

# 基于重叠网格的船模停船操纵 CFD 数值模拟

孙晨光, 王建华, 万德成\*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240, \*通信作者: dcwan@sjtu.edu.cn)

**摘要:** 随着国际航运业的迅速发展, 港口和航道变得日益拥堵。对大型船舶而言, 其停船性能对于航行安全至关重要。本文使用了上海交通大学万德成教授课题组在开源 CFD 平台 OpenFOAM 基础上自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器, 使用船舶六自由度运动和带桨多级物体运动求解模块, 采用重叠网格技术, 实现对停船操纵中船桨复杂运动问题的求解。本文对带桨 KVLCC 船模进行了紧急停船操纵的数值模拟, 先控制螺旋桨转速, 使船模达到稳定自航状态, 在某一时刻控制螺旋桨倒转, 以达到紧急停船的操纵目的。通过全粘性流场的整体求解, 给出了船模自航以及停船操纵过程中的细致流场信息, 分析了倒车效应产生的原因。本文将数值预报结果与相关试验数据进行了对比验证, 充分证明了 naoe-FOAM-SJTU 求解器对船舶倒车停船操纵问题进行数值预报的可靠性。同时, 采用此数值手段, 可就停船问题为船舶的前期设计和操纵方式的选择提供参考。

**关键词:** 停船操纵; naoe-FOAM-SJTU 求解器; 重叠网格技术

## CFD Simulations of Stopping Maneuver using Dynamic Overset Grid Technology

Chenguang Sun, Jianhua Wang, Decheng Wan\*

(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 200240)

\*Corresponding Author: [dcwan@sjtu.edu.cn](mailto:dcwan@sjtu.edu.cn)

**Abstracts:** With the development of international shipping, ports and waterways are becoming increasingly crowded. Stopping ability has great effect on the safety of ship maneuvering for those large ships. In this paper, naoe-FOAM-SJTU solver with 6DOF motion module with a hierarchy of bodies developed by Prof. Wan Decheng's research team in Shanghai Jiao Tong University is used to numerically investigate complex ship motion problem in stopping maneuver. The simulation starts from the steady state of self-propulsion and the propeller is controlled to a reverse speed to achieve the ship stopping condition. Detail information of the flow field during stopping maneuver are presented and analyzed to explain the stopping effect. The predicted results for the stopping maneuver in calm water are compared with the corresponding experimental data. The comparison is satisfactory and shows that the naoe-FOAM-SJTU solver is feasible for the direct simulation of stopping maneuvers. Furthermore, the present solver can provide reference when designing a ship or choosing a stopping method.

**Keywords:** Stopping maneuver; naoe-FOAM-SJTU solver; Overset grid method

## 0 引言

随着世界经济的飞速发展,海上运输日益繁忙,船舶在向大型化和自动化的方向发展,使得港口与航道逐渐变得拥挤,由于船舶相撞而发生的海损事故频繁发生。另外船舶的大型化使得船体本身的运动性能降低,无论是转向能力还是速度调节能力都有一定幅度的下降,导致操作不便。为了确保船舶在航行中的安全性,需要对船舶的停船性能进行更为深入的研究。

就一般大型船舶在通常情况下的停船操纵动作而言,制动方式仍以倒车制动最为普遍。船舶在前进中或在静止状态下使用螺旋桨倒车时,在船尾一些横向力的作用下,会使船头或左或右偏转,这种现象便是倒车效应<sup>[1]</sup>。具有良好停船性能的船舶,应当在实施停船操作后具有相应其船长的最小停船距离(冲程)、最小偏航量(停船横距)和最小偏航角<sup>[2]</sup>,如下图所示。

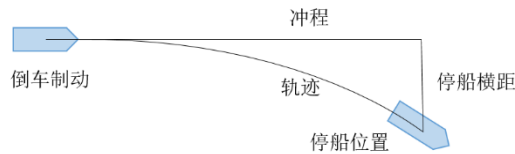


图 1 倒车制动停船航迹

倒车停船是船舶操纵与避碰的一种重要手段。1993年,IMO通过了《船舶操纵性暂行标准》,其中第4项第4款对停船性能提出了明确的要求;2002年底,IMO完成了《船舶操纵性暂行标准》的修改和补充,其中包括了对停船性能的补充要求,从此正式颁布《船舶操纵性标准》<sup>[3]</sup>。

传统的船舶停船操纵的数值研究,主要是基于约束船模试验,构建停船操纵的数学模型,分离出相关水动力导数,通过数值模拟预报出船体水动力,进而得出停船操纵中所需的水动力导数值,最后基于上述参数计算模拟出船舶的运动响应。停船操纵的数学模型如下式所示:

$$\begin{aligned} X &= -m_x \dot{u} - \frac{1}{2} \rho S_w C_T u^2 + X_{\beta\beta} \beta^2 + (X_{\beta r} - m_y V) \beta \gamma + X_{rr} r^2 + X_{\beta\beta\beta} \beta^3 + X_p \\ Y &= -m_y \dot{v} + Y_{\beta} \beta + (Y_r - m_x u) r + Y_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y_{\beta\beta r} \beta^2 r + Y_{rrr} r^3 + Y_p \\ N &= -J_{zz} \dot{u} + N_{\beta} \beta + N_r r + N_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N_{\beta\beta r} \beta^2 r + N_{\beta r r} \beta r^2 + N_{rrr} r^3 + N_p \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $m_x$ ,  $m_y$  和  $J_{zz}$  分别表示船体纵向、横向的附加质量和垂向附加惯性矩。 $\rho$  表示水的密度,  $C_T$  表示总阻力系数,  $S_w$  表示湿表面积。 $X_{\beta\beta}$ 、 $X_{\beta r}$ 、 $X_{rr}$ 、 $X_{\beta\beta\beta}$ 、 $Y_{\beta}$ 、 $Y_r$ 、 $Y_{\beta\beta\beta}$ 、 $Y_{\beta\beta r}$ 、 $Y_{rrr}$ 、 $N_{\beta}$ 、 $N_r$ 、 $N_{\beta\beta\beta}$ 、 $N_{\beta\beta r}$ 、 $N_{\beta r r}$ 、 $N_{rrr}$  表示作用在船体上的水动力分量,  $X_p$ 、 $Y_p$ 、 $N_p$  表示由倒转螺旋桨产生的力与力矩。

由倒转螺旋桨产生的各力与力矩如下:

$$\begin{aligned} X_p &= \rho D^4 n^2 (1-t) K_T \\ Y_p &= \rho D^4 n^2 K_Y \\ N_p &= \rho D^4 L n^2 K_N \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $D$  为螺旋桨直径,  $t$  为推力减额分数,  $K_T$  为推力系数, 同样的,  $K_Y$  和  $K_N$  为螺旋桨产生的横向力系数与垂向转矩系数。

船舶的倒车停船运动一直是船舶操纵领域的一个重要研究课题,国内外有关学者对船舶的倒车停船运动问题进行了相关领域的若干研究。Smit<sup>[4]</sup>通过约束船模试验确定了倒车横向力的存在。刘振江<sup>[5]</sup>提出了倒车横向力(矩)的回归公式,预报结果与实船结果基本吻合,但该文没有考虑到船舶在吃水船长比较小,螺旋桨浸深较小时的倒车横向力(矩)。董国祥<sup>[6]</sup>从船舶推进和船舶操纵性理论出发,通过对相关实船试验数据进行回归分析给出了船舶紧急停船运动的数学模型,该文没有考虑舵力对停船运动的影响。陆冬青<sup>[7]</sup>根据Guldhammer和Harvald图谱估算了船舶的剩余阻力系数,运用Nordstn模桨系列图谱<sup>[8]</sup>和换算系数估算了船舶的四象限螺旋桨特性曲线,并运用MMG模型,对“Mariner”轮和“乐荣”轮进行了倒车停船运动仿真试验,并与相应的两船实船试验结果进行了比较。张玉喜等<sup>[9]</sup>在FUJII等人<sup>[10]</sup>的研究基础上,对狭窄水道中航行船舶的间距控制进行了研究。张强等<sup>[11]</sup>在近年有关船舶操纵性的研究成果基础上,结合关于模型参数和流

体动力学导数不同求取的方法,给出了适用于船舶港内操纵的、考虑右旋单桨倒车特性的船舶港内操纵模型。

目前对于倒车停船操纵的研究,主要采用的是约束模参数与操纵性数学模型,这种方式无法研究螺旋桨倒车过程中的尾流场以及船桨之间的相互作用。因此采用 CFD 方法对倒车停船的操纵过程进行数值模拟具有重要的研究意义。通过重叠网格技术求解船舶大幅度运动是目前主流的方法, Sakamoto 等<sup>[12]</sup>采用船舶水动力学软件 CFDShip-Iwoa Ver. 4 对标准船模 DTMB5512 裸船体进行了 PMM 静态和动态试验的数值模拟,同时给出了相应的验证工作。Carrica 等<sup>[13]</sup>通过求解非定常 RANS 方程,采用重叠网格方法对 DTMB5512 船模进行了回转运动和 Z 型操纵试验的数值模拟。Mofidi 等<sup>[14]</sup>采用对船桨舵全耦合条件下的船体 Z 型操纵试验进行了数值求解,其中关于船桨舵的耦合采用一套多级物体运动求解模块进行计算。沈志荣等基于开源 CFD 软件 OpenFOAM 和重叠网格技术开发了针对船舶与海洋工程结构物大幅度运动条件下的水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU<sup>[15]</sup>,在对海上浮式结构物、标准船模 KCS、DTMB 等在波浪上的运动和船舶操纵性的数值模拟等方面均取得了一定的成果。

本文使用重叠网格技术,对船桨配合下的倒车停船操纵进行了 CFD 数值模拟,预报了停船过程中停船纵距、横距等参数,并细致分析了操纵过程中的流场情况。本文采用的预报手段,可就停船问题为船舶的前期设计和操纵方式的选择提供参考。

## 1 数值方法

### 1.1 流场计算

本文使用上海交通大学基于 OpenFOAM 自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器进行数值计算求解。控制方程为非定常两相不可压 RANS 方程,方程如下:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(U - U_g)U] = -\nabla p_d - g \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) + (\nabla U) \cdot \nabla \mu_{eff} + f_\sigma + f_s \quad (4)$$

式中:  $U$  为速度场,  $U_g$  为网格的移动速度,  $p_d$  为动压力(总压力与静水压力值差),  $\rho$  为液体密度,  $g$  为重力加速度向量,  $\mu_{eff}$  为有效动力粘性系数,  $f_\sigma$  为表面张力项,  $f_s$  为消波源项。

本文中使用的 SST k-w 湍流模型实现 RANS 方程的闭合,其中  $k$  为流体质点的湍动能,  $w$  为特征耗散率。这样的湍流模型既不受自由面的影响,也能保证在壁面处求解的精确性和可靠性。同时,本文采用了带有可压缩项的 VOF 方法处理自由液面<sup>[16]</sup>,其输运方程定义为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(U - U_g)\alpha] + \nabla \cdot [U_r(1 - \alpha)\alpha] = 0 \quad (5)$$

式中,  $U_r$  为用于压缩界面的速度场,  $\alpha$  为两相流体积分数,其定义为:

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{空气} \\ \alpha = 1 & \text{水} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{自由面} \end{cases} \quad (6)$$

本文计算中的 RANS 方程和 VOF 方程都采用有限体积法进行离散,对于离散后得到的压力速度耦合方程,采用 PISO (Pressure-Implicit-Split-Operator) 算法<sup>[17]</sup>进行循环迭代求解。

### 1.2 重叠网格技术

重叠网格法是将物体的每个部件单独划分网格,然后再嵌入另一套大的网格中,在经过挖洞处理后,非计算域的网格会被排除在计算之外,重叠区域可以通过建立插值关系来传递流场信息。重叠网格技术允许多个相互独立的网格之间产生无拘束的相对运动,因此它可以很好地处理 6 自由度的相对运动问题。

本文采用的求解器 naoe-FOAM-SJTU，是在开源 CFD 软件 OpenFOAM 平台基础上加入重叠网格技术和多级物体运动求解模块。求解器中全流场的求解，是利用 Suggar++<sup>[18]</sup>程序计算而得的插值信息数据 Domain Conectivity Information (DCI) 来实现的。

## 2 船模停船操纵数值模拟

本文的计算采用仅带有螺旋桨的 KVLCC2 船模，船体与螺旋桨的表面模型如下图所示：



图 2 KVLCC2 船几何模型

实船与模型的相关参数如下表所示：

表 1 模型参数表

	实船	船模
缩尺比	1	1/110.0
船长 L (m)	320.00	2.909
船宽 B (m)	58.00	0.527
吃水 d (m)	20.80	0.189
螺旋桨直径 D (m)	9.86	0.080
螺旋桨螺距比 P/D	0.721	0.721
湿表面积 Sw (m <sup>2</sup> )	27593	2.280
设计航速 VD (kn)	15.5	1.478
设计航速 VD (m/s)	7.97	0.760
傅汝德数 Fr	0.142	0.142
雷诺数 Rn	$2.15 \times 10^9$	$1.94 \times 10^6$

使用重叠网格方法构建船桨耦合计算模型，计算域的大小为 $-1.5L \leq x \leq 3L$ ,  $-1.5L \leq y \leq 1.5L$  和  $-L \leq z \leq 0.5L$ 。将计算域划分为 3 个部分，分别为背景网格，船体网格和螺旋桨网格，所有的网格均由 OpenFOAM 自带的网格划分工具 snappyHexMesh 生成，其中背景网格数为 57 万，船体网格数为 268 万，螺旋桨网格数为 50 万，经过 Suggar++ 程序对几套网格进行插值得到的最终全流场计算网格总数为 375 万。计算网格如下图所示：

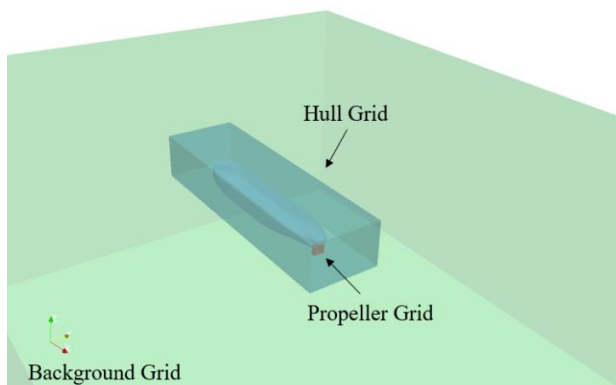


图 3 重叠网格布置

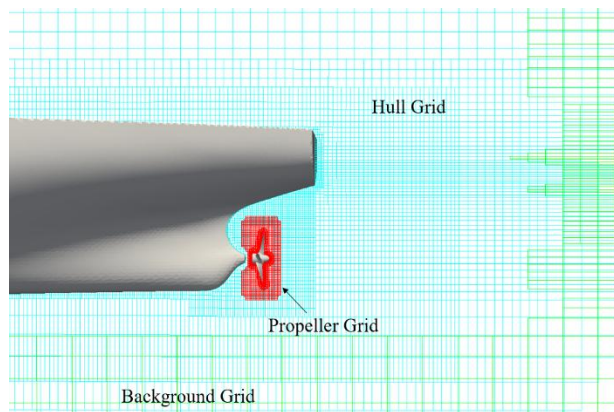


图 4 螺旋桨周围网格分布

## 2.1 自航验证

为了验证本文中使用的数值方法的可靠性，需要对船模的自航问题进行数值验证。本文采用的naoe-FOAM-SJTU求解器，在计算过程中采用PI控制器来调整螺旋桨转速，从而使螺旋桨推力与船模所受阻力达到平衡，得到船模的自航点。

根据NMRI试验水池的试验数据，选取该船的设计航速0.76m/s（对应实船15.5kn）进行数值模拟。下图是模型在该工况下螺旋桨转速与船模航速的时历曲线。

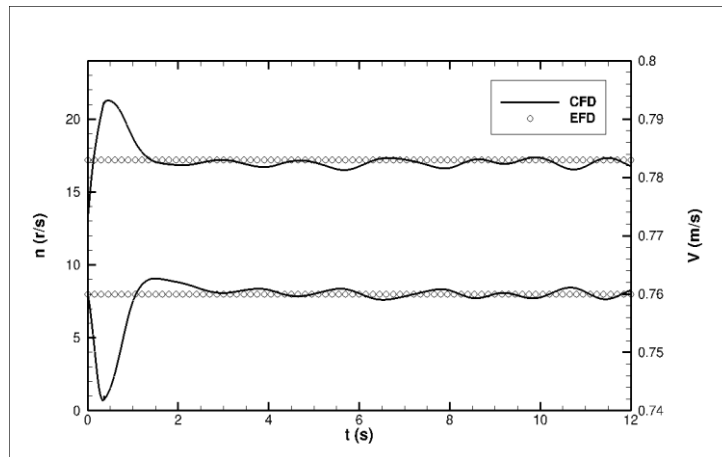


图 5 螺旋桨转速与船模航速时历曲线

从图中可以看出，达到预定航速时，预报的螺旋桨转速为17.02 r/s，与NMRI水池的试验值<sup>[18]</sup>17.2 r/s相比仅小了1.05 %。所以采用本文中使用的数值计算方法对船模自航进行数值模拟，可以精确预报出船模的自航点，为接下来倒车停船操纵的数值模拟提供了基础。

## 2.2 停船模拟

本文中停船操纵的数值模拟过程如下：首先使用PI控制器，控制船模以0.4905 m/s（对应实际船舶10 kn）的速度航行。在达到稳定自航状态之后，控制螺旋桨倒车进行停船操纵，螺旋桨倒转速度为10.36 r/s。当船模纵向速度降为零时，停船操纵完成。

### 2.2.1 停船参数预报

下图给出了停船操纵过程中的船模运动轨迹以及速度随时间的变化曲线。

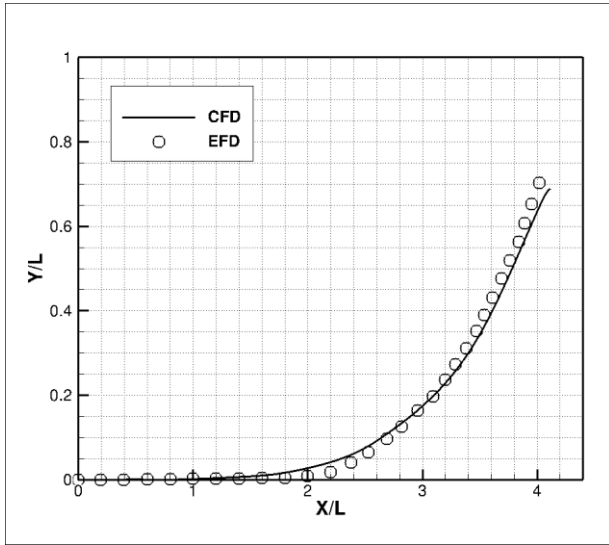


图 6 停船轨迹图

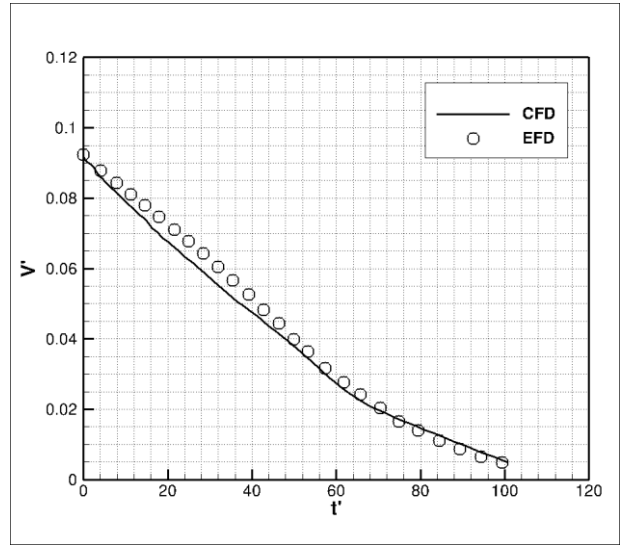


图 7 速度变化图

这里使用了无因次化参数，其中轨迹图中使用了无因次化长度，而速度变化图中使用了无因次化速度和时间，计算公式分别为： $t' = \frac{t}{\sqrt{L/g}}$ ， $V' = \frac{V}{\sqrt{gL}}$ 。其中L为船长，g为重力加速度。

从图中可以看出，停船纵距、横距和停船轨迹与试验值吻合良好，其中停船冲程与试验值相比多了0.75%，计算结果与实际情况相比趋于安全；而停船横距与试验值相比小了4.29%，使用CFD方法预报的横向运动距离偏小，在实际应用中应加以关注；停船时间试验值吻合较好，而倒车之后的速度变化情况与试验存在一定误差，在余速较高时，数值方法预报的速度降低较快。本文中采用的数值计算方法可以较为精确的预报船舶停船操纵的相关参数，为停船性能评估提供有力的手段。

### 2.2.2 停船操纵流场分析

为了分析停船操纵中船舶运动的水动力特征，下图给出了船模倒车停船操纵进行10s后（对应实际船舶105s）船艏部的压力分布。

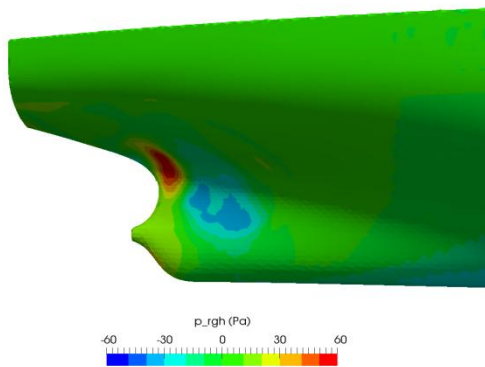


图 8 艏部动压分布侧视图

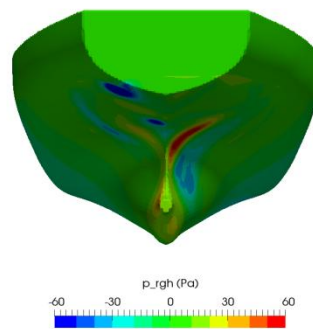


图 9 艏部动压分布后视图

从图中可以看出，倒车停船操纵过程中，船后方右侧形成高压区，而左侧因螺旋桨倒车而导致的压力变化情况较小，相较右侧可以忽略不计。船后方左右两侧的压力差形成了推动船尾向左的横向力，从而导致船首右偏，产生倒车效应。

为了研究船尾右侧高压区的产生原因，下图给出了该时刻船尾周围的流场速度分布。

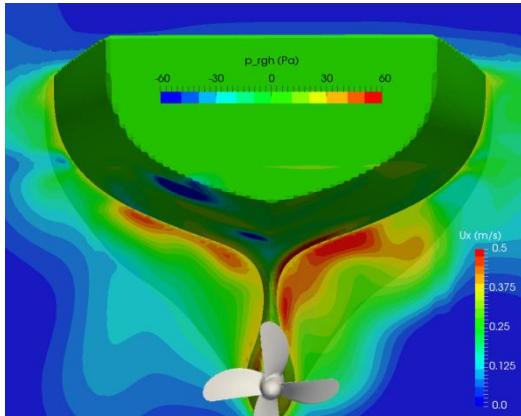


图 10 垂向切面纵向速度分布图

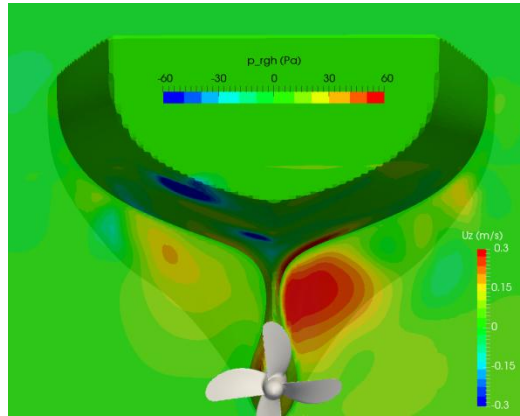


图 11 垂向切面垂向速度分布图

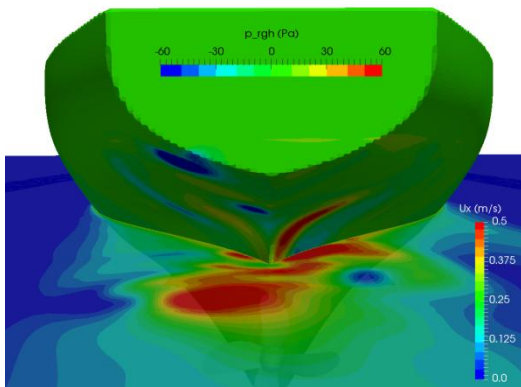


图 12 横向切面纵向速度分布图

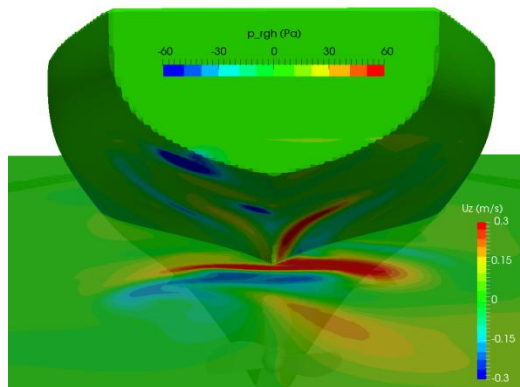


图 13 横向切面垂向速度分布图

从纵向速度分布图(图10与图12)中可以看出,船尾右侧高压区附近伴流速度大于左侧,右侧船体周围流体相对于船的运动速度较小,造成作用在船壳上的压力更大。从垂向速度分布图(图11与图13)中可以看出,在倒转螺旋桨的作用下,船尾右侧的流体明显向上运动,冲击船尾右下方,而左侧流体向下运动,并没有受到船体的阻挡。

从船尾向船首看去,倒车螺旋桨逆时针旋转,改变了船尾附近的流体运动情况,右侧排出流向前方和上方运动,受到了船体的阻挡,冲击船尾右下方,从而形成高压区,推动船尾向左,造成船首右偏,产生倒车效应。

### 3 结论

本文阐述了对停船操纵进行CFD数值模拟的重要意义,介绍了使用重叠网格对倒车停船过程进行数值模拟的方法,文中的数值预报结果,如停船冲程、停船横距和停船时间等与试验结果吻合良好,验证了使用当前数值方法对停船操纵问题进行数值预报的可靠性。另外,对于船舶从自航到停止的过程,给出了详细的流场信息,如船艏表面压力分布、螺旋桨周围流体速度变化等,分析了倒车效应产生的原因。本文采用的求解器可以准确预报出倒车停船操纵下船舶的运动过程和水动力特性,为船舶停船性能的评估、船舶数字化设计和操纵方式的选择提供可靠参考。

未来将对浅水情况下的船舶停船操纵进行模拟,并比较分析不同停船方式,同时对本文中采用的船舶操纵数值模拟方法进行更广泛的验证。

## 致谢

本文工作国家自然科学基金项目(51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099), 上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022), 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300), 以及工信部数值水池创新专项VIV/VIM项目(2016-23/09)资助。在此一并表示衷心感谢。

## 参考文献

- [1] 洪碧光. 船舶操纵原理与技术[M]. 大连海事大学出版社, 2007.
- [2] 刘正江. 倒车停船性能实用预报的研究[J]. 大连海事大学学报, 1987(3):57-66.
- [3] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. Standards for Ship Maneuverability[R], MSC. 137(76).
- [4] CHISLETT M S, SMITT L W. A brief description of the hya large amplitude pmm system[J]. ARCHIVE Journal of Mechanical Engineering Science 1959-1982 (vols 1-23), 1972, 14(7):80-84.
- [5] 刘正江. 倒车停船性能实用预报的研究 [J]. 大连海运学院学报, 1987, 3, 55-64.
- [6] 董国祥. 紧急停船运动数学模型及其仿真研究 [J]. 上海交通大学学报, 1996, 5, 42-48.
- [7] 陆冬青. 船舶倒车停船运动仿真研究[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(4):110-113.
- [8] SV.AA.哈瓦尔特. 船舶阻力与推进 [M]. 黄鼎良等译. 大连理工大学出版社, 1989.
- [9] 张玉喜, 贲锋, 李国帅. 狭水道中航行船舶间距控制的研究[J]. 船海工程, 2009, 38(4):1-3.
- [10] FUJII Y, TANAKA K. Traffic Capacity[J]. Journal of Navigation, 1971, 24(4):543-652.
- [11] 张强, 张显库. 考虑螺旋桨倒车特性的船舶港内操纵数学模型及仿真应用[J]. 中国造船, 2016, 57(4):147-156.
- [12] SAKAMOTO N, CARRICA P M, STERN F. URANS simulations of static and dynamic maneuvering for surface combatant: Part 2. Analysis and validation for local flow characteristics[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2012, 17(4): 446-468.
- [13] CARRICA P M, STERN F. DES simulations of KVLCC1 in turn and zigzag maneuvers with moving propeller and rudder[C]. Proceedings of the SIMMAN 2008 Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods. Lyngby, Denmark, 2008.
- [14] MOFIDI A, CARRICA P M. Simulations of zigzag maneuvers for a container ship with direct moving rudder and propeller[J]. Computers & Fluids, 2014, 96: 191-203.
- [15] SHEN Z R, WAN D C. Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU. Technical Report for Solver Manual, Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [16] RUSCHE H. Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions[D]. Imperial College London (University of London), 2003.
- [17] CAO H, WAN D C. Benchmark computations of wave run-up on single cylinder and four cylinders by naoe-FOAM-SJTU solver[J]. Applied Ocean Research, 2017, 65: 327-337.
- [18] NOACK R W, BOGER D A, KUNZ R F, CARRICA P M. Suggar++: An improved general overset grid assembly capability[C]. Proceedings of the 47th AIAA Aerospace Science and Exhibit, San Antonio TX, 2009, 22-25.
- [19] TSUKADA Y, UENO M, TANIZAWA K. Development of an Auxiliary Thruster for Free-running Model Ship Tests[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 2014, 20:59-67.

### 作者简介:

孙晨光, 男, 1996年5月, 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 硕士研究生, 主要从事计算船舶水动力学、波浪中船舶操纵性等方面的研究; 通讯地址: 上海市闵行区东川路800号上海交通大学闵行校区木兰船建大楼A608, 邮编: 200240, Email: sunchenguang1993@qq.com



万德成, 男, 1967年9月, 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 长江学者特聘教授, 上海交通大学特聘教授, 博士生导师, 主要从事计算船舶水动力学、无网格粒子法、船型优化、浮式风机、流固耦合、涡激振动/运动等方面的研究。

通讯地址: 上海市闵行区东川路800号上海交通大学木兰船建大楼, 邮编: 200240, 电话: 021-34205697

Email: dcwan@sjtu.edu.cn