

迎浪航行条件下船舶耐波性的计算分析

查若思, 叶海轩, 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, 上海 200240)

摘要

本文采用CFD (Computational Fluid Dynamic) 方法对某型模型尺度下的海洋巡逻船在规则波中迎浪航行的耐波性问题进行了计算分析。采用基于开源 CFD 软件 OpenFOAM 自主开发的求解器 naoe-FOAM-SJTU 进行计算, 包括完整的造波和消波模块, 求解船体六自由度运动方程, 运用有限体积法 (FVM) 离散不可压 RANS 方程, 并使用 VOF 方法捕捉自由面, 最终得到不同工况下的船体垂荡和纵摇运动响应。计算结果可以为船型优化和设计提供参考。

关键词: 运动响应; 粘流; 耐波性; naoe-FOAM-SJTU 求解器

1 引言

船舶在波浪中航行时, 受到波浪和流的影响, 船体会发生一定的摇荡运动, 会对船舶的耐波性和快速性造成不利影响。因此, 对于船舶在波浪中的运动响应预报是船舶耐波性的一个重要课题。本文利用 CFD 数值计算的方法研究了某型海洋巡逻船在不同规则波条件下迎浪航行的运动响应情况。传统的研究方法主要有基于势流理论的计算和模型试验方法, 相对于势流方法简单方便的特点, CFD 方法充分考虑了流场的粘性, 并且能求解传统方法难以解决的强非线性问题。随着计算机硬件和数值方法的发展, CFD 粘流计算的方法越来越成为一个有力的研究工具。相对于直接使用商业软件, 基于开源软件进行自主开发的方式具有更高的灵活性和拓展性。本文的数值模拟使用了基于源代码程序包 OpenFOAM 而开发的多用途求解器 naoe-FOAM-SJTU^[1], 运用有限体积法 (FVM)^[2] 离散不可压 RANS 方程, 并支持 VOF 方法和 level-set 方法处理自由面。包括三维数值造波和消波模块, 该数值水池能够模拟不同海况和不同波浪条件, 与理论值符合较好。另外, 该求解器基于 OpenFOAM 进一步开发了六自由度运动模块, 能够处理船舶在波浪作用下的六自由度运动问题。该求解器适用于求解多种复杂的船舶与海洋工程水动力学问题, 文献[3, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13]利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对标准船型 KVLCC2, KCS 和 DTMB5415 等船模型在波浪中运动问题进行了数值模拟, 并与试验结果进行了对比; 同时在迎浪条件下考虑船体纵倾和升沉运动, 计算了船舶波浪增阻, 验证了该求解器求解船舶在波浪中强非线性大幅度运动问题的有效性。

2 数学模型和数值方法

本文采用两相不可压 RANS 方程作为控制方程, 其形式可写为:

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

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

其中(1)为连续性方程, (2)为动量守恒方程: \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} 表示有效动力粘性, ν 表示运动粘度, ν_t 表示涡粘度。 f_σ 为表面张力项, f_s 是用于消波的源项。

本文采用 SST $k-\omega$ 湍流模型^[5]进行方程的闭合。 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 (Volume of Fluid) 方法^[6]来处理自由面。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, 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, $\alpha = 0$ 表示空气, $\alpha = 1$ 表示水, $0 < \alpha < 1$ 表示界面。

可以通过设置入口边界条件来实现模拟造波板运动, 从而实现数值造波^[7]功能, 本文采用的是考虑遭遇频率的一阶 stokes 深水波用来产生不同规则波的工况。消波功能是通过在数值水池的末端设置海绵层来实现的, 用来避免波浪反射, 造成数值计算结果的剧烈震荡。

本文中采用的 naoe-FOAM-SJTU 求解器包含了完整的六自由度运动^[8,9]求解模块, 并采用了动网格技术, 用来进行运动响应预报。坐标系包括船体坐标系和大地坐标系, 其中船体坐标系原点位于船体重心, 并随船一起运动。在两种坐标系下的速度可以变换矩阵进行相互转化。船体坐标系的线速度和角速度可以用 $\mathbf{v} = (v_1, v_2) = (u, v, w, p, q, r)$ 表示。六自由度运动方程为:

$$\begin{cases} \dot{u} = X/m + vr - wq + x_g(q^2 + r^2) - y_g(pq - \dot{r}) - z_g(pr + \dot{q}) - C_1 u/m \\ \dot{v} = Y/m + wp - ur + y_g(r^2 + p^2) - z_g(qr - \dot{p}) - x_g(qp + \dot{r}) - C_2 v/m \\ \dot{w} = Z/m + uq - vp + z_g(p^2 + q^2) - x_g(rp - \dot{q}) - y_g(rp + \dot{p}) - C_3 w/m \\ \dot{p} = \frac{1}{I_x} \{ K - (I_z - I_y)qr - m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)] - C_4 p \} \\ \dot{q} = \frac{1}{I_y} \{ M - (I_x - I_z)rp - m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] - C_5 q \} \\ \dot{r} = \frac{1}{I_z} \{ N - (I_y - I_x)pq - m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] - C_6 r \} \end{cases} \quad (4)$$

其中, (X, Y, Z, K, M, N) 表示船体坐标系中的力和力矩的三个分量。 I_x, I_y, I_z 是主转动惯量。 $I_{xcg}, I_{ycg}, I_{zcg}$ 是绕重心的主转动惯量分量。将加速度沿时间积分可以得到在船体坐标系中的速度, 然后由转换矩阵可得大地坐标系中的速度, 将该速度沿时间积分可知道船体的运动位移。

3 模型与网格

本文计算对象为模型尺度下的某型海洋巡逻船, 其主尺度及其他参数如表 1 所示。三维模型如图 1 所示。

网格的划分采用 OpenFOAM 自带的网格生成工具 SnappyMeshHex。利用船体的对称性, 可以认为流场也是关于 X-Z 平面对称的, 因此可以使用半船体进行计算, 最终的计算域为一半的流场可, 获得较高的计算效率。计算域的坐标范围分别是 $-1.0L_{pp} < x < 3.0L_{pp}$, $0 < y < 1.0L_{pp}$, $-1.0L_{pp} < z < 1.0L_{pp}$ 。其中 L_{pp} 为垂线间长。为了更精确地捕捉自由面和尾流场的流场信息和兴波情况, 提高计算精度, 在

相应的区域分别进行了网格加密。网格划分如图 2 所示，可以看到船首和船尾附近的加密情况。

表 1 巡逻船船型参数

主尺度	符号	实船	船模
缩尺比	λ	30.27	1
垂线间长	L_{pp} (m)	90.8	3
水线长	L_{wl} (m)	94	3.106
型宽	B (m)	12.2	0.403
吃水	d (m)	3.4	0.112
方型系数	C_b	0.504	0.504
湿表面积	S (m ²)	1119.4	1.222

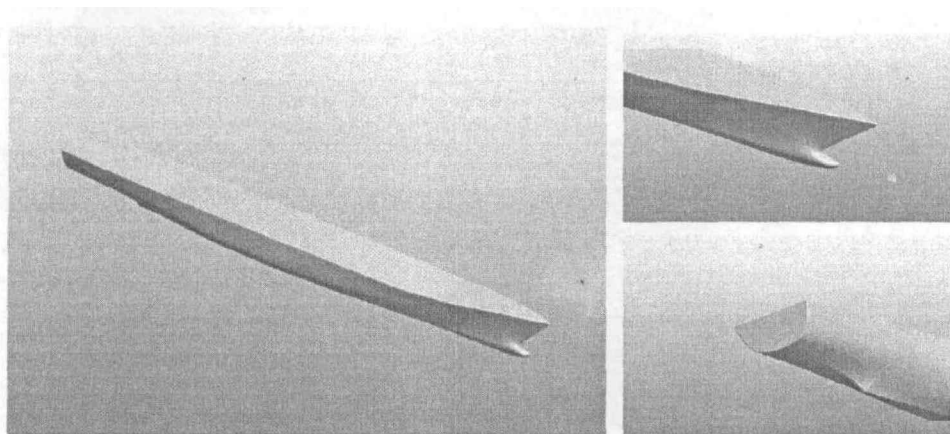


图 1 模型生成

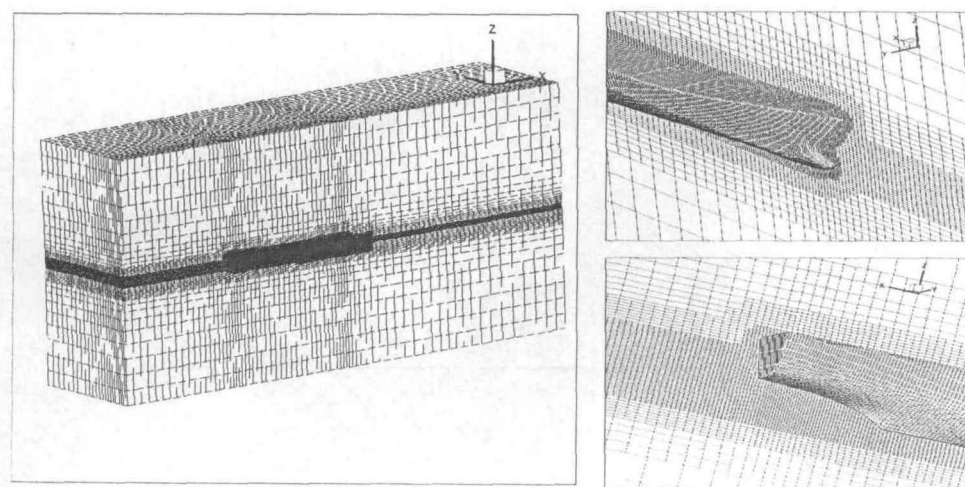


图 2 计算域及网格生成

4 计算工况

本文计算工况如表 2 所示,其中 V 代表模型尺度的航速工况,船体的六个自由度全部保持固定,不考虑船体运动对阻力性能的影响。工况 1 和工况 2 的波浪均为规则余弦波,浪向角为 180° ,即迎浪航行状态。本文考虑的船体运动的两个自由度,分别是纵摇和升沉,其他被固定的自由度的运动对船体阻力性能和耐波性的影响较小。根据实际情况,环境工况设定为 20°C 条件下的水池工况。

表 2 计算工况

工况	$V(\text{m/s})$	Fr	Re	波高 $h(\text{m})$	波长 $L(\text{m})$	ak	自由度	遭遇频率 $T_e(\text{s})$
1	2.057	0.38	5.86×10^6	0.1320	4.5	0.092	pitch, heave	0.9559
2	1.683	0.31	4.79×10^6	0.1652	2.21	0.235	pitch, heave	0.625

5 结果分析

经过一定时间的迭代计算,船体的各自由度运动随时间的变化曲线逐渐达到稳定的周期变化。为了更好地对比各工况下的运动响应,对时间进行了无因次化处理,可以研究完整周期内的运动变化情况。稳定后的纵摇与升沉时历变化曲线如图所示。

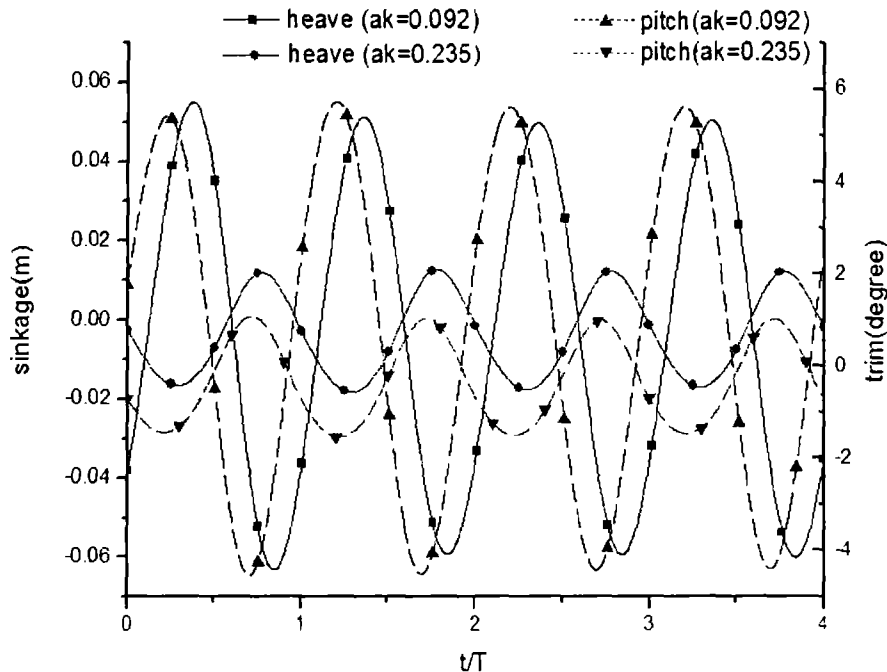


图 3 纵摇和升沉响应时历曲线

从图 3 可以看出,船体纵摇和升沉的运动响应趋于稳定后,保持正弦或余弦的变化规律,这说明其运动响应表现出很强的线性特点。航速越高,其运动响应越剧烈。对于不同波浪海况下,其运动响应的变化规律较为一致。为了定量分析,利用傅里叶级数展开法,得到了不同阶数的运动响应

幅值和相位。如表 3 所示。

表 3 运动响应傅里叶展开

自由度	ak	0阶		1阶		2阶	
		幅值(m)	幅值(m)	相位(deg)	幅值(m)	相位(deg)	
升沉	0.092	-0.0045	0.0550	-126.1	0.0012	22.4	
	0.235	-0.0037	0.0149	73.6	0.0011	163.4	
纵摇	0.092	0.749	5.0478	-71.0	0.1493	49.3	
	0.235	-0.347	1.2567	97.1	0.1038	-167.1	

其中，0 阶幅值表示运动变化的时均值，1 阶响应表示运动的线性程度，2 阶及更高阶响应代表运动的非线性程度。从上表中可以看出，升沉和纵摇的线性特征比较明显。当波陡较高时，船体运动的非线性性所占比例变大，说明非线性运动更加剧烈。

以工况 2 为例，展示船体在一个周期时间内的自由面变化，如图 4 所示。

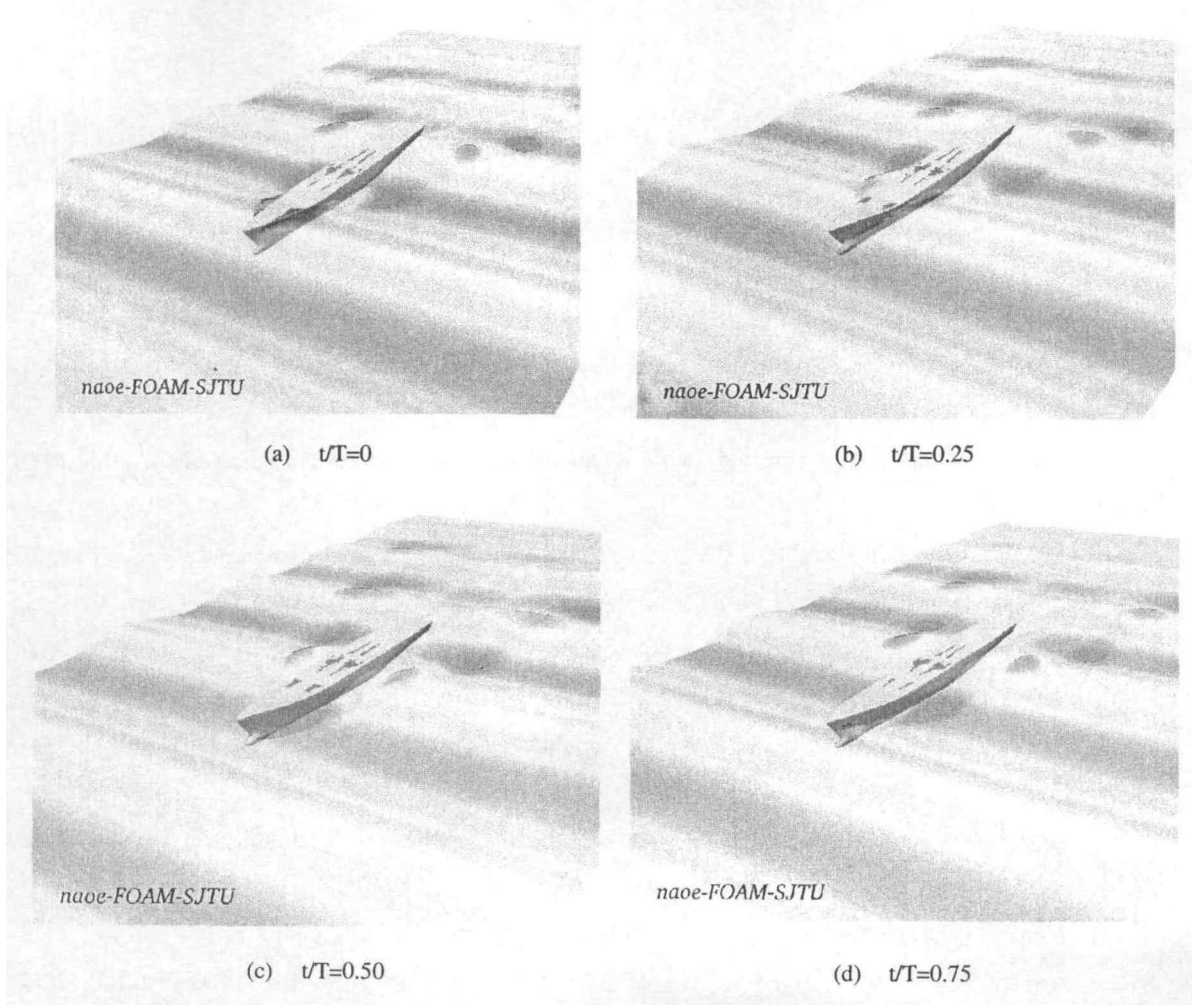


图 4 一个周期内自由面的变化

从图 4 可以看出, 一个周期内典型时刻的自由面兴波流场。从船首位置和吃水的变化可以明显看出剧烈的纵摇和升沉运动。同时可以观察到规则波经过船体与船体周围的兴波相叠加的情况。另外可以发现干舷较低, 各时刻均可观察到甲板上浪现象, 甚至出现球鼻艏露出水面的现象, 可能会造成船首砰击, 不利于该船型的耐波性。使用 naoe-FOAM-SJTU 解器可充分模拟出甲板浪等强非线性现象, 体现了本文求解器的优越性。

6 总结

本文使用基于 OpenFOAM 自主开发的求解器 naoe-FOAM-SJTU, 通过对某型海洋巡逻船在不同规则波作用下的垂荡和纵摇运动响应进行数值模拟计算, 研究了不同航速不同海况条件下该型巡逻船的耐波性。利用求解器 naoe-FOAM-SJTU 中的数值造波模块得到所需的规则波工况, 通过求解六自由度运动方程得到船体的运动响应数据, 并对其进行了傅里叶级数展开, 讨论了非线性因素在不同波浪条件下对船体运动的影响程度。另外, 还展示了船体运动过程中自由液面和兴波波形的变化情况。船体的运动响应规律与实际情况一致, 也由此验证了该求解器在求解非线性问题上的可靠性, 其计算结果可以为相似船型耐波性研究与船型设计提供一定参考。

7 致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目(Grant No. 11072154), 973 项目子课题(Grant. No. 2013CB036103), 海洋工程国家重点实验室自主研究课题基金 (Grant No. GKZD010059)和上海高校特聘教授(东方学者)岗位计划资助(No. 2008007), 在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] Shen Z R, Cao H J, Wan D C. Manual of CFD solver naoe-FOAM-SJTU for ship and ocean engineering flows[M]. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, 2012
- [2] Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method[M]. Prentice Hall, 2007.
- [3] Shen Z R, Jiang L, MIAO S, Wan D C. RANS simulations of benchmark ships based on open source code[C], Proceedings of the Seventh International Workshop on Ship Hydrodynamics (IWSH'2011), Shanghai, China. 2011
- [4] Ye H X, Shen Z R, Wan D C. Numerical prediction of added resistance and vertical ship motions in regular head waves[J]. Journal of Marine Science and Application, 2012, 11(4): 410-416.
- [5] Menter, F.R., Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994. 32(8): p. 1598-1605.
- [6] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of computational physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [7] 查晶晶, 万德成. 用OpenFOAM实现数值水池造波和消波[J]. 海洋工程, 2011, 29(3): 1-12.
- [8] 沈志荣, 叶海轩, 万德成. 船舶在迎浪中运动响应和波浪增阻的RANS数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2012, 27(6): 621-633
- [9] Shen Z, Wan D C. RANS Computations of Added Resistance and Motions of Ship in Head Waves[C], Proceedings of 654

the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 17-22, 2012, 1096-1103

- [10] 叶海轩, 沈志荣, 万德成, 集装箱船在波浪中大幅度运动的计算分析[C], 第十一届全国水动力学学术会议暨第二十四届全国水动力学研讨会并周培源教授诞辰 110 周年纪念大会文集, 2012 年 8 月 25 日-30 日, 无锡, 880-886
- [11] 沈志荣, 叶海轩, 万德成, 船舶粘性兴波与波浪增阻问题的数值模拟[C], 第二届全国船舶与海洋工程 CFD 专题研讨会, 2012 年 9 月 18 日-19 日, 武汉
- [12] Shen Z, Wan D C. Numerical Simulations of Large-Amplitude Motions of KVLCC2 with Tank Liquid Sloshing in Waves[C], Proceedings of 2nd International Conference on Violent Flows, Sept. 25-27, 2012, Ecole Centrale Nantes, Nantes, France, 149-156

Numerical Investigation of Ship Sea-Keeping Performances in Head Regular Waves

ZHA Ruo-si, YE Hai-xuan, WAN De-cheng*

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240)

Abstract

In this paper, the sea-keeping performances of a patrol ship in regular waves are studied by our in-house solver naoe-FOAM-SJTU developed using open source OpenFOAM tool package. Volume of Fluid (VOF) method is used to capture the free interface and Finite Volume Method (FVM) is adopted as the discretization scheme. Different wave conditions are set by the wave generation and damping module in the solver. The motion responses of heave and pitch are simulated. Green water is also found during the ship motion.

Key words: Motion response; viscous flow; seakeeping; naoe-FOAM-SJTU solver