

# 静水中高速艇纵向运动数值模拟

于小平<sup>1,2</sup>, 刘建闽<sup>1,2</sup>, 陈景锋<sup>1,2</sup>

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 为准确估算高速艇在静水中航行的水动力性能, 以某高速艇为研究对象, 基于 CFD (Computational Fluid Dynamics) 技术, 应用切割体网格和重叠网格、两相流、VOF 模型、6-DOF 模型等物理模型和  $k-\varepsilon$  湍流模型, 对静水中高速艇升沉、纵摇耦合运动进行数值模拟, 分析了高速艇阻力随航速变化及运动过程中纵倾角度和重心位置的变化情况, 并将计算结果与船模实验值进行了比较, 以证明高速艇纵向运动水动力性能数值模拟方法的可行性和准确性。

**[关键词]** 高速艇; 重叠网格; 纵向运动; 数值模拟

**[中图分类号]** U 661.3

## Longitudinal Motion Simulation for High-Speed Crafts in Steady Water

YU Xiao-ping<sup>1,2</sup>, LIU Jian-min<sup>1,2</sup>, CHEN Jing-feng<sup>1,2</sup>

(1. Marine Engineering Institute, Jimei University, Fujian Xiamen 361021, China;

2. Fujian province key laboratory of ship and ocean engineering, Fujian Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to evaluate the hydrodynamics of High-Speed Crafts' motion in steady water, the coupling motion of heave and pitch was simulated using CFD technology, in which the trimmed and overset mesh, Two-phase Flow, VOF, 6-DOF and  $k-\varepsilon$  turbulence model were adopted. The variety of high-speed Craft's resistance was analyzed with the changes of the craft's speed, the trimming angles, and the centre of gravity position. The results were compared with the experimental data of a ship model. It proves that the numerical simulation of longitudinal motion hydrodynamic capability of high-speed crafts is feasible and practical.

**Keywords:** high-speed craft; overset mesh; longitudinal motion numerical simulation

## 0 引言

由于高速艇航行过程中运动姿态变化较大, 常规船型的水动力性能预报方法已不再适用, 寻求新方法以准确估算高速艇的水动力性能成为众多学者研究的重点。NACA 在兰利水池的拖曳实验为其研究提供了实验基础<sup>[1]</sup>, 基于实验数据得到一系列经验或半经验公式的计算方法<sup>[2-3]</sup>, 并在高速艇水动力性能预测方面取得显著成果。近年来, 基于 CFD (Computational Fluid Dynamics) 技术的船舶水动力性能成为热点。Yusuke Tahara 等<sup>[4]</sup>应用 RANS 方法进行了 KCS 船拖曳状态和自航状态水动力性能的模拟分析。NI Chong-ben 等<sup>[5]</sup>对自由度开放下高速艇的水动力性能进行研究, 对考虑船舶升沉、纵摇运动的船舶阻力进行了预测分析, 计算结果较为合理地反映了船舶实际的运动情况。董文才

等<sup>[6-7]</sup>对深 V 型滑行艇进行了规则波顶浪纵向运动实验研究,提出了一种可预报滑行艇高速航行时纵向运动的新方法,并通过模型实验验证了该方法的准确性.王硕等<sup>[8]</sup>基于 RANSE VOF 求解器,对滑行艇在静水中的高速直航和在规则波浪中的迎浪运动进行了多自由度数值模拟分析,结果表明,该方法对于模拟滑行艇高速航行下的运动具有可行性<sup>[8]</sup>.

文中应用 CFD 软件 STAR-CCM+,选取某高速艇模型,应用切割体网格和重叠网格对高速艇模型进行数值模拟,并与实验值进行对比.证实了 CFD 方法可以准确高效地为高速艇水动力性能计算提供可靠的参考依据.

## 1 计算模型

以某一高速艇模型为计算模型,高速艇模型如图 1 所示,主要参数为:长  $L$  2.3 m;宽  $B$  0.6 m;深  $H$  0.35 m;排水量  $\Delta$  5.25 t.

计算区域:为利于捕捉高速艇尾部流场情况,船艏向前取 2 倍船长,向后取 10 倍船长,左右舷两侧取 5 倍船长,自由面向上取 2.5 倍船长,向下取 5 倍船长,计算控制域如图 2 所示.



图 1 高速艇模型三视图

Fig.1 Three view drawing of high-speed craft model

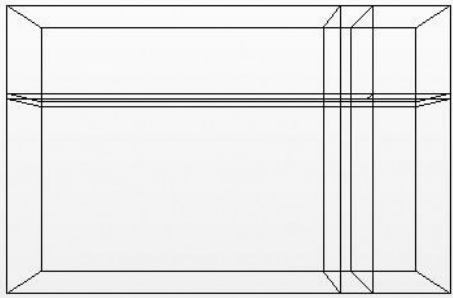


图 2 计算控制域

Fig.2 The control domain for calculation

应用 STAR-CCM+ 软件对高速艇模型进行表面修复及面网格重构,生成三角化良好的高质量面网格,并以面网格为基础应用重叠网格技术生成带有边界层网格的切割体网格.

高速艇模型在静水中航行时纵向运动姿态的捕捉采用重叠网格模型,如图 3 所示.划分计算网格时,创建两个计算域:重叠网格域和背景网格域.重叠网格域包围着高速艇模型,背景网格域涵盖远场流域.两个区域单独进行网格划分,因此会形成一个重叠区域.模拟计算时,随着高速艇的运动,重叠区域将发生相应变化.两种计算域中的网格被分为四种类型,分别是主动网格、被动网格、供体网格和受体网格.其中,受体网格需提供主动网格的网格信息以用于计算,供体网格和受体网格分别处于背景网格域边界与重叠网格域边界,以进行两部分网格间的数值传递.计算网格分布如图 4 所示.

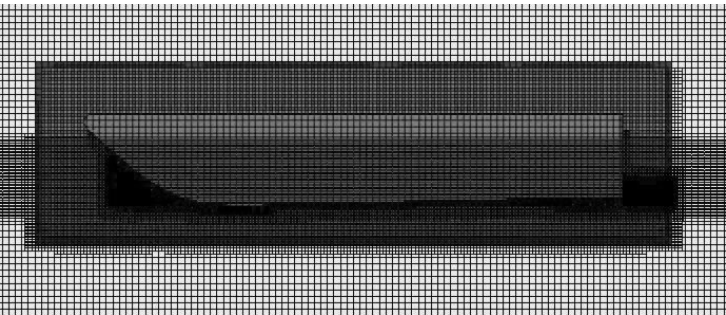


图 3 重叠网格模型

Fig.3 Overset mesh model

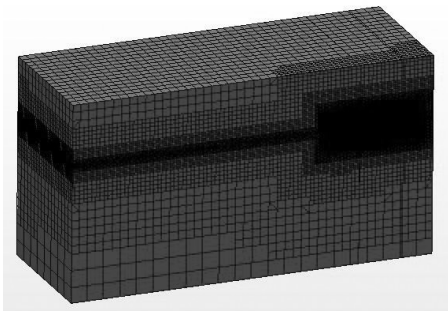


图 4 计算网格

Fig.4 Computational grid

本文选取三个不同弗如德数  $Fr=0.75$ ,  $Fr=0.9$ ,  $Fr=1.05$  下的计算工况, 对高速艇静水航行时纵向运动数值进行模拟, 并将数值模拟值与水池实验值进行比较分析。

2 控制方程及数值模型

对于不可压缩的粘性流动满足连续性方程和 RANS 方程, 其张量形式可表示为:

$$\begin{cases} \partial \rho / \partial t + \partial (\rho u_i) / \partial x_i = 0, \\ \partial (\rho u_i) / \partial t + \partial (\rho u_i u_j) / \partial x_j = - \partial p / \partial x_i + \partial (\mu \partial u_i / \partial x_j - \rho \overline{u'_i u'_j}) / \partial x_j + S_i, (i, j = 1, 2, 3). \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $\mu$  为流体的动力粘性系数;  $p$  为压力时均值;  $u_i$ 、 $u_j$  为速度分量的时均值,  $\overline{u'_i u'_j}$  为脉动速度分量乘积的平均值;  $S_i$  为源项。

文中湍流模型采用改进型 Realizable  $k-\varepsilon$  模型<sup>[9-10]</sup>, 自由液面的捕捉方法采用 VOF 法<sup>[11-12]</sup>, 高速艇航行过程中纵摇和垂荡耦合运动采用 6 自由度 (6-DOF) 模型进行求解<sup>[13]</sup>。

3 计算结果分析

船舶 6 自由度运动中, 纵向运动主要表现为纵摇和垂荡, 故选取纵摇和垂荡两自由度运动为高速艇纵向运动的度量。在数值模拟过程中, 开启纵摇和垂荡两个自由度的求解器。首先, 将高速艇以设计吃水状态置于流场中; 然后, 初始化流场, 保持固定航行姿态一段时间, 等待流场稳定; 最后, 释放艇体。高速艇经过一段时间的纵摇与垂荡耦合运动后趋于稳定, 达到模拟需求的航行状态。

以  $Fr=0.75$  为例, 高速艇阻力 ( $R_t$ ) 的变化曲线如图 5 所示, 纵倾角和重心升沉变化曲线如图 6 所示。

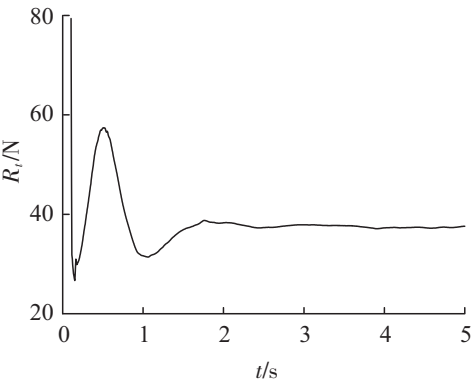


图 5 高速艇阻力变化曲线  
Fig.5 The variation curves of high-speed craft resistance

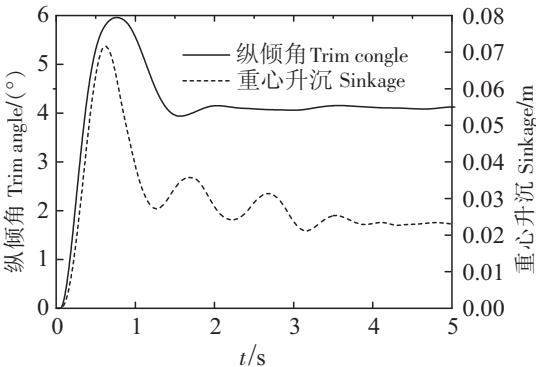


图 6 纵倾角和重心升沉变化曲线  
Fig.6 The variation curves of trimming angle and centre of gravity

由图 5、图 6 可知模拟计算中高速艇结束大幅振荡需要时间为 2 s, 经过初期短时间的振荡调整, 高速艇后续航行状态趋于稳定, 艇体总阻力收敛为 37.5N。航行初始阶段纵倾角变化较大, 在 1s 左右达到最大值 5.9°, 后续航行稳定阶段保持在 4.1°。高速艇航行开始阶段, 船艏冲起波浪使船舶重心升高, 吃水减少, 随着航行继续进行, 高速艇吃水开始增加, 到稳定阶段重心下降至 0.023 m。

不同弗如德数下高速艇阻力、航态计算结果及其与水池实验结果对比如图 7 所示。由图 7 可知, 模拟计算和水池实验的阻力曲线、纵倾角曲线变化趋势基本一致, 且符合随航速增加的变化

规律. 不同弗如德数下, 两者计算值与实验值相差不大, 阻力最大误差约为 3.1%, 纵倾角最大误差约为 4.2%. 由此可见, 应用 STAR-CCM+ 软件模拟计算高速艇纵向运动是可行的.

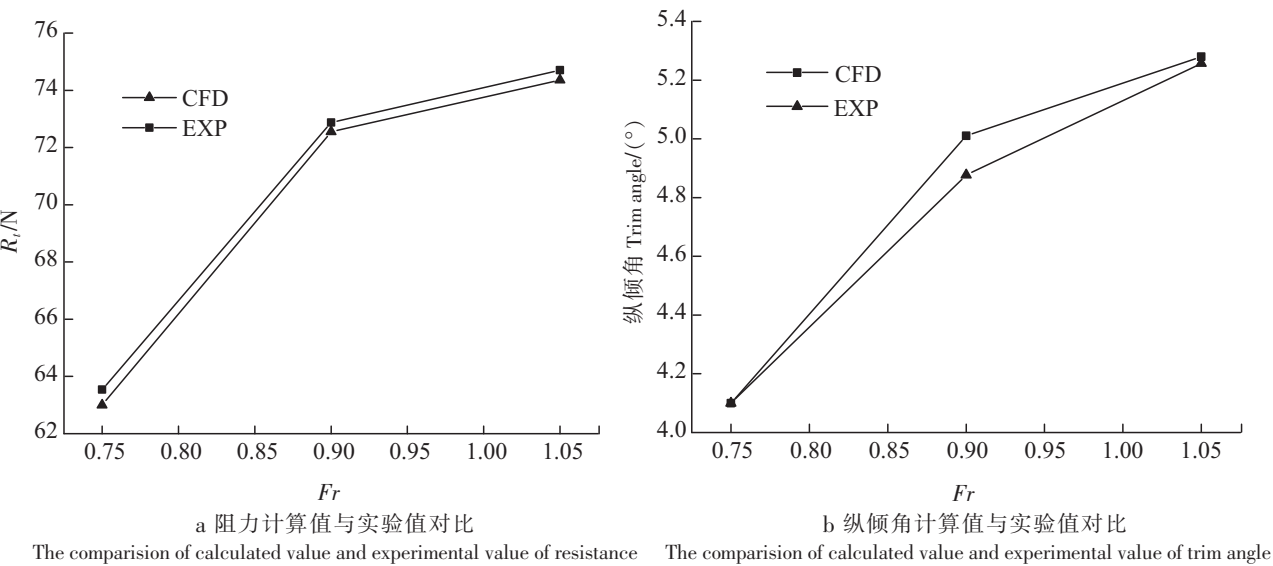


图 7 不同弗如德数下计算值与实验值对比

Fig.7 The comparison of calculated value and experimental data under different Froude numbers

4 高速艇周围流场及航行姿态

应用 STAR-CCM+ 软件对静水中高速艇纵向运动进行模拟计算, 高速艇模型在静水中航行时船行波波高图如图 8 所示. 图 8a、图 8b、图 8c 分别为  $Fr=0.75$ 、 $Fr=0.9$ 、 $Fr=1.05$  工况下, 高速艇经过升沉纵摇耦合运动动态调整后航行姿态与周围流场情况的波高图.

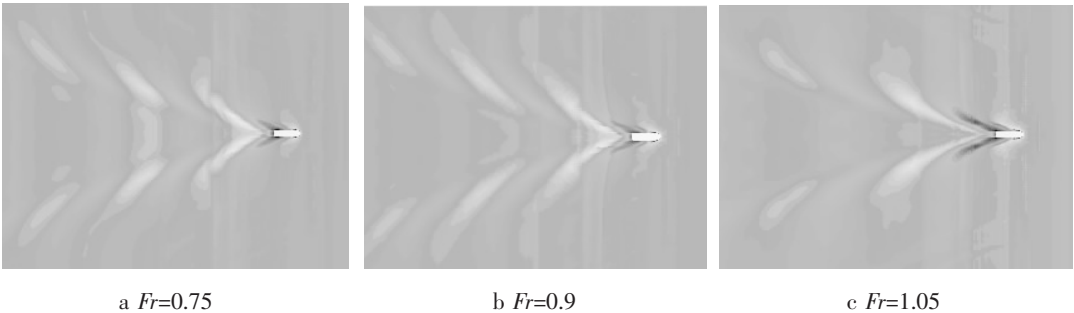


图 8 不同弗如德数下高速艇周围流场分布

Fig.8 The distribution of flow field around High-speed craft under different Froude number

由图 8a 可知,  $Fr=0.75$  时高速艇模型重心下降约为 0.023 m, 艇体艏部向上抬起约  $4.1^\circ$ , 由于航速较低艇体艏部喷溅小, 尾部流场未出现明显的鸡尾流. 由图 8b 可知,  $Fr=0.9$  时艇体艏部向上抬起约  $5.0^\circ$ , 由于航速较高艇体艏部喷溅较为明显, 尾部流场出现较为明显的鸡尾流. 由图 8c 可知,  $Fr=1.05$  时艇体艏部向上抬起约  $5.2^\circ$ , 由于航速高艇体艏部及两侧均出现明显的喷溅, 尾部流场的鸡尾流特征尤为明显.

5 结论

本文基于 CFD 理论, 对高速艇静水中纵向运动进行数值模拟, 通过重叠网格 (overset mesh) 与 6-DOF 模型的结合, 实现了对静水航行中高速艇升沉、纵摇耦合运动的数值预报, 并将模拟计算结

果与水池实验结果进行比较分析,结果表明船体总阻力误差、纵倾角误差均小于5%,对于高速艇数值预报而言,可以满足工程精度要求,证实CFD方法具有可行性.关于船体周围流场情况及航行姿态,高速艇航行姿态在模拟过程中动态调整以达到动态平衡,高速艇速度达到 $Fr = 1.05$ 时航行稳定后纵倾角基本保持在 $5^\circ$ 左右,且获得船体尾部流场较好的鸡尾流现象.可为相关高速艇水动力性能的研究提供参考.

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] CHAMBLISS D B, BODY G M. The planing characteristics of two V-shaped prismatic surfaces having angles of deadrise of 20 and 40. Washington: Langley Aeronautical Laboratory: NACA. 1953: 28-76.
- [2] SAVITSKY D. Hydrodynamic design of planing hulls. Marine Technology, 1964, 1(1): 71-95.
- [3] John M A. Resistance prediction of planing hulls: state of the art. Marine Technology, 1993, 30(4): 296-307.
- [4] YUSUKE TAHARA, ROBERT V. WILSON PABLO M. Carrica Frederick Stern. RANS simulation of a container ship using a single-phase level-set method with overset grids and the prognosis for extension to a self-propulsion simulator. Journal of Marine Science and Technology, 2006, 11(4): 209-228
- [5] NI CHONG-BEN, ZHU REN-CHUAN, MIAO GUO-PING, et al. Hull gesture and resistance prediction of high-speed vessels. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23(2): 234-240. DOI:10.1016/S1001-6058(10)60101-4.
- [6] 董文才, 岳国强. 深V型滑行艇纵向运动试验研究. 船舶工程, 2004, 26(2): 14-16. DOI:10.3969/j.issn.1000-6982.2004.02.005.
- [7] 董文才, 刘志华, 吴晓光, 等. 滑行艇波浪中纵向运动理论预报的新方法. 船舶力学, 2007, 11(1): 55-61. DOI:10.3969/j.issn.10007-7294.2007.01.007.
- [8] 王硕, 苏玉民, 杜欣. 滑行艇静水直航及波浪中运动的数值模拟. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 119-126. DOI:10.3969/j.issn.1000-565X.2013.04.020.
- [9] 王福军. 计算流体力学分析—CFD软件原理与应用. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [10] 张帅帅. 计算流体力学及其应用—CFD软件的原理与应用. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011.
- [11] ZHANG ZHI-RONG, ZHAO FENG. Numerical calculation of viscous free-surface flow about ship hull. Journal of Ship Mechanics, 2002, 6(6): 10-17. DOI:10.3969/j.issn.1007-7294.2002.06.002.
- [12] 刘儒勋. 数值模拟方法和运动边界追踪. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- [13] 赵发明, 高成君, 夏琼. 重叠网格在船舶CFD中的应用研究. 船舶力学, 2011, 15(4): 332-341. DOI:10.3969/j.issn.1007-7294.2011.04.002.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)