

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2016.05.006

基于重叠网格技术数值模拟船舶纯摇首运动*

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, Email: sjtuwjh@gmail.com)

摘要: 该文采用基于非定常 RANS 方程的黏性数值模拟方法, 对标准船模 DTMB5512 裸船体在平面运动机构 (PMM) 控制作用下的纯摇首运动进行了数值模拟。文中数值计算采用基于开源 CFD 工具包 OpenFOAM 和重叠网格技术开发的多功能水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU。根据 SIMMAN2014 提供的标准算例, 对同一运动频率下, 在 $Fn = 0.28$ 工况下的 3 种不同运动幅值的纯摇首运动进行了数值计算, 得出了船舶不同工况下的阻力、侧向力和转首力矩的历时曲线。并且根据操纵性数学模型 (MMG) 推导出相应的水动力导数值, 所有计算结果同模型试验数据吻合较好, 验证了采用当前处理方法数值求解纯摇首运动的可靠性。

关键词: 重叠网格; 平面运动机构 (PMM); 纯摇首; naoe-FOAM-SJTU 求解器

中图分类号: U661.1

文献标识码: A

Numerical simulation of pure yaw motion using dynamic overset grid technology

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, China)

Abstract: This paper presents the URANS simulation and analysis of the hydrodynamic characteristics for the surface combatant Model 5512 bare hull under dynamic planar motion mechanism (PMM). All the numerical computations are carried out by in-house solver naoe-FOAM-SJTU coupled with dynamic overset grid method. In the present work, the ship model is

* **收稿日期:** 2015-10-30(2016-08-31 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 11432009, 51579145, 11272120)、长江学者奖励计划(T2014099)和上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022)

作者简介: 王建华(1988 -), 男, 河北邢台人, 博士研究生。

通信作者: 万德成, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

Received: October 30, 2015 (**Revised** August 31, 2016)

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51379125, 51490675, 11432009, 51579145, 11272120), the Chang Jiang Scholars Program (T2014099) and the Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions of Higher Learning (2013022)

Biography: WANG Jian-hua (1988-), Male, Ph. D. Candidate.

Corresponding author: WAN De-cheng, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

subjected to pure yaw motion at Froude number 0.28. The hydrodynamic forces and moments acting on the ship are obtained for further analysis. According to the MMG mathematical model, the hydrodynamic derivatives are obtained. All the above numerical results have been compared to the experimental data presented at SIMMAN 2014. All the predicted hydrodynamic derivatives agree well with the experimental data, which indicates that the present solver coupled with dynamic overset grid method is applicable for the simulation of pure yaw motion.

Key words: Pure yaw; PMM; Dynamic Overset Grid; naoe-FOAM-SJTU

引言

近年来,伴随着对于船舶航行安全性能的日益提升,船舶操纵性的重要性也变得越来越凸显。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)^[1]。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。

目前,对于船舶操纵性能的研究主要还是基于物理试验进行,其中最为常用的一种方法就是采用平面运动机构(Planner Motion Mechanism)进行约束船模试验。得到相关水动力数据后,再根据操纵性数学模型进行船、桨、舵配合的操纵性能仿真,这种方法被较广泛地采用。目前PMM试验主要分为静态试验(斜拖试验)和动态试验(纯横荡试验、纯摇首试验等)。平面运动机构试验有其特有的优势,可以很好地实现多个运动的叠加,但是同样它也有很多自身的缺点:需要的设备成本很高,多个工况下需要进行重复性的工作;运动过程中由于不同工况下船体各个方向的受力范围差别较大,因此对于传感器的灵敏度要求较高;物理试验不能给出在各个工况下船体周围流场的信息,不便于研究分析等。

近年来伴随着计算流体力学(CFD)在船舶水动力学领域的迅猛发展,采用黏性流场模拟复杂船型在操纵运动中的水动力特性成为可能。目前国内外关于数值分析船舶操纵性方面的研究有很多,Ohmori^[2]采用有限体积法对船舶操纵运动条件下的黏性流场进行计算求解,得出了只有求解出船体周围的细致流场才能精确地给出船体的受力和力矩

的结论。Turnock^[3]采用CFD计算软件CFX对KVLCC2船模在直航、斜拖和纯横荡运动条件下进行了数值求解,同时也对浅水工况进行了分析。Stern等^[4]给出了SIMMAN2008会议上关于船舶操纵性数值研究的整体进展,并且指出细网格和DES方法对操纵性数值计算的精度会有提升。Simonsen等^[5]分别利用CFD计算所得和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^[6]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。Zhang等^[7]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。

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^[8]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^[9]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^[10]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^[11,12],对海上浮式结构物^[13]、标准船模KCS、DTMB等在波浪上的运动^[14]、船舶操纵性模拟^[15,16]等方面均取得了一定的成果。

1 数学模型

1.1 流体控制方程

本文采用naoe-FOAM-SJTU求解器进行数值模拟求解。其控制方程为非定常两相不可压的RANS方程:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1) \quad \text{体分布如式 (4) 所示。}$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(U - U_g)U] = -\nabla p_d - g \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) + (\nabla U) \cdot \nabla \mu_{eff} + f_\sigma + f_s \quad (2)$$

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{空气} \\ \alpha = 1 & \text{水} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{自由面} \end{cases} \quad (4)$$

式中: U 为速度场, U_g 为网格移动速度。 $p_d = p - \rho g \cdot x$ 为动压力, 其数值等于总压力值减去静水压力, ρ 为液体或者气体的密度, g 为重力加速度向量。 $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu_t)$ 为有效动力黏性, ν 为运动黏度, ν_t 为涡黏度。 f_σ 为表面张力项, f_s 为用于消波的源项。

本文中采用 SST $k-\omega$ 湍流模型^[17]来实现 RANS 方程的闭合。其中 k 为流体质点的湍动能, ω 为特征耗散率。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

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(U - U_g)\alpha] + \nabla \cdot [U_r(1 - \alpha)\alpha] = 0 \quad (3)$$

式中: U_r 为用于压缩界面的速度场, α 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

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) 算法进行循环迭代求解。

1.2 操纵性数学模型

目前数值方法研究船舶操纵性能的主流方法是基于操纵性数学模型和相关回归得出的水动力导数值。关于操纵性数学模型主要有两种: 一种是整体型, Abkowitz 等^[18]提出的简化数学模型, 把船、桨和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、桨和舵的整体受力情况, 相应的数学模型如式 (5); 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、敞水桨和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^[19]提出的数学模型, 如式 (6)。

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ N' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_* + X_{vv}v'^2 + X_{rr}r'^2 + X_{vr}v'r' \\ Y_vv' + Y_v\dot{v}' + Y_r\dot{r}' + Y_{vvv}v'^3 + Y_{rvr}v'r'^2 + Y_{rvv}r'v'^2 + Y_{rrr}r'^3 \\ N_v\dot{v}' + N_r\dot{r}' + N_vv' + N_{vvv}v'^3 + N_{rvr}v'r'^2 + N_{rvv}r'v'^2 + N_{rrr}r'^3 + N_{rvv}r'v'^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ N' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_* + X_{vv}v'^2 + X_{rr}r'^2 + X_{vr}v'r' \\ Y_v\dot{v}' + Y_r\dot{r}' + Y_vv' + Y_{|v|}v'|v'| + Y_{|r|}r'|r'| + Y_{|v|r|}v'|r'| + Y_{|r|v|}r'|v'| \\ N_v\dot{v}' + N_r\dot{r}' + N_vv' + N_{|v|}v'|v'| + N_{|r|}r'|r'| + N_{|v|r|}v'|r'| + N_{|r|v|}r'|v'| \end{bmatrix} \quad (6)$$

本文计算的船舶纯摇首试验, 是船舶的横荡和首摇两个自由度运动的叠加, 其中船舶的两个自由度的运动方程如下:

$$\begin{cases} Y = -a \sin \omega t \\ \dot{v} = \dot{Y} = -a\omega \cos \omega t \\ \dot{v} = \ddot{Y} = a\omega^2 \sin \omega t \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \phi = -\frac{a\omega}{u} \cos \omega t \\ r = \dot{\phi} = \frac{a\omega^2}{u} \sin \omega t \\ \dot{r} = \ddot{\phi} = \frac{a\omega^3}{u} \cos \omega t \end{cases} \quad (8)$$

船舶纯摇首运动的实现是通过控制同频率条件下的横荡幅值和摇首幅值和两个运动的相位来达到船体运动过程中, 在船体坐标系下每一时刻均没有侧向速度。纯摇首运动下船体的受力平衡方程为:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ N' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_* + X_{rr}r'^2 \\ Y_r\dot{r}' + Y_{|r|}r'|r'| \\ N_r\dot{r}' + N_{|r|}r'|r'| \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式 (8) 带入到操纵性数学模型式 (9) 中, 并且采用以下的积分方式可以得到分离的水动力导数, 如式 (10) 所示。通过中间值 Y_{in} 和 N_{in} 可以

得出加速度水动力导数值, 通过 Y_{out} 和 N_{out} 可以得出线性水动力导数和二阶水动力导数值。

$$\begin{cases} Y_{in} = \frac{1}{4} \left(\int_0^{\pi/2} Y' dwt - \int_{\pi/2}^{3\pi/2} Y' dwt + \int_{3\pi/2}^{2\pi} Y' dwt \right) = \\ (Y_r - mx_G) \frac{\dot{r}'}{4} \\ Y_{out} = \frac{1}{4} \left(\int_0^{\pi} Y' dwt - \int_{\pi}^{2\pi} Y' dwt \right) = (Y_r - mu)r' - Y_{r|l}r'^2 \frac{\pi}{4} \\ N_{in} = \frac{1}{4} \left(\int_0^{\pi/2} N' dwt - \int_{\pi/2}^{3\pi/2} N' dwt + \int_{3\pi/2}^{2\pi} N' dwt \right) = \\ (N_r - I_z) \dot{r}' \\ N_{out} = \frac{1}{4} \left(\int_0^{\pi} N' dwt - \int_{\pi}^{2\pi} N' dwt \right) = (N_r - mx_G u)r' + \\ N_{r|l}r'^2 \frac{\pi}{4} \end{cases} \quad (10)$$

1.3 重叠网格技术

重叠网格又称 Chimera、Overlapping 或者 Overset。该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。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。

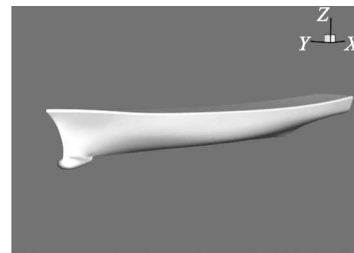
本文计算采用的求解器 naoe-FOAM-SJTU 是在开源 CFD 软件 OpenFOAM 平台基础上加入重叠网格技术和多级物体运动求解模块。在基于 OpenFOAM 的数值方法、数据存储方式以及非结构网格的特点上, 利用插值程序 SUGGAR++^[20]生成重叠网格的插值信息 Domain Connectivity Informai-

tion (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。

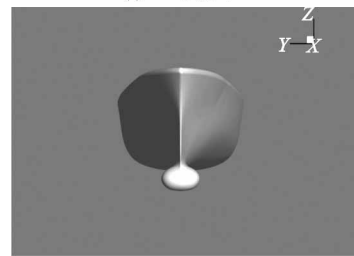
2 计算模型和网格划分

2.1 计算模型

本文采用 SIMMAN2014 操纵性会议提供的标准算例, 对标准船模 DTMB5512 裸船体在平面运动机构作用下的纯摇首运动进行了数值模拟。船体三维模型见图 1, 具体船体参数见表 1。



(a) 三维视图



(b) 首部视图

图 1 DTMB 裸船体模型
Fig.1 DTMB bare hull model

表 1 DTMB 船体参数
Table 1. Main parameters of DTMB hull

主要参数	标识	实船	船模
缩尺比	λ	1	46.588
垂线间长	L_{pp} / m	142.000	3.048
型宽	B / m	19.060	0.409
吃水	T / m	6.150	0.132
排水量	Δ / kg	84 244 000	82.600
重心沿船长方向位置	LCG/m	70.348	1.539
重心距基线距离	KG/m	5.582	0.120
纵摇惯性半径	K_{yy} / m	35.500	0.777
横摇惯性半径	K_{xx} / m	7.052	0.131
初稳性高	GM/m	1.950	0.096

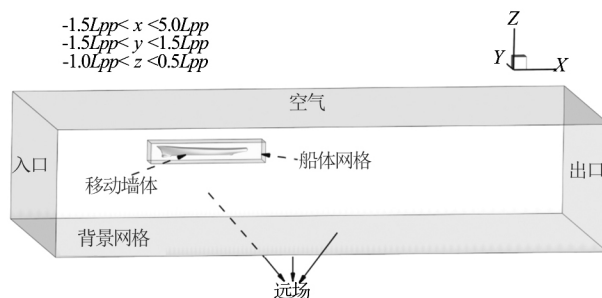


图2 计算域示意图

Fig.2 Computational domain

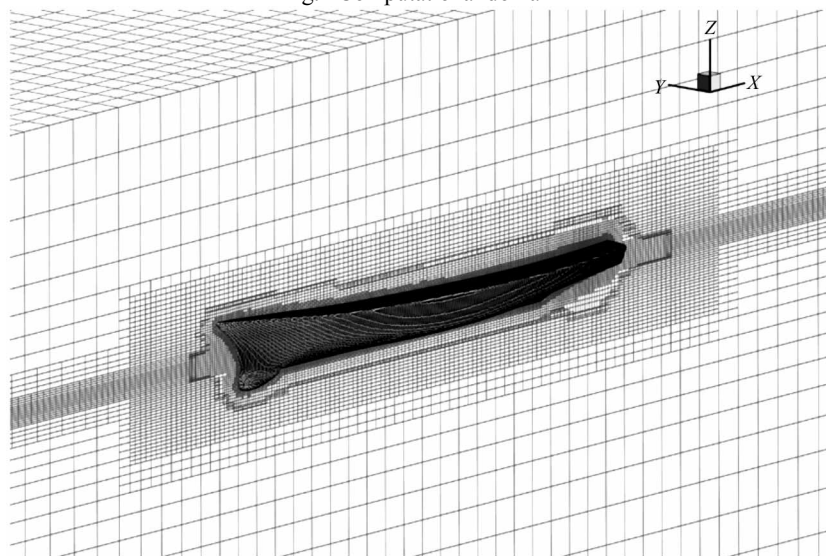


图3 船体周围网格分布

Fig.3 Mesh arrangement around ship hull

2.2 计算域和网格划分

本文计算针对于裸船体, 分为两套网格, 一个是船体周围网格, 另外一个则是背景网格。计算域的示意图如图 2 所示, 文中计算采用的网格通过 OpenFOAM 自带的网格生成工具 snappyHexMesh 生成, 其中船体周围网格范围为 $-0.2L_{pp} < x < 1.2L_{pp}$, $-0.2L_{pp} < y < 0.2L_{pp}$, $-0.1L_{pp} < z < 0.1L_{pp}$, 网格量为 68×10^4 , 背景网格范围是 $-1.5L_{pp} < x < 5.0L_{pp}$, $-1.5L_{pp} < y < 1.5L_{pp}$, $-1.0L_{pp} < z < 0.5L_{pp}$, 网格量为 121×10^4 。船体网格周围边界条件设置为 overlap, 从而实现两套网格之间的插值计算。由于采用重叠网格控制船体运动, 本文中 3 种不同振荡幅值条件下的计算均采用同一套网格, 总网格量为 189×10^4 。两套网格在船体周围的局部分布如图 3 所示。其中蓝色表示船体网格, 红色为背景网格, 中间重叠部分为插值区域。

3 网格收敛性验证

本文中所有工况下采用同一套重叠网格, 为减

少计算量和分析计算结果的不确定性, 本文对该网格在静水阻力工况下进行网格收敛性的验证。所采用的方法为 ITTC 推荐的不确定性分析中关于网格收敛性的建议, 这里采用 3 套不同的网格, 网格缩放的比例为 $\sqrt{2}$ 。网格收敛性的验证结果如下:

表2 网格收敛性验证
Table 2. Grid convergence study

网格	网格量	C_t (CFD)	C_t (EFD)	误差
粗网格	0.64M	1.597×10^{-2}	1.706×10^{-2}	-6.39%
中网格	1.87M	1.661×10^{-2}	1.706×10^{-2}	-2.64%
细网格	3.67M	1.678×10^{-2}	1.706×10^{-2}	-1.66%

表3 计算工况
Table 3. Case conditions

算例	频率/Hz	横荡幅值/m	摇首幅值/ $^\circ$
Case 1	0.134	0.055	1.7
Case 2	0.134	0.164	5.1
Case 3	0.134	0.327	10.2

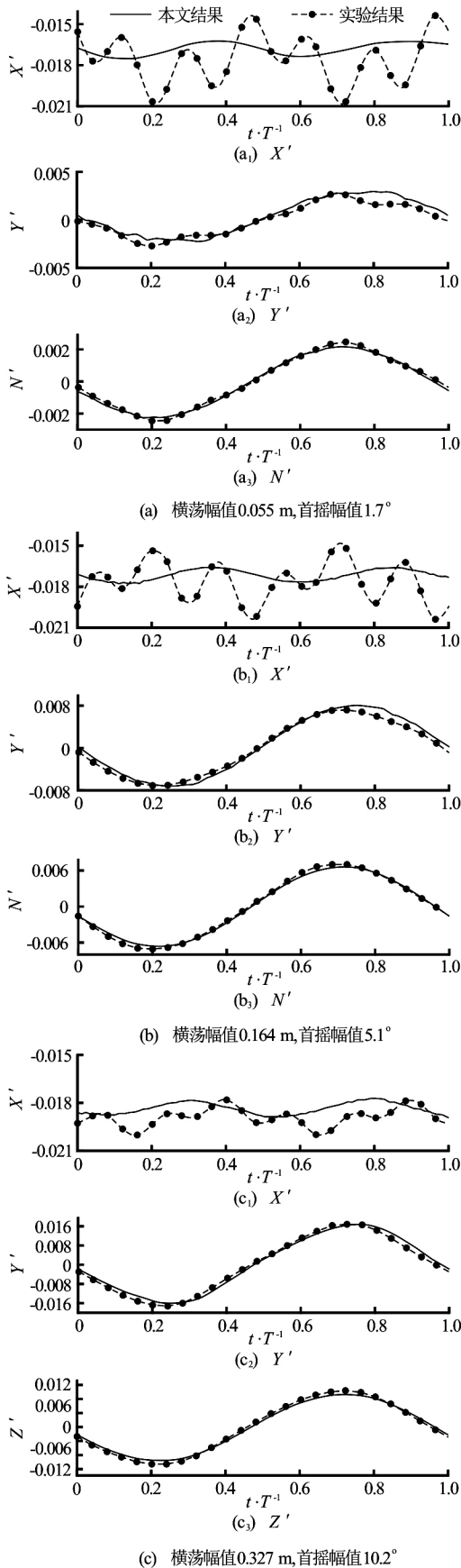


图 4 不同振幅下纯摇首运动中船体受力历时曲线
 Fig.4 Time histories of forces and moment coefficients for pure yaw

通过 3 套不同网格条件下的计算结果可以看出，计算结果表现出一致收敛的趋势，因此在采用中等网格密度的计算结果同网格的依赖程度不高，数值结果可靠。

4 计算工况及数值结果分析

4.1 计算工况

本文根据 SIMMAN 2014 会议提供的标准计算工况对 DTMB5512 裸船体进行纯摇首运动的数值模拟。船舶纯摇首运动的实现是通过控制同频率条件下的横荡幅值和摇首幅值来达到船体坐标系下每一时刻均没有侧向速度。本文中选取频率同为 0.134 Hz 下的 3 种不同振幅的横荡运动和摇首运动，对应的计算工况如表 3 所示。

文中所有计算结果均采用由垂线间长 L_{pp} ，吃水 T ，航速 U_0 ，密度 ρ 进行无因次化的系数来表示，其表达式如下：

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ N' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X}{0.5\rho U_0^2 T L_{pp}} \\ \frac{Y}{0.5\rho U_0^2 T L_{pp}} \\ \frac{N}{0.5\rho U_0^2 T L_{pp}^2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

4.2 计算结果

三种不同振幅条件下的纯摇首运动计算得出的船体受力和力矩历时曲线如图 4 所示，其中，实线为本文计算结果，带点的虚线为 SIMMAN2014 上提供的模型试验数据。从图中可以看出，对于沿船长方向的阻力计算同试验值时间历程上差别较大，CFD 计算结果更为平滑，而试验值波动较大，但两者均值保持一致。

通过对比可以看出，除了阻力方向在历时曲线上表现的不一致以外，计算所得的船体侧向力和转首力矩同试验值在时间历程上趋势保持一致，并且精度较高。从上面图中还可以看出，船舶在振荡幅值增大以后对船体受力的预报精度反而更高，分析原因如下，在运动幅度较小的情况下，船体的侧向力和转首力矩较小，采用数值计算得到的绝对误差量级较小，但是相对误差较大，主要原因可归结为数值误差，而对于大幅度运动情况下，船体的侧向力和转首力矩较大，流场变化较为剧烈，在这种情况下数值预报精度反而比较高，这表明通过重叠网格处理船舶大幅度运动，可以很好的解决大幅度运

动情况下由于网格质量下降导致的计算精度问题。这也说明了当前采用的重叠网格加 CFD 黏性流场计算模拟船舶纯摇首运动是很有必要的。

4.3 水动力导数

根据式 (10) 进行水动力导数的回归, 得出纯摇首运动工况下船体在无因次化以后的水动力导数值如表 4 所示。采用同样的方法回归得出试验和数值计算的水动力导数值, 通过表 4 可以看出, 回归得到的线性水动力导数值误差都保证在 10% 以内, 而非线性导数值误差较大, 保持在 20% 左右。这表明, 采用当前方法计算可以预报出水动力导数值, 并且能够达到较高的精度。

表 4 纯摇首试验水动力导数对比
Table 4. Comparison of hydrodynamic derivatives from pure yaw

水动力导数	计算值	试验值	误差
Y'_r	2.21×10^{-3}	2.26×10^{-2}	-2.26%
N'_r	2.89×10^{-3}	2.63×10^{-3}	9.61%
$Y'_{r }$	7.66×10^{-3}	6.96×10^{-3}	9.98%
$Y'_{r }$	9.06×10^{-3}	7.21×10^{-3}	20.4%
N'_r	1.29×10^{-2}	1.36×10^{-2}	-5.41%
$N'_{r }$	5.61×10^{-3}	6.94×10^{-3}	19.1%

4.4 流场信息

前言里面提到过, 目前常用的预报船舶操纵性能的方法仍然是物理试验, 但采用物理试验想给出

精确的流场信息需要 PIV 设备等 (代价非常高)。采用 CFD 方法数值计算可以给出船体周围精确流场, 方便分析船舶水动力特性。这里我们给出了运动幅度最大的工况下一个运动周期内船舶纯摇首试验中的自由面兴波情况。

通过图 5 可以看出, 船体周围自由面在纯摇首运动过程中变化剧烈, 首部兴波和船体侧向波高周期性变化明显, 兴波周期性变化可以使得船体周围压力场发生相应的变化, 从而导致船体侧向力和转首力矩呈现周期性变化。通过上述分析也可以充分说明, 采用 CFD 黏性流场计算可以对船体纯摇首运动过程中的流场进行可视化分析, 便于找出问题来源, 分析各项水动力特性。

5 结论

本文利用基于重叠网格方法的 naoe-FOAM-SJTU 求解器对标准船模 DTMB5512 裸船体在平面运动机构作用下的纯摇首试验进行了数值模拟, 首先对本文计算所用的网格进行了收敛性验证, 通过三套网格验证了当前网格的可靠性; 同时给出了 3 种不同振幅工况下的纯摇首试验中数值计算得出的船体受力和力矩历时曲线, 并且同试验值进行对比, 结果表明, CFD 计算结果中船体阻力与试验值均值一致, 但表现到历时曲线中波动较小, 船体侧向力和摇首力矩同试验值吻合较好。同时本文基于 MMG 操纵性数学模型, 给出了相应的水动力导数值, 通过同样的回归方法给出计算结果和试验结果, 可以看出数值预报的结果同实验结果吻合较

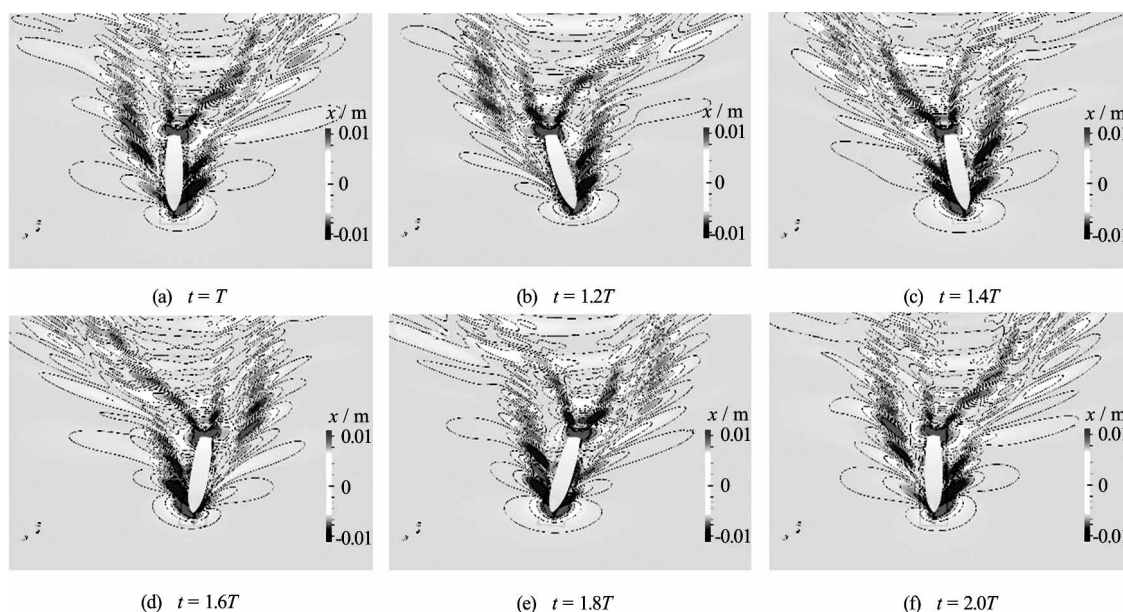


图 5 一个周期内纯摇首运动自由面兴波
Fig.5 Wave patterns at one pure yaw motion period

好。本文计算所得结果展示了基于非常 RANS 方法和重叠网格技术的 naoe-FOAM-SJTU 求解器可以很好地处理船舶操纵性中大幅度运动如 PMM 试验等问题, 可以给出比较准确的数值预报, 通过与试验值的对比验证, 说明当前方法可以为船舶操纵性预报提供一个有效的手段。

致谢

本文工作还得到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[S]. MSC. 137(76).
- [2] OHMORI T. Finite-volume simulation of flows about a ship in maneuvering motion[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 1998, (3): 82-93.
- [3] TURNOCK S R. Urans simulations of static drift and dynamic maneuverers of the KVLCC2 tanker[C]. *Proceedings of SIMMAN 2008 workshop on verification and validation of ship manoeuvring simulation methods*, Lyngby, Denmark, 2008.
- [4] STERN F, AGDRUP K, KIM S Y, et al. Experience from SIMMAN2008—The first workshop on verification and validation of ship maneuvering simulation methods[J]. *Journal of Ship Research*, 2011, 55(2): 135-147.
- [5] SIMONSEN C D, OTZEN J F, KLIMT C, et al. Maneuvering predictions in the early design phase using CFD generated PMM data[C]. *Proceedings of the 29th Symposium on Naval Hydrodynamics*, 2012: 26-31.
- [6] SADAT-HOSSEINI H, CARRICA P M, STERN F, et al. 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.
- [7] ZHANG X G, 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] SHEN Z R, WAN D C. An irregular wave generating approach based on naoe-FOAM-SJTU solver[J]. *China Ocean Engineering*, 2016, 30(2): 177-192.
- [13] 王建华, 万德成. 南海浮式码头与系泊系统动力耦合分析[J]. *水动力学研究与进展, A 辑*, 2015, 30(2): 180-186.
WANG Jian-hua, WAN De-cheng. Dynamic coupling analysis of the mooring system and floating pier in the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2015, 30(2): 180-186.
- [14] SHEN Z R, WAN D C. RANS computation of added resistance and motions of a ship in head waves[J]. *Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2013, 23(4): 263-271.
- [15] SHEN Z R, WAN D C, CARRICA P M. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 108: 287-306.
- [16] WANG J H, LIU X J, WAN D C. Numerical simulation of an oblique towed ship using naoe-FOAM-SJTU solver[C]. *Proceedings of the 25th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kona, Hawaii Big Island, USA, 2015: 432-438.
- [17] MENTER F R, KUNTZ M, LANGTRY R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model[J]. *Turbulence, heat and mass transfer*, 2003, 4: 625-632.
- [18] ABKOWITZ M A, LIU G. Measurement of ship resistance, powering and maneuvering coefficients from simple trials during a regular voyage[J]. *Transactions-Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 1988, 96: 97-128.
- [19] INOUE S, HIRANO M. A practical calculation method of ship maneuvering motion[J]. *International Shipbuilding Progress*, 1981, 28(325): 207-222.
- [20] NOACK R W, BOGER D A, KUNZ R F, et al. An improved general overset grid assembly capability[C]. *19th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*, San Antonio, USA, 2009.