

杭州湾开挖深水航道对潮流影响的数值研究

李 身 铎[†]

王行恒[†] 梅向旗

(华东师范大学河口海岸研究所 上海 200062) (华东师范大学计算机系 上海 200062)

[†](华东师范大学河口海岸国家重点实验室 上海 200062)

提要 采用 x 方向伸展坐标下的二、三维方程,建立了开辟或增深深水航道前后的潮流场数值模式。该模式在航道横向上网格变距,以保证航道横向上有一定量的网格覆盖。在计算中采用二、三维交替进行,既节省大量计算时间,又保证了计算的稳定性。模式应用在杭州湾深水航道试挖研究中,用 5 个测流站大、中、小潮各层的观测资料给予验证,流速相对平均误差为 6%—10%,流向平均偏差大都在 10° 之间。计算表明在杭州湾航道增深 4m 后,垂直平均流速将减小 15cm/s 左右(约减小 16%)。但在垂向上变化是不同的,底层减小较大,而表层还略有增大;流向挖前挖后除槽内底层外,几乎没有变化。

关键词 数值模拟 潮流 深水航道 伸展坐标 分段双向转换 杭州湾

学科分类号 P731.2

杭州湾水域平均水深在海图深度基准面以下 8m,拟从湾口的唐脑山至北岸的金山咀,开挖一条长约 50km、宽为 160m、深为 12m 的深水航道,即需从海底挖出一条长、宽、深为 $50\text{km} \times 160\text{m} \times 4\text{m}$ 的深槽。挖后该深槽坡壁的稳定性以及槽内泥沙回淤的强度等都是深水航道能否挖成和有否经济价值的关键。杭州湾为一强潮水域,水体中含沙量极大,潮流的大小、方向及其变化,不但直接影响深槽本身的稳定,而且是泥沙输移、沉降和起动悬浮的重要动力因素,从而决定了槽内泥沙回淤量大小。因此,开挖深水航道首先必须对挖前挖后航道区及深水航道内的流场进行准确的数值模拟。

开挖的深水航道一般宽度有限,往往不会超过数百米,而航道长度大都长达数十公里,若用差分方法计算时,需解决沿航道纵横向网格距的问题;此外,底层流比上层流对航道深槽边坡稳定影响更大,而且它是悬浮泥沙沉降和起动的主要动力因素,用它作主要依据估算回淤强度更为可信,因而数值研究以三维分层算出流速为好。针对上面特点,本文采用了 x 方向伸展坐标三维水动力学模式¹⁾,使航道横向(x 方向)网格变距,这样既能保证航道横向有一定的网格覆盖,而计算量不至于过大,使航道流场能整体计算。在计算中

* 国家自然科学基金资助项目,49276261号。李身铎,男,出生于1938年9月,硕士生导师,教授,Fax: 0086-021-62546441

1) Rao S Vemulakonda. 1985. Coastal and inlet processes numerical modeling system for Oregon Inlet, North Carolina. Report of U.S. Army Engineer Water Ways Experiment Station

收稿日期:1996-02-05,收修改稿日期:1997-03-07

二、三维交替进行,二维采用稳定性较好的 ADI 方法,而三维采用显式格式,这样既能保证计算的稳定性,又有有效地减少计算时间。同时,还能根据不同的要求,改变计算中的若干常数,灵活地控制航道三维计算网距。

1 计算方法

1.1 控制方程

1.1.1 二、三维原始方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + fv - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + A_H \Delta u \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - fu - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + A_H \Delta v \quad (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \frac{\partial(HU)}{\partial x} - \frac{\partial(HV)}{\partial y} \quad (4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = - \frac{1}{H} \int_{-\zeta}^h \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz + fV - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{H} + A_H \Delta U \quad (5)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = - \frac{1}{H} \int_{-\zeta}^h \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) dz - fU - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{H} + A_H \Delta V \quad (6)$$

式中 x, y, z 为笛卡尔坐标的三个坐标轴。 xoy 轴位于未扰动的直角平面上, u, v, w 分别为三个坐标轴上的速度分量, ζ 为海面升降; Δ 为拉普拉斯算子; $H = h + \zeta$; τ_s 和 τ_b 分别为风应力和底应力, 风对杭州湾流场的作用可忽略, 本计算取 $\tau_s = 0$ 。

$$U = \frac{1}{H} \int_{-\zeta}^h u dz, \quad V = \frac{1}{H} \int_{-\zeta}^h v dz \quad (7)$$

1.1.2 x 方向伸展坐标下的二、三维方程 转换 x 方向坐标, 令 $x = \Phi(x')$, 则 $\frac{\partial a}{\partial x} =$

$\frac{1}{\Phi'(x')} \frac{\partial a}{\partial x'}$, 其中, $\Phi'(x') = d\Phi/dx'$, 转换可得 x 方向伸展坐标下的二、三维方程:

$$\frac{1}{\Phi'} \frac{\partial u}{\partial x'} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \left(\frac{u}{\Phi'} \frac{\partial u}{\partial x'} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + fv - \frac{g}{\Phi'} \frac{\partial \zeta}{\partial x'} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + A_H \Delta u \quad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = - \left(\frac{u}{\Phi'} \frac{\partial v}{\partial x'} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - fu - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + A_H \Delta v \quad (10)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \frac{1}{\Phi'} \frac{\partial(HU)}{\partial x'} - \frac{\partial(HV)}{\partial y} \quad (11)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = - \frac{1}{H} \int_{-\zeta}^h \left(\frac{u}{\Phi'} \frac{\partial u}{\partial x'} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz + fV - \frac{g}{\Phi'} \frac{\partial \zeta}{\partial x'} + \frac{\tau^{sx} - \tau_{bx}}{H} + A_H \Delta U \quad (12)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{1}{H} \int_{-\zeta}^h \left(\frac{u}{\Phi'} \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) dz - fU - g \frac{\partial \zeta}{\partial Y} + \frac{\tau^{xy} - \tau_{by}}{H} + A_H \Delta V \quad (13)$$

$$\text{其中, } \Delta u = \frac{\partial}{\partial x'} \left(\frac{\partial u}{\partial x'} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial y'^2}, \Delta v = \frac{\partial}{\partial x'} \left(\frac{\partial v}{\partial x'} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial y'^2} \quad (14)$$

1.2 网格配置和计算范围

1.2.1 平面配置 在 (x', y) 平面上采用交错网格, 两个相邻同类点的距离(步长)为 $\Delta x'$ 和 Δy (图 1)

1.2.2 垂向配置 航道工程加深前各处水深均为分等厚的三层, 但第一层需加海面升降 ζ , 则表、中、底三层的厚度分别为 $h_1 + \zeta, h_2, h_3$ 。其中 $h_1 = h_2 = h_3 = h / 3$; 加深后航道的深度为 $h_{\text{新}}$, 即加深了 $h_{\text{新}} - h$, 这部分水体也均分为三层, 即 $(h_{\text{新}} - h) / 3 = h_4 = h_5 = h_6$, 则加深后共分 6 层(图 1)

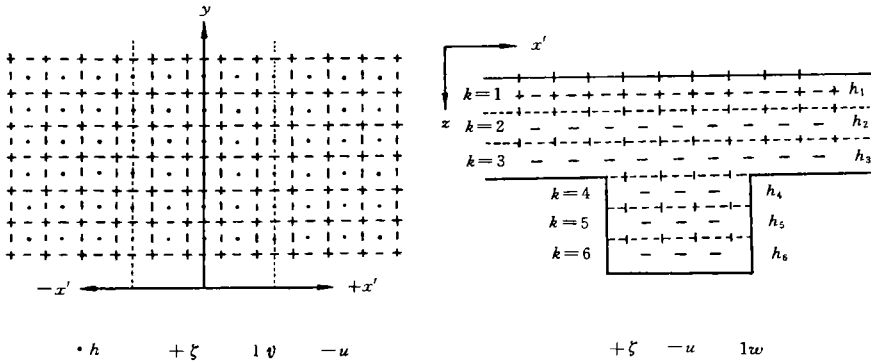


图 1 各变量在水平和垂向网格上的配置

Fig.1 Location of variables on the horizontal and vertical grid

1.2.3 横向(x)网格设计 引入实际横向距离 x 与伸展坐标 x' 的关系为

$$x = \Phi(x') = bx' + abx'^3 \quad (15)$$

取导数有: $\Phi'(x') = (1 + 3ax'^2)b \quad (16)$

式中 a, b 为任意常数, 设加深航道中轴处 $x = 0$, 航道边界处 $x = \pm B = \pm 80\text{m}$ (设航道宽度为 160m), 要求所计算的航道在横向上要有 4 个网格覆盖, 即取 $\Delta x' = 1$, 当 $x' = \pm 2$ 时, $x = \pm B = \pm 80$ 。根据要求和计算条件, 取适当的 a 后, 便可得与 x' 坐标相对应的实际距离(x)。本计算取 $a = 1 / 90, b = 38.3$ 可使加深槽轴线的两边各有二个 ζ 点和 u 点, 即在 160m 宽的加深槽上有 4 个 ζ 点和 u 点(实际距离分别为 $39.6\text{m}, 38.3\text{m}, 39.6\text{m}$, 槽轴取在间距 38.3m 中央)。此时若以槽轴为中心, 两旁各取 18 个水位点, 共有 35 个 $\Delta x'$, 则实际计算的范围为槽轴两旁各 3.38km , 即整个航道区横向计算范围为 6.76km (图 2)。

1.2.4 纵向(y)网格设置 深水航道设计长度为 4.65km , 取 $\Delta y = 500\text{m}$, 设置 101 个水位点, 100 个 Δy , 计算海区的长度为 50km , 其中计算深水航道的长度为 $(100 - 7) \Delta y = 46\,500\text{m}$ (图 2)。

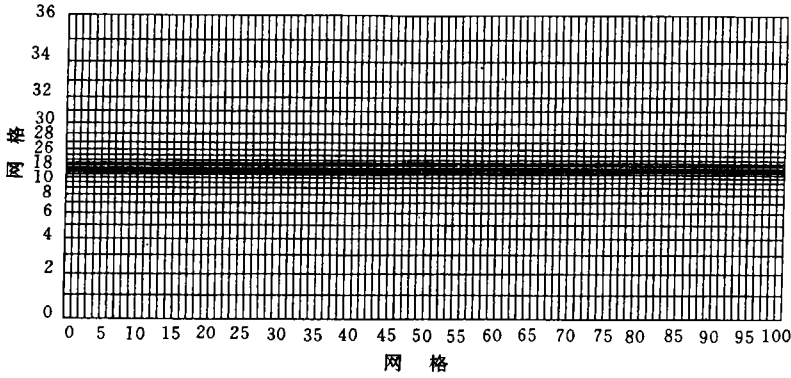


图2 航道区数值模拟网格

Fig.2 Numerical grid for channel regions simulation

1.3 系数的确定

根据经验和以往杭州湾研究结果(李身铎, 1985; 李身铎等, 1987; 曹德明等, 1988), 取海底摩擦系数 $\nu = 0.001$, 侧向涡动粘性系数 $A_H = 3.2 \times 10^6 \text{cm}^2 / \text{s}$, 垂直涡动粘性系数 $\nu = 200 - 400 \text{cm}^2 / \text{s}$.

1.4 开边界值的确定

根据杭州湾潮汐潮流数值模拟算得的潮汐调和常数(李身铎等, 1993), 用潮汐预报式

$$\zeta = x_0 + \sum_{i=1,2,4} f_i H_i \cos[\omega_i t + (V_0 + u)_i - g_i] \quad (17)$$

给出计算区四周开边界的水位值, 式中 H_1, H_2, H_4 和 g_1, g_2, g_4 分别为 $m_1 = (K_1 + O_1) / 2, M_2, M_4$ 分潮潮汐调和常数的振幅和迟角; $\omega_1 = 2\pi / (24.84 \times 3600\text{s}) = 0.7025945 \times 10^{-4} / \text{s}, \omega_2 = 2\omega_1, \omega_4 = 4\omega_1$, 分别为 m_1, M_2, M_4 分潮波的角速度; $(V_0 + u)$ 为分潮的天文相角。

2 计算实施过程

设定 $t = 0$ 时, u, v, w 和 $\zeta = 0$ 。由于本模型计算量特别大, 为减少计算量, 将二维和三维计算交替进行。在 t 方向二维计算取时间步长 $\Delta t = 3\text{s}$, 三维计算取时间步长 $\Delta T = m\Delta t$,

本计算取 $m = 6$ 。计算时由二维差分方程按 Δt 步长向前计算 m 后, 计算中将 $(m / 2) \Delta t$ 时刻的 ζ 计算值保留用于三维计算; 然后再按三维差分方程, 以 ΔT 步长进行三维计算。由此不断进行二、三维交替计算。其中二维计算采用稳定性较好的 ADI 法、三维计算采用显式格式。

3 计算结果验证

可供本计算验证的有 5 个测流站(编号为 9201, 9202, 9203, 9204, 9205)的资料, 其中 9202 和 9203 在

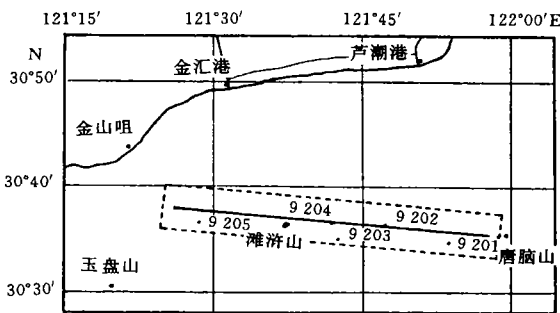


图3 计算区位置和验证测站

Fig.3 Location of computational regions and observation station for making a check

深水航道上(图 3), 这些站均有大、小潮, 垂向上有 6 层(表层, 0.2h, 0.4h, 0.6h, 0.8h, 底层)的海流观测资料。计算结果为表、中、底 3 层。将对应的表层、底层以及实测的 0.4H 和 0.6H 的平均值与计算的中间层流向、流速进行比较, 算出各平均偏差值(表 1)。从表 1 中可见, 除 9205 站外, 流向和流速平均偏差大都在 10° 和 10cm/s 之内。流速相对误差大都在 6—10% 范围。其中底层误差较大, 这是因为杭州湾底层特别在小潮期间, 常有较厚的浮泥沉积, 因而会减少实测的底层流速值。据此本数值模拟的结果是可信的。

表1 计算值和实测值的偏差[流速: cm/s, 流向: ($^\circ$)]

Tab.1 The deviation of computational and observational value [velocity:cm/s, direction:($^\circ$)]

测 站	层 次	大 潮			小 潮		
		流速平均 偏 差	流向平均 偏 差	流速平均 偏差(%)	流向平均 偏 差	流速平均 偏差(%)	流向平均 偏 差
9201	表	6.9	7.7	6.1	5.9	6.8	6.5
	中	7.0	7.7	6.1	5.3	5.4	6.0
	底	10.9	6.0	12.5	5.6	5.4	8.2
9202	表	8.1	9.6	6.5	6.2	9.5	6.9
	中	6.9	8.7	6.9	6.3	7.5	7.7
	底	9.4	8.4	10.4	12.7	8.1	21.3
9203	表	5.9	9.6	5.0	6.3	9.6	7.3
	中	5.1	8.6	4.6	6.2	7.8	7.6
	底	12.0	8.3	11.9	13.9	11.3	13.9
9204	表	7.8	7.3	6.7	6.4	7.1	7.1
	中	6.0	8.7	7.9	4.9	6.8	5.4
	底	8.6	5.1	6.3	6.2	7.0	8.8
9205	表	10.3	14.2	10.7	13.6	12.8	11.4
	中	8.5	13.9	11.7	10.7	12.0	10.9
	底	7.2	14.7	15.6	11.9	12.0	16.8

表2 9202站挖前后流速(cm/s)计算值

Tab.2 The velocity before and after deepening at station 9202

潮型	层次	挖 前				挖 后				绝对值	相对值
		涨 潮		落 潮		涨 潮		落 潮			
		最大	平均	量大	平均	最大	平均	最大	平均		
大潮	表层	171	105	208	130	172	106	209	132	2	2
	中层	165	101	176	116	163	88	140	103	-13	-12
	底层	158	85	137	99	94	58	82	66	-30	-33%
	平均	165	97	174	115	143	84	144	100	-14	-13%
小潮	表层	150	87	156	88	151	89	157	90	2	2%
	中层	145	81	136	82	134	70	105	68	-13	-16%
	底层	130	67	102	66	77	42	57	39	-26	-39%
	平均	142	78	131	79	121	67	106	66	-12	-15%

4 计算结果和结论

本数值模拟得到杭州湾航道区和航道加深前(3层)和后(6层)洪枯季,大、中、小潮期间各层流向、流速和水位值。图4中仅示出洪季航道区及深水航道加深后表、底层大潮期间涨、落急和高、低平时的流矢图。据计算结果可以看出,航道加深后总的来说,深水航道内垂线平均流速将减小,在大潮期间绝对流速将减小13.7cm/s,约比挖深前流速减小13%,但各层变化的情况不一样,航道加深后表层流速还略有增加(约2cm/s),而底层减小最大,特别在小潮期间比未挖深前底层的流速减小39%。流向加深前后变化不大,仅底层在涨、落急时,约有近10°的变化。在计算中曾做了一试验,当深水航道仅加深2m时,垂线平均流速也减小,但减小程度比加深4m时要小(表3)。

表3 9202站处挖深4m和2m逐时垂直平均流速(cm/s)流向(°)比较

Tab.3 Comparison between the 4m and 2m vertical average current and direction at station 9202
[velocity: cm/s, direction:(°)]

时间 (h:min)	大 潮						小 潮						时间 (h:min)
	挖 前		挖 4m		挖 2m		挖 前		挖 4m		挖 2m		
	流速	流向	流速	流向	流速	流向	流速	流向	流速	流向	流速	流向	
09:00	126	97	104	98	112	98	89	96	64	96	70	96	18:00
10:00	67	111	54	110	57	110	44	105	31	104	34	104	19:00
11:00	51	285	45	283	47	283	40	273	34	274	37	274	20:00
12:00	160	272	141	272	149	272	127	275	108	275	114	275	21:00
13:00	141	276	120	276	128	276	142	278	120	278	127	278	22:00
14:00	115	278	97	278	103	278	116	280	100	280	106	280	23:00
15:00	80	281	67	280	71	280	99	283	79	282	85	282	24:00
16:00	36	289	28	296	31	287	57	289	47	87	50	287	01:00
17:00	45	127	37	112	44	113	14	164	10	202	10	192	02:00
18:00	140	90	116	91	124	91	69	84	57	85	60	86	03:00
19:00	162	96	132	96	141	96	109	94	89	94	95	94	04:00
20:00	139	98	117	98	124	98	128	99	100	98	107	98	05:00
21:00	112	104	91	102	98	105	113	103	88	102	95	102	06:00
22:00	80	107	64	106	69	105	84	108	62	108	67	108	07:00
23:00	19	321	17	316	18	316	43	122	29	124	31	122	08:00
24:00	153	274	134	273	141	277	27	325	215	328	24	318	09:00
01:00	155	276	131	276	139	276	88	262	76	264	79	270	10:00
02:00	131	278	111	278	118	278	100	270	82	269	88	271	11:00
03:00	93	281	76	280	82	280	86	274	71	274	75	274	12:00
04:00	50	287	41	285	45	285	52	280	41	280	44	280	13:00
05:00	29	180	24	216	26	204	26	292	22	290	23	290	14:00
06:00	127	88	107	88	114	92	24	159	18	159	20	168	15:00
07:00	168	93	136	93	146	93	90	87	24	88	80	82	16:00
08:00	165	96	129	97	140	96	109	88	92	88	98	89	17:00
09:00	129	99	107	99	114	99	101	90	82	90	87	90	18:00

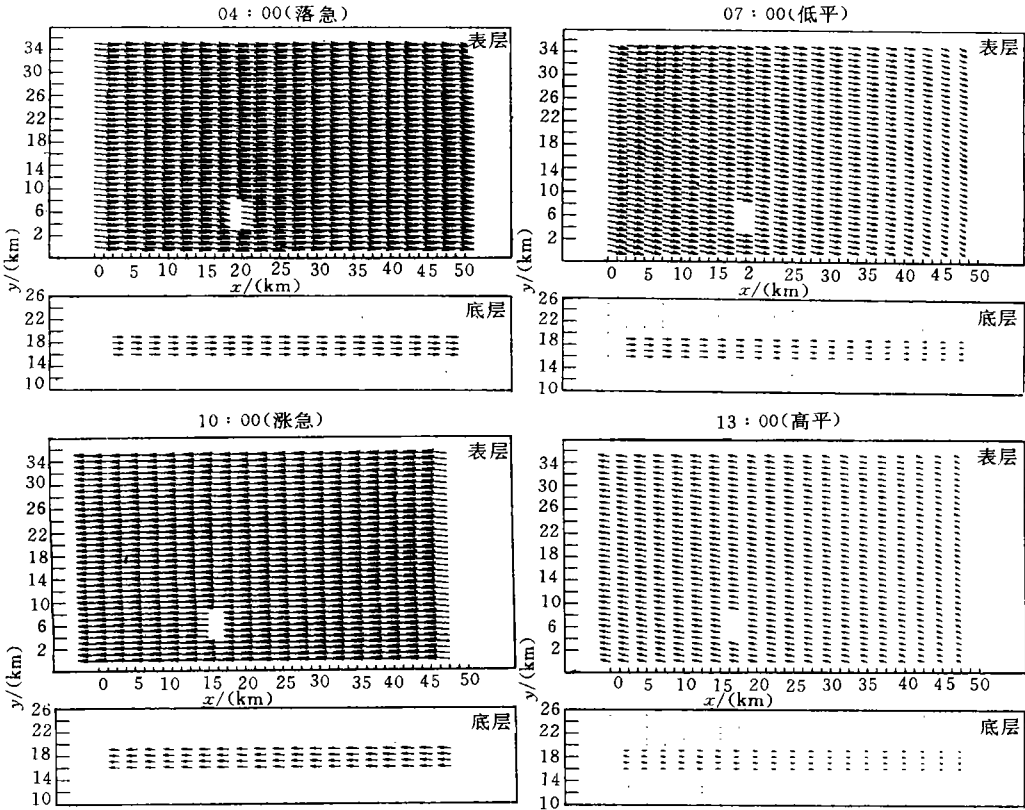


图 4 航道区挖槽后大潮涨、落急和高、低平流矢(1992-09-13)

Fig.4 Velocity vectors in flood strength, ebb strength, high tide slack water, low tide slack water for trenching regions(1992-09-13)

5 结语

当今航运继续向集装箱船大型化发展,目前常见的载重量为6—9万t,载箱量为6000—8000TEU的超巴拿马型船吃水深度增至12.0—15.0m,在军事上潜艇的升级换代等,均对航道深度的要求越来越高,深度不足的老航道需增深,开辟新航道往往需在海底开挖加深。本文按较高的标准以杭州湾开挖深水航道为例,对湾内新挖深水航道前后的流场作一数值试验。模型中计算边界全用开边界,同时采用伸展坐标,使航道在平面横向上有4个计算点,还采用二、三维隐显交替计算方法,尽可能减少计算量,得以使航道垂向上分6层计算,计算结果比较理想。但也须指出,工程中所挖深槽的边坡坡度一般比1/10更缓,而本模型所设定的边坡为直立的,这样计算所得的流速会比实际流速要小,这方面还有待将垂向坐标作转换后加以改进。

致谢 在确定文内的计算方程过程中得到中国科学院海洋研究所方国洪研究员的大力帮助,在此诚致谢意。

参 考 文 献

- 李身铎 顾斯美, 1993. 杭州湾潮波三维数值模拟. 海洋与湖沼, 24(1): 8—15
 李身铎, 1985. 杭州湾潮流湍应力和涡动粘性的估算. 海洋学报. 7(4): 412—422
 李身铎 胡 辉, 1987. 杭州湾流场的研究. 海洋与湖沼, 18(1): 28—37
 曹德明 方国洪, 1988. 杭州湾和钱塘江潮波的联合数值模型. 海洋学报, 10(5): 521—530

NUMERICAL STUDY ON THE EFFECT OF DEEPENING CHANNEL ON TIDAL CURRENTS IN THE HANGZHOU BAY

LI Shen-duo[†]

(*Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai, 200062*)

WANG Xing-heng[†], MEI Xiang-qi

(*Compute Central, East China Normal University, Shanghai, 200062*)

[†](*State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai, 200062*)

Abstract A 2,3-dimensions hydrodynamic numerical model on extended x -coordinate was used to calculate the tidal current before and after trenching in Hangzhou Bay. A piecewise reversible transformation is used in the x direction to map the variable grid into a uniform grid used in the computation. The transformation has the form $x = \Phi(x') = bx' + abx'^3$, where x' and x are uniform and variable grid respectively, a and b are $1/90$ and 38.3 for the computational regions, so that there are 4 grid points across the channel section (width 160km). In order to reduce the computational time and have good stability. Two dimension calculation alternating with 3 dimension calculation method is employed, the former being the alternating direction implicit (ADI) finite-difference method, the later being 3 dimension is the explicit method.

The velocity and direction of tidal current before and after trenching during the spring and neap tide are obtained by numerical modeling. The maximum and vertical average vertical velocity are 169.5 and 106.0cm/s (before trenching) 143.5cm/s and 92cm/s (after deepening) during the spring tide, the vertical average velocity after trenching decreases about 13%, the above corresponding velocities are 136.5cm/s and 78.5cm/s (before trenching), 113.5cm/s and 66.5cm/s (after trenching) respectively during the neap tide, the vertical average velocity in the deepened channel after trenching decreases about 15%. On the vertical direction, and the surface velocity increase about 2% and the bottom velocity decreases about 33—39% due to trenching. During neap tide, the reducing of bottom velocity is largest.

Key words Numerical modeling Tidal current Deepen channel Extended x -coordinate
 Piecewise reversible transformation Hangzhou Bay

Subject classification number P731.2