

实尺度船舶参数横摇数值模拟研究

刘李为, 董 凯, 陈静瑶, 陈美霞, 王先洲

(华中科技大学 船舶与海洋工程学院 船舶和海洋水动力湖北省重点实验室, 武汉 430074)

摘 要

船舶在特定波浪环境下会遭遇大幅度的参数横摇运动。论文基于黏性流理论建立 CFD 数值模拟方法, 结合动态重叠网格技术与刚体 6 自由度运动预报模块, 对国际标准水面船模型 ONRT, 在横摇、纵摇与垂荡 3 自由度耦合运动情况下进行实尺度参数横摇数值模拟。还在安装不同附体(舵龙骨、呆木、尾舵)的条件下进行参数横摇数值预报。研究结果表明, 加装舵龙骨对参数横摇具有显著的抑制作用, 而呆木与尾舵虽然能在一定程度上减小参数横摇幅值, 总体而言效果不显著。研究成果对船舶第二代完整稳性衡准的研究具有一定的参考意义。

关 键 词: CFD; 参数横摇; 实尺度; 数值不确定度; ONRT

中图分类号: U661.32

文献标志码: A

0 引 言

参数横摇是由于复原力臂呈周期性变化而引起的在波浪中航行的船舶强非线性运动, 严重时会使船舶倾覆, 国际海事组织(IMO)将其定义为第二代完整稳性衡准中 5 种稳性失效模式(参数化横摇、纯稳性丧失、骑浪/横甩、瘫船与过度加速度)之一。在 IMO 船舶设计与建造分委会(SDC)第四次会议中, 参数横摇的直接评估方法是关注的重点。直接稳性评估方法的建立能够以更精确的方式考虑所有相关因素, 这在船舶设计阶段是较为重要的。

Sadat-Hosseini等^[1]运用 3 种方法对国际标准模型 ONRT 参数横摇现象发生的区间进行预报, 包括试验方法、CFD (computational fluid dynamics) 方法与非线性动力学分析(non-linear dynamic analysis)方法。研究结果表明, CFD 方法对模型在迎浪条件下参数横摇的预报结果与试验较为吻合。卜淑霞等^[2]基于切片理论提出了考虑非线性成分的横摇-纵摇-垂荡耦合的 3 自由度(3DOF)数学模型, 并以集装箱船为对象进行顶浪参数横摇的预报。Zhang 等^[3]基于黏性流 CFD 方法对实尺度船舶的参数横摇失稳运动进行了数值预报研究, 并对参数横摇发生过程中船舶的受力和力矩特性进行了分析。朱军等^[4]提出了一种横摇-纵摇-垂荡耦合的切片计算方法, 用于计算参数横摇并分析其发生的机理。在斜浪条件下, 船舶易受到参数激励与强迫激励的共同作用, 也会发生大幅横摇运动。鲁江等^[5]、储纪龙等^[6]和李红霞等^[7]基于势流理论进行了相关的数值模拟研究。

以上研究主要以船模作为研究对象。需要注意的是, 在基于缩比模型结果预报实尺度船舶性能的方法中, 尺度效应是一个较为重要的问题。因此, 发展实尺度船舶参数横摇特性的直接预报技术具有

重要意义。Liu 等^[8]针对自行研制的黏性流非定常CFD 求解器 HUST-Ship 进行了验证与确认,并评估该求解器用于实尺度船舶参数横摇数值预报的不确定度。本研究基于该求解器对 ONRT 水面舰船实尺度模型在迎浪条件下的参数横摇运动进行数值模拟。同时,研究安装在尾部的附体对于参数横摇特性的影响。

1 数学模型与数值方法

自研 CFD 求解器 HUST-Ship 主要用于水面舰船水动力性能的数值预报。利用该求解器对非定常的 RANS 方程进行求解以获取内外流场的流动特征,采用有限差分法对控制方程进行数值离散,然后基于全结构网格划分方式在每个网格点上对差分方程进行求解。控制方程如式(1)和式(2)所示:

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

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial(U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j}) \quad (2)$$

式中, U_i 、 U_j 为时均速度, ρ 为流体密度, P 为时均压力, μ 为动力黏性系数, $\overline{\rho u_i u_j}$ 为表示湍流脉动的雷诺应力。采用 SST $k-\omega$ 两方程湍流模型^[9]对控制方程进行封闭。

使用 HUST-Ship 求解器对上述控制方程和水面船的 6 自由度运动方程耦合求解,得到水面舰船受力和运动特性。分别定义了大地坐标系(惯性参考系)和船体坐标系(非惯性参考系)。还耦合了自行研制的重叠程序 HUST-OverSet,可在前处理过程中实现不同对象(计算域、船体、各附体以及推进器)网格的单独生成,然后生成最终的计算网格模型;还可在全时域求解过程中动态调用重叠网格模块,实时更新船舶及其附体姿态,便于实现船舶网格模型与计算域之间的大幅相对运动。

在计算域入口处给定速度条件,以实现规则波的数值模拟。规则波的波面方程可用余弦函数表示:

$$\zeta(t) = A \cos(kx - \omega t + \varphi) \quad (3)$$

式中, ζ 为波面升高, A 为波幅, k 为波数, ω 为波浪圆频率, φ 为初始相位。

速度入口造波方式在实际操作中较容易实现,与推板或摇板造波相比,使用该方式在起始段波浪就能够发展良好,无需充分发展和传播的空间,因此对水池尺寸的要求更低。

2 计算对象与工况

以如图 1 所示的国际标准模型 ONRT 为研究对象,主尺度如表 1 所示。基于 INSEAN 水池模型试验的工况^[10],选取迎浪规则波的波幅 A 为 $0.018 3L_{pp}$ (L_{pp} 为垂线间长),波长 λ 为 $1.0L_{pp}$,进行 ONRT 实尺度船舶在航速 3.88 m/s (弗劳德数 $Fr = 0.10$) 时的参数横摇模拟,考虑模型的横摇-纵摇-垂荡 3 自由度运动,并约束其横荡-纵荡-艏摇自由度的运动。同时,对实尺度 ONRT 舰船在安装不同附体(艏龙骨、呆木、尾舵)的条件下进行参数横摇数值预报。计算工况如表 2 所示。

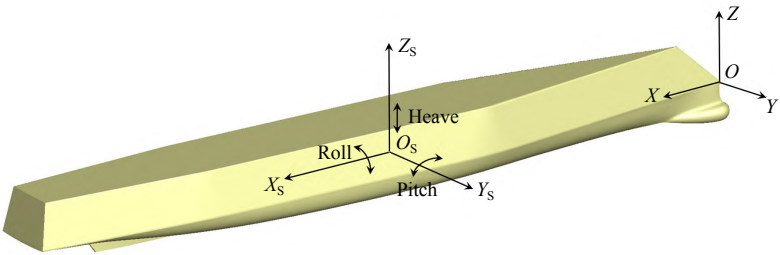


图 1 ONRT 船型

表 1 ONRT 船型主尺度参数

参数	垂线间长 L_{pp} / m	型宽 B / m	吃水 T / m	重心高度 h_{KG} / m	初稳性高 h_{GM} / m
数值	154.00	18.78	5.60	8.16	1.54

表 2 计算工况

工况	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
模型	光体	光体+呆木	光体+呆木+尾舵	光体+呆木+艏龙骨

对于计算域、船体以及各附体（呆木、尾舵、艏龙骨）分别进行结构网格的划分，计算域网格与数值模拟边界条件的设置如图 2 所示。船体、呆木、尾舵以及艏龙骨的网格如图 3 ~ 图 6 所示。运用重叠程序 HUST-Overset 实现网格重叠与组装，并生成计算网格模型，如图 7 所示。

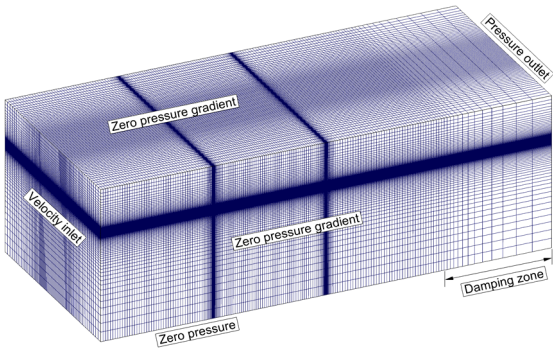


图 2 计算域网格

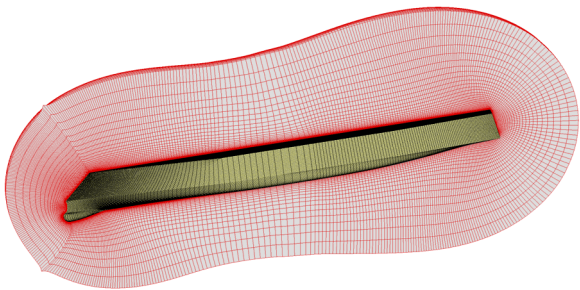


图 3 船体网格

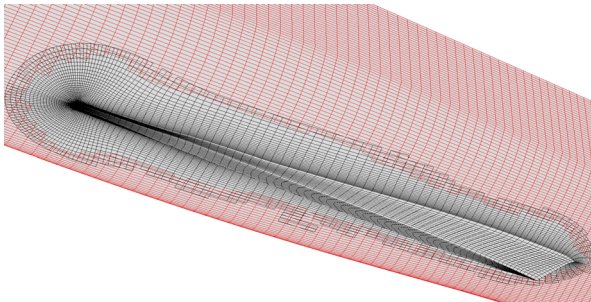


图 4 呆木网格

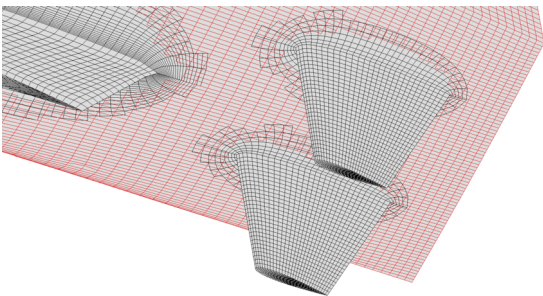


图 5 尾舵网格

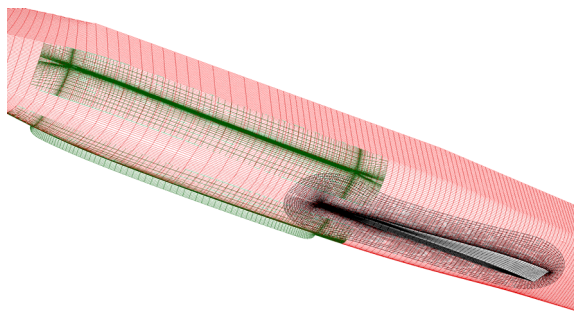


图6 舳龙骨网格

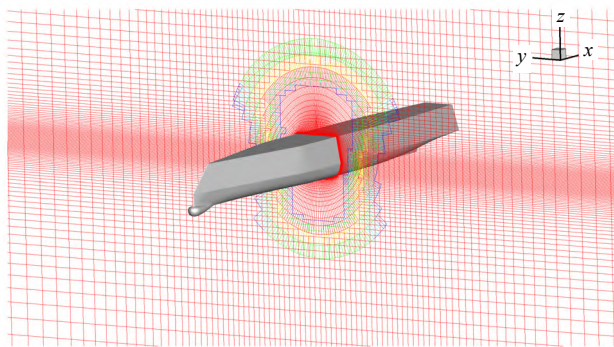


图7 重叠后的计算网格模型

3 计算结果与分析

3.1 不确定度评估

在文献[8]中已针对工况 2 进行了 CFD 数值模拟方法的验证与确认,包括系统的网格与时间步长的收敛性分析。基于 Richardson 外推法^[9]得到网格不确定度 U_G 与时间步长不确定度 U_T , 进而得到数值不确定度 U_{SN} , 如表 3 所示。不确定度 U_V 可根据试验不确定度 U_D 与数值不确定度 U_{SN} 进行计算, 如式 (4) 所示:

$$U_V^2 = U_D^2 + U_{SN}^2$$

(4)

基于 CFD 方法的数值预报结果与试验结果, 得到比较误差 E , 如表 3 所示。表中的比较误差 E 小于不确定度 U_V , 可判断数值预报结果已得到确认, 该数值模拟方法能进行可靠和准确的预报。实尺度 ONRT 船舶发生参数横摇时的时历曲线如图 8 所示。可见实尺度 CFD 数值模拟结果与 INSEAN 水池模型试验测量得到的横摇时历曲线吻合良好。

表 3 数值方法验证与结果确认

参数	U_G	U_T	U_{SN}	U_D	U_V	E
数值/%	5.11	0.28	5.39	3.40	6.37	4.29

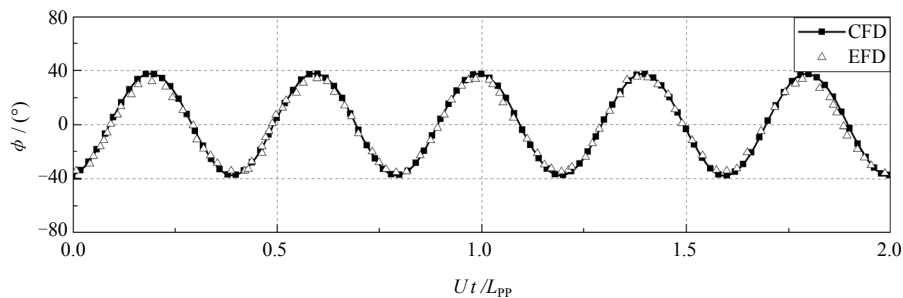


图8 实尺度 ONRT 横摇运动时历曲线 ($Fr = 0.10$)

3.2 附体对船舶参数横摇的影响

对安装不同附体(舳龙骨、呆木、尾舵)情况下的实尺度 ONRT 舰船进行迎浪条件下参数横摇的数值模拟。在工况 1(光体船舶)下船舶的垂荡、横摇与纵摇时历曲线如图 9 所示。伴随着周期性的垂荡与纵摇耦合运动, 光体船舶发生了显著的参数横摇现象, 且稳定后的横摇幅值达到了 40.5° 。还发

现船舶的参数横摇周期为纵摇周期的两倍左右，而垂荡周期与纵摇周期接近。

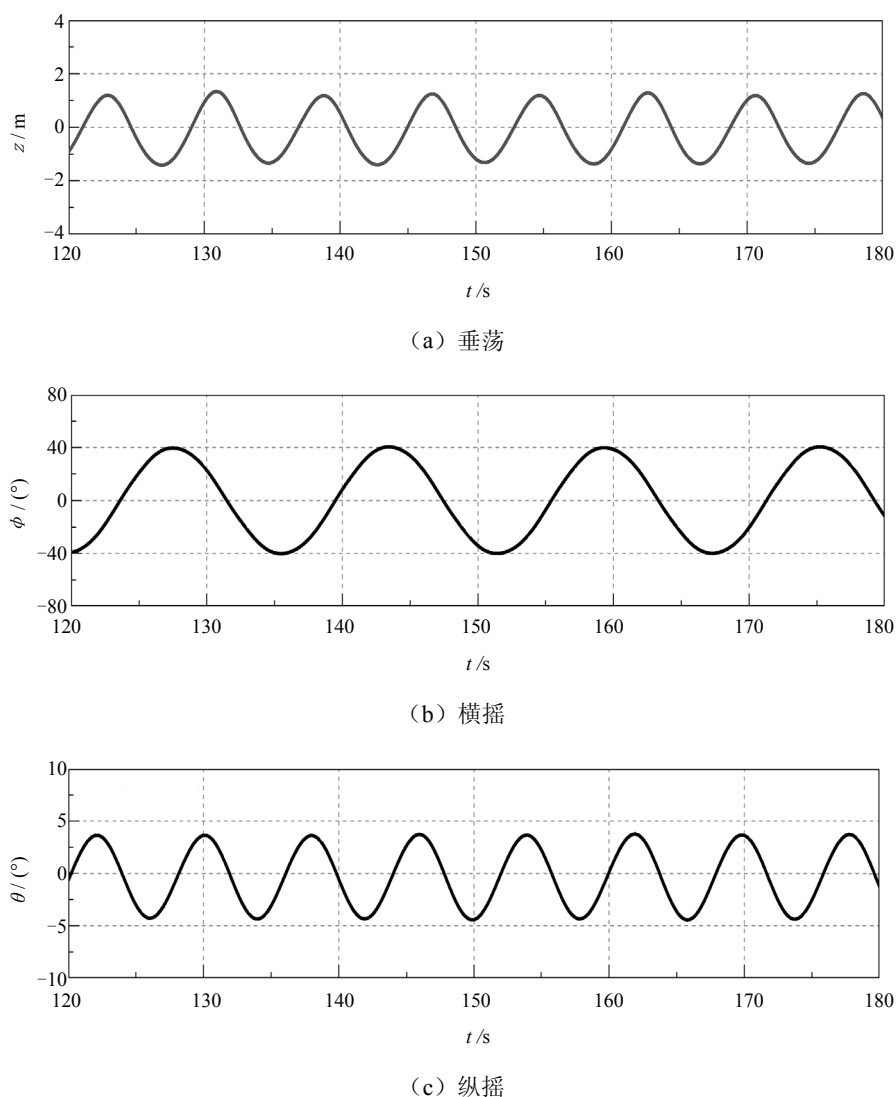


图9 实尺度 ONRT 光体垂荡、横摇与纵摇运动时历曲线数值模拟

在加装了不同附体后,实尺度 ONRT 舰船在同一波浪与航速条件下的横摇运动时历曲线如图10所示。工况2与工况3均发生了显著的参数横摇,稳定后的横摇幅值与工况1相比稍有所降低,这说明安装呆木和尾舵对船舶参数横摇的影响较小。然而,在船舶加装了舦龙骨之后(工况4),上述显著的参数横摇现象基本消失,且稳定后的横摇角趋于 0° ,这与INSEAN水池中针对带舦龙骨的ONRT模型的试验结果一致,充分说明安装舦龙骨能显著增大船舶的横摇阻尼,起到抑制参数横摇的作用。

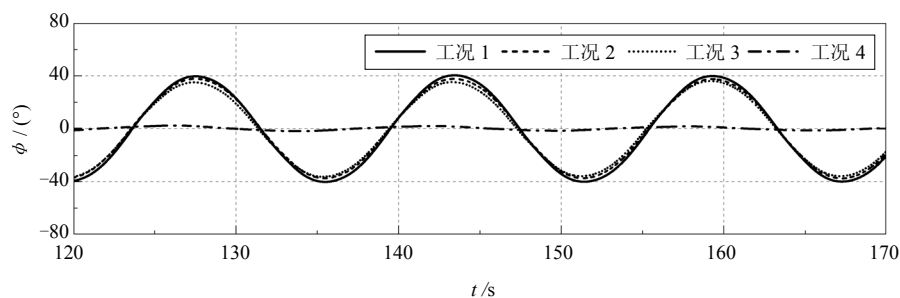


图10 加装不同附体的 ONRT 船舶横摇运动时历曲线

图 11 显示了加装不同附体后的实尺度 ONRT 舰船的垂荡、横摇与纵摇幅值。安装附体对垂荡与纵摇幅值的影响不显著。对横摇幅值, 加装呆木使其降低了 6.7%, 在此基础上加装尾舵会使其再降低 4.9%, 而加装舳龙骨会直接抑制参数横摇现象。在工况 3 下不同时刻实尺度 ONRT 模型的兴波与尾部涡结构如图 12 所示, 其中 T_e 为波浪的遭遇周期, 图中左上角的小图为船舶参数横摇过程中的尾部涡结构分布。由图可知, 船舶在遭遇参数横摇的过程中, 当船舯处于波谷、船首处于波峰位置时, 船舶横摇角达到最大值, 此时在横摇运动和入射波浪的作用下船舶会发生显著的甲板上浪, 如图 12(a) 和 图 12(d) 所示。同时, 由于大幅横摇、纵摇与垂荡运动的耦合作用, 船舶还会遭受较为显著的首部砰击, 如图 12(b) 和 图 12(c) 所示。由左上角的小图可知, 船后呆木与尾舵周围出现了显著的涡流, 且呈现较为明显的非对称性。正是由于尾部附体引起的流场变化, 导致船舶参数横摇幅值的略微减小。

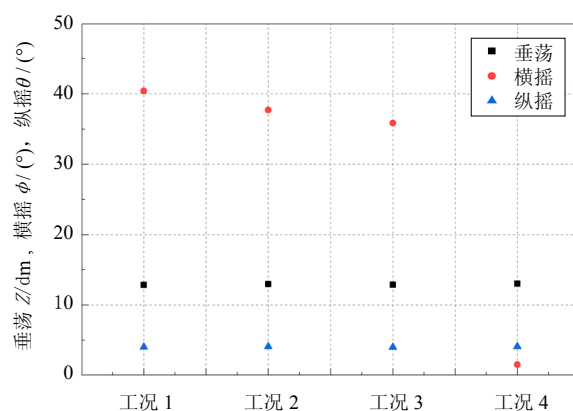


图 11 加装不同附体的 ONRT 船舶横摇运动幅值对比

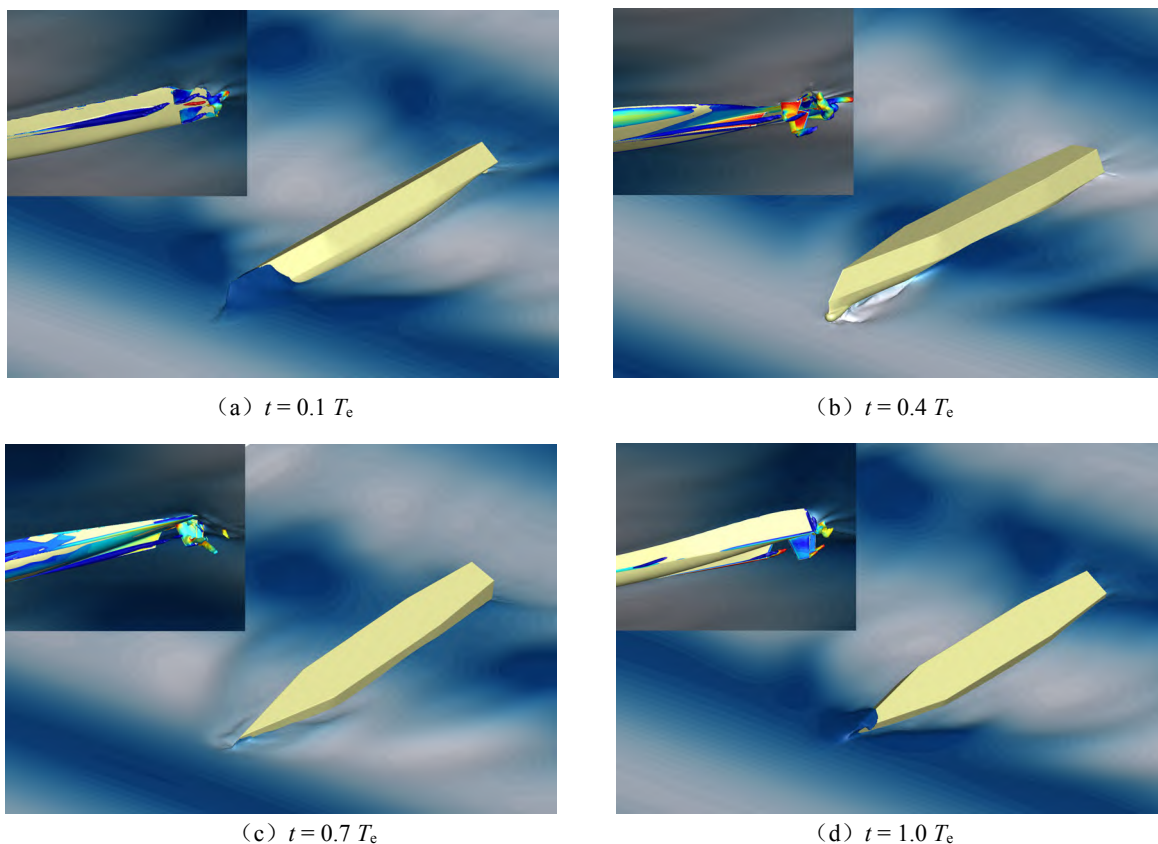


图 12 在工况 3 下不同时刻实尺度 ONRT 模型兴波与尾部涡结构

4 结 论

本文针对国际标准水面船模型 ONRT, 基于 CFD 数值模拟方法, 并结合动态重叠网格技术和刚体 6 自由度运动预报模块, 进行了实尺度船舶在横摇、纵摇与垂荡 3 自由度下的参数横摇数值模拟。得到以下结论:

(1) 通过数值不确定度分析和验证, 表明该实尺度数值模拟方法能较为准确和可靠地预报迎浪条件下船舶的参数横摇。

(2) 加装舳龙骨对参数横摇具有显著的抑制作用, 呆木与尾舵能在一定程度上减小参数横摇幅值, 但总体而言效果不显著。

这项研究成果对船舶第二代完整稳性衡准的研究具有一定的参考意义。

参 考 文 献

- [1] SADAT-HOSSEINI H, STERN F, OLIVIERI A, et al. Head-wave parametric rolling of a surface combatant [J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(10): 859-878.
- [2] 卜淑霞, 鲁江, 顾民, 等. 顶浪规则波中参数横摇数值预报研究[J]. *中国造船*, 2014, 55(2): 1-7.
- [3] ZHANG Z, GUO L, WANG S, et al. URANS simulation of ONR tumblehome parametric rolling in regular head waves[C]// OMAE2019-96425. ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Glasgow, 2019.
- [4] 朱军, 朱韬, 王智宇, 等. 船舶参数横摇数值计算与力学机理分析[J]. *中国舰船研究*, 2020, 15(3): 25-31.
- [5] 鲁江, 马坤, 黄武钢. 斜浪群波中船舶复原力和参数横摇研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2012, 33(5): 629-634.
- [6] 储纪龙, 鲁江, 顾民, 等. 斜浪规则波中船舶参数横摇研究[C]// 中国力学学会, 等. 第十四届全国水动力学学术会议暨第二十八届全国水动力学研讨会文集(下册). 上海: 《水动力学研究与进展》杂志社, 2017.
- [7] 李红霞, 鲁江, 顾民, 等. 斜浪中参强激励横摇运动的数值模拟与解析分析[J]. *中国造船*, 2015, 56 (1): 113-119.
- [8] LIU L W, CHEN M X, WANG X Z, et al. CFD prediction of full-scale ship parametric roll in head wave[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 233: 109180.
- [9] XING T, STERN F. Factors of safety for Richardson extrapolation[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2010, 132(6): 061403.
- [10] SADAT-HOSSEINI H. CFD prediction of ship capsizing: parametric rolling, broaching, surf-riding, and periodic motions[D]. Iowa: University of Iowa, 2009.

Numerical Study on Parametric Roll of Full-scale Ship

LIU Liwei, DONG Kai, CHEN Jingyao, CHEN Meixia, WANG Xianzhou

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Key Laboratory of Ship and Ocean Hydrodynamics of Hubei, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract

As a ship is advancing in a certain wave condition, the parametric roll may occur with a large amplitude. Therefore, it is of importance to develop the numerical method aimed at simulating this nonlinear stability failure mode and predicting the parametric roll. In this study, a viscous CFD method, coupled with dynamic

overset grid approach and rigid-body 6 DOF motion prediction module, is performed for the prediction of the roll-pitch-heave motions of the full-scale ONR Tumblehome. The systematic verification and validation studies are first conducted to quantify the uncertainty and prediction difference during the full-scale simulation. The parametric roll of the ONR Tumblehome appended with different appendages (bilge keels, skeg, and rudder) is then simulated to study the effect of the appendages on the parametric roll. The results indicate that the bilge keel shows significant effect to restrain the occurrence of the parametric roll but the effects of the skeg and rudder are not obvious. This study can provide a reference for the research of second-generation intact stability criteria.

Key words: computational fluid dynamics; parametric roll; full scale; numerical uncertainty; ONRT

作者简介

刘李为 男, 1997 年生, 博士研究生。主要从事数值仿真计算与船舶水动力性能方面的研究。

董 凯 男, 1997 年生, 硕士研究生。主要从事数值仿真计算与船舶水动力性能方面的研究。

陈静瑶 女, 1998 年生, 硕士研究生。主要从事数值仿真计算与船舶水动力性能方面的研究。

陈美霞 男, 1975 年生, 教授, 博士研究生导师。主要从事舰船结构振动与噪声控制方面的研究。

王先洲 男, 1975 年生, 副教授。主要从事船舶水动力学、船舶操纵与控制方面的研究。