

深水和浅水中船舶斜航运动数值模拟

刘小健^{1,2}, 王建华¹, 万德成¹

(1.上海交通大学 海洋工程国家重点实验室 船舶海洋与建筑工程学院

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 国家喷水推进技术重点实验室, 上海 200011)

摘要

船舶经常航行于深水和浅水中, 掌握其在不同水深的操纵特性是操船者和研究人员的迫切需求。本文基于OpenFOAM开源代码开发的求解器分别模拟深水和浅水中斜航运动试验, 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, 带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。将所求解的船体力与模型试验所测的水动力进行比较, 精度较好, 证明该方法可行, 该工作的开展为其它PMM试验模拟奠定基础。

关键词: 动网格; 斜航运动试验; naoe-FOAM-SJTU 求解器

0 引言

船舶经常航行于深水和浅水中, 为了掌握其操纵特性能确保船舶的航向安全, 使用大型水池或遮蔽水域进行自由自航模试验确定船舶的操纵性是常用的方法, 但是该方法难以进行机理分析, 耗费人力和物力, 且一旦试验完成, 很难为了其它状态再次进行试验。因此, 通过数值手段模拟船舶的操纵运动, 获得操纵性运动方程中所需要的水动力, 再进行操纵性数值仿真是当前国际上的研究热点。

Turneck^[3]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^[4,5]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。Carrica^[1]用URANS方法模拟了水面双体船模型尺度和实尺度时的回转和Z形试验, 结果表明URANS方法进行标准操纵模拟是可行的。在SIMMAN2008会议上, Stern^[6]提交了多种预报操纵性模拟方法, 最后给出了好网格和DES方法能更准确进行模拟的结论。

本文采用naoeFOAM-SJTU求解器^[15-17]分别模拟深水(水深、吃水比大于4)和浅水(水深、吃水比等于2)中斜航运动试验, 其中斜航时漂角为2、4、6、8、10、12度等, 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, 带入升沉和纵倾方程, 获得该船的运动数据。将所求解的船体力与模型试验所测的水动力系数进行比较, 计算时将给出详细的流场信息。

在这篇文章, 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等, 其次介绍求解域、网格设置、船体几何和参数, 进一步给出数值模拟结果以及与试验结果的比较。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:

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

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

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，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； \mathbf{g} 表示重力加速度； $\mu_{\text{eff}} = \rho(\nu + \nu_t)$ 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^[9]。 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^[10]。采用 Rhie 和 Chow 提出的同位网格法^[11]代替传统的交错网格法从而节省了中保存副本网格信息而消耗的存储量。

1.2 VOF 方法

本文采用边界可压缩的 VOF 方法。在这里先给出简短的介绍，感兴趣的读者可以参阅文献。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：

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

1.3 离散方法

RANS 方程(式 1 和 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，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。

1.4 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。

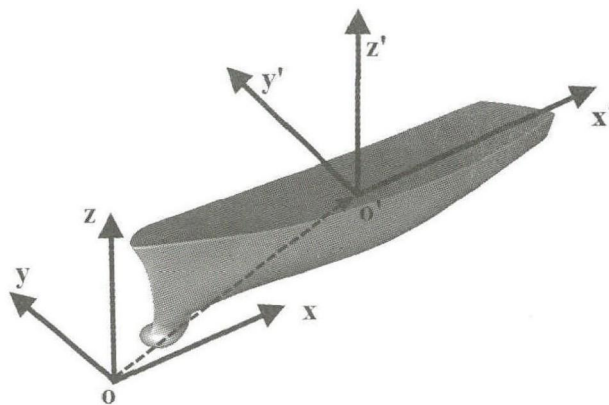


图 1 坐标系

船舶在大地坐标系中的线位移和角位移 $\mathbf{n} = (\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2) = (x_1, x_2, x_3, \varphi, \theta, \psi)$, 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 $\mathbf{v} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = (u, v, w, p, q, r)$ 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。

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{J}_1^{-1} \dot{\mathbf{n}}_1 \mathbf{v}_2 = \mathbf{J}_2^{-1} \dot{\mathbf{n}}_2 \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{n}}_1 = \mathbf{J}_1 \mathbf{v}_1 \dot{\mathbf{n}}_2 = \mathbf{J}_2 \mathbf{v}_2 \quad (6)$$

其中, \mathbf{J}_1 和 \mathbf{J}_2 分别为

$$\mathbf{J}_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi \\ \cos\theta\sin\psi & \sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\phi\cos\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{J}_2 = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi\sec\theta & \cos\phi\sec\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{F}(X, Y, Z) = \mathbf{J}_1^{-1} \mathbf{F}_e \mathbf{M}(K, M, N) = \mathbf{J}_2^{-1} \mathbf{M}_e \quad (9)$$

在大地坐标中, 计算船体上受到的力 \mathbf{F}_e 和力矩 \mathbf{M}_e , 利用公式(9), 可以得到船体坐标系下船体受到的力 \mathbf{F} 和力矩 \mathbf{M} , 将其代入刚体运动方程(10)并积分, 得到船体线速度和角速度 $\mathbf{v} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = (u, v, w, p, q, r)$, 再次利用公式(6)并积分, 可以得到大地坐标下船体的位置和姿态 $\mathbf{n} = (\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2) = (x_1, x_2, x_3, \varphi, \theta, \psi)$ 。

$$\begin{cases} \dot{u} = X/m + vr - wq + x_g(q^2 + r^2) - y_g(pq - \dot{r}) - z_g(pr + \dot{q}) - C_1 u/m \\ \dot{v} = Y/m + wp - ur + y_g(r^2 + p^2) - z_g(qr - \dot{p}) - x_g(qp + \dot{r}) - C_2 v/m \\ \dot{w} = Z/m + uq - vp + z_g(p^2 + q^2) - x_g(rp - \dot{q}) - y_g(pr + \dot{p}) - C_3 w/m \\ \dot{p} = 1/I_x \{K - (I_z - I_y)qr - m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)] - C_4 p\} \\ \dot{q} = 1/I_y \{M - (I_x - I_z)rq - m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] - C_5 q\} \\ \dot{r} = 1/I_z \{N - (I_y - I_x)pq - m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] - C_6 r\} \end{cases} \quad (10)$$

1.5 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:

$$\gamma = \frac{1}{r^2} \quad (12)$$

也可以直接求解网格位移的 Laplace 方程:

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla X_g) = 0 \quad (13)$$

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
纵向惯性半径 K_{yy}	m	$0.25L_{pp}$
傅氏数 Fn	-	0.24
雷诺数 Re	-	$6.79e6$

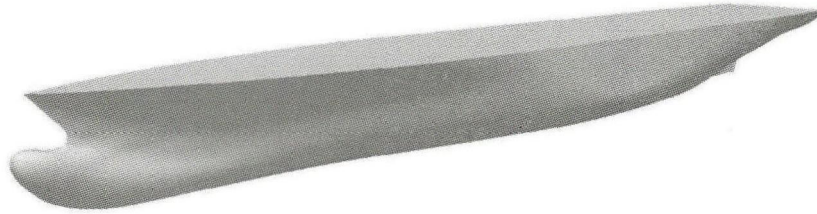


图 2 船体几何

2.2 计算域和网格

为了计算的方便，我们用斜流替代了船舶的转动，漂角 β 即为斜流角。

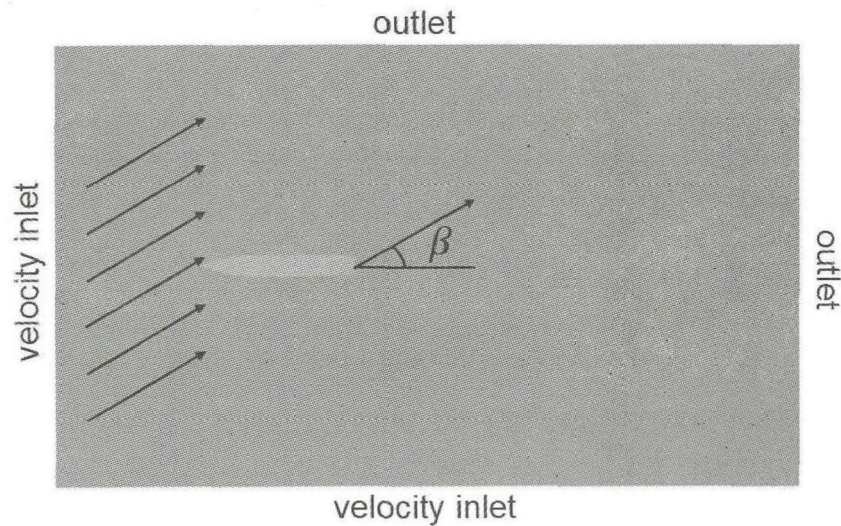


图 3 计算域

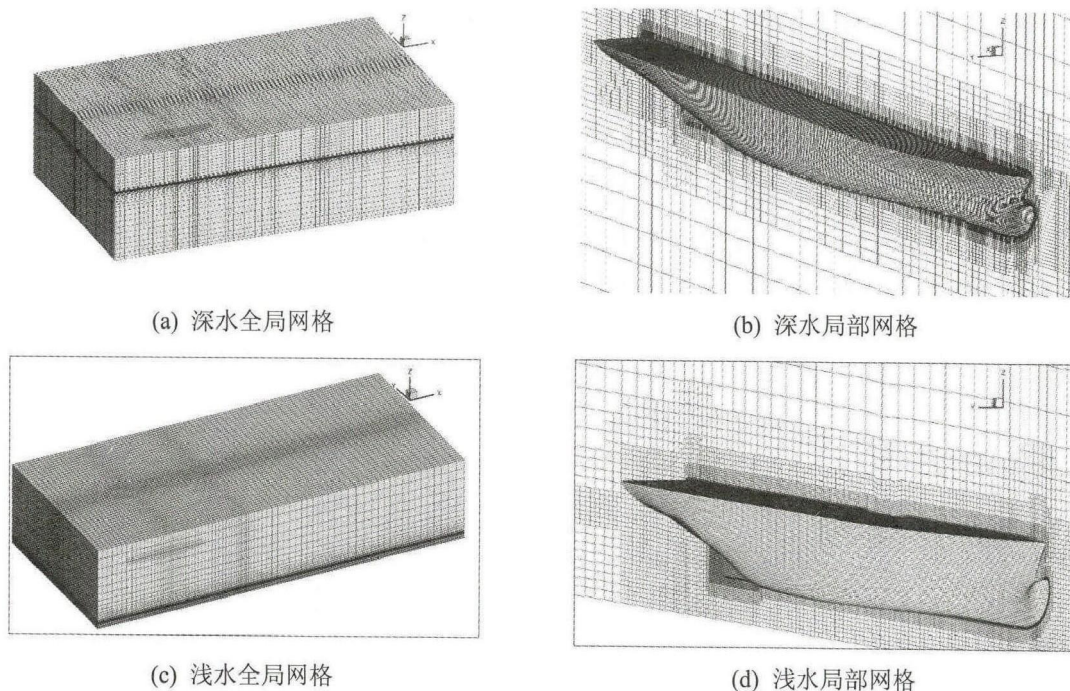


图4 网格划分示意图

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，深水和浅水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 1.83M。

3 计算结果

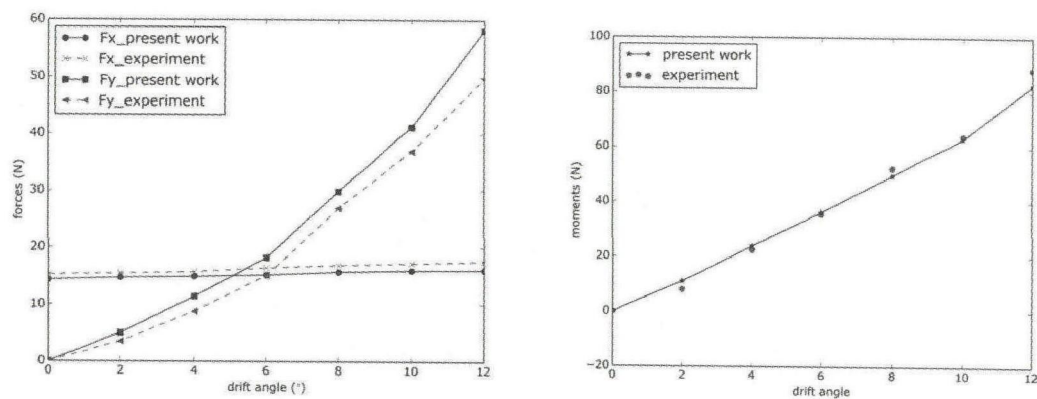


图5 深水工况下侧向力对比曲线图 图6 深水工况下力矩对比曲线

图 5 和图 6 给出了不同漂角时力 F_x 、 F_y 和力矩 M 的数值计算和水池试验结果对比，从图 5 可以看出，计算的 F_x 较试验值偏小，误差在 5%-9%，而横向力 F_y 的计算结果几乎与试验结果一致，横向力 F_y 随角度的增加，有明显的非线性。图 6 显示，计算的摇首力矩与试验值接近。

图 7 和图 8 分别给出斜拖工况中不同漂角条件下的船体周围的涡量场以及在 $x/L_{pp}=0.9$ 位置处的伴流场，通过详细的流场信息能够更加真实的反应出斜拖过程中的物理现象以及给出结果的原因分析。

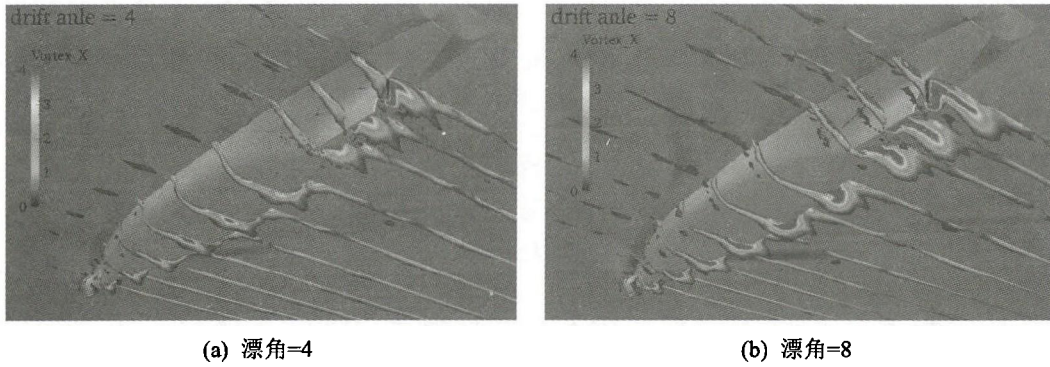


图7 深水工况下船体周围涡量场

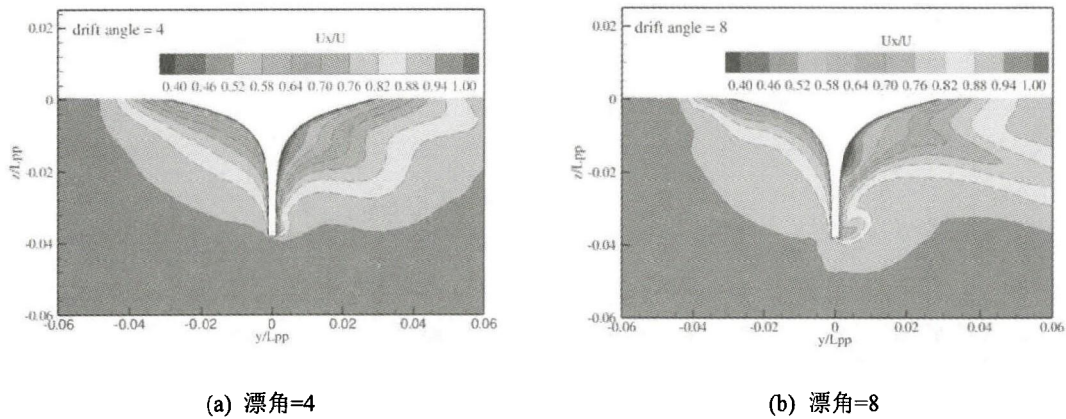


图8 深水工况下尾部件流场

对于浅水工况下的斜拖进行了数值模拟，根据试验条件，水深与吃水比值为 2，给定底部壁面边界条件，同时采用深水工况中的等效流程进行模拟浅水情况下船体的斜拖受力。下图给出了该工况下，船体所受力和力矩的结果，并且同试验值进行对比，达到了预定的要求。

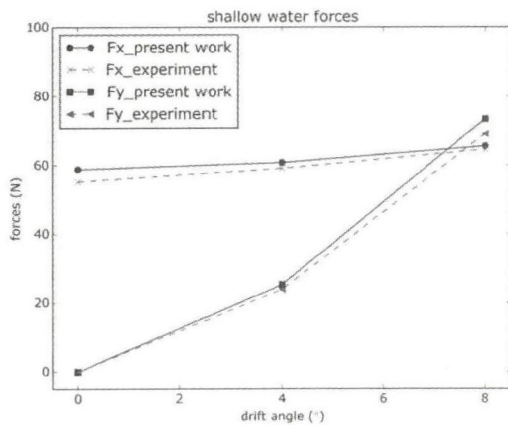


图9 浅水工况下侧向力对比曲线图

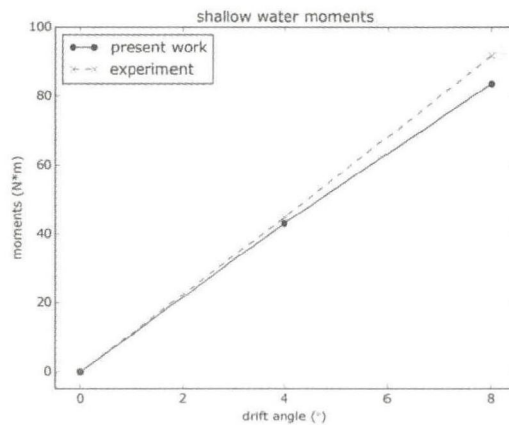


图10 浅水工况下摇首力矩对比曲线

下面给出浅水工况下船体周围的流场信息，先是船体周围及自由面附近的涡量场，通过涡量场可以看出，在浅水工况下，船体尾部流场的不对称性更加明显，同时尾部沿流向泄涡现象更为严重。这也证实了浅水工况下侧向力更大的原因。

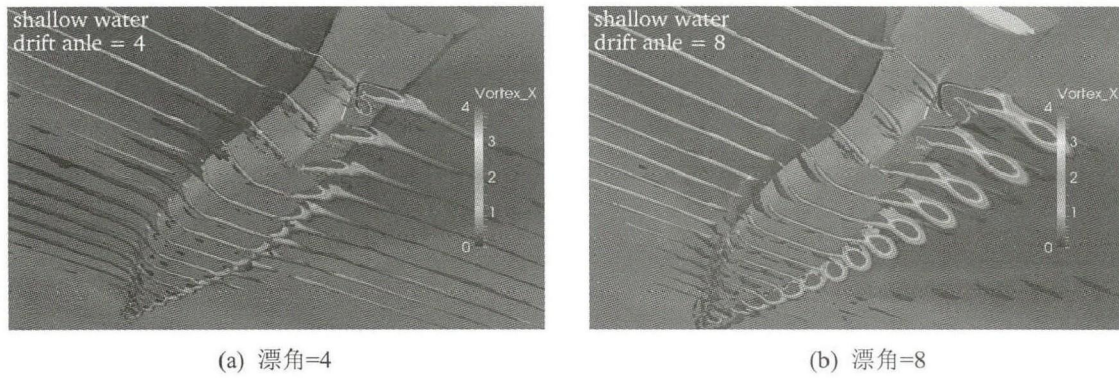


图 11 浅水工况下涡量场变化

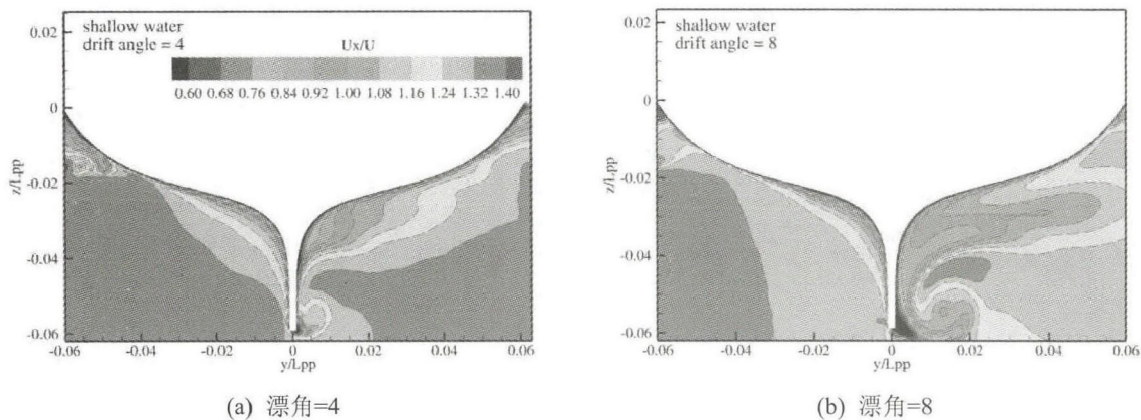


图 12 浅水工况下尾部伴流场变化

通过上面的尾部流场图，我们可以清晰的看到船体尾部流场变化非常剧烈，同时与深水工况中相应漂角下的尾部流场进行对比可以看出，浅水工况下，尾部流场变化更加剧烈，并且变化的范围明显更大，因此浅水工况更为值得研究。

4 结论

本文采用naoe-FOAM-SJTU求解器进行了深水和浅水中斜航运动试验模拟，模拟过程中采用斜流代替船模的转动，通过这种等效方法，我们进行了系列入口速度模拟。

模拟过程中考虑了船舶六自由度运动，计算了纵向力、横向力和摇首力矩，给出了波形图、涡量图和尾流场信息，并显示出了很强的非线性，计算结果与试验结果吻合较好。

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] Carrica, P. M., Ismail F., Hyman, M., et al. (2013). "Turn and zigzag maneuvers of a surface combatant using a URANS approach with dynamic overset grids." *J Mar SciTechnol*, 18(2), 166-181.
- [2] Ohmori, T. (1998). "Finite-volume simulation of flows about a ship in maneuvering motion." *J Mar SciTechnol*, 3, 82-93
- [3] Turnock, S. R. (2008). "Urans simulations of static drift and dynamic maneuverers of the KVLCC2 tanker." *ProcSIMMAN 2008 workshop on verification and validation of ship manoeuvring simulation methods*, Lyngby, Denmark.
- [4] Sakamoto, N., Carrica, P.M., Stern, F. (2012). 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*, 17(4): 422-445.
- [5] Sakamoto, N., Carrica, P.M., Stern, F. (2012). 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*, 17(4): 446-468.
- [6] Stern, F., Agdrup, K., kim, S. Y., et al. (2011). "Experience from SIMMAN2008—The first workshop on verification and validation of ship maneuvering simulation methods." *J Ship Res*, 55(2), 135-147.
- [7] Hirt, C. W., and Nichols, B. D. (1981). "Volume of fluid (VOF) method for the dynamic of free boundaries." *J ComputPhys*, 39, 201-225.
- [8] Ferziger, J. H. and Peric, M. (1999). "Computational methods for fluid dynamics." Second ed. Springer, Berlin.
- [9] D. C. Wilcox.(1994).*Turbulence modeling for CFD*. La Canada, CA: DCWindustries, Inc.
- [10] Issa, R. I. (1986). "Solution of the implicitly discretized fluid flow equations by operatorsplitting." *J ComputPhys*, 62(1), 40-65.
- [11] C. M. Rhie and W. L. Chow,(1983). "Numerical study of the turbulent flow pastan airfoil with trailing edge separation," *AIAA Journal*, 21(11),1525-1532.
- [12] P. K. Sweby.(1984) "High resolution schemes using flux limiters for hyperbolicconservation laws," *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 21(5),995-1011.
- [13] B. van Leer.(1979). "Towards the ultimate conservative difference scheme. v.a secondorder sequel to godunov's method," *Journal of ComputationalPhysics*, 32(1),101-136,
- [14] Menter, F. R. (1994). "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications." *AIAA Journal*, 32(8), 1598-1605.
- [15] Shen, Z. R., Cao, H. J. and Wan, D. C.(2012). "Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU. " *Technical Report for Solver Manual, Shanghai Jiao Tong University*.
- [16] Zha, R. S., Ye, H. X. and Wan, D. C. (2014). "Numerical study of viscous wave-making resistance of ship navigation in still water." *J Mar SciAppl*, 13(2), 158-166.
- [17] Shen, Z. R., Ye, H. X., Wan, D.C. (2014). "URANS simulations of ship motion responses in long-crest irregular waves." *J Hydrodynamics, Ser. B*, 26(3), 436-446.

Simulation of Oblique Towed Tests in Deep and Shallow Water

LIU Xiaojian^{1,2}, WANG Jianhua¹, WAN Decheng^{1*}

(1. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai

Jiaotong University, 800 Dong Chuan Road, Shanghai, 200240, China;

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

Abstract

Ship maneuverability is different for deep and shallow water, hence, for operators and researches, it is necessary to make an in-depth study. In this article, the oblique towed tests were calculated by based onnaoeFOAM-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, in deep and shallow water. The calculated results were compared with the results in tank test, the maximum error of the calculated results is about 9% for deep water, and the maximum error is about 10% for shallow water.

Key words: moving mesh; oblique towed tests; OpenFOAM