

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2009.03.003

# 大通至长江口整体水动力模型

欧 剑<sup>1,2</sup>, 马进荣<sup>1</sup>, 张行南<sup>1</sup>, 张晓艳<sup>3</sup>

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;

2.浙江水利水电专科学校水利系,浙江 杭州 310018; 3.广东省水利水电科学研究院河港所,广东 广州 510610)

**摘要:**为更好研究长江大通以下河段的水动力特性,建立了大通至长江口感潮河段的二维水动力数学模型,模拟了径流和潮汐共同作用下的河道水位与流量、河汉分流比及长江口水域的流态.在整体水动力模型的基础上,采用嵌套技术建立了镇扬河段工程区局部数学模型,整体模型为局部模型提供边界条件,局部模型采用精细网格进行工程计算.以高资港区码头工程为例,对工程建设前、后不同水文条件下水位、流场变化进行了数值模拟.计算结果表明,工程建设对河段的水利规划、堤防和行洪安全、河势不会带来明显不利的影响.

**关键词:**水动力模型;平面二维模型;正交曲线网格;嵌套网格;防洪评价;长江口

**中图分类号:**TV131.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1980(2009)03-0258-05

洪水是一种非恒定流不连续波运动.自圣维南方程组问世以来,国内外学者对河道洪水波尤其是洪水演进数值模拟研究<sup>[1-3]</sup>进行了有益的探索.文献[4]建立了珠江三角洲大系统水动力模型,文献[5-8]建立了能适应复杂情况的一二维嵌套的非恒定流模型.目前,天然河道的洪水数值模拟研究及工程应用已取得了长足的进展,但对于地形地貌复杂、断面形态沿程变化大、计算河段特别长的情况,模拟难度仍较大<sup>[9-10]</sup>.

长江大通以下河段受径流、潮流、风暴潮等多方面共同作用,河口段河床冲淤多变,主槽摆动频繁.目前,长江口呈三级分汊、四口入海的格局,在近年来外界条件的影响下出现了新的变化特征<sup>[11-13]</sup>.研究这些动力机制,对于感潮河段和河口的水流泥沙运移规律、河床变形、防洪减灾、水环境和深水航道的治理等均具有重要意义.为能更准确地模拟该河段水动力特性,针对感潮河段洪水传播特点,本文建立了大通至长江口感潮河段的平面二维水动力数学模型,对贴体正交曲线坐标系下的水流方程,采用 ADI 法对模型进行了验证计算.与此同时,以镇扬河段高资港区码头工程为研究对象,采用嵌套技术建立了工程区局部数学模型,对工程建设对水动力环境的影响进行了模拟研究.

## 1 数学模型

### 1.1 基本方程

在宽阔水域,水流的流动已具有二维性质,本研究以平面二维数学模型进行概化求解.在贴体正交曲线坐标系下,其水流基本方程如下:

连续方程为

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{C_{\xi} C_{\eta}} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (DuC_{\eta}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (DvC_{\xi}) \right] = 0 \quad (1)$$

动量方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{C_{\xi}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{C_{\eta}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{uv}{C_{\xi} C_{\eta}} \frac{\partial C_{\xi}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{C_{\xi} C_{\eta}} \frac{\partial C_{\eta}}{\partial \xi} =$$

收稿日期:2008-06-26

基金项目:河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2008491211);教育部博士点基金(20060294002);浙江省自然科学基金(Y507710)

作者简介:欧剑(1972—),男,湖南衡阳人,副教授,博士研究生,主要从事水文水资源研究.

$$fv - \frac{g}{C_\xi} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + E_\xi \left( \frac{1}{C_\xi} \frac{\partial A}{\partial \xi} - \frac{1}{C_\eta} \frac{\partial B}{\partial \eta} \right) - \frac{gu}{C^2 D} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{C_\xi} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{C_\eta} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{uv}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - \frac{u^2}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} = \\ & -fu - \frac{g}{C_\eta} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + E_\eta \left( \frac{1}{C_\xi} \frac{\partial B}{\partial \xi} + \frac{1}{C_\eta} \frac{\partial A}{\partial \eta} \right) - \frac{gv}{C^2 D} \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $A = \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta u) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi v) \right]$   $B = \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta v) - \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi u) \right]$

式中： $\zeta$ ——水位； $D$ ——总水深， $D = \zeta + h$  ( $h$  为水深)； $\xi, \eta$ ——正交贴体坐标的纵横向计算网格方向； $u, v$ ——沿  $\xi, \eta$  的水流速度分量； $t$ ——时间； $C_\xi, C_\eta$ ——拉梅系数； $f$ ——科氏力系数； $E_\xi, E_\eta$ ——水平涡黏扩散系数； $C$ ——谢才系数， $C = \frac{1}{n} (h + \zeta)^{1/6}$ ； $n$ ——曼宁系数； $g$ ——重力加速度。

### 1.2 模型范围及网格剖分

感潮河段的水动力模型须正确反映径流与潮流动力的相互作用，潮汐动力边界与径流边界均不应受彼此动力影响。本文计算，上边界取在大通附近，距离长江口门约 620 km，长江口外海边界取三面开边界，其中东边界在鸡骨礁与绿华山之间，南边界在卢潮港附近，北边界在连兴港以北约 28 km 一线。外海开边界位置的选定已考虑边界典型潮位等因素，由东中国海模型提供天文潮边界<sup>[14]</sup>。整体模型网格剖分采用变步长技术，加密区与非加密区空间步长渐变，模型网格数横纵向总数为 385 × 674，徐六泾以下网格步长在 100 ~ 600 m 之间，外海步长约 500 m；河道部分纵向网格步长约 700 m，横向步长约 70 m，沿河宽方向，计算网格线数因河段不同而有所不同，在 16 ~ 44 条之间。整体模型计算范围、边界如图 1 所示。

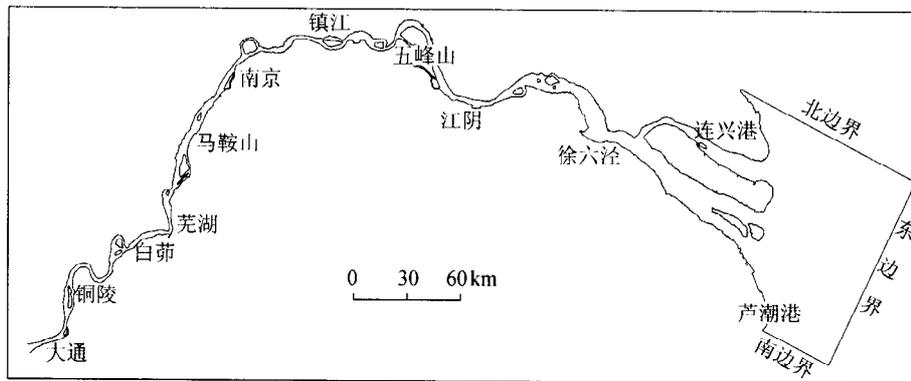


图 1 模型计算范围、边界示意图  
Fig. 1 Model range and boundaries

### 1.3 相关问题处理

计算时开边界  $\Gamma_0$  采用流速过程或潮位过程控制。闭边界  $\Gamma_c$  采用不可入条件，即流向流速为零。数值求解采用 ADI 法，动边界处理时采用冻结法。

糙率选用公式  $n = n_0 + \frac{n'}{H}$  计算，验证取值为 0.018 ~ 0.026；右端第 2 项为糙率修正值。

紊动黏性系数  $E$  采用 Smagorinsky 公式计算：

$$E = 0.1 \Delta x \Delta y \sqrt{\left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2} \quad (4)$$

使其随网格尺度及水流动力强弱自动调整，避免紊动扩散项过大引起流场失真又能增强模型稳定性。计算时间步长的选取受到网格空间步长限制，本文计算中采用 30 s。

在计算中要求各种误差的积累不会扩大，而应逐步减小，这就是差分计算的稳定性。ADI 法在计算过程中没有显示格式出现的波动现象，但也不是无条件稳定。

将动量方程  $u$  方向对  $y$  取偏导， $v$  方向对  $x$  取偏导，连续方程对  $t$  取偏导，略去所有非线性项及高阶微量项后合并，在笛卡儿坐标下可将基本方程简化为相应的线性方程：

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = gh \left( \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

相对于这一方程显示差分计算的 Courant 条件为  $\frac{\Delta t}{2} \leq \frac{\Delta s}{\sqrt{gh_{\max}}}$  ( $h_{\max}$  为水域上的最大水深), 这一稳定性条件说明差分方程的依赖区必须大于对应微分方程的依赖区. 即空间步长  $\Delta s$  不应小于物理波速  $\sqrt{gh_{\max}}$  和分步时间步长  $\Delta t$  的乘积.

实际计算表明, 可将上述稳定性条件作一些修正, 即时间步长  $\Delta t$  满足以下关系:

$$\frac{\Delta t}{2} \leq \frac{\alpha \Delta s}{\sqrt{gh_{\max}}} \quad (\alpha = 1 \sim 3) \quad (6)$$

#### 1.4 模型验证

大通到长江口水流模型尺度较大, 采用了洪(2003年7月)、枯季(2005年4月)水文测验资料进行验证. 潮位过程和同步垂线流速、流向验证结果为: 系统模型模拟的水位及流量过程其相位偏差在 1h 之内, 潮(水)位幅值偏差在 0.2 mm 以内的验证合格率 90% 以上, 流量相对误差 20% 以内的验证合格率 85% 以上. 模型也对汉道分流比进行了验证, 据实测资料, 世业洲左汉分流比为 36.3%, 本文计算得到世业洲左汉分流比为 35.8%, 右汉为 64.2%; 太平洲右汉分流比为 12.3%, 本文计算得到太平洲右汉分流比为 11.2%.

由此可见, 该模型计算的分流比与实测的分流比误差不大, 模拟精度满足规范<sup>[15]</sup>要求, 表明模型采用的边界控制条件是正确的, 模型确定的水流阻力参数也是合理的.

## 2 计算实例

某拟建码头位于镇扬河段世业洲右汉南岸镇江港高资港区, 工程位于长江的潮流界附近, 除枯季大潮有涨潮流到达本河段以外, 基本表现为单向流. 由于工程河段尺度与工程阻水桩基尺度悬殊, 为满足工程计算要求按整体与局部二维数学模型考虑, 整体模型包括大通至长江口感潮河段, 局部模型为工程区附近. 上边界取在胥浦河口附近, 下边界取在六圩河口附近, 整体模型考虑上、下游边界条件, 经验证计算后为局部模型提供边界条件; 局部模型采用精细网格, 可用于工程计算. 局部模型网格剖分为  $59 \times 282$ , 纵向最小网格步长为 7 m, 横向最小约 2.5 m. 局部模型计算网格如图 2 所示.

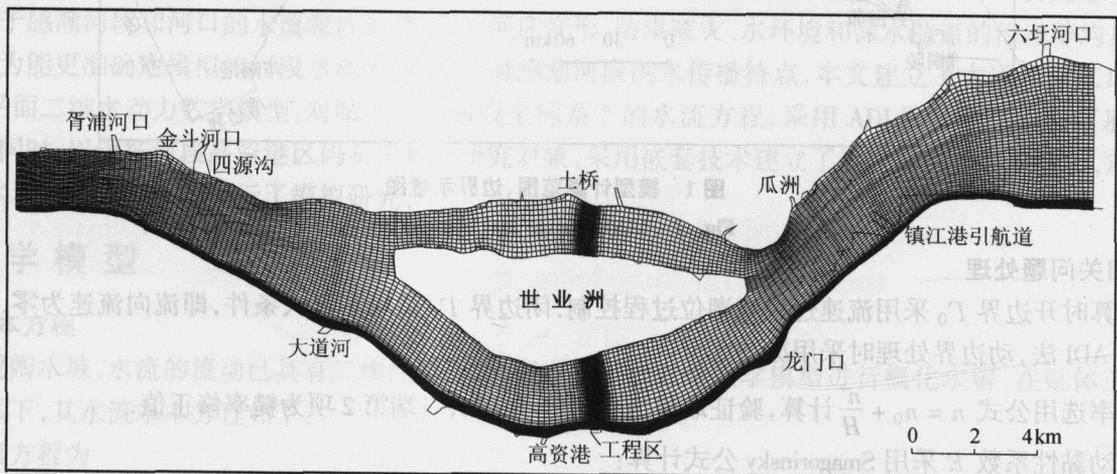


图 2 局部模型计算网格

Fig. 2 Computation grid of local mathematic model

局部模型边界控制条件由整体模型提供, 通过整体与局部模型校验点的潮位对比来检验局部模型流场与整体模型的一致性, 计算表明局部模型和整体模型潮位过程几乎重合, 说明局部模型所模拟的局部区域水流运动与整体模型保持了连续性和一致性. 同时, 流速、流向过程对比也表明, 流向过程两者基本一致, 流速过程线形状一致, 峰值一般是局部模型稍大于整体模型, 局部模型网格加密后对地形的概化更接近于实际, 局部模型的涨、落潮流速应更接近于实际.

总之, 局部模型与整体模型在水流运动及流场分布方面均有较好的一致性, 整体模型与局部模型之间嵌

套控制正确,可以采用局部模型配合整体模型的方法进行工程方案流场的模拟研究.

### 2.1 计算水文条件

工程影响计算水文条件选取长江防洪设计洪水位流量、平滩水位流量和多年平均流量,见表1.

### 2.2 工程概化

数学模型计算中必须考虑桩群阻力,由于桩的尺寸远小于计算网格尺寸,不能在模型中按照实际的尺寸进行模拟.本文在计算过程中,采用附加阻力法<sup>[16]</sup>对码头桩群阻力的阻水效果进行概化处理.

### 2.3 计算成果分析

#### 2.3.1 工程壅水分析

拟建码头工程采用高桩板梁结构,码头桩基之间透空过水,阻水作用很小,工程建成后引起的水位变化值不大,影响区域主要在码头上、下游局部区域内,表现为迎水流侧水位壅高,背水流侧水位降低,流速越大影响越大.由计算结果可知,流量越大时,码头阻水作用越大,工程建成后水位变化也越大.

在防洪设计洪水低潮位流量计算条件下,工程建成后水位变幅和影响范围都达最大,水位壅高最大值为0.012 m,水位降低最大值为0.015 m;影响范围在码头上游350 m和下游890 m的局部区域内,防汛大堤近岸水位壅高值在0.010 m以内.因而,码头工程对河道行洪水位影响甚小.表2列出了各计算水流条件下水位的最大壅高值,影响范围统计的是水位变幅为0.003 m的范围.

#### 2.3.2 工程对河道流场影响分析

工程建成后工程区河道局部流场会发生变化,流速变化主要在码头上游、码头平台两侧和码头下游局部区域.码头上游由于壅水,流速减小;码头平台两侧由于码头平台挤压水流,流速增大;码头下游区域由于受码头工程的阻水作用,流速减小.以上各组来流条件中,一般流量越大,工程对流速的影响也越大.

a. 防洪设计洪水低潮位流量计算条件下,工程建成后,码头上、下游局部区域流速减小,减小最大值为0.23 m/s,在码头下游100 m;流速减小值为0.03 m/s的影响范围在码头下游1600 m和码头上游200 m以内;码头平台外侧60~450 m范围流速略有增大,最大增大0.03 m/s,码头平台内侧流速最大增大0.05 m/s.

b. 平滩水位流量计算条件下,工程建成后,码头上、下游局部区域流速减小,减小最大值为0.15 m/s;流速减小值为0.03 m/s的影响范围在码头下游1200 m和码头上游100 m以内,码头平台外侧流速增大,增大最大值为0.02 m/s,影响范围在380 m以内,码头平台内侧流速增大0.03 m/s.

c. 多年平均流量计算条件下,工程建成后,码头上、下游局部区域流速减小,减小最大值为0.08 m/s,在码头下游60 m以内;流速减小值为0.03 m/s的影响范围在码头下游550 m和码头上游50 m以内;码头平台外侧流速最大增大0.01 m/s,影响范围在200 m以内.码头工程兴建后,对码头附近的流场影响不大,流速变化影响范围仅在码头工程局部区域.

## 3 结 语

本研究建立了大通至长江河口整体水动力数学模型,模拟计算了该河段的水流运动.从验证结果看,模型的计算潮位过程、断面流速分布均与实测过程吻合较好;计算的汉道分流比合理.以镇扬河段码头工程为例,进行了工程对洪水影响的模拟研究.

实测资料的准确和充分是保证长感潮河段洪水演进数值模拟精度的重要前提,受条件限制,本研究未考虑计算域内的支流入流情况和河道湖泊的调蓄作用以及泥沙输移及河床变形作用,这些都是今后深入研究需要考虑的内容.

表1 工程影响分析计算水文条件

Table 1 Hydrological conditions for engineering analysis and calculation

流量条件	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	镇江站水位/m
防洪设计洪水位	85 400	6.93
防洪设计洪水低潮位	85 400	5.97
平滩水位	48 000	3.77
多年平均	28 700	2.47

表2 各计算水流条件下工程建成后水位变化值及影响范围

Table 2 Variation of water levels and range under different flow conditions after project construction m

流量条件	水位变化最大值		码头上游壅水范围	码头下游降水范围
	壅高	降低		
防洪设计洪水低潮位	0.012	0.015	350	890
平滩水位	0.005	0.010	240	690
多年平均	0.003	0.005	80	160

## 参考文献:

- [1] BLACKBURN J, HICKS F E. Combined flood routing and flood level forecasting[J]. Can J Civ Eng, 2002, 29(2): 64-75.
- [2] HSUA M H, FUA Jin-chi, LIU Wei-chou. Flood routing with real-time stage correction method for flash flood forecasting in the Tan-shui River, Taiwan[J]. Journal of Hydrology, 2003, 283(1): 267-280.
- [3] 张真奇, 夏自强. 洪水预报水文水力学模型研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30(5): 83-86.
- [4] 彭静, 何少苓, 廖文根, 等. 珠江三角洲大系统洪水模拟分析及防洪对策探讨[J]. 水利学报, 2003, 34(11): 78-84.
- [5] 胡四一, 施勇, 王银堂, 等. 长江中下游河湖洪水演进的数值模拟[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 278-286.
- [6] 卢士强, 徐祖信. 平原河网水动力模型及求解方法探讨[J]. 水资源保护, 2003(3): 5-9.
- [7] 谢作涛, 罗景. 长江口一、二维嵌套水流盐度数学模型[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2007, 40(2): 7-11.
- [8] 郑国栋, 黄东, 赵明登, 等. 一、二维嵌套模型在河口工程中的应用[J]. 水利学报, 2004, 35(1): 22-27.
- [9] 马建明, 陆吉康. 防洪模拟中的地形自适应网格生成技术[J]. 水利学报, 2004, 35(2): 71-75.
- [10] 张挺, 李华, 李洪波, 等. 复式断面长河道洪水演进计算方法[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2002, 34(2): 32-35.
- [11] 宋志尧, 严以新, 朱勇. 河口涨潮沟形成水动力机制初探[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30(4): 45-48.
- [12] 陈沈良, 陈吉余, 谷国传. 长江口北支的涌潮及其对河口的影响[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2003(2): 74-80.
- [13] 吴继伟, 刘新成, 潘丽红. 长江口北支咸潮倒灌控制工程水动力数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(4): 43-45.
- [14] 张金善, 钟中, 马进荣, 等. 强热带风暴潮引起的风暴潮模拟和灾害分析评估[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2004.
- [15] JTJ/T 233—98, 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程[S].
- [16] 李国斌, 傅津先, 周维军. 平面二维水流计算中墩柱群处理方法比较[J]. 水利水运工程学报, 2001, 32(增刊): 12-15.

## Overall hydrodynamic model of Datong—Yangtze River estuary

OU Jian<sup>1,2</sup>, MA Jin-rong<sup>1</sup>, ZHANG Xing-nan<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-yan<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Department of Hydrology, Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, Hangzhou 310018, China;

3. Institute of River and Ocean, Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** In order to study the hydrodynamic characteristics of reaches downstream Datong on the Yangtze River, a two-dimensional hydrodynamic model for the tidal reach of the Datong—Yangtze River estuary was established. The water levels, discharges, river diversion ratios and flow regimes were simulated in response to runoff and tides. Based on the overall hydrodynamic model, a local mathematical model for the Zhenjiang—Yangzhou reach was set up using nested technology. The overall model provided boundary conditions for the local model calculated over the fine mesh. Using the Gaozi Port project as an example, numerical simulation was applied to the variation of water levels and flow fields under different hydrological conditions before and after the project construction. The calculated results show that the construction will not have adverse effects on water resources planning, the dike and flood safety, or the river regime.

**Key words:** hydrodynamic model; 2D horizontal model; orthogonal curve grid; nested grid; flood control evaluation; Yangtze River estuary