

基于 RANS 方程的高速滑行艇阻力计算

王慧, 朱仁传, 杨云涛

(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, 高新船舶与深海开发装备协同创新中心,

上海 200240, Email:wanghai1994@sjtu.edu.cn)

摘要: 高速滑行艇处于滑行状态时的阻力性能一直是滑行艇水动力性能研究的重点和难点。考虑滑行艇在滑行时的非线性与黏性影响, 通过求解 RANS 方程, 采用 VOF 方法捕捉自由液面, 重叠网格技术模拟滑行艇的大幅运动, 释放滑行艇升沉与纵倾运动, 结合 SST $k-\omega$ 两方程模型, 对静水航行的高速滑行艇进行数值模拟。模拟结果与实验的升沉与纵倾值吻合较好, 得到滑行艇阻力随航速变化规律。研究表明: 基于黏性流动的 RANS 方法可以模拟复杂艇型的滑行艇静水直航运动, 具有较高的准确性与适用性。

关键词: 高速滑行艇; 阻力计算; 航行姿态; RANS; 重叠网格技术

1 引言

滑行艇可用做巡逻艇、垂钓艇、勤务艇、救护艇、娱乐艇及体育竞技艇^[1]。随着航速的提高, 船舶的航态会因流体动支持力的大小与作用位置不同而发生变化, 因而船舶的吃水、水线长度及纵倾角也都随航速的变化而发生明显改变。当容积佛汝德数 $F_{rV} > 3.0$ 时, 此时航速很高, 船体吃水变化很大, 而且整个船体被托起并在水面上“滑行”, 仅有一小部分船体表面与水接触。滑行艇滑行时, 静浮力很小, 艇体几乎完全由流体动升力来支持。

Savitsky 根据大量实验结果提出了关于计算底部斜升角不变的棱柱形滑行艇水动升力的半理论半经验公式, 即英美等较普遍应用的 Savitsky 法^[2]。Lai 基于涡格法提出三维线性数值模型用于解决滑行艇稳定滑行问题, 其模型计算的结果与 Savitsky 的结果以及实验结果吻合一致^[3]。Zhao 基于势流理论的边界元方法, 将 2.5D (2D+t) 的方法用于分析静水中高航速滑行艇的模拟^[4]。Faltinsen 在《Hydrodynamics of High Speed Marine Vehicles》一书中给出了关于滑行艇水动力相关的详细分析^[1]。随着计算流体力学 (CFD) 不断发展, 基于求解 RANS 方程的 CFD 方法可用于模拟滑行艇的运动。邹劲等利用商业软件 STAR-CCM+ 对三体滑行艇进行了数值模拟, 通过与实验数据的比较, 验证了计算结果的正确性, 同时分析了直截面长度对三体滑行艇的水动力和气动性能的影响^[5]。

由于滑行艇高速航行时的强非线性与黏性影响, 本文通过求解 RANS 方程, 结合 SST k

$k-\omega$ 两方程模型, 对静水航行的常规型滑翔艇进行数值模拟。模拟结果与实验的升沉与纵倾结果吻合较好, 说明 CFD 方法可用于高速滑翔艇阻力与航行姿态的计算, 具有较高的准确性。

2 数值方法

2.1 控制方程

本文采用基于有限体积法的商业软件 STAR-CCM+ 开展滑翔艇的黏性流动模拟。在数值计算中, 对流项使用二阶迎风插值格式, 扩散项的离散采用中心差分格式, 应用 SIMPLE 算法分离式求解; VOF 方法捕捉自由液面, 考虑重力影响, 使用多重网格方法迭代求解离散代数方程组。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \rho f_i \quad (i, j=1,2,3) \quad (2)$$

流体体积输运方程:

$$\frac{\partial a_q}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_i a_q)}{\partial x_i} = 0 \quad (q=1,2; i=1,2,3) \quad (3)$$

式中: \bar{u}_i 为流体为微团在方向上的速度, f_i 为质量力, \bar{p} 为流体压力, 流体密度定义为 $\rho = \sum_{q=1}^2 a_q \rho_q$, 式中的体积分数 a_q 表示单元内第 q 相流体体积占总体积的比例, 并且有 $\sum_{q=1}^2 a_q = 1$, μ 为相体积分数的平均动力黏性系数, 与密度定义的形式一样。

采用湍流模式为 SST $k-\omega$ 两方程模型, 其控制方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mathbf{G}_k - \mathbf{Y}_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \mathbf{G}_\omega - \mathbf{Y}_\omega + S_\omega \end{cases} \quad (i=1,2,3) \quad (4)$$

式中: Γ_k 、 Γ_ω 为湍动能 k 和比耗散率 ω 的有效扩散系数, \mathbf{Y}_k 、 \mathbf{Y}_ω 为 k 和 ω 湍流耗散, \mathbf{G}_k 为平均速度梯度引起 k 的产生项, \mathbf{G}_ω 为 ω 的产生项, S_ω 为交叉扩散项。

2.2 船体运动方程

船舶运动方程可以视为刚体一般运动理论的推广。本文数值模拟了滑翔艇在迎浪航行时的姿态变化与阻力。纵荡运动较小且对其他运动以及阻力几乎没有影响, 此处只考虑垂

荡和纵摇两个自由度，根据质心运动定理和绕质心的动量矩定理，其运动方程为：

$$\begin{cases} m \frac{\partial v_0}{\partial t} = F_3 \\ I \frac{\partial \omega}{\partial t} = M_5 \end{cases} \quad (5)$$

式中： m 为船体的质量， v_0 为船体重心处的垂向速度， F_3 为船体受到的合力的垂向分量， I 为船体绕旋转轴(过重心平行于 y 轴)的转动惯量， ω 为纵摇角速度， M_5 为作用于船体绕旋转轴的合力矩。

2.3 计算域的选取与重叠网格技术

针对计算域的选取，本文所采用的虚拟拖曳水池尺寸分别为艇前 2 倍艇长，艇后 4 倍艇长，侧壁离中剖面 2 倍艇长，顶部和底部离艇体基平面 1.5 倍艇长。由于滑行艇航速较高，兴波和尾流范围大，在虚拟拖曳水池中艇体距离压力出口设置相对较大。

边界条件设置情况为：艇体表面设置为无滑移壁面，艇前方和虚拟拖曳水池上、下方设置为速度入口，流场流出边界设置为压力出口，由于流域只计算一半，侧壁边界与右侧边界设置为对称面。在计算时规定坐标系，艇尾部向前为 X 轴正方向，左舷为 Y 轴正方向，艇底部向上为 Z 轴正方向。

本文采用重叠网格技术，如图 1 所示，计算区域分为背景区域与重叠区域两部分。艇体周围网格尺寸较小，网格按照一定的比率逐渐变大，在边界处网格尺寸较大，自由面附近网格需要加密，捕捉自由液面。

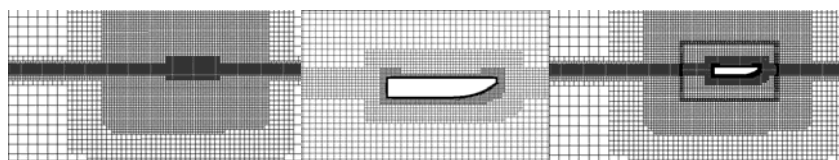


图 1 背景网格（左）、重叠网格（中）与耦合后的网格（右）

3 常规型滑行艇数值模拟与结果分析

选取大阪府立大学 Katayama2000 年开展的滑行艇迎浪运动模型试验进行计算^[6]。滑行艇的主尺度如表 1 所示，滑行艇的横剖面图如图 2 所示。

3.1 网格无关性研究

如表 2 所示，在佛汝德数 Fr 为 4.0 时，选取三种不同尺度的网格进行网格无关性研究分析，可以看出当网格数量在 116 万时计算结果基本收敛，为了缩短计算时间，同时保证计算结果的收敛性，计算网格选取中网格，即第二种网格划分。

表 1 常规型滑行艇的主尺度

参数	单位	数值
艇长	m	0.625
艇宽	m	0.25
型深	m	0.106
吃水	m	0.059
底部斜升角	deg	22
艇重	kg	4.28
KG	m	0.111
LCG	m	0.285

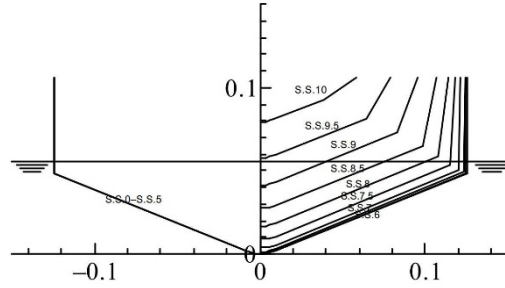


图 2 滑行艇横剖面

表 2 网格无关性研究

网格设置	网格总数	升沉(mm)	纵倾(°)	总阻力(N)
粗网格	590000	46.476	2.646804	14.122422
中网格	1160000	48.283	3.054134	13.51723173
细网格	1500000	48.059	3.061979	13.483304

3.2 数值结果与分析

滑行艇高速滑行时,随着航速的变化,滑行艇的姿态变化较大包括升沉与纵倾的变化。如图 3 所示,给出滑行艇姿态的计算结果与实验结果的比较。可以看出:整个航速范围内,基于 CFD 模拟计算得到的姿态变化与实验值吻合较好;在未滑行阶段 $Fr < 0.8$ 范围内数值模拟结果与实验值有较小的偏差,在滑行以后,两者吻合较好。基于 CFD 的计算结果在整个速度范围内与实验值吻合较好,尤其是升沉变化曲线与实验结果基本一致。

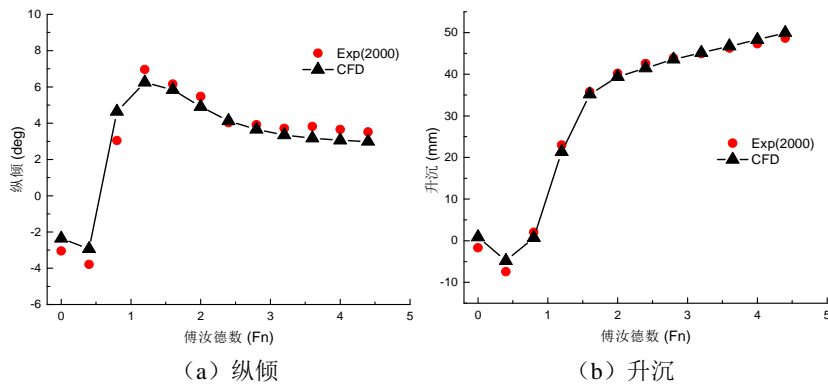


图 3 滑行艇姿态的计算结果与试验结果的比较

如图 4 所示,给出了基于 CFD 方法模拟的滑行艇阻力变化曲线。由于文献[6]中的实验结果未给出阻力结果,这里只给出 CFD 模拟的结果。从图 4 可以看出:滑行艇的摩擦阻力变化曲线跟常规排水型船舶的摩擦阻力变化有所不同,滑行艇的摩擦阻力随着航速的增加

而不断增加，由于航速的增加，喷溅引起的摩擦阻力影响较大；滑行艇的压阻力随着航速的增加，先增加，然后降低，随后趋于稳定，随航速变化较小。

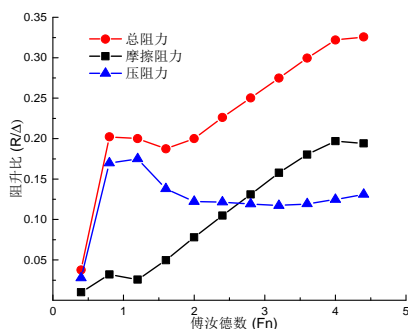


图4 滑行艇阻力变化曲线

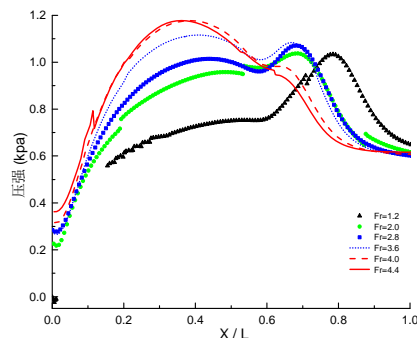


图5 艇底基线位置压力沿船长分布

图5给出艇底基线位置压力沿船长分布，同时图6给出艇底压力分布云图。从图5可以看出：艇底压力的峰值随着航速的增大，逐渐往船后移动。从艇底压力云图可以很清楚地看出压力点的后移。根据滑行艇的纵倾变化，这也说明随着航速的不断增大，纵倾角度先增大，后减小趋于稳定。压力峰值的后移导致纵倾角的减小。

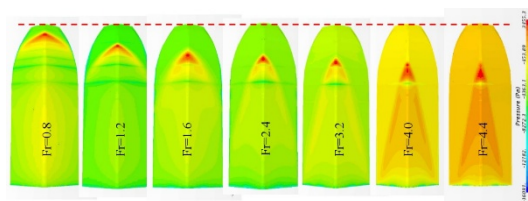


图6 艇底压力分布云图

4 结论

本文通过求解 RANS 方程对滑行艇的阻力与航行姿态进行研究分析。模拟结果与实验结果的比较，进一步验证了 RANS 方法对于滑行艇航行姿态预报的适用性。本文主要结论如下：①采用 RANS 方法对滑行艇的阻力性能进行研究分析，可以计及滑行艇在高速航行时的强非线性的影响，比较准确地预报滑行艇的航行姿态。②通过滑行艇基线的压力分布与艇底的压力分云图分析，在对比纵倾角变化的同时，可以证明纵倾角随着航速的增加，先增加后减小最后趋于稳定。

参考文献

- 1 Faltinsen, O.M.. Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles. Cambridge University Press, New York, 2005.
- 2 Savitsky, D. Hydrodynamic analysis of planing hulls. Mar. Technol. 1964, 1 (1):71-95.

- 3 Lai C, Troesch A W. A VORTEX LATTICE METHOD FOR HIGH - SPEED PLANNING[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1996, 22(6):495-513.
- 4 Zhao, R., Faltinsen, O.M., Haslum, H.A.. A simplified nonlinear analysis of a high-speed planing craft in calm water. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Fast Sea Transportation, Australia, 1997.
- 5 Jiang Y , Sun H , Zou J , et al. Experimental and numerical investigations on hydrodynamic and aerodynamic characteristics of the tunnel of planing trimaran[J]. Applied Ocean Research, 2017, 63:1-10.
- 6 KatayamaT,HinamiT,Ikeda Y. Longitudinal motion of a super high-speed planing craft in regular head wave[C]//4th Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships,Osaka,Japan,2000:214-220.

The resistance calculation of the high-speed planing based on RANS equations

WANG Hui, ZHU Ren-chuan, YANG Yun-tao

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240. Email: wanghui1994@sjtu.edu.cn)

Abstract: The resistance performance is always the key and difficult point in hydrodynamic performance research of high-speed planing. Considering nonlinear and viscous effects of planing, by solving RANS equations, capturing the free surface by VOF method, the overset grid technology to simulate the planing motion, combined with the *SST* $k-\omega$ two equation model, this paper carried out the numerical simulation on the high-speed planing sailing in calm water with two degrees of freedom including sinkage and trim. The simulation results are in good agreement with the experimental results for the sinkage and trim, and the relationships of resistance changing with the speed of the planing and the pressure on the bottom changing with the trim are obtained. The results show that the RANS method based on viscous flow can simulate the motion of the planing with complicate geometry, which is of high accuracy and applicability.

Key words: High-speed planing; Resistance calculation; Navigation attitude; RANS; Overset grid technology.