

基于移动网格和重叠网格技术的船舶纯横荡运动数值模拟

刘小健^{1,2}, 王建华¹, 万德成^{1*}

(¹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)

(²中国船舶与海洋工程设计研究院, 喷水推进技术重点实验室(筹), 上海 200011)

*通信作者 Email: dcwan@sjtu.edu.cn

摘要: 为了在设计初始阶段数值预报船舶的操纵性, 对于纯横荡试验等 PMM 试验的模拟研究一直是 ITTC 的研究热点。本文利用基于 OpenFOAM 开源代码软件自主开发 naoe-FOAM-SJTU 求解器和 naoe-FOAM-os-SJTU 求解器, 分别采用移动网格和重叠网格 (overset) 技术, 利用 VOF 方法求解自由面波高, 并求解 RANS 方程获得船体力等数据, 带入升沉和纵倾方程, 得到船体的运动数据。通过数值模拟某船在同一振幅和同一频率下的纯横荡试验, 将采用不同网格技术获得的船体力的结果进行比较, 发现两者的模拟结果基本接近, 说明对于裸船体的纯横荡数值模拟, 这两种网格技术并没有较大的差异, 重点应该关注湍流等的模拟。

关键词: 移动网格; 重叠网格; 纯横荡; naoe-FOAM-SJTU 求解器; naoe-FOAM-os-SJTU 求解器

1 引言

从多年ITTC的研究进展来看, 数值模拟PMM试验还在不断地发展当中, 这其中除了应用RANS方法, 也有DES和DDES的模拟。数值计算所用的动网格技术, 如变形网格和滑移网格等是通过网格的变形来实现物体的移动, 而重叠网格技术是通过几套网格间插值来实现相互间数值的传递。

Sakamoto 等^[1]使用 URANS 方法模拟了水面双体船静态和动态运动时船体所受到的力和力矩。Turneck 等用 CFX 软件研究了 KVLCC2 船进行直航、斜航和纯横荡时船体受到的力和力矩。Simonsen 和 Stern^[2-3]利用重叠网格方法, 对 Esso Osaka 油轮进行裸船以及带舵

状态下的 PMM 计算模拟。Sakamoto 等^[4]对带附体的 DTMB5415 模型在 $Fn = 0.28$ 航速下的各类 PMM 试验进行了系统性的计算。Carrica 等^[5-6]利用重叠网格方法,进行了全附体 DTMB5415 在静水中以及波浪中的 z 形操舵和回转试验的计算模拟。沈志荣利用重叠网格技术进行了 KCS 船的自航推进、自航操纵和耐波性数值模拟^[8]。

采用基于 OpenFOAM 源代码软件自主开发 naoeFOAM-SJTU 求解器和 naoeFOAM-os-SJTU 求解器分别利用动网格技术、重叠网格技术模拟某船在频率 0.1Hz、振幅为 0.4m 时的纯横荡运动,用 VOF 方法求解自由面波高,求解 RANS 方程获得船体力等数据。

在这篇文章中,首先简要介绍控制方程、求解器和算法、六自由度运动方程、动网格技术和重叠网格技术等,其次介绍各网格技术所采用的求解域、网格设置、船体几何和参数,进一步给出数值模拟结果的比较。最后对全文进行总结。

2 数学模型

2.1 控制方程

不可压缩 RANS 方程如下:

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

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

式中: \mathbf{U} 表示速度场; \mathbf{U}_g 表示网格节点的速度; $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ 表示动压力场。 ρ 表示空气和水两项流体的混合密度; \mathbf{g} 表示重力加速度; $\mu_{\text{eff}} = \rho(\nu + \nu_t)$ 表示有效动力黏性系数,其中 ν 表示运动黏性系数, ν_t 表示涡黏系数;后者是由 $k-\omega$ 湍流模型得到的^[2]。 f_σ 是两相流模型中的表面张力项; f_s 是用于消波区的源项。

本文采用边界可压缩的 VOF 方法。这种处理方式的好处是能有效的控制数值扩散,以较高的精度捕捉自由面。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, α 是体积分数,是网格单元中流体所占的体积比,其值介于 0 和 1 之间:

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

2.2 离散方法

RANS 方程(式 1 和式 2)和 VOF 输运方程(式 3)都采用有限体积法来进行离散, 计算域离散成一系列小单元, 计算流场信息存储在网格单元中心, 再根据单元中心的值插值即可得单元面的值。最后根据 Gauss 理论, 把单元表面的值相加就可以得到单元体的体积积分。对不同的项采用不同的插值方法, 方程(2)中的对流项采用二阶 TVD 有限线性法^[13], 扩散项采用二阶中心差分法, VOF 方程采用 Van Leer 离散方法^[14], 时间项采用二阶向后插值方法。

2.3 六自由度方程

如图 1 所示, 在研究船舶的六自由度运动时, 常采用两个坐标系统, 一个是大地坐标系, 一个是船体坐标系。

船舶在大地坐标系中的线位移和角位移 $\eta = (\eta_1, \eta_2) = (x_1, x_2, x_3, \phi, \theta, \psi)$, 分别代表纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇。船体坐标系的线速度和角速度可以用 $v = (v_1, v_2) = (u, v, w, p, q, r)$ 表示。引入欧拉角, 在两种坐标系下的速度可以变换矩阵进行相互转化。

本文进行船舶的横荡运动模拟, 其运动轨迹 x_2 为正弦曲线, 如下式所示:

$$\begin{cases} x_2 = -a \sin \omega t \\ v = \dot{x}_2 = -a\omega \cos \omega t \\ \dot{v} = \ddot{x}_2 = a\omega^2 \sin \omega t \end{cases} \quad (5)$$

式中, a 为横荡振幅, $\omega = 2\pi f$, f 为振荡频率。

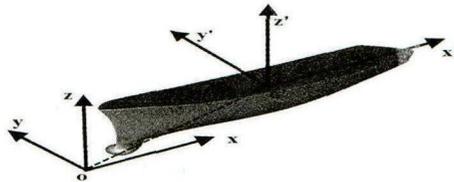


图 1 坐标系统

本文横摇固定, 该运动模式下, $\phi = \psi = 0$, $p=r=0$, $\dot{p} = \dot{r} = 0$, 刚体运动方程可写成:

$$\begin{cases} \dot{u} = X/m - wq + x_g(q^2) - z_g(\dot{q}) \\ \dot{v} = Y/m \\ \dot{w} = Z/m + uq + z_g(q^2) - x_g(-\dot{q}) \\ \dot{p} = 0 \\ \dot{q} = 1/I_y \{ [M - m[z_g(\dot{u} + wq) - x_g(\dot{w} - uq)]] \} \\ \dot{r} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

在大地坐标中, 计算船体上受到的力 F_e 和力矩 M_e , 可以得到船体坐标系下船体受到的力 F 和力矩 M , 将其代入刚体运动方程并积分, 得到船体线速度和角速度 $v = (v_1, v_2) = (u, v, w, 0, q, 0)$, 再次利用公式并积分, 可以得到大地坐标下船体的位置和姿态 $\eta = (\eta_1, \eta_2) = (x_1, x_2, x_3, 0, \theta, 0)$ 。

2.4 移动网格技术

当船体运动时, 网格的拓扑结构并不改变, 但单元的形状会随着节点的拉伸或压缩而改变。网格点的位置可以通过求解带有固定或变化扩散率的 Laplace 方程来确定:

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla \Pi_g) = 0 \quad (7)$$

其中 γ 是扩散场量, 等于单元中心和运动边界之间距离平方的倒数, 由下式确定:

$$\gamma = \frac{1}{r^2} \quad (8)$$

也可以直接求解网格位移的 Laplace 方程:

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla X_g) = 0 \quad (9)$$

其中 X_g 是网格节点位移。

2.5 重叠网格技术

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。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

3.1 船体几何

计算所用模型没有附体, 其主要尺度如表 1 所示:

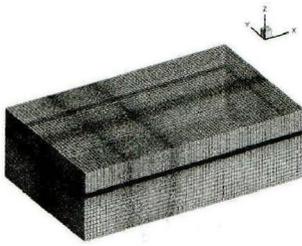
表 1 船模主参数

参数	单位	数值
船长 L_{pp}	m	4.327
型宽 B	m	0.615
吃水 T	m	0.164
船速 V	m/s	1.569
纵向惯性半径 K_{yy}	m	$0.25 L_{pp}$
傅氏数 Fn	-	0.24

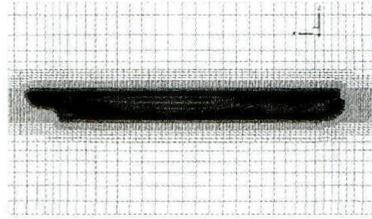


图 2 船体几何

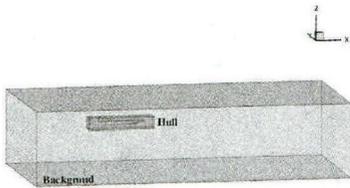
3.2 计算域和网格



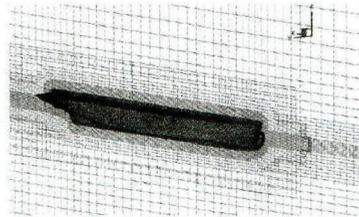
a 计算域 (移动网格)



b 局部网格 (移动网格)



c 计算域 (重叠网格)



d 局部网格 (重叠网格)

图 3 网格划分示意图

计算域如图 3 所示, 以船头为原点, 三个方向分别为: $-1.0L_{pp} < x < 4.0L_{pp}$, $-1.5L_{pp} < y < 1.5L_{pp}$, $-1.0L_{pp} < z < 1.0L_{pp}$ 。移动网格技术中所用的网格是由 OpenFOAM 的自带网格划分工具 snappyHexMesh 产生, 船体网格总数大概 1.83M。重叠网格技术中所用的背景网格、过渡网格和船体网格是由 Pointwise 生成, 船体网格总数与移动网格技术所用的网格数一样。

4 计算结果与分析

4.1 力和力矩

从图 4 中可以看出, 采用两种网格技术得到的力和力矩基本一致, 从该算例中很难区别两种网格技术的优劣, 重叠网格技术没有体现其优越性。

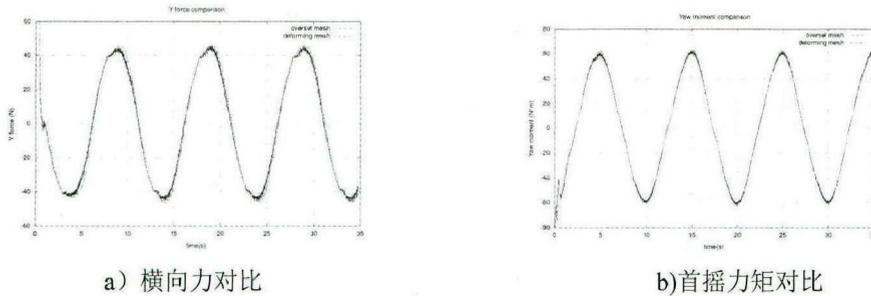


图4 力和力矩对比

4.2 波形图

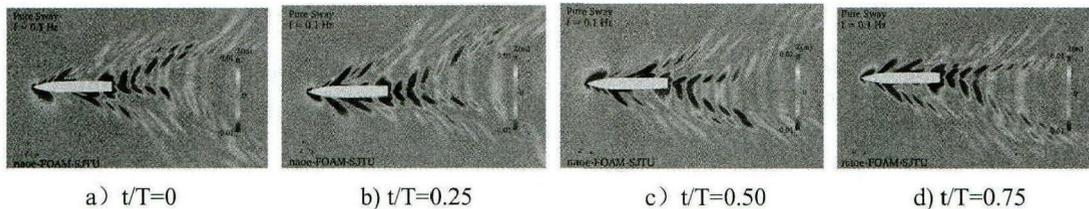


图5 完整振荡周期内的波形图

图5给出横荡完整周期内的波形图，图a)和图c)反对称，船处于平衡位置，横荡最高，船沿横荡方向船首内侧激起的波浪较高，且水的受迫运动面积较大；图b)和图d)反对称，船处于最大横向位置，横荡速度减为零或船刚启动，具有最大加速度，水的受迫运动面积较小。

5 结论

本文采用 naoeFOAM-SJTU 求解器、naoeFOAM-os-SJTU 求解器分别利用动网格技术、重叠网格技术模拟某船在频率 0.1Hz、振幅为 0.4m 时的纯横荡运动，用 VOF 方法求解自由面波高，求解 RANS 方程获得船体力等数据。将采用不同网格技术获得的船体力的结果进行比较，发现两者的模拟结果基本接近，说明对于裸船体的纯横荡计算，这两种网格技术并没有较大的差异，重叠网格的优势在于多级物体的转动。下一步的研究应该偏重于船舶带附体的运动模拟以及湍流方面的模拟，如 LES 和 DES 等。

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 Sakamoto, N., Carrica, P.M., 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.
- 2 Simonsen, C.D., Stern, F. Verification and validation of RANS maneuvering simulation of Esso Osaka: effects of drift and rudder angle on forces and moments[J]. *Computers & Fluids*. 2003, 32(10): 1325–1356.
- 3 Simonsen, C.D., Stern, F. Flow pattern around an appended tanker hull form in simple maneuvering conditions[J]. *Computers & Fluids*. 2005, 34(2): 169–198.
- 4 Carrica, P.M., Castro, A.M., Stern, F. Self-propulsion computations using a speed controller and a discretized propeller with dynamic overset grids[J]. *Journal of Marine Science and Technology*. 2010, 15(4): 316–330.
- 5 Carrica, P.M., Fu, H., Stern, F. Computations of self-propulsion free to sink and trim and of motions in head waves of the KRISO Container Ship (KCS) model[J]. *Applied Ocean Research*. 2011, 33(4): 309–320.
- 6 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.
- 7 Castro, A.M., Carrica, P.M., Stern, F. Full scale self-propulsion computations using discretized propeller for the KRISO container ship KCS[J]. *Computers & Fluids*. 2011, 51(1): 35–47.
- 8 沈志荣, 船桨舵相互作用的重叠网格技术数值方法研究[D], 上海交通大学博士论文, 导师: 万德成, 2014.

Simulation of pure sway tests based on moving mesh and overset mesh technique

LIU Xiao-jian^{1,2} WANG Jian-hua¹ WAN De-cheng^{1*}

(¹State 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)

(²Laboratory of Science and Technology on Water Jet Propulsion, Marine Design and Research Institute of China, 168 Zhong Shan Nan Yi Road, Shanghai, 200011, China)

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

Abstract: At present, a special attention is paid on simulation of Planar Motion Mechanism (PMM) tests like pure sway tests. In this article, the sway tests were calculated by moving mesh and overset mesh technique based on naoeFOAM-SJTU solver, where the forces and moments are obtained by the RANS equations, and sinkage and trim are solved by the prescribed motion equation and free motion equations. The calculated results were compared between different mesh techniques.

Key words: moving mesh; overset; pure sway tests; numerical simulation