



长江感潮河段二维潮流数值模拟*

路川藤¹, 陈志昌^{1,2}, 罗小峰^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210098;

2. 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: 通过非结构网格建立了长江感潮河段二维潮流数学模型, 研究了水工建筑物在非结构网格中的处理, 验证结果良好; 为检验模型长河段沿程流量的守恒性, 模型上边界分别采用枯水、中水、洪水3种恒定流量模拟感潮河段水流运动。计算结果表明: 模型沿程流量守恒性良好, 模型能够有效模拟长江感潮河段水流运动。

关键词: 非结构网格; 有限体积法; 感潮河段; 数学模型

中图分类号: TV 82

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)08-0011-05

Two-dimensional tidal mathematical model in tidal river of Yangtze River

LU Chuan-teng¹, CHEN Zhi-chang^{1,2}, LUO Xiao-feng^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China)

Abstract: Two-dimensional tidal numerical model of tidal river in Yangtze River is built with unstructured grid, and the generalization of hydraulic structures is discussed to get precise result. Three tidal numerical models with different boundary condition (dry, water, flood) are built to test the conversation of flow, and the results indicate that the flow conversation of the tidal numerical model is favorable. In short, the tidal numerical model can simulate the tidal current effectively.

Key words: unstructured grid; FVM; tidal river; numerical model

长江感潮河段自安徽大通至长江口, 感潮河段水流运动复杂, 既受浅海潮波影响, 又受河川径流作用, 增加了数值模拟的难度。历年来, 研究感潮河段的学者众多, 茅泽育^[1]采用一维数学模型, 建立了甬江感潮河网数学模型。包为民^[2]提出感潮河段水流水力要素应分离为洪水要素和潮水要素, 建立了洪水水流要素和潮水水流要素耦合模拟的双驱动力水动力模型, 利用长江河口感潮河段实际水流过程进行了模拟检验, 获得了比圣维南方程组更合理、模拟效果更好的结果。孙昭华^[3]建立了大通至徐六泾一维水沙数学模型, 并取得了不错的计算结果。以上学者均采用一维数学模型模拟感潮河段

水流运动。张金善^[4]建立了长江感潮河段二维潮流数学模型, 研究了径流与潮波的相互影响。张晓艳^[5]研究了长江感潮河段洪水的传播。李键庸^[6]研究了安徽大通至徐六泾段的水沙特性及河床演变。以上研究均采用结构网格建立数学模型, 本文在前人的研究基础上, 采用非结构网格有限体积法模拟长江感潮河段水流运动。非结构网格能准确模拟水域陆边界, 计算精度高, 能更有效模拟水流运动。

1 控制方程及求解

1.1 控制方程

二维浅水控制方程向量形式可表示为:

收稿日期: 2012-02-28

*基金项目: 国家自然科学基金, 青年科学基金项目(51009095)

作者简介: 路川藤(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事河口动力学研究。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla E = M + \nabla E^d \quad (1)$$

其中:

$$U = (H, Hu, Hv)^T$$

$E = (F, G)$, 其中

$$F = \begin{pmatrix} Hu \\ Hu^2 + gH^2/2 \\ Huv \end{pmatrix}$$

$$G = \begin{pmatrix} Hv \\ Huv \\ Hv^2 + gH^2/2 \end{pmatrix}$$

$E^d = (F^d, G^d)$, 其中,

$$F^d = \begin{pmatrix} 0 \\ \epsilon_x H \partial u / \partial x \\ \epsilon_x H \partial v / \partial x \end{pmatrix}$$

$$G^d = \begin{pmatrix} 0 \\ \epsilon_y H \partial u / \partial y \\ \epsilon_y H \partial v / \partial y \end{pmatrix}$$

$$M = M_0 + M_f = \begin{pmatrix} 0 \\ gH(M_{0x} + M_{fx}) + fv \\ gH(M_{0y} + M_{fy}) - fu \end{pmatrix}$$

式中: x, y 为原点 o 置于某一水平面的直角坐标系坐标; u, v 为流速矢量 V 沿 x, y 方向的速度分量; ϵ_x, ϵ_y 为 x, y 方向的水平紊动黏性系数; g 为重力加速度; t 为时间; H 为水深; f 为科氏力; M_{0x}, M_{0y} 为 x, y 方向的河床底部高程变化; M_{fx}, M_{fy} 为 x, y 方向的底摩擦项。

采用三角形网格对计算区域进行离散, 并将单一的网格单元作为控制单元, 水深布置在网格顶

点, 其他物理变量配置在每个单元的中心, 如图1。

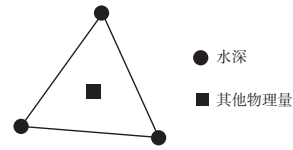


图1 物理量布置

将第 i 号控制元记为 Ω_i , 在 Ω_i 上对向量式的基本方程(1)进行积分, 并利用Green公式将面积分化为线积分, 得

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_i} U d\Omega_i + \oint_{\partial\Omega_i} (E \times n_i - E^d \times n_i) dl = \int_{\Omega_i} M d\Omega_i \quad (2)$$

1.2 方程求解^[7]

方程(2)求解主要分3部分, 一为对流项求解, 二为紊动项求解, 三为底坡项处理。对流项数值通量可采用Roe格式的近似Riemann解, 紊动项采用单元交界面的平均值计算通过该界面紊动黏性项的数值通量, 有限体积法底坡项若不加任何处理, 则会造成静水的伪流动现象, 本文采用“斜底模型”处理底坡项。

2 长江感潮河段数值模拟

2.1 数学模型范围

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-50 m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700 km。模型北至江苏吕四港南侧, 南至浙江金山嘴, 宽约150 km, 如图2所示。

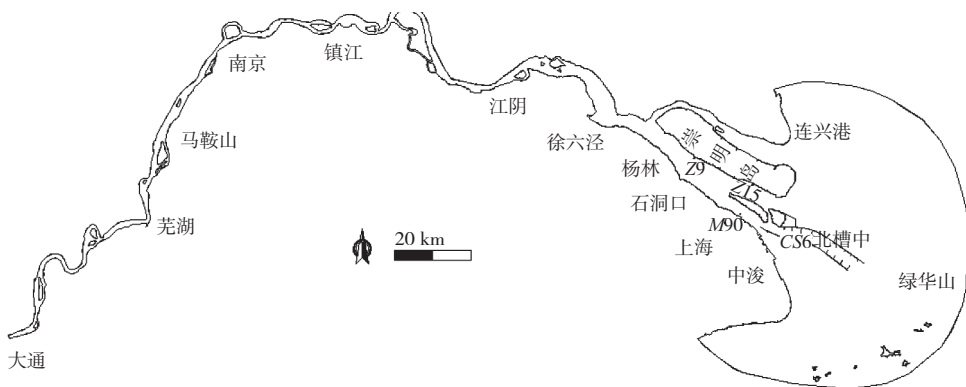


图2 数学模型范围

2.2 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0.030~0.012(大通—外海线性插值), 紊动黏性系数0.1, 动边界水深0.02 m。

2.3 水工建筑物处理

河道中水工整治建筑物宽度一般不大, 而在数值模拟中, 网格尺度往往远大于水工整治建筑物宽度, 若以改变整个网格单元水深值来模拟水工建筑物, 则夸大了水工建筑物的影响。因“斜底模型”水深值布置在网格顶点, 通过修改离工程最近的网格顶点高程来模拟水工建筑物, 能更有效逼近实际地形, 减少添加工程对地形的破坏。

分流堤是河口整治中常见的水工建筑物, 本文在水槽(图3)试验的基础上, 讨论了水工建筑物的处理方式对水流的影响。

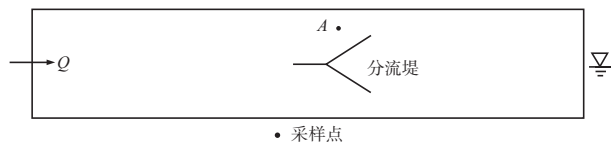


图3 水槽示意

水槽长10 km, 宽1 km, 网格平均长度80 m, 上边界取固定流量3 000 m³/s, 下边界取固定水位

0 m, 分流堤高程-1 m。数值模拟过程中, 分流堤分别按修改网格底高程及修改网格顶点高程处理, 并分析了A点的流速变化, 见表1。

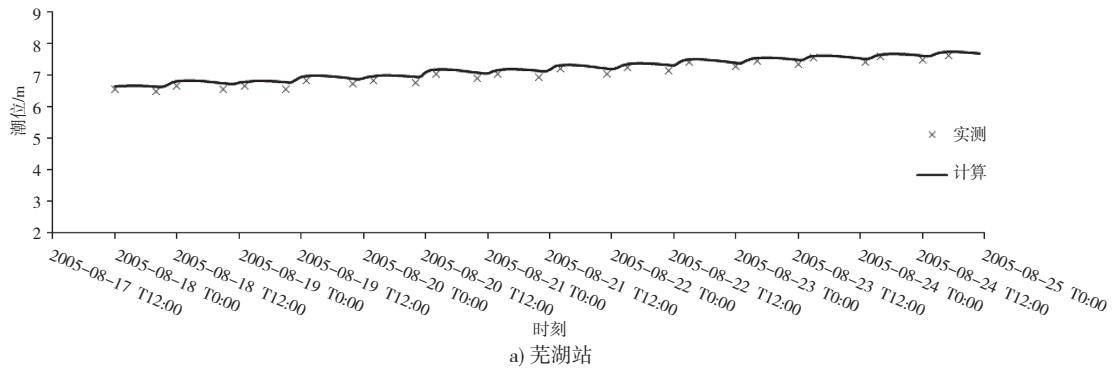
表1 A点流速变化

水工建筑物处理方式	X向流速 $u/(m \cdot s^{-1})$	Y向流速 $v/(m \cdot s^{-1})$
修改网格顶点高程	0.63	0.06
修改网格底高程	0.66	0.15

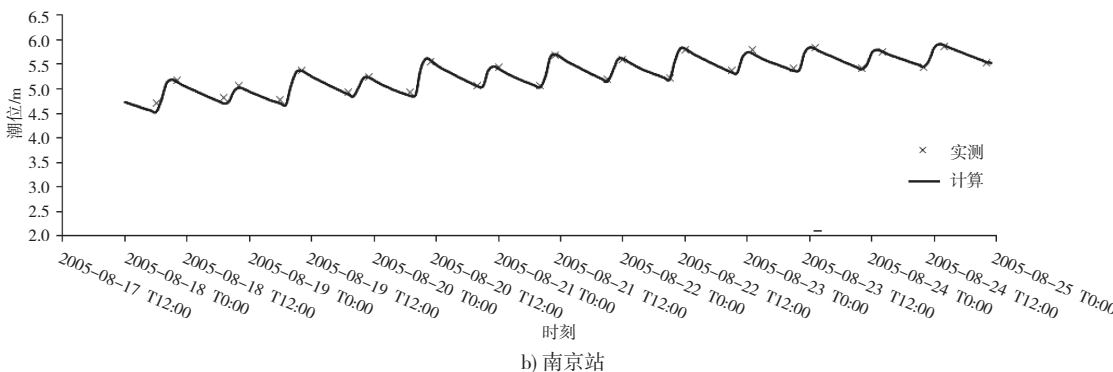
由表1知, 通过修改网格底高程处理分流堤, A点流速偏大, 因为这种工程处理方式远远夸大了工程尺寸, 缩小了过水断面面积。

2.4 模型验证

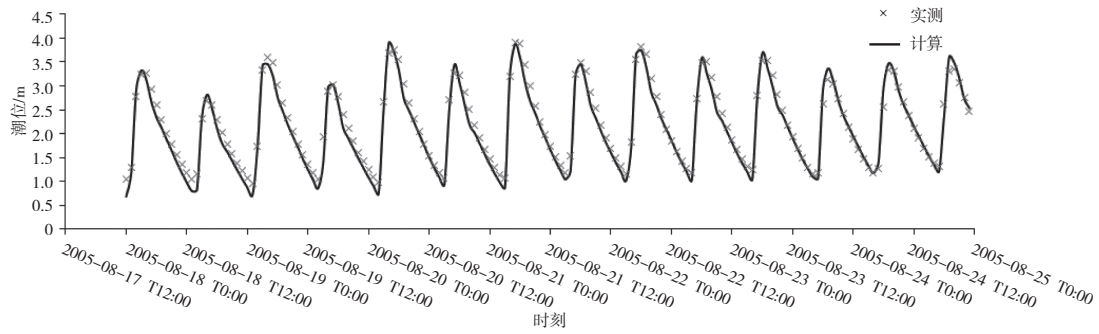
模型潮位验证时间为2005年8月18日—25日, 流速验证时间为2005年8月19—20日和2005年8月21—22日, 验证点位置见图2, 大通平均流量为41 485.7 m³/s。由图4知, 除芜湖站潮位误差偏大外, 其他各站潮位值偏差均在10 cm之内, 高低潮位时间偏差小于30 min; 由图5可知, CS6点位于航道边缘, 流速偏差较大, 因网格较粗, 模型地形与实际地形有偏差, 其他各点偏差基本都在10%之内, 验证良好, 满足规范要求。



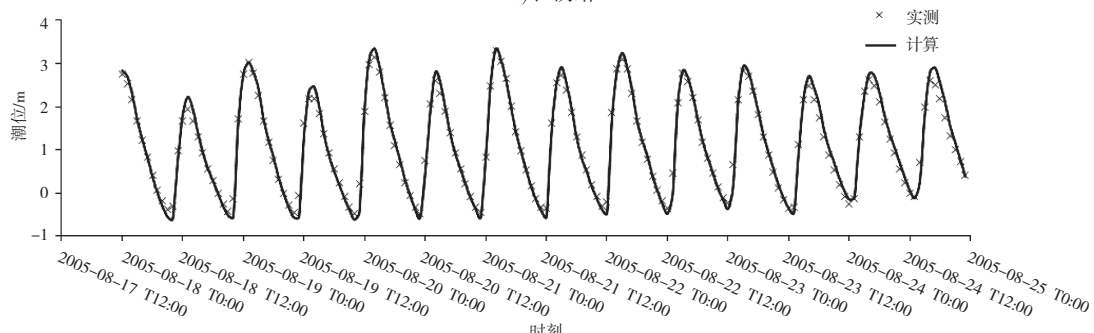
a) 芜湖站



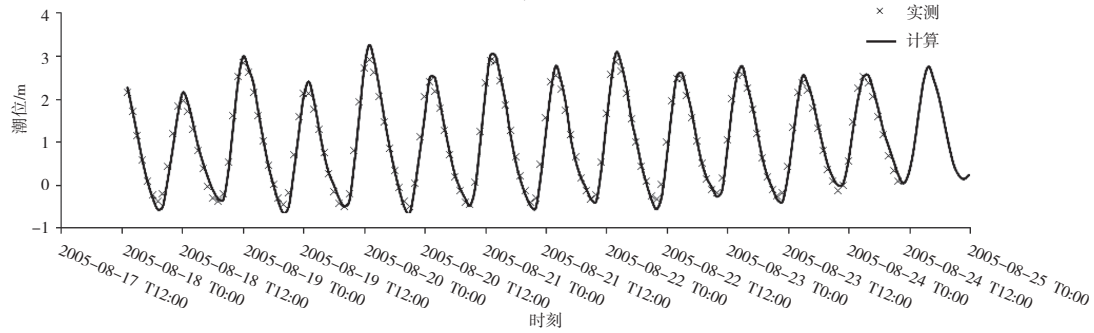
b) 南京站



c) 江阴站

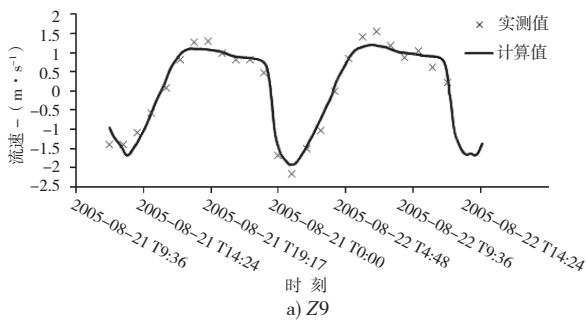


d) 杨林站

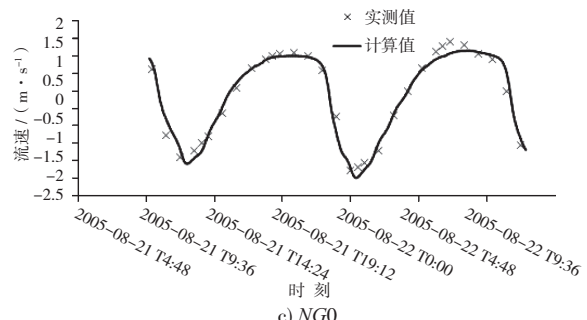


e) 北槽中站

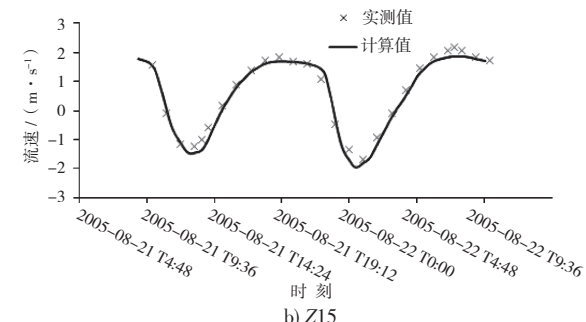
图4 模型潮位验证



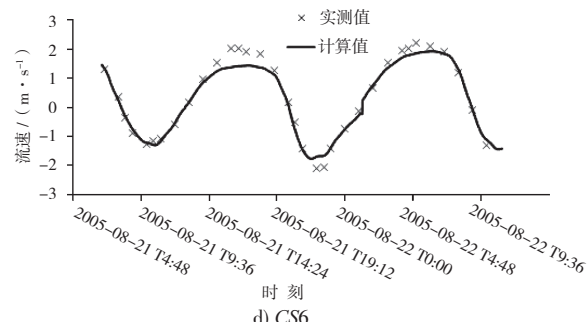
a) Z9



c) NG0



b) Z15



d) CS6

图5 模型流速验证

2.5 沿程流量误差分析

计算误差积累在数值模拟中是不可避免的,长距离复杂河段计算误差积累尤为严重,沿程流量是检验长河段数值模拟计算误差积累大小的重要参数之一。模型沿程选取了12条断面,如图6所示。流量自上游至下游是一个传递的过程,存在时间差,因此上边界采用恒定流量,外海边界潮汐条件不变,上边界流量分别选取枯水(10 000 m³/s)、中水(30 000 m³/s)、洪水(60 000 m³/s)3种流量,计算结果如表2所示。

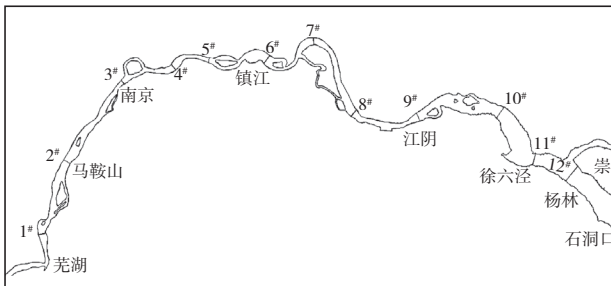


图6 流量分析断面

表2 沿程流量计算 m³/s

断面号	枯水		中水		洪水	
	流量	误差	流量	误差	流量	误差
1#	9 952	-0.48	31 183	3.94	59 016	-1.64
2#	9 394	-6.06	27 830	-7.23	55 158	-8.07
3#	9 545	-4.55	30 776	2.59	61 400	2.33
4#	10 261	2.61	31 300	4.33	62 600	4.33
5#	10 377	3.77	29 729	-0.9	58 095	-3.18
6#	10 046	0.46	29 668	-1.11	59 085	-1.52
7#	9 908	-0.92	27 909	-6.97	54 874	-8.54
8#	9 229	-7.71	29 666	-1.11	58 871	-1.88
9#	9 914	-0.86	30 481	1.60	60 393	0.66
10#	10 091	0.91	28 593	-4.69	57 639	-3.93
11#	9 388	-6.12	30 951	3.17	61 150	1.92
12#	10 665	6.65	33 065	10.22	64 761	7.94

由表2知,除12#断面外,其他各断面枯水、中水和洪水流量误差均在10%之内,12#断面位于南支河段,该河段除受径流影响,还受北支水流

影响,故误差较大。总体来说,模型沿程流量守恒性较好,说明非结构网格有限体积法能够准确模拟长江感潮河段水流运动。

3 结语

利用非结构网格有限体积法建立了长江感潮河段二维潮流数学模型,验证结果良好,满足规范要求。

模型上边界分别选取枯水、中水、洪水3种恒定流量,分析沿程流量误差,计算结果表明,沿程流量误差均在10%之内,流量守恒性良好,非结构网格有限体积法能有效模拟长江感潮河段水流运动。

参考文献:

- [1] 茅泽育,马吉明,余云童,等.感潮河段潮流数值模拟[J].海洋工程,2003(4):89-93.
- [2] 包为民,张小琴,瞿思敏,等.感潮河段洪潮耦合双驱动力水动力模型[J].水动力学研究与进展:A辑,2010(5):601-608.
- [3] 孙昭华,陈飞,郭小虎.长江下游近河口段一维水沙数值模拟[J].水利水运工程学报,2007(3):44-50.
- [4] 张金善,孔俊,章卫胜.长江感潮河段径流与河口海岸动力作用机制的数值模拟[G]//朱德祥.第二十一届全国水动力学研讨会暨第八届全国水动力学学术会议暨两岸船舶与海洋工程水动力学研讨会文集.北京:海洋出版社,2008.
- [5] 张晓艳.感潮河段洪水波传播数值模拟——以大通至长江口为例[D].南京:河海大学,2007.
- [6] 李键庸.长江大通—徐六泾河段水沙特征及河床演变研究[D].南京:河海大学,2007.
- [7] 何杰.半封闭港池水交换的数值模拟及其应用[D].南京:南京水利科学院,2009.

(本文编辑 武亚庆)