

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.06.007

潮汐调和分析与应用研究

石景元¹, 路川藤²

(1.东海航海保障中心, 上海 200090; 2.南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要:基于长江口外鸡骨礁、绿华山潮位站多年实测潮汐资料,开展潮汐调和分析与应用研究。采用最小二乘法计算调和常数,研究不同分潮组合及不同资料长度对调和分析结果的影响。采用规范法及直接预报法计算深度基准面,并分析计算结果。采用余水位订正方法推算潮位,并进行精度验证。结果表明:调和分析精度随分潮个数的增加而提高;采用年实测潮汐资料调和分析的精度总体高于采用多年实测潮汐资料调和分析的精度;采用预报年份相邻的年实测潮汐资料进行潮汐预报精度较高;理论最低潮面计算值,规范法较直接预报法偏小。基于绿华山站与鸡骨礁站实测资料进行余水位推算验证,精度基本满足实用要求。

关键词:调和分析;理论最低潮面;余水位

中图分类号:P714

文献标志码:A

文章编号:1003-2029(2019)06-0046-05

海洋潮汐现象可视为一系列假想天体周期不同的分潮叠加而成。关于调和分析计算,国外学者汤姆森(即开尔文)、达尔文、杜德森等奠定了分析方法的基础。国内调和分析计算起步相对较晚,郑文振、陈宗镛、方国洪等人的研究成果具有一定的代表性^[1]。

潮位资料大都通过布设潮位观测站来获取,随着卫星通信及遥感技术的发展,卫星测高获取潮位取得快速发展,如李大伟^[2]、赵杰^[3]等对卫星测高的潮位数据进行调和分析,成果令人满意。近年来,随着计算机科学的迅猛发展,调和分析计算方法与效率得到长足发展,应用范围也越来越广,如 A R Amiri-Simkooei^[4]利用 LS-HE 方法,采用 413 个潮汐线性及其非线性分量进行调和分析,并应用于英国验潮站,效果较好;张泽国^[5]提出了一种基于灰色的数据处理群模块化(Grey-GMDH)潮汐水位实时预测模型,可预测天文潮和非天文潮;宋艳朋^[6]开发了潮位数据的调和分析与潮位预报系统,适用性较好;杨锋^[7]实现了基于高低潮数据的潮汐调和分析计算;Section of Geodesy^[8]采用调和分析方法研究湖泊的

内潮问题。在海道测量中,潮位控制是目前的难点之一,多采用抛设临时潮位站,然后通过长期潮位站调和分析对临时潮位站潮位修正。如刘雷^[9]、王丽华^[10],研究了基于余水位订正的海洋潮位推算关键技术以及精度问题。

本文在前人研究的基础上,以长江口外海域为研究对象,对绿华山、鸡骨礁等长期潮位站数据进行调和计算,研究调和精度及余水位推算适用性等问题,为相关工程或科研问题提供技术借鉴。

1 调和分析

鸡骨礁位于长江口外,地理坐标(122°23' E, 31°11' N),由 3 个小礁石组成,大者直径 10 m,面积 100 m²,小者直径仅 5 m,面积 25 m²,周围暗礁较多,浪大流急。绿华山站位于(122°37' E, 30°49' N),西距南汇咀约 70 km,距离长江口 10 m 等深线外 25 km(如图 1 所示)。

选取鸡骨礁站、绿华山站 2013-2017 年资料,分析不同资料长度及分潮数对调和分析的影响。

收稿日期:2019-07-15

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405400)

作者简介:石景元(1984-),男,高级工程师,主要研究方向为水文潮汐。E-mail:26218428@qq.com

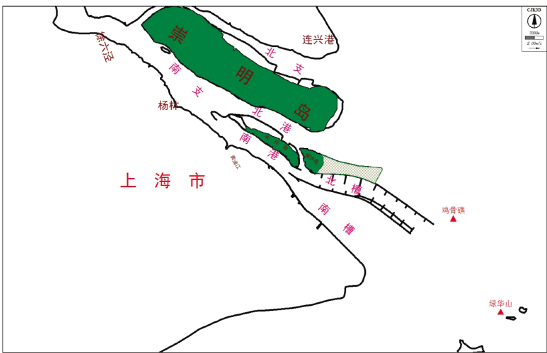


图 1 鸡骨礁、绿华山潮位站位置示意图

1.1 调和分析方法

潮汐调和分析的目的是根据潮汐观测资料计算各个分潮的调和常数。调和分析首先需要选择分潮,即将实际潮汐分成许多有规律的分振动,被分离出的具有一定周期、振幅的分振动称为分潮。

任意一个分潮的表达式可以表示为:

$$\zeta(t)=fH\cos(\sigma t+V_0+u) \tag{1}$$

式中: $\zeta(t)$ 表示任意时刻的潮位值; f,u 分别表示月球轨道 18.6 年变化引进来的对平均振幅 H 和相角的订正值; σ 表示分潮角速度; t 表示时间; V_0 表示初相角。由此看出, $\sigma t+V_0+u=0^\circ$ 发生高潮。事实上并不是如此,一般要落后一段时间才发生高潮。因此,为了符合实际情况,上式相角中引入一迟角 K' ,亦即:

$$\zeta(t)=fH\cos(\sigma t+V_0+u-K') \tag{2}$$

式中: H,K' 便叫分潮的调和常数。选取较常用的最小二乘法计算潮汐调和常数。

潮位可以表示为:

$$\zeta'(t)=a_0+\sum_{j=1}^m(a_j\cos\sigma_jt+b_j\sin\sigma_jt) \tag{3}$$

用它来逼近实测的潮位 $\zeta(t)$,按最小二乘法原理,必须使式(4)为最小,以此来确定系数 a_j,b_j 。

$$D=\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}[\zeta(t)-\zeta'(t)]^2dt \tag{4}$$

1.2 分潮组合对调和影响

实际水位可以看作是许多调和分潮迭加的结果,不过在实际分析中只能选取其中有限个较主要的分潮,使得利用这些分潮能够得到一个良好的计算结果,这就存在一个选取分潮的问题。分潮选取的原则为,相邻的两个分潮角速度差 $>360/N,N$ 为资料长度。如:1 个月资料,角速度差 $>0.5^\circ$;1 a 资料,角速度差 $>0.041^\circ$ 。

对于水文站的长期资料,不同学者选取分潮个

数不同,基于鸡骨礁站、绿华山站 2017 年实测潮汐资料,分别采用 13,64,128 个分潮数量进行调和与分析,统计不同数量分潮调和与分析误差,如表 1~表 2 所示,鸡骨礁、绿华山潮位站 128 个分潮调和与分析精度明显高于 64 个和 13 个,并且分潮越多,调和与分析精度越高。

表 1 鸡骨礁站不同数量分潮调和与分析误差对比
单位:%

	13 个分潮	64 个分潮	128 个分潮
$\leq 0.10\text{ m}$	48.1	55.6	56.3
$\leq 0.20\text{ m}$	78.5	84.0	84.4
$\leq 0.30\text{ m}$	92.0	94.7	94.8

表 2 绿华山站不同数量分潮调和与分析误差对比
单位:%

	13 个分潮	64 个分潮	128 个分潮
$\leq 0.10\text{ m}$	55.5	67.2	66.7
$\leq 0.20\text{ m}$	84.4	89.2	89.3
$\leq 0.30\text{ m}$	95.6	96.8	96.9

1.3 资料长度对调和影响

调和与分析中,若资料长度足够长,则应采用长周期资料进行预报。但对于资料长度相对较短的情况,应合理选择资料长度进行潮汐预报。基于绿华山站 2013–2017 年实测潮汐资料,分别对 1 a 资料和 5 a 资料长度进行调和与分析,统计不同资料长度调和与分析误差,如表 3 所示,1 a 资料长度调和与分析误差(2013 年除外)大都比 5 a 调和与分析误差小,误差范围越小,精度越高。2016 年误差小于 0.15 m 的资料比 5 a 分析多 8.8%,而误差小于 0.30 m 的资料比 5 a 分析多 2.0%。表 4 为绿华山站不同时段潮汐预报误差对比。采用 2016 年资料计算的调和常数预报 2017 年潮汐精度最高,其次为 2013–2016 年资料,2015 年调和常数计算的精度最低。由此可以看出,采用预报年份相邻的年实测潮汐资料进行潮汐预报精度较高,而采用与预报年份间隔时间较长($>2\text{ a}$)的 1 a 潮汐资料进行调和计算进行潮汐预报,精度较低。因此,若预报 2018 年潮汐值,建议采用 2017 年实测资料进行调和与分析及预报。

1.4 资料修正对调和影响

实测潮汐资料中,受外界干扰因素,如台风、寒潮等,某时间段的潮位波动幅度大,对调和常数计算会产生干扰,为将此干扰因素降到最低,首先采用实测值,进行调和常数计算,然后根据天文分潮计算对实测资料进行修正,重复上述步骤,最后,得

表 3 绿华山站不同时段调和和分析误差对比

单位: %

范围	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2013-2017 年
≤0.15 m	78.46	85.64	86.53	89.17	85.90	80.38
≤0.20 m	88.59	92.89	92.83	95.15	93.23	89.20
≤0.30 m	96.59	97.35	98.00	98.62	98.11	96.69

表 4 绿华山站潮汐预报(预报 2017 年)误差对比

单位: %

	与实测值对比			与海洋局潮汐表对比		
	2015 年	2016 年	2013-2016 年	2015 年	2016 年	2013-2016 年
≤0.15 m	67.02	71.85	70.32	71.59	81.91	74.27
≤0.20 m	79.93	83.16	82.82	85.45	93.26	88.32
≤0.30 m	92.65	94.33	94.68	97.99	99.37	99.50

到受外界干扰较小的天文分潮调和常数。

将绿华山站资料修正后的潮汐调和常数与修正前的对比。由表 5 知,资料修正后,误差小于 0.15 m 的资料长度明显增大,误差小于 0.30 m 的资料变化不大。

表 5 资料修正后的调和常数精度对比

单位: %

	2017 年		2013-2017 年	
	修正前	修正后	修正前	修正后
≤0.15 m	80.39	83.94	78.46	79.09
≤0.20 m	89.20	90.68	88.59	88.83
≤0.30 m	96.69	96.57	96.59	96.53

2 深度基准面计算

我国沿海港口的深度基准面采用理论最低潮面。对理论最低潮面计算有直接预报法和规范法两种方法。

(1) 直接预报法

利用 13 个分潮的调和常数,直接预报推算,可以获得最为准确的理论最低潮面,但需要进行超长时间段(数万年、数十万年)的数值计算,工作量巨大,受限于当时落后的计算工具,而无法在实际中应用。但在计算机普及的今天,计算工具不再是障碍,直接预报法已易于实现。

(2) 规范法

理论最低潮位选用 13 个分潮进行推算,分别为: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, M4, MS4, M6, S_a, SS_a, 求得相应的理论最低潮位。规范法作为直接预报法的简化,受假定条件所限,计算值一般小于

直接预报法。

表 6 对比直接预报法和规范法计算的理论最低潮面。其中直接预报法采用 13 个分潮计算 2 万 a 时间。对于绿华山潮位站,基于 1 a 实测资料和 5 a 实测资料,直接预报法和规范方法计算误差均较小,受资料长度影响程度较小,但规范方法计算理论最低潮面值比直接预报法偏小,其中基于 1 a 实测资料,规范方法计算理论最低潮面值比直接预报法小 0.42~0.46 m,基于 5 a 实测资料,规范方法计算理论最低潮面值比直接预报法小 0.43~0.52 m,实际应用中,可根据实际情况使用或修正两种方法的计算值。

表 6 理论最低潮面计算值(平面海平面为基准面)

单位: m

名称	直接预报法		规范方法	
	2017 年	2013-2017 年	2017 年	2013-2017 年
绿华山	-2.62	-2.63	-2.20	-2.20
鸡骨礁	-2.61	-2.66	-2.15	-2.14

3 余水位推算

在忽略观测误差时,余水位是指从实测水位中去除天文潮位和平均海面之后的剩余部分, t 时刻的余水位的数学表达式为:

$$S(t)=h(t)-MSL-T(t) \quad (5)$$

式中: S 为余水位序列; h 为实测水位序列; MSL 为平均海面; T 为天文潮位,由调和或响应分析获得。一般认为,造成水位异常的因素主要包括天气因素(主要是风)造成的短期水位异常;气候因素

造成水位季节性变化异常;天文潮推算误差的影响。

在开阔海域,余水位具有良好的空间一致性,因此常常用来进行潮位插补订正,但需要进行精度验证。假定 A 为基准站,一般选择长期验潮站,B 为推算站。采用基准站的实测水位剥离潮汐和余水位,并用余水位订正推算站的天文潮位。假设 A,B 两站余水位相同,则 B 站水位可由 A 站水位推算得到。计算公式如下:

$$h_B=MSL_B+T_B+S_A \tag{6}$$

一般而言,长期验潮站余水位的控制范围应该在 50 km 范围以内。以长江口鸡骨礁、绿华山站为例,进行余水位推算分析。鸡骨礁、绿华山站均为长期潮位站资料,资料长度为 2013–2017 年。将鸡骨礁站作为长期站,将绿华山站作为临时潮位站,由鸡骨礁站推算绿华山站的潮位过程。两站相距约为 44 km(见图 1)。

鸡骨礁站选取 2013–2017 年共 5 整年资料,绿华山站选取 2013 年 1 月 1 日~2013 年 1 月 31 日资料作为短期资料,由鸡骨礁站长期资料计算调和常数差比关系(振幅比、迟角差),订正绿华山站短期资料的调和常数,并预报绿华山站 2013–2017 年潮位过程,分析计算精度,统计误差。基于余水位的特性,选取气象因素扰动较小的 1 月进行误差统计。

由表 7 可知,采用绿华山站 1 个月的数据作为短期资料,进而采用鸡骨礁站长期资料余水位进行潮位推算,经与实测资料对比,绿华山站各年误差

基本接近,各年小于 0.10 m 的数据比例约为 80%,小于 0.20 m 的数据比例超过 95%,均方差小于 0.08 m。

表 7 绿华山站误差统计

	单位:%				
	2013 年 1 月	2014 年 1 月	2015 年 1 月	2016 年 1 月	2017 年 1 月
≤0.10m	82.46	74.49	75.71	78.54	70.58
≤0.20m	99.46	98.65	97.17	98.65	97.44
≤0.30m	100.00	100.00	99.87	100.00	99.60

4 结 论

基于鸡骨礁、绿华山潮位站多年实测潮汐资料,采用最小二乘法进行潮汐调和分析、理论最低潮面计算、余水位推算,结论如下:

(1) 相邻分潮角速度差满足资料长度条件下,分潮越多,调和分析精度越高;

(2) 采用预报年份相邻的年实测潮汐资料进行潮汐预报精度较高;

(3) 对于深度基准面的计算,直接预报法和规范方法均受资料长度影响程度较小,规范方法计算深度基准面比直接预报法偏小;

(4) 开阔海域余水位推算方法精度较高,可用于进行潮位推算、插补订正等,在水深测量工程中,可弥补海上定点验潮站存在的成本高、零点漂移、易损坏等不足,具有较强的应用价值。

参考文献:

[1] 黄祖珂,黄磊.潮汐原理与计算[M].青岛:中国海洋大学出版社,2005.

[2] 李大炜,李建成,金涛勇.基于卫星测高数据的潮汐分析方法对比研究[J].海洋测绘,2017,37(02):20–23.

[3] 赵杰,汪一航,王永刚,王建.基于卫星高度计资料提取浙江近海的潮汐信息[J].应用海洋学学报,2018,37(03):356–365.

[4] A R Amiri-Simkooei,S Zaminpardaz,M A Sharifi. Extracting tidal frequencies using multivariate harmonic analysis of sea level height time series[J]. Journal of Geodesy,2014,88(10):975–988.

[5] 张泽国,尹建川,柳成.基于 Grey-GMDH 的模块化实时潮汐预报[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2018,48(11):140–146.

[6] 宋艳朋.潮汐调和分析预报与基准面计算软件实现及南海应用研究[D].青岛:山东科技大学,2017.

[7] 杨锋.基于高低潮数据的潮汐调和分析方法研究及应用[D].南京:南京师范大学,2016.

[8] Guangzhen Jin, Haidong Pan, Qilin Zhang, et al. Determination of harmonic parameters with temporal variations: An enhanced harmonic analysis algorithm and application to internal tidal currents in the South China Sea [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2018,35(7):1375–1398.

[9] 刘雷,李宝森,李冬,等.基于余水位订正的海洋潮位推算关键技术研究[J].海洋测绘,2012,32(02):11–14.

[10] 王丽华,万军.疏浚工程中基于余水位订正的沿海远距离潮位推算方法[J].水运工程,2017(07):73–77.

Harmonic Analysis and Application Study of Tides

SHI Jing-yuan¹, LU Chuan-teng²

1. *Donghai Navigation Safety Administration, Shanghai 200090, China;*

2. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu Province, China*

Abstract: In this paper, the harmonic analysis and application of tides are carried out, based on the measured tidal data of the Jigujiao and Lvhuashan stations off the Yangtze River Estuary for many years. The harmonic constants are calculated by the least square method to study the effects of different tidal assemblages and different data lengths on the harmonic analysis results. The depth data are calculated by standard method and direct prediction method, and the tide level is calculated by the residual water level correction method and the accuracy is verified. The results show that the accuracy of harmonic analysis increases with the increase of tidal number. Compared with using the observed tide data for many years, the accuracy of harmonic analysis based on annual measured tidal data is generally higher. Meanwhile, the accuracy of tidal prediction by using the observed tidal data of adjacent years is relatively high. As for the theoretical minimum tidal surface, the results obtained by the standard method are smaller than those obtained by the direct prediction method. The accuracy of residual water level calculation and verification based on the measured data of the Jigujiao and Lvhuashan stations basically meets the practical requirements.

Key words: harmonic analysis; theoretical minimum tidal surface; residual water level