



海龙湾二维潮流场数值模拟

李 颂, 林 钢

(中山大学工学院, 广东 广州 510275)

摘要: 建立了平面二维潮流场模型, 采用 MADI 有限差分方法进行离散求解, 利用动边界处理边滩以及心滩随水位升降产生的边界变动问题, 对工程海域的潮流场进行数值模拟, 并采用两套网格计算方案、使用加密网格, 深入进行潮流场的研究分析。验证结果表明, 计算的潮位和潮流过程与实测过程吻合较好, 为海龙湾工程开发利用提供了科学依据。

关键词: 潮流; 二维潮流场; 数值模拟; 动边界

中图分类号: P 731.23

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)04-0041-05

Numerical simulation of two-dimensional tidal current for Hailong bay

LI Song, LIN Gang

(Institute of Engineering, SunYat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: This paper sets up a two-dimensional current numerical model using the MADI finite difference method, applies the moving boundary to solve the problem of mobile boundary with the water level, and conducts a numerical model to simulate tidal current of the engineering area. In order to research further the tidal field research, this paper uses two sets of grid computing solutions and refined grids. The result and its verification show that the calculated process of the tidal level and current coincide fairly well with the field data, and it provides a scientific basis for the development of Hailong bay.

Keywords: tidal flow; two-dimensional tidal current field; numerical simulation; variable boundary

国内外广泛采用的潮流计算方法是 ADI 法^[1-2], 该方法兼有显示和隐式的优点, 但它将水位、水深、 x 和 y 方向流速等变量交错布置在不同的差分节点上, 不仅增加了计算上的麻烦, 而且无法充分利用计算机内存。为了克服上述缺点, 并考虑到现场实测时水深、流速均在同一个节点上的事实, 天津水运工程科学研究所发展了一种新的模拟方法——MADI 法^[3-4], 该方法的特点是将计算变量(如水位、水深、流速等)均匀布置在同一个网格节点上, 由此离散微分方程而形成新的差分代数方程, 并建立了新的解法。MADI 法

既吸收了传统 ADI 法的优点, 又具备更高的稳定性、收敛性和精度, 并充分利用了计算机内存。

广东台山海龙湾位于珠江口以西约 100 km 沿海的广海湾内, 北靠大陆, 南临南海, 东南面为上下川岛(相距约 10 km)。地处亚热带海洋性气候区, 受东亚季风影响, 全年以偏北风为主, 采用皮尔逊—Ⅲ分布进行频率计算, 得上川站 30 a 一遇设计最大风速为 37.5 m/s, 50 a 一遇设计最大风速为 41.9 m/s。根据 2005 年的洪季测流资料统计分析可知, 广海湾与川岛海域的潮流属于不规则半日潮, 每日两涨两落, 平均涨潮历时 4 h

收稿日期: 2014-07-11

作者简介: 李颂(1990—), 男, 硕士研究生, 从事港口、海岸及近海工程研究。

55 min, 平均落潮历时 7 h 40 min。根据潮流调和分析, 本海区潮流为往复流, 最大可能潮流速在大潮时为 1.98 m/s、在小潮时为 0.95 m/s。

随着国家海洋战略的实施, 广东作为海洋大省, 近岸开发利用的步伐明显加快。为实现海龙湾旅游度假区游艇码头的工程开发, 如何科学地预测海龙湾潮流流态, 成为需要解决的研究课题。海龙湾水流流态复杂, 这为数值模拟方法的选择以及有关参数的确定带来了一定的困难, 本文开发研究海龙湾平面二维潮流模型, 并对潮流场进行深入研究分析, 为工程开发提供科学参考。

1 潮流场模型

1.1 MADI 法控制方程

连续方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial (ud)}{\partial x} + \frac{\partial (vd)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{(\tau_{bx} - \tau_{wx})}{\rho d} - fv = A_x \Delta u \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{(\tau_{by} - \tau_{wy})}{\rho d} + fu = A_y \Delta v \quad (3)$$

式中: ζ 为自由表面与原始静止水面的垂直位移; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的流速分量; f 为柯氏力系数; τ_{bx} 、 τ_{by} 分别为海底剪切应力在 x 、 y 方向的分量; d 为水深; g 为重力加速度; ρ 为水的密度; A_x 、 A_y 分别为 x 、 y 方向的紊动扩散系数。

1.2 数值方法

对控制方程组进行差分离散, 时间导数取向前差分, 空间导数取中心差分。当时间从 $n\Delta t \rightarrow (n + \frac{1}{2})\Delta t$ 时, 由连续方程(1)和动量方程(2)建立差分方程整理得:

$$A_i u_{i-1} + B_i \zeta_i + C_i u_{i+1} = D_i \quad (4)$$

$$A'_{i+1} \zeta_i + B'_{i+1} u_{i+1} + C'_{i+1} \zeta'_{i+2} = D'_{i+1} \quad (5)$$

将上式用矩阵方程表示如下:

$$\begin{bmatrix} \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & A'_i & 0 & 0 & B'_i & C'_i & 0 \\ & & A_i & B_i & 0 & 0 & C_i \\ & 0 & & A'_{i+1} & 0 & 0 & B'_{i+1} & C'_{i+1} \\ & & & & A_{i+1} & B_{i+1} & 0 & 0 & C_{i+1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \vdots \\ \zeta_{i-1} \\ u_{i-1} \\ \zeta_i \\ u_i \\ \zeta_{i+1} \\ u_{i+1} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ D'_i \\ D_i \\ D'_{i+1} \\ D_{i+1} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (6)$$

将以上五对角矩阵分解为 2 个系数较简单的三对角矩阵:

$$\begin{bmatrix} \ddots & \ddots & \ddots & & 0 \\ & A'_i & B'_i & C'_i & \\ & & A_{i+1} & B_{i+1} & C_{i+1} \\ 0 & & & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \vdots \\ \zeta_{i-1} \\ u_i \\ \zeta_{i+1} \\ u_{i+2} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ D'_i \\ D_{i+1} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \ddots & \ddots & \ddots & & 0 \\ & A'_i & B'_i & C'_i & \\ & & A_{i+1} & B_{i+1} & C_{i+1} \\ 0 & & & \ddots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \vdots \\ u_{i-1} \\ \zeta_i \\ u_{i+1} \\ \zeta_{i+2} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ D'_i \\ D_{i+1} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (8)$$

对以上三对角矩阵用追赶法求解, 得出 $(\zeta, u)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}$, 再将求出的值代入式(3)的离散方程, 即可显式地求出 $v_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}$ 。同理, 当时间由 $(n + \frac{1}{2})\Delta t \rightarrow (n+1)\Delta t$ 时, 求解过程与前半步几乎相同, 只要将前述各方程中 x 与 y 、 i 与 j 、 u 与 v 进行互换即可。

1.3 计算区域^[5]

根据研究问题的需要, 本次计算采用两套网格计算方案。

- 1) 600 m 大网格计算方案。
- ①计算目的: 潮流模型验证, 为细网格计算提供边界条件。
- ②计算区域: 广海湾, 见图 1 大框范围。
- ③计算步长: 空间步长 $\Delta x = \Delta y = 600\text{ m}$, 时间步长 $\Delta t = 30\text{ s}$ 。
- 2) 10 m 细网格计算方案。
- ①计算目的: 为海龙湾工程方案提供港池的流场特征。
- ②计算区域: 海龙湾工程邻近海域, 见图 1 小框范围。
- ③计算步长: 空间步长 $\Delta x = \Delta y = 10\text{ m}$, 时间步长 $\Delta t = 3\text{ s}$ 。

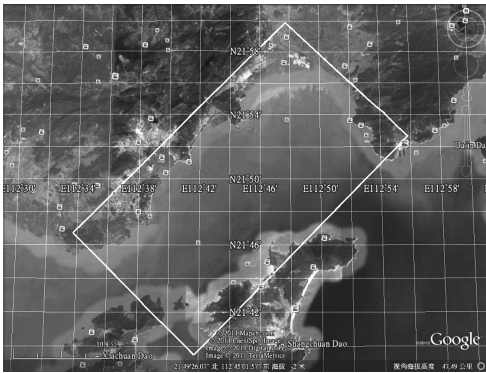


图 1 计算范围

1.4 边界处理^[6-7]

陆边界: $\partial U/\partial n = 0$, n 为边界法向。

水边界: 采用潮位过程边界条件。

动边界处理: 根据水深节点处河底高程, 判断网格单元是否露出水面, 若不露出, 糙率取正常值; 反之, 糙率取一个接近于无穷大 (如 10^{30}) 的正数。为使计算进行下去, 在露出单元水深点给定微小水深 (0.005 m)。

2 模型验证

验证资料选用 2005 年 8 月份实测资料, 大潮 08-20T11:00—08-13T12:00, 小潮 08-27T11:00—08-28T12:00。1) 潮位验证, 以计算域内的台山电厂站为验证点 (图 2)。验证结果 (图 3) 表明, 大潮、小潮的计算值与实测值吻合良好。2) 潮流

验证, 流速流向仅有大潮的数据, 选取 7[#]、8[#]、9[#] 共 3 个点进行验证 (图 2)。验证结果 (图 4) 表明, 计算值与实测值基本吻合。

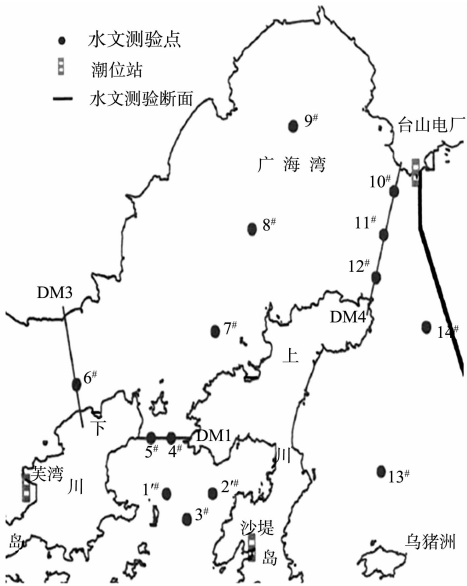


图 2 计算区域及潮位潮流测点

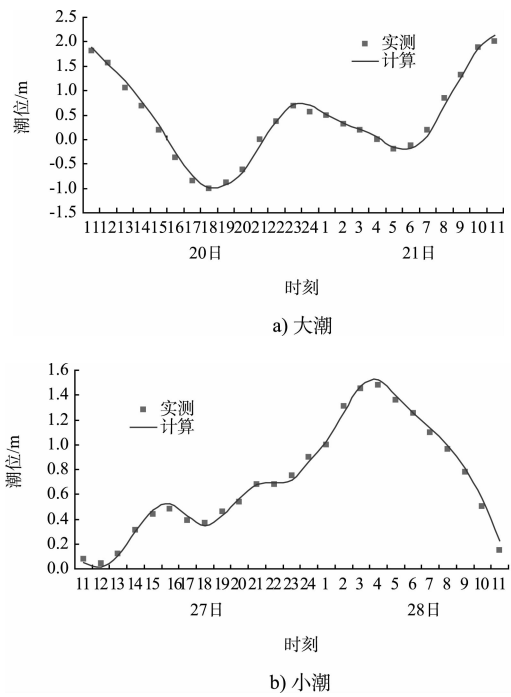
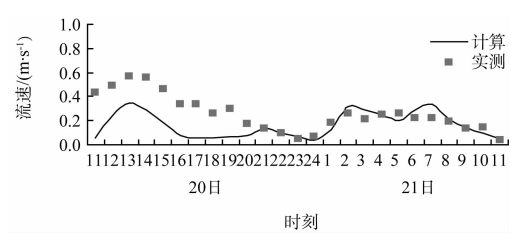


图 3 台山电厂站潮位过程验证



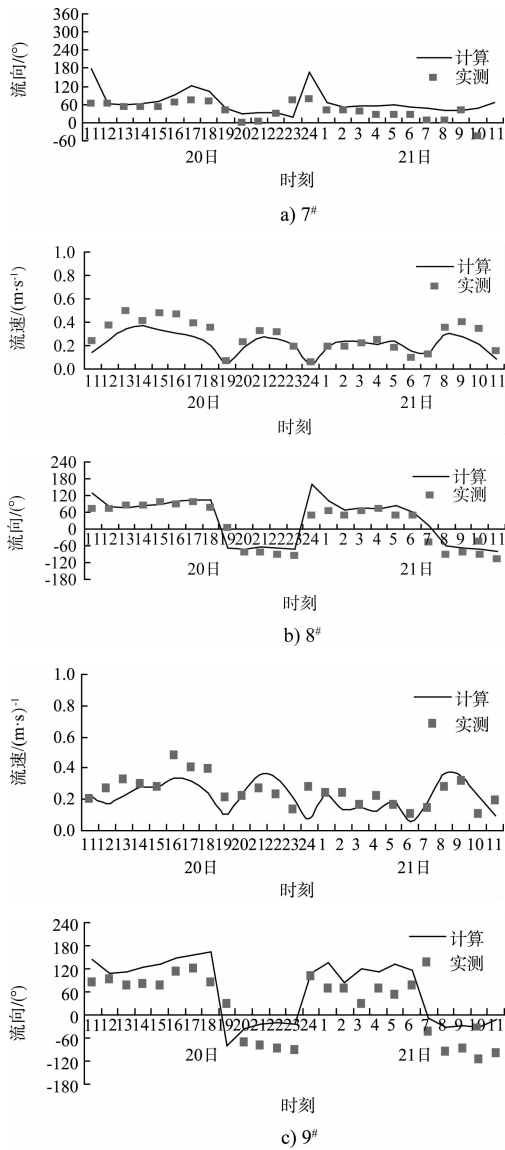


图 4 不同测点大潮流速流向过程验证

3 潮流场分析

3.1 广海湾流场基本特征分析

潮流场数值模拟计算显示 (图 5、6, 阴影表示潮滩干出), 大潮时, 潮流往复特征比较明显, 广海湾 3 个口门共同涨落的时间较长, 东进西出的时间较短, 说明海区更像一个半封闭的海湾, 海峡的特征很弱, 较有利于泥沙的沉积而不是输运; 小潮时, 潮流往复特征比较不明显 (实测小潮过程接近全日潮), 潮流摆动强度弱于沿岸流, 广海湾 3 个口门东进西出的时间较长, 共同涨落的时间几乎没有, 流向始终是向西, 潮汐只是调整流动强度作用, 而无法扭转流向, 说明海区更像一个单向输运的海峡, 海湾特征很弱, 较有利于泥沙的输运而不是沉积。

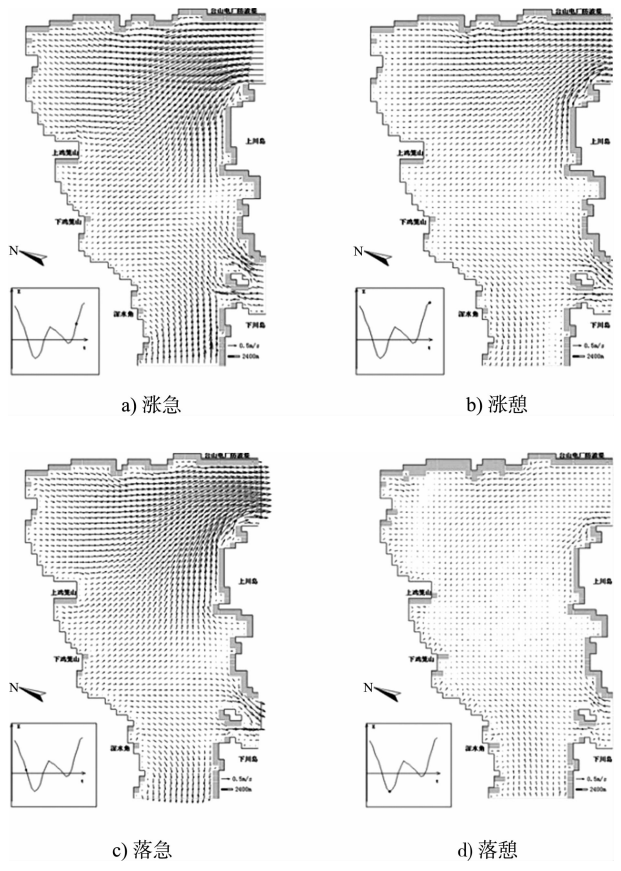


图 5 广海湾大潮潮流场 (600 m 网格)

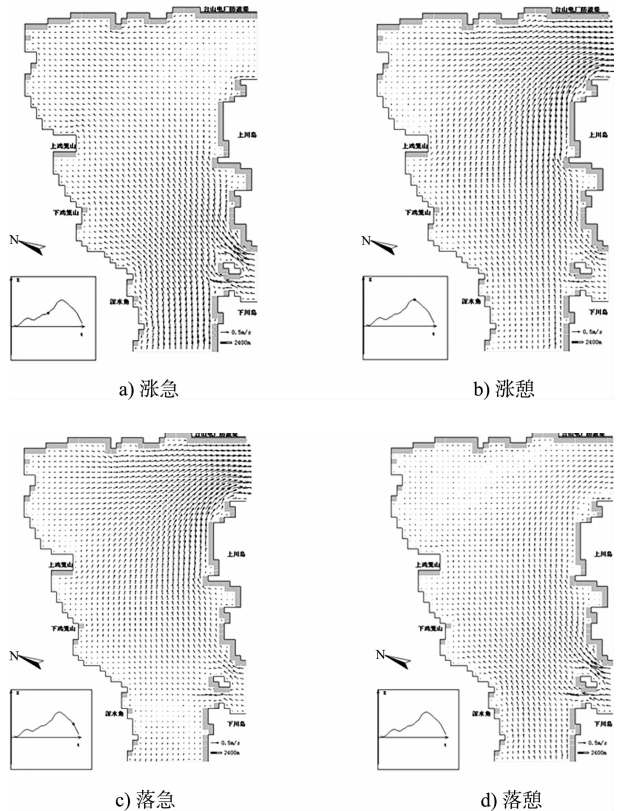


图 6 广海湾小潮潮流场 (600 m 网格)

3.2 工程岸线附近流场特征分析

潮流场数值模拟计算显示 (图 7、8, 阴影表示潮滩干出), 4 个港池内部流速很小, 随着外部潮汐水位流入及流出的吞吐变化。大潮时, 港池外部呈较典型的往复流特征, 除了港池口附近区域, 沿岸流态基本保持与岸线平行的往复流状态。小潮时, 港池外部呈单向波动流特征, 除了港池口附近区域, 沿岸流态基本保持与对比岸线平行的向东流的状态。从大、小潮特征对比来看, 大潮流速明显大于小潮, 且流态差异较大, 说明海区泥沙及沉积物的输运变化过程较为复杂。

4 结 论

1) 潮流场的大网格数值模拟显示, 广海湾作为一个有 3 个出口的海湾, 在不同的潮型下, 有

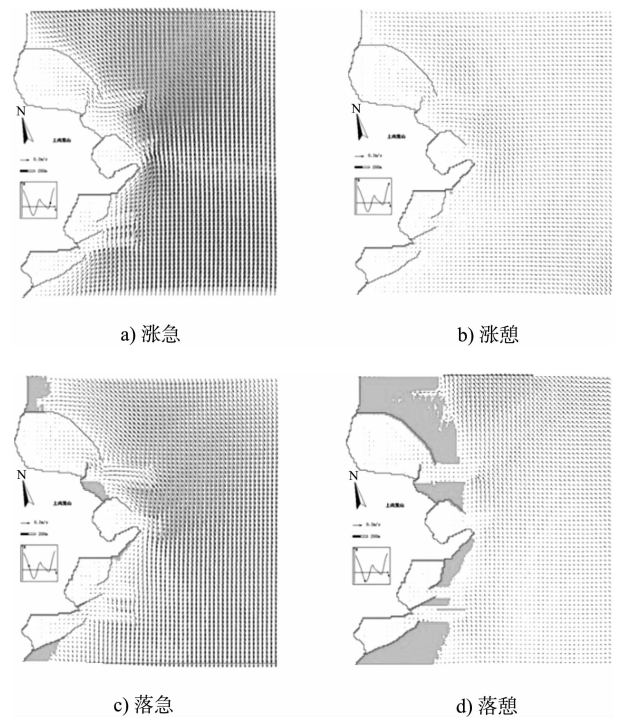


图 7 工程海域大潮潮流场 (10 m 网格)

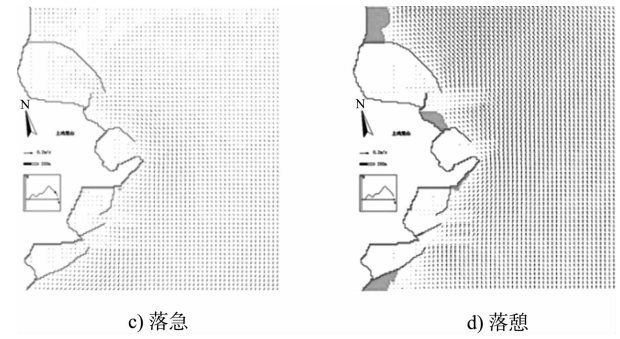
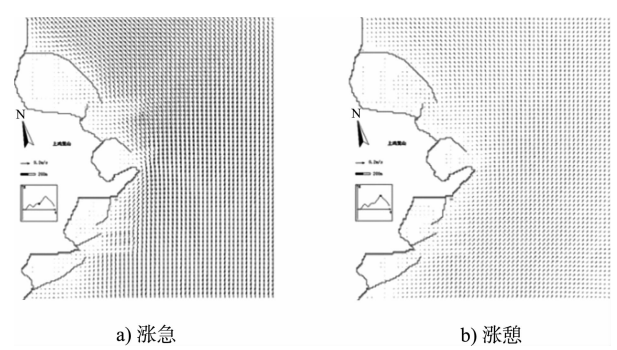


图 8 工程海域小潮潮流场 (10 m 网格)

两种特征: ①大潮时, 海区像是一个半封闭的海湾, 较有利于泥沙的沉积而不是输运; ②小潮时, 海区像是一个单向输运的海峡, 较有利于泥沙输运的而不是沉积。

2) 工程附近海区小网格潮流场数值模拟显示, 4 个港池内部流速很小, 随着外部潮汐水位流入及流出吞吐变化。①大潮时, 港池外部呈较典型的往复流特征, 沿岸流态基本保持与岸线平行的往复流状态。②小潮时, 港池外部呈单向波动流特征, 沿岸流态基本保持与岸线平行的向东流的状态。大、小潮流态的较大差异, 表明海区泥沙及沉积物的输运变化过程是较为复杂的。

参考文献:

[1] Lardner R W, Belen M S, Cekirge H M. Finite difference model for tidal flows in the Arabian Gulf[J]. Computers & Mathematics with Applications, 1982, 8(6): 425-444.

[2] Chau K W, Jin H S, Sin Y S. A finite difference model of two-dimensional tidal flow in Tolo Harbor, Hong Kong[J]. Applied Mathematical Modelling, 1996(4): 321-328.

[3] 郭玉臣, 徐小明, 张静怡. 二维浅水数值模拟的有限差分 MADI 法[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008(6): 769-772.

[4] 邱兆山. 有限体积法及其在近岸潮流计算中的应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.

[5] 汤军健, 温生辉, 陈楚汉. 海坛海峡二维潮流场数值模拟[J]. 台湾海峡, 2006(4): 533-540.

[6] 孙健, 陶建华. 潮流数值模拟中动边界处理方法研究[J]. 水动力学研究与进展, 2007, A(1): 44-52.

[7] 林钢. 二维潮流悬沙动边界数值模拟研究[J]. 水运工程, 2006(11): 83-86.

(本文编辑 武亚庆)