

# 数值模拟船舶驶出构皮滩船闸过程

孟庆杰, 万德成

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室 船舶海洋与建筑工程学院

高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

## 摘要

为研究船舶驶出船闸过程的水动力性能, 预报船舶在构皮滩水域航行的可行性, 本文以乌江构皮滩船闸为计算环境, 结合重叠网格技术, 采用 Level-set 自由面捕捉方法, 以及 PISO 算法求解不可压缩 RANS 方程和  $K-\omega$  SST 湍流模型, 综合考虑粘性流动与自由面, 在全相似条件下, 对船舶驶出构皮滩船闸过程进行数值仿真, 展现船舶驶出构皮滩船闸过程的流场情况。对船舶驶出构皮滩过程的阻力、侧向力、转舵力矩、船体周围水流速度等信息进行分析, 为船舶在构皮滩水域的航行、操纵提供数据支持与参考。

**关键词:** 构皮滩; 船闸; 重叠网格

## 1 引言

为加快贵州省经济社会的快速发展, 贵州省政府决定打通乌江航运, 建设乌江构皮滩水电站翻坝运输系统, 改写贵州没有四级航道和闸坝过船设施的历史。为此, 贵州省政府投资 35 亿, 按 IV 级航道、500 吨级船型标准同步建设构皮滩水电站通航建筑物。由于构皮滩水域水位差大, 构皮滩水域采用垂直升船机实现船舶顺利通航。其中, 第一、三级垂直升船机采用下水式, 为国内规模最大的下水式升船机; 第二级垂直升船机提升高度 127 米, 是目前世界上提升高度最大的垂直升船机, 其塔柱高度、提升高度参数指标居世界第一。

但由于闸室水域环境具有水浅、航道窄等特殊性, 船闸在驶入驶出闸室的过程中, 对船舶操纵性要求非常高。Vrijburcht (1988) 利用 six-waves-model 对船舶驶入船闸过程的船体兴波进行了研究。Vergote (2012) 对 six-waves-model 进行了完善。Chen (2010) 提出了 viscous frictional 模型来计算船-闸的相互作用。Delefortrie et al. (2008, 2009) 对不同船型驶入第三组巴拿马运河的船舶水动力性能进行了研究, 并对引墙形式、偏心距离、螺旋桨转速、水深等因素进行了讨论。Wang et al. (2014) 在不计及自由面的情况下, 利用 fluent 对船舶驶入 Pierre Vandamme Lock 过程进行了数值研究。Meng et al. (2015) 利用自主开发程序, 综合考虑自由面与粘性的影响, 对 12000TEU 船型驶入第三组巴拿马船闸过程进行了数值研究, 并对航速、水深以及偏心距离等进行了研究。

为研究船舶驶出构皮滩船闸过程的水动力性能, 预报船舶在构皮滩船闸运行的可行性, 本文对船舶以 1.0m/s 航速驶出构皮滩船闸过程进行数值预报与分析。本计算采用基于有限差分方法(FDM) 自主开发的粘性求解器。该求解器在解决限制水域船舶水动力性能方面可靠性较高(Meng et al. 2014, 2015)。考虑到闸室环境阻塞系数较高, 当船舶驶出闸室, 闸室内水流将被推出闸室而不能及时回流。这将导致闸室内水位下降, 船舶所受阻力增加。为保证仿真的准确性, 本计算计及自由面的变化。此外, 为保证在整个过程中网格具有良好的正交性, 避免由于网格变形或重构带来的精度、效率下降问题, 本次计算采用重叠网格方法。通过对整个过程中船舶所受阻力、侧向力及转舵力矩的分析以及船体周围水流速度等信息的考察, 为船舶在构皮滩水域的航行、操纵提供数据支持与参考。

## 2 控制方程

本文采用无量纲化方式对船舶静水流场进行模拟计算。其控制方程可写为：

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re_{eff}} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

方程中所有变量都据船舶运动速度 $U_0$ ，长度 $L_{pp}$ 以及水密度 $\rho$ 进行无量纲化，进而得到有效雷诺数 $Re_{eff}$ 以及Froude数：

式中，

$$\frac{1}{Re_{eff}} = \frac{1}{Re} + u_i = \frac{u}{U_0 L} + u_i, Fr = \frac{U_0}{\sqrt{g L}} \quad (3)$$

$\gamma_t$ 为无量纲化的湍动粘度。 $P = \frac{P_{abs}}{\rho U_0^2} + \frac{z}{Fr^2} + \frac{2}{3}k$ 。 $P_{abs}$ 为绝对压力值， $z$ 为垂向坐标， $k$ 为湍动能。

## 3 仿真设计

本文研究的是一艘集装箱船自构皮滩船闸驶出宽阔水域过程中船舶水动力性能及流场的变化情况。

### 3.1 船闸模型

本次计算以构皮滩水域实际环境为计算环境。船闸及引航河道模型见图1及图2。计算中船闸按缩尺比1:10进行。

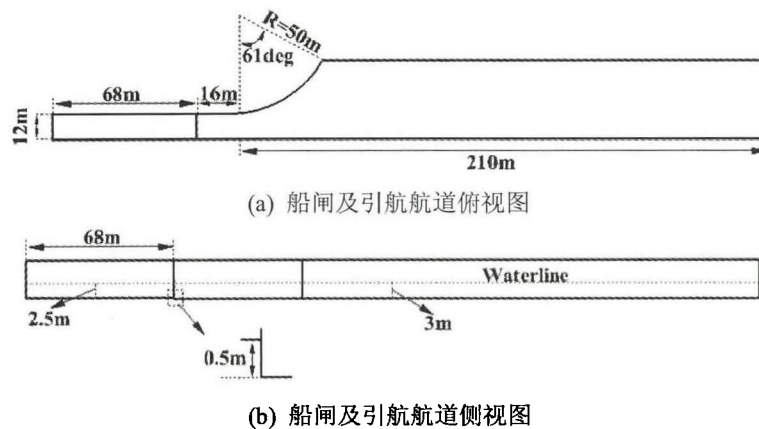


图1 构皮滩船闸计算模型二维示意图

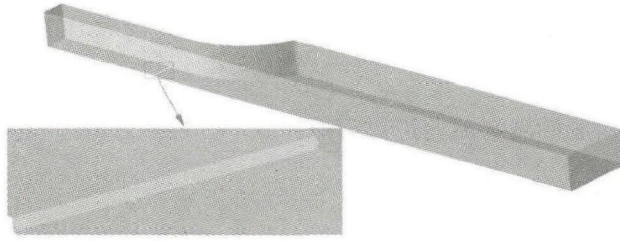


图2 构皮滩船闸计算模型三维示意图

### 3.2 船舶模型

本计算采用的船型为一艘集装箱船型，船舶几何模型见图3，模型尺度船型主要参数见表1。

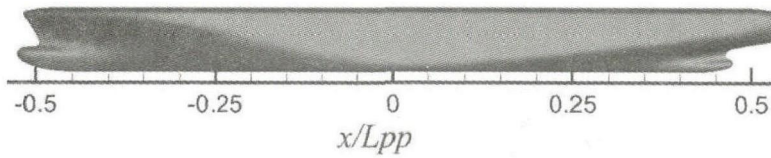


图3 集装箱船几何模型

表1 计算船型主要参数（模型尺度）

参数	模型数值
水线长 $L_{pp}$ (m)	4.35
型宽 B(m)	0.613
吃水(m)	0.19
$C_B$ (-)	0.65
航速(m/s)	1.633

### 3.3 坐标系及边界条件

本次计算采用的边界条件主要包括不可滑移边界(船体表面)、无穷远边界以及壁面边界条件(船闸边界)三类。计算中我们采用右手直角坐标系。坐标原点位于闸门、自由液面以及闸室中纵剖面交点处。x轴由闸室指向宽阔水域，z轴垂直向上。具体边界设定及坐标系见图4。

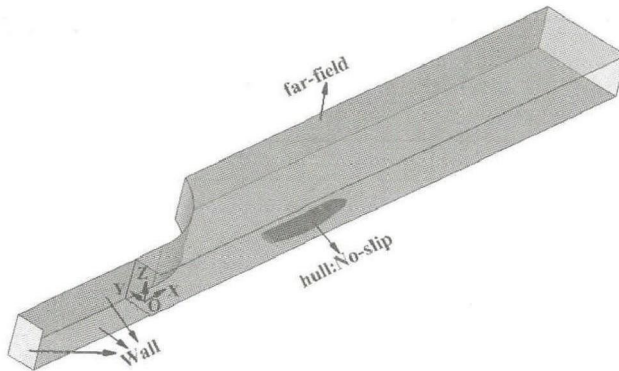


图4 边界条件及坐标系

### 3.4 网格

本文计算全部采用结构化网格，由O型船体边界层网格与完全正交的背景网格组成。网格总量

约为 380 万，其中船舶随体网格约为 130 万，背景网格约为 250 万。计算网格在自由液面以及船体表面部分进行局部细化，以便精确捕捉自由液面和处理船体表面边界层内流速等物理量的剧烈变化。具体网格情况见表 2。计算采用的全局网格以及局部网格如图 5 所示。图 6 为计算采用的重叠网格示意图。

计算在上海交通大学船建学院高性能计算集群（处理器：IBM E5-2680V2×2，2.8GHz，每节点 20 核心、64G 内存）上完成，每个工况的计算使用 20 个 CPU，耗时约 3 天。

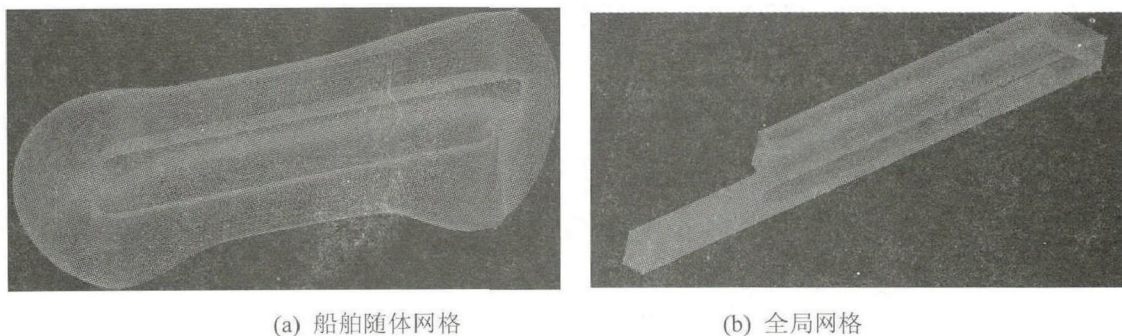


图 5 计算网格

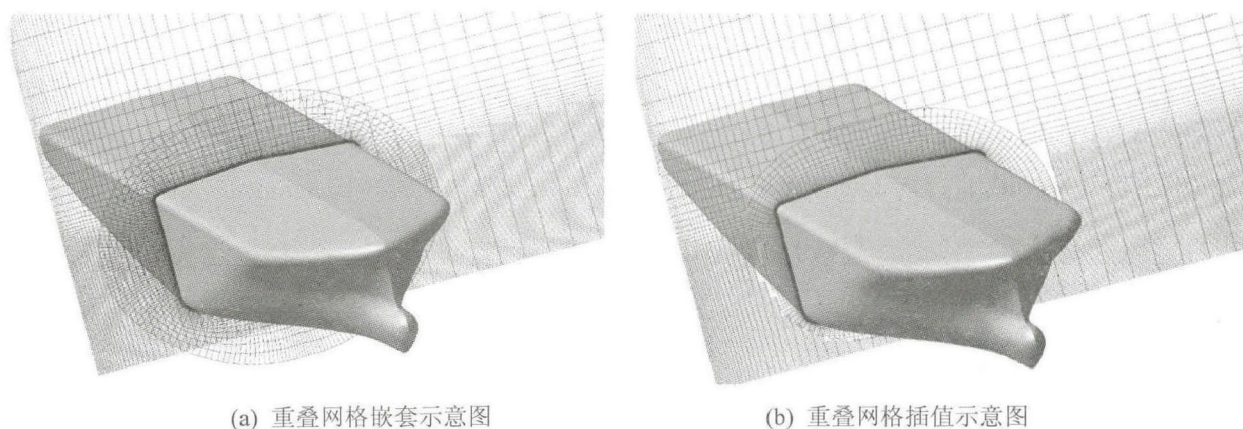


图 6 重叠网格示意图

表 2 网格信息汇总

名称	数量	网格类型	各方向网格数量	网格量
边界层网格	1	O 型网格	159×87×91	1258803
背景网格-闸室	1	H 型网格	44×101×107	475508
背景网格-引航河道	1	H 型网格	174×101×117	2056158
网格总量				3790469
最小网格尺度	船体表面			5E-6
	自由面			1.0E-3

## 4 结果与分析

为更好的研究船舶驶出船闸过程中，船舶水动力性能变化过程，我们定义了三个典型时刻，如

图 7 所示。Time 1 时刻船舶开始驶出升船机；Time 2 时刻船舶完全进入引航航道；Time 3 时刻船舶驶入宽阔水域（如海洋或湖泊）。

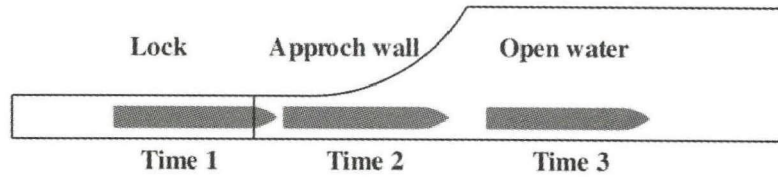


图 7 船舶驶出船闸过程三个典型时刻示意图

#### 4.1 船舶受力

图 8 给出了研究船舶受力所采用的坐标系。本文所关注的船舶受力及力矩主要包括总阻力系数  $C_X$ 、侧向力系数  $C_Y$  及转艏力矩系数  $C_N$ 。其定义如下：

$$\left. \begin{aligned} C_X &= FX / \left( \frac{1}{2} \rho U^2 L_{pp} d \right) \\ C_Y &= FY / \left( \frac{1}{2} \rho U^2 L_{pp} d \right) \\ C_N &= MZ / \left( \frac{1}{2} \rho U^2 L_{pp}^2 d \right) \end{aligned} \right\}$$

其中， $FX$ 、 $FY$  分别代表船舶所受总阻力及侧向力(N)； $MZ$  表示船舶受到的转艏力矩(Nm)； $\rho$  为水的密度 ( $\text{Ns}^2/\text{m}^4$ )； $U$  与  $L_{pp}$  表示船舶航速 (m/s) 以及船体水线间长 (m)； $d$  为吃水 (m)。

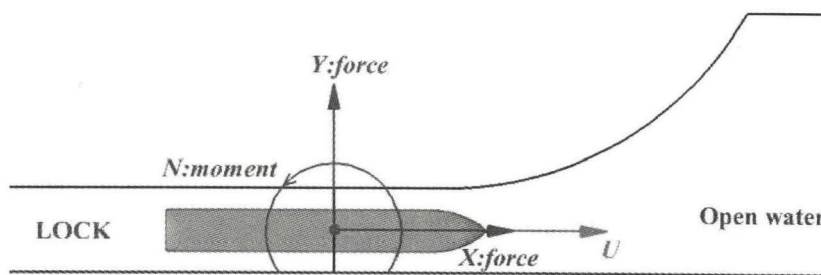


图 8 力与力矩坐标系

图 9~图 11 为整个过程中船舶所受总阻力系数  $C_X$ 、侧向力系数  $C_Y$  及转艏力矩系数  $C_N$  的历时曲线。计算结果表明：

(1) 由于构皮滩船闸水域环境既浅又窄，船体周围流场呈现明显的岸壁效应与浅水效应。因此，船舶驶出闸室过程中其总阻力、侧向力及转艏力矩呈现明显的震荡；

(2) 当船舶驶出闸室，船舶所受阻力最大。这可能是由于阻塞系数较高，闸室内的水将被推出，致使船舶首尾水位差增加所致；

(3) 当船舶驶出闸室，由于船舶两侧流场的不对称性，导致船舶所受侧向力与转艏力矩不为零。船舶发生碰壁或者转艏可能性增加，因此，在船舶实际运行中，建议采用防撞壁措施；

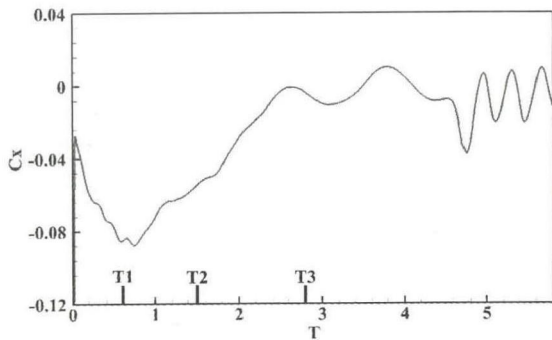


图9 总阻力系数  $C_x$  历时曲线

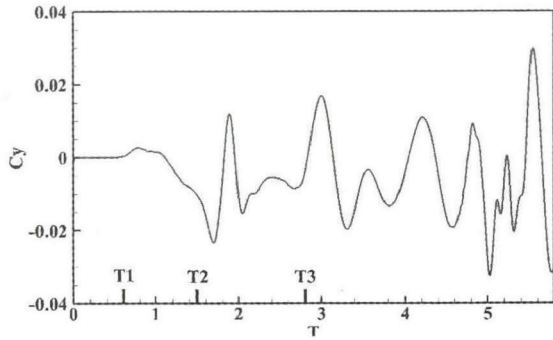


图10 侧向力系数  $C_y$  历时曲线

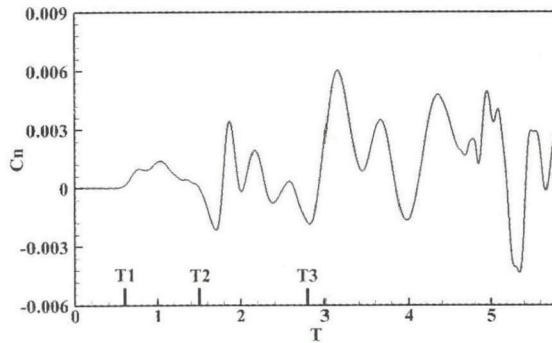


图11 转艏力矩系数  $C_n$  历时曲线

#### 4.2 船舦剖面水体流速

图12~图14分别为船舶驶出闸室过程中，三个时刻船舦剖面周围水体流速  $U$  示意图。图中结果表明：

(1) Time 1 时刻，船体将闸室内水流推出，船体周围水流回流速度较高。此外，船体两侧流场呈现较好的对称性；

(2) Time 2 时刻，由于船体周围水域较 Time 1 时刻开阔，船体周围水体回流速度较 Time 1 时刻下降。但船体两侧流场不对称性增加，船舶所受侧向力与转艏力矩不再为零，船体存在侧移与转艏的可能性。

(3) Time 3 时刻，由于船体周围水域更为宽阔，船体周围水体回流速度进一步下降。但由于流场的不对称性，船舶仍存在侧移与转艏的可能性。

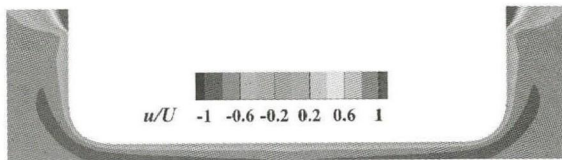


图12 Time 1 时刻，船舦周围水流速示意图

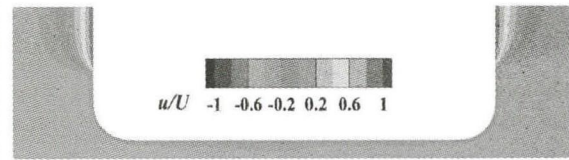


图13 Time 2 时刻，船舦周围水流速示意图

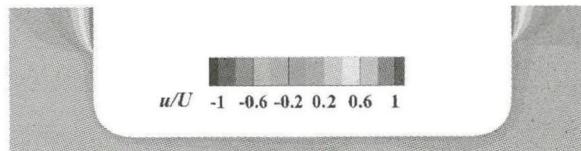


图14 Time 3 时刻，船舦周围水流速示意图

## 5 结论

本文依据构皮滩模型数据为计算环境,数值模拟了船舶驶出升船机的过程。从计算结果来看:

(1) 由于船闸环境既浅又窄,船舶在通过船闸的过程中受到闸室两侧固壁以及闸室底部的影响明显,即存在岸壁效应与浅水效应;

(2) 船舶在引航河道以及宽阔水域内时,由于流场的不对称性以及侧壁的影响,船舶受到较大的侧向力及转艏力矩,可能引起船舶碰壁或转艏;

(3) 船舶驶出升船机时,水域浅窄,闸室内水流被推出,导致船舶艏尾水位差增加。进而使得船舶触底的可能性增加。

根据以上结果:我们认为:

(1) 船舶在船闸中航行时,由于船闸环境既浅又窄,对船舶操纵性有较高要求;

(2) 船舶在通过船闸过程中,建议采用防撞壁措施(如在船侧安装防撞橡胶,拖车引航等);

## 致 谢

本文工作得到国家自然科学基金项目(Grant Nos 51379125, 51490675, 11432009, 51411130131),长江学者奖励计划(Grant No. 2014099),上海高校特聘教授(东方学者)岗位跟踪计划(Grant No. 2013022),国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(Grant No. 2013CB036103),工信部高技术船舶科研项目的资助。在此一并表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] Chen, X. N. (2010). From water entry to lock entry. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 22(5), 885-892.
- [2] Delefortrie, G., Willems, M., et al. (2008). Tank test of vessel entry and exit for third set of Panama locks. In *Proceedings of the International Navigation Seminar following PIANC AGA*, 517-523.
- [3] Delefortrie, G., Willems, M., et al. (2009). Behavior of post panamax vessels in the Third Set of Panama locks. In *International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability (MARSIM'09)*.
- [4] Vrijburcht, A. (1988). Calculations of wave height and ship speed when entering a lock. *Delft Hydraulics Publication* 391, 1-17.
- [5] Wang, H. Z., & Zou, Z. J. (2014). Numerical study on hydrodynamic interaction between a berthed ship and a ship passing through a lock. *Ocean Engineering*, 88, 409-425.
- [6] Meng Q. J., & Wan, D. C. (2014). Numerical Simulations of Ship Motions in Confined Water by Overset Grids Method. *The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference*, 15-20 June, Busan, Korea.
- [7] Meng Q. J., & Wan, D. C. (2015). Numerical Simulations of Viscous Flows around a Ship While Entering a Lock With Overset Grid Technique. *The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference*, 21-26 June, Hawaii, USA.

# Numerical investigation of hydrodynamic performance of a ship while leaving Goupitan Lock

MENG Qing-jie, WAN De-cheng

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai, China, 200240.)

## Abstract

To investigate the hydrodynamic performance of a ship while leaving Goupitan Lock and to predict the feasibility for a ship maneuvering in Goupitan Lock, the unsteady viscous flow around a ship model while leaving Goupitan lock is simulated by solving the unsteady RANS (Reynolds Averaged Navier–Stokes) equations in combination with the  $k-\omega$  SST turbulence model, Level-set method as well as PISO algorithm. Overset grid technology is used to maintain grid orthogonality. The effects of the free surface are taken into account. The hydrodynamic forces, yawing moment as well as wake field are predicted and analyzed. The numerical results might provide data support for the maneuver of ships in the water area of Goupitan Lock.

**Key words:** Goupitan; Lock; Overset grid.