

黄茅海潮流场计算分析

Calculation and Analysis of Tidal Current of Huangmao Sea

陶爱峰/TAO Ai-feng,邵宇阳/SHAO Yu-yang,李瑞杰/LI Rui-jie

河海大学海洋学院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,南京 210098

State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Ocean College, Hohai University, Nanjing 210098, China

[摘要] 采用海岸工程水动力学数学模型,用水平方向上的曲线正交坐标与垂直方向上的 Sigma 坐标相结合的方法,对黄茅海海域潮流场进行了计算;计算结果与实测结果比较表明:模型能较好地复演黄茅海潮流场,可以用于工程实际中的沿岸及河口湾潮流场问题的计算。

[关键词] 潮流;海岸工程水动力学数学模型;黄茅海

[中图分类号] P753

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)06-0042-03

Abstract: Combining with the topography of Huangmao Sea, the Model of Coastal and Ocean Engineering is used in tidal current for Huangmao Sea in this paper. The method of combining curvilinear orthogonal coordinates in the horizontal direction with Sigma mapping coordinates in the vertical direction is used. The comparison between the model results and field data indicates that this model is satisfied to simulate the tidal current field of Huangmao Sea and it can be applied to calculate the tidal current of estuaries or coastal ocean.

Key Words: tidal current;model of coastal and ocean engineering;Huangmao Sea

CLC Number: P753

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)06-0042-03

1 引言

黄茅海位于珠江口西部,在东经 113°00′~113°12′,北纬 21°52′~22°13′之间,是崖门及虎跳门外一个走向为 NNW-SSE 的河口湾,湾顶通过崖门、虎跳门分别与银洲湖和虎跳门水道相通,湾口由一系列岛屿形成屏障,通过岛屿间的峡口与南海相连,海域面积达 500 km²(以上平面图见图 1)。黄茅海属于潮流作用优势型河口,其演变过程主要由潮流动力控制,而且径流量小、纳潮量大。黄茅海的地貌形态有以下几个鲜明的特点:① 河口湾呈喇叭状,水深自外向内逐渐变小;② 拦门沙体嵌入在湾内或湾顶,形成拦门沙坎;③ 湾内两侧发育着范围广阔的潮成边滩。另外,黄茅海也是一个弱潮河口,虽然潮差不大,但因纳潮量大,潮流动力仍具主控地位。崖门径流主要来自潭江,部分为西江来水。太平洋波浪经巴士海峡进南海传入黄茅海。由于黄茅海湾岸缘、地形以及上游径流影响,使潮波在空间及时间上均发生变化。

黄茅海的潮流运动形式主要为南北向的往复流,但在湾腰以南的拦门沙浅水区,水流分散并形成东、西 2 条主流带。落潮流速由湾顶向湾口递减,汛期尤为明显;涨潮流速由湾口向湾顶递增,枯季更加突出。大潮流速强于小潮流速,表层流速大于底层流速,落潮历时长于涨潮历时。

本文用海岸工程水动力学数学模型(Model of Coastal and Ocean Engineering, MOCO E)对黄茅海潮流场进行计算,建立了一个针对黄茅海的水流数学模型。计算中采用水平方向上的曲线正交坐标与垂直方向上的 s 坐标相结合,以及三维数学模型二维化的方法。

2 方法

MOCO E 是河海大学海洋环境实验室和河海大学物理海洋研究所环境海洋水动力学模型的基础上增加了多个计算模块而

研制的,是一个多任务、高集成的大型海岸工程水动力学模块式计算程序,主要用于模拟水系统三维流场、物质输运(包括非黏性泥沙和黏性泥沙的输运)、生态过程及淡水入流。模型可以模拟河口、湖泊、水库、湿地以及自近岸到陆架的海域,并且可以同时考虑风、浪、潮、径流的影响,同步布设水工建筑物。采用该模型对黄茅海潮流场进行计算,主要控制方程描述如下。

水动力学方程组是基于水平方向上的曲线正交坐标^[1]和垂直方向上的 Sigma 坐标变换^[2]所得到的流体动力学方程组^[2,4-6]:

$$\partial_t(mHu) + \partial_s(muu) + \partial_y(mHvu) + \partial_z(mwu) - (mf - v\partial_s m_y - u\partial_s m_x)Hv = -m_y H \partial_s (g\zeta + p) - m_y (\partial_s h - z\partial_s H) \partial_s p + \partial_s (mH^{-1}A_s \partial_s u) + Q_u \quad (1)$$

$$\partial_t(mHv) + \partial_s(muw) + \partial_y(mHvv) + \partial_z(mwv) - (mf - v\partial_s m_y - u\partial_s m_x)Hu = -m_x H \partial_s (g\zeta + p) - m_x (\partial_s h - z\partial_s H) \partial_s p + \partial_s (mH^{-1}A_s \partial_s v) + Q_v \quad (2)$$

$$\partial_s p = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} = -gHb \quad (3)$$

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_s(m_y Hu) + \partial_y(m_x Hv) + \partial_z(mw) = 0 \quad (4)$$

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_s(m_y \int_0^1 u dz) + \partial_y(m_x \int_0^1 v dz) = 0 \quad (5)$$

以上方程中, u 和 v 为曲线正交坐标 x 和 y 方向上的水平速度分量; m_x 、 m_y 和 m 为坐标变换因子 $m=m_x m_y$; ζ 为水位; $b=(\rho-\rho_0)/\rho_0$ 为水密度变化, ρ 为密度,一般为温度和盐度等的函数, ρ_0 为淡水密度。

经坐标变换后垂直方向 z 方向的速度 w 与坐标变换前的垂直速度 w^* 间的关系为:

$$w = w^* - z(\partial_s \zeta + um^{-1} \partial_s \zeta + vm^{-1} \partial_s \zeta) + (1-z)(um^{-1} \partial_s h + vm^{-1} \partial_s h) \quad (6)$$

$H=h+\zeta$ 为总水深; p 为压力;动量方程(1)和(2)中 f 为 Coriolis 系数, A_s 为垂直紊动系数; Q_u 和 Q_v 为动量源汇项;连续方程(4)是在区间 $(0,1)$ 对 z 积分并用垂直边界条件,当 $z=(0,1)$ 、 $w=0$ 时得到的。由运动边界条件和方程(6)可以得到深度积分的连续方程

收稿日期:2005-08-20

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50339010),国家自然科学基金面上项目(40476039)

作者简介:陶爱峰,男,南京市西康路 1 号河海大学海洋学院,博士生,主要研究方向为水波动力学;E-mail: taoaf@hhu.edu.cn

(5)。

给出垂向紊动和扩散系数,方程组(1)~(5)则给出了一个求解变量 u, v, w, p 和 ζ 的封闭的系统。

紊动和扩散系数采用的是 Mellor 和 Yamada 模型^[5],模型相关的参数由下式确定:

$$A_v = \phi_v q l = 0.4(1 + 36R_q)^{-1}(1 + 6R_q)^{-1}(1 + 8R_q) q l \quad (7)$$

$$A_b = \phi_b q l = 0.5(1 + 6R_q)^{-1} q l \quad (8)$$

$$R_q = \frac{g H \partial b}{q^2} \frac{l^2}{H^2} \quad (9)$$

式(7)~(9)中 q 为紊动强度, l 为紊动长度, R_q 为 Richardson 数, ϕ_v 和 ϕ_b 是稳定函数,以分别确定稳定和非稳定垂向密度分层环境的垂直混合或输运的增减。

紊动强度和混合长度由下列方程确定:

$$\partial_z(m H q^2) + \partial_x(m_s H v q^2) + \partial_y(m_s H w q^2) + \partial_z(m w q^2) = \partial_z(m H^{-1} A_v \partial_z q^2) + Q_q + 2m H^{-1} A_v ((\partial_x u)^2 + (\partial_y v)^2) + 2m g A_b \partial b - 2m H (B_1 l)^{-1} q^3 \quad (10)$$

$$\partial_z(m H q^2 l) + \partial_x(m_s H v q^2 l) + \partial_y(m_s H w q^2 l) + \partial_z(m w q^2 l) = \partial_z(m H^{-1} A_v \partial_z q^2 l) + Q_q + m H^{-1} E_1 l A_v ((\partial_x u)^2 + (\partial_y v)^2) + m g E_3 l A_b \partial b - m H B_1^{-1} q^3 (1 + E_2 (k L)^{-2} l^2) \quad (11)$$

$$L^{-1} = H^{-1} (z^{-1} + (1-z)^{-1}) \quad (12)$$

这里 B_1, E_1, E_2 和 E_3 均为经验常数, Q_q 和 Q_l 为附加的源汇项,例如子网格水平扩散。垂直耗散系数 A_v 一般取与垂直湍动粘性系数 A_v 相等。

式(1)~(5)和 Mellor 和 Yamada(1982)紊动模型(7)~(12)^[6]一起及适当的初边值条件给出了一个求解变量 u, v, w, p, ζ 和 ρ 的封闭的系统。动力学方程采用有限体积法和有限差分结合的方法来求

解,水平方向采用交错网格离散。数值解分为沿水深积分长波重力波的外模式和与垂直流结构相联系的内模式求解^[4]。

文中采用三维数学模型二维化的方法将三维环境流体动力学数学模型转化成二维数学模型,也即将三维数学模型进行垂向积分或直接采用外模式而不考虑内模式的方法求解,文中直接采用第二种方法进行二维化。

3 计算结果

根据所研究的实际问题的需要选取计算域,如图1所示。模型西边界取在东经 112°55'处,东边界至东经 113°15'30"处,南边界至 30 m 等深线附近,北面包括崖门和虎跳门。计算域的西边界、东边界、南边界和北边界部分为开边界,网格剖分如图2所示。开边界用水位控制,均统一到理论深度基准面,潮流边界采用动边界处理。初始条件采用流速和水位为零的条件。整个计算域采用正交曲线坐标系进行离散,网格节点数为 200×300=60 000 个,计算网格单元数为 30 552 个。最小网格步长 32.5 m,最大网格步长 687 m,计算域包括荷包岛、大襟岛、大 岛等大小岛屿 12 个。

验证资料^[1]采用 2003 年 4 月 18 日 18:00 至 19 日 22:00 大潮实测的流速、流向和水位值进行验证。潮位验证水文测站为虎山和荷包岛;潮流验证水文测站为 #1、#2、#3 和 #4。这 4 个测站的坐标分别为: (715 649.049, 458 713.892)、(715 316.825, 439 173.323)、(714 076.840, 423 144.058) 和 (725 957.952, 424 251.053)。图3、图4给出了虎山和荷包岛大潮潮位验证结果,图5~图8给出测站 #1、#2、#3 和 #4 的潮流验证结果,图中正

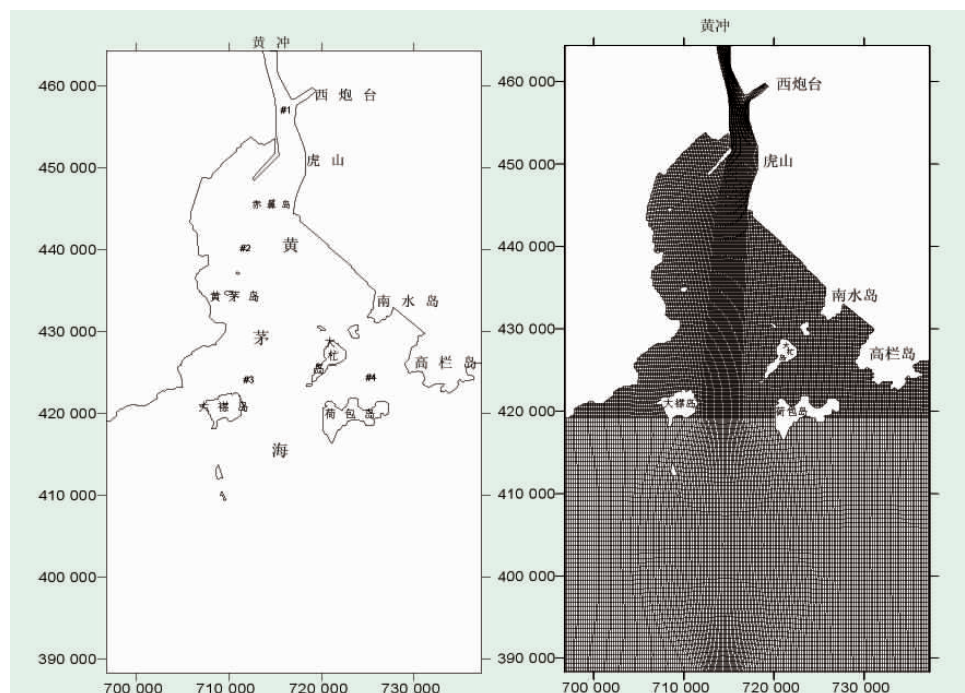


图1 黄茅海平面图
Fig. 1 Sketch of Huangmao Sea

图2 黄茅海计算网格图
Fig. 2 Computing grids of Huangmao Sea

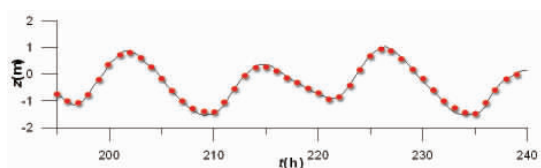


图3 荷包岛验潮站潮位验证(珠江基面)
Fig. 3 Surface elevation at Hebao

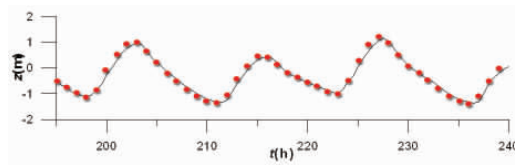


图4 虎山验潮站潮位验证(珠江基面)
Fig. 4 Surface elevation at Hushan

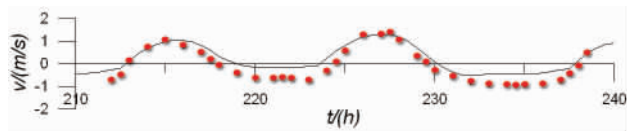


图 5 #1 测站流速验证
Fig. 5 Tidal current at #1

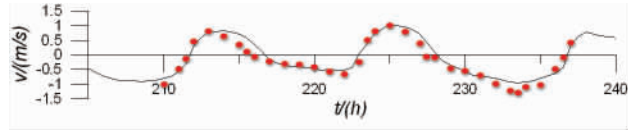


图 6 #2 测站流速验证
Fig. 6 Tidal current at #2

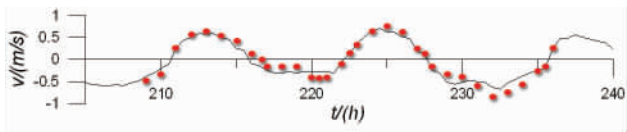


图 7 #3 测站流速验证
Fig. 7 Tidal current at #3

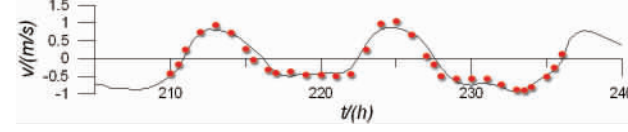


图 8 #4 测站流速验证
Fig. 8 Tidal current at #4

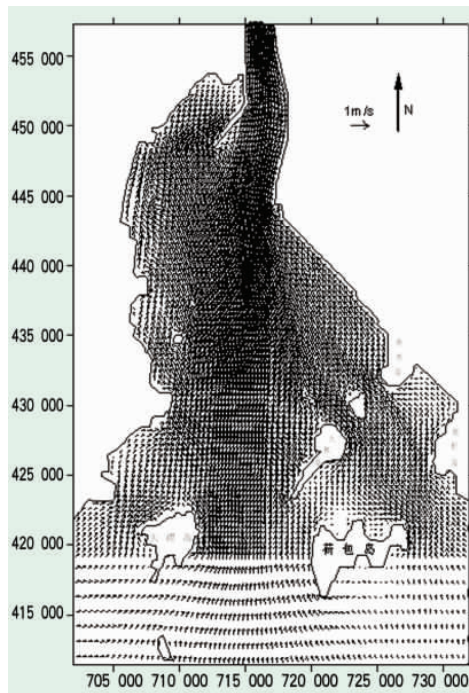


图 9 大潮涨急流场图
Fig. 9 Flood current of spring tid

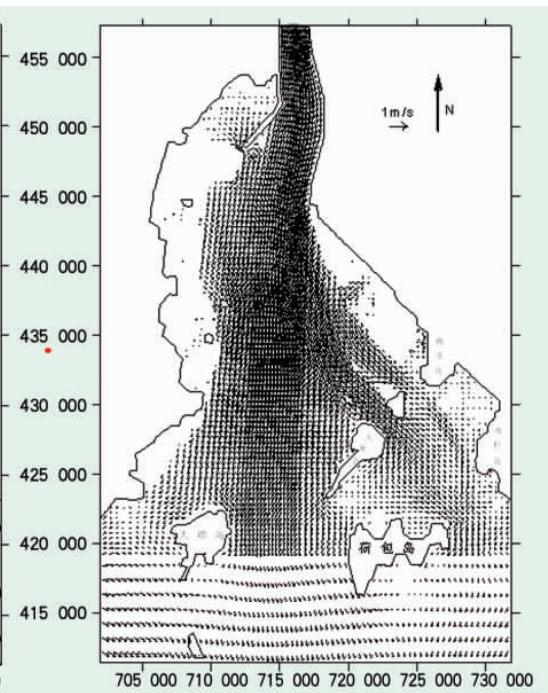


图 10 大潮落急流场图
Fig. 10 Ebb current of spring tide

负代表潮流的方向,并规定正向为水道出流方向,负向为水道入流方向。各图中点为实测值、线为计算值。图 9、图 10 给出了大潮计算的 2 个特征时刻的局部流场分布图,为清晰起见,图中流速隔网格绘制。从验证结果图 3~图 8 可以看出:无论潮位还是潮流的流速和流向都与实测结果相当吻合。从图 9、图 10 可以看出,由于受地形和径流的影响,进入黄茅海的潮波发生变形,涨潮历时缩短,落潮历时延长,其潮差变化也呈由湾口至湾腰渐增,再由湾腰向湾顶递减的空间分布趋势。潮汐东进西出,并且明显可见 3 个出口中的东口,即高栏岛和荷包岛之间的峡口及其纵深,都是以潮汐动力为主的潮汐动力控制区,这些都与遥感图像一致。

4 结论

1) 通过采用海岸工程水动力学数学模型对黄茅海潮流场进行计算,计算结果与实测结果验证表明:文中模型能够较好地重演黄茅海潮流场,可以成功地用于模拟复杂地形的工程实际中潮流场问题。

2) 文中仅给出了潮流场的模拟结果,对于模型在其他方面的应用有待进一步的探讨和实践。

参考文献(References)

- [1] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem [J]. Rev Geophys Space Phys,1982(20): 851-875.
- [2] 于风香,李瑞杰.日照港煤码头浚深工程回淤分析[J].海洋湖沼通报,2004(1): 1-7.
- [3] 上海航道勘察设计院.崖门 5 000 吨级出海航道整治工程水文测验技术报告[R].南京,2003.
- [4] 李瑞杰,严以新,宋志尧.太平水道悬移质输运数学模型 [J].泥沙研究,2003(4): 46-51.
- [5] 李瑞杰,诸裕良,郑金海.虎门太平水道航道整治工程潮流数模计算 [J].水运工程,2003(3): 38-42.
- [6] 于风香,宋志尧,李瑞杰.长江口三维潮流数值计算及动力分析[J].海洋湖沼通报,2003(3): 14-23.
- [7] RYSKIN G.L EAL LG. Orthogonal mapping[J]. J Comp Phys,1983 (50): 71-100.

(责任编辑 王 芷)