

用重叠网格技术数值模拟船舶纯摇首运动

王建华, 刘小健, 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 Email: dcwan@sjtu.edu.cn

摘要: 本文采用基于非定常 RANS 方程的黏性数值模拟方法, 对标准船模 DTMB5415 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 软件 OpenFOAM 和重叠网格技术开发的多功能求解器 naoeFOAM-os-SJTU。根据 SIMMAN2014 提供的标准算例, 对航速为 $Fn=0.28$ 工况下 3 种不同横荡和摇首幅值叠加工况下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。所有计算结果同模型试验数据进行比较, 验证了数值求解纯摇首运动的可靠性。

关键词: 重叠网格; PMM; 纯摇首; naoeFOAM-os-SJTU

1 引言

近年来, 伴随着对于船舶航行的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。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)进行限制船模试验。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、纯摇首等)。平面运动机构试验有其特有的优势, 可以很好的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。

最近的这些年里伴随着计算机能力的大幅度进步, 计算船舶流体力学领域在船舶水动力学方面的研究取得了巨大的进展, 包括船舶静水阻力预报、船舶耐波性计算、船舶自航推进和船舶操纵性预报等方面。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^[1]采用有限体积法对船舶操纵运动条件下的粘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的给出船体的受力和力矩的结论。Turnock^[2]等采用 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^[3]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。

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^[4]等采用船舶水动力学软件 CFDShip-Iwoa Ver. 4 对标准船模 DTMB5415 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^[5]等通过求解非定常 RANS 方程,采用重叠网格方法对 DTMB5415 船模进行了回转运动和 Z 型操纵试验的数值模拟。Mofidi^[6]等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^[7]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 naoeFOAM-os-SJTU,对标准船模 KCS、DTMB 等在波浪上的运动、船舶操纵性模拟等方面均取得了一定的成果。

2 数学模型

2.1 控制方程

本文采用 naoeFOAM-os-SJTU 求解器^[7]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:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho (\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}) + (\nabla \mathbf{U}) \cdot \nabla \mu_{eff} + \mathbf{f}_\sigma + \mathbf{f}_s \quad (2)$$

其中: \mathbf{U} 代表速度场, \mathbf{U}_g 表示网格移动速度。 p_d 为动压力, 其数值等于总压力值减 $\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$ 去静水压力, ρ 为液体或者气体的密度, \mathbf{g} 为重力加速度向量。 μ_{eff} 表示有效动力黏性, ν 表示运动黏度, ν_t 表示涡黏度。 \mathbf{f}_σ 为表面张力项, \mathbf{f}_s 是用于消波的源项。

本文中采用 SST $k-\omega$ 湍流模型来实现 RANS 方程的闭合。其中 k 表示流体质点的湍动能, ω 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:

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

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

$$\begin{cases} \alpha=0 & \text{air} \\ \alpha=1 & \text{water} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{interface} \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\alpha=0$ 表示空气, $\alpha=1$ 表示水, $0 < \alpha < 1$ 表示水和空气的界面。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。

2.2 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哪些是洞点和插值点, 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。

本文计算采用的求解器 naoeFOAM-os-SJTU^[1]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++生成重叠网格的插值信息。多级物体运动模块中, 船体作为父级物体在自由面上进行六自由度运动的同时, 螺旋桨和舵(假如存在的话)作为子物体还能相对于船体进行转动。通过该模块实现船、桨、舵相互配合问题的 CFD 计算。

3 计算模型与网格生成

本文针对标准船模 DTMB5415 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, 具体参数见表 1。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 3 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 万, 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 万。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 万。两套网格的局部示意图如图 2 所示。

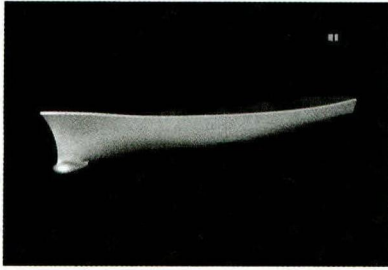


图1 DTMB 三维模型

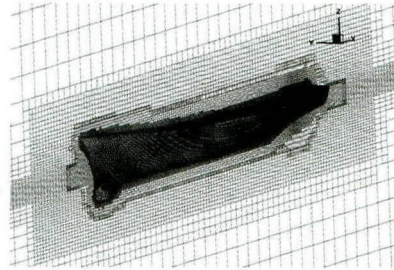


图2 船体周围局部网格分布

表1 DTMB 5415 模型参数

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	84244000	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

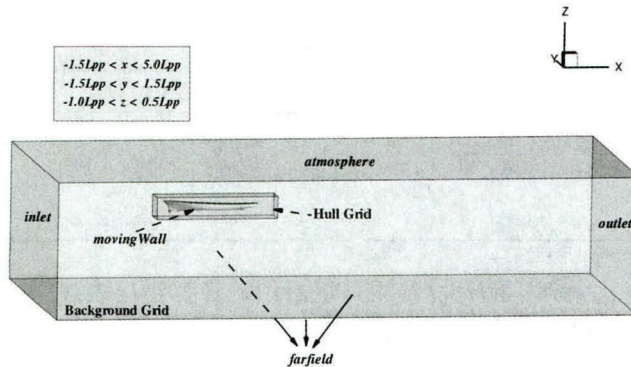


图3 计算域示意图

4 计算工况及数值结果

4.1 计算工况

本文根据 SIMMAN 2014 会议提供的标准计算工况对 DTMB5415 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摇首角速度。本文中选取标准工况中频率同为 0.134Hz 下 3 种不同振幅的横荡运动和摇首运动，对应的的计算工况如表 2 所示。

表 2 计算工况

算例	频率/Hz	横荡幅值/m	摇首幅值/(°)
case1	0.134	0.055	1.7
case2	0.134	0.164	5.1
case3	0.134	0.327	10.2

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，无因次表达式如下：

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ N' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X}{0.5\rho U_0^2 T L_{pp}} \\ \frac{Y}{0.5\rho U_0^2 T L_{pp}} \\ \frac{N}{0.5\rho U_0^2 T L_{pp}^2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

4.2 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的不确定性，本文对该网格在计算静水阻力工况下进行网格收敛性的验证。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见表 3

表 3 收敛性验证

网格	网格量	Ct (CFD)	Ct(EFD)	误差
粗网格	0.64M	1.597e-2	1.706e-2	-6.39%
中网格	1.87M	1.661e-2	1.706e-2	-2.64%
细网格	3.67M	1.678e-2	1.706e-2	-1.66%

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，因此在该网格条件下的计算结果比较可靠。

4.3 计算结果及分析

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 4-1 所示，其中，实现为本文计算结果，带点的虚线为 SIMMAN2014 上提供的模型试验数据。从计算结果可以看出，对于沿船长方向的阻力计算同试验值差别较大，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。

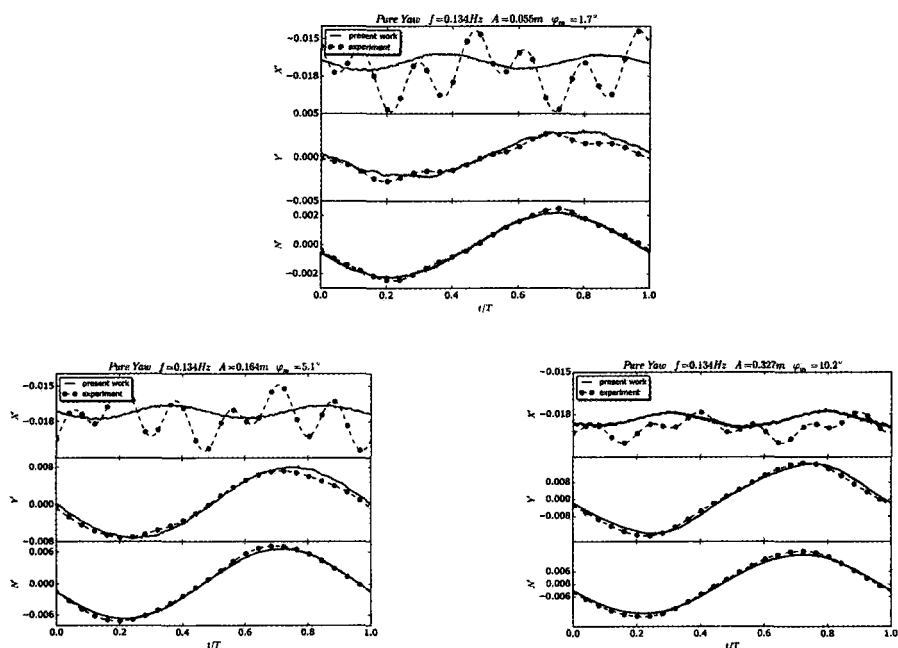


图4 不同频率条件下船体受力及力矩曲线

从图4中可以看出,通过重叠网格方法计算船舶在不同运动幅度情况下的水动力特性,均能达到比较满意的结果,同时也验证了naoeFOAM-os-SJTU求解器对于船舶操纵性的数值模拟可以达到很好的效果。

5 结论

本文利用基于重叠网格方法的naoeFOAM-os-SJTU求解器对标准船模DTMB5415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,同时数值计算得出的船体受力和力矩与模型试验结果符合较好。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。本文计算所得结果展示了基于非定常RANS方法和重叠网格技术的naoeFOAM-os-SJTU求解器可以很好的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,为船舶初步设计提供参考。

致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目(Grant Nos 51379125, 51490675, 11432009, 51411130131),长江学者奖励计划(Grant No. 2014099),上海高校特聘教授(东方学者)岗位跟踪计划(Grant No. 2013022),国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(Grant No. 2013CB036103),工信部高技术船舶科研项目的资助。在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Ohmori, T. Finite-volume simulation of flows about a ship in maneuvering motion. [J] Journal of Marine Science and Technology, 1998 (3): 82-93
- 2 Turnock, S. R. URANS simulations of static drift and dynamic maneuverers of the KVLCC2 tanker. [C] Proc SIMMAN 2008 workshop on verification and validation of ship manoeuvring simulation methods, Lyngby, Denmark.
- 3 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.
- 4 Sakamoto, N., Carrica, P. M., Stern, F. URANS simulations of static and dynamic maneuvering for surface combatant: part1. Verification and validation for forces, moment, and hydrodynamic derivatives. [J] Journal of Marine Science and Technology, 2012, 17(4), 422-445.
- 5 Carrica, P. M., Ismail F., Hyman, M., et al. Turn and zigzag maneuvers of a surface combatant using a URANS approach with dynamic overset grids. [J] Journal of Marine Science and Technology, 2013, 18(2), 166-181
- 6 Mofidi, A., Carrica, P.M. Simulations of zigzag maneuvers for a container ship with direct moving rudder and propeller. [J] Computers & Fluids 2014, 96: 191-213.
- 7 Shen, Z R., Zhao W W, Wang J H, et al. Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoeFOAM-os-SJTU. [R] Technical Report for Solver Manual, Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- 8 Wang J H, Liu X J, Wan D C. Numerical Simulation of an Oblique Towed Ship by naoe-FOAM-SJTU Solver. [C] Proceedings of the Twenty-fifth International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Hawaii, USA. 2015.

Numerical simulation of pure yaw test using overset grid

WANG Jian-hua, LIU Xiao-jian, 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)

*Corresponding author, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

Abstract: This paper presents the numerical simulations and analysis of the hydrodynamic characteristics for the surface combatant Model 5415 bare hull under dynamic planar motion mechanism (PMM). All the numerical computations are carried out by solver naoeFOAM-os-SJTU and the main purpose of this research is to investigate the capability of our solver for ship maneuvering prediction. In the present work, the ship model is subjected to pure yaw motion at Froude number 0.28. The hydrodynamic forces and moments acting on the ship are obtained for further analysis. All the above numerical results have been compared to the experimental data presented at SIMMAN 2014. Taking free surface into consideration and using dynamic overset grid technology, the numerical results show good agreement with experimental data. Grid convergence studies are performed for the bare hull DTMB 5415 model to further validate the numerical results and the implementation of the overset grid approach in OpenFOAM.

Key words: Pure yaw; PMM; Overset; naoeFOAM-os-SJTU solver.