

海南南山外海潮流的数值模拟

曹德明

(中国科学院海洋研究所, 青岛)

关键词 南山外海, 高分辨率, 潮流数值模拟

提要 本文建立了三个不同大小和不同分辨率的数值模型, 得到了海南南山外海高分辨率的计算结果, 与实测结果符合良好。

在沿海地区的开发中, 港湾建设、航道开发、石油开采等均需采用较为详尽的水位、海流资料, 但往往没有现成的历史资料可供借鉴, 现场观测又受到某些限制, 这种情况可以应用数值计算的手段加以解决。尽管实际开发海区的范围并不一定很大, 但是为了获得高分辨率的结果, 以及尽可能运用已有的历史资料作为边界

条件和检验手段, 有时需要建立几个不同大小和不同分辨率的数值模型。现以南山海区为例进行讨论。该海区位于海南岛西南, 莺歌海和榆林之间。

一、基本方程及差分格式

支配潮波运动的基本方程取为:

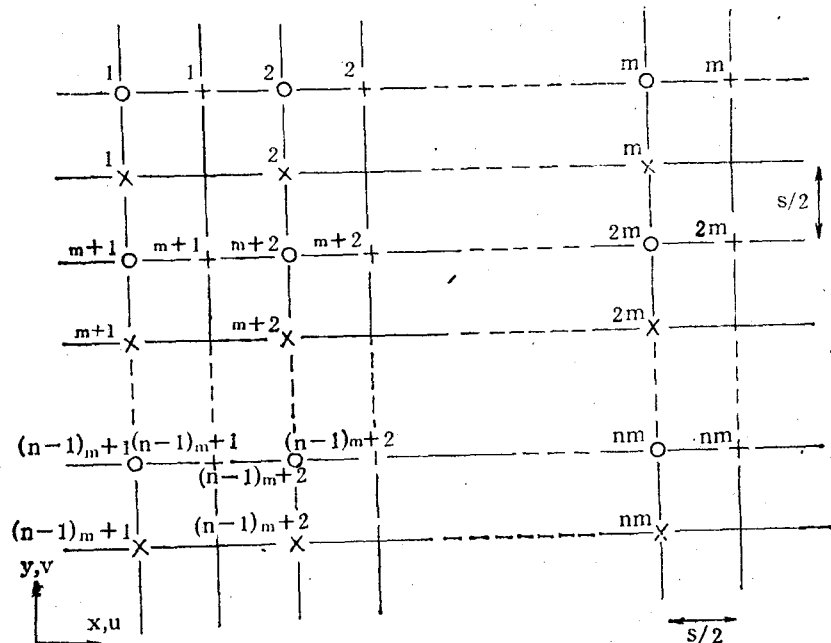


图1 计算网格点配置图

○— ξ ; +— η ; ×— ψ

Fig.1 Layout of grid points of numerical model

连续方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Hu) + \frac{\partial}{\partial y} (Hv) = 0 \quad (1)$$

运动方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + \frac{Ku(u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}}{H} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + \frac{Kv(u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}}{H} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

式中, t ——时间; ζ ——潮位; H ——总水深 $= h + \tau$, h ——未扰动水深; u, v ——潮流沿 x, y 方向分量的海底到海面的平均值; f ——Coriolis 参量; K ——底摩擦系数, 本计算中取 0.0022; g ——重力加速度。

差分格式基本采用 Flather 和 Heaps^[3] 的斜导数方法, 网格点配置见图 1。

差分方程为显式, 由式(1)–(3)导出如下:

$$\begin{aligned} & \{\zeta_i(t + \tau) - \zeta_i(t)\} / \tau \\ & = -\{d_i(t)u_i(t) - d_{i-1}(t)u_{i-1}(t) \\ & \quad + e_{i-m}(t)v_{i-m}(t) - e_i(t)v_i(t)\} / s, \\ & \{u_i^*(t + \tau) - u_i(t)\} / \tau = f\tilde{v}_i(t) \\ & \quad - Ku_i^*(t + \tau)\{u_i^2(t) + \tilde{v}_i^2(t)\}^{\frac{1}{2}} / D_i(t + \tau) \\ & \quad - g\{\zeta_{i+1}(t + \tau) - \zeta_i(t + \tau)\} / s, \\ & \{v_i^*(t + \tau) - v_i(t)\} / \tau = -f\tilde{u}_i^*(t + \tau) \\ & \quad - Kv_i^*(t + \tau)\{\tilde{u}_i^2(t) + v_i^2(t)\}^{\frac{1}{2}} / \\ & \quad E_i(t + \tau) - g\{\zeta_i(t + \tau) \\ & \quad - \zeta_{i+m}(t + \tau)\} / s, \\ & \{u_i(t + \tau) - u_i^*(t + \tau)\} / \tau \\ & = -\frac{1}{2s} \tilde{u}_i^*(t + \tau)\{u_{i+1}^*(t + \tau) - u_i^*(t + \tau) \\ & \quad + u_i(t + \tau) - u_{i-1}(t + \tau)\} \\ & \quad - \frac{1}{4s} [\{v_{i-m}^*(t + \tau) + v_{i-m+1}^*(t + \tau)\} \\ & \quad + \{u_{i-m}(t + \tau) - u_i(t + \tau)\} \\ & \quad + \{v_i^*(t + \tau) + v_{i+1}^*(t + \tau)\}\{u_i^*(t + \tau) \\ & \quad - u_{i+m}^*(t + \tau)\}], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \{v_i(t + \tau) - v_i^*(t + \tau)\} / \tau \\ & = -\frac{1}{4s} [\{u_{i+1}^*(t + \tau) + u_{i+m}^*(t + \tau)\} \\ & \quad + \{v_{i+1}^*(t + \tau) - v_i^*(t + \tau)\} \\ & \quad + \{u_{i-1}^*(t + \tau) + u_{i+m-1}^*(t + \tau)\} \\ & \quad + \{v_i(t + \tau) - v_{i-1}(t + \tau)\}] \\ & \quad - \frac{1}{2s} \tilde{v}_i^*(t + \tau)\{v_{i-m}(t + \tau) \\ & \quad - v_i(t + \tau) + v_i^*(t + \tau) \\ & \quad - v_{i+m}^*(t + \tau)\}, \end{aligned}$$

其中,

$$d_i = \frac{1}{2} (H_i + H_{i+1}),$$

$$e_i = \frac{1}{2} (H_i + H_{i+m}),$$

$$D_i = \max(d_i, H_0), \quad E_i = \max(e_i, H_0),$$

$$\tilde{u}_i = \frac{1}{4} (u_{i-1} + u_i + u_{i+m-1} + u_{i+m}),$$

$$\tilde{v}_i = \frac{1}{4} (v_{i-m} + v_{i-m+1} + v_i + v_{i+1}),$$

$$\tilde{u}_i = \frac{1}{4} (u_{i+1} + 2u_i + u_{i-1}),$$

$$\tilde{v}_i = \frac{1}{4} (v_{i-m} + 2v_i + v_{i+m}).$$

用这个差分方程计算时, 每一时间步, 水位计算一次, 流速要计算两次, 即先计算 u^*, v^* , 再计算 u, v 。

二、计算过程

为了使南山附近获得高分辨率的结果, 我们建立三个不同大小和不同分辨率的模型。第一个模型的计算区域覆盖了整个北部湾海区 (见图 2), 其网格点之间的间距为 7.5n mile。对于这个模型, 大部分边界为海岸线, 边界条件很简单, 即垂直海岸方向的流速分量为零。开边界主要是在海区的东南部, 此外在琼州海峡亦有一小段开边界。这里边界条件可依据沿岸实测值和经验的同潮图给出。第二个是过渡模型, 比第一个模型覆盖的区域小 (见图 2 的阴影部分), 但其分辨率比第一个模型高 5 倍, 即网格

点间距取 1.5nmile, 见图 3。第二个模型有较长的开边界, 其边界条件由第一个模型的结果

内插得出。第三个模型是直接为南山海区而设计的, 它的覆盖区域更小一些(见图 3 的阴影部分), 而其分辨率进一步比第二个模型高 5 倍, 即网格点间距取为 0.3n mile (见图 4)。这个模型已有足够高的分辨率, 反映出南山海区的复杂岸形和海底水深变化。

我们在数值计算中采用方国洪等^[2]提出的方法, 即对全日和半日族各取一个分潮为代表分潮。因而我们所模拟的潮汐和潮流可表示为

$$\zeta = H_{m_1} \cos(\omega_{m_1} t - g_{m_1}) + H_{M_2} \cos(\omega_{M_2} t - g_{M_2}) \quad (4)$$

$$u = U_{m_1} \cos(\omega_{m_1} t - \xi_{m_1}) + U_{M_2} \cos(\omega_{M_2} t - \xi_{M_2}) \quad (5)$$

$$v = V_{m_1} \cos(\omega_{m_1} t - \eta_{m_1}) + V_{M_2} \cos(\omega_{M_2} t - \eta_{M_2}) \quad (6)$$

这样, 我们要模拟的潮波过程既包括了全日潮也包括了半日潮。同时, 由于 $\omega_{M_2} = 2\omega_{m_1}$, 由 (4)–(6) 式所描述的运动是以 $2\pi/\omega_{m_1}$ (即 1 太阴日) 为周期的周期性过程。

数值计算中开边界条件均由 (4) 式给出, 式中调和常数 $H_{m_1}, g_{m_1}, H_{M_2}$ 和 g_{M_2} 对第一个模

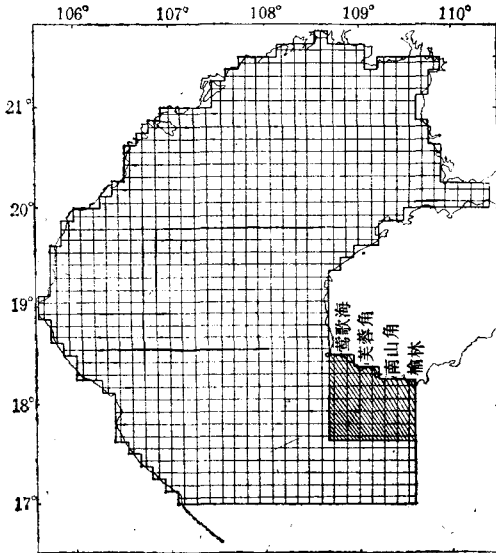


图 2 北部湾数值计算网格
(阴影部分表示过渡模型的计算范围)

Fig.2 Computational grid of the Beibuwan Gulf
(shaded area represents the coverage of the transitional model)

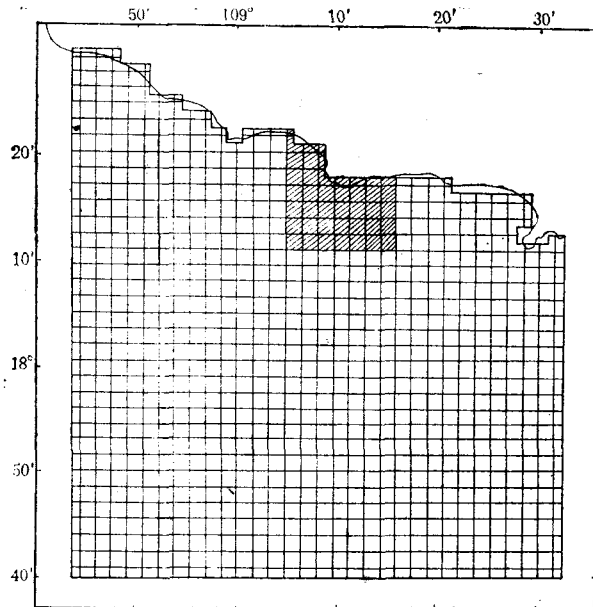


图 3 过渡模型计算网格
(阴影部分表示南山海区模型的计算范围)

Fig.3 Computational grid of the transitional model
(shaded area represents the coverage of the Nanshan model)

型由沿岸实测资料和历史同潮图给出^[1];对第二个模型由第一个模型结果内插给出。初始条件取

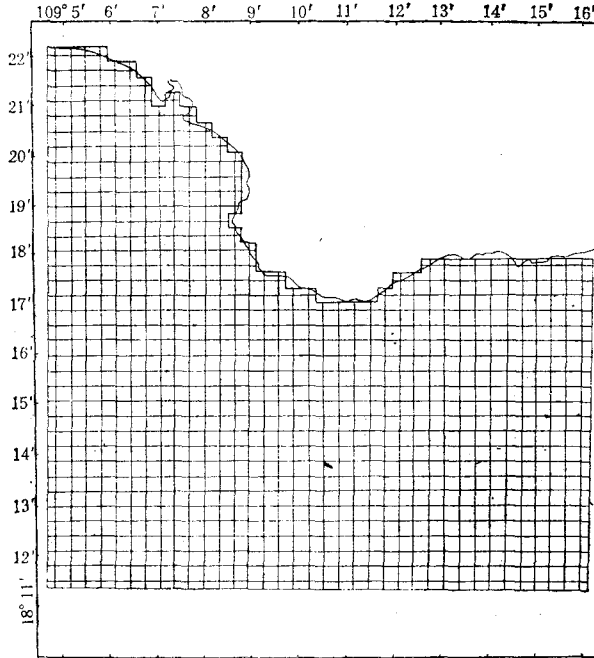


图4 南山海区数值计算网格

Fig.4 Computational grid of the Nanshan model

$\zeta = u = v = 0$ 。在计算过程中,每 1/5 太阴日将计算值与 1 个太阴日前的对应值进行比较,若差值有大于 1cm (对 ζ) 或 1cm/s (对 u 和 v) 时,则计算继续进行;若连续 5 次全部差值小于 1cm (对 ζ) 和 1 cm/s (对 u 和 v) 则计算中止,并取出一个太阴日内的 ζ, u 和 v 值进行简单的 Fourier 变换,求得各计算点的调和常数 H, g, U, ξ, V 和 η 。

三、计算结果与实测的比较

在第一个数值模型所包含的计算区域内,有沿岸和岛屿上的 20 个潮汐测站和海中 25 个海流测站,其位置见图 5。对这些站上的观测资料已进行过调和分析,求得潮汐和潮流调和常数。我们对数值计算得到的和由实测分析得到的 m_1 和 M_2 分潮的潮汐和潮流调和常数进行了比较,示于图 6。由图 6 可见,其一致性是良好的。平均偏差值如下:

$$H_{m_1}: 3.2\text{cm} \quad g_{m_1}: 3^\circ$$

$$H_{M_2}: 2.5\text{cm} \quad g_{M_2}: 7^\circ$$

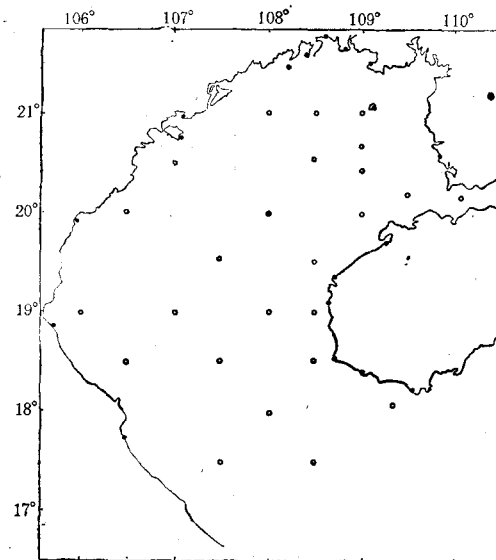


图5 北部湾验潮站和测流站分布图

(●——验潮站, ○——测流站)

Fig.5 Distributions of tidal stations (full circle) and tidal current stations (open circle)

$U_{m_1}: 2.4 \text{ cm/s}$ $\xi_{m_1}: 12^\circ$
 $U_{M_2}: 1.4 \text{ cm/s}$ $\xi_{M_2}: 12^\circ$
 $V_{m_1}: 2.4 \text{ cm/s}$ $\eta_{m_1}: 5^\circ$
 $V_{M_2}: 1.8 \text{ cm/s}$ $\eta_{M_2}: 9^\circ$

其一致性十分良好。潮流调和常数符合程度也

表 1 过渡模型计算所得潮流椭圆要素与实测的比较
 Tab.1 Comparison of the elliptic parameters of tidal current for the transitional model, computed and observed

站号	分潮	椭圆要素	实测值	计算值	偏差
A	m_1	W	38.2	46.4	8.2
		w	1.4	0.9	0.5
		k	0.04	-0.02	0.06
		τ	8.6	7.6	1.0
		Θ	106	103	3
	M_2	W	9.0	12.7	3.7
		w	1.3	1.0	0.3
		k	0.14	0.08	0.06
		τ	4.8	4.2	0.6
		Θ	113	106	7
B	m_1	W	27.6	29.3	1.7
		w	3.3	4.4	1.1
		k	-0.12	-0.15	0.03
		τ	8.2	6.6	1.6
		Θ	114	111	3
	M_2	W	9.4	8.5	0.9
		w	0.9	0.2	0.7
		k	0.10	0.02	0.08
		τ	3.8	3.7	0.1
		Θ	110	108	2

注: 椭圆要素单位 W, w —cm/s; τ —h; Θ —度

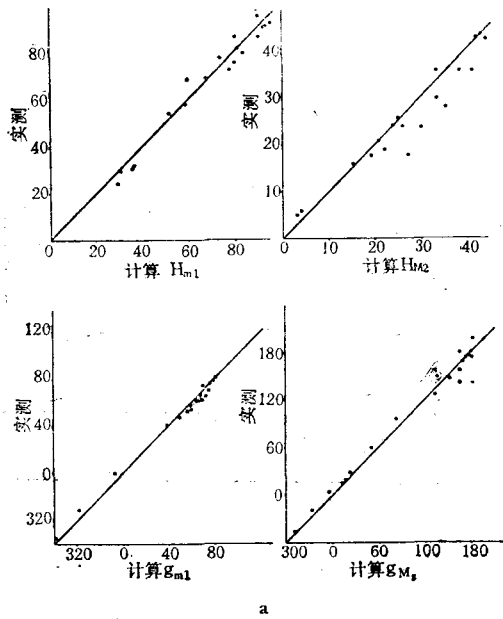


图 6 计算和实测潮汐潮流调和常数的比较
 a. 潮汐 b. 潮流 (图略)

Fig.6 Comparison of harmonic constants of tides (a) and tidal currents (b), computed and observed

第二个模型即过渡模型所包含的计算区域较小, 只有两个潮汐观测点和两个潮流观测点。其计算和观测所得调和常数的偏差情况与第一个模型类似, 但潮流的迟角偏差略大一些。表 1 是潮流椭圆要素的比较表。表中 W, w, k, τ 和 Θ 分别代表潮流椭圆的长半轴, 短半轴, 椭圆率(正值表示左旋, 负值表示右旋), 最大流发生时间和最大流流向。由表 1 可知, 流速及方向均相当一致, 仅最大流发生时间偏差较为显著。

对第三个模型即南山海区模型, 没有实测资料可用于与计算对比, 但是我们比较了第三个模型和第二个模型的计算结果, 相应计算点 m_1 分潮振幅的平均差值为 0.1 cm , 位相为 0.1° , M_2 分潮振幅的平均差值为 0.1 cm , 位相为 0.2° ,

很好, 我们绘制了南山海区分潮流椭圆图(参看图 7a、b) 由图 7 可见, 全日分潮流和半日分潮流无论流向和振幅均十分一致, 仅在近岸地区差异略大, 这是因为对岸线的近似程度不一样造成的, 第三个模型因网格更为接近天然海岸线, 因而更符合实际。

通过以上计算, 我们得到了南山海区内间距 0.3 哩的各节点上高分辨率的水位和潮流调和常数。引入差比关系后, 可以得到 8 个主要调和分潮 ($Q_1, O_1, P_1, K_1, N_2, M_2, S_2, K_2$) 的潮汐和潮流调和常数, 可充分满足进一步推算工程所需各种潮汐潮流特征值的需要。

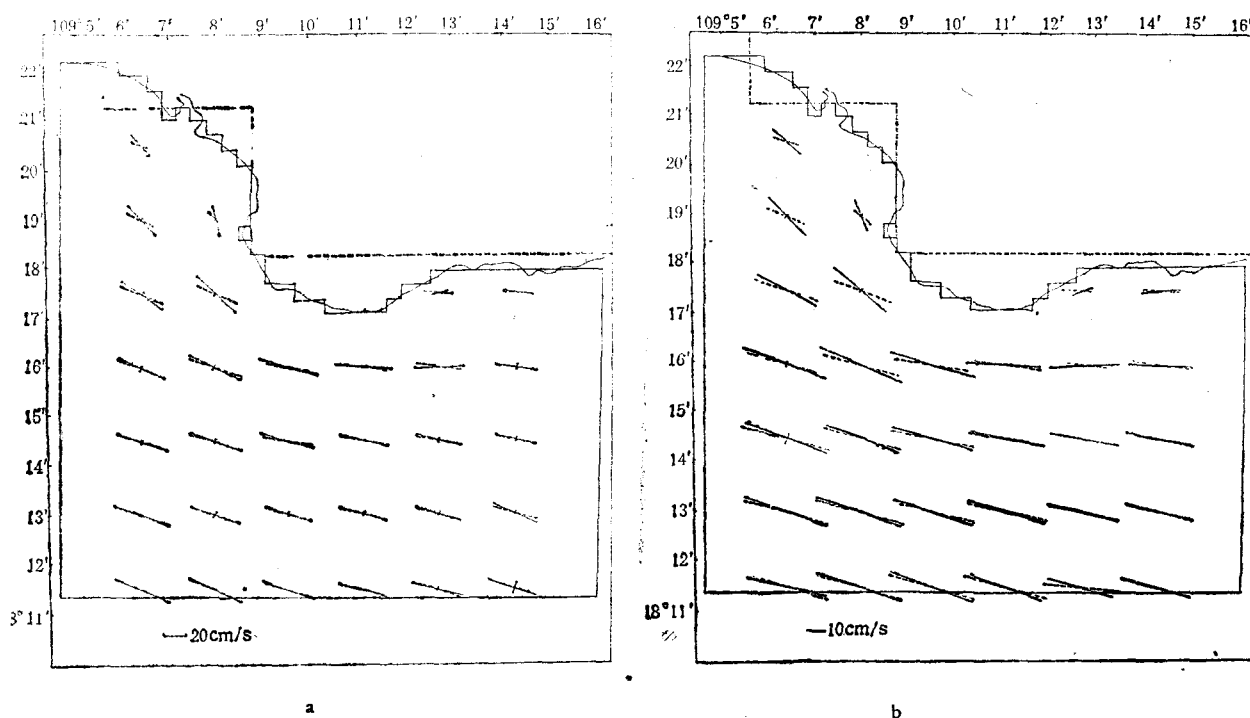


图7 南山海区潮流椭圆图
图中实线为南山模型计算结果;虚线为过渡模型的相应计算结果;实折线为南山模型网格边界;虚折线为过渡模型网格边界
a. 全日潮流 b. 半日潮流

Fig.7 Tidal current ellipses near the Nanshan area
(a) Diurnal tidal current; (b) Semidiurnal tidal current

参 考 文 献

- [1] Fang, G., 1986. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology* 4(1): 1-16.
[2] Fang, G., Yang, and Thao, Y. 1984. A two-dim-

ensional numerical model for tidal motion in the Taiwan Strait. *Marine Geophysical Researches* 7: 267-276.

- [3] Flather, R. A. and Heaps, N. S., 1975. tidal computation for More Borecambe Bay. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 42: 489-517.

NUMERICAL MODELLING OF TIDAL CURRENTS IN THE AREA NEAR NANSHAN, HAINAN ISLAND

Cao Deming

(Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao)

Key Words: Nanshan, High resolution, Numerical model of tidal current

Abstract

Three models with different coverage and different resolution are developed for the Nanshan sea area, Hainan Island. Good results with high resolution and agreement with real situation were obtained and metted with emergency requirement of engineering.