

浅水潮综合预报方法的研究

徐汉兴

(上海航道局设计研究所)

本文以上海港的潮汐预报方法为例,阐述了适用于河口及我国沿海其他浅水港口潮汐预报的一种综合性方法,它包括对天文潮、增减水及其综合水位的预报方法与效果问题的研究等。

上海港扼长江口、濒东海之滨,潮汐属非正规半日浅海潮,常受台风、寒潮和长江径流等水文气象因素的影响,航道水深较浅,潮汐水流情况复杂。近十多年来,通过实践,逐步建立了一套较为完整的预报方法,精度和计算效率都较高,从而在实际预报中取得了较好的效果。

这一方法主要分周期性水位长期预报和非周期性水位短期预报两部分,前者采用快速电子计算机进行潮汐调和与分析,后者则采用经验天气图预报方法来确定。然后再将两者的结果叠加起来,得所需的潮位预报值。

实践证明,这种方法不仅适用于上海港及长江口这样复杂的河口浅水潮汐的预报,而且也适用于我国沿海其它地区的浅水潮汐的预报,例如,经在杭州湾、闽江口、厦门港、珠江口、北部湾、连云港、秦皇岛等地的半日潮、混合潮和全日潮的预报中使用,都取得了良好的效果。

同时,这一方法除了适用于潮汐的预报,还对潮流的预报亦同样适用。

一、潮汐的长期预报

现在采用电子计算机调和与分析法^[4,7,8],来解决周期性的天文潮汐长期预报问题。对于浅水潮港来说,除了应有高、低潮潮高和潮时的长期预报外,还应有较详细的每小时正点潮高的长期预报,以供航行、防汛、渔捞、灌溉、水闸等有关方面使用。

现将“调和与分析”和“潮汐预报”的具体内容分述如下:

(一) 调和与分析

1. 潮高模式与分析长度

据调和与分析原理,任何复杂的潮汐现象,均可用许多简单振动之和来表示;每个振动称为一个“分潮”。因此,若以潮汐曲线 $h_0(t)$ 表示实际海面的潮汐涨落,此曲线可表示为下述诸分潮之和。即理论上,在时刻 t 时的实际潮高 $h_0(t)$,其模式可写成:

$$h_0(t) = Z_0 + \sum_{q=1}^Q R_q \cos(\sigma_q t - \varphi_q) + r(t), \quad (1)$$

表 1 128 分潮一览表

分 潮		角速度 σ (度/小时)	分 潮		角速度 σ (度/小时)	分 潮		角速度 σ (度/小时)
序号	名 称		序号	名 称		序号	名 称	
0	Z ₀	0.0000000	43	M ₂	28.9841042	86	2NMK ₆	85.9457005
1	Sa	0.0410686	44	MK ₂	29.0662415	87	2MN ₆	86.4079380
2	Ssa	0.0821373	45	M2(KS) ₂	29.1483788	88	2MNK ₆	86.4900752
3	Sa ₃	0.1232059	46	2SN(MK) ₂	29.3734880	89	M ₆	86.9523127
4	Sa ₄	0.1642746	47	λ_2	29.4556253	90	MSN ₆	87.4238337
5	MSm	0.4622374	48	L ₂	29.5284789	91	MKN ₆	87.5059710
6	Mm	0.5443747	49	T ₂	29.9589333	92	2MS ₆	87.9682084
7	SMm	0.5854433	50	S ₂	30.0000000	93	2MK ₆	88.0503457
8	MSf	1.0158958	51	R ₂	30.0410667	94	NSK ₆	88.5218668
9	Mf	1.0980331	52	K ₂	30.0821373	95	2SM ₆	88.9841042
10	SaMf	1.1391017	53	MSN ₂	30.5443747	96	MSK ₆	89.0662415
11	Mtm	1.6424078	54	KJ ₂	30.6265120	97	S ₆	90.0000000
12	2Q ₁	12.8542862	55	2KM(SN) ₂	30.7086493	98	2MNO ₇	100.3509735
13	σ_1	12.9271398	56	2SM ₂	31.0158958	99	2NMK ₇	100.9046318
14	Q ₁	13.3986609	57	SKM ₂	31.0980331	100	2MSO ₇	101.9112440
15	ρ_1	13.4715145	58	NO ₃	42.3827651	101	MSKO ₇	103.0092771
16	O ₁	13.9430356	59	2MK ₃	42.9271398	102	2(MN) ₈	114.8476674
17	MP ₁	14.0251728	60	M ₃	43.4761563	103	3MN ₈	115.3920422
18	M ₁	14.4920521	61	SO ₃	43.9430356	104	3MNK ₈	115.4741795
19	χ_1	14.5695476	62	MK ₃	44.0251729	105	M ₈	115.9364169
20	π_1	14.9178647	63	SK ₃	45.0410686	106	2MSN ₈	116.4079380
21	P ₁	14.9589314	64	N ₄	56.8794590	107	2MNK ₈	116.4900752
22	S ₁	15.0000000	65	3MS ₄	56.9523127	108	3MS ₈	116.9523127
23	K ₁	15.0410686	66	MN ₄	57.4238337	109	3MK ₈	117.0344500
24	ϕ_1	15.0821353	67	MNKS ₄	57.5059710	110	MSNK ₈	117.5059710
25	φ_1	15.1232059	68	M ₄	57.9682084	111	2(MS) ₈	117.9682084
26	θ_1	15.5125897	69	SN ₄	58.4397295	112	2MSK ₈	118.0503457
27	J ₁	15.5854433	70	KN ₄	58.5218668	113	2M2NK ₉	129.8887360
28	2PO ₁	15.9748272	71	MS ₄	58.9841042	114	3MNK ₉	130.4331108
29	SO ₁	16.0569644	72	MK ₄	59.0662415	115	4MK ₉	130.9774855
30	OO ₁	16.1391017	73	SL ₄	59.5284789	116	3MSK ₉	131.9933813
31	2NS ₂	26.8794590	74	S ₄	60.0000000	117	4MN ₁₀	144.3761464
32	2NK2S ₂	26.9615963	75	SK ₄	60.0821373	118	M ₁₀	144.9205211
33	OQ ₂	27.3416964	76	MNO ₅	71.3668693	119	3MNS ₁₀	145.3920422
34	MNS ₂	27.4238337	77	2MO ₅	71.9112440	120	4MS ₁₀	145.9364169
35	MNK2S ₂	27.5059710	78	3MP ₅	71.9933813	121	2MNSK ₁₀	146.4900752
36	2MS2K ₂	27.8039338	79	MNK ₅	72.4649023	122	3M2S ₁₀	146.9523127
37	2N ₂	27.8953548	80	2MP ₅	72.9271398	123	4MSK ₁₁	160.9774855
38	μ_2	27.9682084	81	2MK ₅	73.0092770	124	M ₁₂	173.9046253
39	N ₂	28.4397295	82	MSK ₅	74.0251728	125	4MNS ₁₂	174.3761464
40	ν_2	28.5125831	83	3KM ₅	74.1073101	126	5MS ₁₂	174.9205211
41	2KN2S ₂	28.6040041	84	3NKS ₆	85.4013258	127	3MNKS ₁₂	175.4741795
42	OP ₂	28.9019669	85	2NM ₆	85.8635632	128	4M2S ₁₂	175.9364169

式中: Z_0 为平均海面在水尺零点基准面上的高度, q 及 Q 分别为分潮的序数和总数, $R_q \cos(\sigma_q t - \varphi_q)$ 即表示一个分潮, 其中 R_q , φ_q 及 σ_q 分别表示第 q 个分潮的振幅、位相和角速度, 而余项 $r(t)$ 则表示由气象因素或其它偶然性因素引起的非周期性水位变化, 或称“增减水”。

就上海港浅水潮预报来说, 为使潮高模式具有一定的代表性, 能反映浅水潮汐特征, 除了对余项 $r(t)$ 这部分非周期性水位变化将由下节增减水预报处理外, 对周期性水位变化部分将有 Q 个分潮组成。经过反复试验及筛选, 所得总数为 $Q = 128$ 个分潮, 这一模式, 既含有一定数量的天文分潮, 又有相当数量的倍潮和复合潮^[6,10], 任何两个分潮的角速度之差均大约不小于 0.04 度/小时, 详见表 1¹⁾。

根据这个角速度差的规定, 分析所需的潮高系列的长度, 至少应有一年以上的资料。因此, 我们具体使用了连续 369 天的正点潮高资料, 总计有 8857 个正点的潮高可供分析。这个潮高系列的时间长度, 大约相当于 $13 \frac{1}{2}$ 个太阴月。据研究, 这一时间长度将与所有短周期分潮相合周期的倍数接近, 几乎能将所有的短周期分潮都分离开来。对气象状况年过程中的周期性和非周期性变化对潮位的影响, 也几乎都能消除掉。因而能取得受干扰较小, 并能代表正常潮汐变化的调和常数。

2. 计算公式简化与方程求解

本文所用的潮高模式 (1), 其分潮的组成如表 1 规定, 连同代表平均海平面那个角速度为零 ($\sigma = 0$) 的分潮在内, 总共有 129 个分潮。对每一个分潮都有两个未知的调和常数待求, 相应地可建立 $2Q + 1 = 257$ 个方程和采用连续 369 天正点潮汐资料, 并可使用最小二乘法来求得^[2,3]。即设 A_0 为平均海在潮高基准面上的高度, $Z_0 = A_0 \pm \Delta Z$, ΔZ 为潮高基准面与水尺基准面之差, 而 $X_0 = Z_0$, 则此浅水潮预报所用的潮高 $h_p(t)$ 可写成:

$$h_p(t) = X_0 + \sum_{q=1}^Q R_q \cos(\sigma_q t - \varphi_q), \quad (2.1)$$

现将 (2.1) 式展开, 得:

$$h_p(t) = X_0 + \sum_{q=1}^Q (X_q \cos \sigma_q t + Y_q \sin \sigma_q t), \quad (2.2)$$

式中: $X_q = R_q \cos \varphi_q$, $Y_q = R_q \sin \varphi_q$, $R_q = f_q \times H_q$, $\varphi_q = g_q - (V_0 + u)_q$, 并且, 节点因数 f_q , 初相角 $(V_0 + u)_q$ 及角速度 σ_q , 统称“天文参数”, 可按有关公式确定^[2,10]; 而半潮差 H_q , 专用迟角 g_q 及平均海平面高度 A_0 则统称为“调和常数”, 都取决于地理因素, 这需要通过下面的调和计算来确定。

又, 设正点潮的序数和总数分别以 n 及 N 来表示, 取时间间隔 $\tau = 1$ 小时, $n\tau = t$, 则按最小二乘法^[2,10], 使潮高的实测值与预报值的残差 (δ) 平方和 (D) 达最小, 有

$$D = \sum_{n=0}^N \delta^2 = \sum_{n=0}^N [h_0(n\tau) - h_p(n\tau)]^2 = \text{最小}, \quad (3)$$

由此将导出共计 $(2Q + 1)$ 阶线性方程, 以便推求所需的全部 257 个调和常数。把这些方

1) 徐汉兴等, 1975。电子算潮十年 (1964.11—1974.11), 上海航道局。

程的计算原点从潮高系列的起点移到系列的中点,计算可大为简化而节约运算时间达 98% 以上^{1,2)}。在计算过程中对三角函数用余弦表方法计算^[5],对方程右端向量用瓦特迭代法 (Watt's iteration formula) 计算^[2,7],最后用高斯-赛德尔迭代法 (Gauss-Seidel iterative system) 求解整个方程^[7,9],便能很快地得出全部方程解: X_0, X_q 及 Y_q 等。

3. 调和常数计算

根据上面求得的分潮的相对系数 X_0, X_q 及 Y_q ,按下式就能计算出所有 129 个分潮的全部调和常数: H_q 及 g_q 及 A_0 ,其计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} H_q &= \sqrt{X_q^2 + Y_q^2} / f_q, \\ g_q &= \text{tg}^{-1}(Y_q/X_q) + (V_0 + u)_q + \frac{1}{2} N \sigma_q \tau \quad q = 1, 2, 3, \dots, Q, \\ Z_0 &= X_0, \\ A_0 &= Z_0 \pm \Delta Z, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $(V_0 + u)_q$ 及 g_q 均为该年 1 月 1 日格林威治(午夜) 0 时之值,其余符号意义同前。

(二) 潮汐预报

接着调和分析之后,就是按所得调和常数推算出所需的潮汐预报。其所用的潮高模式,计算方法和结果,以及注意事项等分述如下。

1. 预报模式

设某时刻 t 时的预报潮高 $h_p(t)$,由 (2.1) 式改写,可得

$$h_p(t) = A_0 + \sum_{q=1}^Q f_q H_q \cos[(V_0 + u)_q - g_q + \sigma_q t], \quad (5)$$

式中 A_0, H_q, g_q 和 $f_q, (V_0 + u)_q, \sigma_q$ 均为已知,唯 t 为未知。所以,只要给定 t 值,即可算出相应的预报潮高。一般在预报中, t 以当地时区标准时为准。对正点潮的推算, t 是任意给定的, f_q 是取一年中间时刻之值,即平年取 7 月 2 日 12 时,闰年取 7 月 2 日 0 时。而对高、低潮的推算,其 t 值却不能任意给定,须通过一定的计算予以确定。这可对 (5) 式取时间的一阶导数为零,即有

$$\frac{\partial h(t)}{\partial t} = 0, \quad (6.1)$$

可得

$$\sum_{q=1}^Q \sigma_q f_q H_q \sin[(V_0 + u)_q - g_q + \sigma_q t] = 0. \quad (6.2)$$

对 (6.2) 式求解,可得一系列的 t 值,代表一系列高、低潮出现的时刻,因而将这些 t 值一一代入 (5) 式时,即可算出相应的高、低潮潮高来。但因这个为零的导数事实上是不容易求得的,而这个 t 值一般得按此理论导出的某些近似方法来推求,现将几种近似法介绍如下。

1) 徐汉兴, 1977. 潮汐理论与应用(下册),上海航道局。

2) 徐汉兴, 1980. 潮汐预报方法及其组织形式。上海航道局设计研究所。

2. 近似算法

(1) “余弦表”方法: 将一个象限分为 1,024(即 2^{10}) 等分, 并取其 0° 至 90° 各分割值的余弦值, 列表存入机内备查, 此表即称“余弦表”。表列值对各象限均通用^[5]。表中连续两个余弦值的最大差值约为 0.0016, 其对于每一个分潮可能产生的最大计算误差, 将为其振幅的 0.0008 倍。并且这种误差是随机的而不是累计的, 因此对潮高预报的影响甚小。

(2) 二分法: 在求高、低潮时, 在算出了一天的正点潮后, 从这一天 0 时的前一小时开始往后, 对每三个正点潮逐一比较, 逐次寻出其非单调变化的 3 个正点潮位置及其所夹的两个区间, 并算出这两个区间各自中点的潮高。它包括原来的 3 个正点潮, 共计有五个潮高, 又重复上述步骤, 找出呈非单调变化的 3 个潮高位置及其所夹的两个区间, 并再算出这两个区间各自中点的潮高……如此反复做下去, 一直到区间被压缩至某个误差限值, 这时所得的潮高极值取作为高潮(或低潮), 其相应的时刻作为高(低)潮潮时。

(3) 插值法: 设在潮位曲线 $h(t)$ 上, 有连续 3 个呈非单调变化的正点潮高, 其坐标如图 1 所示为: (t_0, h_0) , (t_1, h_1) , (t_2, h_2) ; 极值(高潮或低潮)的坐标为: (t_m, h_m) , 并且

$$\begin{cases} t_m = t_1 + \Delta t, \\ h_m = h_1 + \Delta h. \end{cases} \quad (7.1)$$

当 $t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = 1$ 小时, 则 Δt 及 Δh 分别按下式计算:

$$\begin{cases} \Delta t = \frac{1}{2} \frac{(h_0 - h_2)}{(h_0 - 2h_1 + h_2)} \text{ (小时)}, \\ \Delta h = \frac{1}{4} \Delta t (h_2 - h_0) \text{ (厘米)}. \end{cases} \quad (7.2)$$

如果时间区间被压缩至 $1/32$ 小时, 则有

$$\begin{cases} \Delta t = \frac{1}{64} \frac{(h_0 - h_2)}{(h_0 - 2h_1 + h_2)} \text{ (小时)}, \\ \Delta h = 8\Delta t (h_2 - h_0) \text{ (厘米)}. \end{cases} \quad (7.3)$$

如果区间再压缩, 其相应的 Δt , Δh 可类推之。

(4) 二分插值法: 在求高、低潮时, 先用二分法计算到最后一次, 再改用插值法作近似逼近。两种方法这样结合使用, 比单用二分法计算可节省上机时间约 20%。

3. 结果比较

根据分别由 11、63、128 个分潮组成的潮高模式, 按上述方法进行分析和预报的结果与实测值的比较, 如图 2 所示。图 2a 为吴淞站的潮位, 分别按 11、63 及 128 个分潮计算的预报值与实测值的比较。显然, 按 63 分潮预报的误差较小, 约在 10 厘米左右, 而按 11 分潮预报的误差却在 30 厘米以上, 前者比后者的预报精度提高达一倍以上。图中虽未绘出 128 分潮的预报结果, 因为它与 63 分潮的结果较接近, 以免混淆, 但实际上两者全年逐时潮高离差以年均方差表示, 仍有明显的差别。例如, 某年前者的年方差为 ± 16.4 厘米, 后者为 ± 18.2 厘米, 表明 128 分潮比 63 分潮的预报精度更提高达 10% 以上。同时在地区

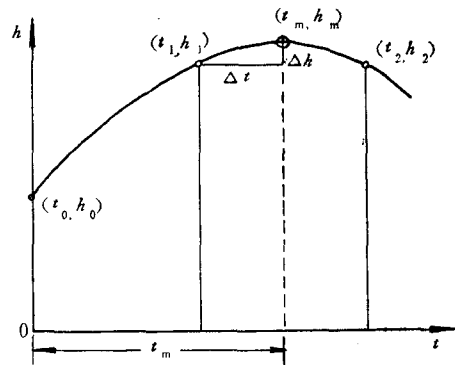


图 1 求高、低潮示意图

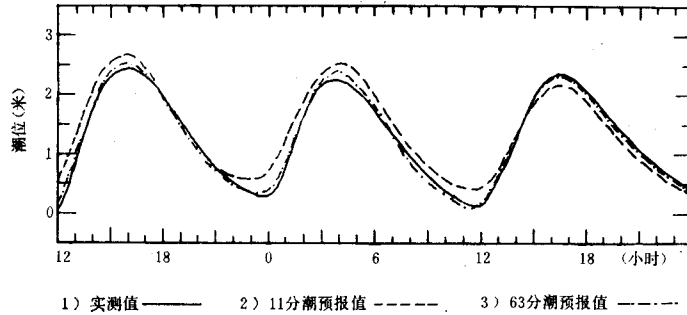


图 2a 关于 11、63 分潮预报的精度比较

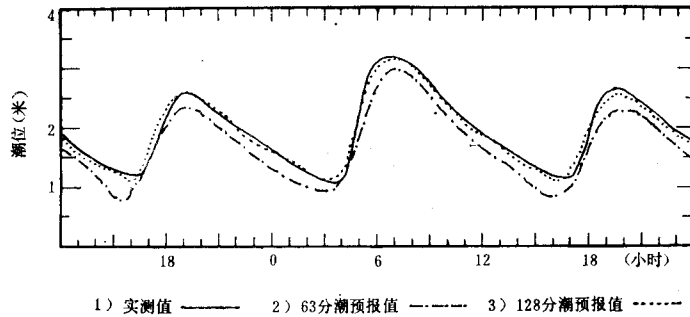


图 2b 关于 63、128 分潮预报的精度比较

上,越往上游潮型受径流和地形的影响越大,128分潮的预报效果越显著。例如江阴和南京分别在吴淞上游约160和360公里,图2b即为江阴的128和63分潮预报结果的比较,其年均方差分别为18.5厘米和26.0厘米,前者的预报精度又比后者进一步提高达40%以上,而对南京站则更提高精度超过一倍,其年方差分别为30.8厘米和66.6厘米¹⁾。其误差的频率分析结果,也是128分潮的预报误差较集中于零值附近,因而优于63分潮的预报误差分布。并且在潮型上因受浅水影响较大,潮波有很大变形,而用128分潮所算得的预报曲线仍明显比63分潮预报的更接近实测潮型,由此显示出了这一浅水预报模式的显著优越性。显然,这是由于适当地选取及增加65个分潮,尤以增加代表长江径流季节变化的一些低频分潮,和部分描述潮型因地形而变化起了重要作用的高频有效分潮的结果。

最后,在预报中还应注意的几点是:(1)一般的年度预报应从该年的1月1日0时开始,一直算到12月31日为止,这样便于为下一年1月1日的预报结果作校核。(2)对水下地形变化较大的地方,应经常注意更换以近期的调和常数作预报,这样可保持提高预报的精度。

二、增减水预报

其次,关于增减水的预报,实际上就是对(1)式中余项 $r(t)$ 的预报和处理问题。设

1) 徐汉兴,1976。上海港潮汐预报方法简介。

$h_0(t)$ 为实测潮高, $h_p(t)$ 为对应的预报潮高, 则有:

$$\Delta h = h_0(t) - h_p(t), \quad (8)$$

其中, Δh 为正, 称“增水”; Δh 为负, 称“减水”, 二者统称“增减水”。如果以天文潮长期预报值代表正常潮位, 则其与实测之差代表当时天气条件下发生的非周期性水位变化, 亦即把 $r(t)$ 简化, 以 $\pm \Delta h$ 表示, 称之为增减水, 而影响这部分非周期性水位变化的因素是很多的, 所以增减水预报的问题很复杂^[1]。在长江口的增减水预报中, 为使问题简化, 认为模式误差、资料观测误差^[11]以及地质上地震之类的非周期动力因素作用等影响均甚小, 因而主要考虑了气象因素及长江径流因素的作用所产生的增减水影响。因在气象上夏季的台风, 冬季的寒潮, 以及在各季节均可能发生各种中、小尺度的高、低气压系统的过境, 均能引起相应规模的增减水, 其量值一般可从几十厘米至 1 米以上, 有的甚至可超过 2 米, 性质有的明显与季节有关, 有的则是随机的, 其变化的复杂性往往给预报带来很大困难。长江的径流对水位的影响不仅量值大(在较上游一些地方往往达 1—2 米), 而且有明显的季节性变化。另一方面, 因长江口航道水深较浅, 须有精确可靠的潮位预报作指导, 这时, 关于增减水预报的正确性如何, 往往起决定性作用。由于增减水预报的重要性和复杂性, 因此使我们对有关的水文气象因素的变化规律的研究, 探索了十多年, 才建立了现在这套增减水预报方法。其主要特点是根据过去天气图上的气象特征与增减水之间的经验相关关系, 以及预报时的天气实况和天气预报, 实测水位等资料来进行预报的, 一般称为“天气图预报法”。其原理为:

1. 气象潮相关原理 海面因受气象因素作用产生的气象潮, 与当时特定的天气形势之间存在着一定的相关关系。

2. 气象潮重现原理 某地未来可能发生的气象潮, 将是其过去历史上同类型天气条件下产生的气象潮的重现。因此, 其预报步骤是: (1) 增减水分离, 按 (8) 式, 计算历史上各次风暴潮或增减水 Δh 及其潮时差 Δt ; (2) 气象潮相关, 将所得 Δh 及 Δt 与当时的天气特征作相关分析, 并建立经验相关关系; (3) 前期水位相关, 将所得 Δh 及 Δt 与前期水位作相关分析, 并建立其相关关系; (4) 增减水预报, 收集预报时的天气实况、天气预报、实测水位等资料, 按有关的相关关系确定次日对应高潮的增减水 Δh 及潮时差 Δt 的预报估值。

三、潮位短期预报

上述长期天文潮预报和预见期为一天的增减水预报, 最后将集中在该潮位的短期预报上, 体现出综合的预报效果。对于主要考虑风、气压、径流作用产生的增减水预见期为一天的高潮潮高和潮时的短期预报公式, 可写成:

$$\begin{cases} h_{\text{高}} = h_p(t) \pm \Delta h_{\text{风}} \pm \Delta h_{\text{压}} \pm \Delta h_{\text{径}}, \\ t_{\text{高}} = t_p(t) \pm \Delta t_{\text{风}} \pm \Delta t_{\text{压}} \pm \Delta t_{\text{径}}, \end{cases} \quad (9)$$

式中 $h_{\text{高}}$, $t_{\text{高}}$ 分别为次日某高潮的短期预报潮高及潮时; $h_p(t)$, $t_p(t)$ 分别为从《上海港潮汐表》(此表即系按前述长期预报方法算得)中查得的次日对应高潮的长期预报潮高及潮时; Δh , Δt 则分别为按风、气压、径流等对应相关关系确定的增减水及潮时差的预报估值, 其中, 由径流引起的潮时差 $\Delta t_{\text{径}}$ 往往甚小, 常略而不计。

这种短期预报方法,对于低潮或潮位曲线上其它任意点潮高的预报均可适用,并且对潮流短期预报亦类似适用。经使用表明,这种短期预报方法具有原理简单、操作方便,费用少而效果好等特点,有时预报误差只有几厘米,颇受使用者的欢迎。

如图3这就是长江口某站在1974年8月中旬遭受一次强台风侵袭影响,并且正赶上(农历七月)朔日大潮之际,这一方法所体现的综合预报效果的一个实例。图中实线表示实测潮位,虚线表示长期预报潮位,可见该站18—19日台风增水普遍高达1米左右。显然,这是一次难度较大的预报。从19日中午这次高潮来看,式子中分子为潮高(米),分

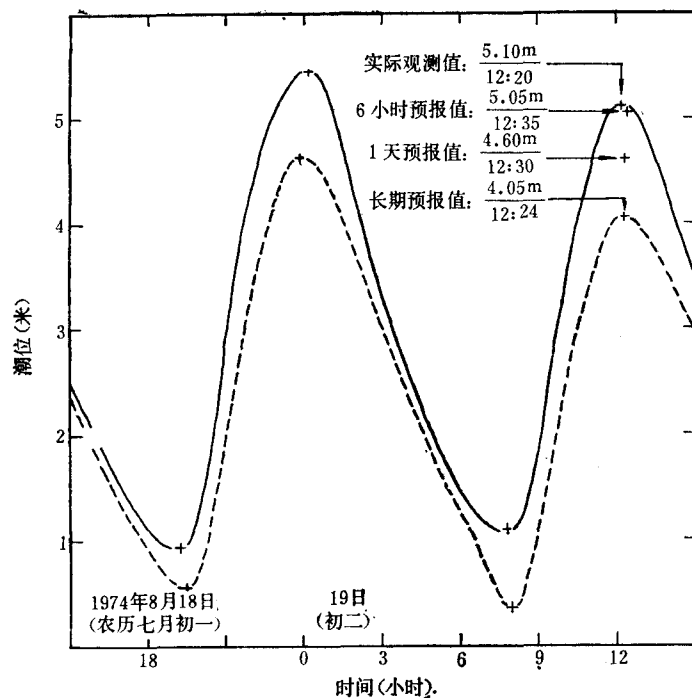


图3 长江口某站强台风增水潮位预报实例

母为潮时,长期预报潮时为12时24分,实测潮时为12时20分,两者只差4分钟,这除了体现长期预报的效果外,表明这次台风增水对潮时的影响并不大,而对潮高的影响却相当大,从4.05米一直抬高到5.10米而猛增达1.05米。航行部门要求在每天11点以前发出潮位短期预报通知,即在18日11点以前就应作出19日中午的高潮预报,而这时该站的实测潮位与长期预报潮位两者相当接近。但正是应用这个天气图预报方法,在分析了当时天气形势及前期水位等因素的综合作用后,对该高潮第一次作出了潮时为12时30分和潮高为4.60米的预见期为一天的预报,即考虑了各种水文气象因素综合影响产生的 Δt 和 Δh 后,将分别比长期预报值要推迟6分钟和增高55厘米。

事实证明,这一预报效果的正确性在于:首先,在当时前期水位接近长期值以及气象因素十分复杂的条件下,确定了这是一次增水性质的预报,因此,这在定性预报上是完全正确的。同时,在量值上也相当于实际最大增水值的一半以上,这在定量预报上也基本上是成功的。

接着在次日(19日)早晨6点,又据当时天气预报及水位等实况资料作出预见期为6小时的修正预报,其精度就更高了,即潮高预报值比实测值仅低5厘米,潮时只迟1刻钟(如对此法缺乏使用经验,要取得显著成效也是不可能的)。近年来,取得这样理想预报效果的,已不乏其例,却难一一枚举。

综上所述,这个以电子计算机进行潮汐调和并分析并对天文潮作长期预报,并与天气图方法作增减水预报相结合的方法,对复杂的浅水潮取得综合性预报的良好效果,有时甚至胜于其它某些统计法或数值预报法。此法具有的经济、实用效果显著,不仅在上海港使用迄今,而且在其它浅水潮港的使用中,也取得了类似的效果。但是,这一方法在经验和理论上还有待于继续改进与深入地探讨。

参 考 文 献

- [1] 和達清夫編,昭和45年。津波・高潮・海洋災害。共立出版株式会社, pp.209—330。
- [2] Cartwright, D. E. and D. B. Cotton, 1963. On the Fourier Analysis of Tidal Observations. *International Hydrographical Review* 40(2): 113—125.
- [3] Doodson, A. T., 1928. The Analysis of Tidal Observations. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* A227: 223—279.
- [4] Dronkers, J. J., 1954. Tidal Computations in Rivers and Coastal Waters. North-Holland Publishing Company-Amsterdam, pp. 88—122.
- [5] Harris, D. L., N. A. Pore and R. A. Cummings, 1965. Tide and Tidal Current Prediction by High Speed Digital Computer. *International Hydrographical Review* 42(1): 95—103.
- [6] Horn, W., 1960. Some Recent Approaches to Tidal Problems. *International Hydrographical Review* 37(2): 65—84.
- [7] Murry, M. T., 1964. A General Method for the Analysis of Hourly Heights of Tide. *International Hydrographical Review* 41(2): 91—101.
- [8] Lennon, G. W., 1965. The Treatment of Hourly Elevations of the Tide Using an IBM 1620. *International Hydrographical Review* 42(2): 125—148.
- [9] Murry, M. T., 1964. Analysis of High and Low Water. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, Jahrgang 17, Heft 2: pp. 75—85.
- [10] Zetler, B. D. and R. A. Cummings, 1967. A Harmonic Method for Predicting Shallow-Water Tides. *Journal of Marine Research* U. S. A. 25(1): 103—114.
- [11] Murry, M. T., 1965. Optimisation Processes in Tidal Analysis. *International Hydrographical Review* 42(1): 73—81.

STUDIES ON PREDICTION OF SHALLOW WATER TIDES

Xu Hanxing (Shu Han-shing)

(The Design and Research Institute of the Shanghai Waterway Bureau)

ABSTRACT

This paper mainly describes a new approach to tidal prediction, which has been developed on the characteristics of shallow water tide of the Shanghai Harbour.

The water depth of the access channel to the Shanghai Harbour is comparatively shallow and the tide here is of the irregular semi-diurnal shallow-water type under constant influences of weather condition and the river run-off of the Changjiang River (Yangtze River). The variation of the tidal flow is complicated owing to the combination of the periodical and non-periodical fluctuation of tidal water. Therefore, it's necessary to have reliable and accurate tidal prediction for navigation. Through the practice of more than a decade, a complete set of methods for tidal prediction has been developed. For periodical water level variation of the astronomical tidal constituents, method of computerized harmonic analysis is now adopted with calculating efficiency and comparatively high accuracy. For non-periodical water level fluctuation, a weather chart method has been adopted, which is simple in operation and produces comparatively good result. Based on the combination of the above 2 methods, a one-day short-term tidal prediction is issued for navigation of ships serving the Shanghai Port, for flood-control efforts of the municipality and for other purposes. The new approach is characterized as follows:

1. The tidal height model for harmonic analysis and prediction computation has been improved. Based on the tidal behavior in the shallow water area, significant tidal constituents have been selected in line with local conditions to form a model of tidal height computation, and the required span of data analysis was defined, resulting in an increase of the prediction accuracy of about two times and more.

2. Computation method for harmonic analysis and prediction has been simplified. The original point of the calculation for harmonic analysis is shifted from the initial point to the central in the continuous sequence of tidal heights, resulting in greatly simplifying the computation of matrix elements on the left-hand of the equation. Watt's iteration formula is fast-rated for computation of the vector elements on the right-hand of the equation; cosine table method is simple and efficient in computation of the numerous trigonometric functions; Gauss-Seidel iterative system is quick in converging the solution of the matrix equation. The overall computation rate is thus increased 98% and more. The cosine table method is also used to calculate the large amount of trigonometric functions in computation for tidal prediction, and a method of approximation is adopted for the calculation of the tidal hours and tidal heights of both low and high water, resulting in an increase of 60% in processing rate.

3. The method is, in principle, capable of processing any wished number of tidal constituents within the capacity of the computer. Take the Shanghai Harbour as an

example, tidal models consisting of 11, 60, 63, 128 and 168 tidal constituents have been computed respectively with satisfactory results. Experience of practical application of the method indicated that it is efficient not only in the tidal prediction for shallow water area of the Shanghai Harbour and the Changjiang River Estuary, but also in the prediction of the semi-diurnal tides, mixed tides and diurnal tides for the coastal areas of our country, including the Hangzhou Bay, the Minjiang River Estuary, the Xiamen Harbour, the Zhujiang River (Pearl River) Estuary, the Beibu Bay (Gulf of Tonkin), the Lianyungang Harbour, the Qinhuangdao Harbour, and etc.

4. For prediction of non-periodical water level fluctuation, main considerations are given to the factors of meteorology and river runoff. Other casual factors influencing waterlevel fluctuation are omitted. Prediction is conducted mainly on the principles of meteorological tide correlation and meteorological tide re-occurrence. There is a certain type of correlation between the weather conditions at the time and the meteorological tide. It's also considered that the possible meteorological tide in the future is something of a re-occurrence of the recorded meteorological tide in history under the similar weather conditions. Therefore, the corresponding waterlevel fluctuation can be predicted. As to the waterlevel fluctuation due to river runoff, prediction is based on the correlation between the measured water level at the time and the tendency of the previous variation.

5. The long-term prediction of periodical astronomical tides is issued annually. This type of prediction superimposed by the water level fluctuation prediction for the given hours results in the short-term prediction of the possible waterlevel for the time concerned. The short-term prediction, which is simple and convenient in processing, effective in use and saving in cost, is issued daily for users.

6. The above mentioned methods of computerized harmonic analysis and weather-chart prediction of fluctuation are valid, in principle, for prediction of either tides or tidal current in shallow water area. Results of the application of the methods have been proved to be satisfactory.