

## 浅水港口潮汐预报的一个方法\*

方国洪 于克俊

(中国科学院海洋研究所)

我国沿海有许多重要浅水港口,如上海、广州等。这类港口由于航道较浅,对潮汐预报的准确度要求就比较高,而这些地区的潮汐预报误差一般较大。除了气象影响在这些地区表现得更激烈之外,从潮汐本身而言,主要是由于在浅水区域非线性效应不可忽视,潮波波形常常产生显著的畸变。要预报这样的潮汐过程,必须充分重视高频振动,特别对于高、低潮,由于它们发生的时间决定于潮高的一级微商,高频振动有着特殊重要的意义。而困难在于随着频率的增加,潮汐分潮的数目极其迅速地增加。在经典的 Doodson (1928) 方法中<sup>[1]</sup>,仅取到频率 6 周/日的分潮,他认为,要想考虑频率为 8 周/日以上的分潮实际上是不可能的,而事实上对于许多浅水港口,频率为 12 周/日甚至大于 12 周/日的振动也必须予以考虑。为了对这类港口作出较准确的高、低潮预报, Doodson (1957) 采用了 对高、低潮的时间序列和高度序列进行调和和分析的方法<sup>[2]</sup>。这种方法对高、低潮都能获得非常好的预报效果,但其缺点是只能预报高、低潮而不能同时预报出整个潮位变化过程。在没有电子计算机这一有力的计算工具的情况下, Doodson 所提出的这些方法无疑是卓越的。自应用电子计算机以来,分潮的数目已不再受到严格的限制了。Zetler & Cummings (1967) 和 Rossiter & Lennon (1968) 分别将分潮的数目予以扩充<sup>[3,7]</sup>。Doodson (1928) 用了 60 个分潮,而他们都采用了 110 多个,使预报结果获得了改进。我们认为,用增加调和分潮的方法来改进预报其效果可能是比较有限的,因从原则上来说,高频分潮的数目是极大的,不可能从中挑选出少数几个分潮来近似代替所有的分潮。

本文将采用准调和分量来表示浅水效应,基本作法与 Munk & Cartwright (1966) 类似<sup>[6]</sup>,实际计算表明效果是明显的。

### 一、方 法

对于低频部分,即潮族 0, 1, 2, 我们仍采用调和分潮表示。所采用的分潮见表 1。表中分潮的符号一般与 Darwin 符号相同。但是为了明确起见,对倍潮和复合潮这里的表示法稍有不同:如  $O_2, KO_2, S\bar{O}_1, 2S\bar{M}_2, MN\bar{S}_2, MA_2, S\bar{B}_2$  分别表示其角速率为  $2\sigma_{O_1}, \sigma_{K_1} + \sigma_{O_1}, \sigma_{S_2} - \sigma_{O_1}, 2\sigma_{S_2} - \sigma_{M_2}, \sigma_{M_2} + \sigma_{N_2} - \sigma_{S_2}, \sigma_{M_2} + \sigma_{S_2}, \sigma_{S_2} - 2\sigma_{S_2}$ 。另外,在复合潮中我们用  $k$  代表  $K_2$  分潮以区别于  $K_1$ 。表中 Doodson 数除第一个数字,其余每个数字都是把原来 Doodson 随意加上去的数字 5 去掉之后的数字,不过这时会出现负数,这里把负号放在数字的上面。表 1 中包括了 Doodson (1928) 所用的所有属于潮族 0, 1, 2 的分

\* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 361 号。

在研究过程中,承国家海洋局王骥、张锦文和徐炎光等同志的协助,作者特此表示深切的谢意。

本刊编辑部收到稿件日期: 1979 年 12 月 4 日。

表 1 调和分潮

序号	分潮符号	Doodson 数	包含的主要复合分潮	序号	分潮符号	Doodson 数	包含的主要复合分潮
1	$S_a$	001000		30	$OO_1$	130000	$2K\bar{O}_1, k\bar{O}_1$
2	$S_{S_a}$	002000	$K\bar{P}_{S_a}, k\bar{S}_{S_a}^*$	31	$*S\bar{O}_1$	142100	
3	$M_m$	010100	$M\bar{N}_m, O\bar{Q}_m$	32	$*2K\bar{O}_1$	140100	$k\bar{O}_1$
4	$\bar{M}S_f$	022000	$P\bar{O}_f$	33	$OQ_2$	230100	$MN\bar{k}_2$
5	$M_f$	020000	$k\bar{M}_f, K\bar{O}_f$	34	$MN\bar{S}_2$	232100	
6	$2Q_1$	130200	$(2O\bar{K}_1)$	35	$2N_2$	220200	$(O_2), (2M\bar{k}_2), 2N\bar{M}_2$
7	$\sigma_1$	132000	$2O\bar{P}_1$	36	$\mu_2$	222000	$2M\bar{S}_2$
8	$*Q\bar{A}_1$	121100		37	$*N\bar{A}_2$	211100	
9	$Q_1$	120100	$N\bar{K}_1$	38	$N_2$	210100	$KQ_2$
10	$*Q\bar{A}_1$	121100		39	$*N\bar{A}_2$	211100	
11	$\rho_1$	122100	$(N\bar{P}_1)$	40	$\nu_2$	212100	
12	$*O\bar{B}_1$	112000	$OP\bar{K}_1$	41	$OP_2$	202000	$M\bar{B}_2, MS\bar{k}_2$
13	$*O\bar{A}_1$	111000		42	$*M\bar{A}_2$	201000	
14	$O_1$	110000		43	$M_2$	200000	$KO_2$
15	$*O\bar{A}_1$	111000		44	$*M\bar{A}_2$	201000	
16	$M\bar{P}_1$	112000	$KO\bar{P}_1, O\bar{B}_1$	45	$Mk\bar{S}_2$	202000	$MB_2$
17	$M_1$	100000	$(2O\bar{Q}_1), N\bar{O}_1$	46	$\lambda_2$	212100	$SN\bar{M}_2$
18	$X_1$	102100		47	$L_2$	210100	$2M\bar{N}_2$
19	$*2P\bar{K}_1$	114000		48	$*S\bar{B}_2$	224000	$2S\bar{k}_2$
20	$\pi_1$	113001	$P\bar{A}_1$	49	$T_2$	223001	$S\bar{A}_2$
21	$P_1$	112000	$S\bar{K}_1, K\bar{B}_1$	50	$S_2$	222000	$KP_2$
22	$S_1$	111000	$K\bar{A}_1, P\bar{A}_1$	51	$R_2$	221001	$k\bar{A}_2, S\bar{A}_2$
23	$K_1$	110000	$M\bar{O}_1, k\bar{K}_1, S\bar{P}_1, N\bar{O}_1$	52	$k_2^{**}$	220000	$K_2^{***}, S\bar{B}_2$
24	$\phi_1$	111001	$K\bar{A}_1$	53	$*k\bar{A}_2$	221000	
25	$\varphi_1$	112000	$K\bar{B}_1, 2K\bar{P}_1, k\bar{P}_1$	54	$MS\bar{N}_2$	232100	
26	$\theta_1$	112100		55	$KJ_2$	230100	$Mk\bar{N}_2$
27	$J_1$	120100	$M\bar{Q}_1, KO\bar{Q}_1$	56	$2S\bar{M}_2$	244000	
28	$*2P\bar{O}_1$	134000		57	$*2S\bar{N}_2$	254100	
29	$S\bar{O}_1$	132000	$KP\bar{O}_1$	58	$M_3$	300000	

\* 增加的和分潮； \*\* 为与  $K_1$  分潮区别起见,用  $k_2$  代表  $K_2$  分潮； \*\*\* 这是指  $K_1$  分潮的倍潮。

潮。增加的分潮共 16 个,其中的一类属于天文-气象分潮。可以设想,海洋水文条件的季节变化能够影响到潮波的运动和传播,这可以看作是天文潮和气象因素的相互作用。如果我们对一个地点不同月份的潮位观测值分别进行调和分潮,就能够看出所得不同月份的调和常数具有季节变化。同时容易发现,观测地点离外洋距离越远,季节变化也就表现得越明显。实际上文献[4]就曾注意到营口  $M_2$  分潮的季节变化。在这里 2 月份的调和常数为  $H = 104.5$  厘米,  $g = 144^\circ$ , 而 8 月则为  $H = 125.0$  厘米,  $g = 137^\circ$ 。这种变化可以用增加频率为  $M_2 + S_a$  和  $M_2 - S_a$  及  $M_2 + S_{S_a}$  和  $M_2 - S_{S_a}$  的分潮的办法反映出来,我们将其分别记为  $MA_2, M\bar{A}_2, MB_2, M\bar{B}_2$ , 但后面两个与天文复合潮  $OP_2$  和  $Mk\bar{S}_2$  频率相同。对于其它主要分潮我们也考虑了相应的天文-气象分潮。但是大部分天文-气象分潮的频率和天文潮相同,我们一般仍用天文潮的符号来表示。在检查分析结果时应当注意,可能这些分潮的结果并不一定单纯是天文原因引起的,而可能主要是天

文-气象相互作用的结果,特别对那些较小的分潮,如  $\phi_1, R_{20}$

所增加的第二类是摩擦非线性复合分潮。从动力学原因来看,非线性可分为两种,一种是运动方程中的平流项,如  $u \frac{\partial u}{\partial x}, \dots$ , 和连续方程中的非线性项,如  $\frac{\partial(\zeta u)}{\partial x}, \dots$  ( $\zeta$  为水位,  $u$  为流速);另一种是运动方程中的摩擦力项引起的,它与流速的平方  $|u|u$  成比例。由这两种原因引起的复合潮波有一重要差别:如果把外海输入的潮波看作一阶潮波,则对第一种非线性,除长周期外,属于同一潮族的分潮相互作用所产生的二阶潮波中没有仍属于此潮族的分潮;而对第二种,即摩擦非线性,情况则不同,其二阶潮波中包含有属于原来潮族的分潮。因此在全日潮港口,全日和半日潮族的复合潮波主要是由于摩擦的非线性引起的。在全日潮港,半日潮族中可能包含有由非摩擦、非线性引起的复合潮。不过这些复合潮常和天文源分潮频率相同,如  $K_1$  倍潮即  $K_2, K_1$  和  $O_1$  的一个复合潮为  $M_{20}$ 。

天文源分潮、天文-气象复合潮和不同来源的天文浅水复合潮常常具有相同的频率。对于一年资料的分析,由于各个分潮  $f, u$  值不一样,会给结果带来误差。更麻烦的事情是它们之间频率不同,但一年的期间又不足以将它们区别开来。这样的分潮在表 1 中用括号予以区别。特别需提到的是分潮  $2O\bar{K}_1$ , 其角速率与天文源分潮  $2Q_1$  约相差  $0.0093^\circ/\text{小时} = 81^\circ/\text{年}$ 。Doodson 采用了  $2Q_1$  而忽略  $2O\bar{K}_1$ , 这在深水区域是合理的。但在浅水区域我们常常可发现  $2O\bar{K}_1$  比  $2Q_1$  还要大。在这些地区,忽略了  $2O\bar{K}_1$  之后,所得的  $2Q_1$  调和常数则完全没有代表性。例如在广西北海,通常算得的  $2Q_1$  分潮的迟角每年有很大的变化,大约每四年半变化  $360^\circ$ , 这是把以  $2O\bar{K}_1$  为主的合成振动误当作  $2Q_1$  的结果。为了分离这两个分潮,应当有多年观测资料。在资料只有一年的情况下,  $2Q_1$  应当用主要分潮

来推算。例如可用  $H_{2Q_1} = \frac{C_{2Q_1}}{C_{O_1}} H_{O_1}, g_{2Q_1} = g_{O_1} - \frac{\sigma_{O_1} - \sigma_{2Q_1}}{\sigma_{O_1} - \sigma_{O_1}} (g_{O_1} - g_{O_1})$  来计算  $2Q_1$  的调和常数。合成振动和  $2Q_1$  的向量差(用向量的长度和角度代表一个振动的振幅和位相)便是  $2O\bar{K}_1$ 。类似地,在全日潮地区,复合潮  $O_2$  也可能严重地干扰天文源分潮  $2N_2^{[3]}$ 。

我们在计算中对各分潮的交点因子  $f$  和位相的交点订正值  $u$  仍采用传统的方法。前面已提到,常常有许多不同来源的分潮具有相同的频率,而各个分潮的  $f, u$  的算式又不一样,故用其中的一个算式来代替其余的必然带来误差。此外,主要是由于摩擦的非线性效应,分潮实际的年变化不会与  $f, u$  的变化情况相符。例如我们不能期望引潮力增加若干倍,实际潮汐也能增加这么多倍,因为摩擦比例于潮汐振幅的平方,而不是线性关系。实际的情况应当是:观测到的  $f$  的变化幅度要小于引潮力的变化幅度。全日分潮的  $f$  值变化幅度要比半日分潮的大。 $f_{O_1}$  约变化于  $1 \pm 0.18$ , 在某些海区实际的变化如缩小到  $1 \pm 0.13$ , 那么就会引入 5% 的误差。

上面谈到的这些可能的误差对半日潮港问题没有那么严重,但对全日潮港是需要考虑的;必要时,最好用 19 年的资料进行分析。

前面已经提到,用调和分潮表示高频部分存在着相当大的困难。为了以较少的项数来表示这部分振动,我们首先将长周期、全日、半日潮族分别加以组合,记

$$\left\{ R_0 \cos r_0 = \sum_{i=1}^5 f_i H_i \cos [\sigma_i t + (V_0 + u)_i - g_i] \right.$$

$$\left. \begin{aligned}
 R_0 \sin r_0 &= \sum_{i=1}^5 f_i H_i \sin [\sigma_i t + (V_0 + u)_i - g_i] \\
 R_1 \cos r_1 &= \sum_{i=6}^{32} f_i H_i \cos [\sigma_i t + (V_0 + u)_i - g_i] \\
 R_1 \sin r_1 &= \sum_{i=6}^{32} f_i H_i \sin [\sigma_i t + (V_0 + u)_i - g_i] \\
 R_2 \cos r_2 &= \sum_{i=33}^{57} f_i H_i \cos [\sigma_i t + (V_0 + u)_i - g_i] \\
 R_2 \sin r_2 &= \sum_{i=33}^{57} f_i H_i \sin [\sigma_i t + (V_0 + u)_i - g_i]
 \end{aligned} \right\} (1)$$

则等号左边每个量的变化过程仍与余弦或正弦变化接近, 但是其振幅和相角的变化率已不再是常量, 而作缓慢的变动, 因此我们称这些量为准调和分量。一个地点任一时刻的潮高应当是该地点及其周围地点当时及前一段时间的  $R$  和  $r$  的函数。实际潮汐的情况是, 两个地点距离如不很远(如很远的话, 这两个地点的潮汐相互影响显然会很弱), 其  $R, r$  值的变化情况是很相近的, 从而以本地点  $R, r$  值作为预报指标一般已经足够了。

根据潮汐动力学可以寻找高频的潮族与低频潮族之间可能的关系。据上述第一种(即非摩擦)非线性所产生的二阶摄动项可表示为

$$KR_2^2 \cos(2r_2 - \theta), \quad KR_1 R_2 \cos(r_1 + r_2 - \theta), \quad (2)$$

这里  $K$  和  $\theta$  为常量, 第一项的  $K, \theta$  值与第二项不同, 这里为了书写方便,  $K, \theta$  的下标都省略了。本来除了这两项之外还有

$$KR_0 R_1 \cos(r_0 + r_1 - \theta), \quad KR_1^2 \cos(2r_1 - \theta), \quad KR_1 R_2 \cos(r_2 - r_1 - \theta), \dots,$$

但它们都属于低频部分, 已经在调和分潮中考虑了。由上面这些项再与一阶项组合可得到三阶摄动项, 如

$$KR_1 R_2^2 \cos(r_1 + 2r_2 - \theta), \quad KR_1 R_2^2 \cos(2r_2 - r_1 - \theta), \quad KR_2^3 \cos(3r_2 - \theta), \dots (3)$$

类似地由二阶与二阶组合或三阶与一阶组合, 还可以得到四阶项, 等等。

另外, 由第二种(即摩擦)非线性所产生的二阶摄动项则可表示为

$$\begin{aligned}
 KR_1^2 \cos(3r_1 - \theta), \quad KR_2^2 \cos(3r_2 - \theta), \quad KR_1 R_2 \cos(2r_1 + r_2 - \theta), \\
 KR_1 R_2 \cos(r_1 + 2r_2 - \theta), \quad KR_1 R_2 \cos(2r_2 - r_1 - \theta), \dots (4)
 \end{aligned}$$

这些项与一阶项组合进一步产生三阶项, ……。

更复杂的是, 第一种非线性产生的二阶项也可以通过第二种非线性与一阶项组合, 反之亦然。这样, 项数可能仍然很多。不过所有可能的项之中, 有许多项的相关关系是很密切的。例如(3)中所列出的三项与(4)中第四、五两项不同之处仅多乘了一个  $R_2$ 。  $R_2$  恒为正, 且在一个平均值上下作不是非常大的变化, 故这些相应项的相关系数一般很高, 故如相应的两项中只取其中一项也就能大体上代表了另一项。特别在更高阶的项中, 可以只选取比较少数的项。

上列这些准调和分量可以用一个一般的形式来表示:  $KA \cos(a - \theta)$ 。从而潮高可用下式表达:

$$\zeta = A_0 + \sum_i f_i H_i \cos[\sigma_i t + (V_0 + u)_i - g_i] + \sum_j K_j A_j \cos(a_j - \theta_j) (5)$$

表 2 中列出的是我们以吴淞为例进行方法试验时所选用的项。为了节省计算时间，仅选取 34 项。表 2 中项的选择不是最恰当的，尤其对别的港口更是如此。另外，在表中我们没有考虑与前期  $R, r$  值有关的项。在某些地区这样的项可能会有一定意义，但一般港口，即使把它们引进来，其作用也不会很显著。

表 2 准调和项中  $A, \alpha$  表达式

$j$	$A_j$	$a_j$	$j$	$A_j$	$a_j$	$j$	$A_j$	$a_j$
1	$R_1^2$	$3r_1$	13	$R_1 R_2^2$	$2r_2$	25	$R_1 R_2^2$	$r_1 + 3r_2$
2	$R_1 R_2$	$r_1 + r_2$	14	$R_1^2 R_2$	$3r_1 + r_2$	26	$R_1 R_2^2$	$4r_2 - r_1$
3	$R_1^2 R_2$	$r_1 + r_2$	15	$R_1 R_2$	$r_1 + 2r_2$	27	$R_1 R_2^2$	$4r_2 - r_1$
4	$R_1 R_2$	$2r_2 - r_1$	16	$R_1 R_2^2$	$r_1 + 2r_2$	28	$R_2^3$	$4r_2$
5	$R_1 R_2^2$	$2r_2 - r_1$	17	$R_1 R_2^2$	$r_1 + 2r_2$	29	$R_2^4$	$4r_2$
6	$R_1 R_2^2$	$2r_2 - r_1$	18	$R_1 R_2^2$	$3r_2 - r_1$	30	$R_1 R_2^2$	$r_1 + 4r_2$
7	$R_1^3$	$4r_1$	19	$R_1 R_2^2$	$3r_2 - r_1$	31	$R_2^4$	$5r_2$
8	$R_1 R_2$	$2r_1 + r_2$	20	$R_1^2 R_2$	$2r_1 + 2r_2$	32	$R_2^5$	$5r_2$
9	$R_1^2 R_2$	$2r_1 + r_2$	21	$R_2^2$	$3r_2$	33	$R_2^5$	$6r_2$
10	$R_1^2 R_2$	$2r_1 + r_2$	22	$R_2^2$	$3r_2$	34	$R_2^6$	$6r_2$
11	$R_2^2$	$2r_2$	23	$R_2^4$	$3r_2$			
12	$R_2^2$	$2r_2$	24	$R_1 R_2^2$	$r_1 + 3r_2$			

实际分析分两步，首先对实测潮位  $\zeta$  进行调和分析，求出调和常数。在分析过程中，为了消去高频部分对低频部分调和常数的影响（对于一年资料的分析，这种影响本来就不大），可以加入一些主要的浅水分潮（例如 Doodson 60 个分潮中的那些浅水分潮），但分析完后其调和常数可不采用。然后由实测水位减去平均水位和表 1 中所列的各分潮的水位，得到由高频振动和噪声构成的水位  $\delta$ 。对于第  $\nu$  个观测时刻，我们可给出方程

$$\sum_{j=1}^{34} K_j A_{j\nu} \cos(a_{j\nu} - \theta_j) = \delta_\nu \quad (6)$$

式中  $\nu = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  为观测记录的个数。记  $K_j \cos \theta_j = x_{2j-1}$ ,  $K_j \sin \theta_j = x_{2j}$ ,  $A_j \cos a_j = \alpha_{2j-1}$ ,  $A_j \sin a_j = \alpha_{2j}$ , 则上式可化为线性方程:

$$\sum_{k=1}^{68} \alpha_{k\nu} x_k = \delta_\nu \quad (7)$$

这个方程组可用最小二乘法解出。

作预报时，可先计算  $R$  和  $r$ ，然后计算  $\alpha_k$ ，最后由式(5)算出水位值。

## 二、预报效果

我们用上述方法对吴淞 1963 年的潮汐观测资料进行了分析，然后用所得分析结果预报了 1970 年的潮汐。为了考察本方法的预报效果，自然希望与调和分析方法作一比较。调和法效果的好坏与选取的分潮是否恰当很有关系，Doodson (1928) 所选用的 60 个分潮是经过谨慎考虑的，但由于当时计算工具的限制，没有采用更多的分潮，故作为与本方法相比较的调和法，显得浅水分潮数目太少了一些，然而当前还没有一个方法，它所选用的浅水分潮是公认最合适的，故我们仍采用 Doodson 方法作为比较之用。下面在谈到调和法的结果时，均指采用 Doodson 60 个分潮的结果。

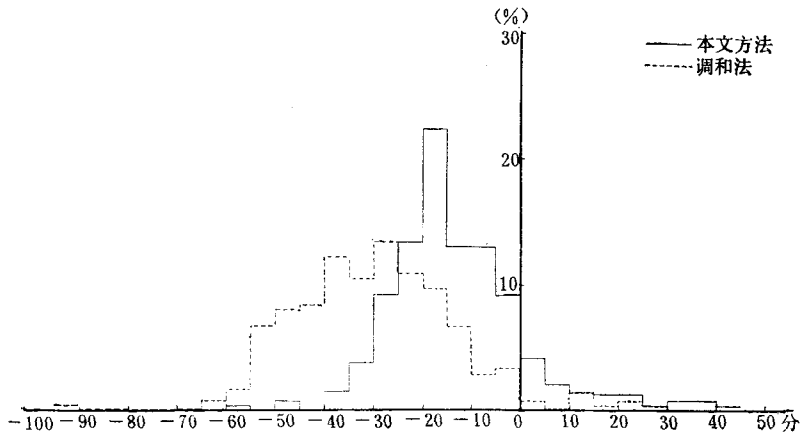


图 1 用 1963 年分析结果预报 1970 年低潮时间的误差分布图

—— 本文方法    - - - 调和法

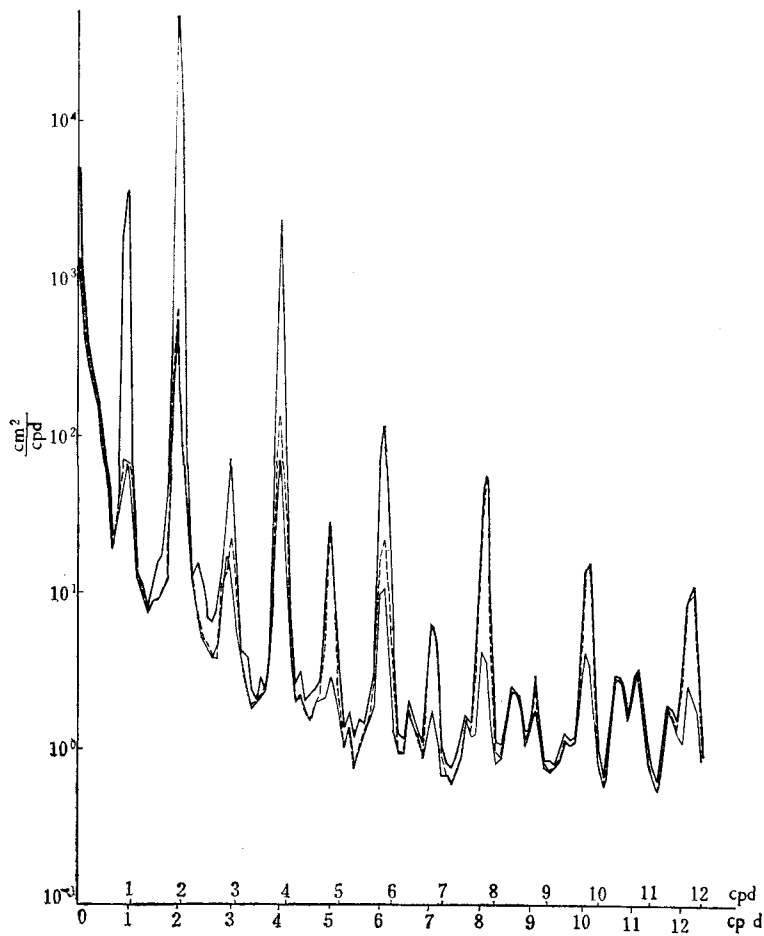


图 2 实测潮位、本文方法潮位余差及调和法余差的谱

—— 实测潮位谱； —— 本文方法余差谱； - - - 调和法余差谱。

用调和法对吴淞站进行预报时，高、低潮高度及高潮时间都比较好，但低潮时间误差很大。用本文方法预报时，高、低潮高及高潮时间与调和法效果差不多，而低潮时的预报准确度有了实质性改进。图 1 中的虚线是调和法预报低潮时的误差分布，细实线是本文方法预报低潮时的误差分布。可以看出所获得的改进是明显的。例如调和法误差在半小时以上占 49%，而本方法可减少到 9%，但仍大有改进的余地，实线仍显示出预报低潮时系统地偏早，这可能是由于表 2 中的项数还不够多，还需要考虑更高频的项。

为了更细致地检查预报效果，我们对实测潮位及潮位余差进行了谱分析。图 2 中粗实线为实测潮位的谱，虚线为实测潮位减去调和法预报值的余差的谱，细实线为实测减去本文方法预报值的余差的谱。

为了给出一些数字上的概念，我们还将频率划分为 0—0.5, 0.5—1.5, 1.5—2.5, …, 10.5—11.5, 11.5—12.42 *cpld* (周/太阴日) 共 12 段，计算出各段的能量分布情况(表 3)。

表 3 实测潮位谱、调和法余差谱及本方法余差谱在各频段的能量分布

频		率	实 测 潮 位 谱	调 和 法 余 差 谱	本 方 法 余 差 谱
<i>cpld</i>	<i>cpd</i>				
0—0.5	0—0.48	596.0	237.0	237.0	
0.5—1.5	0.48—1.45	542.5	35.8	33.7	
1.5—2.5	1.45—2.42	5750.4	89.3	85.2	
2.5—3.5	2.42—3.38	15.7	7.3	6.4	
3.5—4.5	3.38—4.35	362.0	24.5	12.4	
4.5—5.5	4.35—5.31	5.0	4.6	1.7	
5.5—6.5	5.31—6.28	21.7	5.4	3.1	
6.5—7.5	6.28—7.25	2.2	1.9	1.1	
7.5—8.5	7.25—8.21	9.8	9.7	1.6	
8.5—9.5	8.21—9.18	1.6	1.5	1.4	
9.5—10.5	9.18—10.15	3.8	3.8	1.5	
10.5—11.5	10.15—11.11	2.0	1.9	1.9	
11.5—12.42	11.11—12	3.0	3.0	1.3	
0—12.42	0—12	7215.8	425.6	388.1	

由于 Doodson 60 个分潮只包含潮族 0, 1, 2, 3, 4 和 6, 故在频率 5, 7, 8, …, 12 *cpld* 附近, 图 2 中虚线和粗实线几乎重叠, 表 3 中相应频段调和法余差能量和实测潮位能量很相近(由于低频部分的影响减弱, 计算所得余差能量略小一些)。而本文方法的余差能量在各频段 (10.5—11.5 *cpld* 除外, 因为表 2 中没有考虑潮族 11) 均明显低于调和法。

由图 2 可以看到, 实测水位谱在频率  $m\text{cpld}$  和  $m\text{cpd}$  ( $m = 1, 2, \dots, 12$ ) 之间有一个峰值, 这是预料之中的。但是也容易发现, 在这些峰的每一个的左边还显示出一个较低的峰。例如在 11 *cpld* 和 11 *cpd* 之间的峰的左边还有一个稍低的峰, 对应的频率约为 10.35 *cpd*, 从潮汐线谱的分布看, 不应当存在这个峰。如考虑到我们所用的观测资料是以 1 小时为间隔, 所得的谱实际上是以 12 *cpd* 为折叠频率的折叠谱, 那么这个峰的出现就不难理解。事实上它对应的频率并不是 10.35 左右, 而是  $24 - 10.35 = 13.65$  左右, 在 14 *cpld* ( $=13.53\text{cpd}$ ) 和 14 *cpd* 之间, 它实际上是潮族 14 的“像”。由于在表 2 中没有考虑超过 12 的潮族, 在这些较低的峰附近, 预报的余差谱和实测潮位谱几乎一样; 而附近主

要的峰则明显地降低了(潮族 11 除外),甚至低于实测谱的较低的峰。这样看来,在吴淞,频率高于  $12cpd$  的潮族仍然是重要的,这可能是我们预报低潮时间仍然偏早的主要原因。因此为了进一步提高预报准确度,引入更高频率的潮族是必要的。

可能会有这样看法,认为由于折叠现象的存在,由每小时潮位观测记录不能分析出频率高于  $12cpd$  的分潮,这是不确切的。事实上, Miyazaki (1958) 就用每隔 35.5 小时一个观测值的样本(折叠频率为  $0.338cpd$ ) 分析出主要的潮汐分潮。这是因为潮汐分析与一般的 Fourier 变换不同,潮汐谱线的频率是预先知道的,故只要有足够的信噪比,大多数频率高于折叠频率的分潮都可以计算出来。但少数分潮不行,例如对 1 小时间隔的样本,  $S_{13}$ ,  $S_{14}$  等分潮与分潮  $S_{11}$ ,  $S_{10}$  完全重叠,不能分离,不过这些分潮一般很小。同样,即使样本的间隔仍为 1 小时,本方法也容许引入高于  $12cpd$  的潮族,以致这些潮族的“像”位于噪声及天文潮与低频噪声相互作用都相当显著的频段内。如果很高频率的潮族仍然需要考虑,那么就必需采用时间间隔小于 1 小时的样本。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Doodson, A. T., 1928. The analysis of tidal observations. *Phil. Trans. Roy. Soc., Ser. A*, 227: 223—279.
- [ 2 ] Doodson, A. T., 1957. The analysis and prediction of tides in shallow water. *Int. Hydr. Rev.* 33(1): 85—126.
- [ 3 ] Godin, G., 1975. The identification of tidal constituents. *Int. Hydr. Rev.* 52(2): 145—155.
- [ 4 ] Int. Hydr. Bureau, 1936. Tides List of Harmonic Constants. Monaco.
- [ 5 ] Miyazaki, M., 1958. A method for the harmonic analysis of tides. *Oceanogr. Mag.* 10(1): 65—80.
- [ 6 ] Munk, W. H. and D. E. Cartwright, 1966. Tidal spectroscopy and prediction. *Phil. Tran. Roy. Soc., Ser. A*, 259: 533—581.
- [ 7 ] Rossiter J. R. and G. W. Lennon, 1968. An intensive analysis of shallow water tides. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 16: 275—293.
- [ 8 ] Zetler, B. D. and R. A. Cummings, 1967. A harmonic method for predicting shallow-water tides. *J. Mar. Res.* 25(1): 103—114.

## A METHOD FOR PREDICTING THE TIDES OF SHALLOW-WATER PORTS\*

Fang Guohong and Yu Kejun

(Institute of Oceanology, Academia Sinica)

### ABSTRACT

The tidal species with frequencies higher than  $2cpd$  are represented by quasi-harmonic terms in the present method to overcome the difficulties existing in the harmonic method. The harmonic constituents are still adopted to represent the species 0, 1 and 2, and some constituents caused by the interaction between astronomical and meteorological origins and by nonlinear effects of tidal friction are introduced. The prediction of the year of 1970 for Wusong, Shanghai, using the results obtained from the analysis of observations of the year of 1963 show obvious improvement compared with Doodson's standard method.

\*Contribution No. 361 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.