

# 船舶驶入船闸过程水动力数值研究

孟庆杰, 万德成\*

**摘要:** 本研究根据比利时弗兰德水力学研究中心公布的实验数据, 以模型尺度的 12000TEU 集装箱船为研究对象, 结合重叠网格技术, 采用 Level-set 自由面捕捉方法, 以及  $K-\omega$  SST 湍流模型和 PISO 算法求解不可压缩 RANS 方程, 综合考虑流体黏性与自由面, 采用船舶主动运动的方式, 重现了船舶驶入第三组巴拿马船闸过程中的流场与水动力的变化。通过与实验依据的比较, 验证本研究方法的有效性。

**关键词:** 船闸; 重叠网格; 12000TEU; 粘性流场

## 1 引言

水运以其运量大、成本低等优点, 成为人类诸多货物运输方式中涵盖面最广, 承担运输比例最大的运输方式。但对于存在水位差的航道而言, 船闸是船舶安全通行的最重要的设施形式。但随着人类经济的不断发展, 船舶尺寸日益增大。为保证船舶能够安全顺利地通过船闸, 目前世界范围内有相当数量的船闸正进行设计或扩建。为适应船舶大型化的趋势, 巴拿马运河管理局决定对作为世界航运重要通道的巴拿马运河进行扩建: 兴建第三组巴拿马船闸。新建的第三组巴拿马船闸尺寸达到  $427\text{m} \times 55\text{m} \times 18.29\text{m}$ , 以便允许超巴拿马型 12000TEU 集装箱船通过。为评估改船型通过新建船闸过程中的水动力性能, 巴拿马运河当局委托比利时弗兰德水力学研究中心进行试验, 并将实验数据进行了公开<sup>[1]</sup>。

本研究依据该试验提供的数据, 利用有限差分 CFD 代码, 采用 PISO 算法求解不可压 RANS 方程, 利用单相 level-set 捕捉自由面, 选取  $K-\omega$  SST 湍流模型, 并结合重叠网格技术, 对模型尺度的 12000TEU 集装箱船通过巴拿马第三组船闸过程进行了仿真计算, 研究了通过过程中船舶的受力变化情况, 并与实验数据进行了对比, 以验证本文采用的 CFD 源程序的可行性与可靠性。

## 2 Overset 网格技术

Overset 网格技术<sup>[2-3]</sup>是将复杂的流动区域分成几个几何边界相对较为简单的子区域，各个子区域的计算网格独立生成，彼此可能存在重叠或覆盖关系，重叠区域流场信息通过插值进行匹配与耦合。

### 2.1 基本原理

图 1 为 Overset 技术示意图。其中，mesh1 为均匀分布的正交背景网格，mesh2 为机翼网格。物体网格嵌套在背景网格内部，背景网格在物体壁面内以及壁面附近的网格点将被标记为洞内点而被挖掉，不参与流场的计算。而在两套网格之间重叠部分的网格点通过插值进行数据交换，进而实现对流场的模拟。

我们对此网格重叠部分的网格进行放大（图 2）。在机翼网格的最外围我们称为外插值边界，在这上面的网格点我们称为外边界插值点，其作用为通过插值的方法从背景网格获取数据，同时以机翼网格边界点的身份参与机翼网格的计算。其数据传递方向如图中所示。而在背景网格中，由深色虚线绘制的是其插值边界，其上面的网格点，被称为边界插值点。其作用是通过插值从机翼网格中获取数据并作为背景网格的边界点参与背景网格的计算。数据传递方向如图 2 所示。

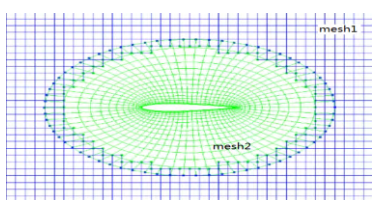


图 1 Overset 示意图

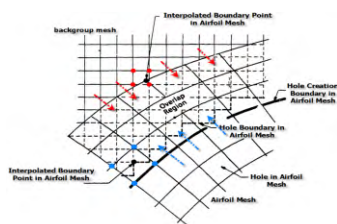


图 2 Overset 网格局部放大图

## 3 计算结果

### 3.1 船闸与船型介绍

为准确研究船舶穿越巴拿马船闸过程的水动力性能，比利时弗兰德水力学研究中心以 1:80 为缩尺比建造了第三组巴拿马船闸模型，模型如图 3 所示。实验过程中 12000TEU 船模船艏位置由  $-4L_{pp}$  位置逐渐移动到  $1L_{pp}$  位置<sup>[4]</sup>。超巴拿马型 12000TEU 船型参数及计算初值见表 1。

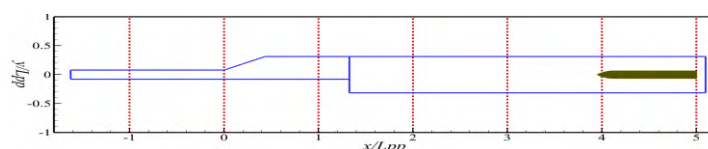


图 3 第三组巴拿马船闸模型

表 1 12000TEU 船模主要参数与计算初值

参数	符号	单位	数值
船长	$L_{pp}$	m	4.350
船宽	$B$	m	0.613
吃水	$D$	m	0.190
方形系数	$C_B$	----	0.65
傅汝德数	$Fr$	$m^2$	6.5597
雷诺数	$Re$	$m^3$	1.1712

### 3.2 网格与边界条件

本文计算采用结构化网格，由 O 型船体边界层网格与完全正交的背景网格组成（图 4）所示。为保证对自由面的准确捕捉，本文计算网格在  $-0.02 \leq z \leq 0.02$  处对网格进行了加密。另外，由于本文采用  $K-\omega$  SST 湍流模型，为保证  $y^+ \leq 1$ ，壁面距第一层网格无因次间距取为  $1.0 \times 10^{-6}$ 。

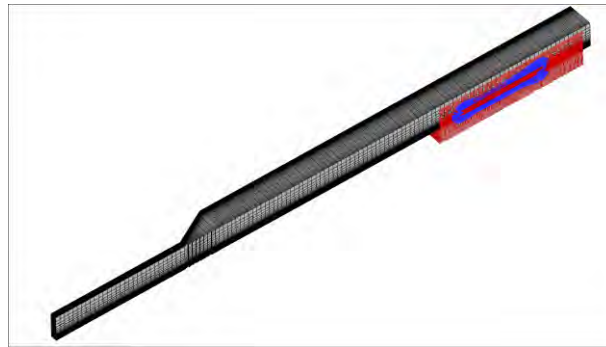


图 4 重叠网格示意图

表 2 计算边界条件

	$U$	$V$	$W$	$P$	$k$	$\omega$
slip-wall (闸室侧壁)	$\frac{\partial U}{\partial n} = 0$	$V=0$	$\frac{\partial W}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \omega}{\partial n} = 0$
slip-wall (闸室底部)	$\frac{\partial U}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial V}{\partial n} = 0$	$W=0$	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \omega}{\partial n} = 0$
far-field ( $z = z_{\max}$ )	$\frac{\partial U}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial V}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial W}{\partial n} = 0$	Not needed	$\frac{\partial k}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \omega}{\partial n} = 0$
no-slip (船体表面)	$U=0$	$V=0$	$W=0$	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$	$k=0$	$\omega = \frac{60}{Re\beta y^{+2}}$

合理的边界条件是正确仿真计算的前提。本研究采用的边界条件包括船体表面不可滑移边界条件、闸室墙壁可滑移边界条件以及无穷远边界条件 3 种，具体变量设置条件见表 2。

### 3.3 结果分析

#### 3.3.1 重叠网格

Overset 网格技术的工作不仅仅是简单的子网格生成，更重要的是要确定各个子网格之间的拓扑关系，以确定子网格之间的插值关系以及插值系数。因此对于物面的精确捕捉是重叠网格技术一个重要的内容，也是其进行数据交换的基础。图 6 为 Overset 网格技术对船体表面的捕捉效果。从图 7 中可以看出我们采用的重叠网格技术对于物体壁面的捕捉效果较好，为我们流体计算提供了可信的前提<sup>[5]</sup>。图 7 为计算过程中不同时刻船舶随体网格与背景网格的改变情况。从图 7 可以看出，在不同时刻随着船舶位置发生了改变，船舶随体网格始终同船体一起移动，保证了近船舶壁面处网格的精密与正交，既避免了网格重生成带来的计算资源消耗又保证了船体流场求解的精度，而在整个过程中背景网格始终保证不变，保证了全流场网格的均匀正交性，不仅节省了计算资源，同时避免了网格再生成带来的网格扭曲问题。

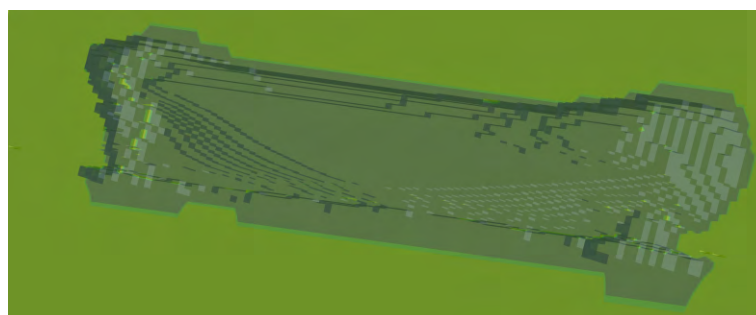


图 6 重叠网格方法对船体形状的捕捉



图 7 不同时刻网格移动示意图

#### 3.3.2 船舶受力

为详细研究 12000TEU 船型在穿越第三组巴拿马船闸时的水动力性能，比利时弗兰德水力学研究中心一共设计了 5 组实验。本文采用数值模拟方法对其第一组实验进行了模拟。图 8 为计算结果与实验结果比较。从结果来看，尽管计算结果与实验结果有一定的误差存在，但水动力的变化趋势与实验结果吻合较好。因此，我们采用的数值方法与重叠网格方法在研究此问题时具有较高的可信度。图 9 为船舶驶入闸室前后闸室内自由面高度示意图。从图中可以看出船舶进入闸室前后，闸室内水的自由面明显上升。因此，我们认为

船舶开始进入船闸时，船体受到的水动力变化很大，是由于闸室内部空间十分狭窄，且水深很浅，当船舶驶入闸室时，闸室中的水不能及时的流出闸室，使得闸室内水面上升，进而使得船体湿表面积增加所致。因此对于此类情况自由面对计算结果会有较大影响。

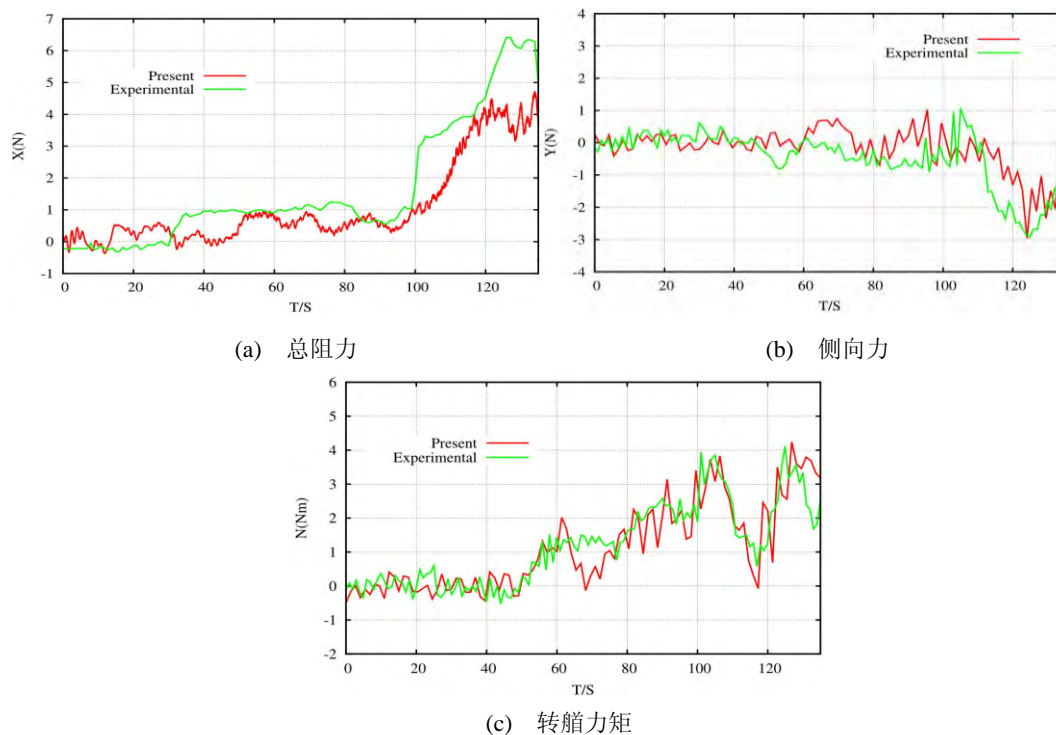


图8 计算结果与实验结果对比图

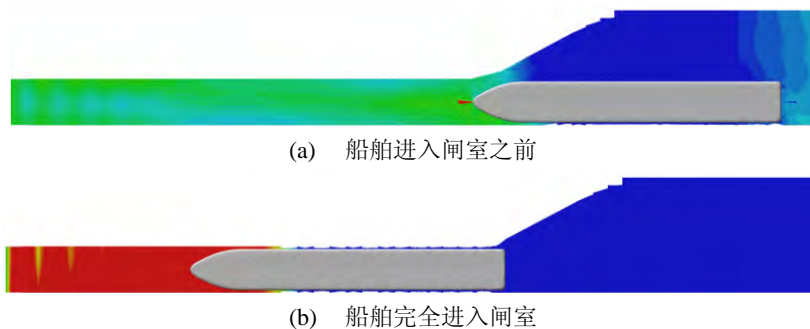


图9 船舶驶入船闸前后闸室自由面示意图

#### 4 结论

本研究结合重叠网格技术，利用黏性 CFD 方法，对 12000TEU 船型驶入第三组巴拿马船闸过程中船舶所受水动力进行了计算模拟，结果与实验结果吻合较好，验证了我们采用

的数值方法以及重叠网格技术在处理此类问题中的有效性与可靠性。此外,计算结果表面对于船舶在此类极为窄浅水域中航行时,自由面对船舶水动力的影响较大。

### 致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目(Grant No. 11072154, 51379125, 11272120),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,以及上海交通大学高性能计算中心(HPC)的资助。在此一并表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Vantorre, M., Delefortrie, G., Mostaert, F. Behaviour of ships approaching and leaving locks: Open model test data for validation purposes. Version 2\_0. WL Rapporten, WL2012R815\_08e. Flanders Hydraulics Research and Ghent University - Division of Maritime Technology: Antwerp, Belgium, 2012.
- 2 Suhs N E, Rogers S E, Dietz W E, et al. Pegasus 5: An automated pre-processor for overset-grid cfd J. 2002.
- 3 Noack R. SUGGAR: a general capability for moving body overset grid assembly J. AIAA paper, 2005, 5117: 2005.
- 4 王宏志, 邹早建. 船舶进入第三组巴拿马船闸时的水动力数值研究//第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会(下册). 2013.
- 5 孟庆杰, 隋智享, 万德成. 基于重叠网格技术的运动船舶黏性流场数值模拟 // 第二十五届全国水动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议文集(上册). 2013.

## Numerical study on hydrodynamic behaviour of ships approaching locks

MENG Qing-jie, WAN De-cheng

**Abstract:** Using single level-set method, SST  $k-\omega$  turbulence model, PISO algorithm and an unsteady state Reynolds Averaged Navier–Stokes solver, a numerical study of the hydrodynamic behaviour of a model scaled 12000 TEU ship approaching the Panama Canal third set of locks is presented in this paper with overset grid technology. A good correspondence between the experimental and computed data is noted, indicating that the present numerical method is a useful tool for prediction of the viscous flow around the ship approaching locks.

**Key words:** Lock; Overset; 12000TEU; viscous flow.