基于非结构网格的长江口 二维三维嵌套潮流数值模拟

路川藤, 陈志昌, 罗小峰

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:三维数学模型多应用于局部水域,无法模拟模型周边的大范围流场.为解决此问题,基于非结构网格有限体积法,建立了长江口二维三维潮流嵌套数学模型.模型嵌套边界采用近似处理方法,假设嵌套边界处网格单元分层水平流速服从多项式分布,该处理方法嵌套边界处的三维计算存在一定误差.将模型应用于长江口大范围水域潮流模拟计算.结果表明,潮位及二维三维潮流验证良好,计算精度满足规范要求,这说明该方法能够模拟大范围水域的二维及三维潮流运动.

关 键 词:非结构网格; FVM; 二维三维数学模型 中图分类号: TV131 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2013)04-0018-06

计算水力学中,一维、二维计算模式已趋于成熟,三维模式因计算繁琐,局部水域数值计算应用较多,而 大范围水域应用较少.近年来,国内外学者对三维模式研究成果颇丰,Chen Xin-jian^[1]建立了 Peace 河与 Charlotte 港之间的二维三维嵌套数学模型,模拟了潮流与径流之间的相互作用. M. D. J. P. Bijvelds^[2]建立了 Square 港区三维数学模型,并讨论了紊黏系数的处理.于守兵等^[3]采用水位积分平衡法并引入边壁滑移系 数,建立三维模型,研究了淹没丁坝的水流结构问题.刘金贵等^[4]将非结构网格三维数学模型成功应用于崖 门水道水流计算,并取得了不错的成果.王志力等^[5]建立了强潮河口瓯江口三维数学模型,并模拟了瓯江口 盐度输运.李褆来等^[6]建立了长江口三维潮流数学模型,讨论了长江口三维水流运动.华祖林等^[7]提出了基 于三角形网格的隐式差分算法,并模拟了长江南通河段流场及浓度场,取得了令人满意的效果.丁道扬等^[8] 针对宽浅河道水流的特点,建立了一个基于分层积分降维数值解法的三维浅水紊流数值模型,并指出该数学 模型特别适用于解决宽浅河道及河口水流问题.本文在前人研究基础上,尝试在二维潮流数值模拟基础上, 局部水域采用三维算法,模拟大范围水域局部三维流场问题.该计算模式使得局部三维模型外部有足够大的 水域面积,能够满足水面线的连续以及大范围潮流场的相似.

1 三维潮流运动控制方程

浅水运动方程^[9]σ变化后,可写为

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

$$\frac{\partial uH}{\partial t} + \frac{\partial u^2H}{\partial x} + \frac{\partial uvH}{\partial y} + \frac{\partial uW}{\partial \sigma} + gH\frac{\partial \zeta}{\partial x} - fHv = \frac{1}{H}\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(N_z\frac{\partial u}{\partial\sigma}\right) + H\frac{\partial}{\partial x}\left(N_x\frac{\partial u}{\partial x}\right) + H\frac{\partial}{\partial y}\left(N_y\frac{\partial u}{\partial y}\right)$$
(2)

收稿日期:2012-11-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51009095);水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201201070)

作者简介: 路川藤(1983-),男,山东烟台人,博士研究生,主要从事河口动力学研究.

E-mail: lct000abc@163.com

$$\frac{\partial vH}{\partial t} + \frac{\partial v^2 H}{\partial x} + \frac{\partial uvH}{\partial y} + \frac{\partial vW}{\partial \sigma} + gH\frac{\partial \zeta}{\partial x} + fHu = \frac{1}{H}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(N_z\frac{\partial v}{\partial \sigma}\right) + H\frac{\partial}{\partial x}\left(N_x\frac{\partial v}{\partial x}\right) + H\frac{\partial}{\partial y}\left(N_y\frac{\partial v}{\partial y}\right)$$
(3)

直角坐标系下垂向速度分量可表示为

$$w = W + u \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) + v \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) + (\sigma + 1) \frac{\partial \zeta}{\partial t}$$
(4)

式中:x,y,z为原点 o 置于某一水平面,z 轴垂直向上的直角坐标系坐标;u,v,W 为流速沿 x,y,z 方向的速度 分量; N_x,N_y,N_z 为 x,y,z 方向水流紊动黏性系数;g 为重力加速度;t 为时间; ζ 为水位;H 为水深; σ 为 σ 坐标, $\sigma = \frac{z-\zeta}{H}$.

2 数值方法

2.1 有限体积法

三维潮流控制方程沿水深垂向积分变成二维方程,二维方程可写成向量形式:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla E = M + \nabla E^{d}$$

$$\vec{x} \oplus : U = (H, Hu, Hv)^{\mathsf{T}}, E = (F, G), F = \begin{pmatrix} Hu \\ Hu^{2} + gH^{2}/2 \\ Huv \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} Hv \\ Huv \\ Hv^{2} + gH^{2}/2 \end{pmatrix}.$$

$$\mathbf{x}$$

$$\mathbf{x$$

为: $M = M_o + M_f = \begin{pmatrix} 0 \\ gH(M_{ox} + M_{fx}) + fv \\ gH(M_{oy} + M_{fy}) - fu \end{pmatrix}$,其中: M_{ox}, M_{oy} 分别为x, y方向的河床底部高程变化; M_{fx}, M_{fy} 分别

为 x, y 方向的底摩擦项.将单一的三角形网格作为控制单元,物理量定义在控制单元中心.将第 i 号控制元 记为 Ω_i , 在 Ω_i 上对向量式的基本方程组进行积分,并利用 Green 公式将面积分化为线积分,得

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_i} U \mathrm{d}\Omega_i + \oint_{\partial\Omega_i} (E \cdot \bar{n}_i - E^d \cdot \bar{n}_i) \mathrm{d}l = \int_{\Omega_i} M \mathrm{d}\Omega_i$$
(6)

式中:d Ω_i 为面积分微元;dl为线积分微元; $\overline{n}_i = (n_{ix}, n_{iy}) = (\cos\theta, \sin\theta), n_{ix}, n_{iy}$ 分别代表第*i*号控制元边界单元单位外法向向量*x*,*y*方向的分量.式(6)的求解分为3个部分,一是对流项的数值通量求解,二是紊动项的求解,三是源项中底坡项的处理.对流项采用 Roe 格式的近似 Riemann 解,紊动项的处理采用类似有限元的方法处理,底坡项采用斜底模型处理,斜底模型可以更精确地模拟实际地形.

2.2 边界条件

模型的边界条件分别为:

- (1) 固边界:法向流速为零,即 V·n = 0.
- (2) 开边界:上游采用流量控制, $Q(x,y,t) = Q^*(x,y,t)$;外海采用已知潮位控制: $\zeta(x,y,t) = \zeta^*(x,y,t)$.
- (3) 水面边界条件: $\frac{\partial u}{\partial \sigma} = \frac{\tau_{fx}H}{\rho N_x}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} = \frac{\tau_{fy}H}{\rho N_y}, W = 0, 其中: \tau_{fx}, \tau_{fy}$ 分别为风应力矢量 $\overrightarrow{\tau_f}$ 沿 x, y 方向的分量.

(4) 床面边界条件: $\frac{\partial u}{\partial \sigma} = \frac{\tau_{bx}H}{\rho N_x}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} = \frac{\tau_{by}H}{\rho N_y}, W = 0, 其中: \tau_{bx}, \tau_{by}$ 分别为底部切应力矢量 $\overrightarrow{\tau_b}$ 沿x, y方向的分量.

(5) 二维、三维嵌套边界处理:本文二维、三维嵌套边界采用近似处理方法. 假设边界左侧二维单元 Ω_i 垂向流速 w = 0,各分层水平流速服从二次多项式分布^[10],满足: $\frac{u_i^{(k)}}{u_i} = p_1 + p_2 \left(\frac{y}{h}\right) + p_3 \left(\frac{y}{h}\right)^2$,其中: $u_i^{(k)}$ 为分 层水平流速; \bar{u}_i 为平均流速; $\frac{\gamma}{h}$ 为相对水深; $p_n(n = 1, 2, 3)$ 为待定系数. 根据二维单元及水面水底边界条件 计算求得边界右侧三维单元 Ω_i 流速.

2.3 计算流程

模型计算按以下流程进行:(1)假定初始水位及二维、三维初始流速;(2)计算二维水位及平均流速;(3) 判别二维与三维计算区域;(4)二维区域与三维区域嵌套边界处理;(5)计算三维流速;(6)根据平均流速对 三维分层流速进行误差校正;(7)输出水位及二维、三维潮流场.

3 长江口二维三维嵌套潮流数学模型

3.1 数值模拟范围

长江潮区界位于安徽大通,大通以上水域水 位基本不受潮波影响,作为模型的上边界;长江口 外-50m等深线处受径流影响可忽略不计,作为模 型外边界,模型总长约700km.模型北至江苏吕四 港南侧,南至浙江金山嘴,宽约150km(见图1).

3.2 数值计算

数学模型基本计算参数:网格最小边长128 m; 网格数114 489,时间步长3 s;糙率0.03~0.012 (大通-外海线性插值);二维紊动黏性系数为0.1;



图 1 数值模拟范围(虚线范围为三维区域) Fig. 1 Numerical simulation range

2005年

08-21

08-22

08-23

08-24 08-25

计算值

08-20

动边界水深 0.02 m; 三维垂向分 10 层; 三维垂向紊动黏性系数按经验公式取值.数值计算中,三维计算区域包括南港、北槽和南槽局部区域,计算网格约占总网格数的 40%,若模拟水域只做二维潮流运算,模拟潮波运动 1 d 需 90 h 左右,二维三维模型嵌套计算需 30 h 左右,大大节约了计算时间.

3.3 模型验证

潮位/m

08-18

数学模型地形选取 2005 年长江口大范围实测地形,模型潮位验证时间为 2005-08-18—2005-08-25, 本次水文测验因测量河段长且测点多,南支与北槽河段潮流测量分为 2 个时间段, Z9 与 Z15 位于南支河段, 验证时间为 2005-08-21—22, CS2 位于北槽河段,验证时间为 2005-08-25—26. 验证点位置见图 1,大通平

均流量为41485.7 m³/s. 潮位验证见图 2, 可见除芜湖站 潮位误差偏大外, 其他各站潮位值偏差均在 10 cm^[10]之 内, 高低潮位相位偏差在 0.5 h 内. 二维与三维潮流验证 分别见图 3 和图 4. 可见偏差均在 10% 之内, 误差较小, 满 足规范要求.



6.5

E 6.0

- 5.5 辺 5.0 麗 45

4.5 4.0 实测值

08-19

08-18

Fig. 2 Tidal level verification



图 3 二维潮流验证





Fig. 4 3D tidal current verification

4 结 语

在非结构网格的基础上,建立了长江口二维三维潮流嵌套数学模型,模型二维三维嵌套边界采用近似处 理方法,精度较低,但大大节约了三维模型计算大范围水域所需时间.将模型应用于长江口潮流模拟,潮位及 二维、三维潮流验证良好,说明该方法能够模拟大范围水域二维及三维潮流运动.

参考文献:

- [1] CHEN Xin-jian. Using a dynamically coupled 3D-2DV model to simulate hydrodynamics in the lower Peace River-Upper Charlotte Harbor System in Southwest Florida [C] // Ninth International Conference on Estuarine and Coastal Modeling Charleston, South Carolina, 2005: 72-85.
- [2] BIJVELDS M D J P, KRANENBURG C, STELLING G S. 3D numerical simulation of turbulent shallow-water flow in Square Harbor[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(1): 26-31.
- [3] 于守兵,王万战,余欣. 基于非结构网格的三维浅水模型[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2011, 139(2): 195-200.
 (YU Shou-bing, WANG Wan-zhan, YU Xin. 3-D shallow water model based on unstructured grids [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 139(2): 195-200. (in Chinese))
- [4] 刘金贵,李瑞杰,张义丰. 非结构网格 FVM 模型及崖门水道三维模拟研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2009, 24 (1): 49-55. (LIU Jin-gui, LI Rui-jie, ZHANG Yi-feng. Unstructured grid FVM model and 3-D simulation studies on Yamen Channel[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser A), 2009, 24(1): 49-55. (in Chinese))
- [5] 王志力, 陆永军, 左利钦. 强潮河口三维无结构网格盐度数学模型[J]. 海洋工程, 2008, 126(2): 43-53. (WANG Zhili, LU Yong-jun, ZUO Li-qin. Unstructured 3D baroclinic model of current and salt for strong tidal estuary[J]. The Ocean Engineering, 2008, 126(2): 43-53. (in Chinese))
- [6] 李褆来, 窦希萍, 黄晋鹏. 长江口边界拟合坐标的三维潮流数学模型[J]. 水利水运工程学报, 2002(3): 1-6. (LI Tilai, DOU Xi-ping, HUANG Jin-peng. 3-D model of tidal currents in the Yangtze estuary with orthogonal curvilinear coordinates
 [J]. Hydro-Science and Engineering, 2002(3): 1-6. (in Chinese))
- [7] 华祖林,褚克坚. 基于三角形网格的潮汐水域水流水质的一种计算模式[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2001, 29 (4): 31-37. (HUA Zu-lin, ZHU Ke-jian. A numerical model of flow and water quality for tidal regions based on triangular meshes[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2001, 29(4): 31-37. (in Chinese))

- [8] 丁道扬,吴时强. 三维宽浅河道水流数学模型研究[J]. 中国工程科学, 2010, 12(2): 32-39. (DING Dao-yang, WU Shiqiang. Study on three-dimensional numerical model for shallow water flow[J]. Engineering Science, 2010, 12(2): 32-39. (in Chinese))
- [9] 孙文心, 江文胜, 李磊. 近海环境流体动力学数值模型[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (SUN Wen-xin, JIANG Wensheng, LI Lei. The numerical model for the fluid dynamics of offshore environment[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [10] 鞠俊,夏云峰,闻云呈. 长江河口段流速沿垂线分布规律[J]. 人民长江, 2008, 39(15): 46-48. (JU Jun, XIA Yunfeng, WEN Yun-cheng. Law of distribution flow velocity along vertical lines in the estuary reach of the Yangtze River[J]. Yangtze River, 2008, 39(15): 46-48. (in Chinese))
- [11] JTJ/T 233-98, 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程[S]. (JTJ/T 233-98, Technical regulation of modeling for tide-current and sediment on coast and estuary[S]. (in Chinese))

2D and 3D nested tidal current numerical simulation of Yangtze estuary based on finite volume method

LU Chuan-teng, CHEN Zhi-chang, LUO Xiao-feng

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: 3D numerical models are always used in simulating tidal flow field of local waters, but the vast flow field beyond the simulated area by 3D numerical model can not be simulated. In order to solve this problem, a 2D and 3D nested model for the Yangtze estuary is developed based on a finite volume method with unstructured grids. The flow field of boundary cells between 2D and 3D is handled with an approximation method which supposes that the 3D horizontal velocity of the boundary cells can meet the multinomial distribution, and there will be some calculation errors in the boundary cells. The model is used for the Yangtze estuary in simulating tidal flow movement. The simulated results show that the tidal level as well as 2D and 3D tidal currents are well verified by the numerical model, and the accuracy of calculation can meet the requirements of the norms and specifications. So this method can be used to simulate the 2D and 3D tidal current movement of large scale waters.

Key words: unstructured grid; finite volume method (FVM); 2D & 3D numerical simulation