

# 海口市长流油气码头海域二维潮流数值模拟

陈小红 刘美南

(中山大学城市与资源规划系, 广州 510275)

**摘要** 采用破开算子法对建立的该区二维潮流数学模型进行解算, 研制了通用的适用于任意边界的数值方法及计算程序. 通过局部加大海底糙率来模拟桥墩对水流的影响, 以了解长流油气码头栈桥工程实施前后潮流的变化情况, 并为码头栈桥建设提供参考.

**关键词** 破开算子, 潮流模型, 码头

海南省海口市长流油气码头栈桥位于澄迈角, 向西并以偏离正北  $104^\circ$  的方向向水域延伸, 桥全长 2120m, 桥墩直径 6m, 孔距 32m. 栈桥修建后附近水域水流会有一定变化, 需要通过潮流场的计算分析, 比较工程前后水域流场的差异性 & 水与桥墩的相互影响.

栈桥所处水域属正规日潮型, 出现半日潮时日不等现象显著. 受琼州海峡制约, 潮流很特殊, 涨退潮均出现东流和西流阶段. 该水域东、西、北三面为海, 南面为陆地, 最大水深约 17m, 大部分水域海底高程大于  $-6\text{m}$  (理论深度基面), 属于近岸浅水区, 潮流运动可用垂直平均二维不恒定流方程进行描述.

首先取东水港 (边湾) 至秀英港长 21.6km, 宽 7.2km 的 (包含栈桥) 大水域进行粗网格潮流模拟, 以了解大水域总体潮流流态, 并为栈桥水域细网格计算确定边界. 根据粗网格模拟工程前后结果对比 (对栈桥的模拟采用局部加大海底糙率的方法), 并经线性内插求出工程影响水域范围在栈桥两侧 200~280m 以内, 故取栈桥细网格计算范围  $2450\text{m} \times 560\text{m}$ . 以对栈桥所处局部水域进行细网格详细计算, 并从工程前后潮流场计算和对比分析, 确定工程对水域流场的影响程度和影响范围.

## 1 数学模型

### 1.1 基本方程

表征二维不恒定流的基本方程为:

$$\frac{\partial z}{\partial T} + u \frac{\partial z}{\partial x} + v \frac{\partial z}{\partial y} + H \frac{\partial u}{\partial x} + H \frac{\partial v}{\partial y} = u \frac{\partial z_0}{\partial x} + v \frac{\partial z_0}{\partial y} \quad (1)$$

收稿日期: 1995-07-03

参加工作的还有甘雨鸣、陈俊合、江涛、杨清书, 中山大学河口所也给予了大力支持

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://>

$$\frac{\partial u}{\partial T} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} = -g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2 H} + Fv \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial T} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} = -g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2 H} - Fu \quad (3)$$

式 (1) 为连续方程, 式 (2)、(3) 为动量方程.

式中  $z$  为水位;  $z_0$  为海底高程;  $H$  为水深,  $H = z - z_0$ ;  $u$  为流速沿  $x$  方向的分量;  $v$  为流速沿  $y$  方向的分量;  $T$  为时间变量;  $g$  为重力加速度;  $F$  为柯氏系数,  $F = 2k \sin j$ ,  $k$  是地球自转角速度,  $j$  为纬度 (取  $20^\circ$ );  $C_z$  为相应于水位  $z$  时的谢才系数,  $C_z = (1/n)(z - z_0)^{1/6}$ ,  $n$  为糙率.

根据上述计算方程, 取  $x, y, z$  坐标系于理论深度基准面上, 粗网格  $x$  轴向东方向 ( $60^\circ$ ) 为正;  $y$  轴向北偏西 ( $30^\circ$ ) 方向为正,  $z$  轴向上为正. 细网格考虑到工程布置需要, 坐标系 ( $y$  轴) 与地磁正北方向向西偏差  $14^\circ$ .

## 1.2 破开算子

将连续方程和动量方程分别沿  $x$  和  $y$  方向破开成两部分, 即从式 (2) (3) 中分别取出一个对流项, 各自作为独立的分步, 而剩余部分分别与连续方程中的一部分联立求出特征型, 作为另一分步求解. 破开后的各个分步在形式上均是一维的.

设时间步长为  $\Delta T$ , 若仅将对时间的偏导数用差分形式近似, 则由 (1) 式得:

$$(z^{m+1/2} - z^n) / \Delta T + u \frac{\partial z}{\partial x} + H \frac{\partial u}{\partial x} = u \frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (4)$$

$$(z^{m+1} - z^{m+1/2}) / \Delta T + v \frac{\partial z}{\partial y} + H \frac{\partial v}{\partial y} = v \frac{\partial z_0}{\partial y} \quad (5)$$

由式 (2), (3) 得

$$(u^{m+1/2} - u^n) / \Delta T + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} = N_1 \quad (6)$$

$$(u^{m+1} - u^{m+1/2}) / \Delta T + v \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$(v^{m+1/2} - v^n) / \Delta T + u \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$(v^{m+1} - v^{m+1/2}) / \Delta T + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} = N_2 \quad (9)$$

式中

$$N_1 = -g \left\{ u \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2 H} \right\} + Fv$$

$$N_2 = -g \left\{ v \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2 H} \right\} - Fu$$

## 2 数值处理

### 2.1 数值离散

2.1.1 内点计算 本方法适用于缓流情况, 总有  $|u| < a$  或  $|v| < a$  ( $a = \sqrt{gH}$ ).

分别联立式 (4), (6) 及式 (5), (9) 得沿  $x$  和  $y$  方向的一维圣维南方程形式, 导出相应的特征关系, 并写成偏心差分格式, 可求得计算域内各点的算式:

$$u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^{n+1/2} - \frac{\Delta T}{2\Delta x} \left[ v_{i,j}^{n+1} (u_{i,j}^{n+1/2} - u_{i,j-1}^{n+1/2} - |v_{i,j}^{n+1}| (u_{i,j}^{n+1/2} - 2u_{i,j}^{n+1/2} + u_{i,j-1}^{n+1/2})) \right] \quad (10)$$

$$v_{i,j}^{n+1} = v_{i,j}^{n+1/2} + \frac{\Delta T}{2\Delta y} \left[ 2\Delta y N_{2,j}^{n+1/2} - g z_1^{n+1/2} + (g/a_{i,j}^{n+1/2}) v_{i,j}^{n+1/2} z_2^{n+1/2} - v_{i,j}^{n+1/2} v_1^{n+1/2} + a_{i,j}^{n+1/2} v_2^{n+1/2} \right] \quad (11)$$

$$z_{i,j}^{n+1} = z_{i,j}^{n+1/2} + \frac{\Delta T}{2\Delta y} \left\{ v_{i,j}^{n+1/2} z_{01} - |v_{i,j}^{n+1/2}| z_{02} - v_{i,j}^{n+1/2} z_1^{n+1/2} + a_{i,j}^{n+1/2} z_2^{n+1/2} - [a_{i,j}^{n+1/2} v_1^{n+1/2} - v_{i,j}^{n+1/2} v_2^{n+1/2}] (a_{i,j}^{n+1/2} / g) \right\} \quad (12)$$

其中

$$z_1^{n+1/2} = z_{i,j+1}^{n+1/2} - z_{i,j-1}^{n+1/2}, \quad z_2^{n+1/2} = z_{i,j+1}^{n+1/2} - 2z_{i,j}^{n+1/2} + z_{i,j-1}^{n+1/2}$$

$$z_{01} = z_{0i,j+1} - z_{0i,j-1}, \quad z_{02} = z_{0i,j+1} - 2z_{0i,j} + z_{0i,j-1}$$

$$v_1^{n+1/2} = v_{i,j+1}^{n+1/2} - v_{i,j-1}^{n+1/2}, \quad v_2^{n+1/2} = v_{i,j+1}^{n+1/2} - 2v_{i,j}^{n+1/2} + v_{i,j-1}^{n+1/2}$$

2.1.2 岸边界点计算 岸边界点计算公式的推导基于两点.①认为垂直于岸边界的法向流速分量为零.②根据各自的特征方向,对特征关系进行差分离散.这样岸边界只需计算一个方向的流速,可类似内点进行推求.

2.1.3 水边界点计算 适用于在水边界处给定水位过程线的情况,所以只需在水边界处求解  $u, v$  值.在水边界处,对基本方程作线性化处理,即计算时不考虑动量方程中的对流项,使方程简化为

$$\begin{cases} q_u / \partial T + g \partial z / \partial x = N_1 & (13) \\ q_v / \partial T + g \partial z / \partial y = N_2 & (14) \end{cases}$$

针对不同边界,可直接由式 (13)、(14) 进行显式差分计算,得到  $u, v$  值.

计算软件中为加强通用性,共考虑 20 种角点和 8 种边界.为了提高解的稳定性,每当求出全部  $u_{i,j}^{n+1}, v_{i,j}^{n+1}$  和  $z_{i,j}^{n+1}$  后,均对它们作光滑处理.可以证明,光滑作用相当于在本基本方程中附加上高阶的“人为虚粘项”.

### 2.2 稳定条件

本项目计算网格为矩形,定边界,全部显式求解,在选取网格距  $\Delta x, \Delta y$  及计算时段  $\Delta T$  的数值时,通常应满足柯朗条件.即  $\Delta x, \Delta y$  在选定情况下,  $\Delta T$  取值应满足下式要求.

$$\Delta T \leq \frac{\min\{\Delta x, \Delta y\}}{|gH \pm \frac{u^2 + v^2}{2}|_{\max}} \quad (15)$$

## 3 模型调试与参数选定

### 3.1 桥墩的处理

栈桥工程前后潮流的变化主要是桥墩对潮流的影响所致.由于桥墩的几何尺寸远小于整个码头水域(桥墩直径 6m),按常规方法对计算网格尺寸取为 6m(一个桥墩占据一个网格),计算机内存和速度都难以承受.为了满足计算要求,这里将桥墩概化为结点,并使之位于计算网格点上,则两桥墩结点间距 38m(桥墩中心间距).为比较两桥墩之间工程前后的潮流流态,两桥墩结点间还应有一个计算网格点,因此取  $\Delta x = 19m$ .

桥墩在水中既具有某些岸的特性(如垂直于壁面方向的流速分量为零)同时又具有分流的作用.桥墩概化为结点后,需对桥墩对水流的作用进行处理.目前已有一些研究

者提出了这类问题的处理办法，如用桩基透水系数来考虑码头群桩对水流的影响，或采用加大桥墩位置的海底糙率来模拟桥墩对水流的影响等。由于本工程栈桥桥墩较为单一，且桥墩较小，间距较大，桥墩对潮流的影响主要与桥墩形状，桥墩位于水下的体积，迎水面积、长度等有关。因此，这里参考南京水科院戴贤凯<sup>[1]</sup>等人在杭州湾北仑港区潮流计算中的研究成果，采用加大桥墩处海底糙率的方法进行处理。桥墩结点处糙率  $n_s$  计算公式为：

$$n_s = \left[ \frac{0.05 \times Cd \times T/F \times H^{0.4}}{l - W/F \times H} + n \right] \% \tag{16}$$

$$Cd = 0.855 \times C_s \times m \times l/H$$

式中， $T$ 为单墩迎水面面积； $H$ 为平均水深； $n$ 为天然情况海底糙率； $m$ 为经验系数（取 0.9）； $W$ 为单墩水下部分体积； $F$ 为单个计算网格面积； $C_s$ 为形状系数（取 1.0）； $l$ 为桩基长度。

### 3.2 模型验证及参数选择

采用中大河口所实测资料，分别对大、小水域实测点计算流速流向进行验证，结果表明，实测值与计算值无论趋势、位相，还是变化幅度均完全一致，且模拟误差较小，全过程亦拟合较好，说明模型有较好的精度和足够的代表性，可用来复演本区的潮流运动和考察工程实施对本区水流运动的影响。小网格验证结果如图 1 图 2。

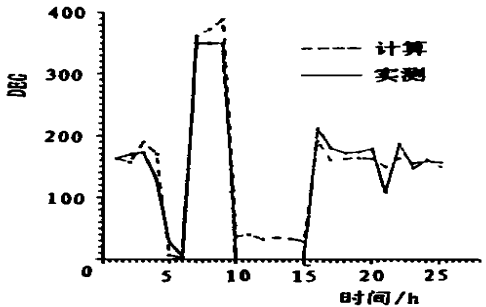
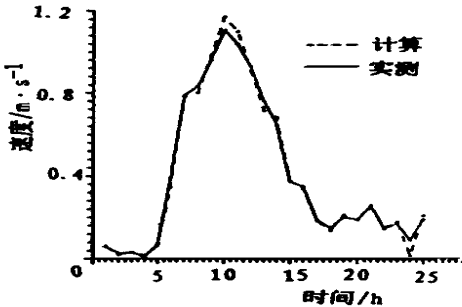


图 1 小水域 [92, 9] 号点流速验证图

图 2 小水域 [92, 9] 号点流向验证图

Fig. 1 Current velocity verification for the point No. (92, 9) of the small water field

Fig. 2 Current direction verification for the point No. (92, 9) of the small water field

模型经调试后采用计算参数如下：

$\Delta_x$ : 大网格取 1200m, 小网格取 19m;  $\Delta_y$ : 大网格取 600m, 小网格取 40m;  $\Delta T$ : 大网格取 16s, 小网格取 2s;  $n$ : 当  $H \leq 2.0m$ , 取 0.05, 当  $H > 2.0m$ , 取  $(0.05 \sim 0.5) / H$ ,  $H$  按实时计算值;  $k$ : 取  $7.27 \times 10^{-5} 1/s$ ;  $i$ : 取 0.3491;  $n_s$ : 按式 (16) 计算, 其结果为天然糙率的 6~10 倍。光滑系数取为 0.6。

## 4 模拟结果及分析

为了解长流油气码头水域潮流自然状态及栈桥工程实施后潮流的变化情况，分别模拟计算了大水域自然状态大潮和小水域工程前后大、小潮潮流流场。

从大水域（流场图见①）模拟计算过程可以看出，本水域潮流流路顺畅，流向受水

下地形影响明显, 水流运动较为复杂, 但基本上涨潮初期为西向流, 中潮位以上才转为东流, 且涨潮东流大于涨潮西流; 落潮则相反, 且落潮西流大于落潮东流. 流速分布是北部水域大, 南部近岸区小, 并呈由北向南递减趋势. 澄迈角由南向北插入水中, 对近岸区水流流态影响明显, 使本水域产生了明显的东部流速大于西部的现象, 且上述现象与本区水深及水下地形变化及等深线走向基本一致.

由小水域模拟结果可以看出小水域流场与大水域流场具有相似性, 即涨潮基本为东向流, 退潮为西向流, 且涨潮流变幅要大于退潮流. 流速分布除自外向岸递减外, 东西向差异不大 (详见表 1), 这一点与水域水深变化不大 (海底高程均大于  $-6\text{m}$ ) 相一致. 1994 年 6 月本水域相距  $1750\text{m}$  的两个实测点 [92, 9] 号与 [2, 8] 号 (点号位置见表 1 注, 详见报告① 计算网格图) 的同步观测结果也证实了上述情况存在. 此外, 澄迈角在大潮涨急 (东流) (如图 3a), 退急 (西流) (见报告①) 情况下对近岸水流的影响明显; 即在流场图上, 该点以西短时间内存在一明显的环流.

表 1 工程前后代表点大潮水流特征值比较表

Tab. 1 Comparison of current characteristics during spring tide before and after the engineering for representative points

时间	工程 前后	流速 ( $\text{m/s}$ )					潮位 ( $\text{m}$ )				
		(92, 9) <sup>#</sup>	(80, 8) <sup>#</sup>	(25, 10) <sup>#</sup>	(2, 8) <sup>#</sup>	(45, 1) <sup>#</sup>	(92, 9) <sup>#</sup>	(80, 8) <sup>#</sup>	(25, 10) <sup>#</sup>	(2, 8) <sup>#</sup>	(45, 1) <sup>#</sup>
26日 13时	前	0.021	0.025	0.024	0.025	0.023	1.890	1.89	1.890	1.89	1.890
	后	0.020	0.026	0.025	0.025	0.023	1.890	1.89	1.890	1.890	1.89
14时	前	0.031	0.045	0.091	0.114	0.060	1.988	1.986	1.987	1.988	1.988
	后	0.028	0.046	0.092	0.114	0.060	1.987	1.987	1.988	1.987	1.988
17时	前	0.345	0.395	0.476	0.542	0.429	2.090	2.080	2.080	2.080	2.090
	后	0.337	0.399	0.478	0.542	0.429	2.090	2.090	2.090	2.080	2.090
20时	前	0.984	1.281	1.685	1.865	1.831	2.480	2.420	2.416	2.390	2.400
	后	0.970	1.290	1.692	1.865	1.831	2.470	2.420	2.420	2.390	2.400
21时	前	1.180	1.406	1.912	1.904	1.873	2.637	2.609	2.618	2.600	2.590
	后	1.159	1.415	1.922	1.904	1.873	2.627	2.611	2.624	2.600	2.590
22时	前	1.105	1.371	1.910	1.901	1.862	2.630	2.600	2.610	2.58	2.570
	后	1.094	1.382	1.921	1.901	1.862	2.620	2.605	2.613	2.580	2.570
27日 4时	前	0.209	0.245	0.319	0.377	0.334	0.440	0.440	0.440	2.445	0.441
	后	0.200	0.248	0.321	0.377	0.334	0.438	0.442	0.442	2.445	0.441
5时	前	0.190	0.176	0.420	0.525	0.285	0.429	0.426	0.435	0.435	0.430
	后	0.186	0.176	0.428	0.525	0.285	0.428	0.427	0.437	0.435	0.430
6时	前	0.250	0.276	0.517	0.592	0.480	0.481	0.480	0.502	0.495	0.484
	后	0.240	0.280	0.522	0.592	0.480	0.478	0.482	0.504	0.495	0.484

注: 1) (80, 8)<sup>#</sup> 及 (25, 10)<sup>#</sup> 为桥墩之间点; (45, 1)<sup>#</sup> 为外边界点, (2, 8)<sup>#</sup> 为码头前沿点;  
(92, 9)<sup>#</sup> 代表桥侧面浅水区

2) 选自 1994 年 6 月观测资料

① 中山大学河口所, 水资源与环境所科研报告. 海口市长流油气码头海域二维潮流数值模拟与分析, 1994, 8

图 3b 为小水域栈桥工程实施后大潮涨急 (东流) 流场图。对照工程前图 3a 的自然流场, 可见工程实施对水域流场无大影响。

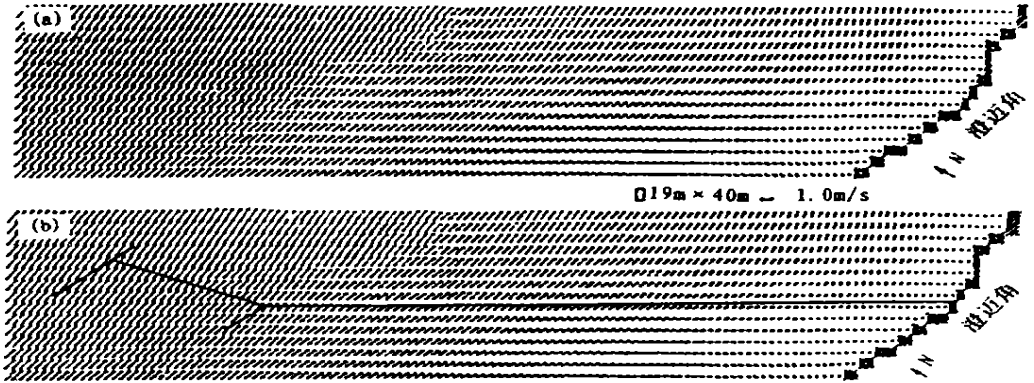


图 3 小水域大潮工程前 (a) 后 (b) 涨急流场

Fig. 3 The analog current field during spring tide (rising torrent) of the small water region before and after the engineering

从表 1 可看出, 工程实施后, 近边界或边界处的 ([2, 8] 号和 [45, 1] 号) 流速和潮位均无变化, 说明影响不超出此计算范围, 选取的计算域是合理的。

从位于两桥墩间的结点 ([80, 8] 号和 [25, 10] 号) 所列的值看, 工程后流速较工程前普遍有所增加, 增加幅度大潮为  $0.001 \sim 0.011 \text{ m/s}$ ; 小潮为  $0.001 \sim 0.010 \text{ m/s}$ , 且变幅最大出现时刻主要是高潮位以前的转流时刻, 从两结点潮水位变化来看, 工程后两桥墩间潮位略有增高, 但也仅几个毫米, 这主要与桥墩较小, 间隔宽松, 流向顺直, 产生的束水作用小有关。

紧邻栈桥东侧的 [92, 9] 号点, 离岸约 600m, 属近岸浅水区。建桥后流向基本稳定, 但流速、潮位较工程前略有减少和降低。流速减少值大潮在  $0.001 \sim 0.021 \text{ m/s}$ , 小潮最大为  $0.012 \text{ m/s}$ , 潮水位降低约  $0.001 \sim 0.017 \text{ m}$ , 最大变差出现在最大值时刻, 且正是本海区转流时刻, 水流特征值变小主要是受桥墩的影响。

从总的情况看, 建桥后对流速造成的影响也仅限于栈桥两侧, 且这种影响程度随栈桥向两侧距离增大而递减, 并在 200~240m 处其影响已不再存在。

## 5 结 论

(1) 模拟采用破开算子方法, 并经过大、小网格的调试和检验来选取参数, 具备模拟范围广 ( $21600 \text{ m} \times 7200 \text{ m}$ ) 模拟单元区域小 (细网格  $19 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ ) 的特点。模型中边界和角点处理考虑了实际存在的各种组合, 具有通用性。

(2) 模拟结果表明: 本海域潮流畅顺, 流向受水下地形影响明显, 水流运动较为复杂, 但基本上涨潮初期为西向流, 中潮位以上转为东流; 落潮则相反。潮流的变化过程与水位变化不相对应, 表现为具有变态驻波的特点。

(3) 本区潮流流速的变化有北部水域大于南部, 并呈由北向南快速递减趋势。

(4) 澄迈角对近岸一侧水域水流作用明显, 在大潮涨急 (东流)、退急 (西流) 情况下, 其以西近岸水域产生一明显环流.

(5) 本文采用局部加大海底糙率的方法来模拟桥墩的影响, 既简化了计算, 又有效可行.

(6) 从模拟的总体结果来看, 栈桥工程实施对海域潮流运动有一定的影响, 但其影响值是很小的, 不会对本区水流运动产生大碍.

### 参 考 文 献

- 1 戴贤凯, 田海勇, 刘家驹. 北仑港区潮流数值计算和冲淤分析. 海洋工程, 1987 (4): 51- 62
- 2 于克俊, 张法高. 渤海潮波运动的三维数值计算. 海洋学报, 1986 (3): 227
- 3 朱良生. 近岸二维海流数值计算方法若干问题的研究和应用. 热带海洋, 1995 (1): 30- 37

## Two Dimension Numerical Modelling and Analysing of the Tidal Current for ChangLiu Oil and Gas Dock of Haikou City

*Chen Xiaohong*<sup>\*</sup> *Liu Meinan*

**Abstract** In order to understand the variations of tidal current caused by the construction of the trestle in ChanLiu Oil and Gas Dock of Haikou city, a two dimensional current mathematical model is set up and the spilt operators method is adopted in solving the model. The numerical algorithm and the compute procedure developed in this paper, in which 20 different corner points and 8 different borders are included, are generally applicable. The effect of the trestle piers on the current is simulated by increasing the sea bed roughness in the pier site. The simulated and calculated results are satisfactory, and provide references for the construction of the dock.

**Keywords** spilt operators, tidal current model, dock

<sup>\*</sup> Department of City and Resource, Zhongshan University, Guangzhou 510275