



利用高低潮推算乘潮水位的方法

乔光全, 麦宇雄, 徐润刚

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 提出一种仅利用高低潮数据计算乘潮水位的新方法。以潮汐表中我国不同潮汐类型站点的高、低潮数据和逐时潮位数据为基础, 采用按规范方法计算的结果对新方法的结果进行验证, 从多角度分析计算误差。结果表明, 新方法的计算结果误差多在 10 cm 以内, 径流和浅水分潮影响明显区域的最大误差在 20 cm 左右, 结果精度能够满足工程需求。此方法含义明确、公式简单、计算方便, 可通过计算器或 Excel 软件简单求解, 在缺乏逐时潮位数据的海区, 可近似计算乘潮水位。

关键词: 高低潮; 乘潮水位; 误差分析; 特征潮位曲线; 三角函数

中图分类号: U 652.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0035-06

Method of calculating tide riding water level by high and low tide

QIAO Guang-quan, MAI Yu-xiong, XU Run-gang

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: We propose a new method to calculate the tide riding water level only using the high and low tide data. Based on the tide table's data of the high and low tide data and hourly tide level data from tidal stations of different tide types in China, we use the calculation results by the standard method to verify the results of this method, and analyze the calculation error from multiple aspects. The results show that most of the new method's errors are within 10 cm, and the maximum error is about 20 cm in the area which is obviously impacted by runoff and shallow water tidal component. Thus, the results of the new method can meet the engineering requirements. This method has clear physical meaning, simple formula and can be easily solved by calculator or Excel software. This method can be used to calculate the tide riding water level in the sea area lacking hourly tide level data.

Keywords: high and low tide; tide riding water level; error analysis; characteristic tide level curve; trigonometric function

对于港口与航道等近岸工程, 乘潮水位是重要的设计参数之一。在现行的《港口与航道水文规范》^[1]中, 其计算方法是先在潮位过程线上量取各潮次的乘潮历时潮位值, 之后采用累积频率法推求不同历时和累积频率的乘潮水位。其依据的原始资料须能绘制出潮位过程线。现在能收集到的潮位资料一般有两种: 逐时潮位数据和高低潮潮位数据, 在绘制潮位曲线方面, 前者的精度明显比后者更好。但针对部分海域, 潮汐表只给出高低潮数据, 在没有条件实测的情况下, 很难收集

到逐时潮位。因此, 本文提出一种仅采用高低潮数据推求乘潮水位的计算方法。

现在已有的利用高低潮数据推算乘潮水位的总体思路是将高低潮数据插值或推算至逐时潮位, 然后采用规范方法, 先计算乘潮历时, 再计算乘潮保证率。比如, 杨峰^[2]、刘田甲^[3]提出不同的潮汐数据插值方法, 乔光全等^[4]对比了将高低潮数据扩展到逐时数据的多种插值方法, 认为 Hermit 插值方法结果最优、计算简单, 为推荐方法; 王莹辉^[5]、王如云等^[6]先后提出高低潮数据

推求潮汐调和的分析模型，并用各自的模型预报至逐时数据。上述通过高低潮推算逐时潮位的方法，总体分为两种思路：1) 采用插值方法将高低潮数据插值到逐时潮汐数据；2) 利用高低潮数据近似推求潮汐调和常数，预报得到逐时潮位数据。这两种思路都需要复杂的算法，必须借助计算机语言编程方可实现，实际工程应用中多有不便。

基于此，本文转换思路，探讨先计算保证率、再计算乘潮历时的方法，可以采用高低潮潮位和潮时数据，不需要插值到逐时潮位即可推算工程需要的乘潮水位。本方法计算简单易操作，可以通过 Excel 软件或者计算器进行简单求解。

1 站点及数据选择

我国潮汐类型丰富，正规和不正规潮型、全日潮和半日潮型都有分布。本文的分析数据站点以 2018 年和 2020 年潮汐表^[7-8]为依据，站点选择尽量覆盖 4 种潮型，且潮汐表中同时提供高低潮和逐时潮位数据，便于对计算结果进行验证。另外，站点选择尽量覆盖我国沿岸，因此选择了北至山海关、南至八所的 11 个站点，其位置和相关潮汐参数见表 1。

表 1 站点位置及潮汐参数

潮型	站点	东经/ (°)	北纬/ (°)	潮型 系数 K	平均潮 差/cm
正规半日潮	三江口	119.117	25.420	0.21	537
	吕四	121.617	32.130	0.18	385
	厦门	118.067	24.450	0.34	420
不正规半日潮	舢舨洲	113.667	22.720	1.11	154
	京唐港	119.017	39.220	1.40	85
	湛江	110.400	21.170	0.85	214
不正规全日潮	铁山港	109.583	21.600	3.29	248
	海安	110.117	20.220	3.78	109
	山海关	119.817	39.980	9.89	61
正规全日潮	八所	108.617	19.100	6.39	127
	炮台角	108.383	21.400	5.06	207

2 计算方法

潮位波动随时间 t 连续变化，某时刻的高水位 H 或低水位 L 是 t 的函数 $H(t)$ 或 $L(t)$ ，且二者间隔排列，高、低潮数据序列可分别表示为 (t_0, H_0) ， (t_1, L_1) ， \dots ， (t_n, H_n) ， \dots ， (t_m, L_m) 和 (t_1, L_0) ，

(t_2, L_1) ， \dots ， (t_{n+1}, L_n) ， \dots ， (t_{m+1}, L_m) ，其中 $t_0 < t_1 < t_2 < t_3 \dots < t_n < t_{n+1} \dots < t_m < t_{m+1}$ ， n 为任意数， m 为高/低潮位组数。

首先根据序列中相邻时刻的高潮位和低潮位相减得到潮差序列 R_i ：

$$R_i = H_i - L_i \quad (i=0, \dots, m) \quad (1)$$

高水位序列 H_i 、低水位序列 L_i 和潮差序列 R_i 分别按照《港口与航道水文规范》附录 E 的方法，计算得到不同累积频率的高/低潮位和潮差。然后根据序列中所有高潮和低潮的潮时，计算平均涨潮历时 T_F 和平均落潮历时 T_E 。根据得到的潮高、潮差和潮时构造特定保证率下的特征潮位过程线，从该过程线上截取不同历时的水位作为该保证率的乘潮水位。在该方法中，乘潮水位的保证率通过高(低)潮和潮差的保证率得到，乘潮历时则从特征潮位过程线中确定。

以乘潮时间 2 h、保证率为 90% 的高潮乘潮水位为例，其计算过程为：

1) 假设按照上述步骤计算得到保证率为 90% 的高潮位和潮差数据分别为 $H_{0-90\%}$ 和 $R_{90\%}$ ，构造 90% 保证率的高潮过程特征潮位曲线，并把高潮时刻定位在 0 时刻，过程曲线的 3 个特征点为 $(-T_F, H_{0-90\%} - R_{90\%})$ 、 $(0, H_{0-90\%})$ 、 $(T_E, H_{0-90\%} - R_{90\%})$ 。

2) 采用三角函数公式，得到 $H-t$ (潮位-时间) 过程线(图 1)，3 个特征点高/低潮时刻对应三角函数的极值点。针对高潮过程，其计算公式为：

$$H(t) = \begin{cases} \left(H_{0-90\%} - \frac{R_{90\%}}{2} \right) + \frac{R_{90\%}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{T_F}t\right) & (-T_F \leq t \leq 0, \text{ 涨潮过程}) \\ \left(H_{0-90\%} - \frac{R_{90\%}}{2} \right) + \frac{R_{90\%}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{T_E}t\right) & (0 < t \leq T_E, \text{ 落潮过程}) \end{cases} \quad (2)$$

3) 在上述潮位曲线上依次量取高潮历时等于所需乘潮时间(本例中为 2 h)的潮位值，即得到乘潮时间 2 h、保证率为 90% 的乘潮水位。

也可采用公式计算得到特定乘潮历时 T_{tr} 的乘潮水位 $H(T_{tr})$ 。在高潮时刻前的历时为 $\frac{T_F}{T_F + T_E} T_{tr}$ ，

在高潮时刻后的历时为 $\frac{T_E}{T_F + T_E} T_{tr}$ ，将上述两个时间

点分别代入式(2)的涨潮过程和落潮过程公式, 可以得到:

$$H(T_{tr}) = (H_{0-90\%} - \frac{R_{90\%}}{2}) + \frac{R_{90\%}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{T_F + T_E} T_{tr}\right) \quad (3)$$

同理可得乘潮历时为 T_{tr} 的低潮乘潮水位 $L(T_{tr})$ 的计算公式:

$$L(T_{tr}) = (L_{0-90\%} + \frac{R_{90\%}}{2}) - \frac{R_{90\%}}{2} \cos\left(\frac{\pi}{T_F + T_E} T_{tr}\right) \quad (4)$$

式中: $L_{0-90\%}$ 为保证率为 90% 的低潮水位。

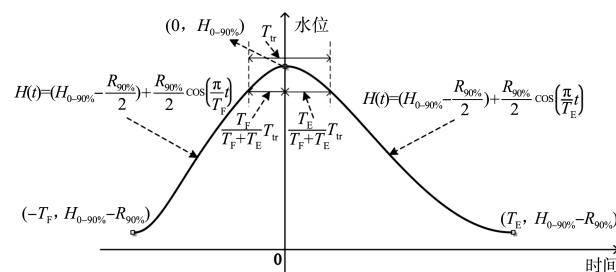


图 1 保证率 90% 的高潮过程特征点、特征曲线及公式

3 结果及分析

3.1 计算结果

将第 2 节计算得到的乘潮水位与《港口与航道水文规范》中逐时水位推算的乘潮水位之间的误差, 汇总见表 2。可以看出, 乘潮历时越长, 误差越大。2 h 乘潮水位的计算误差多在 6 cm 以内, 其中厦门、湛江和铁山港误差较大。3 和 4 h 乘潮水位误差略大, 大部分站点在 10 cm 以内, 厦门和湛江的误差略大, 在 10~20 cm, 另外, 低潮位的 4 h 乘潮水位误差也较大。

从站点分别看, 厦门和湛江两个站的高潮乘潮水位误差较其他站点大, 这可能是因为两个站点地形复杂, 受径流影响大, 浅水分潮比较突出, 两个站点的浅水分潮振幅分别为 18 和 13 cm。另外浅水分潮振幅较大的是舢舨洲站 11 cm, 其误差也比其他站点大。

表 2 乘潮水位误差

类型	历时/h	保证率/%	乘潮水位误差/cm									
			三江口	吕四	厦门	舢舨洲	京唐港	湛江	铁山港	海安	山海关	八所
乘高潮	2	50	4.2	0.7	8.4	-2.8	-1.9	3.7	-5.0	-0.5	-1.9	-0.2
	2	70	1.9	-1.2	5.6	1.7	1.4	5.0	-5.7	0.9	0.0	-1.3
	2	90	0.7	0.0	5.2	3.5	1.9	5.6	-2.1	3.1	0.9	-0.5
	3	90	3.4	1.3	10.3	6.8	4.2	12.9	2.0	4.8	2.0	-1.4
	4	90	6.1	1.5	15.4	9.8	7.4	21.1	5.0	8.2	-2.1	-0.6
乘低潮	2	50	-1.9	-2.6	-1.7	-5.7	-1.3	-2.4	0.3	-1.5	1.1	2.0
	2	70	-0.3	-1.0	-3.1	-5.2	-2.2	-3.4	-1.1	0.3	1.6	0.3
	2	90	-0.3	-2.0	-2.9	-2.8	-0.8	-1.7	-5.0	-1.5	2.0	-1.1
	3	90	-1.9	-3.2	-4.8	-7.8	-2.0	-6.0	-8.1	0.3	1.8	-2.8
	4	90	-13.8	-6.2	-6.9	-13.1	-5.3	-12.9	-16.0	-1.3	2.2	-5.2

3.2 结果分析

《港口与航道水文规范》规定, 近岸海域设计水位推算收集资料不应短于 1 年, 实际计算中, 不同年份数据得到的结果会略有差异。因此, 将

本文方法的计算结果误差与规范方法依据不同年份资料的计算结果差异进行对比分析。为简便计算, 以吕四、京唐港、海安和八所 4 个站为例进行对比分析, 计算结果见表 3 和图 2。

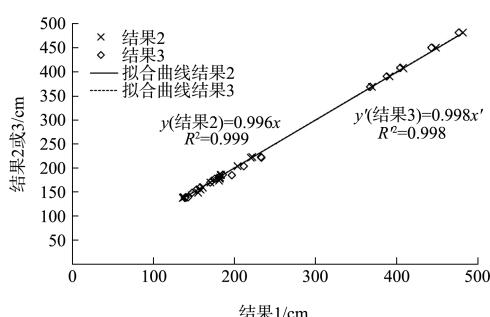
表 3 不同计算方法和数据计算得到的不同保证率的高潮乘潮水位

站点	乘潮历时/h	保证率/%	高潮乘潮水位/cm				
			结果 1	结果 2	结果 3	结果 2 与 1 之差	结果 3 与 1 之差
吕四(正规半日潮)	2	50	481.4	482.1	477.0	0.7	-4.4
	2	70	450.0	448.8	443.2	-1.2	-6.8
	2	90	408.1	408.1	405.0	0.0	-3.1
	3	90	390.3	391.6	388.2	1.3	-2.1
	4	90	368.4	369.9	367.7	1.5	-0.7

续表3

站点	乘潮历时/h	保证率/%	高潮乘潮水位/cm			
			结果 1	结果 2	结果 3	结果 2 与 1 之差
京唐港(不正规半日潮)	2	50	185.5	183.7	185.9	-1.9
	2	70	169.2	170.6	170.4	1.4
	2	90	159.1	161.0	157.9	1.9
	3	90	154.4	158.6	153.3	4.2
海安(不正规全日潮)	4	90	148.0	155.4	148.0	7.4
	2	50	220.9	220.4	233.5	-0.5
	2	70	203.2	204.1	211.8	0.9
	2	90	179.5	182.5	180.4	3.1
八所(正规全日潮)	3	90	177.2	182.0	176.1	4.8
	4	90	173.0	181.2	172.3	8.2
	2	50	222.4	222.3	233.0	-0.2
	2	70	184.4	183.2	197.0	-1.3
	2	90	138.5	138.0	143.0	-0.5
	3	90	138.8	137.4	140.0	-1.4
	4	90	137.1	136.6	139.0	-0.6
						1.9

注: 结果 1 利用 2018 年潮汐表逐时数据和规范方法得到; 结果 2 利用 2018 年潮汐表高潮低潮数据和本文方法得到; 结果 3 利用 2020 年潮汐表逐时数据和规范方法得到。



注: 结果 2、3 的拟合曲线基本重合。

图 2 不同方法计算的乘潮水位结果对比

由表 3 和图 2 的计算结果可看出, 两种计算结果与结果 1 相比, 线性拟合相关系数均在 0.99 以上, 说明计算结果很相近。具体来看, 结果 2 与 1 相比, 误差最大值 8.2 cm, 最小值 -1.9 cm, 平均值 1.4 cm。结果 3 与 1 相比, 差异最大值 12.6 cm, 最小值 -6.8 cm, 平均值 1.7 cm。所以, 本文方法计算得到的水位误差和不同年份计算结果差异在量级上相同, 数值上略有差异。因此, 可以认为本方法计算结果的误差在工程上可以接受。需要特别说明的是, 结果 2 与 1 相比, 2 h 乘潮水位误差较小, 3 和 4 h 的误差较大, 误差随乘潮历时变化明显; 结果 3 与 1 相比, 低保证率的差异较大, 高保

证率的差异较小, 差异随乘潮保证率变化明显。

4 讨论

4.1 误差原因分析

与规范方法相比, 本文提出的估算方法有两个近似假定: 1) 假定潮高累积频率与潮差累积频率一致; 2) 认为潮汐过程符合余弦曲线变化规律。

针对第 1 个假设, 绘制了 6 个站点的潮差-潮位关系, 见图 3, 其中包含 3 个正规半日潮站点(三江口、吕四和厦门)以及其他 3 种潮型各 1 个站点。根据分析结果, 6 个站潮差和高潮水位之间呈线性相关, 相关系数虽然各站略有差异, 但都在 0.80 以上, 表明潮差和高潮潮位具有很好的相关性。具体来看, 厦门和三江口站的相关系数最小, 表明其相关性在这 6 个站中最差, 其次为湛江和八所, 相关系数在 0.90 左右, 相关性最好的是吕四和铁山港, 相关系数在 0.95 左右。根据表 2 中乘潮水位的计算误差, 半日潮站中, 厦门误差最大, 其次为三江口, 误差最小的是吕四港。正规半日潮以外的 3 个站中, 八所误差最小, 其次为铁山港, 误差最大为湛江。对比分析上述相关系数及误差, 整体来看, 对应性一般。因此, 可认

为潮高累计频率和潮差累计频率的线性相关性较好, 该假设不是造成误差的主要因素。

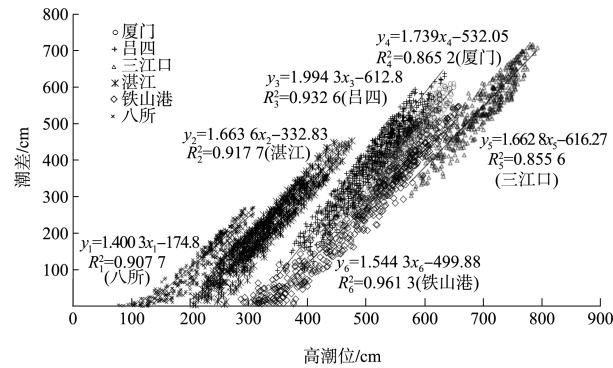


图3 潮差和高潮位的相关关系

针对第2个假设, 在某些浅水分潮、气象分潮影响较大的海区, 实际潮过程线可能偏离三角函数曲线较多。针对6个站点, 绘制了某小→大→小潮过程线, 见图4。

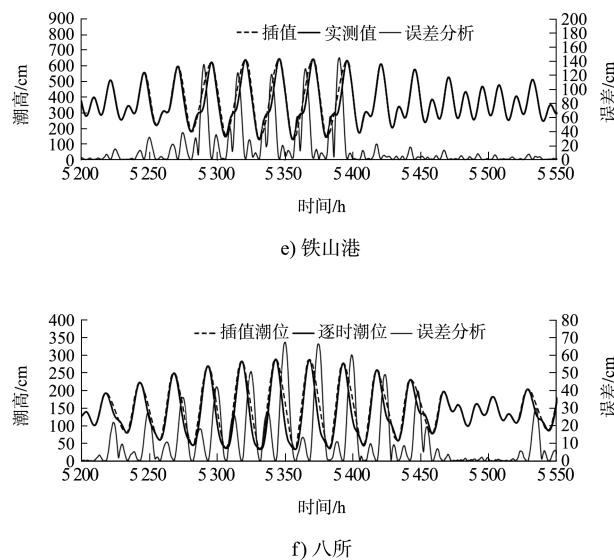
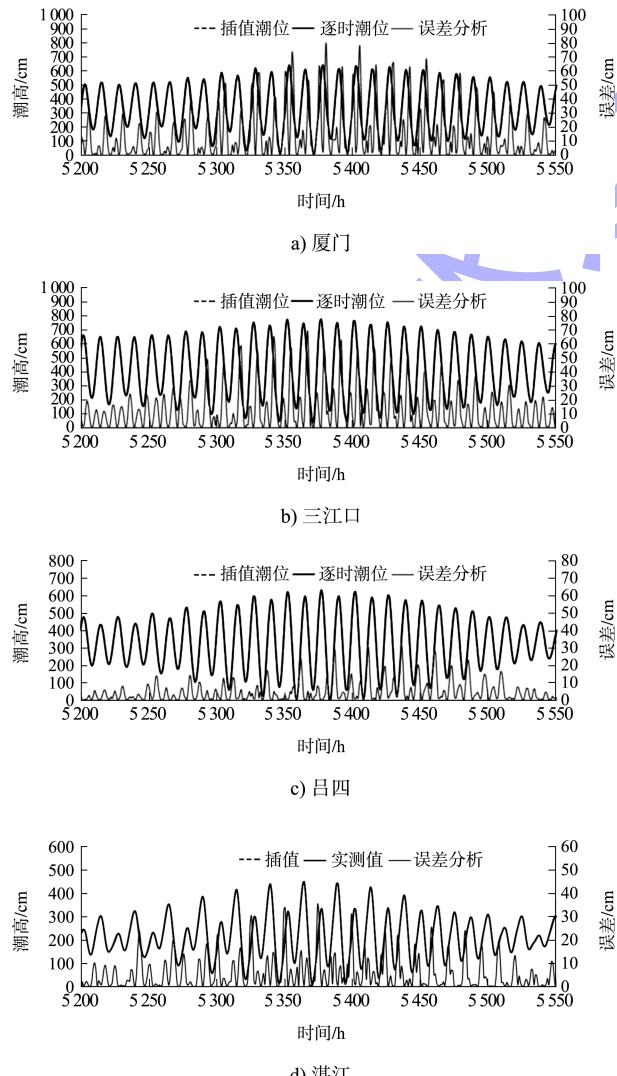


图4 三角函数插值潮位与潮汐表逐时潮位对比

对乘潮水位计算结果影响最大的是插值数据和实际数据之间的最大误差及其出现时刻。厦门站, 最大误差约80 cm, 出现频率很高, 在大潮期间, 几乎每个涨落潮过程都会出现, 这种高频率出现将会对低保证率的乘潮水位产生显著的影响。最大误差出现时间通常位于高平潮前后2 h左右, 这会明显影响4 h的乘潮水位结果。该分析结果与表2中厦门站的乘潮水位误差计算结果的分布趋势(低保证率、长历时的误差较大)一致。同为正规半日潮的三江口, 与厦门站相比, 其最大误差略小, 出现频率也低, 因此乘潮水位的计算误差也略小, 而吕四站潮型规律性很好, 三角函数插值潮位和逐时潮位的误差多在20 cm以内, 因此, 乘潮水位的计算结果最精准。

湛江港是不正规半日潮, 每日有两个显著不等的高潮, 插值得到的潮位误差主要出现在其中一个潮的一个涨或落过程, 大潮期误差大于小潮期。长期来看, 误差对大潮期间高高潮和低低潮的影响相等。因此, 湛江各保证率的乘潮水位误差基本一致。最大误差出现时刻和正规半日潮一致, 也在高平潮前后2 h左右, 导致长历时的乘潮水位误差较大。另外, 该站与三江口相比, 虽然最大误差和出现频次均少于三江口, 但乘潮水位误差大于三江口。这是因为, 通常来说, 高保证

率的乘潮水位是由一年中较低的高潮决定,因此湛江站中每日的低高潮占据很大的决定比重,而正规半日潮每日两个高潮相等,高保证率的乘潮水位是由小潮的高潮决定。在全年较低的高潮中,三江口的潮位插值误差小于湛江站。

铁山港和八所为代表的不正规和正规半日潮海区,其乘潮水位误差比半日潮海区明显小。而从图5的分析结果来看,插值误差的最大值明显更大,这可能是因为最大误差的出现时间距离高平潮时刻远,通常是6 h左右,影响不到本文计算的4 h以内的乘潮水位,而且插值误差多出现在大潮的高潮期间,也不会影响高保证率乘潮水位的计算结果。

综合以上分析,采用三角函数曲线对特征潮位曲线拟合,这种近似假设方法存在一定误差,这种误差依据各站性质表现不一,但是误差的量值和出现时刻能很好地解释乘潮水位的误差规律,因此,认为插值误差是影响乘潮水位结果精确度的主要原因。

4.2 工程应用建议

本文提出的仅利用高低潮数据推算乘潮水位的计算方法简单,结果能满足工程精度需求。需要说明的是,不同站点的潮汐特性因受地理位置、地形、洋流和径流等多种因素影响,表现有所不同,本文提出的方法通过了所选取站点的验证,针对其他站点的适用性还有待深入研究。

因此,在项目前期阶段,当站点缺乏逐时潮位数据时,建议可采用该方法近似计算乘潮水位,特别是针对全日潮海区和规律性较好的正规半日潮海区,其误差很小。

5 结论

1)本文提出一种仅依靠高、低潮位和潮时数

据推求乘潮水位的计算方法,该方法通过高、低潮特征点构造特征潮位曲线,推算曲线公式,并利用该公式直接计算乘潮水位,其基本思路是先计算乘潮保证率,再计算乘潮历时。

2)新方法的计算误差大多在10 cm以内,在径流和浅水分潮影响较大海域以及长乘潮历时条件下,误差略大,但都在工程可接受范围内。

3)从本方法的两个假设出发,分析了误差产生的原因,认为三角函数插值得到的潮汐过程和实际过程的差异是造成该方法计算误差的主要原因。

4)提出的新方法含义明确、公式简单、计算方便、误差可接受。在缺乏逐时潮位数据海区,可采用该方法近似计算乘潮水位。

参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [2] 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.
- [3] 刘田甲.潮汐数据插值方法研究[D].南京: 南京师范大学, 2017.
- [4] 乔光全, 徐润刚, 卢永昌, 等.高低潮位扩展至逐时潮位的插值方法比较[J].水运工程, 2019(9): 6-12.
- [5] 王莹辉.高低潮数据的潮汐分析及预报方法研究[D].南京: 河海大学, 2008.
- [6] 王如云, 占飞, 周钧, 等.基于高低潮的优化保形调和分析模型(OCTHM)及算法[J].水运工程, 2014(8): 15-19.
- [7] 国家海洋信息中心.2018年潮汐表(第1~3册)[M].北京: 海洋出版社, 2018.
- [8] 国家海洋信息中心.2020年潮汐表(第1~3册)[M].北京: 海洋出版社, 2020.

(本文编辑 王璁)