

文章编号:1007-4708(2009)03-0428-05

采用交替分层法的河口海岸 三维 z 坐标水流模式

包 芸

(中山大学 力学系, 广州 510275)

摘 要:利用河口三维水流数值模式平面变量空间配置的交替网格方法,设计并发展了速度与水位的交替分层法,成功地解决了垂向等平面 z 坐标模式将实际海底变为台阶状的问题。在 ccost-2d 水动力模式的基础上,发展了采用垂向 z 坐标模式而又能保证实际海底底边界模拟的三维水动力数值模式 ccost-3d。以珠江西四口门网河和海区的整体计算模拟为算例,求解得到三维流场,水平表层速度分布和口门河道纵向剖面速度分布计算合理。

关键词:交替分层法;三维模式;垂向 z 坐标;珠江河口;ccost-3d

中图分类号:TV131

文献标识码:A

1 引 言

河口、近岸海域三维斜压水流数值模式是目前全世界在该领域研究的一个热点问题。由于河口地区的水体流动极其复杂,主要表现为水流的非恒定性、非均匀性、斜压性以及水体的三维特征。它们的成因机制和运动尺度各异,使得河口地区的水动力特征区域可变性和随机性强烈。因此,对河口和近岸海域三维水动力特征的深入了解以及研究十分重要。

河口、近岸海域三维水流模式的垂向坐标模式一直是三维斜压水流数值模式中重点讨论的问题之一^[1-3]。目前,三维水动力模式中主要采用的两种垂向坐标有等平面(z)坐标^[4]和地形拟合(σ)坐标^[5],两种坐标各有优势,但不具通用性。对于河口与近岸海域,海底地形变化剧烈,且密度结层效应明显, σ 坐标系引入较大计算误差,已引起人们的关注^[6,7]。许多人为了克服 σ 坐标的种种缺点,正在研究组合的 σ 坐标系^[8]以及 σ - z 混合坐标模式^[9]。混合坐标模式在局部深水区域是合适的,但在河口、近岸海域,水深较浅且滩槽相间,径流与海水混合都造成这一特定海域水体的垂向结构非常

复杂,混合坐标模式仍不方便^[10]。 z 坐标模式在河口地区的计算中有许多优势,同时 z 坐标中原始偏微分方程组在形式上要比在 σ 坐标中经变换后的方程组要简单得多,因此可以换个思路去讨论三维斜压水流数值模式的垂向模式底边界拟合问题,而不是发展更为复杂的 σ 坐标模式。

河口三维斜压水流数值模式在计算上采用的是交替网格方法,即速度和水位分别放在网格的边界点和中心点上。利用这点本文设计并发展了交替分层法,成功地解决了等平面 z 坐标模式将实际海底变为台阶状的问题,在 z 坐标模式下以海底的台阶为实际的斜面形状;并已完成了河口三维正压水流数值模式的编写工作,得到合理的计算结果。

2 等平面(z) 坐标和地形拟合(σ) 坐标的各自优势

等平面 z 坐标模式在垂向分层上按同一水平面布置,如图 1(a) 所示。它具有很多优点: z 坐标模式方程简单,利于数值离散;由于海水运动具有准水平的特点, z 坐标符合海水运动规律;水平压力梯度很容易求得,并不会引入截断误差。不足之处主要是等 z 面与海底相交,将海底变为台阶状,使得海底边界处理不方便,在模拟中有较大误差,并带有较大的假混合现象。在 z 坐标中,每个水平计算网格都需要记录分层层数和最底层的实际深度

收稿日期:2008-08-08;修改稿收到日期:2008-10-23.

基金项目:国家自然科学基金(10772204)资助项目.

作者简介:包 芸(1960),女,博士,教授

(E-mail: stsby@mail. sysu. edu. cn).

ΔZ_h , 以保证底边界的模拟。

地形拟合 σ 坐标最早由大气模型中提出, 后被引入到海洋模型, 至今在物理海洋模型中被较广泛的应用。引入 σ 伸缩变换, 实现垂向上相对分层, 使全域的垂向坐标在 $[-1, 0]$ 之间变化, 并在整个计算域分层相同, 能提高浅水区域的计算分辨率。地形拟合 σ 坐标避免了采用非连续性(即台阶状)划分海底地形和自由面带来的寄生效应, 很好地拟合了地形起伏和水面波动。但是由于水深变化, 较深处垂向网格间距较大, 不能很好的反应表面混合层。虽然目前可通过更复杂的变 σ 坐标(s 坐标)改进, 但由于方程经过坐标变换, 对流项和扩散项变得更加繁琐; 另一点, 在地形变化大的地方, 计算水平压强梯度时精度很难保证。而且在计算模拟有温度或盐度跃层时, 由于 σ 坐标网格线与实际水平跃

层相交, 会产生垂向伪分量而使计算产生误差。

3 交替分层法设计

由于河口及近岸海域地区, 海底地形变化剧烈, 且密度层结效应明显, 三维斜压水动力数值计算垂向模式直接采用等平面 z 坐标或地形拟合 σ 坐标 都有明显的缺陷, 各自的优势和不足都同时显现出来。而且河口地区浅滩地较多, 在潮涨潮落中滩地的没出现象要能很好的反应出来。因此, 模拟计算希望水域是在等平面中进行, 但又具有较好地可以连续模拟变化的海底底边界的能力。

在物理海洋的所有水动力数值模拟计算中, 水平面上的计算无论是直角网格还是曲线拟合网格, 变量空间配置都是采用 Arakawa C 格式的交替网格法, 即为了避免计算产生伪振荡, 水位放在计算

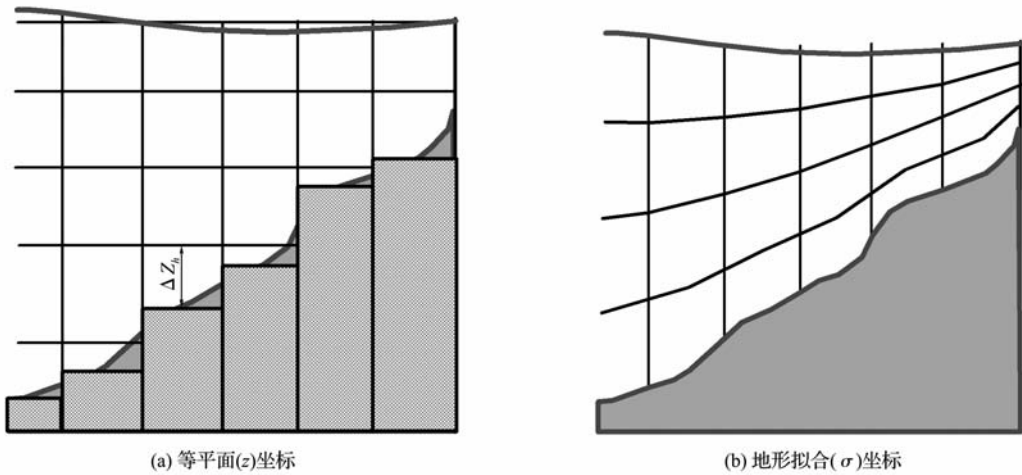


图 1 三维水动力模式中主要采用的两种垂向坐标
Fig. 1 Two vertical coordinate modes of 3-D flow model

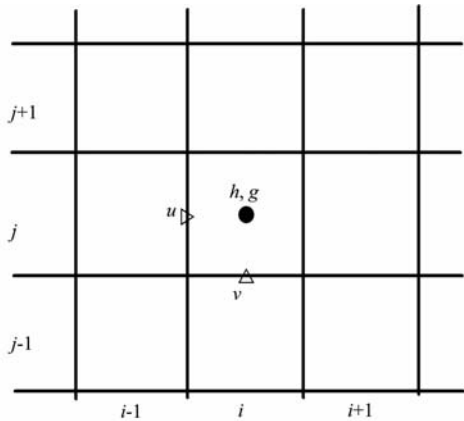


图 2 交替网格分布
Fig. 2 Alternate grid method

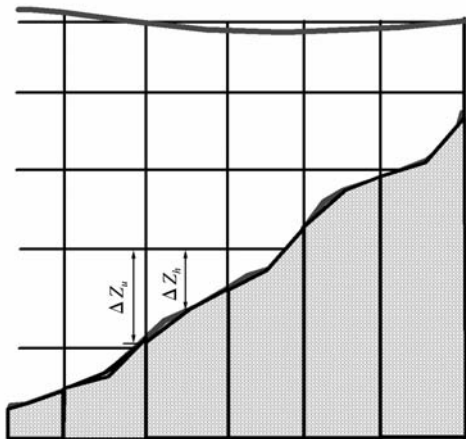


图 3 交替分层法示意图
Fig. 3 Alternate layer method

网格的中心,而水平速度的两个分量分别放在二分之一网格处,即网格线上。因此,可利用水位与速度在水平面上位置不同的特点,在垂向等平面 z 坐标模式中分别设计水位和速度各自的网格分层数和底层深度 ΔZ_h 、 ΔZ_u ,如图 3 所示。由于计算速度时得原垂向等平面 z 坐标中的台阶状海底面不复存在。这样就可以在等平面 z 坐标模式中得到连续的海底地形模拟。把在交替网格上采用水位和速度不同的分层方法叫交替分层法。等平面 z 坐标中的交替分层法在分别得到 (i,j) 点上水位的分层数和最底层深度 ΔZ_h 以及 $(i-1/2,j)$ 点上 u 速度的分层数和最底层深度 ΔZ_u 和 $(i,j-1/2)$ 点上 v 速度的分层数和最底层深度 ΔZ_v 后,计算步骤与原来的等平面 z 坐标中三维水动力模式计算基本相同,只是需要改变计算速度方程时的水深,及计算水位方程时网格四边流量积分时采用各自不同的水深值。

采用交替分层法的垂向 z 坐标中的三维河口、近岸海域水动力计算模式,在计算过程中保持了 z 坐标系 中的优势,方程形式直接简单,能方便地处理水平压力梯度和较准确的模拟密度层结效应,同时又克服了海底台阶状的缺陷。这对改进河口区域的三维斜压水动力数值计算有着现实的意义,进

而对珠江河口的盐水入侵机理研究提供了一个新的研究手段。

4 珠江河口三维水动力计算模拟

在 ccost-2d 二维河口水动力数值计算模式的基础上^[11],发展 ccost-3d 三维斜压河口及近岸海域水动力数值计算模式。利用交替分层法,可采用垂向等平面 z 坐标。目前还没有加入温度和盐度方程,即只完成了三维正压水动力数值计算的程序工作。

- ccost-3d 三维水动力数值计算模式的特点:
- (1) 采用基于静力和 Boussinesq 近似的海洋原始方程。
 - (2) 采用垂向等平面 z 坐标,利用交替分层法克服底边界台阶问题。
 - (3) 采用平面正交曲线网格。
 - (4) 采用平面有限体积法求解水动力方程组。
 - (5) 通过旋转矩阵克服科氏力产生的计算弱不稳定问题。
 - (6) 连续方程的求解采用类似于 ECOM 模式的隐式技术。
 - (7) 水平项采用显式差分,垂向采用隐式差分。
 - (8) 采用冻结网格法模拟滩地出没水面的动边界技术。
 - (9) 对水点记数,只计算求解水点的物理量。

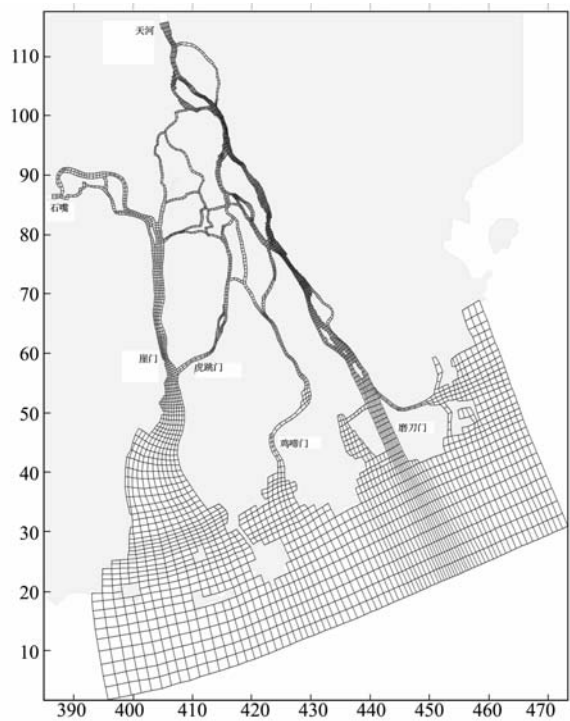


图 4 计算区域与网格
Fig. 4 Simulation area and grid

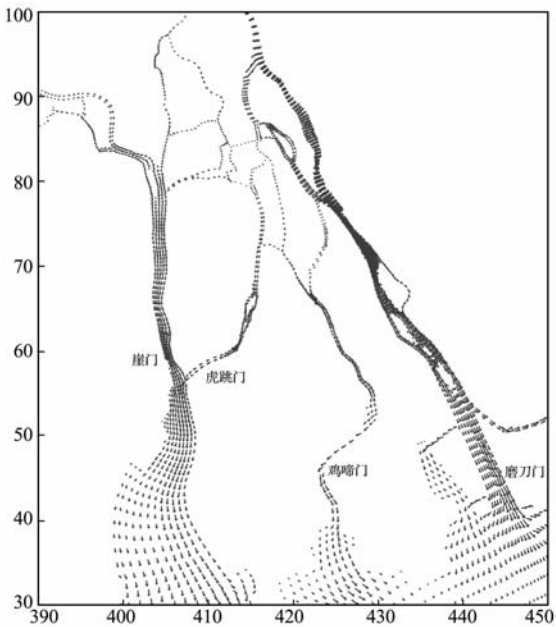


图 5 珠江河口西四口门网河区落潮时表层速度场
Fig. 5 Distribution of the level surface speed of four gates in the west of the Pearl River

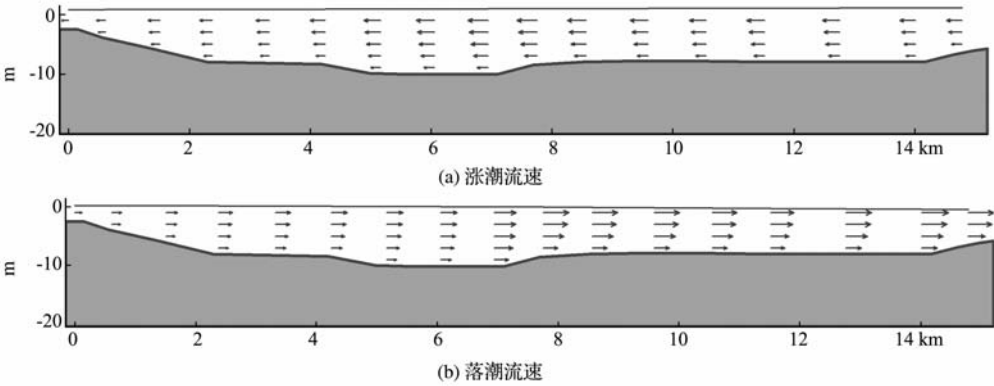


图 6 磨刀门纵剖面流速分布
Fig. 6 Vertical profile speed in river way of Modaomen

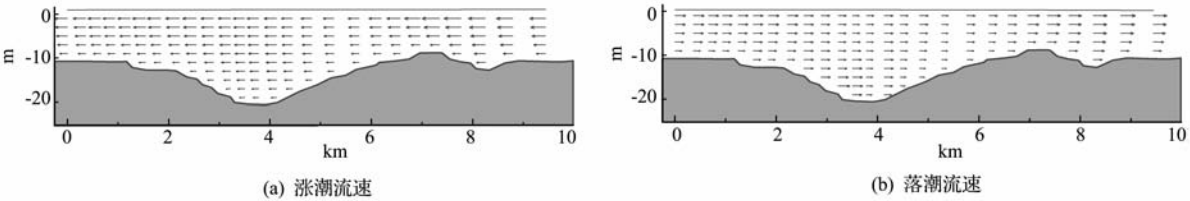


图 7 崖门纵剖面流速分布
Fig. 7 Vertical profile speed in river way of Yamen

(10) 计算高程,即负水深。以模拟计算为例,采用 ccost-3d 计算模式对珠江河口局部网河和海域的整体三维水动力进行了模拟计算。计算区域和网格如图 4 所示。计算网格数为 $83 \times 175 \times 12$ 。计算时间步长为 10 s。模型模拟了枯季期间的水动力特征,模拟时间为 2005 年 1 月。

图 5 给出了落潮流场。由于计算区域较大,为了能更清楚地看到流速变化,只给了网河区局部。在落潮过程中,磨刀门水道为西江的主要河道,分流比大,流速较快,因此磨刀门水道是河水下泄的主要通道。在磨刀门水道中可明显地看出,由于地形水深不同,在同一断面上流速不同。此外有部分上游来水从北街分流后,通过睦洲水闸流入虎坑水道与虎跳门水道,最终汇入崖门水道,赤粉水道与坭湾门水道的来水汇入鸡啼门水道,流入外海。因此,落潮过程时的上游来水通过主要西海水道和磨刀门水道流出,虎跳门水道和鸡啼门水道作为分流河道,接纳了部分通过网河流入的水体,江门水道和谭江来水汇合后进入崖门水道流向外海。

磨刀门水道为典型的径流型河口口门。图 6 给出了磨刀门上下 15 km 纵剖面上的流速分布,其中图 6(a)为涨急时的流速,图 6(b)为落急的流速图。考虑外海边界处较深,并在网河区保证每层

厚度为 2 m,整个流场垂向共分了 12 层。磨刀门水道整体水深在 10 m 以内。由于为径流型河口,落潮流速明显要比涨潮流速大。图中上面的一条线为同时间的水位线。

崖门是西四口门中典型的潮流型口门。图 7 给出了崖门上下 10 km 纵剖面上的流速分布,其中图 7(a)为涨急时的流速,图 7(b)为落急的流速图。崖门最窄出水深也是最深的地方,深达 20 m 左右。崖门上接银州湖,下接黄茅海,涨、落潮流动因通过狭窄的口门而形成双向射流。但由于口门处水深的原因,其过水面积并不小,所以涨急和落急时的流速在口门处不是流场中的最大流速点,最大流速点在崖门的下游,那里是崖门与虎跳门的交汇处。由于两股流动的影响,流速大于崖门最窄处,也就是图上的最深处的流速。在崖门涨落潮流速的大小没有明显的区别。

5 讨 论

本文设计的交替分层法,有效解决了三维河口和近岸海域水动力计算模式中的垂向 z 坐标海底台阶状的问题。在计算过程中保持了 z 坐标系中的优势,方程形式直接简单,能方便的处理水平压力梯度和较准确的模拟密度层结效应。在河口地

区地形变化较大的情况下,三维模拟计算中可根据计算需要均匀的分布垂向计算网格,以保证在计算域内完整的垂向计算精度。

ccost-3d 三维水动力数值模拟计算模式,保持了原来 ccost-2d 模式的计算优点,计算效率高。在对珠江河口西四口门的三维正压水动力的数值模拟计算中,得到了合理的网河表层流场和水道中的纵向剖面流场。

进一步的工作是要完成温度及盐度方程的耦合,加入斜压力的模拟,并加入 2.5 阶湍流模式,使 ccost-3d 计算模式具有更广泛的用途。

参考文献(References):

- [1] 刘 桦,何友声. 河口三维流动数学模型研究进展[J]. 海洋工程,2000,**18**(2):87-93.
- [2] 董 壮. 三维水流数值模拟研究进展[J]. 水利水运工程学报,2002,(2):66-73.
- [3] 陶建峰,张长宽. 河口海岸三维水流数值模型中几种垂向坐标模式研究述评[J]. 海洋工程,2007,**25**(1):133-142.
- [4] GRIFFIES S M, PACANOWSKI R C, et al. Tracer conservation with an explicit free surface method for z -coordinate ocean models[J]. *Monthly Weather Review*,2001,**129**:1081-1098.
- [5] EZER T, MELLOR G L. Simulations of the Atlantic Ocean with a free surface sigma coordinate ocean model[J]. *Journal of Geophysical Research*,1997,**102**:15647-15657.
- [6] MELLOR G L, OEY L Y, EZER T. Sigma coordinate pressure gradient errors and the seamount problem[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*,1998,**15**:1122-1131.
- [7] 朱建荣,朱首贤. ECOM 模式的改进及在长江河口、杭州湾及邻近海区的应用[J]. 海洋和湖沼,2003,**34**(4):364-374.
- [8] SONG Y, HAIDVOGEL D B. A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinates[J]. *Journal of Computational Physics*, 1994,**115**:228-244.
- [9] EZER T, MELLOR G L. A generalized coordinate ocean model and a comparison of the bottom boundary layer dynamics in terrain-following and in z -level grids[J]. *Ocean Modelling*,2004,**6**(3-4):379-403.
- [10] GRIFFIES V, BONING C, et al. Developments in ocean climate modeling[J]. *Ocean Modeling*,2000,**2**:123-192.
- [11] 包 芸. 伶仃洋二维水沙特性数值模型 ccost-2d[J]. 南昌大学学报(理科版),2007,**31**-suppl,p1-4.

Alternate layer method in vertical z -coordinate of 3-D estuary hydrodynamic model

BAO Yun

(Mechanics Department, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The alternate layer method for speed and water level is designed and developed adopting the alternate grid method based on the plane variable configuration for the three-dimensional hydrodynamic numerical model in estuary, and the problem that the seabed is changed into steps by using the vertical z -coordinates mode is successfully solved. Based on ccost-2d model, the 3-D hydrodynamic numerical model ccost-3d is developed, which adopts the vertical z -coordinates mode and ensures the simulation of the actual seabed bottom boundaries. As an example, the three-dimensional flow for the overall simulation of four gates in the west of the Pearl River is calculated. The results of the distribution of the level surface speed and the vertical profile speed in the gates and the river ways are reasonable.

Key words: alternate layer method; 3-D model; z -coordinates mode; estuary; ccost-3d