

考虑航速和水深条件下的纯横荡试验数值模拟

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

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OpenFOAM开源代码软件, 采用移动网格技术, 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, 将不同航速和水深条件下获得的船体升沉、纵倾和船体力等结果进行了相互比较。

关键词: 浅水; 纯横荡试验; naoe-FOAM-SJTU 求解器

0 引言

从ITTC报告多年的研究进展来看, 数值模拟PMM试验如横荡运动等试验还在不断的发展当中, 单体船过渡到双体船、三体船, 从最初针对裸船体的研究逐渐开始了带桨带舵船体的研究; 除此之外, 在深水、浅水和限制水域等方面的研究也是日新月异。

Turneck^[1]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。Sakamoto^[2-3]等使用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^[7-8]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。李冬荔^[9]通过FLUENT软件的二次开发, 采用动网格技术, 模拟了PMM试验。杨勇^[10]在不考虑自由面的情况下, 用FLUENT软件数值模拟了深水和浅水中的纯横荡试验, 李赫^[11]采用FLUENT, 完成了潜水器的PMM试验数值模拟。沈志荣^[12]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, 并得到试验验证。

本文采用naoe-FOAM-SJTU求解器^[4-6]利用动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, 带入升沉和纵倾方程, 获得该船深水和浅水中的运动数据, 并进行了相互比较。

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以及相互之间的比较。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^[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。控制方程采用 PISO 算法对速度压力进行耦合求解。采用 Rhie 和 Chow 提出的同位网格法^[13]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。

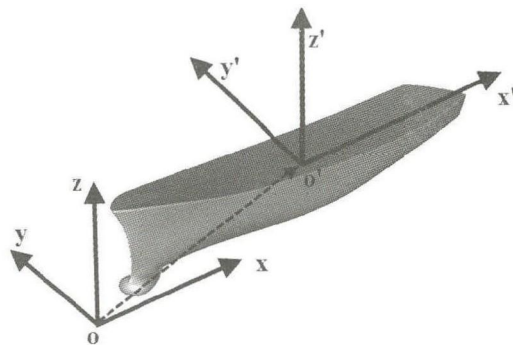


图 1 坐标系统

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

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

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

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

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:

$$\begin{cases} x_2 = -a\sin\omega t \\ \dot{x}_2 = -a\omega\cos\omega t \\ \ddot{x}_2 = a\omega^2\sin\omega t \end{cases} \quad (10)$$

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

为了得到横倾力矩, 横摇固定, 因此, 在该运动模式下, $\phi = \psi = 0$, $p=r=0$, $\dot{p} = \dot{r} = 0$, 刚体运动方程可写成:

$$\begin{cases} \dot{u} = X/m - wq + x_g(q^2) - z_g(\dot{q}) \\ \dot{v} = Y/m \\ \dot{w} = Z/m + uq + z_g(q^2) - x_g(-\dot{q}) \\ \dot{p} = 0 \\ \dot{q} = 1/I_y \{M - m[z_g(\dot{u} + wq) - x_g(\dot{w} - uq)]\} \\ \dot{r} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

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(11)并积分, 得到船体线速度和角速度 $\mathbf{v} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = (u, v, w, 0, q, 0)$, 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 $\mathbf{n} = (\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2) = (x_1, x_2, x_3, 0, 0, 0)$ 。

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:

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla U_g) = 0 \quad (12)$$

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：

$$\gamma = \frac{1}{r^2} \quad (13)$$

也可以直接求解网格位移的 Laplace 方程：

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla X_g) = 0 \quad (14)$$

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 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	-	$6.79e6$

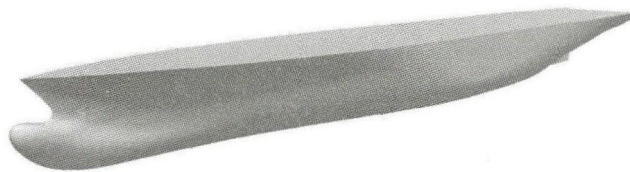


图 2 船体几何

2.2 计算域和网格

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

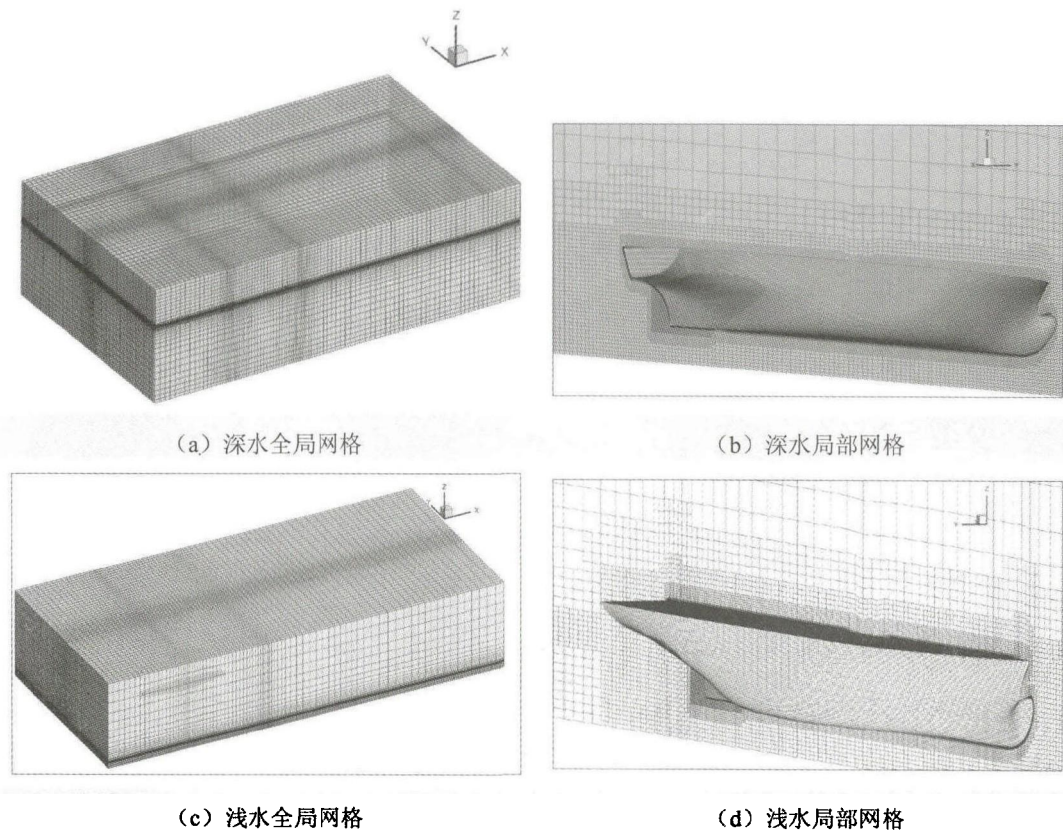


图3 网格划分示意图

2.3 数值模拟结果

零速和设计航速时纯横荡运动模拟的频率为 0.1Hz，振荡幅值为 0.4m，如图 4 所示，船舶开始朝右舷运动，在相同的模拟条件下，同时进行了深水和浅水中的模拟，下文将介绍计算结果相互之间的比较。

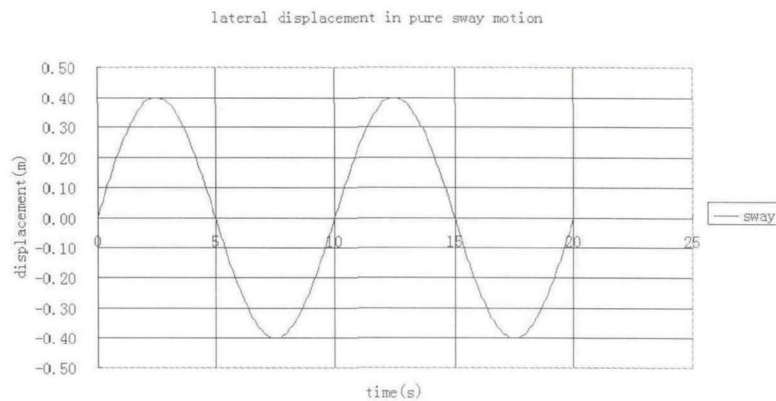


图4 纯横荡运动

2.4 深水零速时速度剖面图

图 5 给出了深水零速时 $x=0.90L$ 横剖面处一个完整横荡周期下的速度剖面图，由于深水有航速和浅水的情况与此类似，这里不再介绍。图 5(a) 可见，在 $t/T=0.25$ 时刻，剖面处的流速很低，此时

船舶到达最大的横向位置，左舷的流速高于右舷，可能是因为船朝右舷运动，流被挤压，流不得不快速回填到左舷。图 5(c)在 $t/T=0.75$ 时刻的现象正好与此相反。

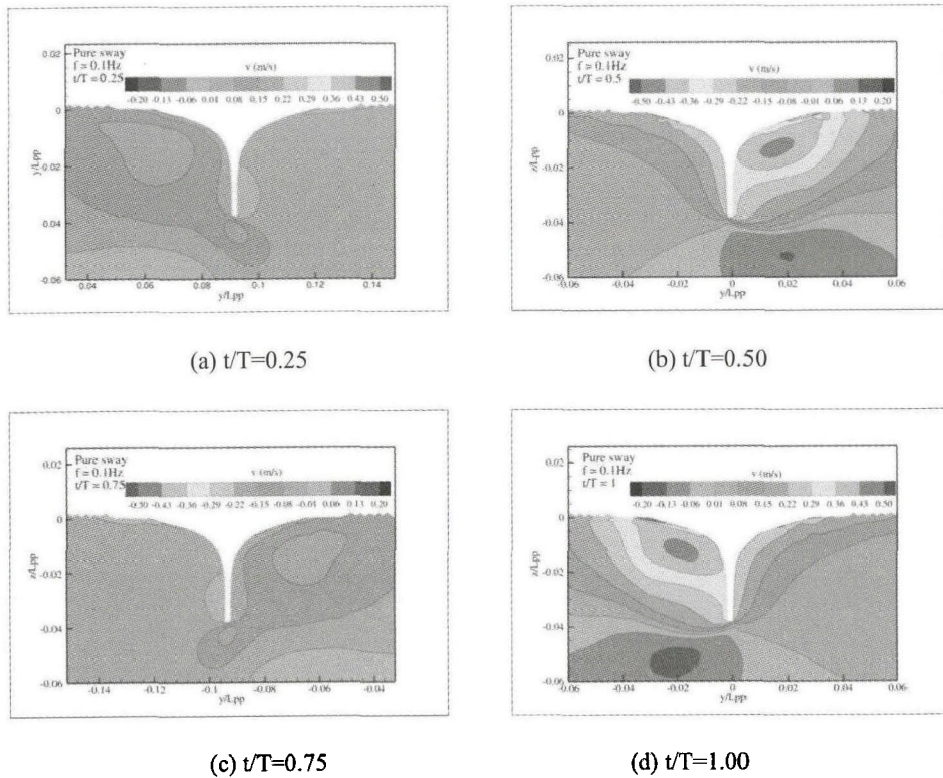


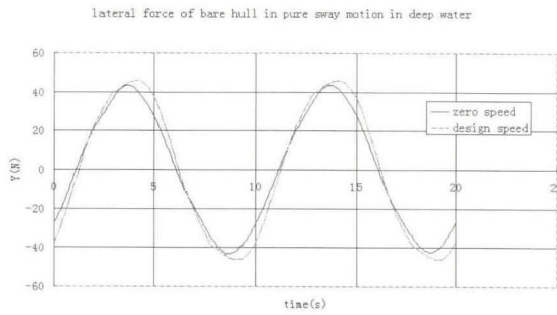
图 5 $x=0.90L$ 横剖面处速度剖面图

2.5 零速和有航速时的比较

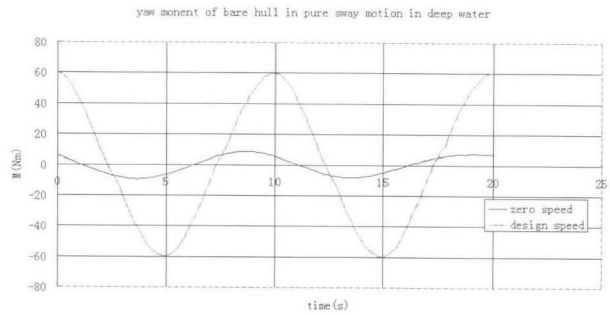
表 2 和图 6 给出了零速和有航速时的计算结果。从表 2 可以看出，零速时的横向力 F_y 和摇首力矩 M_z 分别是有航速时的 94.8%和 14.8%，零航速时横向力作用中心为 0.21m，有航速时为 1.30m，可见速度对力的作用中心影响很大。从表 2 和图 9-10 可见，在零速时船舶上浮 4.4mm，纵倾 0.053° ；有航速时船舶下蹲 1.93mm， 0.119° 。总之，速度对摇首力矩和运动的影响很大。

表 2 零速和有航速时计算平均值

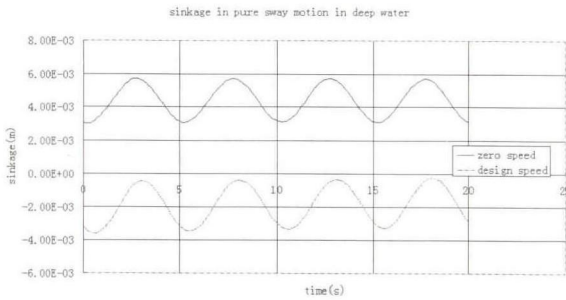
项目	零速 平均值 =abs(max)+abs(min)	设计航速	比较 =零速/设计航速(%)
$F_y(N)$	43.2	46.0	94.8
$M_z(Nm)$	8.9	60.0	14.8
Sinkage(mm)	4.4	1.93	228
Pitch(deg)	0.053	0.119	44.5



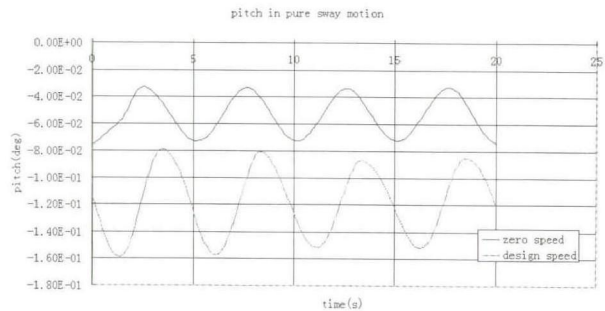
(a) 横向力比较



(b) 摇首力矩比较



(c) 升沉比较



(d) 纵倾比较

图6 零速和设计航速下的受力和运动比较

2.6 深水和浅水中的比较

深水和浅水中计算结果如表 3 和图 7 所示。从表 3 可以发现，深水中的横向力 F_y 和摇首力矩 M_z 分别是浅水中的 77.4% 和 132.8%。从表 3 和图 7 可见，在零速深水时船舶上浮 4.4mm，纵倾 0.053° ；在零速浅水时船舶下蹲 2.0mm，纵倾为 0.050° 。总之，零速浅水中摇首力矩增大明显，但运动的影响不大。

表 3 深水和浅水中计算平均值比较

项目	深水	浅水	比较 =深水/浅水(%)
	平均值 =abs(max)+abs(min)		
$F_y(N)$	43.2	55.8	77.4
$M_z(Nm)$	8.9	6.7	132.8
Sinkage(mm)	4.4	2.0	220
Pitch(deg)	0.053	0.050	106

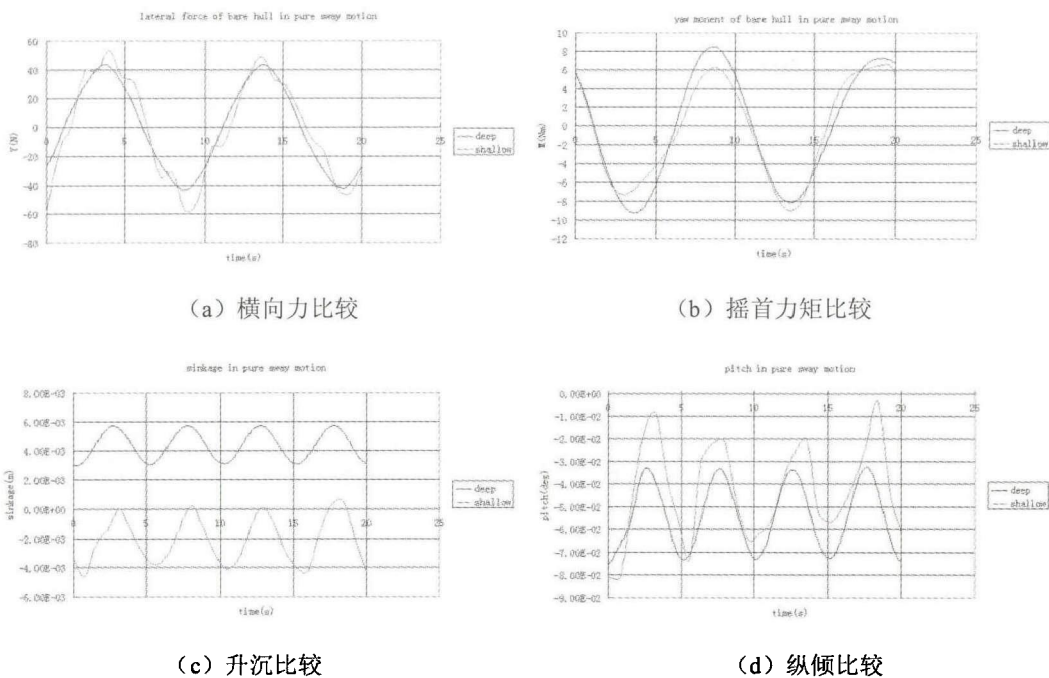


图7 深水和浅水中的受力和运动比较

从图 6 和图 7 中的 c)和 d)图与 a)和 b)图的周期比较可以发现, c)和 d)图的运动周期为 5s, 而 a)和 b)强迫运动的周期为 10s, 这是合理的, 因为船舶无论是从右舷到左舷,然后再从左舷到右舷横荡运动, 对于升沉和纵摇运动来说, 都是对称的。

3 结论

本文利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器进行了深水和浅水中零速, 以及深水中设计航速下的纯横荡运动模拟。零速和有航速下的模拟显示, 速度对横向力的作用中心有很大的影响, 对于纯横荡运动试验, 必须在有航速下进行。深水和浅水中的模拟发现, 零速时深水中船舶上浮, 而在浅水中船舶下蹲; 有航速时船舶在深水中也上浮, 在模拟过程中船舶的姿态必须考虑。除此之外, 在浅水中横向力明显增加, 水深的影响也很明显。

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] 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.
- [2] Sakamoto N., Carrica P., 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 Mar Sci Technol*, 17, 422-445.

- [3] Sakamoto N., Carrica P., Stern F. (2012), URANS simulations of static and dynamic maneuvering for surface combatant: part 2. Analysis and validation for local flow characteristics, *J Mar Sci Technol* 17, 446–468.
- [4] Shen, ZR and Wan, DC(2011). "RANS simulations of benchmark ships based on open source code," *Proceedings of the Seventh International Workshop on Ship Hydrodynamics*, Shanghai, China, pp. 76-82.
- [5] Shen, ZR and Wan, DC (2012). Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU, Register No. 2012 SR118110, Shanghai Jiao Tong University, China.
- [6] Shen, ZR and Wan, DC (2013). "RANS computations of added resistance and motions of ship in head wave," *Int J Offshore and Polar Eng, ISOPE*, Vol 23, No 4, pp 263-271.
- [7] Stern, F. and Agdrup, K. (2009), "Proceedings of the Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods SIMMAN 2008", *FORCE Technology*, Lyngby, Denmark.
- [8] Stern, F., Bhushan, S., Carrica, P., et al. (2009), "Large scale parallel computing and scalability study for surface combatant static maneuver and straight ahead conditions using CFDShip-Iowa", *Proceedings 21st International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics*.
- [9] 李冬荔等, 操纵运动船舶的水动力计算研究, 船舶工程, 2009,31(2),8-11.
- [10] 杨勇等, 深浅水中KVLCC船体横荡运动水动力数值计算, 水动力力学研究与进展, 2011,26(1),85-93.
- [11] 李赫等, 基于FLUENT软件平面运动机构试验, 系统仿真学报, 2010,22(3),566-569.
- [12] 沈志荣, 船桨舵相互作用的重叠网格技术数值方法研究[博士学位论文], 上海交通大学, 2014.
- [13] Rhie. C. M. and Chow. W. L. (1983), "Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation," *AIAA Journal*, 21(11), 1525–1532.

Simulation of Pure Sway Tests with Ship Speed and Water Depth Effects

LIU Xiaojian^{1,2}, WANG Jianhua¹, WAN Decheng¹

(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

At present, a special attention is paid on simulation of Planar Motion Mechanism (PMM) tests as sway tests. In this article, the sway tests were calculated by moving mesh 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 each other, and it is shown that ship velocity and water depth have important effect on the results.

Key words: shallow water; pure sway tests; OpenFOAM