

文章编号: 1007-7294(2024)07-1028-12

高航速下带自由面滑行艇粘性流场 数值计算方法研究

向国¹, 欧勇鹏¹, 陈君杰¹, 吴浩²

(1. 海军工程大学 舰船与海洋学院, 武汉 430033; 2. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 武汉 430033)

摘要:针对滑行艇高航速下姿态变化显著、数值计算时艇底易于出现气-水异常现象的问题,基于雷诺平均纳维-斯托克斯(RANS)方法及动网格技术,采用人工干预结合六自由度(6-DOF)运动模型解决自由面与网格的匹配问题,采用高分辨率交界面捕捉技术结合流体体积模型(HRIC-VOF)的方法计算气-液相分布,通过探索HRIC-VOF的角度因子、锐化因子、库朗数上界值、库朗数下界值、时间步长等对艇底气-液相分布及总阻力的影响规律,获得可有效计算高速下滑行艇阻力及自由面兴波的数值计算方法。通过与试验结果进行对比,在模型速度 $V_m=2\sim 13$ m/s($F_v=0.96\sim 5.78$)时的阻力计算误差小于4.5%。

关键词: 高速滑行艇; 粘性CFD; 气-水异常; HRIC-VOF方法

中图分类号: U661.32 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.07.006

Numerical simulation method of viscous flow field of planing craft with free-surface at high speed

XIANG Guo¹, OU Yong-peng¹, CHEN Jun-jie¹, WU Hao²

(1. Department of Naval Architecture, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430033, China)

Abstract: For a high-speed planing craft, remarkable variation of the sailing state may cause abnormal distribution of air-water on the bottom for numerical calculation. In order to match the mesh layout and free-surface, a numerical wave tank based on Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) method was established with dynamic mesh and manual six degrees of freedom (6-DOF) motion model. The high-resolution interface capturing with volume-of-fluid model (HRIC-VOF) scheme was applied to calculate the bottom's water-air distribution on the ship model. The influences of angle factor, sharpening factor, Courant number's upper bound, Courant number's lower bound and time step on the calculation results of water-air distribution and total resistance were explored. The comparison of calculation and experimental results indicates that the current method is feasible for high-speed crafts' resistance forecast and for capture of free-surface. The relative error is less than 4.5% for ship model's velocity at 2-13 m/s when $F_v=0.96\sim 5.78$.

Key words: high-speed craft; viscous CFD; air-water abnormal distribution; HRIC-VOF method

收稿日期: 2024-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52101368);内河航运技术湖北省重点实验室基金项目(NHHY2020005);航空科学基金项目(20152316004)

作者简介: 向国(1990-),男,博士研究生;

欧勇鹏(1982-),男,讲师,通讯作者, E-mail: oubad@163.com。

0 引 言

深V型高速滑行艇因其具有良好的快速性及耐波性,在军事、民用领域均具有广阔的应用市场,其水动力性能成为研究的热点。相对于排水型船舶,高速滑行艇在滑行状态下以水动升力为主,并伴随有显著的纵倾、升沉、喷溅及兴波,具有很强的非线性特征。因而,采用排水船舶的水动力计算方法所得结果误差较大,无法满足高速艇的航行性能分析及预报需求。

随着粘性CFD越来越广泛地应用于船舶水动力的计算,部分学者开展了基于雷诺平均纳维-斯托克斯(RANS)方法的高速艇水动力性能预报研究。Lotfi^[1]、曹洪建^[2]、刘维华^[3]、王硕^[4]、郭军^[5]和赵核毓^[6]等人分别利用CFX、Fluent或Star-CCM+软件开展了滑行艇或滑行块的航行阻力计算,所得结果的离散性较大,最大偏差甚至超过10%。Brizolara^[7]、Forest^[8]、易文彬^[9]等人在计算滑行艇静水阻力的过程中发现,高速滑行状态下艇底易于出现异常的气-水分布现象,从而导致计算误差达到10%左右。但上述文献并未给出消除气-水异常现象的方法,未能实现对滑行艇高航速下($F_v=4.0\sim 6.0$)阻力的精确预报。

为此,本文综合考虑滑行姿态的复杂性以及气-液两相流的强非线性,采用人工干预与六自由度(6-DOF)运动模型相结合的方法,保证采用整体动网格时自由面网格与静水面的正交性;同时根据高分辨率交界面捕捉技术结合流体体积模型(HRIC-VOF)的特性,系列探索角度因子、锐化因子、库朗数限界值、时间步长等对艇底气-液相分布的影响,获得可有效避免气-水异常分布现象的设置原则及参数组合,可为滑行艇在高航速下的阻力预报及粘性兴波流场分析提供支撑。

1 数值计算模型

1.1 计算对象

计算对象为一条棱柱型深V滑行艇模型,表1为该模型的主尺度参数,图1给出了模型的三维效果图。表1中, Δ 为排水量, L_{oa} 为艇体总长, L_p 为折角线长, B_{px} 为折角线最大宽度, β_m 为中部艇底斜升角, β_T 为尾部艇底斜升角。静止状态下,船模的初始纵倾角为 1.184° ,重心位于艇体舭后 $-6\%L_p$ 。

表1 模型的主尺度参数

Tab.1 Main particulars for ship model

艇型参数	符号	数值	单位	艇型参数	符号	数值	单位
排水量	Δ	85.0	kg	折角线最大宽度	B_{px}	0.54	m
总长	L_{oa}	2.895	m	中部艇底斜升角	β_m	21.9	°
折角线长	L_p	2.69	m	尾部艇底斜升角	β_T	4.83	°

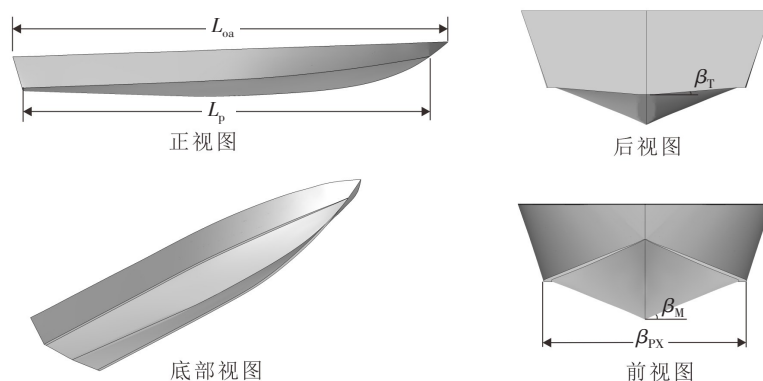


图1 计算滑行艇船模的三维图

Fig.1 3-D ship model for calculation

1.2 两相流模型

气-液两相流采用VOF模型,其控制方程如式(1)~(6)所示^[10]。质量守恒方程为

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \vec{u}_q \cdot \nabla \alpha_q + \nabla \cdot (\vec{u}_c \alpha_q (1 - \alpha_q)) = 0 \tag{1}$$

动量方程为

$$\frac{\partial (\rho_q \alpha_q \vec{u}_q)}{\partial t} + (\rho_q \alpha_q \vec{u}_q \cdot \nabla) \vec{u}_q = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot (\mu_q \alpha_q \nabla \vec{u}_q) + \rho_q \alpha_q \vec{g} + \vec{F}_{D,q} + \vec{F}_{s,q} \tag{2}$$

式中, ρ_q 、 α_q 和 \vec{u}_q 分别表示第 q 相的密度、体积分数和速度; \vec{g} 为重力加速度, 取值为 9.81 m/s^2 ; $\vec{F}_{D,q}$ 和 $\vec{F}_{s,q}$ 分别为相间曳力与表面张力, 本文不考虑这两项的影响; \vec{u}_c 称为界面压缩速度, 表达式为 $\vec{u}_c = C_\alpha |\vec{u}| (\nabla \alpha / |\nabla \alpha|)$, 其中 $|\vec{u}|$ 为流动速度, C_α 为锐化因子, 用于增强界面的锐度, 通过提高界面处相对密度或其他相变量的梯度, 来使界面更加清晰, 取值范围为 $0 \sim 1$ 。

界面追踪采用高分辨率 HRIC 格式, 该格式的基础是 NVD 方法 (Normalized Variable Diagram), 原理如图 2 所示。图中 α_D 、 α_A 、 α_f 分别表示施主单元、受主单元和迎风单元的体积分数, α_f 表示控制体边界的体积分数, 其计算表达式为: $\alpha_f = (1 - \tilde{\beta}_f) \alpha_D + \tilde{\beta}_f \alpha_A$, 式中 $\tilde{\beta}_f = (\tilde{\alpha}_f - \tilde{\alpha}_D) / (1 - \tilde{\alpha}_D)$, $\tilde{\alpha}_f = (\alpha_f - \alpha_U) / (\alpha_A - \alpha_U)$, $\tilde{\alpha}_D = (\alpha_D - \alpha_U) / (\alpha_A - \alpha_U)$ 。

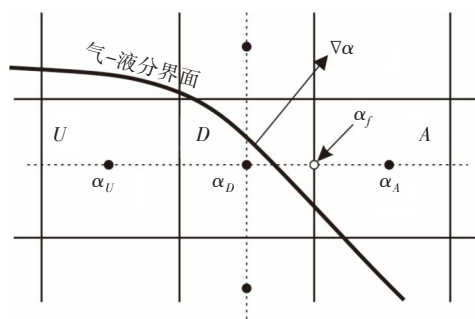


图2 NVD方法原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of NVD method

HRIC 格式考虑了界面与网格夹角、当地库朗数等因素的影响, 各相体积分数的具体求解方法^[11-12]如下:

(1) 采用 NVD 方法计算归一化体积分数 $\tilde{\alpha}_f$ 。

$$\tilde{\alpha}_f = \begin{cases} \tilde{\alpha}_D & \tilde{\alpha}_D < 0, \tilde{\alpha}_D \geq 1 \\ 2\tilde{\alpha}_D & 0 \leq \tilde{\alpha}_D < 0.5 \\ 1 & 0.5 \leq \tilde{\alpha}_D < 1 \end{cases} \tag{3}$$

(2) 考虑角度 θ_f 的影响, 通过权重因子 γ_f 对界面伪变形进行修正。

$$\tilde{\alpha}_f^* = \gamma_f \tilde{\alpha}_f + \tilde{\alpha}_D (1 - \gamma_f) \tag{4}$$

其中, θ_f 定义为施主单元 D 指向受主单元 A 的单元向量 d 与界面法向 n 之间的夹角 (如图 3 所示), $\gamma_f = (\cos \theta)^{C_\theta}$, C_θ 称为角度因子 (angle factor), 主要用来描述界面法线方向相对于网格的角度, 以减少数值耗散并提高界面的捕捉精度, 取值范围为 $0 \sim 1$ 。

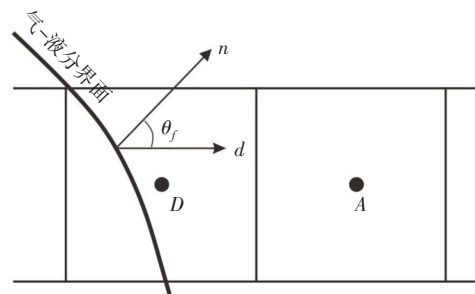


图3 角度 θ_f 的定义

Fig.3 Definition of angle θ_f

(3) 考虑当地库朗数的影响:

$$\tilde{\alpha}_f^{**} = \begin{cases} \tilde{\alpha}_f^* & \tilde{\alpha}_D < 0, \tilde{\alpha}_D > 1, C_f < C_{UL} \\ \tilde{\alpha}_D & 0 < \tilde{\alpha}_D < 0.5, C_f > C_{UU} \\ \tilde{\alpha}_D + (\tilde{\alpha}_f^* - \tilde{\alpha}_D) \frac{C_{UU} - C_f}{C_{UU} - C_{UL}}, & C_{UL} \leq C_f \leq C_{UU} \end{cases} \tag{5}$$

式中, C_{UL} 为库朗数下界值, C_{UU} 为库朗数上界值, C_f 为当地库朗数。

当地库朗数的定义:

$$C_f = \frac{V \cdot \vec{n}_s}{\Delta x} \delta t \tag{6}$$

式中, V 为来流速度, \vec{n}_s 为网格单元面的法向, δt 为时间步长, Δx 为沿流动方向的网格尺寸。可知, 当地库朗数与时间步长成成正比、与网格尺度成反比。

1.3 湍流模型

湍流模型采用在船舶水动力计算中被广泛应用和验证的 Realizable $k-\varepsilon$ 模型^[13-14], 该模型的数学表达式如下。

湍动能方程(k 方程)的表达式为

$$\frac{\partial k}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon - Y_M \tag{7}$$

耗散率方程(ε 方程)的表达式为

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \tag{8}$$

式中, ρ 为流体密度; u_i 为速度分量; μ_t 为湍流粘性系数, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$; G_k 为湍动能生成项, $G_k = \mu_t S^2$; S 是湍流剪切应变率, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$; Y_M 为质量扩散项, $Y_M = 2\rho \varepsilon M_t^2$, $M_t = \sqrt{k/a^2}$; $C_1 = \max [0.43, \eta / (\eta + 5)]$, $\eta = Sk/\varepsilon$ 。

在壁面附近采用两层模型(two-layer model), 其中单方程模型为切向力驱动的 Wolfstein 模型, 尺度函数和湍流粘度系数函数的表达式分别为

$$l_\varepsilon = c_l y [1 - \exp(-\frac{Re_y}{A_\varepsilon})] \tag{9}$$

$$\frac{\mu_t}{\mu} = Re_y C_\mu^{1/4} \kappa [1 - \exp(-\frac{Re_y}{A_\mu})] \tag{10}$$

式中, 雷诺数 $Re_y = \rho \sqrt{k} y / \mu$ (y 为与壁面的距离), 当 $Re_y < Re^*$ (临界值, 本文 $Re^* = 200$) 时采用单方程模型, $Re_y > Re^*$ 时采用 Realizable $k-\varepsilon$ 两方程模型; $A_\varepsilon = 2c_1$, $c_1 = \kappa C_\mu^{-3/4}$, $C_\mu = 0.09$, $\kappa = 0.42$, $A_\mu = 70$ 。

1.4 网格布局与边界条件

由于艇体在静水中航行时的流动关于中纵剖面对称, 因此仅对流场一半进行网格离散。计算域及其网格划分、边界条件设置如图4所示。流域呈长方体, 总长为 $5.2 L_{oa}$, 总宽为 $2 L_{oa}$, 总高为 $2.5 L$, 上表面距离艇体甲板为 $1.0 L_{oa}$, 设置为速度入口; 下表面距离艇底部为 $1.3 L_{oa}$, 设置为速度入口; 流域侧面距离艇体舷侧为 $1.8 L_{oa}$, 与中纵剖面一同均设置为对称面; 入口位于艇体首部前方 $1.5 L_{oa}$ 处, 设置为速度入口, 沿水线面将入口分为上下两部分, 上部分为空气入口, 下部分为水入口, 通过场函数进行赋值; 出口距离艇尾为 $3.0 L_{oa}$, 设置为压力出口。

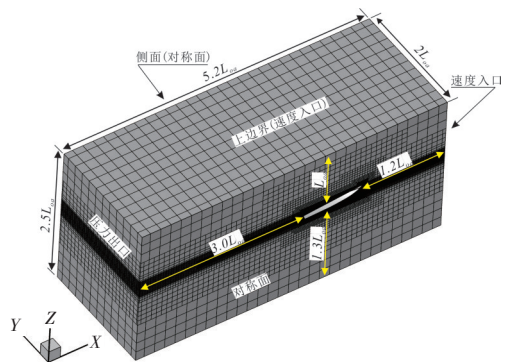


图4 流域网格及边界条件

Fig.4 Calculation region and boundary condition

图4还给出了网格在流域上的整体布局情况。从图中可以看出, 本文采用切割型网格, 在艇体周围及自由面附近均进行了网格加密, 以静水面为中心, 分别沿 Z 轴正方向和负方向进行加密。

艇体表面上的网格布局情况如图5(a)所示, 其中, 对水线以下的艇体表面进行了网格加密。同时, 为了能较为准确地获得航行过程中的首部喷溅, 对喷溅流动的可能区域也进行了网格加密, 其中, 艇体中后部的网格尺寸为 4 mm , 在艇首喷溅区的网格尺寸为 3 mm 。为提高艇体表面摩擦力及压力的计算精度, 在艇底表面上设置边界层网格, 其总厚度为 5 mm , 设置5层网格, 沿法向的增长率为 1.25 , 如图5(b)所示。对自由液面附近的网格进行了加密, 加密区的总厚度为 0.2 m 。垂直自由液面方向的网格尺度为 4 mm ; 沿流动方向的网格尺寸变化, 在艇首前方为 3 cm , 向来流方向逐渐增大。整个计算域的网格总数为 120 万。数值计算采用二阶迎风格式, 文中未特别说明的时间步长均取为 0.001 s 。

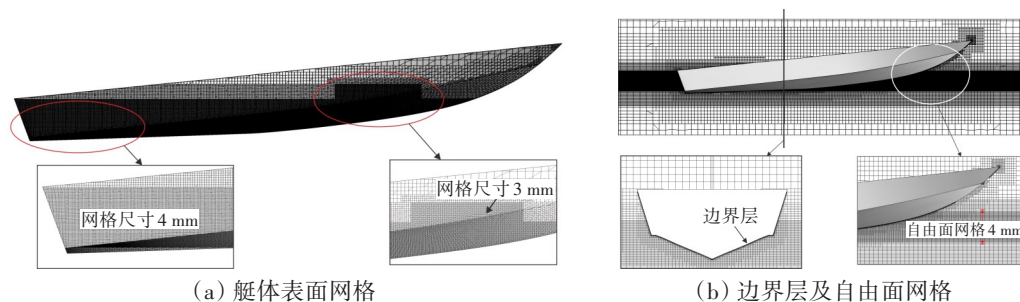


图5 艇体表面及附近的网格划分

Fig.5 Meshes of calculation region

2 人工干预结合6-DOF方法

由于滑行艇在高速航行状态下会发生显著的纵倾与升沉,采用区域整体移动的动网格方法容易导致自由液面网格在入口处发生大幅度位移,从而使得网格加密区与自由面位置不匹配,如图6所示。为解决这一问题,可将自由面网格的加密区增大,也可采用重叠网格技术^[5,10],但这两种方法要么使得网格数量大幅增加,要么增加了额外的“挖洞”过程,均使得计算效率降低。

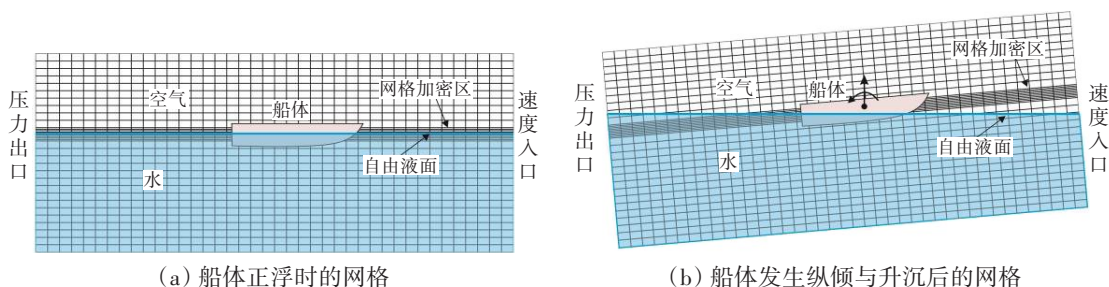


图6 整体移动网格技术导致的加密区偏移现象

Fig.6 Migration of fine mesh region with integral mesh technology

本文采用人工干预结合6-DOF的方法,通过1~2次的人工干预,在流域构建及网格划分时先估取艇体的航行姿态,再应用6-DOF模型进行艇体姿态计算,这样确保了艇体的稳定姿态与初始姿态之间不至于产生过大的偏移,可实现在采用不大的自由面网格加密区情况下也可与自由面的位置相匹配。具体过程如下:

- (1) 确定需要计算的模型速度,并从小到大排列 $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$;
- (2) 采用查洁法(或 Savitsky 方法)等半理论、半经验公式估算对应 V_1 的航行姿态(升沉、纵倾);
- (3) 以估算值作为初始姿态,将艇体几何进行移位与旋转,并构建流域,进行网格划分和边界条件、流动参数等的设置;
- (4) 应用6-DOF运动模型(此处仅释放升沉和纵倾两个自由度的运动)、动网格技术及VOF方法开展粘性CFD数值计算;
- (5) 根据计算结果判断自由液面是否偏移出网格加密区,如果没有偏离,则完成计算;如果发现两者发生了偏离,则以此时计算得到的新的艇体姿态作为输入重复步骤(3)、(4),直至完成该航速的计算;
- (6) 以计算得到的 V_1 速度下的艇体姿态作为下一个速度 V_2 的初始姿态,重新构建流域和网格,并重复步骤(3)~(5),完成 V_2 的计算;
- (7) 以此类推,直至完成速度 V_n 的计算。

本文数值计算全部在 Star-CCM+ 软件平台上实现,艇体的 6-DOF 运动则借助上述软件的 DFBI 方法完成。在计算过程中发现,采用上一个速度的姿态作为下一个速度的初始姿态进行计算,一般无需进行第二次人工调整即可获得良好的计算结果。图 7 给出了人工干预结合 6-DOF 方法计算所得的纵倾角与试验结果的对比。可见,当模型速度 $V_m=2\sim 13\text{ m/s}$ ($F_v=0.96\sim 5.78$) 时,纵倾角的计算值与试验结果的最大偏差小于 0.25° (在曲线峰值处),说明采用该方法计算航行姿态是可行的,且具备较好的精度。

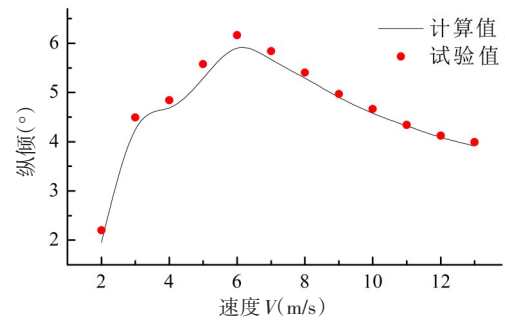


图7 模型航行姿态与试验结果的对比

Fig.7 Comparison of calculation and experiment results of ship model's pitching angles

3 艇底表面气-水异常分布

图 8 给出了计算过程中在艇底表面上的气-液相分布情况。从图中可以看出:当模型速度 $V_m=4\text{ m/s}$ 时,艇底出现少量的气-水混合现象;当模型速度增大为 $V_m=6\text{ m/s}$ 时,艇底出现大范围的气-水混合,液相在艇体表面上的体积分数为 $0.2\sim 0.8$,这是数值扩散导致的气-水分布异常现象,与船模试验的实际情况不符,使得计算所得阻力值与试验值偏差较大(如图 9 所示)。该现象与文献[7]~[9]给出的情况类似,但是上述文献并未给出解决该问题的方法。

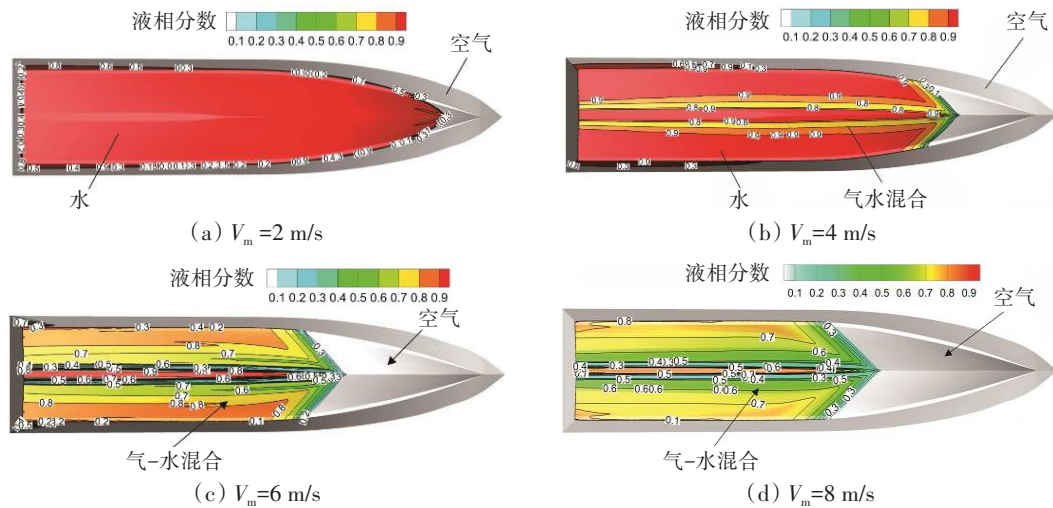


图8 艇底表面上的气-水异常分布

Fig.8 Calculated water-air distribution on model's bottom

根据式(3)~(5)可知:采用 HRIC-VOF 模型时,影响流场气-液相分布的主要参数有角度因子、锐化因子、库朗数的上界值与库朗数的下界值。下面将探讨这些参数对艇底表面气-液相分布的影响,以解决艇底的气-水异常现象。

4 HRIC-VOF 模型参数的影响研究

根据 HRIC-VOF 模型的参数以及特性,分别讨论角度因子、锐化因子、库朗数限界值等参数对艇底气-液相分布的影响。

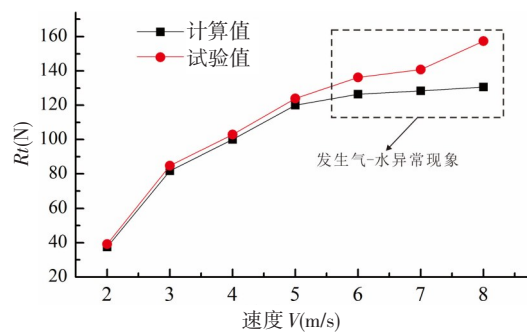


图9 阻力随航速的变化

Fig.9 Variation of resistance with ship speed

4.1 角度因子的影响

图10给出了角度因子对艇底气-液相分布的影响。此时模型速度为 $V_m=8\text{ m/s}$, 库朗数的限界值为 $C_{UL}=0.5$ 、 $C_{UU}=1$, 锐化因子为0, 计算时间步长为0.001 s, 艇体姿态采用人工干预结合6-DOF的方法。

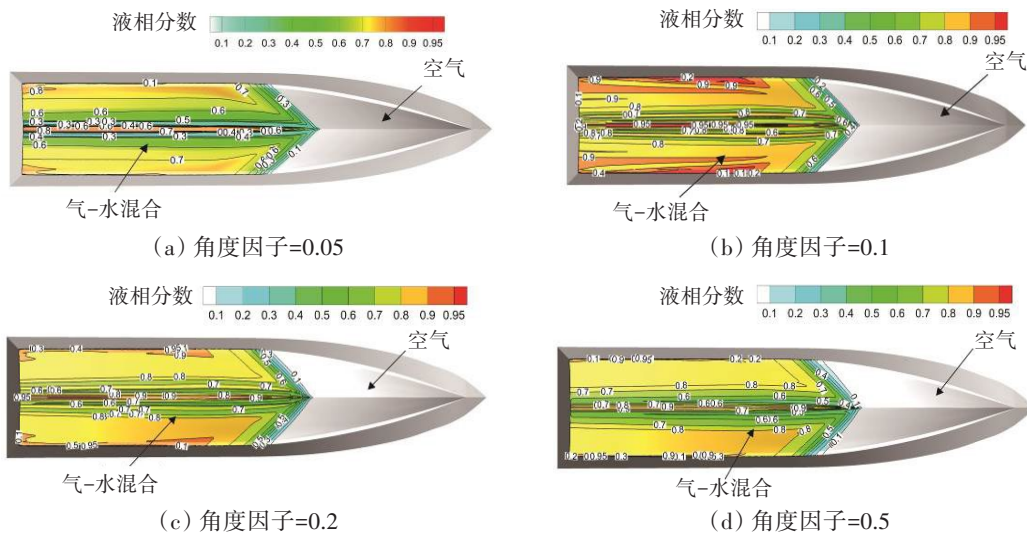


图10 角度因子对艇底表面气-液相分布的影响

Fig.10 Influence of the angle factor on model bottom's water-air distribution

从图10可以看出,随着角度因子的增加,艇底表面上的气-水异常现象先略有减小,然后逐渐增大。表2给出了艇体总阻力随角度因子的变化,该航速下模型总阻力的试验值为157.45 N。从表2可以看出,角度因子的改变对阻力计算结果有所影响,但对计算精度的改善不大。

表2 速度 $V_m=8\text{ m/s}$ 时角度因子对总阻力的影响

Tab.2 Influence of the angle factor on ship's total resistance at $V_m=8\text{ m/s}$

角度因子	0.05	0.1	0.2	0.5
总阻力 R/N	130.50	143.10	141.50	138.38
与试验的偏差	-17.12%	-9.12%	-10.13%	-12.11%

4.2 锐化因子的影响

图11给出了锐化因子(sharpening factor)对艇底气-液相分布的影响,此时模型速度为 $V_m=8\text{ m/s}$,

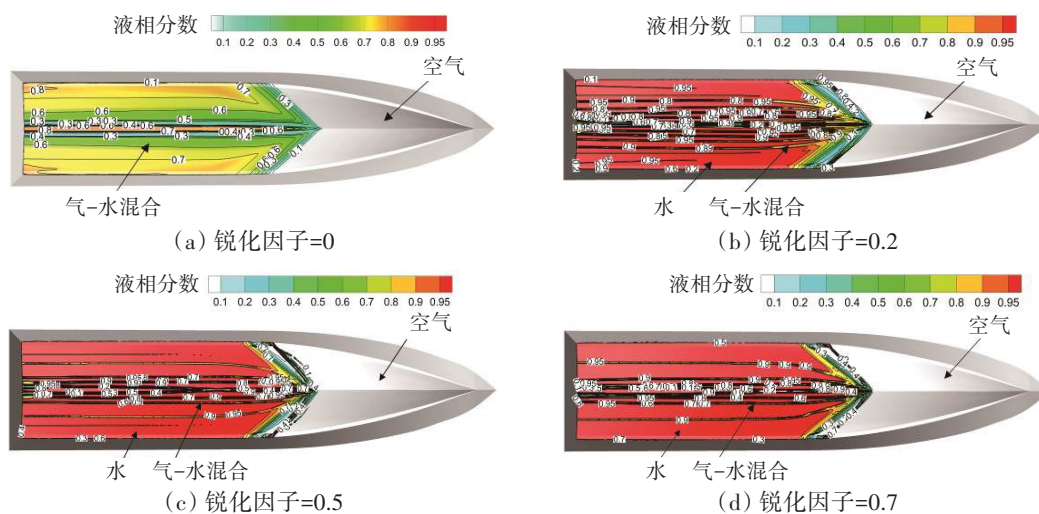


图11 锐化因子对艇底表面气-液相分布的影响

Fig.11 Influence of the sharpening factor on model bottom's water-air distribution

库朗数的限界值为 $C_{UL}=0.5$ 、 $C_{UU}=1$ ，角度因子取为 0.05，计算时间步长取 0.001 s。

从图 11 可以看出，锐化因子增加，可较大幅度降低艇底表面上的气-水异常现象，但未能消除；当锐化因子大于 0.2 时，继续增加锐化因子对艇底气-水异常现象的改善不大。

表 3 给出了艇体总阻力随锐化因子的变化。可以看出，随着锐化因子增加，艇体总阻力计算偏差降低；当锐化因子大于 0.2 时，阻力计算偏差可减小至 6% 左右。

表 3 锐化因子对总阻力的影响

Tab.3 Influence of the sharpening factor on ship's total resistance

锐化因子	0	0.2	0.5	0.7
总阻力 R_t/N	130.50	146.98	147.88	148.37
与试验的偏差	-17.12%	-6.65%	-6.08%	-5.77%

4.3 库朗数上界值的影响

图 12 给出了模型速度 $V_m=8$ m/s，库朗数上界值 $C_{UU}=1、5、10、15$ 时艇底表面上的气-液相分布情况。此时，库朗数下界值 $C_{UL}=0.5$ ，角度因子为 0.05，锐化因子为 0，时间步长为 0.001 s。从图 12 可以看出，随着库朗数上界值的增加，艇体表面上气-液相分布有所变化，气-水混合的异常现象减弱。当库朗数上界值 $C_{UU}=10$ 时，艇底表面上的气-水混合异常现象大幅度减少。当 $C_{UU}=15$ 时，艇底的气-水异常现象消失。

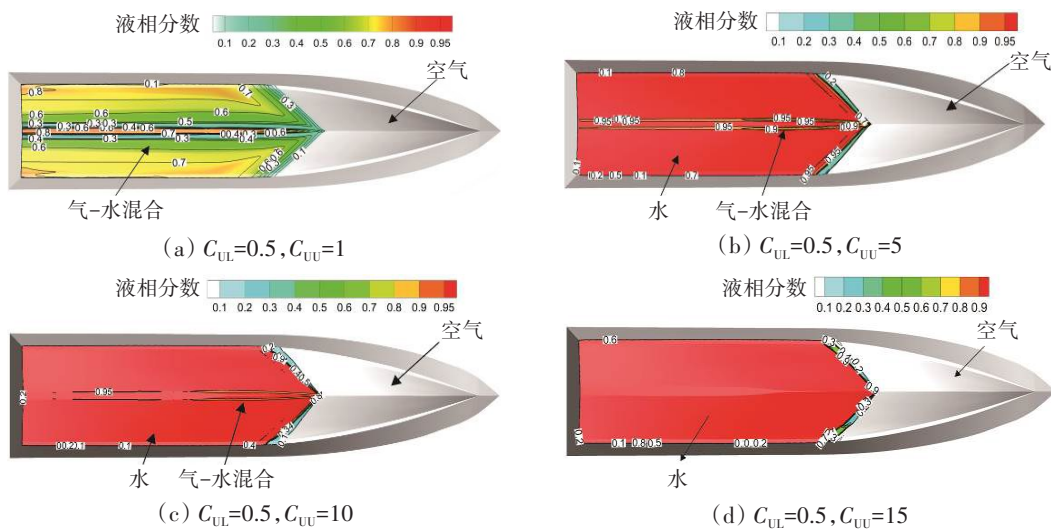


图 12 库朗数上界值对艇底气-液相分布的影响

Fig.12 Influence of C_{UU} on model bottom's water-air distribution

表 4 给出了库朗数上界值对阻力计算结果的影响，此时模型速度为 8.0 m/s，试验测试该航速下的总阻力为 157.45 N。从表 4 可以看出，随着 C_{UU} 的增加，计算所得总阻力与试验值的偏差从 17.12% 降低至 3.39%。当 $C_{UU}=5$ 时，阻力结果偏差仅为 3.59%，这与艇底表面上的气-水异常现象大幅减少密切相关。

表 4 库朗数上界值对阻力计算结果的影响

Tab.4 Influence of the Courant number's upper bound on resistance

库朗数上界 C_{UU}	1	5	10	15
总阻力 R_t/N	130.50	151.80	152.01	152.12
与试验偏差	-17.12%	-3.59%	-3.45%	-3.39%

4.4 库朗数下界值的影响

图 13 给出了模型速度 $V_m=8$ m/s 时，库朗数下界值 ($C_{UL}=0.5、5、10、15$) 对艇底气-液相分布的影响。此时，库朗数上界值与下界值的差值恒为 0.5，角度因子为 0.05，锐化因子为 0，时间步长为 0.001 s。

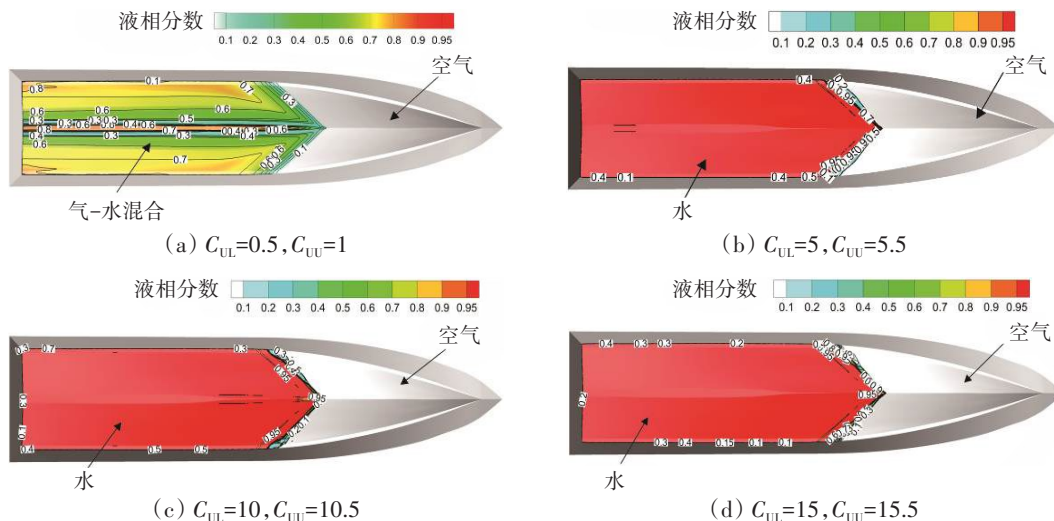


图13 库朗数下界值对艇底表面气-液相分布的影响

Fig.13 Influence of the Courant number's lower bound on model bottom's water-air distribution

从图13可以看出:库朗数下界值增加,艇底表面上的气-水异常现象大幅降低,当下界值为 $C_{UL}=15$ 时,艇底表面上气-水异常现象消失。

表5给出了库朗数下界值变化对总阻力计算结果的影响。从表中可以看出:当库朗数下界值增大为5时,阻力计算结果与试验结果的偏差从17.12%减小至3.63%,精度大幅提高。

表5 库朗数下界值对阻力的影响

Tab.5 Influence of the courant number's lower bound on resistance

库朗数下界 C_{UU}	0.5	5	10	15
总阻力 R_t/N	130.50	151.73	152.17	152.23
与试验的偏差	-17.12%	-3.63%	-3.36%	-3.31%

5 计算方法综合分析

从以上分析可知,HRIC-VOF模型的角度因子、锐化因子、库朗数界限值对艇底表面上气-液相分布均有影响。其中,角度因子对气-水异常现象的影响不大,锐化因子增大可减弱该现象,对气-液相分布影响最大的是库朗数的界限值。

图14给出了模型速度 $V_m=8\text{ m/s}$ 时艇底表面上的当地库朗数云图。从图中可以看出,此时艇底表面上的当地库朗数范围为0.5~3.5。当库朗数下界值或上界值超过3.5(如取值为5)时,结合公式(3)可知,此时主要采用考虑了角度因子和当地库朗数进行修正的方法来计算各相的体积分数,可较好地抑制高航速下出现的艇底气-水异常现象。

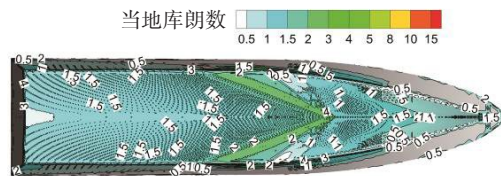
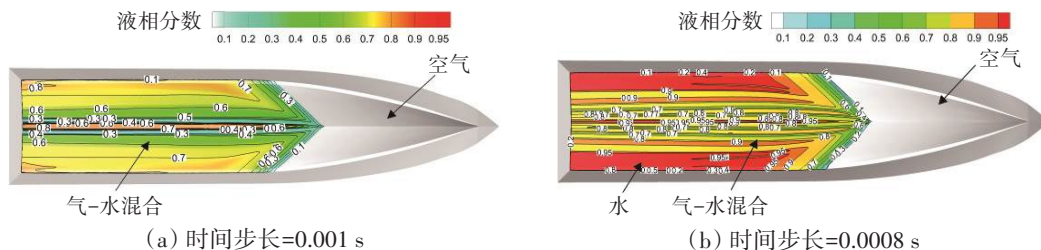


图14 模型速度 $V_m=8\text{ m/s}$ 时艇底表面上的当地库朗数
Fig.14 Local Courant number distributed on the model's bottom at $V_m=8\text{ m/s}$

图15给出了不同时间步长对艇底气-液相分布的影响,此时 $C_{UL}=0.5, C_{UU}=1$ 。表6给出了不同时间



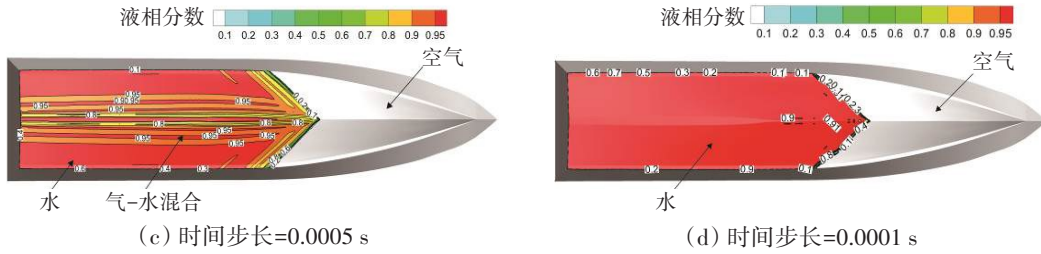


图 15 时间步长对艇底表面上气-液相分布的影响

Fig.15 Influence of the time step on model bottom's water-air distribution

步长下艇底表面上库朗数的平均值。从图 15 和表 6 可以看出,通过减小计算时间步长既可降低当地库朗数的值,使得艇底附近的库朗数小于上界值(如表 6 所示),亦可改善艇底表面上的气-液相分布,从而提高阻力的计算精度。

表 6 时间步长的影响

Tab.6 Influence of the time step on resistance

时间步长/s	艇底库朗数	R_t/N	与试验偏差
1.0×10^{-3}	0.5~3.5	130.50	-17.12%
0.8×10^{-3}	0.4~2.8	145.46	-7.62%
0.5×10^{-3}	0.2~1.7	149.80	-4.86%
0.1×10^{-3}	0.1~0.5	151.64	-3.69%

综上所述:通过适当改变库朗数的限界值,或改变计算时间步长,使艇底表面上的当地库朗数小于库朗数下界值或处于下界值与上界值之间,可降低或避免艇底表面的气-水异常现象。由于高速滑行艇艇底表面上的网格尺度一般较小(3~4 mm),采用减小时间步长的方法容易导致计算时间过长。因此,可采用时间步长为 0.001 s,而适当改变库朗数下界值、上界值的方法来消除气-水异常现象。

图 16 给出了采用该方法计算模型速度为 2~13 m/s 时所得阻力值与试验结果的比较;图 17 为模型速度 $V_m=10$ m/s、12 m/s 时艇底表面上的气-液相分布情况;图 18 为计算所得首部喷溅及自由面兴波与模型试验照片的对比。从图 16~18 可以看出,采用该方法计算所得阻力、艇底气-液相分布及自由面兴波图像与试验结果吻合良好,说明该方法适用于计算滑行艇在高航速下的粘性兴波及航行阻力。

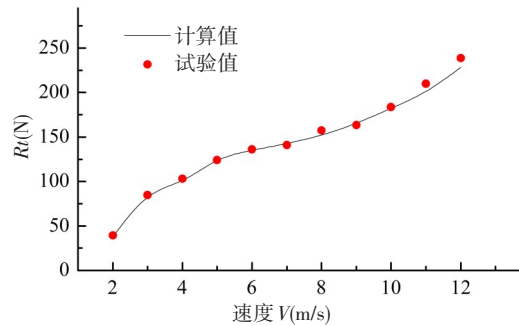


图 16 不同航速下的阻力计算与试验值的对比

Fig.16 Comparison of calculation and experiment results for ship's resistance

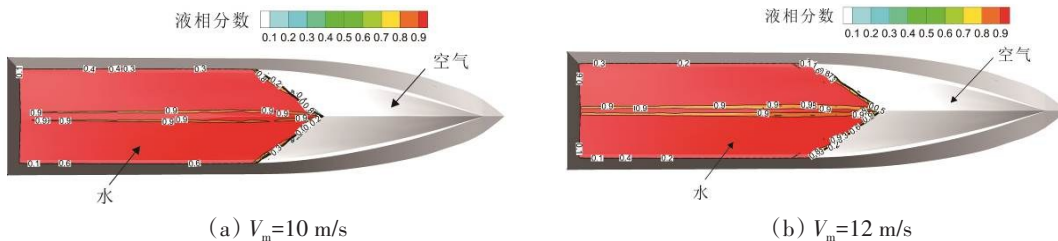


图 17 高航速下艇底表面上的气-液相分布

Fig.17 Air-water distribution on model's bottom under high speed

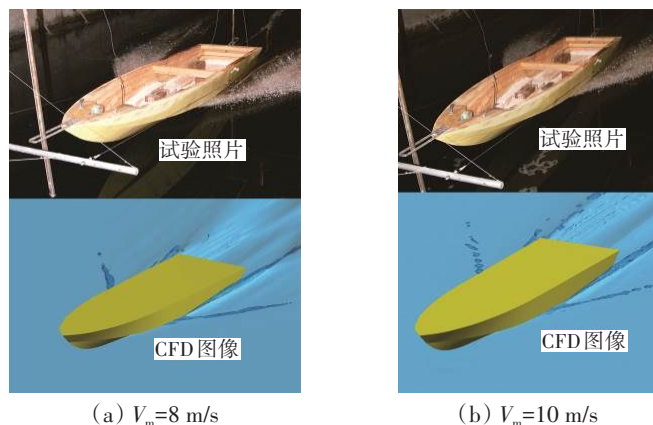


图18 艇体兴波图像与试验照片的对比

Fig.18 Comparison of calculation and experiment images for ship's wave making

6 结 论

本文的主要结论如下:

(1) 采用人工干预结合6-DOF模型计算艇体姿态时,采用以前一个速度的航行姿态作为下一个速度的初始姿态,可提高计算效率,其纵倾角计算偏差小于 0.25° 。

(2) HRIC-VOF模型的角度因子、锐化因子、库朗数上界值、库朗数下界值、时间步长等参数对高航速下滑行艇底部的气-水异常现象均有影响,通过改变上述参数值可减弱或避免气-水异常现象的发生。

(3) 增大角度因子对艇底气-水异常现象的改善不大;增大锐化因子可减弱气-水异常现象,但不能消除;库朗数限界值对气-水异常现象的影响较大,通过增大库朗数上界值或下界值,使得艇体附近的当地库朗数小于库朗数的上界值,可有效减弱甚至避免气-水异常现象的发生。

(4) 通过改变计算时间步长,改变艇体附近的当地库朗数,使其小于库朗数的上界值,同样可大幅减弱气-水异常现象,提高阻力计算精度。

(5) 根据上述原则,本文计算了模型速度 $V_m=2\sim 13\text{ m/s}$ ($F_v=0.96\sim 6.26$)时的阻力,所得结果与试验值的相对偏差小于4.5%,表明采用该方法计算滑行艇在高航速下的阻力时具备较好的精度,可为滑行艇高航速下的静水阻力及艇体姿态的数值预报提供参考。

参 考 文 献:

- [1] Lotfi P, Ashrafizaadeh M, Esfahan R K, Numerical investigation of a stepped planning hull in calm water[J]. Ocean Engineering, 2015, 84: 103-110.
- [2] 曹洪建. 基于FLUENT的滑行艇阻力计算研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
Cao Hongjian. The computation and research on resistance of planning craft based on the software FLUENT[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008. (in Chinese)
- [3] 刘维华. 无人艇稳性及浮态恢复性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
Liu Weihua. Research on the stability and floating attitude recovery of unmanned surface vehicle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. (in Chinese)
- [4] 王 硕, 苏玉民, 庞永杰, 等. 高速滑行艇CFD精度研究[J]. 船舶力学, 2013, 17(10): 1107-1114.
Wang Shuo, Su Yumin, Pang Yongjie, et al. Study on the accuracy in the hydrodynamic prediction of high-speed planning crafts of CFD method[J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(10): 1107-1114. (in Chinese)

- [5] 郭 军, 扈 喆, 陈作钢, 等. 基于 STAR-CCM+的滑艇阻力数值计算[J]. 中国造船, 2022, 63(2): 107-115.
Guo Jun, Hu Zhe, Chen Zuogang, et al. Numerical calculation of resistance performance of planing craft based on software STAR-CCM+[J]. Shipbuilding of China, 2022, 63(2): 107-115. (in Chinese)
- [6] 赵核毓, 陈 曦, 陆 屿, 等. 高速深V滑艇阻力模型试验及数值对比研究[J]. 水动力学研究与进展, 2021, 36(4): 591-598.
Zhao Heyu, Chen Xi, Lu Yu, et al. Experimental and numerical study on resistance of deep-V planing vessels[J]. Chinese Journal of Hydrodynamic, 2021, 36(4): 591-598. (in Chinese)
- [7] Brizolara S, Serra F. Accuracy of CFD codes in the prediction of planing surfaces hydrodynamic characteristics[C]//2nd International Conference on Marine Research and Transportation, Naples, Italy: ICMRT, 2007: 147-158.
- [8] Forest S, Moreau S, Desrochers A. 3D unsteady simulation of a planing hull propelled by a waterjet pump system[C]// FEDSM 2012, Rio Grande, Puerto Rico: FEDSM, 2012: 1-12.
- [9] 易文彬, 王永生, 刘承江, 等. CFD在高速滑艇表面性能预报中的应用[J]. 海军工程大学学报, 2017, 29(3): 59-64.
Yi Wenbin, Wang Yongsheng, Liu Chengjiang, et al. Application of CFD in predicting performance of high-speed planing hulls[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2017, 29(3): 59-64. (in Chinese)
- [10] 欧勇鹏, 周广礼, 吴 浩. 气泡高速艇波浪中阻力及运动性能数值研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(27): 1-9.
Ou Yongpeng, Zhou Guangli, Wu Hao. Numerical investigation of the effects of air cavity on the resistance and longitudinal motion of a high-speed air cavity in regular waves[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(27): 1-9. (in Chinese)
- [11] Shonibare O Y, Wardle K E. Numerical investigation of vertical plunging jet using a hybrid multifluid-VOF multiphase CFD solver[C]//International Journal of Chemical Engineering, 2015.
- [12] Waclawczyk T, Koronowicz T. Comparison of CICSAM and HRIC high-resolution schemes for interface capturing[J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, 46(2): 325-345.
- [13] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new $k-\varepsilon$ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-Model development and validation[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [14] Xu Y, Zhang G Q. Numerical calculation for the flow in the air-thrust bearings[C]//Procedia Engineering, 2011: 922-927.