

考虑粘性作用情况下船在船厢中运动的水动力学分析

董俊哲*, 李宝元

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023)

摘要:从根据浅水特性在垂直方向所平均化的 N-S 方程出发, 利用有限元计算船舶进出船厢时的水动力学过程和船舶运动过程中的升沉、纵倾及船舶与厢底的最小间隙。由于在平均过程中保留了粘性项, 同时产生了底摩擦项, 使得到的数学方程更接近真实物理问题, 另一方面也增加数值计算的稳定性。本文提出了随非惯性系一起运动的开边界的辐射条件。关于压力的求解, 在船底与自由表面分别利用压力泊松方程求压力及自由表面利用连续方程求波高的求解方法。由针对三峡升船机的数值模拟的计算结果看, 计算结果合理, 计算方法稳定。

关键词:有限元法; 浅水波动方程; 粘性; 移动网格方法

中图分类号: O241.8 **文献标识码:** A

1 引言

在三峡升船机的设计与建造的过程中, 船进出船厢时的水动力学计算是最重要的课题之一。由于船厢的尺寸相对普通河道来说非常狭小, 船在这样狭窄的有限域中运动与船在无限域中运动相比有许多不同的特点。第一, 船在狭窄的有限域中运动, 会产生半活塞效应, 即由于船推动的水不易四处散开, 会在船的前面与船厢壁之间积聚, 使水面有较大幅度的升高; 而船的后面会由形成水凹。这种状态下, 船将有一定程度的倾斜, 如果倾斜度过大, 船便处于危险的状态。而较大的波幅又意味着计算过程中较强的非线性, 增加计算的难度。第二, 对于船在船厢中运动的问题, 人们更关心的不是船的运行的阻力, 而是船厢水量的变化, 船与船厢底部最小间隙, 兴波及其衰减等与安全相关的问题, 研究这些问题时, 能量的耗散是不能忽略的。第三, 在研究船在无限域中运动的问题时, 人们通常是建立连船坐标系, 以及该坐标系下的无穷运动边界条件, 使计算域相对连船坐标系来说变为一个固定不变的区域, 因而可用固定网格离散; 而研究船在船厢中运动时, 无论坐标系建立在船厢上还是

在船上都避免不了移动网格的问题。

对于船进出船厢问题, 盛正为等^[1]提出了一个一维的水动力学模型, 进行计算并作了船模试验。吴健康^[2-4]则从二维的浅水波动方程出发, 采用伯努力方程求解压力, 采用有限元计算船变速驶进驶出船厢的水动力过程, 浅水波动方程中的耗散项以底摩擦形式给出。

本文采用二维浅水方程计算船进出船厢的水动力学过程。浅水方程除保留底摩擦项外, 还加进了粘性项; 采用了速度在整个计算域求解, 压力与波高分区求解方法, 所谓分区求解是指船底压力在压力表面域利用压力泊松方程求解, 波高在自由表面域利用连续方程求解, 分区求解压力时提出了利用吃水线外侧波高表达的关于压力泊松方程的一类边界条件。本文采用了连船非惯性坐标系, 提出了随非惯性坐标系一起运动的开边界的辐射条件。

采用本文的方法, 按三峡升船机设的尺寸, 分别以船速 0.5 m/s, 0.7 m/s 和 1.0 m/s 做了船进出船厢的水动力学计算, 算法具有很好的稳定性, 计算结果合理。

2 浅水波动问题基本方程

2.1 船进出船厢的基本问题

船通过引航道进出船厢的问题被简化为船在单无限浅窄航道运动的问题如图 1 所示。图中

收稿日期: 2007-01-21; 修改稿收到日期: 2009-04-14.

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20040386004)资助项目.

作者简介: 董俊哲* (1971-), 男, 博士生
(E-mail: julius@dlut.edu.cn).



图 1 计算域的基本描述
Fig. 1 Domains for computation

$A'C'D'$ 围成的区域 $E1$ 为船的吃水面下的水域,定义为压力表面域; $ABCD$ 与 $A'C'D'$ 之间的区域 $E2$ 为与大气接触的表面下的水域,定义为自由表面域。为方便计算中自动移动网格,把坐标系固接在船上,坐标系与船一起做水平的主动运动,但不随船一起做升沉、纵摇及横摇运动。由于船进出船厢的运动含有加速和减速过程,故连船坐标系 oxy 为非惯性系。图中 AB 为船厢端面, AD 与 BC 为船厢或引航道侧面, CD 为人工选取的与船保持固定距离的与非惯性系一起运动的开边界。

2.2 浅水波动方程

二维浅水方程是由三维的动量方程沿竖直方向积分得到的,竖直方向的运动方程简化为静平衡方程。考虑粘性项的影响,浅水波动的基本方程为

质量连续方程:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

非守恒型的运动方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial (pp)}{\partial x} + X = \\ \frac{1}{\rho H} (\tau_x^s - \tau_x^b) + \frac{\epsilon}{H} \left(\frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q_y}{\partial y^2} \right) + \\ \frac{\epsilon}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \end{aligned} \tag{2}$$
$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial (pp)}{\partial y} = \\ \frac{1}{\rho H} (\tau_y^s - \tau_y^b) + \frac{\epsilon}{H} \left(\frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q_y}{\partial y^2} \right) + \\ \frac{\epsilon}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \end{aligned} \tag{3}$$

式中 u 和 v 为平均后的水平方向的速度, ρ 为水的密度, ϵ 为粘性系数, ξ 为波高, $H = h + \xi$ 为总水深, h 为静水深, $q_x = Hu$, $q_y = Hv$ 为体积流量, $pp = p_s + \rho g \xi$ 为平均水平压力, p_s 为表面压, τ_x^s 和 τ_y^s 为表面摩擦力, τ_x^b 和 τ_y^b 为底部摩擦力, 分别定义为

$$\tau_x^s = \rho g u \frac{\sqrt{(u^2 + v^2)}}{c_1^2}, \quad \tau_y^s = \rho g v \frac{\sqrt{(u^2 + v^2)}}{c_1^2} \tag{4}$$

$$\tau_x^b = \rho g u \frac{\sqrt{(u^2 + v^2)}}{c_2^2}, \quad \tau_y^b = \rho g v \frac{\sqrt{(u^2 + v^2)}}{c_2^2} \tag{5}$$

式中 c_1 和 c_2 为 Chezy 系数。

将式(1)对时间求导数,式(2)对 x 求导数,式(3)对 y 求导数后相减,得压力泊松方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{H}{\rho} \frac{\partial (pp)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{H}{\rho} \frac{\partial (pp)}{\partial y} \right] = \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - \\ \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial (q_x v)}{\partial x} + \frac{\partial (q_y v)}{\partial y} - \frac{1}{\rho} (\tau_y^s - \tau_y^b) \right] - \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial (q_x u)}{\partial x} + \frac{\partial (q_y u)}{\partial y} + HX - \frac{1}{\rho} (\tau_x^s - \tau_x^b) \right] + \\ 2\epsilon \nabla^2 \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \end{aligned} \tag{6}$$

初始条件: 本文选取初始时刻船与水均静止, 故当 $t = 0$ 时,

$$u = 0, v = 0, \xi = \begin{cases} 0 & (\text{自由表面}) \\ S_0 & (\text{压力表面}) \end{cases}, pp = 0$$

式中 S_0 为船的静吃水深度。(这里定义吃水深度为代数值,水平面上为正,水平面下为负,同波高定义)。

边界条件: 考虑粘性作用影响,在固壁边界上采用粘附条件,在与船保持固定距离的开边界上采用辐射边界条件。相对于非惯性坐标系,各边的边界条件具体表示为

端面 1 边: $u = -u_{ch}, v = 0$

侧面 2 边和 4 边: $u = -u_{ch}, v = 0$

开边界 3 边,取相对船不动的开边界时,辐射边界条件:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + (c \pm u_{ch}) \frac{\partial \xi}{\partial x} = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + X + (c \pm u_{ch}) \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \tag{8}$$

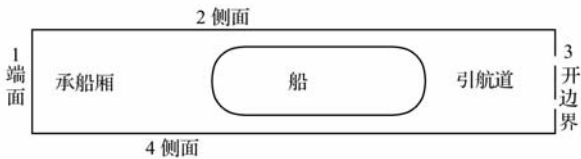


图 2 边界条件示意图
Fig. 2 Boundary conditions on each side

式中 c 为波速, $c = \sqrt{gh}$, X 为坐标系在 x 方向的加速度, u_{ch} 为船相对船厢的 x 方向分速度, 式中正负号取决于船驶进还是驶出船厢, 驶进时取负号, 驶出时取正号。

3 有限元法求解

当某一时刻水的运动速度, 自由表面波高, 压力表面压力已知, 并且船在该时刻的位置、姿态(吃水深度)、运动速度也已知, 求解下一时刻水的运动可如下处理:

- (1) 利用非守恒型运动方程(2)、(3)在整个计算域 $E1 + E2$ 上求水在下一时刻的运动速度。
- (2) 利用连续方程(1)在自由表面域 $E2$ 上求下一时刻的水深 H 或波高 ξ 。
- (3) 利用压力泊松方程(6)在压力表面域求下一时刻压力表面的压头 pp , 进而再利用 pp 的定义求出下一时刻船底所受压力分布。
- (4) 采用四边形等参元。

求解压力泊松方程需给出压力表面的关于 pp 的边界条件, 本文给出了关于 pp 的一类边界条件, 即 $pp = \rho g \xi + p_a$, 其中 p_a 为大气压。

4 算 例

算例中, 船长 90 m, 船宽 16 m, 船厢长 120 m, 船厢宽 18 m。船进船厢时, 船初始位置选为船头离船厢端面 AB140 m 处, 开边界 CD 选在离船尾 110 m 处。初始时刻船及水处于静止状态, 然后船以 0.1 m/s^2 的加速度分别加速到 1 m/s , 0.7 m/s , 0.5 m/s 后匀速行驶, 行驶到船厢端面附近, 以 0.1 m/s^2 的加速度减速, 减至船停止, 停止时船头距船厢端面 15 m。船出船厢时, 船初始位置选在船尾离船厢端面 15 m, 开边界选在离船头 110 m 处, 船从静止状态以 0.1 m/s^2 的加速度加速至 1 m/s 后匀速行驶, 直至船离开船厢。图 3(a~f) 给出了船按速度 1 m/s 进船厢时的波形图, 图 4(a~c) 给出了船以 1 m/s 速度出船厢时的波形图, 图 5 和

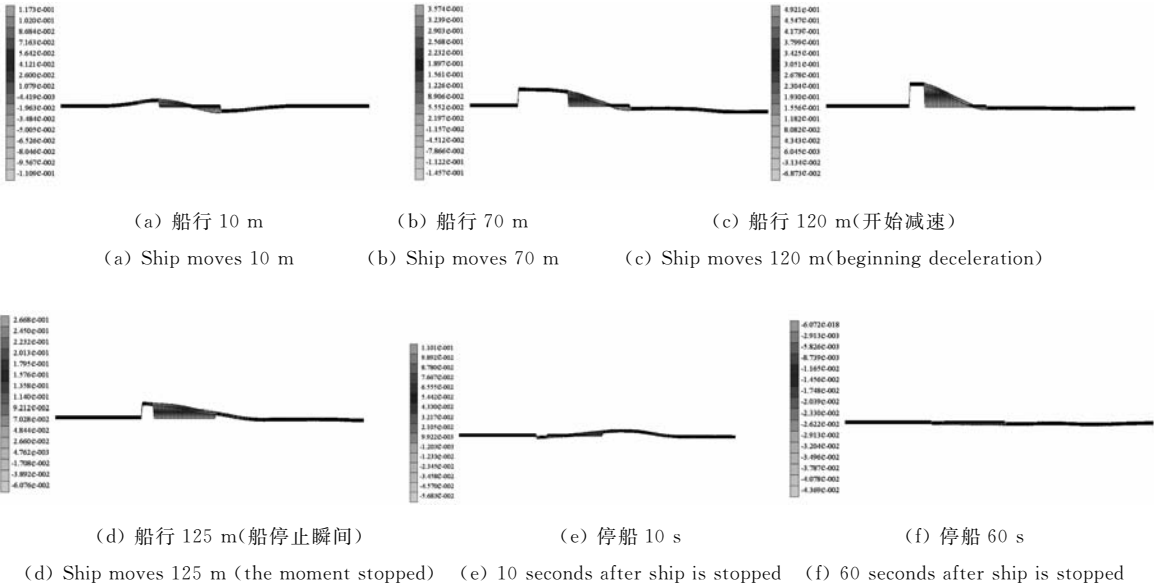


图 3 船驶入船厢过程中的波形图
Fig. 3 Wave patterns of ship moving into ship chamber

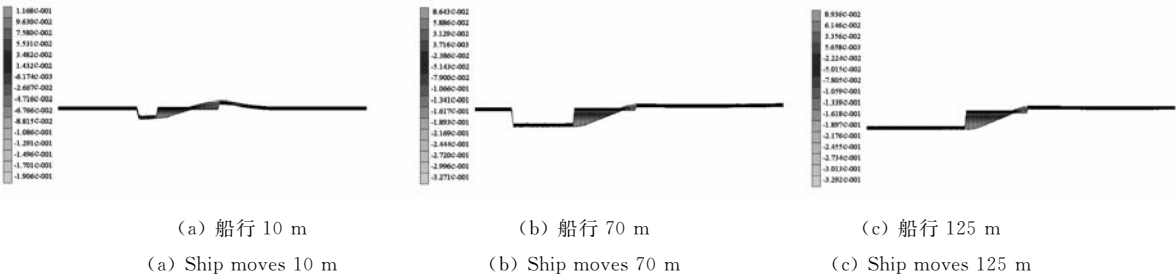
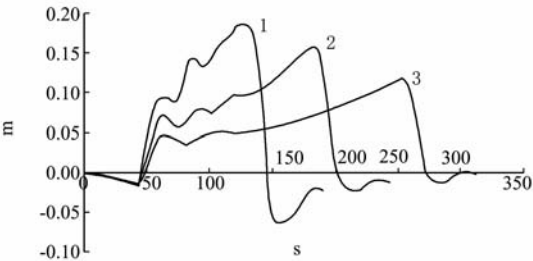
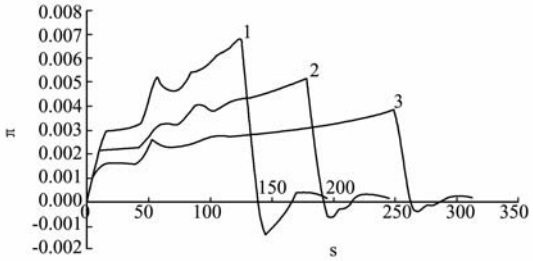


图 4 船驶出船厢过程中的波形图
Fig. 4 Wave patterns of ship moving out of ship chamber



1. 船速 1 m/s,2. 船速 0.7 m/s, 3. 船速 0.5 m/s
图 5 船进船厢时升沉随时间的变化
Fig. 5 Elevation of ship into chamber according to speed



1. 船速 1 m/s,2. 船速 0.7 m/s, 3. 船速 0.5 m/s
图 6 船进船厢时纵倾随时间的变化
Fig. 6 Pitching of ship into chamber according to speed

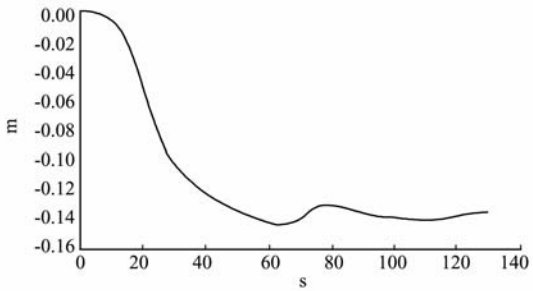


图 7 船出船厢时升沉随时间的变化
Fig. 7 Elevation of ship out of chamber

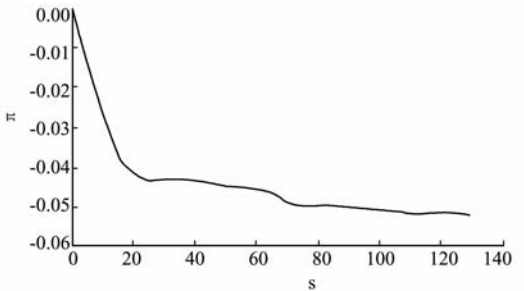


图 8 船出船厢时纵倾随时间的变化
Fig. 8 Pitching of ship out of chamber

图 6 分别给出了船以不同速度进船厢时的升沉与纵倾随时间的变化,图 7 和图 8 分别给出了船以 1 m/s 的速度驶出船厢时的升沉与纵倾随时间的变化。

从上述计算结果可以看出:

(1) 船在狭窄的有限域进出船厢的过程中,在船前出现堆水,船后出现水凹,计算结果证实了半活塞效应的存在,随着船速的增大,半活塞效应更趋明显。

(2) 波形结果显示,当船驶进承船厢,停止行驶 1 分钟后,水面基本恢复原水平面,表明虽经过长时间的计算,质量守恒仍然能基本保证。

(3) 升沉结果表明,当船驶进承船厢时,水被推进船厢,船厢的水位升高,船上升;当船驶出承船厢时,水被推出船厢,船厢水位下降,船下沉,结果合理。

(4) 工程上关心船与船厢的最小间隙。当船驶进承船厢时,纵倾使船尾下降,但整个船上升,船与船厢的间隙的变化量为船的上升量减去船尾由于纵倾引起的下降量;而当船驶出承船厢时,纵倾引起船尾下降,整个船也下沉,船与船厢的间隙的变化量为船的下沉量加上由于船尾纵倾引起的下降量。所以从关心船与船厢的最小间隙的角度出发,船驶出承船厢时应加倍关注。

5 结 论

本文采用的浅水方程,加进了粘性项,改善了计算模型,使数学方程更逼近真实物理问题,改进的模型大大加强了计算的稳定性,更好的满足质量守恒性,计算结果合理。计算结果表明:船在船厢中运动,会产生半活塞效应,船前产生堆水,船后产生水凹;当船驶进承船厢时,船会上升,当船驶出承船厢时,船会下沉;船与船厢的最小间隙更可能出现在船驶出承船厢的过程中。

参考文献(References):

[1] 盛正为,糜振星,刘应中. 浅水狭航道中船舶变速航行的一维理论[J]. 中国造船,1987, 3: 18-25. (SHENG Zheng-wei, MI Zhen-xing, LIU Ying-zhong. One-dimension theory for unsteady ship in shallow and narrow channel[J]. Shipbuilding of China,1987, 3:18-25. (in Chinese))

[2] 吴健康. 二维浅水狭航道船舶变速航行的有限元计算[J]. 水动力学研究与发展,1994, 9(4):420-428. (WU Jian-kang. Finite element calculation of two-dimensional unsteady flows caused by a ship moving with varying speed in a retriected shallow waterway [J]. J Hydrodynamics Ser A, 1994, 9(4): 92-100. (in Chinese))

[3]

WU J K. Numerical study of square-stern ship wave in shallow water[J]. *Chinese J Hydrodynamics Ser B* No. 3, 1997;92-100.

[4]

WU J K, TANG J P. Natural frequencies of shallow water waves in the ship reception chamber of a ship lift[J]. *Journal Huazhong (Central China)University of Science and Technology*, 1995,**23** (10): 98, 1000-8616.

[5]

CLARKE D. Calculation of the added mass of circular cylinders in shallow water[J]. *Ocean Engineering*, 2001,**28**(9):1265-1294.

[6]

LI M J, WU X H. Simulation calculation and comprehensive assessment on ship maneuverabilities in wind. Wave Current and Shallow Water[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 1990,**2**(4): 59-72, 1001-6058.

Hydrodynamic analysis of viscous water wave caused
by ship moving in ship chamber

DONG Jun-zhe* , LI Bao-yuan

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In this paper, the shallow water equation and FEM are used to analyse the horizontal movement, flicker and the least clearance between the ship bottom and the ship-chamber when the ship is driven into and out of the chamber. The shallow water equation used in the paper including not only the bottom friction part, but also the viscosity part, which, on one hand, makes the equation more similar to physical problem, on the other hand, increases the stability of results. The paper gives out the non-reflection boundary conditions for open boundaries, which move with non-inertial coordinate system; the method to solve pressure of pressed surface with Poisson equation and the method to solve wave height of free surface with continuity equation. As to the engineering condition of ship elevator for Three Gorges, a series of calculation are carried out, show stable computations, and provide reasonable results.

Key words: FEM; shallow water equation; viscosity; grid-moving method