增强骨架,浮体预设仪器安装孔和固定支座等,安装 ADCP 监测仪器,标体支架上采用太阳能电池板和免维护蓄电池为仪器供电。使用 GPRS 无线数据传输完成实时系统监控和数据传输,实现远程现场数据查看、数据分析。

徐六泾断面宽阔,测验将整个测流断面分为 4 个子断面,从左岸(起点距 0 m)~2 000 m 为 1 号断面,称为左边滩;2 000~3 600 m 为 2 号断面,3 600~5 200 m 为 3 号断面,称为中泓部分;5 200~5 881 m 为 4 号断面,称为右边滩。2005 年,根据代表线法测流原理,采用浮标 ADCP 结合平台 ADCP 的测流系统,实现了潮流量实时自动监测,通过每年 3、7、10 月走航式 ADCP 实测的定线比测资料分析计算,徐六泾水文站成功实现了潮流量整编^[12]。

2008 年 11 月,徐六泾断面潮流量自动监测系统进行了全面升级,升级后的浮标浮体由钢材制成。

表 2 中泓组合流速与中泓流量关系曲线精度及曲线检验结果

方法	潮型	最大偏差/%		系统误差		随机不确定度($\alpha=5\%$)		随机不确定度($\alpha=25\%$)		相关性检验		符号检验		适线检验		偏离数值检验	
		(+)	(-)	统计值/%	精度类别	统计值	精度类别	统计值	精度类别	r	类别	u	类别	u	类别	t	类别
方法一	涨潮	19.6	-15.9	-0.07	1	11.9	2	6.8	0.99	1	1.18	0	-0.20	1	-0.08	1	
	落潮	7.6	-16.6	-0.19	1	8.3	1	4.8	0.99	1	0.36	1	3.13	0	-0.36	1	
方法二	涨潮	19.3	-15.8	0.06	1	11.8	2	6.8	0.99	1	1.18	0	-0.20	1	-0.07	1	
	落潮	9.0	-16.9	-0.19	1	8.5	1	4.9	0.99	1	1.11	1	3.13	0	-0.40	1	

注:(+)表示计算流量大于实测流量,(-)表示计算流量小于实测流量。

钢铁材质制成的水文监测浮标,相对于聚脲材料和泡沫制作的水文监测浮标稳定性好、抗碰撞能力强、使用寿命长、便于维护。

2 数据处理和精度统计

从走航 ADCP 测验数据中提取中泓流量、左边滩流量和右边滩流量,中泓流量为 2 号、3 号断面实测流量之和。提取浮标及平台位置的垂线流向数据,计算各垂线的平均流向,结果如表 1 所示。

表 1 监测垂线平均流向统计

监测垂线	平均流向/(°)	
	涨潮	落潮
1 号浮标	281	110
2 号浮标	278	100
3 号浮标	270	90
4 号浮标	268	91
2 号平台	271	88

为研究流向与计算流量的关系,在定线分析时用两种方法计算分析:

a. 方法一。徐六泾断面的方位角为 185°,把浮标测得的流向认为垂直于徐六泾断面,即认为断面上 5 个垂线所有涨潮流向是 275°,所有落潮流向是 95°。

b. 方法二。5 个垂线分别采用表 1 中各自测得的垂线平均流向作为垂线流向,从而对实测流向进行修正。

采用 2 号、3 号、4 号浮标和 2 号平台 ADCP 实测流速,分别利用这些垂线的平均流速进行面积加权求出组合流速,推求组合流速与中泓流量、左边滩流量、右边滩流量的关系。

2.1 中泓部分流速流量关系的推求

中泓部分流速的组合利用 2 号、3 号、4 号浮标流速和 2 号平台流速,对中泓组合流速与实测中泓断面的流量采用 2009 年 3 月 2 次测验资料分别按方法一和方法二建立流速-流量关系,并进行偏差、系统误差、随机不确定度($\alpha=5\%$ 、 $\alpha=25\%$)、相关性检验、符号检验、适线检验和偏离数值检验统计,结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,两种方法统计的流速-流量关系曲线精度及曲线检验结果相差很小,且均符合规范的要求。

2.2 左、右边滩流速相关关系的推求

利用1号浮标平均流速与左边滩平均流速建立相关关系,利用2号平台平均流速与右边滩平均流速建立相关关系,利用2009年3月2次测验资料分别采用方法一和方法二建立涨潮流速、落潮流速相关关系,相关系数见表3。

表3 左、右边滩平均流速相关关系

边滩	相关系数 R^2			
	涨潮		落潮	
	方法一	方法二	方法一	方法二
左边滩	0.6340	0.6337	0.7087	0.7075
右边滩	0.9023	0.9023	0.9666	0.9660

从表3可以看出,采用两种方法计算得到的左、右边滩流速相关关系很接近,都达到了精度要求。

3 流量和潮量对比分析

3.1 流量

利用定线公式,分别计算出方法一和方法二两种情况下的流量,计算公式为

$$Q_{左} = K_{左} V_{1浮} S_{左} \quad (1)$$

$$Q_{右} = K_{右} V_{2平} S_{右} \quad (2)$$

$$Q_{中} = \sum_{i=1}^n q_i \quad (3)$$

$$Q = Q_{左} + Q_{中} + Q_{右} \quad (4)$$

式中: $Q_{左}$ 、 $Q_{右}$ 、 $Q_{中}$ 、 Q 分别为左边滩、右边滩、中泓和整个断面流量; $K_{左}$ 、 $K_{右}$ 分别为左、右边滩系数; $V_{1浮}$ 、 $V_{2平}$ 分别为1号浮标流速和2号平台流速; $S_{左}$ 、 $S_{右}$ 分别为左、右边滩面积; n 为部分面积数; q_i 为相邻两测速垂线间的部分流量。

2009年3月大、中潮2次测验流量的对比分析见表4和表5(表中误差1是两种方法定线计算流量之间的相对误差;误差2是方法一定线计算流量和实测流量间的相对误差;误差3是方法二定线计算流量和实测流量间的相对误差)。

从表4和表5可以看出,方法一计算流量和实测流量间的相对误差(误差2)与方法二计算流量和实测流量间的相对误差(误差3)一致性很高。两种方法计算流量的相对误差(误差1)在小流量时较大,但绝对误差较小,大潮最大为2.7%,中潮最大为2.6%,其余误差全断面都很小,大部分在1%左右。

利用定线公式,分别对2010年和2011年3月大、中潮测验资料采用方法一进行全断面计算流量和实测流量验证,结果见图1~4。

表4 两种方法定线计算的流量对比
(2009年3月24—25日部分时段全断面大潮)

日期	时刻	计算流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)		实测流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	误差 1/%	误差 2/%	误差 3/%
		方法一	方法二				
24日	09:00	56252	56703	58499	-0.8	-3.8	-3.1
	10:00	26432	26562	24682	-0.5	7.1	7.6
	11:00	-44500	-44512	-47405	0.0	-6.1	-6.1
	12:00	-73575	-74208	-70305	-0.9	4.7	5.6
	13:00	-62902	-63504	-63215	-0.9	-0.5	0.5
	14:00	-40389	-40352	-38526	0.1	4.8	4.7
	15:00	4090	3990	4330	2.5	-5.5	-7.9
	16:00	44425	44270	45287	0.4	-1.9	-2.2
	17:00	62501	62293	62381	0.3	0.2	-0.1
	18:00	69377	69781	68836	-0.6	0.8	1.4
	19:00	69595	69347	69096	0.4	0.7	0.4
	20:00	68933	69334	68255	-0.6	1.0	1.6
	21:00	67789	67554	68668	0.3	-1.3	-1.6
22:00	59738	59527	58099	0.4	2.8	2.5	
23:00	-4110	-4012	-4320	2.4	-4.9	-7.1	
25日	0:00	-61779	-61633	-61279	0.2	0.8	0.6
	1:00	-59997	-59861	-60949	0.2	-1.6	-1.8
	2:00	-43122	-43069	-41139	0.1	4.8	4.7
	3:00	-1647	-1655	-1572	-0.5	4.8	5.3
	4:00	38954	38829	41697	0.3	-6.6	-6.9
	5:00	62416	62207	62750	0.3	-0.5	-0.9
	6:00	68630	68398	68273	0.3	0.5	0.2
	7:00	70934	70626	70267	0.4	0.9	0.5
	8:00	68883	69295	68237	-0.6	0.9	1.6
	9:00	65600	66018	65191	-0.6	0.6	1.3
	10:00	57582	57379	57186	0.4	0.7	0.3
	11:00	2261	2201	2161	2.7	4.6	1.9
	12:00	-66929	-67504	-65403	-0.9	2.3	3.2
13:00	-71266	-71172	-73909	0.1	-3.6	-3.7	
14:00	-54226	-54224	-54355	0.0	-0.2	-0.2	
15:00	-20020	-20059	-18907	-0.2	5.9	6.1	

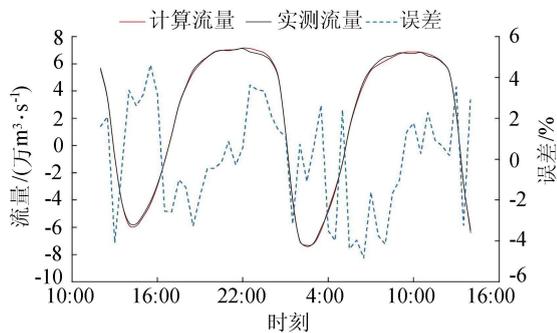


图1 2010年3月17—18日大潮方法一
计算流量和实测流量对比

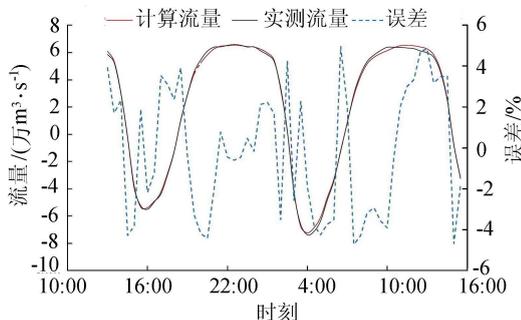


图2 2010年3月20—21日中潮方法一
计算流量和实测流量对比

表5 两种方法定线计算的流量对比
(2009年3月30—31日部分时段全断面中潮)

日期	时刻	计算流量/(m ³ ·s ⁻¹)		实测流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	误差 1/%	误差 2/%	误差 3/%	
		方法一	方法二					
30日	13:00	64683	64455	63526	0.4	1.8	1.5	
	14:00	-1615	-1646	-1735	-1.9	-6.9	-5.1	
	15:00	-75247	-75039	-77858	0.3	-3.4	-3.6	
	16:00	-72774	-72579	-69354	0.3	4.9	4.7	
	17:00	-40872	-40932	-41768	-0.1	-2.1	-2.0	
	18:00	5086	4965	5093	2.4	-0.1	-2.5	
	19:00	46924	47422	50615	-1.1	-7.3	-6.3	
	20:00	66640	66417	70189	0.3	-5.1	-5.4	
	21:00	74624	74360	74022	0.4	0.8	0.5	
	22:00	73439	73187	74523	0.3	-1.5	-1.8	
	23:00	70213	70620	71557	-0.6	-1.9	-1.3	
	31日	0:00	68911	69318	68025	-0.6	1.3	1.9
		1:00	60933	60718	61641	0.4	-1.1	-1.5
2:00		-3591	-3500	-3751	2.6	-4.3	-6.7	
3:00		-86249	-86816	-90157	-0.7	-4.3	-3.7	
4:00		-90541	-90261	-91037	0.3	-0.5	-0.9	
5:00		-67712	-67655	-65563	0.1	3.3	3.2	
6:00		-23356	-23058	-24652	1.3	-5.3	-6.5	
7:00		32490	32386	34231	0.3	-5.1	-5.4	
8:00		62759	63202	65286	-0.7	-3.9	-3.2	
9:00		72932	72687	73907	0.3	-1.3	-1.7	
10:00		75151	75536	76506	-0.5	-1.8	-1.3	
11:00		75027	74760	73618	0.4	1.9	1.6	
12:00		72354	72104	71625	0.3	1.0	0.7	
13:00		67080	66845	66579	0.4	0.8	0.4	
14:00		48582	48410	47514	0.4	2.2	1.9	
15:00	-36563	-36543	-38863	0.1	-5.9	-6.0		
16:00	-68157	-68065	-70489	0.1	-3.3	-3.4		
17:00	-53731	-53721	-55220	0.0	-2.7	-2.7		
18:00	-22653	-22696	-21986	-0.2	3.0	3.2		

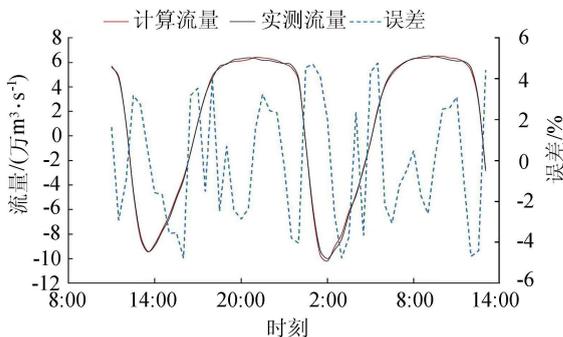


图3 2011年3月20—21日大潮方法一
计算流量和实测流量对比

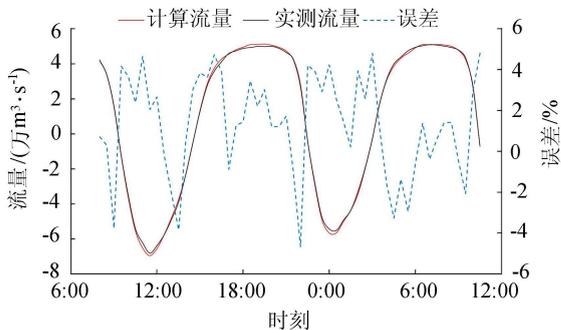


图4 2011年3月17—18日中潮方法一
计算流量和实测流量对比

从图1~4可以看出,2010年和2011年3月大、中潮全断面方法一计算流量和实测流量误差均在5%之内,小流量情况下,误差相对较大,大流量情况下,误差相对较小。

3.2 潮量

对2009年3月大、中潮分别采用两种方法计算的流量和实测流量根据式(5)计算潮量,结果见表6。

$$W = \int_{t_0}^{t_1} Q dt \quad (5)$$

式中:W为潮量;t₀、t₁为相邻的2个憩流时间。

表6 大、中潮潮量对比

潮型	潮量计算采用的流量	亿 m ³		
		涨潮潮量	落潮潮量	全潮下泄潮量
大潮	方法一计算流量	-17.14	35.12	17.98
	方法二计算流量	-17.20	34.98	17.78
	实测流量	-17.16	35.24	18.08
中潮	方法一计算流量	-14.52	32.38	17.86
	方法二计算流量	-14.40	32.47	18.07
	实测流量	-14.20	32.12	17.92

从表6可以看出,采用3种流量计算得到的涨潮、落潮、全潮潮量都非常接近,相互之间的误差均较小,最大相对误差只有2.3%(为采用方法一计算流量和实测流量这两种流量计算得到的中潮涨潮潮量-14.52亿m³和-14.20亿m³之间的相对误差),精度均较高。

3.3 精度评价

一般情况下,流量误差包括流量测验误差和流量计算误差。刘桂平等^[13]研究表明,对于同一断面,流量计算精度主要由测速垂线数量的多少决定。测速垂线越多,精度越高,误差越小;测速垂线越少,精度越低,误差越大。流量测验误差在流量误差中起决定性的作用,而流量计算误差在流量误差中也起着重要的作用。

根据GB50179—2015《河流流量测验规范》,徐六泾断面流量测验的误差来自于定点ADCP测验误差和走航式ADCP测验误差,流量计算误差来自于定点ADCP流量计算误差和走航式ADCP定线流量计算误差。因此,前文分析的流量计算误差,包含了定点ADCP测验误差和走航式ADCP测验误差及其各自的流量计算误差。计算结果表明,不论对流向数据是否修正,计算得到的各种流量和潮量误差均较小,精度都很高。

4 结语

在现有徐六泾断面水动力条件、测流断面条件及实际测验布置状况下,本文对采用垂直于断面的方位角作为流向(流向不修正)和采用断面各垂

线实测平均流向作为流向(流向修正)两种情况下钢铁材质浮标对 ADCP 水文监测系统流量测验精度和流量、潮量计算的影响进行了计算分析,通过流量、潮量分析与精度评价,结果表明,无论对流向数据是否修正,其计算的涨落潮流量、潮量以及全潮下泄潮量和走航式 ADCP 定线比测的实测资料相比,误差均较小,精度都很高。因此,在流量和潮量计算时,可以对钢铁材质浮标 ADCP 流向不做修正。钢铁材质制成的水文监测浮标相对于聚脲材料和泡沫制作的水文监测浮标,稳定性好、抗碰撞能力强、使用寿命长、便于维护。使用钢铁材质的 ADCP 水文监测系统对于提高测验精度、减少测验投入、提高测验效率非常有益。

参考文献:

[1] 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.

[2] 刁新源,于非,葛人峰,等. 船载 ADCP 测量误差的因素分析和校正方法[J]. 海洋科学进展,2006,24(4):552. (DIAO Xinyuan, YU Fei, GE Renfeng, et al. Factor analysis and correction method of shipboard ADCP measuring error[J]. Advances in Marine Science,2006,24(4):552. (in Chinese))

[3] 张美富,刘大伟,王真祥,等. 基于 GPS 罗经的感潮河段 ADCP 测验精度研究[J]. 现代测绘水文,2010,33(6):34. (ZHANG Meifu, LIU Dawei, WANG Zhenxiang, et al. Research on precision of ADCP discharge measurement using GPS compass in tide reach [J]. Modern Surveying and Mapping, 2010, 33(6):34. (in Chinese))

[4] 李占桥,吴宝勤,任来平,等. 铁质船体对磁罗经海流计流向影响分析[J]. 海洋测绘,2012,32(4):60-62. (LI Zhanqiao, WU Baoqin, REN Laiping, et al. Analysis on flow direction influence from iron hull to magnetic-compass current meter [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2012, 32(4):60-62. (in Chinese))

[5] 李发. 磁罗经为什么要校正[J]. 天津航海,1995(1):9-10. (LI Fa. Why magnetic compass calibration [J]. Tianjin Maritime, 1995(1):9-10. (in Chinese))

[6] 邵海桂. 获取磁罗经差的方法分析[J]. 中国水运,2011,11(12):88-89. (SHAO Haigui. Obtain the magnetic compass error analysis of the method [J]. China Water Transport, 2011, 11(12):88-89. (in Chinese))

[7] 陈力平,方波,季成康. 应用 GPS 技术修正 ADCP 测量误差[J]. 人民长江,2002,33(1):36-37. (CHEN Liping, FANG Bo, JI Chengkang. Application of GPS to correct ADCP measurement Error [J]. Yangtze River, 2002, 33(1):36-37. (in Chinese))

[8] 彭万兵,官学文,赵东,等. 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,2004,2(5):42-44. (PENG Wanbing, Guan Xuewen, ZHAO Dong, et al. Application of combined ADCP and GPS techniques to inner river flow pattern [J]. Geospatial Information, 2004, 2(5):42-44. (in Chinese))

[9] 邹华,彭勤建,刘强,等. 光纤陀螺罗经辅助 ADCP 导航方法研究[J]. 舰船电子工程,2008,28(3):73-75. (ZOU Hua, PENG Qingjiang, LIU Qiang. Fiber optic gyro compass aided ADCP navigation methods [J]. Ship Electronic Engineering, 2008, 28(3):73-75. (in Chinese))

[10] 韩伯成,霍中元,陈斌,等. 走航式 ADCP 在流量测验中的应用[J]. 水利水电科技进展,2008,28(增刊1):154-155. (HAN Bochen, HUO Zhongyuan, CHEN Bin. Navigation type application of ADCP in flow test [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(Sup1):154-155. (in Chinese))

[11] 张红梅,陈志高,赵建虎,等. 基于集成外部传感器的 ADCP 精确测量方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2016,41(8):1131-1136. (ZHANG Hongmei, CHEN Zhigao, ZHAO Jianhu, et al. ADCP integration measurement based on external sensor [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(8):1131-1136. (in Chinese))

[12] 杜亚南,李保. 长江河口和密西西比河河口水文测验工作比较[J]. 水文,2012,32(6):57-58. (DU Yanan, LI Bao. The Yangtze estuary and the Mississippi River estuary hydrological comparison research and enlightenment [J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(6):57-58. (in Chinese))

[13] 刘桂平,徐华,王珏. 长江口北支河段全潮水文测验水通量平衡计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(5):405-409. (LIU Guiping, XU Hua, WANG Jue. Water balance calculation method for hydrological observations during a tidal period in north branch of Yangtze Estuary [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(5):405-409. (in Chinese))

(收稿日期:2016-01-20 编辑:熊水斌)

