

多海况下 Barge 运动响应的数值模拟

荆芃霖, 何广华, 赵传凯, 谢滨阳

(哈尔滨工业大学(威海)船舶与海洋工程学院, 威海, 264209, Email:ghhc@hitwh.edu.cn)

摘要: 船舶在海上航行时会遭遇各种海况, 其运动响应也各不相同; 准确预报船舶在不同海况下的运动响应十分重要。本文基于 CFD(Computational Fluid Dynamic)方法, 建立了黏性数值波浪水池, 并结合重叠网格技术数值模拟了时域下、在规则波作用下 Barge 的顶浪运动响应, 并对其进行了详细的研究和分析。研究发现: 本文建立的数值波浪水池与能准确预报 Barge 在不同波况下的运动响应, 并分析了波长变化对 Barge 运动响应的影响。

关键词: 重叠网格; Barge; 耐波性; RAO; CFD

1 引言

船舶在海上航行时会遭遇各种复杂的海况, 在强烈海况下时常发生首部砰击等强非线性现象, 在不同海况下准确预报船舶的运动响应有十分重要的意义。近年来, 许多学者通过不同的方法对船舶运动响应的预报进行了研究。Chen 等^[1-2]基于 HOBEM (High Order Boundary Element Method)求解了有航速船舶在波浪中的运动问题。何广华等^[3]基于 CIP(Constrained Interpolation Profile)方法建立了波浪中船舶强非线性响应分析模型, 在研究水花飞溅、甲板上浪、底部砰击等问题时也能得到良好的效果。自编程方法虽然可以根据不同问题自主建立数值模型, 但是周期长、难度大; OpenFOAM 作为开源软件, 在自定义数值模型方面也有一定的优势^[4-5]; Seo 等^[4]分析了船舶在规则波中的运动响应; Cha 等^[5]则使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对船舶在规则波中的强非线性运动进行了计算分析。随着 CFD (Computational Fluid Dynamic) 软件的发展, 更多学者使用 CFD 软件求解船舶运动响应^[6-9]; 刘可等^[6]使用 FLUENT 的 UDF (User Define Function)模块对其进行二次开发, 求解了船舶在不规则波中的顶浪纵向运动; 龚丞等^[7]基于 FLUENT 通过 UDF 二次开发, 求解了局部船首的甲板上浪砰击问题。FLUENT 在求解船舶运动响应问题时虽有较多应用^[6-9], 但都需要通过 UDF 进行二次开发, 且其动网格技术在求解船舶大幅运动时还有其局限性。

基于 STAR-CCM+, 建立了黏流数值波浪水池, 并结合使用重叠网格技术和 DFBI (Dynamic Fluid Body Interaction)技术, 可求解船舶在波浪中的顶浪大幅运动, 并提高了计

算效率。本文的计算结果与 Malenica^[10]的实验结果进行了对比，吻合较好。

2 数值模型

2.1 控制方程

STAR-CCM+使用有限体积法求解 RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) 方程, 将流体域离散化为有限个控制体积, 采用 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)实现压力和速度之间的隐式求解. 积分形式的控制方程如下所示:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S \rho(\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \int_S \rho(\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS = \int_S (\mathbf{T} - p\mathbf{I}) \cdot \mathbf{n} dS + \int_S \rho \mathbf{b} dV \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V dV - \int_S \mathbf{v}_b \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (3)$$

式中, \mathbf{v} 是流体速度矢量; \mathbf{v}_b 表示控制体积表面的速度; \mathbf{n} 是控制体积曲面的单位法向量, 控制体积的面积为 S ; 体积为 V 。流体应力以张量 \mathbf{T} 的形式表示; \mathbf{I} 是单位张量; 物体力的矢量表示为 \mathbf{b} 。

通过 VOF (Volume of Fluid) 方法引入体积分数来计算出多相流中的自由液面位置, 交界面的相分布和位置由下式给出:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V} \quad (4)$$

其中, α_i 为相体积分数, V_i 为网格单元中相 i 的体积, V 为网格单元的体积。

因为所有相的体积分数之和必须为 1, 故有:

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1 \quad (5)$$

其中, N 为总相数。

使用 HRIC (High Resolution Interface Capturing)离散格式来精确捕捉自由液面的流体变化。

2.2 数值水池

使用 STAR-CCM+建立了三维黏流的数值波浪水池, 经过收敛性验证, 入口边界至船首距离 $L_1 = 1.5\lambda$, 尾流区长度 $L_2 = 2\lambda$, 消波区长度 $L_3 = 2\lambda$, 计算域宽度 (一侧) $3L$ 。计算域的入口、出口和顶部分别使用 velocity inlet, outlet pressure 和 velocity inlet 边界, 其他边界条件除对称边界外都设为无滑移边界 (图 1)。速度入口边界通过场函数设定自由液面的位置和一阶波的速度, 压力出口边界给出了出口压力和自由面位置, 出口处的压力被设

定为波浪的静水压力。

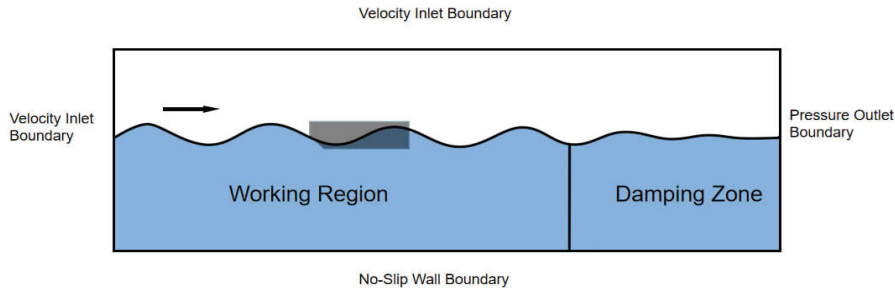


图1 计算域和边界条件

3 结果与讨论

3.1 Barge 模型与网格划分

Malenica 等^[10]为研究 Barge 的水弹性效应,将 Barge 分为 12 个分段,分段间通过刚性或弹性连接,通过实验得到了不同波况下,Barge 上不同监测点处的垂直位移 RAO(Response Amplitude Operator); 本文使用其刚性连接所得的实验结果。实验所用 Barge 见 Malenica 等^[10]和 Barge 的参数(表 1)。

表 1 Barge 的主要参数

船长 L	2.445 m
船宽 B	0.6 m
型深 D	0.25 m
吃水 d	0.12 m

网格划分采用了切割体网格生成器、拉伸体网格生成器和重叠网格等模块的组合,高效地生成了高质量网格。在 Barge 的周围建立网格的核心区域,在该区域中由切割体网格生成器高效且稳定地生成高质量的六面体网格,使用三层的体积控制来加密自由液面的网格来实现波面的精确捕捉,同时能有效防止波面衰减。核心网格区域之外使用渐疏网格。在 Barge 及其周围建立随体运动的重叠网格,由于该重叠网格的整个区域都随 Barge 运动,而背景域网格无需进行变形来捕捉 Barge 运动,所以可以精确预报 Barge 的运动响应并节省计算成本。具体网格尺寸由表 2 给出。

表 2 计算域网格尺寸

自由液面处	每波长划分网格数	60-80
	每波高划分网格数	20-30
Barge 周围	每波长划分网格数	240-320

3.2 与实验对比

模拟了波高 $h = 0.1 \text{ m}$ 时, 船舶在不同波长波浪中的顶浪运动, 结果如图 2 所示, x/L 为监测点距离船首的相对位置, 限于篇幅仅展示船首与船中监测点所得 RAOs。计算结果与 Malenica 等^[10]实验相对比, 各监测点 RAO 大小与变化趋势均吻合较好, 验证了所建立的数值波浪水池在求解船舶顶浪运动时的准确性。

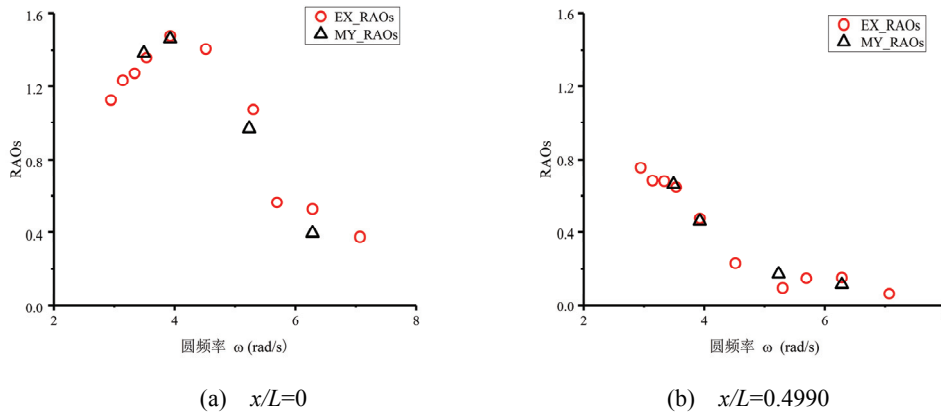


图 2 船首 (左图) 和船中 (右图) 处 RAOs

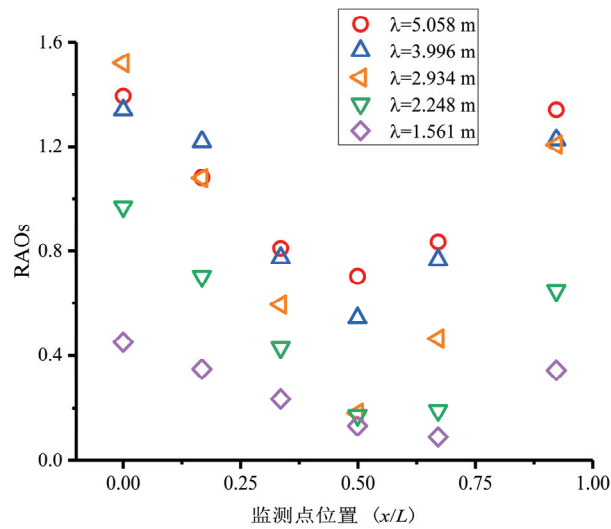


图 3 不同波长下各监测点的 RAOs

3.3 波长对 Barge 运动响应分析

在本小节中,保持波浪的波陡 $h/L=0.445$ 不变,计算了同一 Barge 在不同波长下的运动响应,计算所得 RAOs 如图 3 所示。发现当波长 $\lambda \geq$ 船长 L 时,随着波长的增加 Barge 首尾的 RAOs 十分接近在 1.4 左右;此时越靠近船中,各 case 间 RAOs 相差越大。当波长 $\lambda \leq$ 船长 L 时,反而是越靠近船中各 case 的 RAOs 越接近。

对波面进行分析,发现在大波陡 $h/L=0.445$ 下,所有 case 中,船首都发生入水砰击,伴随入水砰击的发生船首兴起辐射波系。

4 结论

本文建立了分析船舶运动响应的黏流数值模型,模拟了 Barge 在不同海况下的运动响应,并分析了波长对 Barge 运动响应的影响。研究发现:本文建立的三维黏流数值水池能准确预报船舶在波浪中的运动响应;随着波长的增加 Barge 各处的 RAOs 趋于一致;在 $h/L=0.0445$ 时,所有 case 首部均发生入水入水砰击。

致谢

本工作得到了国家自然科学基金资助项目(51579058)的资助,在此表示感谢。

参考文献

- 1 Chen X, Zhu R C, Zhao J, et al. Study on weakly nonlinear motions of ship advancing in waves and influences of steady ship wave[J]. Ocean Engineering, 2018, 150: 243-257
- 2 Chen X, Zhu R C, Zhao J, et al. A 3D multi-domain high order boundary element method to evaluate time domain motions and added resistance of ship in waves[J]. Ocean Engineering, 2018, 159: 112-128
- 3 何广华,陈丽敏,王佳东. 船舶在波浪中运动的强非线性时域模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(4): 142-148
- 4 Seo S, Park S, Koo B Y. Effect of wave periods on added resistance and motions of a ship in head sea simulations[J]. Ocean Engineering, 2017, 137: 309-327
- 5 Cha R, Wan D. Numerical Investigation of Motion Response of Two Model Ships in Regular Waves[J]. Procedia Engineering, 2015, 116(1): 20-31
- 6 刘可,吴明,杨波. 船舶在长峰不规则波中顶浪纵向运动的数值模拟[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(7): 18-24
- 7 龚丞,朱仁传,缪国平,等. 基于 CFD 的高速船甲板上浪载荷的工程计算方法[J]. 船舶力学, 2014, (5): 524-531

- 8 石博文, 刘正江, 吴明. 船模不规则波中顶浪运动数值模拟研究[J]. 船舶力学, 2014, (8): 906-915
- 9 石博文, 刘正江, 杨波. 基于 CFD 方法的船舶骑浪稳性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(7): 1035-1040
- 10 Malenica, S., Moan, B., Remy, F. & Senjanovic, I.. "Hydroelastic reponse of a Barge to impulsive and non-impulsive wave loads". Hydroelasticity in Marine Technology. 2003, pp. 107-115

Numerical simulation of Barge motion response under different wave conditions

JING Peng-lin, HE Guang-hua, ZHAO Chuan-kai, XIE bin-yang

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China. Email: ghhe@hitwh.edu.cn)

Abstract: When a ship sails at sea, it will encounter various sea conditions with different motion responses. It is of great significance for accurately predicting ship motions under different head waves. In this paper, a numerical model of viscous numerical wave tank is established based on CFD (Computational Fluid Dynamic) method. The motion response of Barge, in time domain under the action of regular head wave, is simulated by overset mesh technique, and the results are analyzed and discussed. It is found that the numerical wave tank combined with the overset mesh technique can accurately predict Barge's motion response under different regular head waves, and the influence of the incident wavelength on Barge's motion was analyzed.

Key words: Overset mesh; Barge; Sea keeping; RAO; CFD.