

# 潮流量推算方法及其误差的初步分析

杜迎燕<sup>1</sup>, 宋政峰<sup>1</sup>, 赵德友<sup>2</sup>

(1.上海市水文总站,上海 200232; 2.江苏省水文水资源勘测局,江苏 南京 210029)

**摘要:**通过误差比较,对代表潮平均法、代表潮连时序法、潮汐要素法等潮流量推算方法的应用进行评价,提出潮流量推算的方法建议。

**关键词:**潮流量;推算;精度;代表潮;潮汐要素

中图分类号:P332.4

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)05-0065-05

## 1 前言

与非潮汐河流的水文测站完全不同,潮流量站无法通过水位流量关系由水位观测资料间接推算流量,所有的流量资料必须依赖实测获得。由于潮水河文情态比较复杂,测验难度大,测验限制条件比较多,故长期以来,精度良好、完整连续的潮流量实测资料稀缺,影响了潮汐水文测验基础研究的开展,尤其对潮流量推算的研究。随着沿海地区对水资源问题的日益重视,感潮地区流量资料的客观需求在不断提高。潮流量推算方法的可靠性、有效性需要确定,大量历史资料的精度状况也有待于进行系统评估。

## 2 潮流量的推算方法验证

因潮流的非稳定流特征和沿海地区河道严重的航运干扰,虽然代表流速法(缆道代表垂线施测、测船定位代表垂线施测)进行潮流量测验不失为一种可靠方法<sup>[1-2]</sup>,但进行常年长期连续观测也并非易事,故往往采取按一定的潮次控制进行代表性观测以推算全年流量。对受设施、环境影响不具备施测条件但必须了解潮流量情况的站,则转而通过一定的要素相关方法进行潮流量推算。

具有一定感潮强度、潮流变化较规则、潮汐特征明显的潮流量站,目前除了全年逐潮连续实测(H-ADCP自动观测)外,获得常年潮流量资料的主要方法有:代表潮平均法、代表潮连时序法和潮汐要素法推算月年潮流量。前两者需要依赖实测流量资料直接参与,后者

不需要同期实测流量资料参与。为了验证各种方法的可靠性、准确性和可操作性,确定合理、可靠和有效的潮流量推算技术方法,现用全年逐潮连续实测的潮流量资料,分别按不同的方法进行计算分析后加以比较。为获得比较合理的效果,有关的统计时段均按阴历设定。

### 2.1 样本资料

本次试验利用黄浦江松浦大桥站的实测潮流量资料,分别以代表潮平均法、代表潮连时序法和潮汐要素多元线性回归法来推算潮流量。该站位于黄浦江中游,感潮强度中等,有规则的潮汐过程,同时承接太湖主要下泄径流,是黄浦江重要控制站,常年监测上游来水变化。该站历史上采用缆道按代表潮测流,先后以潮汐要素法和代表潮连时序法推流,经研究取得突破后于2006年在国内率先投产应用H-ADCP连续实测潮流量。本次研究的样本资料使用了连续3年共2118个潮流期的实测资料,测次间隔为5min,总计31.5万个瞬时流量值。其H-ADCP代表流速关系的标准差为5%、三项检验均符合规范指标要求、关系线多年稳定(多年间偏离小于2%),数据资料系统一致、具有较高的精度水平。

### 2.2 代表潮平均法

代表潮平均法早就被列入《水文测验手册》,成为一项推荐性的技术方法,其要点是通过施测每月大、中、小潮的单个潮流期的潮流量,计算其平均潮量,乘以全月实有潮总数,推算月、年总潮量及平均流量。代表潮的选择方法有多种,通常为全月8潮或6潮,常

收稿日期:2014-05-08

作者简介:杜迎燕(1978-),女,浙江安吉人,硕士研究生,工程师,主要从事水文测验与资料整编的应用和研究。E-mail:yoyo781021@sina.com

表1 代表潮的不同组合

Table 1 The different combinations of the representative tides

代号	代表潮	大	中	小	中	大	中	小	中
	阴历日期	3	6~7	10	13~14	18	21~22	25	28~29
8A	全月测 8 次	△	×	×	△	×	△	△	×
8B		×	△	△	×	△	×	×	△
6A	全月测 6 次	△	×	×	×	×	△	△	
6B		×	△	△	△	△	×	×	
6C		△		×	△	×		△	×
6D		×		△	×	△		×	△

注:(1)代号中数字为实测潮期的月数量,字母为区分不同组合的序号。

(2)符号“△”代表周日潮中的较大潮,符号“×”代表周日潮中的较小潮。

(3)潮流期施测日期、时间基本固定,可根据测站大、小潮的实际经常发生日期确定,但上半月和下半月的日期间隔应对称。

表2 不同代表潮组合方法的月总潮量(月平均流量)误差统计(%)

Table 2 The error statistics of the monthly total tidal or monthly mean tidal discharge of the representative tides from the different combinations (%)

代表潮 组合方案	保证率			系统误差	误差范围	不确定度
	误差<5%	误差<10%	误差<15%			
8A	35	62	78	-3.6	-34.0~24.8	24.3
8B	41	84	95	-2.9	-25.7~15.3	15.7
6A	32	41	81	4.3	-49.1~55.3	33.9
6B	35	57	81	5.6	-12.7~30.6	21.6
6C	38	51	65	-9.1	-34.3~23.4	25.8
6D	14	43	62	5.6	-12.7~30.6	21.6

见的组合方法<sup>[3]</sup>见表 1。

按表 1 中的六种方案,计算阴历月总潮量(月平均流量),以实测阴历月总潮量(月平均流量)为近似真值,进行统计分析(见表 2),相对误差在 15%以内<sup>[4]</sup>的保证率大部分达到了 75%以上,但相对误差范围较大,误差分布范围达到-49%~55%,不确定度均大于 15%,最高达到 34%,除了“8B”方案外不确定度均在 20%以上。可见这一方法对代表潮的分布依赖很大,具有一定的局限性,月平均流量精度难以保证。

六种方案的年总量(年平均流量)相对误差(见表 3),以资料统计来看,误差分布范围在-12%~7%之间,“6C”方案总体表现出较大的偏差。除“6C”方案有一年显示超过 10%以外,其余在-5.5%~6.8%,误差小于 10%的保证率可达到 94%,但误差小于 5%的保证率仅 39%。由大部分组合方案的计算结果可见,该方法推算的年平均流量,其精度效果虽不完全令人满意,还会有较大误差发生的情况,但大部分结果可以接受。

研究表明:代表潮平均法的推流精度表现并不令人满意,且不同的组合方式之间也有差异,其关键原因

表3 不同代表潮组合方法的年总潮量(年平均流量)相对误差(%)

Table 3 The relative errors of the annual total tidal or annual mean tidal discharge of the representative tides from different combinations (%)

代表潮组合方案	第一年	第二年	第三年	三年平均	误差范围
8A	0.3	-5.5	-3.4	-2.9	-5.5~0.3
8B	-3.8	-0.3	-6.1	-3.4	-6.1~-0.3
6A	6.7	0.8	5.5	4.4	0.8~6.7
6B	5.7	2.3	6.8	4.9	2.3~6.8
6C	-8.6	-12.4	-7.2	-9.4	-12.4~-7.2
6D	5.6	2.3	6.8	4.9	2.3~6.8

注:样本容量仅为 3 年,不足以进行标准差的有效计算。

是日夜潮不等产生的偏畸影响,代表潮的分布并不具有典型代表性,以至于组合潮的平均值与月周期的实际结果存在偏差,一旦代表潮的上游径流或下游潮水异常则更会影响计算结果。虽然年量推算结果尚可有限接受,但仍然存在较大系统偏离的情况;而月量推算结果总体上难以形成有效的可靠性结论,虽然本例中“8B”个案的月年量推算结果尚可,但整个方法总体

表4 月平均流量误差统计(%)

Table 4 The error statistics for the monthly mean tidal discharge of the representative tides (%)

代表潮 组合方案	保证率			系统误差	误差范围	不确定度
	误差<5%	误差<10%	误差<15%			
连续周日潮	100	100	100	0.0	-4.3~0.4	1.8
隔天周日潮	89	97	100	-0.3	-11.9~6.4	7.5
全月8个周日潮	62	92	100	-0.7	-12.6~10.8	11.5

表5 年平均流量相对误差统计(%)

Table 5 The relative errors of annual mean tidal discharge of the representative tides (%)

代表潮组合方案	第一年	第二年	第三年	误差范围
连续周日潮	0.35	-2.20	-2.21	-2.2~0.4
隔天周日潮	2.02	-1.18	-2.74	-2.7~2.0
全月8个周日潮	-1.40	-2.22	-2.56	-2.6~-1.4

效果上无足够说服力。因此,该方法不宜使用,至少需要进行大量的试验才能确定,代表潮的组合方案需要通过精度试验选定。

### 2.3 代表潮连时序法

代表潮连时序法考虑了日夜潮的差异,通过一定的双代表潮组合,全年按“大潮~中潮~小潮~中潮~大潮……”的“全月8个周日潮”组合方式观测,实测两个相邻潮流期(即一个周日潮),以周日潮平均值按周日潮潮次为时序,采用连时序法计算月平均流量。实际上,这个方法相当于周日潮平均流量的面积包围法。

现分别对“全月8个周日潮”、“隔天周日潮”、“连续周日潮”三种方式,进行了月量推算的对比分析(见表4),结果表明:“全月8个周日潮”方式,其相对误差均小于15%、误差10%以内的保证率达到了90%以上,比单潮代表潮平均法效果显著提高,偶然误差范围较小,系统误差小于1%,不确定度小于12%,能满足现有潮流量测验的精度要求。“隔天周日潮”方式的效果则更好。而“连续周日潮”计算的月平均流量与实测月平均流量,基本接近。在这一方法中,随着周日潮间隔的缩短,双代表潮组合法的精度会显著提高。

从年平均量的推算结果来看(见表5),其误差均未超过3%。“连续周日潮”的结果与实测值最接近,“隔天周日潮”和“全月8个周日潮”的结果也均接近实测值。

由此可见,日夜潮不等现象,对于推流计算精度的影响比较大,双代表潮观测作周日潮平均流量连时序法,与单潮组合的代表潮平均法相比,其推流的准确性

显著提高,无论月量还是年量的推算结果精度效果都比较理想。

需要注意的是,对于感潮强度较弱,落潮流优势显著,全落潮容易发生和涨潮流潮际不稳定变化比较大的情况,即使分离日夜潮作单潮连时序再综合日夜潮推算,或者区分涨落潮进行推算,月平均值的误差范围仍然会有所增大,但年平均值不受影响。

### 2.4 多元线性回归法

属于多元线性回归法的具体方法主要包括合轴相关法、定潮汐要素法、全潮要素相关法,以及闸坝站常用的一潮推流法。对于河流上游在较大范围内不受工程影响和下游为自然河段,通常采用全潮要素相关法。这类方法的特点是不需要潮流量同期实测数据参与,与上述两种方法相比有其简便之处。

根据水系结构和上游径流偏强、径流强度变化不一的特点,针对所用样本资料采用以下两种条件建立多元回归方程:(1)下游7.2km远的干流站和上游7.3km远的干流站;(2)下游站不变,上游三大支流把口站(距离13.1km、17.7km、17.7km)。回归方程的应变变量有4个:涨憩时刻、落憩时刻、涨潮平均流量、落潮平均流量。试验运用SPSS统计分析软件进行各因子的显著性分析,选择主要影响因子,以逐潮平均流量(潮量)与上下游及本站潮汐要素建立多元线性回归方程,据此推流。先利用样本中2007年的实测资料拟合方程,再用2007~2009三年的实测资料作验证分析。

两种方案的多元线性回归方程拟合结果,相关指标的误差情况基本一致。通过统计(见表6)可见,涨憩时刻推算结果的精度优于落憩,而落潮平均流量推算结果的精度却显著优于涨潮。

两个方案的逐潮统计结果相当,这也说明增大边界距离对逐潮推算结果并无意义,从机理上说反而更容易受到其它外界影响。统计数据表明,逐潮涨潮平均流量的不确定度过大,基本在80%以上;落潮平均流量的不确定度也普遍在15%以上。由于受涨憩、落

表6 潮汐要素法推流结果的误差统计

Table 6 The error statistics of the tidal discharge calculation result from the tidal factor relation method

统计项	指标	方案 1(均为干流)			方案 2(干流和支流)		
		第一年	第二年	第三年	第一年	第二年	第三年
逐潮涨潮	误差<15%的保证率/%	79	72	69	85	76	73
平均流量	不确定度/%	98	93	95	136	83	62
逐潮落潮	误差<15%的保证率/%	95	93	91	97	95	90
平均流量	不确定度/%	16	16	20	13	15	19
逐潮全潮	误差<15%的保证率/%	30	30	30	37	37	36
平均流量	不确定度/%	2174	886	1457	1949	512	977
	误差<15%的保证率/%	50	58	67	67	92	83
	误差<10%的保值率/%	42	42	33	42	67	58
月净泄量	误差<5%的保值率/%	17	25	25	17	33	33
	误差值范围/%	-5~79	-21~19	-29~29	-5~75	-23~11	-23~15
	不确定度/%		39			33	
	相对误差/%	14.5	2.9	-3.5	12.6	2.7	-3.3
年净泄量	相对误差 3 年均值/%		8.7			7.6	
	误差值范围/%		-3.5~14.5			-3.3~12.6	

表7 憩流时间推算结果的误差统计

Table 7 The error statistics of the calculation result of tidal rest time from the tidal factor relation method

统计项	指标	方案 1(均为干流)			方案 2(干流和支流)		
		第一年	第二年	第三年	第一年	第二年	第三年
逐潮 涨憩时刻	误差< $\pm 1$ h的保证率/%	92	86	75	93	93	92
	误差< $\pm 0.5$ h的保证率/%	64	57	33	65	68	63
	误差范围/min	-96~133	-96~153	-79~168	-100~132	-99~141	-79~142
	平均误差/min	0	22	42	0	10	14
	不确定度/min	79	132	60	67	66	44
逐潮 落憩时刻	误差< $\pm 1$ h的保证率/%	82	74	66	83	85	84
	误差< $\pm 0.5$ h的保证率/%	43	32	30	39	56	58
	误差范围/min	-278~80	-290~101	-311~91	-340~77	-271~84	-400~75
	平均误差/min	0	5	20	0	-10	-13
	不确定度/min	109	118	66	112	100	79

憩时刻和涨潮、落潮平均流量的推算误差的综合影响,全潮平均流量的结果离散、误差很大,误差小于15%的保证率均低于四成,不确定度巨大。尽管拟合样本采用了一整年的数据,但月量推算仍然出现偏差较大的情况,离散度高,且发生在拟合数据本年份,这说明水情的多变和本方法自身对于月量推算的不稳定性都有一定的影响。不过,年量推算结果均在15%以内,也说明在超大样本容量下,离散度大的误差可以适度抵消。统计结果说明进行逐潮推流并不现实,潮汐要素法推流也只能基于月年推流使用。

试验还表明:利用潮位拟合憩流时刻,误差较大,误差在0.5h以内的保证率较低,推算效果不佳(见表7),这也是本方法的一个重大弱点。这与特征潮位本

身摘录精度有关,且潮位变化复杂,受各种外界影响多,对于全落潮更难以有效应对。需要说明的是,相对代表潮平均法和代表潮连时序法不需要推算潮时,潮汐要素法却有独立进行相应潮时推算的需要,尽管潮时并未直接参与数值拟合计算,其自身误差不对推流结果直接产生作用,但以平均流量推算结果来计算潮量或以潮量推算结果来计算平均流量,均要用到时间,而时间推算的不可靠却会严重影响二次计算结果。

显而易见,以潮汐要素多元线性回归法进行潮流量推算,逐潮推算结果的精度很差,根本不能采用。月推算结果也并不理想,较难接受。只有年推算结果尚可有限接受,且可以在年际间利用。

### 3 不同推流方法的历史实践情况

在潮流量测验历史上,没有连续长系列的实测流量资料,大多为短期分散的代表垂线法或少量垂线筒测法的测验资料,代表潮平均法和潮汐要素多元线性回归法曾经长期用于推算月年潮流量,在没有计算机辅助计算的时代,所采用的合轴相关图<sup>[3]</sup>逐步回归的方式等同于多元回归,而作为对代表潮平均法改进提高的周日潮连时序法是20世纪末在黄浦江水系开始运用的方法。

研究表明:历史上的多垂线流量测验中单次断面流量具有一定的测验精度<sup>[2,5]</sup>,这说明用于推流计算的样本资料是具有可信度的,而推流成果的可靠性则主要和推流方法密切相关。

理论上来说,一个稳定的河槽具有水力因素的稳定性,控制效果良好,也就是说,多元回归法推流方程中的潮汐要素可以通过试验分析、优化确定和维持稳定。在对历年的潮汐要素多元回归法推流方案的误差情况进行的分析中发现,不同阶段的样本资料形成的推流方程,离开样本所在时段,其相关性下降15%~20%,精度指标的下降更为严重。这与本次研究中年际一致的结果完全不同,究其原因那些样本的代表性不足,这也是导致以往采取一年一线的原因。研究还发现,历史实践中,回归方程中的上下游潮汐要素因子,其条件边界的选择距离过远,容易受到干扰。此外,同站的历年方案所选择的因子也各不相同,可见历史方案的科学性有所欠缺。

### 4 结语

通过研究分析,就潮流量推算可以形成以下结论和建议:

(1) 除非依据一年以上具有高精度的连续实测资料,并经分析确定,精度满足要求,否则不适宜采用代

表潮平均法进行潮流量推算。

(2) 施测双代表潮的周日潮平均流量的代表潮连时序法,比单潮代表潮平均法的精度效果要好很多,也不需要比测率定,能有效消除日夜潮不等的影响,必要时可及时加密观测控制水情突变,是相对稳妥的推流方法。

(3) 潮汐要素多元回归法通过逐潮计算进而推算月年的量,但该方法的逐潮推算结果离散度非常大,这种离散虽然可以在月、年平均值上借容量的扩大而均化,但月统计量结果依然不可靠,仅年统计量还能利用。对于缺乏足够、准确的连续实测资料,多元回归方程的建立有较大风险,也不能有效应对水情的异常变化。

作为潮流量推算方法,需要满足一定的潮汐条件,所用断面潮流应具有必要的感潮强度,有较为规则的潮规律,对于弱感潮河段和潮规律变化复杂的河段依然需要寻求可靠的实测手段获取潮流量资料。

#### 参考文献:

- [1] DB31/T 763-2013, 感潮河段与濒海水文测验及资料整编技术规范[S]. (DB31/T 763-2013, Specification for Hydrologic Observation and Data Processing of Tidal Reach and Estuary and Coastal Water[S]. (in Chinese))
- [2] 宋政峰,陈利晶,杜迎燕,等. 感潮河段与河口海湾水文测验规范技术研究[R]. 上海市水文总站, 2011.5. (SONG Zhengfeng, CHEN Li-jing, DU Yingyan, et al. Tidal river and estuary hydrometric standardization research [R]. Shanghai Hydrology Bureau, 2011.5. (in Chinese))
- [3] 水电部水文司. 水文测验手册 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1983. (Hydrology Bureau, Ministry of Water Power. Hydrometry Manual[M]. Water Resources and Power Press, 1983. (in Chinese))
- [4] GB 50179-93, 河流流量测验规范 [S]. (GB 50179-93, Code for Liquid Flow Measurement in Open Channels [S]. (in Chinese))
- [5] 宋政峰,杜迎燕. 对潮流量测验误差的探讨[J]. 水文, 2014, (1). (SONG Zhengfeng, DU Yingyan. Discussion on error control of tidal discharge measurement [J]. Journal of China Hydrology, 2014, (1). (in Chinese))

## Research on Tidal Discharge Calculation Method and Its Errors

DU Yingyan<sup>1</sup>, SONG Zhengfeng<sup>1</sup>, ZHAO Deyou<sup>2</sup>

(1. Shanghai Hydrology Bureau, Shanghai 200232, China; 2. Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** By the error comparison, this paper evaluated the application of the tidal discharge calculation methods including of the mean representative tide method, representative tide chronological method and tidal factor relation method, and put forward suggestion on the tidal discharge calculation.

**Key words:** tidal discharge; calculation; accuracy; representative tide; tidal factor