

长江口流场数值模拟中流速开边界条件的处理

龚 政¹ 张长宽² 张东生² 张君伦²

(1. 水利部太湖流域管理局水利发展研究中心 , 上海 200434 ; 2. 河海大学交通与海洋工程学院 , 江苏 南京 210098)

摘要 :建立了长江口平面二维流场数学模型 ,上游开边界取在徐六泾断面 ,外海开边界在佘山以东 . 上游流速开边界条件采用新的流量过程校正法进行订正 ,较好地反映了上游径流对河口流场的效应 ,弥补了当缺乏上游实测流速资料时 ,用普通的流速开边界处理方法所引起的计算偏差 .
关键词 :长江口 ;流场数值模拟 ;流速开边界条件 ;流量过程校正法
中图分类号 :TV131.4 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2003)06-0682-04

河口是径流和潮汐相互作用的区域 ,对其进行流场数值模拟时 ,开边界上的水位和流速都应作为开边界条件 ,才能真实反映径流和潮汐的作用 .流场数值模拟成果的好坏 ,很大程度上决定于给定的边界条件适当与否 .一般而言 ,给定开边界水位过程相对容易 ,但是 ,理论上要求提供高质量的流速开边界条件在实际操作上是非常困难的 .本文以长江口平面二维流场数值模拟为例 ,研究了常用的流速开边界条件处理方法及其局限性 ,并提出了一种有效的处理方法——流量过程校正法 .

1 数值模型基本情况

计算域包括三级分汊及 4 个口门在内 ,上游边界取在徐六泾断面 ,外海开边界的东边界取在佘山以东约 40 km 处 ,北边界在连兴港以北 10 km ,南边界取在芦潮港 .计算域东西总长 170 km ,南北总宽 100 km(如图 1) .

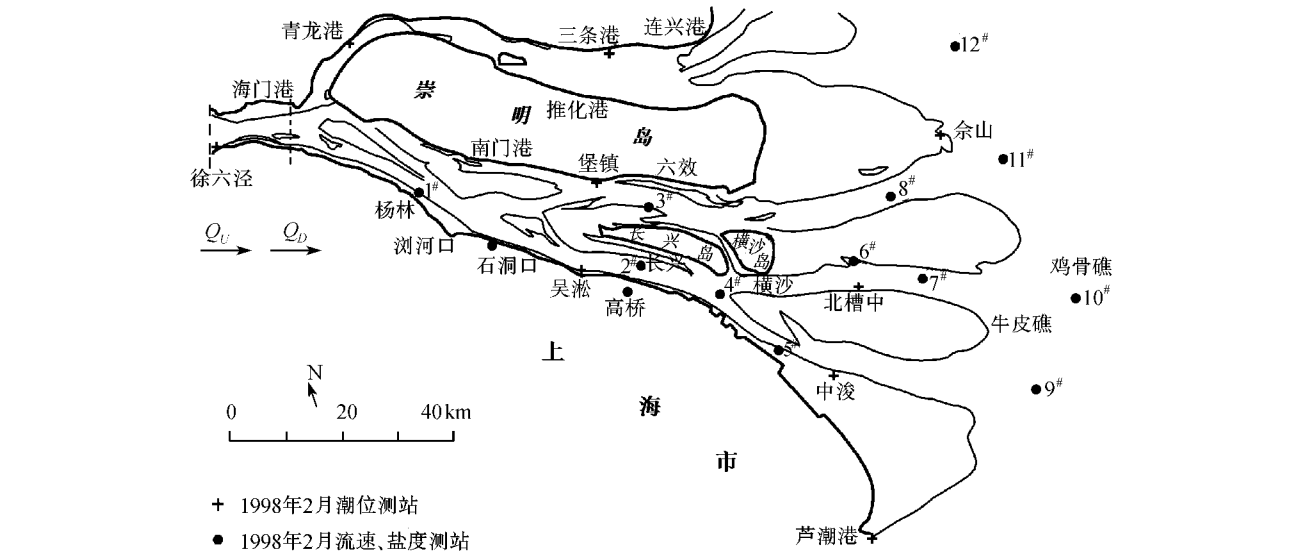


图 1 长江口
Fig.1 Yangtze River Estuary

选用 1998 年 2 月 11 日 0:00 ~ 2 月 12 日 0:45 共 24h45min 作为一个基本的潮型进行计算 .外海开边界潮位采用东中国海潮波模型^[1]推求得到 ;上游水位开边界采用徐六泾实测水位过程 .

2 流速开边界条件处理方法

在长江口地区 ,由于很难得到开边界上同步的流速过程 ,因此在对上下游水位边界进行控制的情况下 ,流速开边界处理方法中较简单的是采用对称型边界 ,即采用邻近边界的网格点流速 ,但这种方法不容易将边界上引入的误差传出计算域。为了克服上述方法的缺陷 ,在实际应用中 ,通常采用由 Reid 和 Bodine 提出、并经过多次修改得到的辐射边界条件 :

$$\frac{(u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}}{C} = \pm \frac{\zeta}{H} \tag{1}$$
$$C = \sqrt{gH}$$

式中 : ζ ——自由表面到平均水面的距离 ; u, v ——水平流速矢量 U 在 x, y 方向的分量 ; H ——平均水面到底床的距离 ; C ——长波的速度。

外海开边界一般取在离重点关心区域较远的深水域 ,如果流速 u 近似与开边界正交 ,也可以采用简化的辐射边界形式 :

$$u = \hat{u} + \frac{C}{H}(\zeta - \hat{\zeta}) \tag{2}$$

式中 : $\hat{\zeta}$ ——边界相邻网格点的水位 ; $\hat{u}$ ——边界点前一时刻的流速。使用这种形式的流速边界条件可以将内部的计算误差通过开边界传出 ,保证了计算的稳定性。

3 新的流速开边界条件处理方法

3.1 徐六泾断面边界水位控制法

为了说明徐六泾断面仅用水位控制和用水位、流量控制对流场计算结果的影响 ,先对仅用水位控制的平面二维流场模拟结果进行徐六泾断面的流量统计 ,并与 1998 年 2 月份徐六泾断面实测的平均流量进行比较。

徐六泾断面为模型的上边界 ,目前对开边界流速边界条件有不同的处理方法 ,但彼此之间会存在误差 ,因此 ,不宜直接用开边界的流速来统计该断面的流量。本文利用统计水体水量平衡的原理 ,取统计水体上游断面为徐六泾 (简称“上游断面”) ,下游断面取在徐六泾下游 15 km 水流较平顺处 (简称“下游断面”) 见图 1 ,由此构成统计水体 W 。根据水量平衡原理

$$Q_U = Q_D - W_0 + W_1 \tag{3}$$

式中 : W_0 ——统计时段初的水体总水量 ; W_1 ——统计时段末的水体总水量 ; Q_U ——统计时段 ΔT 内上游断面净泄量 ; Q_D ——下游断面净泄量 ,均以东向为正。

由此可以得到徐六泾断面的平均净流量

$$q = Q_U/\Delta T \tag{4}$$

它由无法单独分离的徐六泾径流量和外海上溯潮流量两部分组成。

通过上述统计过程 ,平面二维流场模拟的 1998 年 2 月 11 日徐六泾断面净流量约 $4\,200\text{ m}^3/\text{s}$,与实测的 1998 年 2 月平均净流量 $22\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 相差较大。

由此可以得到结论 :对感潮河段进行流场数值模拟 ,仅用水位作为边界控制条件将无法反映上游径流的效应。

3.2 徐六泾断面流量校正法

本文提出的流量过程校正法实施步骤如下 :

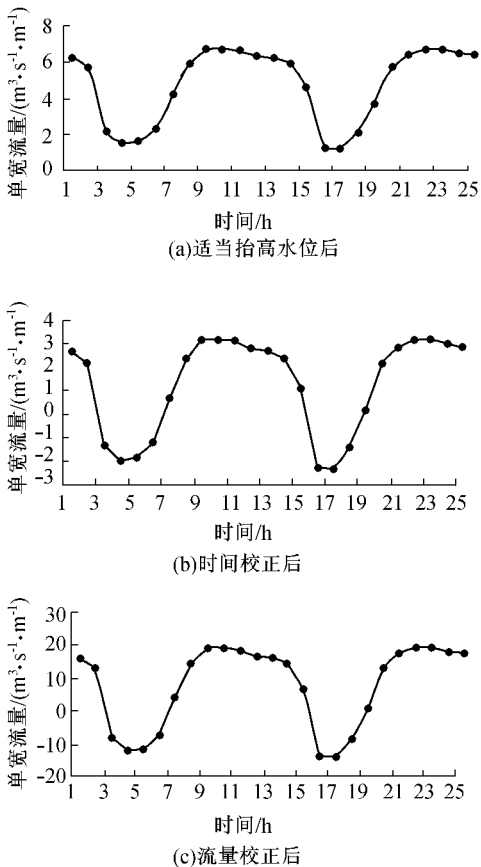


图 2 徐六泾断面单宽流量过程变换
Fig.2 Runoff procedure emendation curves
for Xuliujing section

首先,根据以往数值模拟的经验,当徐六泾断面流量较大时,断面流量每增大 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$,平均水位抬高约 1 cm .适当抬高徐六泾断面的平均水位(见图 2(a)),使统计得到的徐六泾断面净流量等于实测值,输出调整水位后徐六泾断面上节点 j 在各时刻 t 的单宽流量 $q_{j,t}$.由于抬高了水位,得到的单宽流量过程线在相位上可能有较大变化,甚至出现全为落潮流的情况,为了符合通常情况下徐六泾断面在一个半日潮周期中涨潮流历时约 4.5 h 、落潮流历时约 8 h 的规律,必须将得到的单宽流量过程线进行时间校正(见图 2(b)),同时为了再次保证断面净流量值与实测值相等,需要对单宽流量过程线进行流量校正(见图 2(c)),校正系数由调试确定,最终得到单宽流量 $q_{j,t}$.

其次,长江径流的季节性变化是十分显著的,最大的 7 月份流量是最小的 1 月份流量的 4 倍多,但由于徐六泾以下河段河面逐渐放宽,所以径流量的变化对长江口区的水位影响是不明显的.从天生港至河口的鸡骨礁,1 月和 7 月由流量变化而引起的高潮位或低潮位的变化幅度较小,仅约 $30\text{ cm}^{[2]}$.因此,当徐六泾断面流量有微小变化时,可以忽略徐六泾水位过程的变化,即:假设在徐六泾净流量调整的情况下徐六泾水位保持不变,将对应时刻 t 、节点 j 的流速 $u_{j,t}=q_{j,t}/h$ 作为徐六泾流速边界条件(h 为全水深).

由于徐六泾断面采用流量过程校正法处理后计算域内验证点的流向过程变化较小,因此,以图 1 中的 1[#]、2[#]、7[#]、10[#] 点流速大小的变化来进行分析.从图 3 可以看出,徐六泾断面的流速边界按流量过程校正法处理后,1[#]、2[#] 点落潮流得以增大,涨潮流得以减小,流速过程的拟合得到总体改善,随着向外海的推移,径流作用逐渐减弱,因此改善的效果逐渐降低.图 4 为北槽涨急和落急时刻的流场图.

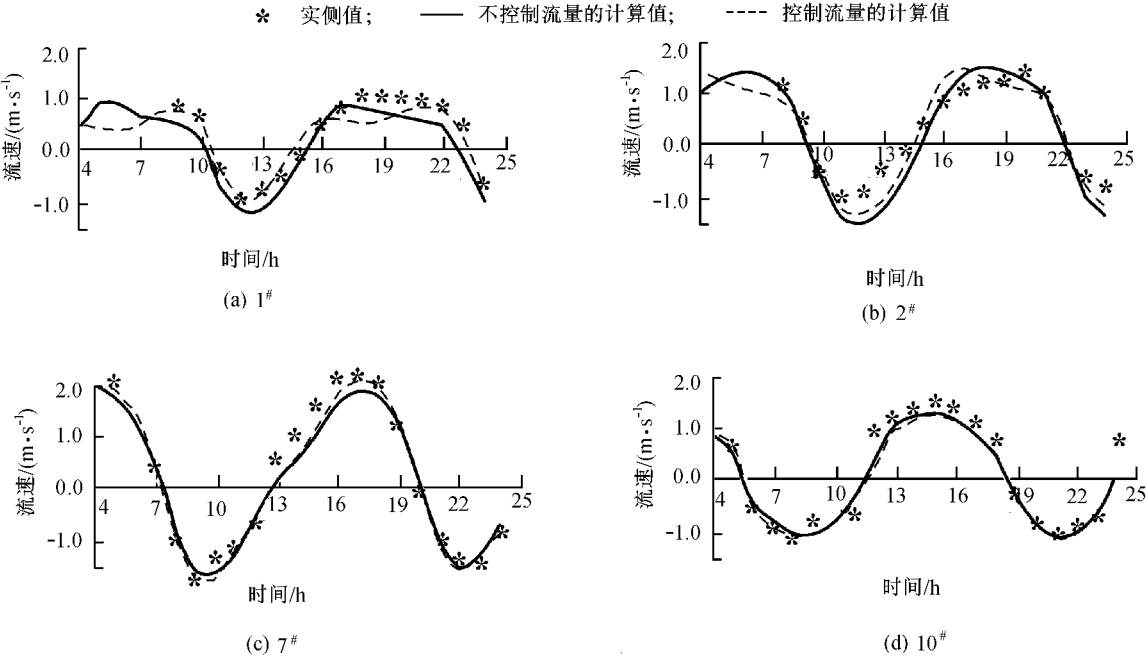


图 3 徐六泾断面流量控制前后流速

Fig.3 Velocity variation before and after runoff controll at Xuliujing section

4 结 语

对河口进行流场数值模拟时,水位开边界条件通常比较容易给定,合理给定流速开边界条件却是比较困难的,但流速开边界条件恰恰是反映上游径流量的基本因素,因此也是河口流场数值模拟成功的关键因素之一.通过分析现有几种流速边界处理方法的优缺点,提出了流量过程校正法.使用流量过程校正法前后的断面计算流量与实测流量比较以及流速比较,证明该方法可以弥补常用的流速开边界处理方法无法反映上游河道径流效应的缺陷,是一种比较有效的处理方法.

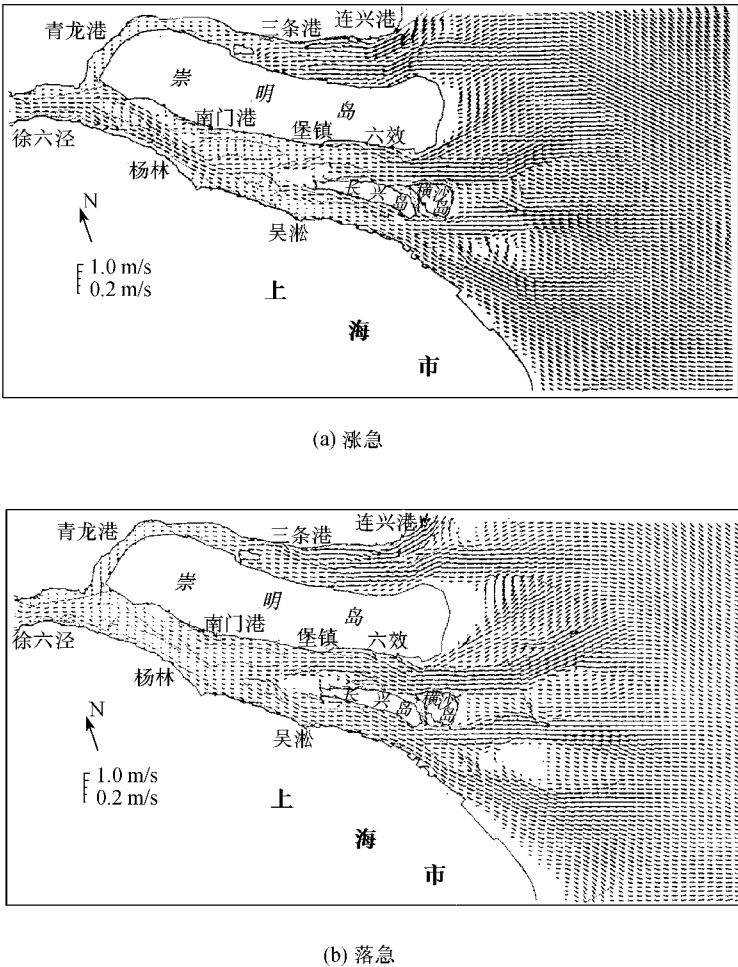


图 4 长江口流场

Fig.4 Flow field for Yangtze River Estuary

参考文献：

[1] 张东生,张君伦. 黄海辐射沙洲 M_2 潮流 [J]. 河海大学学报 ,1996 24(5) 35.
[2] 龚政. 长江口三维斜压流场及盐度场数值模拟 [D]. 南京 : 河海大学 2002.

Study on open boundary condition for numerical simulation
of flow field at Yangtze River Estuary

GONG Zheng¹ ,ZHANG Chang-kuan² , ZHANG Dong-sheng² , ZHANG Jun-lun²

(1. Water Resources Development Research Center , Authority of Taihu Lake Basin , Shanghai 200434 , China ;
2. College of Traffic and Ocean Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract :A numerical model is developed for 2-D flow field at the Yangtze River Estuary with the Xuliujing section taken as the upstream open boundary and the east of Sheshan as the open boundary of the outer sea. The runoff procedure emendation method is adopted to modify the open boundary condition of upstream flow velocity. It well reflects the effect the upstream runoff on the flow field at the estuary , overcoming the error of calculation with the common open boundary treatment method induced by lack of measured data of upstream flow velocity.

Key words :Yangtze River Estuary ; numerical simulation of flow field ; open boundary condition of velocity ; runoff procedure emendation method