

考虑自由面和船舶姿态变化的纯摇艏运动 试验数值模拟

刘小健^{1,2}, 王建华¹, 万德成³

(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 喷水推进技术国防科技重点实验室(筹), 上海 200011)

摘要: 为了通过数学模型模拟船舶的操纵性, 进行斜航、纯横荡和摇艏等试验或数值模拟必不可少。本文基于 OpenFOAM 开源代码开发的求解器 naoe-FOAM-SJTU 模拟深水中摇艏运动试验, 采用动网格技术, 用 VOF 方法求解自由面波高, 求解 RANS 方程获得船体力等数据, 代入升沉和纵倾方程并积分, 通过转换矩阵得到该船的位置和姿态数据。

关键词: 纯摇首; naoe-FOAM-SJTU 求解器; 动网格

为了掌握船舶的操纵特性确保航向安全, 使用大型水池进行自由自航模试验直接获得船舶的操纵性, 或者采用平面运动机构(PMM)获得水动力进行数值仿真是工程中常用的方法。前者的缺陷是难以进行机理分析, 尽管后者解决了这一问题, 但是两种方法中试验一旦完成, 很难为了其他装载状态再次进行试验。因此, 通过数值手段模拟船舶的操纵简化运动, 获得操纵性运动方程所需要的水动力, 再进行操纵性数值仿真是当前流行的做法, 也一直是国际上追踪的热点。

Carrica^[1]用 URANS 方法模拟了水面双体船模型尺度和实际尺度时的回转和“Z”形试验, 结果表明 URANS 方法进行标准操纵模拟是可行的。Turneck^[2]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, 也给出了浅水时的计算结果。Sakamoto 等^[3-4]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。在 SIMMAN2008 会议上, Stern^[6]提交了多种预报操纵性模拟方法, 最后给出了细网格和 DES 方法能更准确进行模拟的结论。

本文采用 naoe-FOAM-SJTU 求解器^[5-7]模拟深水纯摇首运动试验, 采用动网格技术, 用 VOF 方法求解自由面波高, 求解 RANS 方程获得船体力等数据, 代入升沉和纵倾方程, 获得该船的运动数据。计算时将给出详细的流场信息。

文中首先介绍控制方程、求解器和算法、六自由度运动方程和动网格技术, 其次介绍求解域、网格设置、船体几何参数以及计算结果。最后对全文进行总结。

1 数学模型

1.1 控制方程

不可压缩 RANS 方程如下:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

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

式中: U 表示速度场; U_g 表示网格节点的速度; $p_d = p - \rho_g \cdot x$ 表示动压力场, 由总压力减去静水压力得到。 ρ 表示空气和水两项流体的混合密度; g 表示重力加速度; $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu_t)$ 表示有效动力粘性系数, 其中 ν 表示运动粘性系数, ν_t 表示涡粘系数; 后者是由 $k-\omega$ 湍流模型得到的。 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。控制方程采用 PISO 算法对速度压力进行耦合求解。

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:

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

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:

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 11432009, 51411130131), 长江学者奖励计划(2014099), 上海高校特聘教授(东方学者)岗位跟踪计划(2013022), 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB036103), 工信部高技术船舶科研项目的资助项目

作者简介: 万德成, 男, 教授, 博士生导师。主要从事船舶与海洋工程水动力学, 计算流体力学研究工作。
E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

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

1.2 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到单元面的值。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, 式(2)中的对流项采用二阶 TVD 有限线性法, 扩散项采用二阶中心差分法, VOF 方程采用 Van Leer 离散方法, 时间项采用二阶向后插值方法。

1.3 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, 一个是大地坐标系 $o-xyz$, 一个是船体坐标系 $o'-x'y'z'$ 。

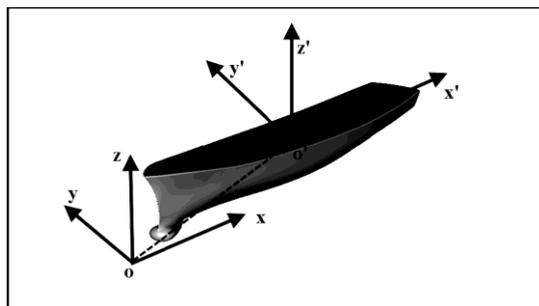


图 1 坐标系

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。

$$v_1 = J_1^{-1} \dot{\eta}_1, \quad v_2 = J_2^{-1} \dot{\eta}_2 \quad (5)$$

$$\dot{\eta}_1 = J_1 v_1, \quad \dot{\eta}_2 = J_2 v_2 \quad (6)$$

其中 J_1 和 J_2 分别为

$$J_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi \\ \cos\theta\sin\psi & \sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\phi\cos\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi\sec\theta & \cos\phi\sec\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$F(X, Y, Z) = J_1^{-1} F_e \quad M(K, M, N) = J_2^{-1} M_e \quad (9)$$

在大地坐标中, 计算船体上受到的力 F_e 和力矩 M_e , 利用式(9), 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式(10)并积分, 得到船体线速度和角速度 $v = (v_1, v_2) = (u, v, w, p, q, r)$, 再次利用式(6)并积分, 可以得到大地坐标下船体的位置和姿态 $\eta = (\eta_1, \eta_2) = (x_1, x_2, x_3, \phi, \theta, \psi)$ 。

$$\begin{cases} \dot{u} = X/m + vr - wq + x_g(q^2 + r^2) - y_g(pq - \dot{r}) - z_g(pr + \dot{q}) \\ \dot{v} = Y/m + wp - ur + y_g(r^2 + p^2) - z_g(qr - \dot{p}) - x_g(qp + \dot{r}) \\ \dot{w} = Z/m + uq - vp + z_g(p^2 + q^2) - x_g(rp - \dot{q}) - y_g(pr + \dot{p}) \\ \dot{p} = 1/I_x \{K - (I_z - I_y)qr - m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)]\} \\ \dot{q} = 1/I_y \{M - (I_x - I_z)rq - m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)]\} \\ \dot{r} = 1/I_z \{N - (I_y - I_x)pq - m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)]\} \end{cases} \quad (10)$$

1.4 移动网格技术

在求解船舶的运动时采用了动网格技术。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:

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla U_g) = 0 \quad (11)$$

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:

$$\gamma = \frac{1}{r^2} \tag{12}$$

也可以直接求解网格位移的 Laplace 方程:

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla X_g) = 0 \tag{13}$$

其中 X_g 是网格节点位移。

2 计算模型与网格

2.1 船体几何

计算所用模型没有带桨带舵, 其主要尺度如表 1 所示。

表 1 船模主尺度

参数	单位	数值
船长 L_{pp}	m	4.327
型宽 d_B	m	0.615
吃水 T	m	0.164
船速 V	m/s	1.569
摇首惯性半径 K_{zz}	m	$0.25 L_{pp}$
傅氏数 Fr	-	0.24
雷诺数 Re	-	$6.79e6$

2.2 计算域与网格

计算域如图 2 所示, 以船头为原点, 三个方向分别为: $-1.0L_{pp} < x < 4.0L_{pp}$, $-1.5L_{pp} < y < 1.5L_{pp}$, $-1.0L_{pp} < z < 1.0L_{pp}$ 。网格是由 OpenFOAM 的自带网格划分工具 snappyHexMesh 产生, 计算所用的全局网格和局部网格如图 3 所示, 网格总数大概 1.83 M。

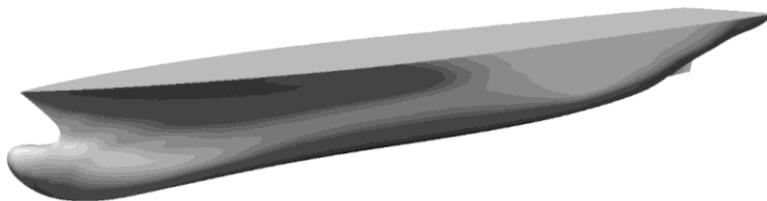
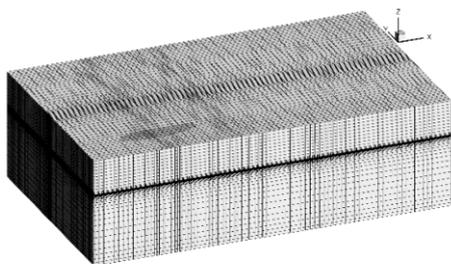
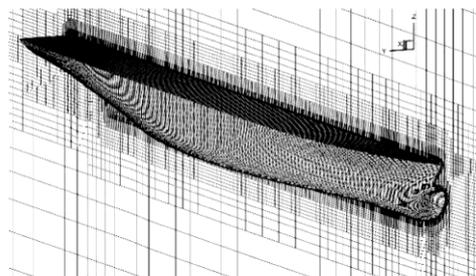


图 2 船体几何



(a) 全局网格



(b) 局部网格

图 3 网格划分示意

3 计算结果

本文计算了横荡幅值 a 为 0.4 m, 频率 f 为 0.143 Hz 时的纯摇首运动, 船舶运动的轨迹如图 4 所示, 船舶的重心位置处的 x 轴始终与轨迹相切, 首向角、摇首角速度和角加速度的变化如式 (14) 所示。

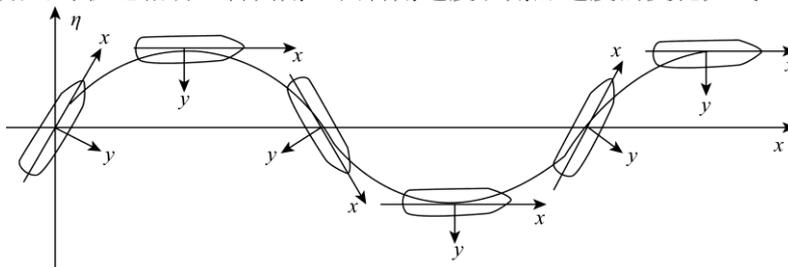


图 4 纯摇首运动

$$\begin{cases} \psi = -\frac{a\omega}{U_0} \cos \omega t \\ r = \dot{\psi} = \frac{a\omega^2}{U_0} \sin \omega t \\ \dot{r} = \ddot{\psi} = \frac{a\omega^3}{U_0} \cos \omega t \end{cases} \quad (14)$$

3.1 受力和运动曲线

计算给出了纵向力、摇首力矩、升沉和纵倾的时历曲线，可以看出，力和力矩随船舶运动周期明显。纵向力最大值为 20 N；摇首力矩最大值为 100 N·m；船舶下蹲，但升沉很小，几乎为零；纵倾也很小，船发生了首倾（图 5、图 6）。

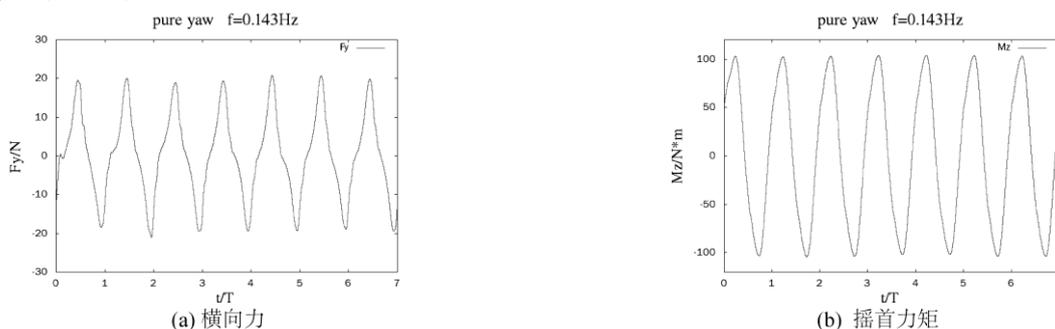


图 5 力和力矩

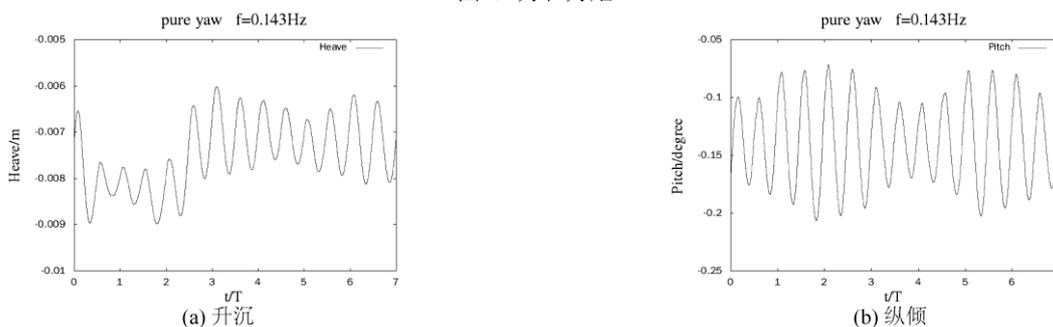


图 6 升沉和纵倾

3.2 自由面波形图

从图 7 可以看出，在一个周期内，随着船体的摇首运动，船舶的自由面兴波情况同样有周期性的变化。在 $t=0.25T$ 以及 $t=0.75T$ ，船首附近的自由面兴波波峰分别出现在船首的右侧和左侧，这与三种压力分布的情况相吻合。而且在此两个时刻，船首的兴波也最剧烈。另外，船首兴波在 $t=0$ 以及 $t=0.75T$ 时刻趋于平稳。

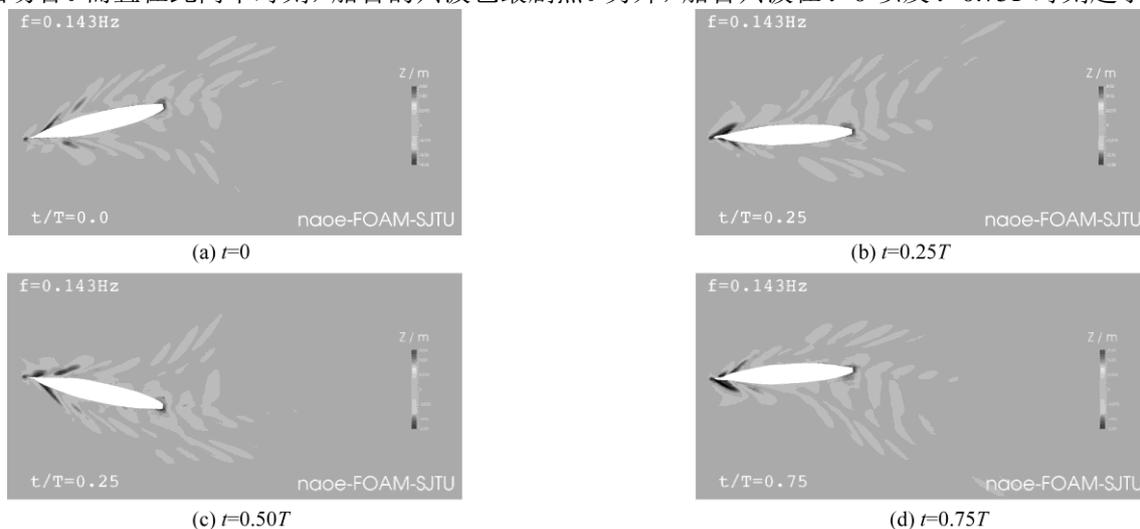


图 7 自由面波形

4 结 语

本文基于 OpenFOAM-SJTU 求解器计算了船速为 1.569 m/s、横荡幅值为 0.4 m、频率为 0.143 Hz 时船舶的纯摇首运动, 获得了船体力和力矩、升沉和纵倾、自由面波高等数据。可以发现力和力矩具有明显的周期性, 与摇首运动周期相等。本算例中升沉和纵倾的变化不大, 几乎在零附近。下一步应该关注傅氏数与船舶姿态的变化, 对船体力和力矩的影响。

参考文献

- 1 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 Mar Sci Technol*, 2013, 18(2): 166-181.
- 2 Turnock S R. Urans simulations of static drift and dynamic maneuverers of the KVLCC2 tanker. Proc SIMMAN 2008 workshop on verification and validation of ship manoeuvring simulation methods, 2008, Lyngby, Denmark.
- 3 Sakamoto N, Carrica P M and Stern F. URANS simulations of static and dynamic maneuvering for surface combatant: part 1. Verification and validation for forces, moment, and hydrodynamic derivatives. *Journal of Marine Science and Technology*, 2012, 17(4): 422-445.
- 4 Sakamoto N, Carrica P M and Stern F. URANS simulations of static and dynamic maneuvering for surface combatant: part 2. Analysis and validation for local flow characteristics. *Journal of Marine Science and Technology*, 2012, 17(4): 446-468.
- 5 Shen Z R., Cao H J. and 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. 2012
- 6 Zha R S, Ye H X and Wan D C. Numerical study of viscous wave-making resistance of ship navigation in still water. *J Mar Sci Appl*, 2014, 13(2): 158-166.
- 7 Shen Z R, Ye H X and Wan D C. URANS simulations of ship motion responses in long-crest irregular waves. *J Hydrodynamics, Ser. B*, 2014, 26(3): 436-446.