

基于VOF方法的赛艇艇型优化

宋凯明¹,于健²,丁冬升¹,初少玲³,周玉强⁴

(1. 山东财经大学体育学院, 山东 济南 250014; 2. 山东中医药大学体育学院, 山东 济南 250355;

3. 山东大学体育学院, 山东 济南 250061; 4. 济南大学体育学院, 山东 济南 250022)

摘要:为减小赛艇行驶过程中的阻力、提高运动员的成绩,对赛艇艇型进行优化。采用 RNG $k-\varepsilon$ (renormalization group $k-\varepsilon$) 湍流模型、VOF (volume of fluid) 方法对单人赛艇的周围流场和阻力特性进行了数值计算,获得了赛艇周围的速度分布和压力分布等流场信息,实验结果证实了数值计算的可靠性。利用数值计算对赛艇艇型进行了优化,得到了赛艇阻力与艇型的关系。研究结果对于改善赛艇性能、减小赛艇阻力具有重要的参考价值和指导意义。

关键词:湍流模型;体积函数法;数值计算;赛艇;自由面

中图分类号:G8035 **文献标志码:**A

The optimization of rowing bote type based on VOF method

SONG Kai-ming¹, YU Jian², DING Dong-sheng¹, CHU Shao-ling³, ZHOU Yu-qiang⁴

(1. School of Physical Education, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014, China;

2. School of Physical Education, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, China;

3. School of Physical Education, Shandong University, Jinan 250061, China;

4. School of Physical Education, Jinan University, Jinan 250022, China)

Abstract: The rowing boat type was optimized to reduce the rowing resistance and to help the athletes to earn a good competition outcome. RNG $k-\varepsilon$ turbulent model and VOF method were used to calculate the flow field and the resistance characteristics, and the velocity and pressure distribution around a single rowing boat was obtained. Experimental results showed the reliability of the numerical calculation. The rowing boat type was optimized and the relationship between resistance characteristic and rowing type was obtained. The results could give some instructions to reduce the rowing boat resistance and improve its performance.

Key words: turbulent model; VOF; numerical calculation; rowing; free face

0 引言

赛艇运动作为现代奥运会的一个大项,正逐渐成为人们喜爱的运动。要在比赛中获得好成绩,既需要运动员拥有出色的体能和运动技术,也需要赛艇器材具备优良的水动力性能。近年来,我国赛艇运动进步很快,在国际大赛上取得了很好的成绩,

2008年北京奥运会上我国女子4人双桨运动员取得了金牌,打破了欧美选手对这个项目的垄断。但在赛艇器材的研发与制造上,我国还处在较为落后的状态,在国内外的重要比赛中,中国运动员使用的赛艇是进口赛艇,国产赛艇只用于日常训练。国内的赛艇生产厂家主要以仿制为主,很少对赛艇的阻力性能进行深入研究,导致国产赛艇性能不强。在赛艇的阻力性能研究方面,西方发达国家开展的较

早, Seragg C A 和 Tuck E O 等研究者通过实验和计算相对比的方法分析了赛艇的阻力成分及其大小^[1-2]。在国内, 葛新发、郑伟涛和韩九瑞等学者分析了赛艇、皮划艇的水动力学性能, 采用实验和计算的手段得到了阻力特性^[3-6]。但在优化艇型、减小赛艇阻力方面的研究还较少。

舰船在水上前行时, 水面可视为无壁面约束的自由面, 自由水面的存在导致船体周围的流场与无自由面时有较大区别。在研究舰船阻力时, 自由面的存在会导致兴波阻力, 应该予以考虑。近年来, 船舶 CFD (computational fluid dynamics) 技术发展迅速, 众多的研究者^[6-20]采用湍流模型和 VOF (volume of fluid) 方法相结合的方式对船舶等物体的水动力学特性进行了研究, 研究中采用湍流模型和 VOF 方法计算出了阻力, 得到了自由水面的波形, 获得了较好效果, 表明基于湍流模型和 VOF 方法的数值计算是研究自由面问题的有效方法。但在赛艇领域, 采用 CFD (volume of fluid) 方法研究分析阻力特性、优化艇型的研究较为少见, Coppel A、郑伟涛和高玉玲等研究者采用 CFD 技术研究了赛艇的阻力特性, 计算出了不同速度下的摩擦阻力系数^[21-23]。但研究时只考虑了赛艇水面以下的位置, 只计算了黏性摩擦阻力, 未考虑自由面的影响, 这与赛艇实际行驶情况不完全符合。本研究采用 VOF 方法、结合 RNG $k-\varepsilon$ (renormalization group $k-\varepsilon$) 湍流模型对单人赛艇的绕流流场进行了模拟, 捕捉到了赛艇行驶时的自由面, 得到了包括兴波阻力在内的总阻力特性, 计算中所采用的模型更符合赛艇的实际行驶情况。在此基础上, 采用非均匀有理 B 样条曲线拟合了多个艇型, 对不同艇型的单人赛艇阻力特性进行了研究, 给出了减小阻力的优化方案。研究结果可为赛艇的形状优化提供理论依据。

1 数学模型

1.1 湍流模型

赛艇周围的流场属于湍流流场, 数值求解湍流问题的主要方法是对纳维尔-斯托克斯方程进行雷诺平均, 得到时均值方程组, 然后引入湍流模型处理额外产生的雷诺应力项, 建立一组封闭的方程组, 来求解速度分布、压力分布等流场信息。本研究的湍流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型, RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型是应用重整化群方法导出的一个新型的 $k-\varepsilon$ 紊流模型。与标准 $k-\varepsilon$ 模型相比, 它做了如下改进: 在 ε 方程中增加了一个附加项, 使得在计算速度梯度较大的流

场时精度更高; 考虑了旋转效应, 提高了强旋转流动计算精度; 对近壁面区进行适当处理后可以计算低雷诺数效应。

RNG $k-\varepsilon$ 模型的具体组成是^[24-25]:

连续方程为

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

动量方程为

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}). \quad (2)$$

k 方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ \mu_t \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) &- \rho \varepsilon. \end{aligned} \quad (3)$$

ε 方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ \frac{c_1 \varepsilon}{k} \mu_t \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) &- c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R. \end{aligned} \quad (4)$$

上述各式中, $\bar{\tau}_{ij}$ 为时均黏性应力量; $\bar{u}_i u_j = 2/3 k \delta_{ij} - \nu_t (\partial \bar{u}_i / \partial x_j + \partial \bar{u}_j / \partial x_i)$, \bar{u}_i 为时均化的流体速度, 下标代表不同方向上的速度分量 ($i=1, 2, 3$); \bar{p} 为时均化压力; t 为时间; x_i 表示 3 个坐标 ($i=1, 2, 3$); ρ 为流体密度; k 为紊流脉动动能; ε 为紊流脉动动能的耗散率; μ 为层流运动黏性系数; μ_t 为湍流运动黏性系数, $\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$, c_μ 为经验常数, 数值为 0.09; c_1 和 c_2 也是经验常数, 数值分别为 1.42; 和 1.68; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 方程和 ε 方程中的湍流 Prandtl 数, 数值分别为 1.0 和 1.3; 附加项 R 代表平均应变率对 ε 的影响, 具体表达式为

$$R = 2\nu S_{ij} \frac{\partial \bar{u}'_i \partial \bar{u}'_i}{\partial x_j \partial x_i} = \frac{c_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^3}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^3}{k},$$

式中 $\eta = Sk / \varepsilon$ 是湍流时间尺度与平均流时间尺度之比; $S = \sqrt{2S_{ij} S_{ij}}$, S_{ij} 是应变率张量的范数, $S_{ij} = (\partial \bar{u}_i / \partial x_j + \partial \bar{u}_j / \partial x_i)$; η_0 是 η 在均匀剪切流中的典型值, 为 4.38, $\beta = 0.012$ 。

1.2 自由面处理

采用 VOF 方法捕捉自由面。VOF 模型是一种以计算流体占据网格单元体积份额的途径来捕捉自由液面形状的方法。在 VOF 模型中, 定义函数 α 为某一相流体在网格中占据的体积分, 对于由水和

空气构成的2相流场,函数 α 满足:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_1 \frac{\partial \alpha}{\partial x} + u_2 \frac{\partial \alpha}{\partial y} + u_3 \frac{\partial \alpha}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

式中 u_1 、 u_2 和 u_3 分别为 x 、 y 和 z 方向上的速度分量。

$\alpha = 0$ 表明网格内不包含该相流体; $\alpha = 1$ 表明网格被该相流体充满; $0 < \alpha < 1$ 表明网格内存在自由面。计算中每个网格中都有1个 α 值,求出 α 值后可按照相应方法构造出自由面。

公式(1)~(5)构成1个封闭的方程组,求解得出 u 、 p 和 α 的数值,从而得到速度分布、压力分布等流场信息并构造出自由面,然后根据这些数据求出赛艇的阻力。

2 单人赛艇的数值计算结果

本研究对一艘德国EMPACHER公司的单人赛艇进行了数值计算。通过在山东省水上运动中心对

赛艇实际测量获得了赛艇各个截面的结构数据,然后在三维造型软件中采用NURBS样条曲线拟合出了赛艇的三维模型。计算所用的赛艇为69 kg级的单人赛艇,水线宽为0.27 m,吃水深度取0.077 m。为便于对比,同时计算了考虑自由面和不考虑自由面两种情况。不考虑自由面时,只计算赛艇的水下部位,无法得出自由水面,也无法计算兴波阻力;考虑自由面时,采用基于VOF的两相流模型,模拟自由面。计算区域为长方体,在船头上游方向取1倍船长,船尾下游方向取2倍船长,横向方向取1倍船长,垂直于水面方向上下各取1倍船长。划分网格时采用分块划分,由于赛艇周围结构较复杂,难以采用结构化网格,因此用四面体非结构网格,为提高计算精度,划分时在船身周围对网格加密,远离船身的位置网格稍为稀疏;在考虑自由面的情况下,为减少网格数量在远离赛艇的区域采用较为稀疏的六面体结构网格,计算模型、区域和网格情况如图1所示。

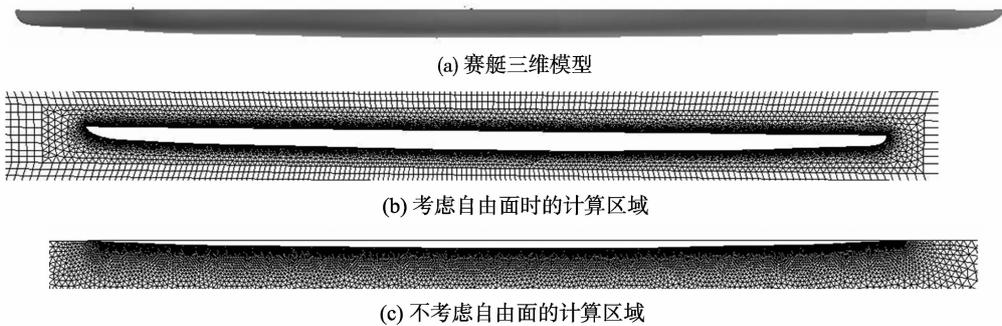


图1 计算模型和网格

Fig. 1 The computational model and mesh

计算时在入口处采用速度入口边界条件,根据赛艇的行驶速度设置好入口速度;出口处由于距离赛艇较远,流动受赛艇的影响很小,采用压力出口边界条件;在赛艇表面采用无滑移边界条件,在对称面上采取对称边界条件。

计算了不同速度下的赛艇阻力,并把计算结果和实验结果进行了对比,结果见表1。表1中的阻

力系数和雷诺数的计算式分别为

$$C = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho u^2 A}, \quad Re = \frac{ul}{\nu}. \quad (6)$$

其中 F 为赛艇受到的阻力, ρ 为水的密度, u 为流速, A 为赛艇与水接触的润湿面积, l 为水线长度, ν 为运动黏性系数。

表1 单人赛艇阻力系数计算结果与实验结果的比较

Table 1 The comparison between calculated drag coefficient and experimental drag coefficient

流速 $u / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	雷诺数 $(Re \times 10^{-7})$	实验结果			计算所得阻力系数 $\times 10^3$	
		摩擦阻力系数 $(C_f \times 10^3)$	兴波阻力系数 $(C_w \times 10^3)$	总阻力系数 $(C_t \times 10^3)$	不考虑自由面 计算结果	考虑自由面 计算结果
4.0	2.797	2.690	0.361	3.051	2.60	2.94
5.0	3.497	2.597	0.430	3.027	2.57	2.92
5.5	3.847	2.560	0.420	2.980	2.49	2.89
6.0	4.196	2.540	0.440	2.980	2.47	2.88

表1中的实验数据取自文献[23],实验在武汉理工大学完成,通过在水池内拖拽赛艇的方法测量

出赛艇以不同速度行驶时的总阻力,兴波阻力用波形分析的方法得到,总阻力与兴波阻力之差即为黏

性阻力。实验使用的赛艇与计算选取的赛艇艇型完全一致,因此可以用实验结果验证计算结果的准确性。在表1中,不考虑自由面时计算的阻力为压差阻力和黏性摩擦阻力之和,根据计算结果可知赛艇前后的压差阻力很小,大约为总阻力的1%~2%,阻力主要是黏性摩擦阻力;考虑自由面时计算出的阻力是兴波阻力、压差阻力和黏性摩擦阻力三者之和。由表1看出,不考虑自由面时计算所得阻力系数与黏性摩擦阻力系数的实验值很接近,考虑自由面的计算结果与总阻力系数的实验值很接近,在实验范围内计算值与实验值的最大误差不超过4%。表1的数据表明数值计算的结果是准确的,能够用来预测赛艇的阻力情况和自由面,表明基于VOF和湍流模型的数值计算是研究赛艇阻力性能的有效工具,可以以此为工具对赛艇艇型进行优化。

3 赛艇艇型的优化研究

赛艇的艇型、结构影响赛艇的行驶阻力,若通过赛艇艇型的优化减小水动力学阻力,有助于运动员在国际大赛中获得好成绩。本研究通过数值计算获得了多种艇型的阻力数据,得到了赛艇艇型和阻力之间关系,为减小赛艇阻力提供了依据。

3.1 赛艇艇型对阻力性能的影响

本研究以德国EMPACHER公司生产的单人赛艇为基础,先保持原赛艇的长、宽、高等基本参数不变,通过改变赛艇的截面形状研究不同艇型对阻力性能的影响。图2给出了部分艇型的最宽位置处的截面示意图,设计艇型时采用NURBS样条绘制横截面曲线,通过改变赛艇截面的型线从而改变赛艇的横截面积。图2(b)为原EMPACHER公司的单人赛艇;图2(a)在原艇型的基础上使赛艇底部较为平坦,即同样的排水量下吃水深度较浅;图2(c)在原艇型的基础上使赛艇底部更为瘦削,即同样排水量下吃水深度较深。图2给出的是中心截面的形状,在赛艇的其他位置随着宽度的减小艇型也随之变化,但在总体上保持着图2所示的规律。数值计算时,保持每种艇型的排水量相同,计算出不同艇型的行驶阻力。共设计了多种横截面不同的艇型,采用赛艇宽度与吃水深度之比 B 来衡量不同的艇型,全部算例中赛艇宽度与吃水深度之比 B 的变化范围是3.53~4.54。

图3分别给出了在与比赛时行驶速度相近情况下赛艇阻力和艇型之间的关系。由图3可看出,当不考虑自由面的影响时,赛艇的黏性摩擦阻力随着

船宽吃水深度比 B 的增大而有所增大。根据第2节的分析,不考虑兴波情况下赛艇阻力主要由黏性摩擦阻力构成,而黏性摩擦阻力与润湿面积成正比。在计算范围内,随着船宽吃水深度比的增大赛艇与水接触的面积逐步增大,反映在黏性摩擦阻力方面就是黏性摩擦阻力随 B 的增加而增大。当 B 从3.53增大到4.54时,赛艇的润湿面积增大了1.72%,黏性摩擦阻力增加了1.86%。

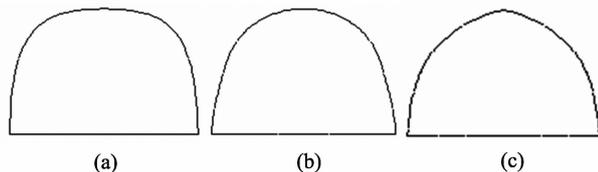


图2 计算采用的艇型(赛艇横截面)
Fig. 2 The rowing type used during calculation process (cross-section of rowing)

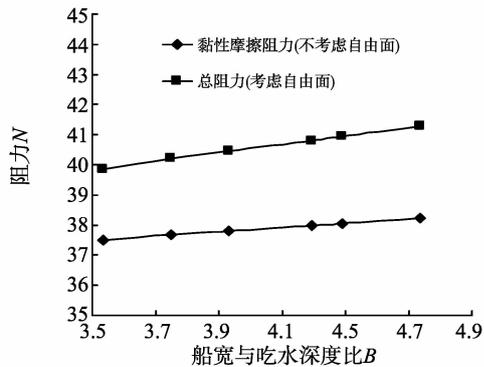


图3 艇型对赛艇阻力的影响
Fig. 3 The effect of rowing type on resistance

图3也给出了考虑自由面时的赛艇总阻力与船宽吃水深度比 B 的关系,与黏性摩擦阻力的变化情况相比,总阻力增加得更多,这表明兴波阻力也随 B 的增加而增大。兴波阻力增大的原因在于随着船型的不断“丰满”,水线宽度增大,兴波更明显,导致了兴波阻力的增加。兴波阻力和黏性摩擦阻力的同时增大使总阻力随 B 的增加而增大。

图4为计算所得的赛艇周围流场的速度矢量图。由图4看出,水流绕流艇身后在尾部又汇合在一起,没有漩涡等耗散能量的现象,表明压差阻力较小。图5为赛艇周围的等压线标量图,可以看出在赛艇表面等压线分布较为稠密,而其他位置等压线较为稀疏,这说明压力下降主要发生在赛艇表面。通过图4和图5可以看出赛艇的阻力特性:阻力主要由黏性摩擦阻力和兴波阻力构成,压差阻力占总阻力的比例很小。图6给出了赛艇的兴波情况,通过对比可以看出,当船宽与吃水深度比 B 增加时,会导致水线宽度增加,兴波更为明显。根据计算结果,随着 B 的增大,船头位置水波的波浪高度增加,兴波阻力也随之增加。

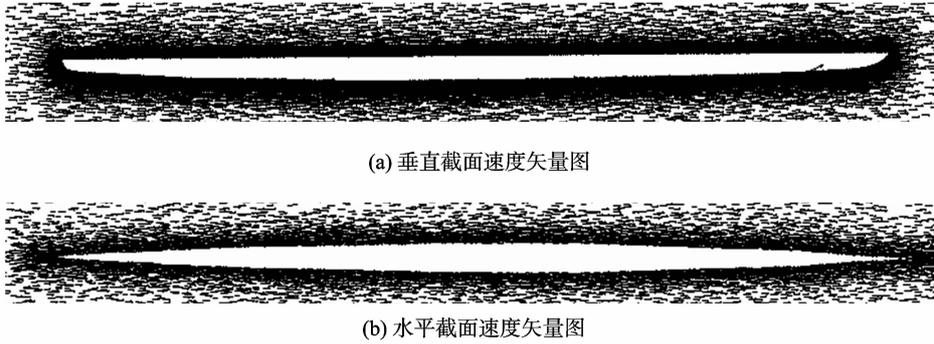


图4 水流绕流赛艇速度矢量图 ($B=4.54$)
 Fig. 4 The velocity vector around rowing ($B=4.54$)



图5 赛艇周围的等压线图 ($B=4.54$)
 Fig. 5 The pressure contour around rowing ($B=4.54$)

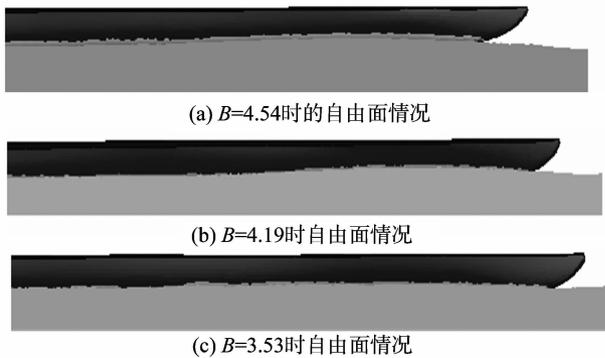


图6 赛艇周围自由面
 Fig. 6 The free face around rowing

3.2 赛艇宽度对阻力性能的影响

在保持原有 EMPACHER 公司单人赛艇艇型不变的基础上更改赛艇的宽度,在排水量不变的情况下计算了宽度对赛艇阻力的影响。图7给出了赛艇宽度对赛艇阻力的影响。由图7可见,与图3相似,随着赛艇宽度的增加,赛艇的水线宽度增大,黏性摩擦阻力和兴波阻力同时增大。计算结果表明,增加船宽不利于赛艇阻力的减小。

3.3 赛艇长度对阻力性能的影响

在赛艇艇型不变的情况下研究了赛艇长度对阻力性能的影响。保持赛艇的排水量不变,当赛艇长度增大时,吃水深度会减小,船宽与吃水深度比 B 增大,反之吃水深度增加, B 减小。采用赛艇长度与吃水深度的比值 L 来衡量长度对阻力性能的影响。图8给出了在艇型不变时赛艇长度对阻力的影响。随着赛艇长度的增加,赛艇的黏性摩擦阻力明显增加,这主要源于润湿面积的增加较明显,当长度吃水比 L 由 101.4 变化到 114.2 时,赛艇的润湿面积从

0.803 m^2 增加到了 0.827 m^2 ,增加明显。润湿面积的增大导致了黏性摩擦阻力的增大。计算结果也表明,当赛艇长度增大时兴波阻力减小,但减小的量小于黏性摩擦阻力增大的量,因此总阻力随赛艇长度的增加而增大。在计算所取的范围内,数值计算结果证实长度增加不利于赛艇的阻力性能。

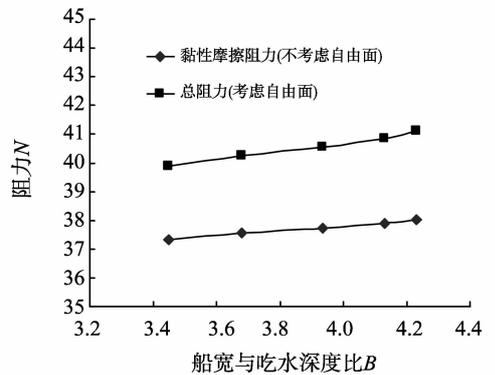


图7 船宽对赛艇阻力的影响
 Fig. 7 The effect of rowing width on resistance

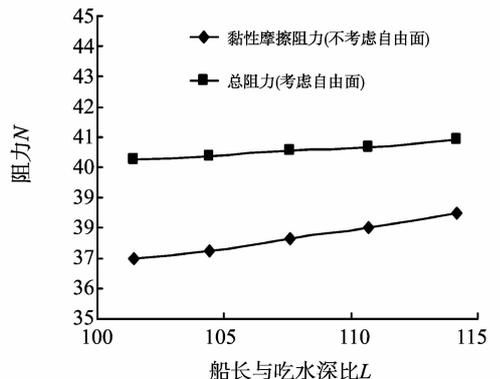


图8 船长对赛艇阻力的影响
 Fig. 8 The effect of rowing length on resistance

4 结论

本研究采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 VOF 方法对单人赛艇的周围流场进行了模拟,得到了黏性摩擦阻力、总阻力等参数,获得了赛艇周围的速度、压力分布和自由面的情况,并通过与实验结果的对比证实了数值计算的有效性。在此基础上,利用数值计算研究了赛艇艇型、宽度和长度对阻力性能的影响,获得了赛艇黏性摩擦阻力和总阻力随艇型变化的具体数据。研究表明,当保持长、宽等尺寸不变而艇型变化时,船宽与吃水深度比 B 从 3.53 增加到 4.54 时,赛艇总阻力增加了 4.4%;当保持原有艇型不变改变长度使长度吃水比 L 由 101.4 变化到 114.2,赛艇总阻力增大了 3.2%;当增大赛艇宽度使 B 从 3.45 增大到 4.23 时,赛艇的总阻力增大了 3.7%。本研究通过数值计算获得了不同艇型、长度和宽度下赛艇阻力的具体数值,对于我国研发赛艇、改善赛艇性能、提高赛艇制造水平具有重要参考和指导意义。

参考文献:

- [1] SERAGG C A, NELSON, BRUCE D. The design of eight-Oared rowing shell[J]. Marine Technology, 1993, 30(2):84-89.
- [2] TUCK E O, LAZANSKAS L. Low drag rowing shells [C]//3rd Conference on Mathematics and Computers in Sport. Queensland Australia; the Bond University Press, 1996:17-34.
- [3] 葛新发, 黄胜初, 郑伟涛. 赛艇动力学及流体动力性能和快速性能研究[J]. 武汉体育学院学报, 2000, 34(6):80-84.
GE Xinfu, HUANG Shengchu, ZHENG Weitao. Research on canoeing dynamics, hydrodynamic performance and mobility[J]. Journal of Wuhan Institute of Physical Education, 2000, 34(6):80-84.
- [4] 郑伟涛, 马勇, 邹早建. 双人赛艇兴波阻力特性分析[J]. 武汉体育学院学报, 2002, 34(6):153-156.
ZHENG Weitao, MAYong, ZOU Zaojian. An analysis of the characteristics of wave-making resistance of double rowing shell[J]. Journal of Wuhan Institute of Physical Education, 2002, 34(6):153-156.
- [5] 韩久瑞, 郑伟涛. 赛艇、皮划艇器材流体动力性能研究[J]. 武汉体育学院学报, 1999(2):91-95.
HAN Jiurui, ZHENG Weitao. The hydrodynamic performance research of equipments of rowing, canoeing and kayak[J]. Journal of Wuhan Institute of Physical Education, 1999(2):91-95.
- [6] 黄德波, 张雨新, 邓锐, 等. 单体与三体高速船舶黏性流场数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(6):683-688.
HUANG Debo, ZHANG Yuxin, DENG Rui, et al. Numerical simulation of viscous flow around high speed mono-hull and trim ran ships[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(6):683-688.
- [7] 何晓晖, 王建平, 程建生, 等. 黏流中舟艇水阻力与自由面流场的数值计算[J]. 舰船科学技术, 2008, 30(5):102-105.
HE Xiaohui, WANG Jianping, CHENG Jiansheng, et al. Numerical calculation of the resistance and flow field about light boat under viscous flows[J]. Ship Science and Technology, 2008, 30(5):102-105.
- [8] 万林, 杨波, 王骁, 等. 舰艇运动自由面的数值模拟[J]. 舰船科学技术, 2008, 30(3):135-138.
WAN Lin, YANG Bo, WANG Xiao, et al. Numerical simulation of the ship with free surface[J]. Ship Science and Technology, 2008, 30(3):135-138.
- [9] 黄少锋, 张志荣, 赵峰, 等. 带自由面肥大船黏性绕流场的数值模拟[J]. 船舶力学, 2008, 12(1):46-53.
HUANG Shaofeng, ZHANG Zhirong, ZHAO Feng, et al. Numerical simulation of viscous flow with free-surface around full ships[J]. Journal of Ship Mechanics, 2008, 12(1):46-53.
- [10] GAO Ni, SUN Shuzheng, ZHAO Xiaodong, et al. Research on calculation methods of hydrodynamic coefficients for sections with complex Shape[J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 16(9):988-955.
- [11] 黄常青, 王学林, 胡于进. 基于 CFD 的起重船水动力系数数值模拟[J]. 中国机械工程, 2011, 22(17):2076-2079.
HUANG Changqing, WANG Xuelin, HU Yujin. Numerical simulation of hydrodynamic coefficients of crane ship based on CFD [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(17):2076-2079.
- [12] 余建伟, 朱仁传, 缪国平, 等. 渔政船的阻力计算与预报研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2011, 26(2):133-139.
YU Jianwei, ZHU Renchuan, MIAO Guoping, et al. Study on resistance prediction of fishery ship[J]. Journal of Hydrodynamics; Ser A, 2011, 26(2):133-139.
- [13] 邓锐, 黄德波, 于雷, 等. 影响双体船阻力计算的流场 CFD 因素探讨[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(2):141-147.
DENG Rui, HUANG Debo, YU Lei, et al. Research on factors of a flow field affecting catamaran resistance calculation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(2):141-147.

- [14] 张盾,侯精明,刘韩生,等. 渥奇面上掺气挑坎位置的试验与数值计算分析[J]. 山东大学学报:工学版, 2008, 38(2):101-105.
ZHANG Dun, HOU Jingming, LIU Hansheng, et al. Experimental and numerical modeling for the location of a bucket aerator on an arch structure [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2008, 32(2):101-105.
- [15] GU Min, WU Chengsheng. CFD Calculation for resistance of a ship moving near the critical speed in shallow water[J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(6):40-47.
- [16] 孙荣,吴晓光,姜治芳,等. 三体船阻力数值计算及方案优选[J]. 中国舰船研究, 2008, 3(5):21-24.
SUN Rong, WU Xiaoguang, JIANG Zhifang, et al. Numerical simulation of viscous flow with free surface around trimarans with different side hull position configurations[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2008, 3(5):21-24.
- [17] QI Peng, HOU Yijun. A VOF based numerical model for breaking waves in surf zone[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2006, 24(1):57-64.
- [18] CARRICA P M, WILSON R V, NOACK R W, et al. Ship motions using single phase level set with dynamic overset grids[J]. Computers & Fluids, 2007, 36(9):1415-1433.
- [19] 张书谊,段文洋. 矩形液舱横荡流体载荷的 Fluent 数值模拟[J]. 中国舰船研究, 2011, 6(5):73-77.
ZHANG Shuyi, DUAN Wenyang. Numerical simulation of sloshing loads on rectangular tank based on Fluent [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2011, 6(5):73-77.
- [20] 陈海阳,李玉星,孙法峰,等. LNG FPSO 液舱内储液晃动特性的数值模拟[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2011, 35(4):134-139.
CHEN Haiyang, LI Yuxing, SUN Fafeng, et al. Numerical simulation of liquid sloshing characteristics in LNG FPSO containers[J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2011, 35(4):134-139.
- [21] COPPEL A, GARDNER T N, CAPLAN N, et al. Simulating the fluid dynamic behavior of blades in competition rowing[J]. Journal of Sports Engineering and Technology, 2010, 224(1):25-35.
- [22] 郑伟涛,马梓清,吴静萍,等. 基于 FLUENT 软件的单人赛艇黏性流数值模拟[J]. 武汉体育学院学报, 2009, 43(3):58-61.
ZHENG Weitao, MA Ziqing, WU Jingping, et al. Numerical simulation of viscous flows around single-person of rowing based on CFD and FLUENT [J]. Journal of Wuhan Institute of Physical Education, 2009, 43(3):58-61.
- [23] 高玉玲. 赛艇黏性流场的数值模拟[D]. 武汉:武汉理工大学, 2007.
GAO Yuling. Numerical simulation of viscous flow field around single-person rowing[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [24] 唐玉峰,田茂诚,冷学礼. 螺旋槽管内流动换热场协同分析[J]. 山东大学学报:工学版, 2011, 41(2):158-162.
TANG Yufeng, TIAN Maocheng, LENG Xueli. Field synergy analyses on inner flow and heat transfer characteristics of spirally corrugated tubes[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2011, 41(2):158-162.
- [25] 崔永章,田茂诚,李广鹏. 内置折边扭带圆管内三维流动与传热数值模拟[J]. 山东大学学报:工学版, 2010, 40(2):143-148.
CUI Yongzhang, TIAN Maocheng, LI Guangpeng. 3D numerical simulation of fluid flow and heat transfer in a circular tube with edge fold twisted tape inserts [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2010, 40(2):143-148.

(编辑:陈斌)