

首斜浪中自航船舶航向保持数值模拟研究

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: 自航船舶在复杂海浪环境下的运动可以直接反映船舶的航向保持能力。本文借助自主开发的船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU, 数值研究了自航船舶在首斜浪工况下的航向保持性能。数值计算中通过重叠网格技术结合多级物体运动模块实现船桨舵的复杂耦合运动求解, 入射波浪通过自主开发的数值造波模块实现, 并且开发了航向控制模块实现航向保持的数值模拟。通过计算得出了船舶在首斜浪工况下的六自由度运动、螺旋桨的推力和扭矩、舵角的历时曲线, 以及船舶的运动轨迹。数值计算结果同东京 2015 CFD 研讨会上的模型试验数据进行比较, 验证了直接数值求解波浪中船舶航向保持问题的可靠性。同时, 还给出了自航船舶在首斜浪中的自由面变化, 为分析船舶在波浪下的航向保持问题提供了数据支撑。

关键字: 船桨舵配合; 航向保持; naoe-FOAM-SJTU 求解器; 重叠网格方法

1 引言

一般情况下, 船舶理想状态是能够直线航行, 从而能够避免额外操作导致的能耗以及风险。但是真实海况下的船舶受到周围复杂流动和波浪影响, 会产生不可避免的偏航和大幅度运动。因此, 如果能够在设计阶段预报船舶在不同海况下的航向保持和运动情况, 可以为船舶设计和安全提供巨大帮助。

传统的预报船舶在波浪下的运动及船舶自航都是在物理水池中进行模型试验, 但是自航船舶的操纵, 尤其是在波浪工况下的自航船舶航向保持问题, 对试验设备和试验设计方案提出了极高的要求, 并且很难获得较为精确的船桨舵周围复杂的流场信息, 同时试验成本高昂。采用数值方法预报自航船舶的水动力性能就显得十分必要。目前, 针对船桨舵系统的自航船舶数值预报, 最为精确和可靠的方法是基于重叠网格方法的进行真实旋转螺旋桨和操舵的直接数值模拟。

Carrica 等[1] 采用 PI 控制器控制真实船后螺旋桨的转动, 实现了船舶自航的数值模拟。文中对三个船型, 单桨 KVLCC1 船、双桨 DTMB5415 船以及单桨 KCS 船进行了研究, 数值预报结果同相应的试验数据吻合较好, 验证了重叠网格方法直接数值模拟船舶自航可靠性。Mofidi 和 Carrica[2] 同样采用重叠网格方法, 通过完成对舵角的控制, 实现了 KCS 船 Z 形试验的数

值模拟，通过对典型 10/10 Z 形试验和修正型的 15/1 Z 形试验的数值模拟，验证了该方法对船舶自航操纵问题的适用性。沈志荣和万德成[3] 在开源 OpenFOAM 平台上实现了重叠网格功能，并实现了 KCS 船的自航和 Z 形试验数值模拟。王建华等[4] 在此基础上拓展并进行了自航船舶在波浪工况下的数值计算，完成了全附体带桨带舵船舶大幅度运动工况下的数值计算，验证了重叠网格方法对波浪工况下的船舶自航数值模拟的可靠性。本文将在之前工作的基础上，完成自航船舶航向保持控制模块的开发，实现在船舶在首斜浪工况下的航向保持数值模拟。

2 数值方法

2.1 流体控制方程和数值格式

文中数值计算采用基于开源 CFD 平台 OpenFOAM 自主开发的面向船舶与海洋工程问题的水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU。流体控制方程为非定常不可压两相流的 RANS 方程。湍流模型采用 SST- $k-\omega$ [5] 两方程模型，该方法综合了标准 $k-\epsilon$ 模型和 $k-\omega$ 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。同时，使用 OpenFOAM 提供的带有人工压缩项的 VOF 方法来处理自由面。

采用有限体积法进行整个计算域的空间离散，时间项采用一阶隐式 Euler 格式进行离散，对流项采用高阶 TVD 格式，扩散项采用中心差分格式，离散后的压力速度耦合求解采用 PIMPLE 算法（外层采用 SIMPLE 算法，内层采用 PISO[6]算法）进行迭代求解。

2.2 重叠网格方法和船桨舵运动控制

重叠网格方法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，同时各套网格之间存在网格重叠的部分。计算过程中首先根据网格布置和重叠情况，标记洞单元（物体内部）、活动单元、边界单元和贡献单元（为边界插值单元提供流场信息）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边界单元的插值，使得每套网格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。

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++[7]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。

为了进行自航船舶的航向保持数值模拟，本文在求解器已有的船桨舵多级运动模块基础上，加入了船舶航向控制模块，即通过 PI 控制器来实现对舵角的控制，最终完成船舶航向的控制。计算中舵角的控制形式如下：

$$\delta(t) = K_p(\psi(t) - \psi_C) \quad (1)$$

其中， $\delta(t)$ 为舵角， K_p 为比例系数，根据不同控制形式取值不同，这里根据试验值 K_p 取为 1， $\psi(t)$ 为首摇角度， ψ_c 为目标航向角。

3 船体模型和计算工况

本文计算采用东京 2015 船舶 CFD 研讨会提供的标准算例，对双桨双舵全附体 ONRT 标准船模在首斜浪工况下的航向保持进行了数值模拟。船体三维几何模型见图 1，具体船体参数见表 1。



图 1 双桨双舵全附体 ONRT 船体几何模型

表格 1 ONRT 船体主要参数

主要参数	模型尺度	实尺度
水线长 (m)	3.147	154.0
船宽 (m)	0.384	18.78
吃水 (m)	0.112	5.494
排水量 (kg)	72.6	8.507e6
螺旋桨直径 (m)	0.1066	--
螺旋桨桨轴倾角 (向下为正)	5	--
螺旋桨旋转方向 (从船后看)	内旋	内旋
最大转舵速度 (deg/s)	35.0	--

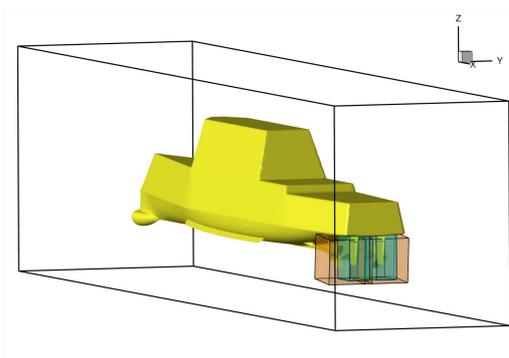


图 2 各网格分布

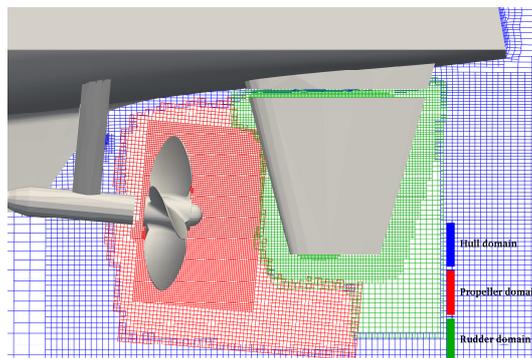


图 3 船后桨舵周围网格分布

计算域中网格分布如图 2 所示，共分为六套网格，一套背景网格、一套船体网格、两套

螺旋桨网格以及两套舵网格。各网格布置如图 3 所示，网格总量为 712 万。

本文计算工况设置参照东京 2015 船舶 CFD 研讨会上的标准算例，船舶在浪向为 45° ，螺旋桨转速设置根据 CFD 预报的船舶自航点[8,9]进行。船舶航速为 $U = 1.11 \text{ m/s}$ ，傅汝德数为 $Fr = 0.2$ ，入射波浪波高为 $H/L_{wl} = 0.02$ ，波长为 $\lambda/L_{wl} = 1.0$ 。通过舵角的控制，完成船舶的直线航行。波浪工况下的自航船舶航向保持数值模拟示意图如图 4 所示。数值计算在上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院高性能计算平台上进行，采用 40 个 CPU 核进行并行计算，时间步长设置为 $\Delta t = 0.0005 \text{ s}$ ，对应每个时间步内螺旋桨转过的角度为 1.5 度。总计算时间为 225 小时，对应 8979 个 CPU 核机时，约 38000 个时间步。

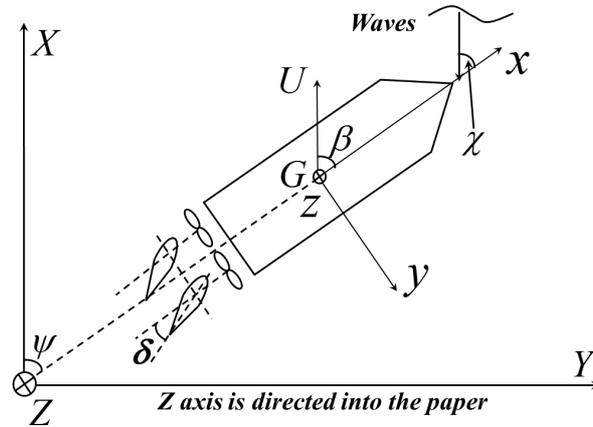


图 4 波浪工况下的自航示意图

4 计算结果和分析

试验和计算数据都进行无因次化，其中，船舶的六自由度运动 $(X, Y, Z, \phi, \theta, \psi)$ 表达的运动轨迹为 $(X - X_0/L_{wl}, Y - Y_0/L_{wl})$ ，船舶的三个线运动采用波高 ζ_a 进行无因次化，转动的无因次化形式为 $\phi/k\zeta_a, \theta/k\zeta_a, (\psi - \psi_c)/k\zeta_a$ ，其中 k 是波数。螺旋桨的推进系数如下：

$$KT = \frac{T}{\rho n^2 D_p^4} \quad (2)$$

$$KQ = \frac{Q}{\rho n^2 D_p^5} \quad (3)$$

其中， KT 为推力系数， KQ 为扭矩系数， n 是螺旋桨转速， D_p 为螺旋桨直径。

图 5 给出了数值模拟得到的自航船舶在首斜浪工况下的运动曲线，并且同试验值进行了对比，图中实线代表当前的数值预报结果，圆圈代表试验值，如无特殊说明，文中和试验对比的曲线均采用这种标记方式。船舶的六自由度运动呈现出非常明显的波频运动，垂荡、纵摇、横摇和首摇运动数值预报结果同试验值吻合良好。并且在斜浪工况下，由于波浪对船体产生的侧向力和转首力矩，使得船舶产生了显著的横摇运动和首摇运动，因此会对船舶的航向产生干扰，需要对舵角进行相应的控制，来保证航向的稳定。此外，从横摇和首摇运动历时曲线可以看出，在初始阶段 CFD 预报结果同试验测量值有较为明显的差别。这主要是由于

在数值计算中，船舶的初始状态是从稳定的自航流场开始，而试验中则存在较大的干扰，但是这种差别随着时间的推移，逐渐减弱并消失，整体的数值结果能够较为精确的预报出自航船舶在首斜浪工况下的运动响应。

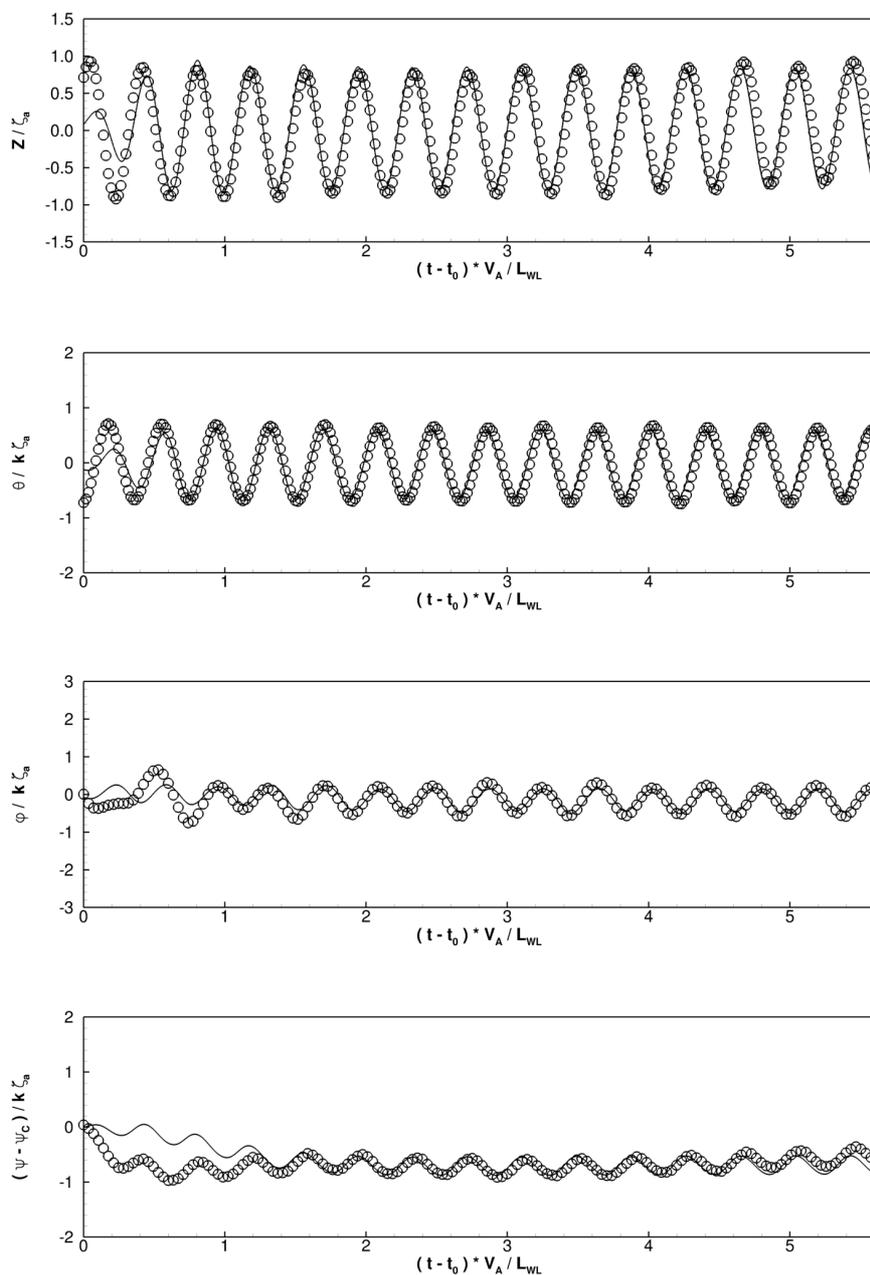


图 5 船舶垂荡、纵摇、横摇和首摇运动历时曲线（实线为当前的数值结果，圆圈为试验值）

图 6 给出了为了保持航向稳定，舵角的变化情况，并且同试验值进行了对比。其中为达到船舶的直线航行，在首斜浪工况下舵角的变化幅值达到 3.19° ，同试验值吻合较好。图 7 给

出了数值预报的船舶在首斜浪下航行的运动轨迹同试验测量结果的对比，充分证实了通过当前的舵角操控，可以实现船舶的直线航行，准确的舵角和航行轨迹预报结果验证了当前开发的航向控制模块的可靠性。

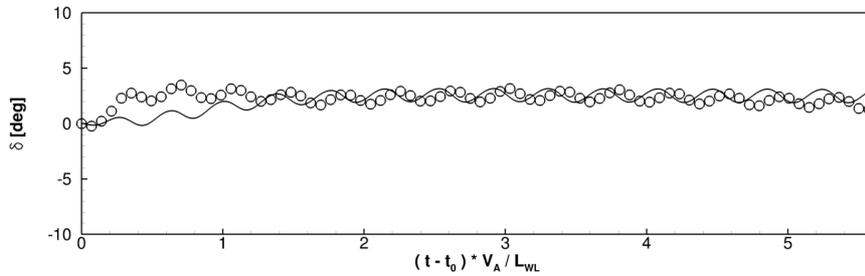


图 6 船舶舵角变化历时曲线

此外，图 8 给出了在整个过程中，船后螺旋桨的推力系数和扭矩系数的变化情况，从中可以看出，在波浪工况下，螺旋桨的推进性能呈现出明显的波动规律，波动频率对应于入射波频率，并且扭矩曲线波动更为复杂，且左舷和右舷桨的推进性能差别较大，主要原因有两个。首先，入射波对船后伴流，即两侧螺旋桨进流的影响，左舷螺旋桨处于迎浪面，而右舷螺旋桨处于背浪面，导致螺旋桨的实际进速系数发生变化。其次是由于控制航向的舵角在实时变化，导致两侧桨周围的伴流情况出现差异，进而影响螺旋桨的推进性能。同时，在曲线的局部放大图中，可以明显的看到高频的波动，这主要是由于真实螺旋桨转动时对应的四个叶片对流场扰动产生的。

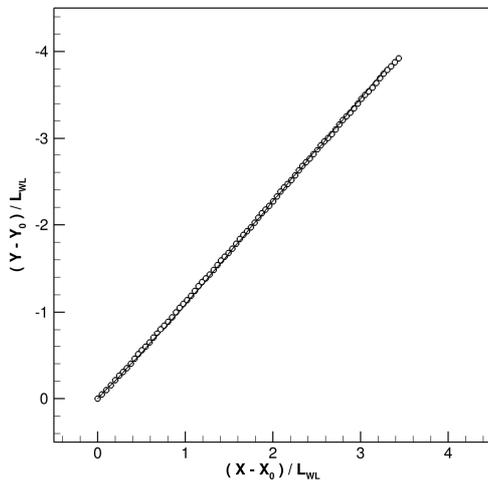


图 7 船舶航行轨迹对比

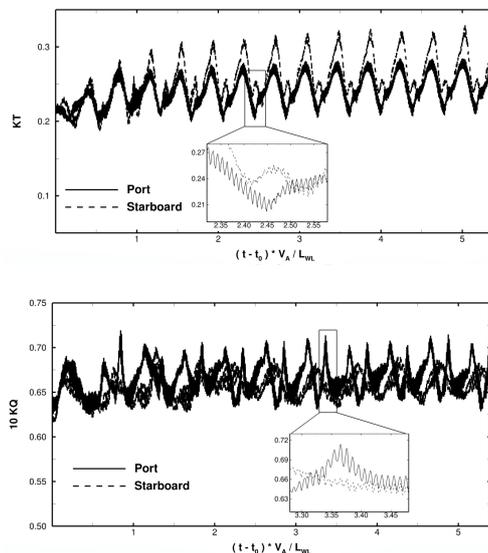


图 8 螺旋桨推力和扭矩曲线

数值模拟相对物理水池试验的一大优势是可以提供详细的流场数据，对问题进行详细的分析。图 9 给出了自航船舶在首斜浪工况下一个波浪周期内的自由面变化情况，通过图中可

以看出明显的波浪绕射，并且与入射波有强烈的干扰，在迎浪面，船体兴波船舶方向同入射波船舶方向相反，因此，影响区域较小，而在背浪面，船体兴波船舶方向与入射波方向一致，从而可以在很大的范围内看到船体的兴波存在。迎浪面和背浪面的波形分布不同导致船体表面的压力分布差异，从而产生了相应的侧向力和转首力矩，进而解释了前面数据结果中明显的横摇和首摇运动。

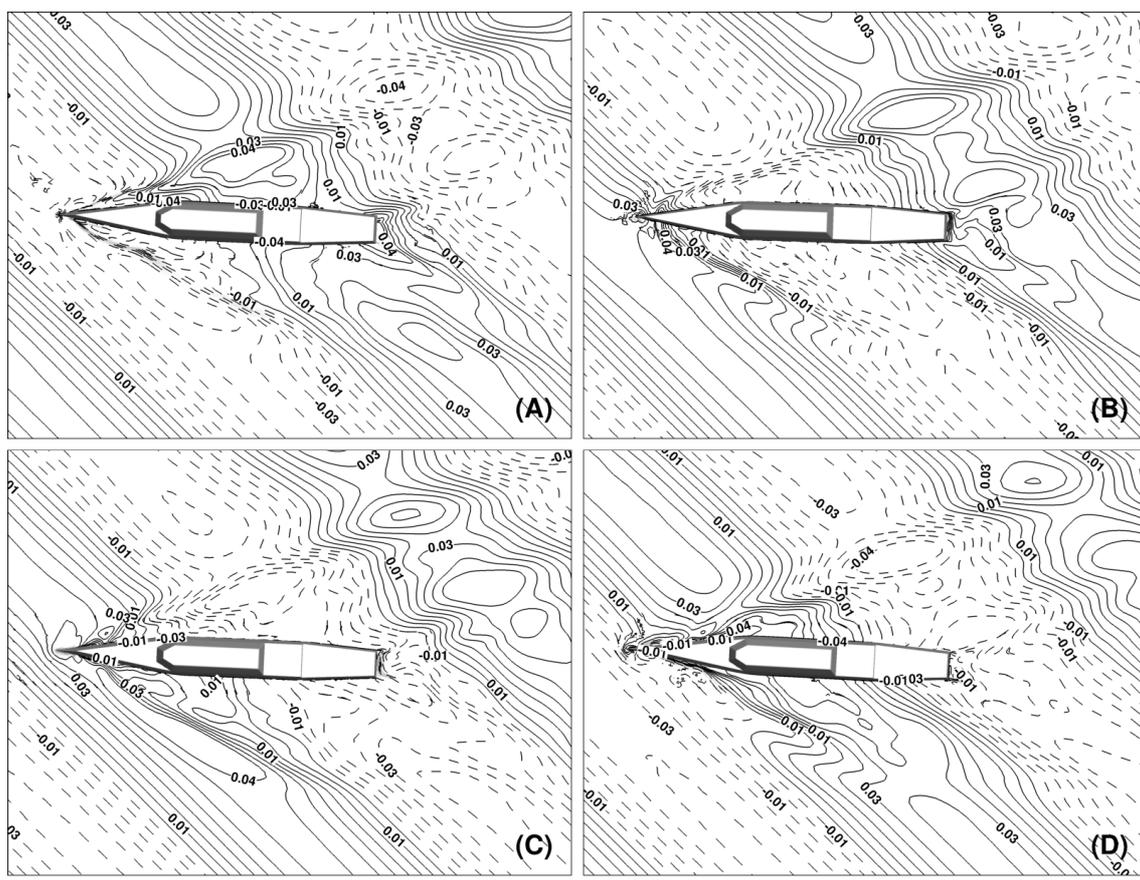


图 9 船舶在一个波浪周期内的自由面兴波

5 结论

本文采用自主开发的船舶与海洋工程水动力学求解软件 naoe-FOAM-SJTU 进行了自航船舶在首斜浪工况下的航向保持数值模拟。采用重叠网格方法模拟船桨舵的复杂运动，并且开发了对应的航向保持舵角控制模块。给出了该工况下的船舶运动历时曲线以及舵角变化曲线，同试验值吻合良好，并且从船舶的运动轨迹可以看出，在当前的舵角控制下，船舶可以保持良好的直线航行状态。此外，还给出了船后螺旋桨的推力及扭矩曲线，可以看出明显的波浪干扰以及四个叶片螺旋桨转动导致的高频振动。最后，还通过自由面变化情况分析了导致船舶明显横摇及首摇的原因。

致謝：本文工作得到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)，工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09) 和劳氏船级社博士生奖学金的资助。在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Carrica, P M, Castro, A M, Stern, F. Self-propulsion computations using a speed controller and a discretized propeller with dynamic overset grids, *J. Mar. Sci. Technol.*, 2010, 15(4): 316 – 330.
- 2 Mofidi, A, Carrica, P M. Simulations of zigzag maneuvers for a container ship with direct moving rudder and propeller, *Comput. Fluids*, 2014, 96: 191 – 203.
- 3 Shen, Z R, Wan, D C, Carrica, P M. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering, *Ocean Eng.* 2015, 108: 287 – 306.
- 4 王建华, 万德成. 全附体 ONRT 船模在波浪中自航的数值模拟. *应用数学和力学*, 2016, 37(12): 1345-1358.
- 5 Menter, F R, Kuntz, M, Langtry, R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. *Turbul. Heat Mass Transf.* 2003, 4: 625 – 632.
- 6 Issa, R I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *J. Comput. Phys.* 1986, 62: 40 – 65.
- 7 Noack, R W, Boger, D A, Kunz, R F, Carrica, P M. Suggar++: An improved general overset grid assembly capability, *Proc. 19th AIAA Comput. Fluid Dynamics*, San Antonio, USA, 2009, 22 – 25.
- 8 Wang, J H, Zhao, W W, Wan, D C. Free maneuvering simulation of ONR Tumblehome using overset grid method in naoe-FOAM-SJTU solver, *Proc. 31th Symposium Naval Hydrodynamics.*, Monterey, USA, 2016.
- 9 Wang, J H, Zou, L, Wan, D C. CFD simulations of free running ship under course keeping control, *Ocean Eng.*, 2017, 141: 450-464.

Numerical investigations of free running ship in bow quartering waves under course keeping control

WANG Jian-hua, WAN De-cheng

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

Abstract : Ship motions in rough sea states can directly show the capability of course keeping. In this paper, numerical investigations are carried out for the free running ship in bow quartering waves using self-developed CFD solver naoe-FOAM-SJTU. The complex ship motions with actual rotating propellers and moving rudders are calculated using dynamic overset grids and 6DoF motion with a hierarchy of bodies. Incident waves are generated by the 3D wave tank module. Furthermore, the course keeping control module is developed to simulate free running ship under course keeping control. Predicted ship motions, rudder deflection, propulsive coefficients and trajectory are present and compared with the available experimental data from Tokyo 2015 CFD workshop. Good agreements are achieved and show that the present approach is suitable for the numerical simulation of free running ship under course keeping control in waves. In addition, free surface elevation are presented to further analyze the ship hydrodynamic performance in bow quartering waves.

Key words: Ship hull-propeller-rudder interaction, Course keeping, naoe-FOAM-SJTU solver, Overset grid method.