

# 船桨舵协同作用下船舶操纵性 CFD 模拟

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)

\*通讯作者: dcwan@sjtu.edu.cn

**摘要:** 随着计算机性能的高速发展以及数值方法的不断完善, 计算流体力学 (CFD) 在船舶与海洋工程领域应用越来越广泛。上海交通大学万德成教授课题组在开源 CFD 平台 OpenFOAM 基础上, 自主开发了三维数值造波和消波模块、船舶六自由度运动和带桨带舵的多级物体运动求解模块, 以及浮式结构物的系泊系统求解模块等, 同时引入动态重叠网格技术, 形成了专门面向船舶与海洋工程的水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU。本文采用重叠网格方法实现船、桨、舵系统复杂运动求解, 并通过控制螺旋桨旋转和舵角, 直接数值求解带桨带舵船舶在复杂操纵运动中的水动力变化。通过全粘性流场的整体求解, 给出了自航船舶在典型操纵运动过程中的细致流场信息, 分析了流场对船舶操纵运动以及船桨舵间相互干扰的影响。文中通过对全附体标准船模 ONRT 在静水和波浪中的操纵性进行数值预报, 并同相关的试验数据进行对比验证, 充分证明了 naoe-FOAM-SJTU 求解器在不同海况下船桨舵配合的船舶操纵性问题数值预报中的适用性和可靠性。同时, 采用当前的数值手段, 可以为船舶整体设计提供有效的前期评估手段。

**关键词:** 船桨舵配合; naoe-FOAM-SJTU 求解器; 船舶操纵; 重叠网格方法

## CFD Simulations of Ship Maneuvering with Direct Propeller and Rudder

WANG Jian-hua, 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 200240)

**Abstract:** With the great progress in supercomputers and the development of numerical methods, the application of computational fluid dynamics (CFD) are advancing rapidly in the field of ship hydrodynamics. A CFD solver named naoe-FOAM-SJTU is developed by Professor Wan Decheng's research team in Shanghai Jiao Tong University. The solver is based on the open source platform OpenFOAM and mainly comprises a numerical wave generation and absorption module, a full 6DOF motion module with a hierarchy of bodies and a mooring system module. The present work shows the capability of naoe-FOAM-SJTU solver in predicting ship maneuvering with direct rotating propeller and moving rudder. Detail information of the flow field during standard maneuvering motion are presented and used for better understanding of the hydrodynamic performance. The fully appended ONR Tumblehome model is applied for the maneuvering simulation both in calm water and waves. The predicted results are compared with the available experimental data and good agreement is achieved, which indicates that the present solver coupled with dynamic overset grid method can be suitable and reliable in predicting ship hydrodynamic problems. Furthermore, the present solver can be an effective approach for the overall design of a ship.

**Key words:** Ship hull-propeller-rudder interaction, naoe-FOAM-SJTU, ship maneuvering, overset grid method

## 0 引言

船舶操纵性是船舶设计中最为关心的性能之一，操纵性能的优劣直接决定了船舶航行安全和能耗，其重要性不言而喻。1993 年负责海事安全的国际海事组织 IMO (International Maritime Organization) 通过了 A.751(18)号决议“船舶操纵性暂行标准”(Interim Standards for Ship Manoeuvability)，并于 2002 年底正式通过第 MSC.137(76)号决议“船舶操纵性标准”(Standards for Ship Manoeuvability)<sup>[1]</sup>。船舶设计工作人员在设计船舶时就不仅要满足船舶快速性要求还要满足操纵性要求。即在船舶设计初期，设计人员就需要评估所设计船舶的操纵性能，以降低船舶运营生命周期中出现安全事故的几率。因此在船舶设计的初始阶段，一个准确的评估船舶操纵性能的研究方法就变得极其重要。

传统的船舶操纵性的数值研究，主要是基于约束船模试验，构建操纵性数学模型，分离出相关水动力导数，通过数值模拟预报出船体水动力，进而回归得出描述操纵运动所需的水动力导数值，最后基于上述参数仿真得出船舶对应的操纵运动。这部分的研究由来已久，操纵性数学模型主要分为两种，一种是整体型，Abkowitz<sup>[2,3]</sup>提出的简化数学模型，把船、桨、舵视为一个不可分割的整体，不考虑他们之间的流体动力干扰，研究船、桨、舵的整体受力情况，相应的数学模型如公式 (1)；另一种为分离型，由日本拖曳水池操纵性委员会提出的 MMG 模型，分别考虑船体、敞水桨、敞水舵的单独受力情况及其之间的相互干扰，作用于裸船体的流体力 and 力矩按照产生的性质分为惯性力和非惯性力，由于该方法中每一项都具有明确的物理意义，方便求解得到数学模型中的各个系数。现在应用比较广泛的是 Inoue 等<sup>[4,5]</sup>提出的数学模型，如公式 (2)。上述两种操纵性数学模型都在 Crane 的第三版 PNA 中有收录。Hirano 等<sup>[6]</sup>在 MMG 模型基础上提出考虑横摇运动的四自由度运动模型，回归水动力导数值主要依据  $T/L$ ， $C_B$ ， $B/L$  和  $B/T$  等船型参数，是第一次采用四自由度考虑横摇对船舶运动影响的尝试。

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ N' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_* + X_{vv}v'^2 + X_{rr}r'^2 + X_{vr}v'r' \\ Y_vv' + Y_v\dot{v}' + Y_r r' + Y_{vvv}v'^3 + Y_{rrr}r'^3 + Y_{vrr}v'r'^2 + Y_{rvv}r'v'^2 + Y_{rvr}r'v' \\ N_v\dot{v}' + N_r\dot{r}' + N_vv' + N_{vvv}v'^3 + N_{vrr}v'r'^2 + N_{rvr}r'v'^2 + N_{rvv}r'v'^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ N' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_* + X_{vv}v'^2 + X_{rr}r'^2 + X_{vr}v'r' \\ Y_v\dot{v}' + Y_r\dot{r}' + Y_vv' + Y_{v|v|}v'|v'| + Y_r r' + Y_{r|r|}r'|r'| + Y_{|vr|}v'|r'| + Y_{|rv|}r'|v'| \\ N_v\dot{v}' + N_r\dot{r}' + N_vv' + N_{v|v|}v'|v'| + N_r r' + N_{r|r|}r'|r'| + N_{|vr|}v'|r'| + N_{|rv|}r'|v'| \end{bmatrix} \quad (2)$$

到目前为止，国内外针对这种手段进行的数值研究很多，Simonsen 等<sup>[7]</sup>分别利用 CFD 计算得的和 EFD 测量得到的 PMM 数据，根据操纵性数学模型，对 KCS 船模在静水中的回转操纵和 Z 形操纵实现进行模拟。Sadat-Hosseini 等<sup>[8]</sup>同样也是利用类似方法，分别进行 ONR Tumblehome 船模的 PMM 试验和数值计算，获取船模的水动系数，并基于操纵性数学模型，对该船模在波浪上的各类侧翻、骑浪、周期性运动等各类现象进行了模拟。Sakamoto 等<sup>[9,10]</sup>对水面舰艇 5415 船模采用 CFDShip-Iwoa 进行了静态和动态的 PMM 试验数值模拟，并且同试验结果进行对比分析，给出了数值结果的验证与确认(V&V)。Marcu 等<sup>[11]</sup>采用 RANS 方法计算了 VLCC 船模在平面运动机构作用下的水动力特性。Zhang 等<sup>[12]</sup>使用支持向量机 (Support Vector Machine) 方法从船舶约束试验数据中的获取水动力导数，并进行操纵性模拟。Kang 等<sup>[13]</sup>开发了一种针对单桨双舵的操纵性数学模型，基于约束试验和自航试验数据中获取的相关水动力导数，进行 Z 形操纵和回转试验的模拟。其中，Z 形操纵的模拟结果与试验吻合较好，但是回转操纵的运动轨迹却和试验偏差较大。Khanfir 等<sup>[14]</sup>利用基于 MMG (Mathematical Modeling Group) 表述方法的操纵性模型，对单桨双舵以及双桨双舵的船型进行 Z 形操纵和回转操纵的计算，但是回转操纵的计算结果与试验测量值普遍相差较大。

虽然目前对操纵性的数值研究，很大一部分仍采用约束模参数加操纵性数学模型来进行，但是这种方式无法考虑到操纵运动过程中尾流场以及桨舵间的相互干扰，以及对自由航行的简化 (四自由度或三自由度模型)，其预报精度仍达不到设计需求，因此采用 CFD 方法直接数值模拟自航模的操纵运动成为目前的研究热点。重叠网格方法是实现船、桨、舵同时运动以及自航操纵计算的最有效和最精确的数值方法之一。随着高

性能计算的快速发展已经重叠网格技术的逐步完善，直接数值模拟自航模的操纵运动已经成为现实。美国爱荷华大学 Stern 团队，利用自己开发的基于有限差分法的水动力学求解器 CFDShip-Iwoa 并引入重叠网格技术，从而实现对多级物体运动的直接模拟。Carrica 和 Stern<sup>[15]</sup>利用重叠网格方法来分别划分螺旋桨和舵的网格，对 KVLCC1 船型进行回转和 Z 形操纵的直接 CFD 模拟，但是由于该文中舵支撑被简化，导致有效舵面积增大，以至于计算得到的转向性能高于试验值。Mofidi 和 Carrica<sup>[16]</sup>改进该问题，使用重叠网格对 KCS 船型的舵支撑和舵面进行更精确的划分，保证了有效舵面积不变，同时还划分了螺旋桨网格，进行了两个 Z 形操纵试验的计算，并得到良好的计算结果。沈志荣等基于开源 CFD 平台 OpenFOAM，开发了船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU<sup>[17]</sup>，并引入了重叠网格模块，并扩展到船桨舵配合下的自航和操纵运动中去，验证了在任意多面体网格中直接数值模拟船桨舵协同作用下的操纵运动的适用性。

本文采用 CFD 方法，结合重叠网格技术，直接数值模拟了船桨舵协同配合下的典型操纵运动，如航向保持、自由回转和 Z 形操纵等，并扩展到复杂的波浪工况中去，预报出不同工况下的船舶操纵运动以及水动力变化，详细的流场数据以及操纵特征参数可以为船舶设计提供有效的参考。当前的船桨舵整体预报手段，可以作为船舶设计阶段的操纵性能预估的便捷工具，为数字化船舶设计提供强有力的支撑。

## 1 数值模型

### 1.1 流场计算

针对非定常不可压粘性流体，其控制方程采用 RANS 方程：

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (3)$$

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

其中： $\mathbf{U}$  代表速度场， $\mathbf{U}_g$  表示网格移动速度。 $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$  为动压力，其数值等于总压力值减去静水压力， $\rho$  为液体或者气体的密度， $\mathbf{g}$  为重力加速度向量。 $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu_t)$  表示有效动力粘性， $\nu$  表示运动粘度， $\nu_t$  表示涡粘度。 $f_\sigma$  为表面张力项， $f_s$  是用于消波的源项。

本文中采用 SST  $k - \omega$  湍流模型<sup>[18]</sup>来实现 RANS 方程的闭合。其中  $k$  表示流体质点的湍动能， $\omega$  表示特征耗散率。该湍流模型综合了标准  $k - \omega$  模型和  $k - \varepsilon$  模型的优点，既不受自由面的影响，又能保证在壁面处求解的精确性和可靠性。本文使用带有人工可压缩项的 VOF 方法来处理自由面。VOF 输运方程定义为：

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \alpha] + \nabla \cdot [\mathbf{U}_r (1 - \alpha) \alpha] = 0 \quad (5)$$

其中， $\mathbf{U}_r$  为用于压缩界面的速度场， $\alpha$  为两相流体的体积分数，代表液体部分所占体积的百分比，具体分布如公式 (4) 所示。

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

RANS 方程和 VOF 输运方程都采用有限体积法来进行离散。对于离散后所得到的压力速度耦合方程，采用 PISO (Pressure-Implicit-Split-Operator) <sup>[19]</sup>算法进行循环迭代求解。

### 1.2 重叠网格技术及船桨舵模型构建

重叠网格是将模型中的每个部分单独划分网格，然后再嵌套到背景网格中去。网格可以是结构化网格或者非结构化网格，同时各套网格之间存在网格重叠的部分。计算过程中首先标记洞单元、活动单元、边界单元和贡献单元等，然后执行挖洞命令，去除物面内部的单元和多余的重叠单元，通过在重叠网格区域相互的插值，使得每套网格可以在重叠区域的边界进行数据的交换，从而完成整个流场的求解。

对于船舶操纵性能预报问题，一般都具有大幅度的物体运动，传统的变形网格在物体进行大幅度的运动中网格质量会下降，从而影响求解精度，因此对于当前处理的问题不太适用；而重叠网格技术可以允许多个相互独立的网格之间产生无约束的相对位移，计算过程能够保证网格不发生变形，从而保证计算过程中网格的质量，既而提高问题的求解精度，因此它对动态问题尤其是具有大幅度运动和多级物体运动具有极强的处理能力。

动态重叠网格技术实现船、桨、舵的相互作用和耦合模型构建如下。为了将螺旋桨和舵的运动耦合到船体运动当中，需要使用多级物体（Hierarchy of bodies）以及其运动耦合的概念。在这个多级层级物体的概念当中，最高一级为计算域的背景网格。第二级为父对象。一般情况下选择船体本身为父类对象。船体可以相对于背景网格（第一级）有六个自由度的运动。第三级为子对象，是在船体（第二级）坐标系内运动的附体，如螺旋桨和舵等附体。第一级的背景网格，通常可以跟随第二级中的船体一起运动，但是仅局限于水平内的运动，如纵荡、横荡和首摇。在处理多级物体运动时，首先从较低层级的物体开始。各层级的关系是：最高级是背景网格；第二级是船体网格；第三级是螺旋桨网格。网格的移动是先从第三级开始，根据螺旋桨或者舵的运动在船体坐标系下更新相应网格位置；第二步处理的是第二级船体网格，根据六自由度运动求解模块，预报出下一个时间步的船体位移和姿态角度，在地球坐标系下，同时平移和旋转船体和螺旋桨网格；最后是处理背景网格，如果背景网格跟随船体一起运动，平移和旋转背景网格至船体位置，背景网格的运动仅局限于水平平面内，即纵荡、横荡和首摇三个自由度，如果背景网格是固定的，则保持背景网格不变。至此，整个船桨舵多级物体运动模型构建完毕。

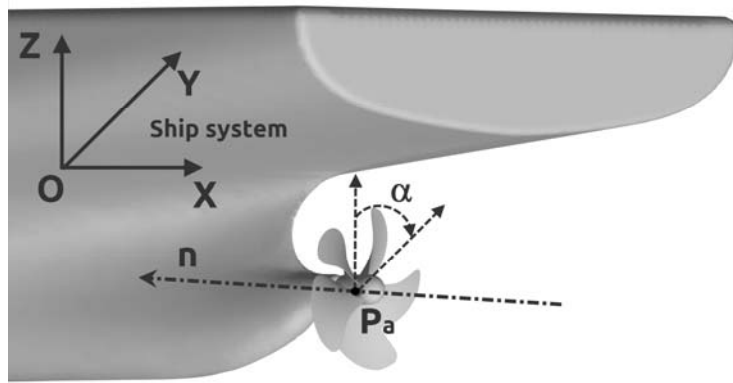


图 1 螺旋桨在船体坐标系下旋转示意图

本文计算采用的求解器 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。在基于 OpenFOAM 的数值方法、数据存储方式以及非结构网格的特点上，利用插值程序 SUGGAR++<sup>[20]</sup>生成重叠网格的插值信息 Domain Connectivity Information (DCI)，然后在计算过程中通过流场与 DCI 信息的交互，从而最终完成整个流场的求解。

## 2 典型操纵问题数值模拟

本文计算船型采用全附体双桨双舵的 ONRT 船模，该船模被广泛应用于 CFD 验证的标准船型，列为 Tokyo2015 CFD 研讨会上的自航模问题的标准船型。针对该船型，有丰富的操纵试验数据，从而可以验证当前数值预报手段的可靠性。下图为船体的几何模型。



图 2 ONRT 船几何模型

船体的主尺度见下表：

表格 1 船体模型主要参数

主要参数		模型尺度	实尺度
水线长	$L_{wl}(m)$	3.147	154.0
船宽	$B_{wl}(m)$	0.384	18.78
吃水	$T(m)$	0.112	5.494

排水量	$\Delta$ (kg)	72.6	8.507e6
螺旋桨直径	$D_p$ (m)	0.1066	
螺旋桨轴倾斜角	$\varepsilon$ (deg.)	5	
螺旋桨旋转方向		内旋	内旋
转舵速度		35.0 deg./s	

根据 1.2 节中的重叠网格方法直接构建船桨舵耦合计算的模型，计算域划分为 6 个部分，即背景网格，船体周围网格，两套螺旋桨网格和两套舵的网格，划分完成的网格如下图所示：

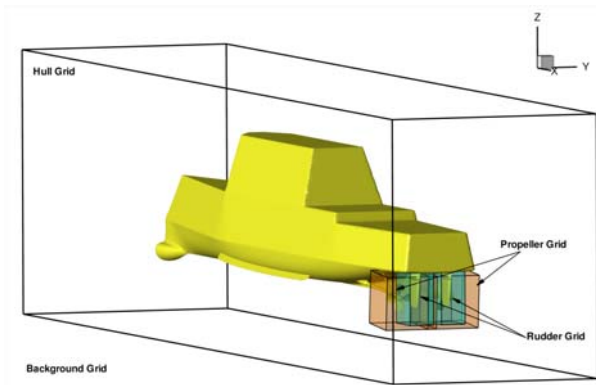


图 3 重叠网格布置

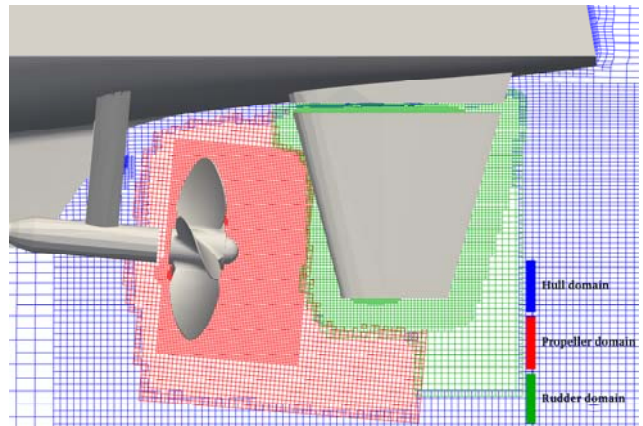


图 4 桨和舵周围网格分布

## 2.1 静水和波浪中航向稳定性问题

海上航行船舶为了保持其航向需要进行必要的操舵，在斜浪航行中的船舶更需要注意。因此，准确的预报复杂海况下的船舶航向保持能力就显得尤为重要，本文这部分针对全附体的 ONRT 船模在静水以及不同浪向下的航向稳定性问题进行了数值模拟。计算工况如下：

表格 2 航向稳定性计算工况

工况		航速 $U_0$ (m/s)	浪向 $\chi$ (deg.)	波高 $H$ (m)	波长 $\lambda$ (m)
静水		1.11	无	无	无
波浪	迎浪	1.11	0	0.06294	3.147
	首斜浪	1.11	45	0.06294	3.147
	横浪	1.11	90	0.06294	3.147

为了计算自航模的操纵性问题，首先需要进行自航计算，即预报在给定航速下的螺旋桨转速值。下图给出了采用 naoe-FOAM-SJTU 求解器计算得到的在航速为  $Fr=0.2$  工况下的螺旋桨转速和船舶航速的历时曲线。

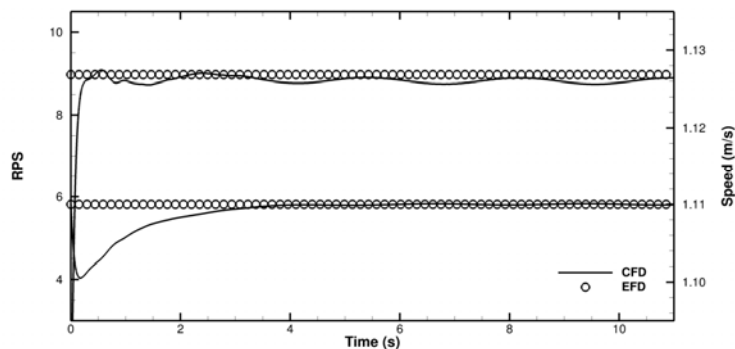


图 5 螺旋桨转速和船舶航速历时曲线

计算过程中采用 PI 控制器来调整螺旋桨转速，从图中可以看出，采用重叠网格方法处理船桨舵的复杂运动方式，可以精确的预报出自航船模的自航点，当前数值结果 8.819r/s 比试验值 8.97r/s 小 1.7%，从而为接下来船桨舵协同配合下的操纵性数值预报提供了很好的基础。航向稳定性研究，首先固定螺旋桨转速，即采用数值预报的结果，然后舵的调整根据试验进行，即舵角等于摇首角。下图给出了迎浪工况下的船舶运动响应与试验值的对比，

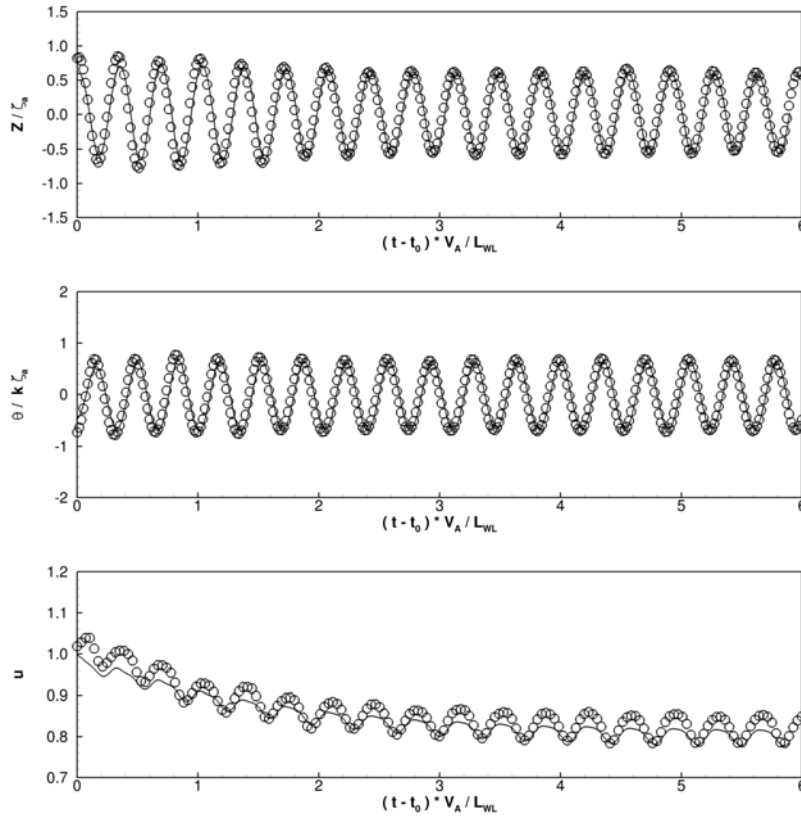
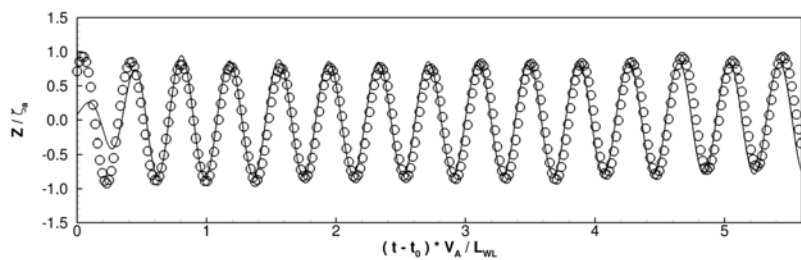


图 6 迎浪工况下船舶垂荡，纵摇，航速随时间的变化

从图中可以看出，当前数值预报的船舶垂荡和纵摇值同试验值吻合的非常好，鉴于迎浪工况下船舶运动响应主要为纵向运动，因此可以看出自航模在迎浪工况下的计算精度很高。此外，还给出了船舶航速随时间的变化，从图中可以看出，CFD 结果同试验结果均有明显的失速现象，并且数值预报结果同试验值表现一致，但是数值结果的振荡幅值要小于试验值，这主要是因为试验中很难保证螺旋桨的转速保持恒定值，从而引起了更大幅度的推力变化，进而使得航速振荡幅值更大。迎浪工况下由于没有侧向干扰，因此摇首角度变化较小，因此可以保持原有航向，不需要进行操舵。而对应首斜浪工况来说，通过操舵来实现航向稳定则不可避免。下图给出了首斜浪工况下的船舶运动历时曲线。





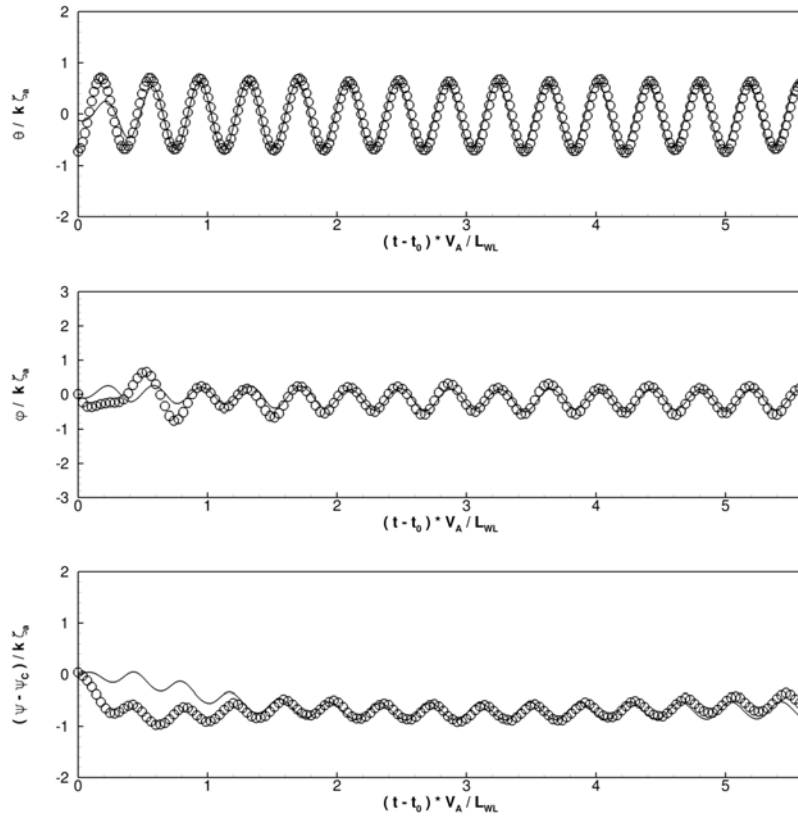


图 7 首斜浪工况下的船舶运动历时曲线

从图 7可以看出，首斜浪工况下船舶的横摇角度明显放大，此外，船舶的摇首角度也有很大的变化，因此需要调整舵角来保证船舶的航向。

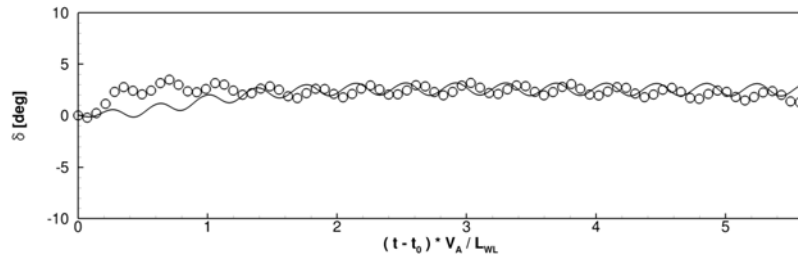


图 8 首斜浪工况下舵角历时曲线

图 8给出了首斜浪工况下为了保证航向稳定而进行的操舵情况，可以看出，最大操舵角度为  $3.2^\circ$ ，并且数值预报的舵角变化同试验值吻合较好，仅是在开始几个周期内有所区别，这部分差别是由于 CFD 计算时是从稳定的自航状态开始，而试验是受到的初始波浪扰动较大。图 9 给出了首斜浪工况下的船舶航行运动轨迹同试验值的对比。当前 CFD 方法结合重叠网格技术可以给出精确的船舶的操舵情况以及运动轨迹，为船舶航向稳定性研究提供了有效的手段。

此外，为了分析自航模在波浪工况尤其是斜浪工况下的水动力特性，这里给出了船舶航行过程中的流场变化，如图 10和图 11，分别给出了一个波浪周期内的自由面变化和桨舵周围的涡量场变化。从自由面图中可以看出，船体的兴波受到斜浪的影响较为明显，在迎浪面，兴波受到来波的挤压，而在背浪面，兴波和来波的船舶方向一致，因此影响的范围更广。船体周围的流场呈现出非常明显的不对称特性，从而导致了船舶受到了很大的侧向力和转首力矩，进而出现了摇首的现象，需要进行操舵来实现航向的保持。

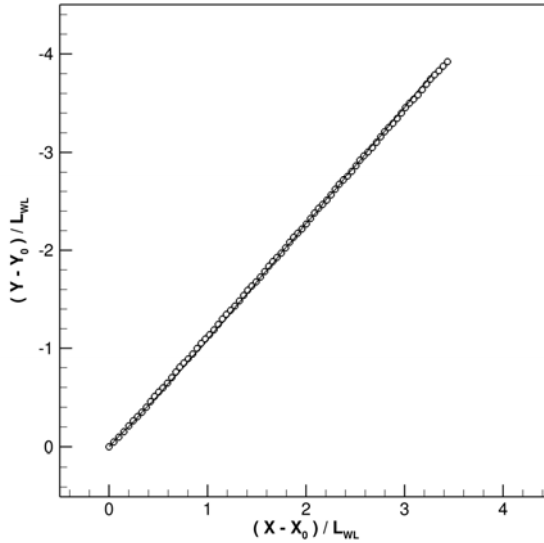


图 9 首斜浪工况下船舶运动轨迹同试验值的对比

图 11 给出了一个波浪周期内的尾部桨舵周围的涡量场变化。从图中可以很明显的看出桨、舵之间的强烈干扰，螺旋桨由于旋转导致的叶尖涡受到后面舵的影响，在舵上部和下部分别发生干扰，并且桨毂涡也可以观察到，桨毂涡的轨迹变化可以反映出船体的运动姿态，并且在不同时刻，涡的强度也可以看出明显的变化，以上桨舵间的干扰现象又可以揭示出自航船舶在波浪中航行的水动力变化，为船桨舵设计提供参考依据。

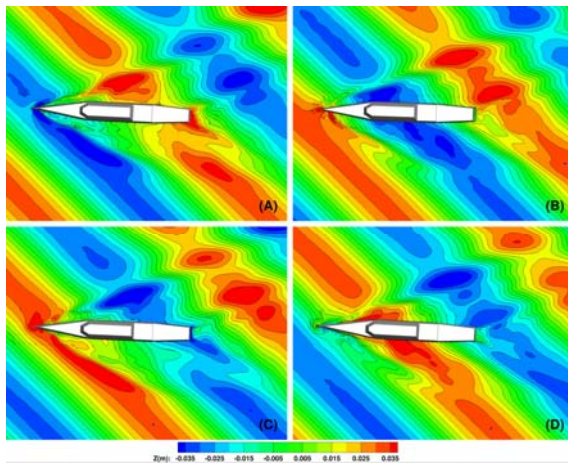


图 10 首斜浪工况下船舶自由面变化

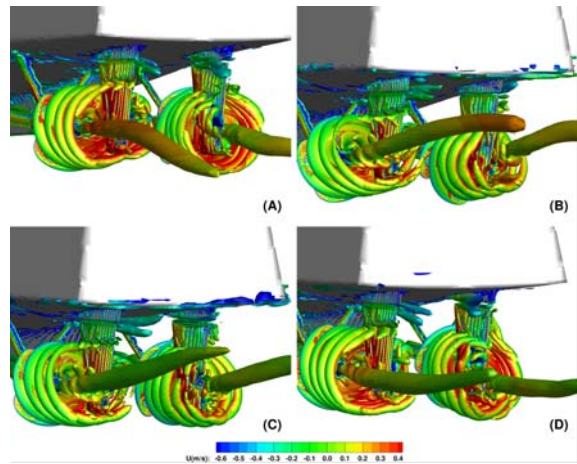


图 11 首斜浪工况下尾部涡量场变化

针对横浪工况，也进行了数值模拟，图 12 给出了一个横浪周期内自由面的变化，从图中可以看出，波面变化非常大，A 和 C 时刻自由面波高明显小于 B 和 D 时刻，即船舶处于波峰和波谷时，波面高度会变大。这主要是由于船舶在横浪工况下由于船舶运动产生的辐射波同入射波的叠加导致，即在 B 和 D 时刻，辐射波同入射波正好波峰相遇，导致波高显著增大。图 13 给出了一个横浪周期内，桨、舵周围伴流场的变化，同图中可以明显的看出横浪对伴流的影响，左舷桨周围的流场明显向右舷偏，并且还可以看出桨后舵对周围流场的影响，即在整个波浪周期内，由于舵的轴线偏离于桨的轴线，因此舵会更多的影响到内侧的流场。根据流场的变化，可以很好的分析横浪工况下船舶航行的水动力变化。



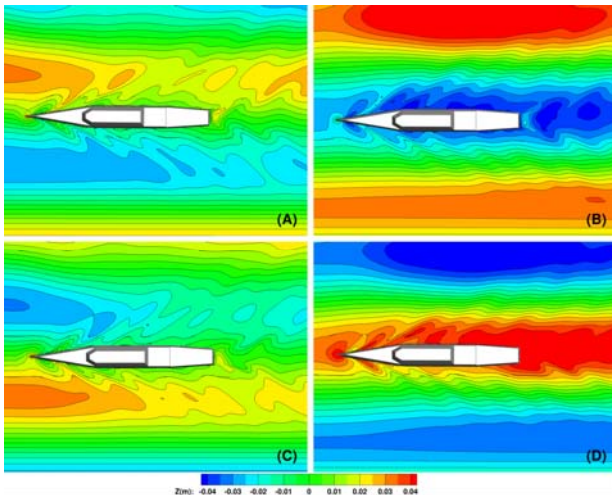


图 12 横浪工况下自由面变化

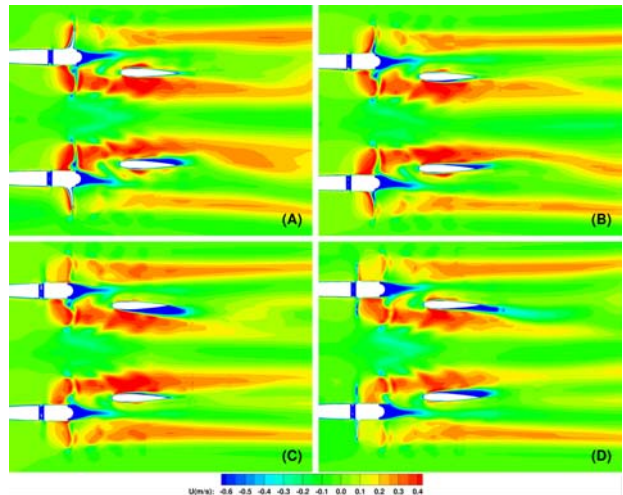


图 13 横浪工况下桨舵周围伴流场

## 2.2 静水和波浪中Z形操纵问题

上面介绍了采用自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器在静水和波浪工况中的应用，取得了满意的结果，求解器除了在航向稳定性中的应用外，还可以对典型操纵运动，如 Z 性操纵进行数值预报。这部分介绍了求解器在静水和波浪中 Z 形操纵问题的数值研究。跟航向稳定性研究一样，自航船舶需要给定螺旋桨转速以保证额定航速，这里 Z 形操纵中船舶航速同上面工况一致，螺旋桨转速选择之前数值预报的自航点，即转速为 8.819r/s。船舶 Z 形操纵运动的实现是通过舵角的控制，如典型的 10/10 Z 形操纵运动过程的实现如下，首先向一侧打 10 度舵角，船舶会在舵力的作用下向一侧偏转，当首向角达到 10 度后，立即反向打到 10 度舵角，然后船舶会在方向舵力的作用下向另外一侧偏转，依次类推，得到船舶 Z 形运动。

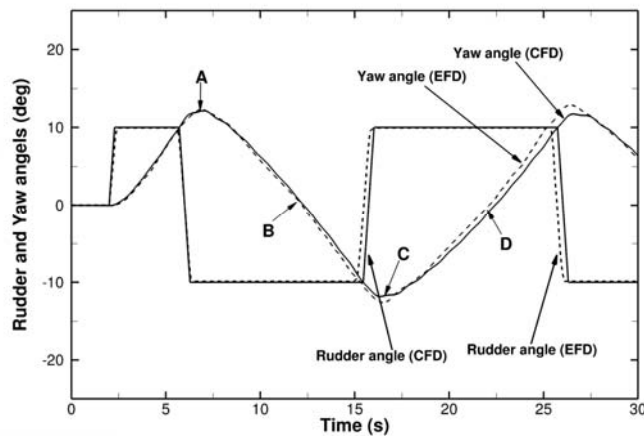


图 14 静水工况下舵角和首向角变化历时曲线

图 14 给出了静水工况下，10/10 Z 形操纵运动中舵角和首向角的历时曲线以及同试验值的对比，通过对比可以看出，当前 CFD 预报方法可以精确的预报船舶 Z 形操纵运动中的首向角变化。此外，还给出了 Z 形操纵运动过程中船舶的运动响应以及同试验值的对比，见图 15。从图中可以看出 CFD 预报的摇首速率小于试验值，因此导致了首向角曲线中，超越角预报偏小（A 和 C 位置处）。另外，数值得到的横摇角变化同试验值较为一致，但是最大横摇角预报偏小。Z 形操纵运动过程中的船舶航速也同试验值吻合较好，漂角结果同试验值有一定的误差。

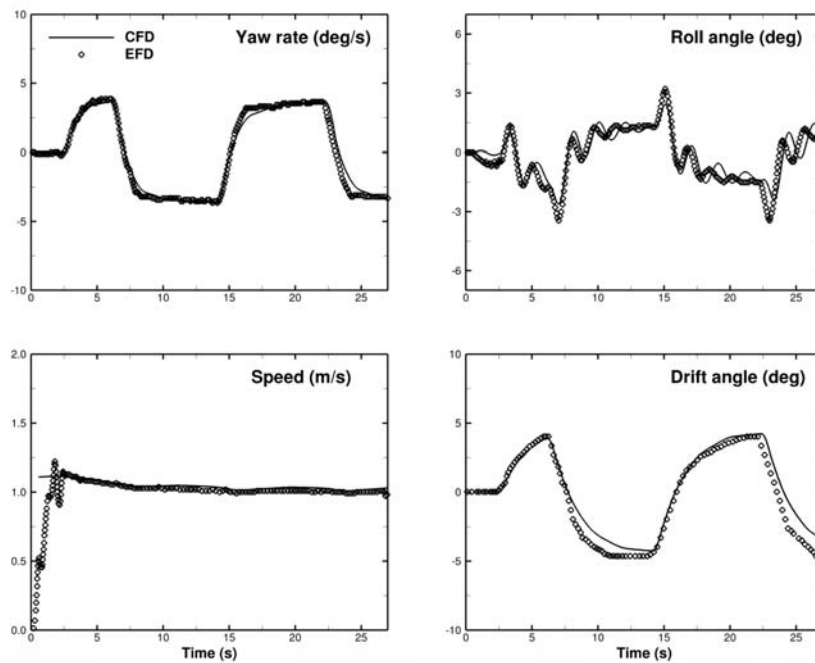


图 15 静水工况下船舶运动同试验值的对比

本文还进行了迎浪工况下的船舶 Z 形操纵试验数值模拟，入射波浪波长为一个船长，波高为 0.06294m。船舶舵角和首向角的变化如图 16 所示。

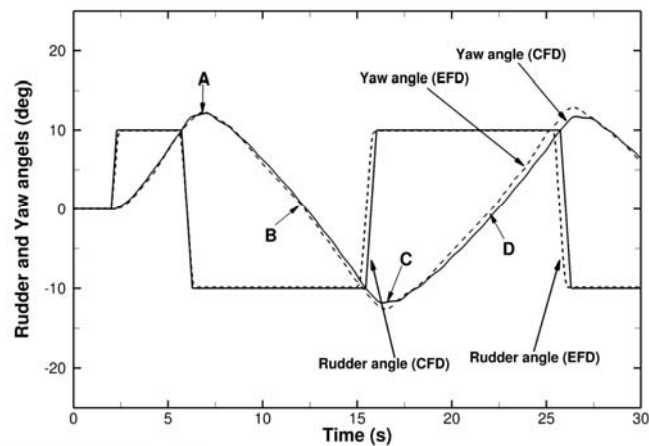


图 16 波浪工况下船舶 Z 形操纵舵角和首向角历时曲线

从图中可以看出，波浪工况下舵角和首向角变化同试验值吻合较好，其中数值预报结果较试验值周期更长，这部分可以通过船舶的航速变化来进行解释。图 17 给出了波浪工况下 Z 形操纵过程中，船舶的运动变化以及同试验值的对比，当前的数值结果可以精确的预报出船舶的垂荡和纵摇运动，横摇运动和漂角变化同样和试验值一致，只是数值结果得到的由于波浪影响导致的振荡幅度较小。船舶在波浪中的失速现象同样在这里出现，但是数值结果的幅度较小，即船舶航速的预报较试验值偏小，进而导致图 16 中需要更长的时间完成一个 Z 形操纵运动。

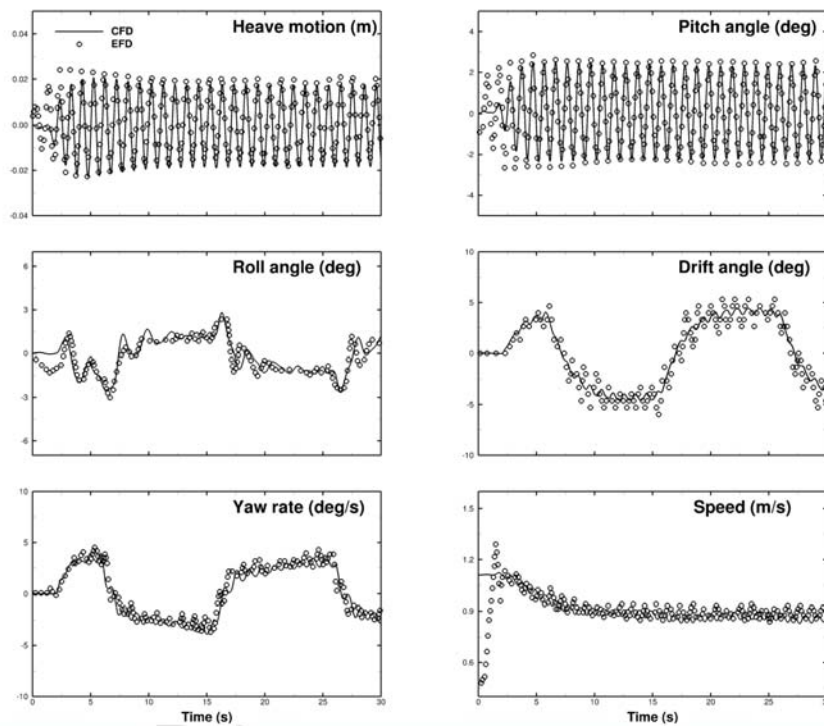


图 17 波浪中 Z 形操纵运动中船舶运动历时曲线

为了分析波浪工况下 Z 形操纵运动的水动力特性,图 18 给出了一个 Z 形操纵运动周期内的自由面变化,从图中可以看出,船舶在第一次超越角和第二次超越角时对波面影响最大,即兴波影响的区域更大,周围流场不对称性越明显,而在 B 和 D 时刻,虽然船舶处于平衡位置,但是由于有转首速度,因此周围的兴波也同直航情况不同。图 19 展示了一个 Z 形操纵运动周期内,桨、舵周围的涡量场变化,从图中可以清晰的看出,船舶在不同位置时,螺旋桨的叶尖涡和桨毂涡有明显的不同,同时,舵对周围的流场影响也呈现明显不同,如在 A 和 B 时刻,右舷的舵对前面的桨毂涡影响很大,而左舷则基本没有影响。在 C 和 D 时刻则这种现象正好相反,这种变化最终会导致左右两侧螺旋桨的推进效率变化。通过流场的分析可以对船舶在 Z 形操纵运动过程中的浮态和水动力特性进行详细的分析。

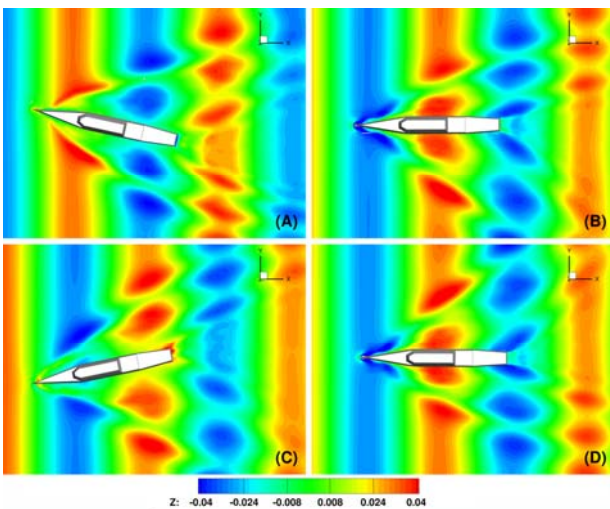


图 18 波浪中 Z 形操纵自由面变化

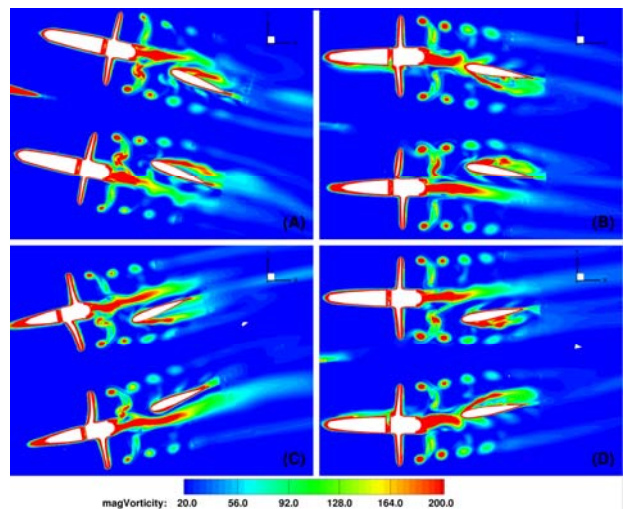


图 19 波浪中 Z 形操纵运动中尾部涡量场

### 3 结论

本文详细介绍了采用重叠网格方法直接数值模拟船桨舵协同配合下的船舶操纵性问题，并且成功应用到了静水和波浪工况中的航向稳定性问题和 Z 形操纵运动问题。数值预报结果，如船舶运动、航速变化、运动轨迹、舵角变化等同已有试验结果吻合较好，验证了当前求解器对船桨舵协同配合下的操纵性问题预报的适用性和可靠性。此外，针对不同工况，还给出了详细的流场信息，如自由面变化，桨、舵周围伴流场、尾部涡量场变化等等，分析了在特定操纵运动工况下水动力变化的原因。由于预报过程中还能对波浪工况下的操纵运动进行直接数值模拟，解决了高频运动（波浪导致）和低频运动（操舵导致）的同时求解的问题，可以整体预报出船桨舵协同配合下的运动形式和水动力特性，为船舶操纵性评估以及船舶整体设计提供了强有力的手段。

将来的工作将主要集中在典型操纵运动，如 Z 性操纵以及自由回转在不同浪向工况下的数值求解，以及对当前数值求解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(51379125, 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)，上海市船舶工程重点实验室基金项目(K2015-11)，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] International Maritime Organization. Standards for Ship Maneuverability[R], MSC. 137(76),.
- [2] Abkowitz, M.A. Measurement of hydrodynamic characteristics from ship maneuvering trials by system identification[J], 1980.
- [3] Abkowitz, M.A., and Liu, G. Measurement of ship resistance, powering and manoeuvring coefficients from simple trials during a regular voyage[J], Transactions - Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988, 96, 97–128.
- [4] Inoue, S. Hydrodynamic derivatives on Ship maneuvering[J], International Shipbuilding Progress, 1981, 28(321).
- [5] Inoue, S., and Hirano, M. A practical calculation method of ship maneuvering motion[J], International Shipbuilding Progress, 1981, 28(325), 207–222.
- [6] Hirano, M., and Takashina, J. A Calculation of Ship Turning Motion Taking Coupling Effect Due to Heel into Consideration[J], Journal of the West-Japan Society of Naval Architects, 1980 (59), 71–81.
- [7] Simonsen, C.D., Otzen, J.F., Klimt, C., Larsen, N.L., and Stern, F. Maneuvering predictions in the early design phase using CFD generated PMM data[C], 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, 2012, 26–31.
- [8] Sadat-Hosseini, H., Carrica, P., Stern, F., Umeda, N., Hashimoto, H., Yamamura, S., and Mastuda, A. CFD, system-based and EFD study of ship dynamic instability events: Surf-riding, periodic motion, and broaching[J], Ocean Engineering, 2011, 38(1), 88–110.
- [9] Sakamoto, N., Carrica, P.M., and Stern, F. URANS simulations of static and dynamic maneuvering for surface combatant: part 1. Verification and validation for forces, moment, and hydrodynamic derivatives[J], Journal of Marine Science and Technology, 2012, 17(4), 422–445.
- [10] Sakamoto, N., Carrica, P.M., and 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.
- [11] Marcu, O., and Obreja, D.C. RANS simulation of the planar motion mechanism tests for a VLCC hull[J], 2012,

1479, 189–192.

- [12] Zhang, X.-G., and Zou, Z.-J. Estimation of the hydrodynamic coefficients from captive model test results by using support vector machines[J], *Ocean Engineering*, 2013 73, 25–31.
- [13] Kang, D., Nagarajan, V., Hasegawa, K., and Sano, M. Mathematical model of single-propeller twin-rudder ship[J], *Journal of Marine Science and Technology*, 2008, 13(3), 207–222.
- [14] Khanfir, S., Hasegawa, K., Nagarajan, V., Shouji, K., and Lee, S.K. Manoeuvring characteristics of twin-rudder systems: rudder-hull interaction effect on the manoeuvrability of twin-rudder ships[J], *Journal of Marine Science and Technology*, 2011, 16(4), 472–490.
- [15] Carrica, P.M., and Stern, F. DES simulations of KVLCC1 in turn and zigzag maneuvers with moving propeller and rudder[C], *Proc SIMMAN 2008 Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods*, 2008.
- [16] Mofidi, A., and Carrica, P.M. Simulations of zigzag maneuvers for a container ship with direct moving rudder and propeller[J], *Computers & Fluids*, 2014, 96, 191–203.
- [17] Shen, Z., Wan, D., and Carrica, P.M. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering[J], *Ocean Engineering*, 2015, 108, 287–306.
- [18] Menter, F.R., Kuntz, M., and Langtry, R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model[J], *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 2003, 4(1), 625–632.
- [19] Issa, R.I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting[J], *Journal of Computational Physics*, 1986, 62(1), 40–65.
- [20] Noack, R.W., Boger, D.A., Kunz, R.F., and 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.