

文章编号:1005-9865(2022)06-0076-07

CFD 数值分析三体船片体位置对阻力及兴波干扰影响

李 响, 刘志强, 万德成

(上海交通大学 船海计算水动力学研究中心(CMHL) 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘 要:三体船的水动力性能是目前水动力学研究的热门。对于中高速三体船来说,其静水阻力的很大一部分由兴波阻力构成,而对于兴波最大的影响因素就是片体位置的布局。以一艘圆艏型三体船为研究对象,运用黏流计算流体力学(CFD)方法模拟分析 4 种不同片体位置对三体船静水阻力和兴波干扰的影响。数值计算采用自主研发的黏流 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU。数值预报得到三体船静水阻力结果与模型试验结果吻合较好,验证了当前 CFD 方法预报三体船阻力的可靠性。通过不同片体位置三体船阻力计算发现,方案 4 的船型方案阻力最优,且通过细节的主片体间兴波干扰流场的结果给出了不同片体布置方案对三体船阻力和兴波的影响。

关键词:三体船;片体位置;静水阻力;CFD 方法;兴波干扰

中图分类号:O357

文献标志码:A

DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2022.06.008

CFD prediction of influence of position of trimaran on drag and wave-making interference

LI Xiang, LIU Zhiqiang, WAN Decheng

(Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The hydrodynamic performance of trimaran is a hot topic in hydrodynamic research. For a medium-high speed trimaran, a large part of its static water resistance is composed of wave-making resistance, and the most important factor for wave-making is the layout of the body position. In this research, a round bilge-type trimaran was taken as the research object, and viscous CFD method was used to simulate and analyze the effects of 4 different plate positions on the static water resistance and wave-making interference of trimaran. The viscous flow CFD solver naoe-Foam-SJTU developed by the research group was used for numerical calculation. The hydrostatic resistance of the trimaran obtained by numerical prediction is in good agreement with the model test results, which verifies the reliability of the current CFD method for predicting trimaran resistance. Through the calculation of the resistance of trimaran ship with different positions of the pieces, it is found that the resistance of scheme 4 is the best, and the influence of different arrangements of the bodies on the resistance and wave generation of trimaran ship is given through the detailed results of the flow field of wave interference between the bodies.

Keywords: trimaran; body position; trimaran resistance; CFD method; wave-making interference

三体船作为高性能船舶之一,其水动力性能是目前各国研究的重点,为了我国海洋强国的发展与实现,对三体船水动力性能的探究是不可或缺的。相较于常规的单体船,三体船有快速性好、甲板空间大等优势。

在高速船中,兴波阻力占静水阻力的一大部分。对于三体船兴波阻力,三体船主体两侧的片体布局是关

收稿日期:2021-11-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52131102,51879159);国家重点研发计划资助项目(2019YFB1704200)

作者简介:李 响。E-mail: 915763835@qq.com

通信作者:万德成。E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

键。现今对三体船静水阻力的研究方法主要为试验模型方法和数值模拟分析方法。在试验研究方面,吴广怀等^[1]进行了三类模型试验得出片体的横向与纵向距离能显著改变兴波阻力,甚至能决定三体船的最大航速。周广利^[2]从事了大量试验得到剩余阻力系数走势不仅和侧体位置有关,而且还与航速密切相关。邴云和卢晓平^[3]运用主片体均为 Wigley 船型的三体船进行了多种片体布局的船模试验,得到片体纵向距离对三体船兴波阻力系数有显著影响,低速时横向距离对兴波阻力系数有一定影响,但在高速时横向距离对兴波阻力系数影响显著。

船模试验方法拥有较高可靠性,但随着计算流体力学(CFD)方法精度和可靠性的逐步提高,借助高性能计算平台和先进数值方法也可以得到相对准确的数值模拟结果,同时 CFD 方法相对试验方法可以节约研究成本。在数值模拟方面,李培勇^[4]以经典薄船理论为基础叠加计算各船波谱线,导出公式可以直观看见片体横、纵位置对兴波阻力影响。李江华和黄德波^[5]采用枚举法和遗传算法优化三体船基于兴波阻力的构型,并也进行了试验验证其可靠性。邓锐等^[6]使用商业软件 FLUENT 模拟了三种三体船侧体布置方案下的流场细节,得到了最佳布局。张英晟^[7]研究了 8 种片体布置状态下的阻力。陈京普等^[8]采用改进 Dawson 方法自行开发数值预报方法,讨论了三体船片体位置优化布局。李乐宇等^[9]使用自主研发的求解器以黏性方法计算并优化了三体船的片体位置以得到最佳的兴波阻力。

使用黏流求解器 naoe-FOAM-SJTU 对 4 种片体位置三体船快速性进行 CFD 数值仿真。首先通过数值仿真结果与试验结果对比,验证该求解器和模拟结果的可靠性。在验证基础上,对 4 种模型尺度三体船采用 4 种片体布局方案进行了静水航行数值模拟。根据数值仿真结果分析不同片体位置对流场兴波的干扰以及对静水阻力的影响。

1 数值方法

1.1 naoe-FOAM-SJTU 求解器

三体船的流场计算采用基于 OpenFOAM 平台开发的船舶水动力学 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU (如图 1 所示)。该求解器在开源平台的基础上通过引入数值造波和消波模块、六自由度运动求解模块、系泊系统求解模块、重叠网格模块等针对船海水动力学的专用模块,可以实现各类船舶与海洋结构物的水动力性能数值预报。目前该求解器在船舶阻力^[10-11]、耐波^[12]、推进^[13]和操纵^[14-15]等领域已经得到了广泛的应用和验证。将采用目前的求解器针对三体船进行数值预报研究,进一步验证该求解器在三体船水动力性能预报方面的可靠性。

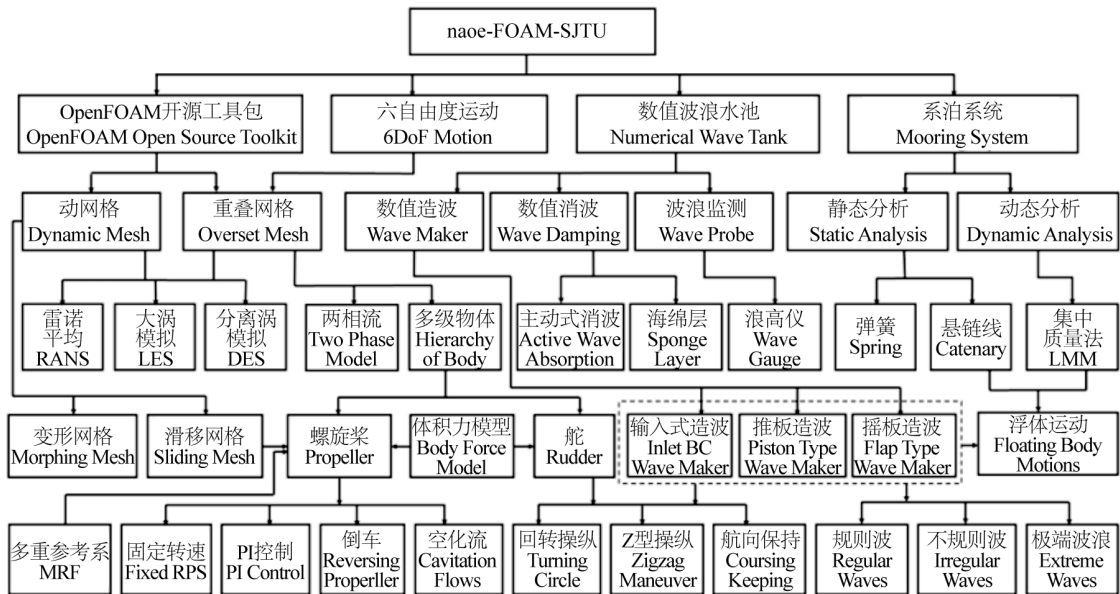


图 1 naoe-FOAM-SJTU 求解器框架
Fig. 1 Solver frame of naoe-FOAM-SJTU

1.2 控制方程

采用不可压缩 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 方程为控制方程,可表示为:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{U} = 0$$

(1)

$$\frac{\partial \rho \boldsymbol{U}}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(\boldsymbol{U} - \boldsymbol{U}_g)\boldsymbol{U}] = -\nabla p_d - \boldsymbol{g} \cdot \boldsymbol{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \boldsymbol{U}) + (\nabla \boldsymbol{U}) \cdot \nabla \mu_{\text{eff}} + f_\sigma + f_s$$

(2)

式中: $\boldsymbol{U}$ 和 $\boldsymbol{U}_g$ 分别为速度场和网格移动速度; $p_d = p - \rho \boldsymbol{g} \cdot \boldsymbol{x}$ 为流体动压力; ρ 为液体或者气体的密度; $\boldsymbol{g}$ 为重力加速度向量; $\mu_{\text{eff}} = \rho(v + v_t)$ 为动力黏性系数的有效值,其中 v 为运动黏性系数, v_t 为湍流涡黏性系数并可由湍流模型求解得到; f_σ 为两相流模型中的表面张力项; f_s 为消波区域所施加的源项。

1.3 自由液面捕捉

自由液面的捕捉方法选择带有人工压缩项的 VOF(volume of fluid) 法。其中人工压缩项能有效控制数值耗散,提高自由液面捕捉能力和精度。其输运方程可以定义为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(\boldsymbol{U} - \boldsymbol{U}_g)\alpha] + \nabla \cdot [\boldsymbol{U}_r(1 - \alpha)\alpha] = 0$$

(3)

其中, α 为体积分数,代表每一个网格单元中液体部分所占整个网格单元的体积分数, α 属于 0 和 1, $\boldsymbol{U}_r$ 表示相对速度,为水速与空气速度之差。

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{空气中} \\ \alpha = 1 & \text{水中} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{自由液面} \end{cases}$$

(4)

基于体积分数 α ,密度 ρ 和动力黏性系数 μ 分别定义为:

$$\begin{cases} \rho = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_g \\ \mu = \alpha \mu_l + (1 - \alpha) \mu_g \end{cases}$$

(5)

其中,下标 g 代表气体,l 代表液体。

2 算例配置

2.1 模型建立

以模型尺度下的三体船为研究对象,三体船的具体主尺度模型参数如表 1 所示,模型如图 2 所示。

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameter

单位:m

参数	数值
主体总长	7.44
主体垂线间长 L_{pp}	7.17
片体水线长	3.31



图 2 三体船模型

Fig. 2 Trimaran model

保持计算模型片体横向距离不变,选取了 4 个不同的片体位置如图 3 所示,其中方案 2 为原始模型位置。以方案 2 为基础,方案 1 片体位置是向船尾移动 $0.05L_{pp}$,即 0.355 m;方案 3 片体位置是向船首移动 $0.05L_{pp}$,即 0.355 m;方案 4 片体位置是向船首移动 $0.1L_{pp}$,即 0.711 m。

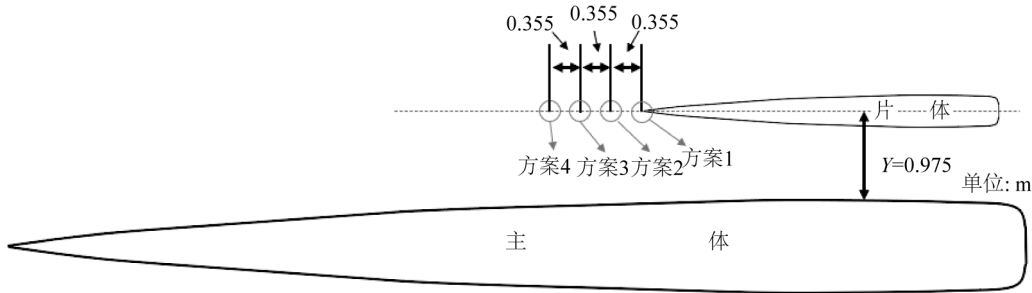


图 3 三体船 4 种片体布局
Fig. 3 4 body layouts of trimaran

2.2 网格布置

采用 OpenFOAM 自带的网格软件 snappyHexMesh 生成计算域网格。初始自由液面与船尾的交点处设置为坐标原点, x 轴指向船舳, y 轴指向右舷, z 轴指向正上方。边界入口在 $x = -2L_{pp}$ 处, 边界出口在 $x = 3L_{pp}$ 处。因为静水阻力计算的数值模拟具有对称性, 因此采用半域进行数值计算, 以节约计算资源, 减少计算时间。采用船固定位置流体为匀速来流来模拟船舶在静水航行的姿态。左右边界和底边界均设置为对称边界。右边界设置在 $y = 2L_{pp}$ 处, 底边界设置在 $z = -L_{pp}$, 上边界设置在 $z = 0.5L_{pp}$ 处。 $z = 0$ 平面为水气交接面, 即自由液面, 其上方是空气, 下方是水, 网格全局计算域如图 4(a) 所示。

采用逐步加密的网格, 对自由面附近流场进行捕捉, 如图 4(b) 所示, 网格由外到内逐级加密分为 4 个部分, 为了保持所有算例捕捉流场的精细程度一致, 全部算例的加密区域不变, 只改变片体变化时船体周围的网格, 因此每一套网格的网格数量相似, 均为 272 万左右。图 4(c) 为三体船静止时气体界面与液体界面的分相, 图中 $z = 0$ 处横线为自由液面位置, 横线上面部分为气体, 下面部分为液体, 黑色为船体模型位置。

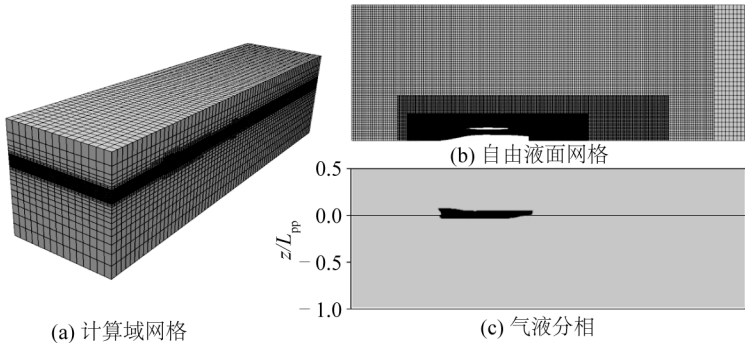


图 4 CFD 计算域网格设置
Fig. 4 Grid settings of CFD calculation domain

3 数值模拟结果及分析

3.1 静水阻力验证

通过模型试验结果与数值仿真结果对比验证该求解器的可靠性。选取 $F_r = 0.10$ 、 0.24 和 0.27 三个航速进行验证, 验证结果如表 2 所示。低航速 $F_r = 0.10$ 工况下静水阻力数值预报误差为 -4.22% , 在中等航速和高航速下的数值预报误差分别为 0.24% 和 2.31% , 上述三体船总阻力计算结果表明采用的 naoe-FOAM-SJTU 求解器在不同航速下的阻力数值计算结果可靠, 可以满足工程实际要求。万德成等^[16]已证明求解器在船舶水动力性能数值预报中有着适用性和可靠性。

除了船体受力结果外, 还将数值计算得到的流场结果与模型试验测量结果进行了对比。图 5 为船舶试验和数值模拟方法得到的尾流场, 可以看到数值模拟得到的尾流场与试验得到的尾流场吻合较好。图中②和④为处于主片体之间受到主片体兴波干扰下的兴波波谷与波峰; ③为受到主片体兴波干扰的片体尾兴波波峰, 可以看到数值模拟与试验都有明显的波峰偏移; ①为主体尾兴波受到主片体间兴波干扰后的兴波波

峰,同时可以看见尾波峰在与片体尾波叠加的位置产生了明显的偏折,这一点同试验结果一致。

表 2 静水阻力系数比较
Tab. 2 Comparison of coefficients of static water resistance

F_r	数值模拟阻力系数/ 10^{-3}	试验阻力系数/ 10^{-3}	误差/%
0.10	3.63	3.79	-4.22
0.24	4.23	4.22	0.24
0.27	3.99	3.90	2.31

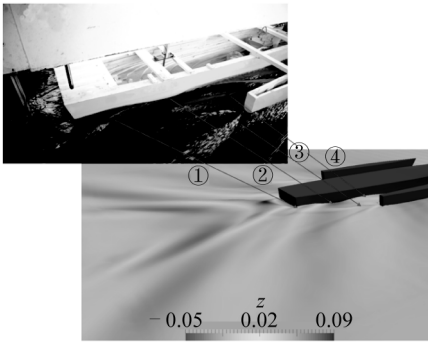


图 5 $F_r=0.27$ 时试验尾流场与数值计算尾流场对比

Fig. 5 Comparison of the wave fields of experiment and numerical calculation when $F_r=0.27$

3.2 片体位置影响分析

选择 4 种片体布局方案,使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对设计航速时的快速性进行数值预报,得到 4 种方案的总阻力系数、自由面兴波干扰和尾部流线。图 6 展示了 4 种片体布局方案数值模拟得到的总阻力系数。可以得到方案 2 的总阻力系数最大,方案 4 的总阻力系数最小,方案 1 的总阻力系数略大于方案 4,方案 3 的总阻力系数介于方案 1 和方案 2 之间,由此可推测出方案 2 的片体布局在 4 种方案中有着最不利的主片体兴波干扰,方案 4 存在较为有利的兴波干扰。之后将通过流场的具体结果给出进一步的分析。

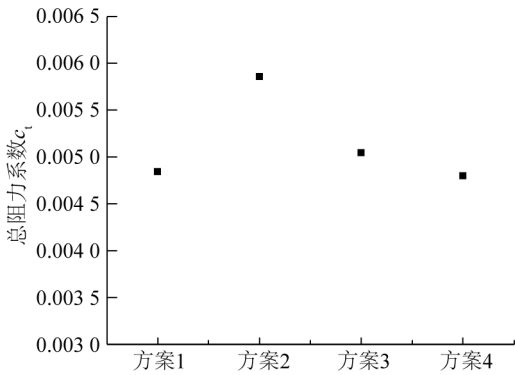


图 6 $F_r=0.18$ 时 4 种片体方案总阻力系数

Fig. 6 Total resistance coefficients of 4 body layout schemes when $F_r=0.18$

如图 7 所示,4 个模型的片体尾部产生了明显不同的兴波干扰。在 4 种方案中,很明显方案 2 兴波干扰最为不利,方案 2 的片体尾部产生的第一个波峰与主体产生的一个波峰处于峰峰叠加状态,使得三体船尾部兴波波高增大,产生更大的兴波阻力,这和图 6 中计算得到的总阻力系数相吻合。在方案 1 中,片体位置相对方案 2 偏向于船尾,使得方案 1 的片体尾兴波波峰与主体产生的尾波峰相互错开,从而兴波高度相对方案 2 平均要小,总阻力系数也相对较小,同样与图 6 总阻力系数结果吻合。在方案 3 中,由于片体位置相对方案 2 更靠近船首,不仅使片体兴波与主体兴波干扰减弱,而且片体尾兴波波峰也未和主体尾兴波波峰相遇,这使得主体船尾兴波波高相比方案 2 的兴波波高小。但是相对于方案 1,方案 3 兴波干扰还较为不利,从图

6 中也可以看到方案 3 产生的兴波波高相对于方案 1 兴波波高的平均要大些,这是由于方案 3 中片体尾部产生的兴波波峰接近主体尾兴波的波峰,产生了不利的兴波干扰。4 个方案中方案 4 的片体位置最靠近船首,相比方案 3 有着更弱的主片体兴波干扰,从图 6 和 7 中可以看到方案 4 的兴波波高平均是 4 个方案中最小,总阻力系数也是 4 种方案中最小的。

根据黏流数值模拟结果,本文还得到了 4 种方案三体船船尾处的流线情况(如图 8 所示)。由图中可以得到 4 种方案主体尾部有着不同程度的流体回流,可以看到在方案 2 中,主体尾部回流区最大,此时船体尾部压力最小,使整个船体压差阻力增加。同时在其他三个方案中,方案 1、3、4 主体船尾的回流区明显小于方案 2,造成这个现象的原因就是片体纵向布局不同使兴波干扰的影响发生改变,从而改变船尾流场的状态,方案 2 的主体片体之前有着相对不利的干扰,使其尾兴波产生的高度增加,从而尾部低速区范围更大,速度更低。相比方案 1、3、4,由之前的分析可知方案 4 的总阻力系数最小,也可从图 8 中看见方案 4 主体尾部流线低速的部分最窄,片体兴波影响到尾部流场的程度更低。而相比方案 1 和 3,两个模型主体尾流宽度相似,但是从图中可以看到方案 3 主体尾流低速区的长度更长。

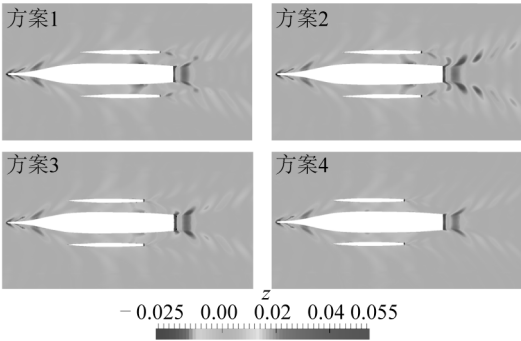


图 7 4 种片体布置方案下的船体周围自由面兴波干扰对比
Fig. 7 Comparison of wave-induced interference on free surface around ship hull under 4 different plate arrangement schemes

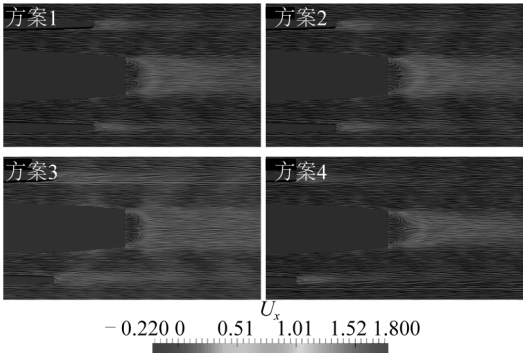


图 8 4 种片体方案下的船体尾部流线对比
Fig. 8 Streamline comparison of hull stern under 4 different body schemes

同时,从图 8 中可以看到 4 种方案布局中片体尾部的流线会向外侧偏移,这是因为主体兴波同时在干扰片体的兴波,同样,方案 2 的片体兴波受到主体兴波干扰的程度最大,从而形成了相对面积更大的低速区,同样反应在了总阻力系数上。相比方案 1 和 3,从图 8 中可以看到方案 3 中主体尾流深色区域面积更大,这表示方案 3 主体尾部相对方案 1 有着更大的低速区,产生的兴波波高更大,有着更大的总阻力系数,这也符合计算出的总阻力系数结果。

4 结 语

对三体船不同片体布置方案进行了阻力预报和流场对比分析。研究结果表明三体船片体位置布局影响着其静水阻力,并且不同的片体布置位置直接影响了三体船主、片体间的兴波干扰,通过调整片体分布可以得到较为有利的兴波干扰以及更低的兴波阻力。

使用黏流求解器 naoe-FOAM-SJTU 对三体船快速性进行数值模拟,通过细节流场中主体与片体间的兴波干扰得到了如下结论:

- 1) 静水数值模拟结果与试验结果吻合较好,证明求解器 naoe-FOAM-SJTU 在三体船全航速下的数值计算结果可靠,并为进一步研究三体船片体布局对阻力影响和兴波干扰提供可靠的手段。
- 2) 在三体船的片体位置布局中,控制片体横向位置不变,只改变片体的纵向位置对三体船兴波影响显著,呈现一定规律性变化趋势。同时三体船的不同片体纵向布局可能产生相似的数值模拟兴波干扰结果。
- 3) 三体船在不同的片体位置布局下,产生不同的兴波干扰情况,片体靠近船尾时,主片体间的兴波干扰加强,此时不利的干扰会更明显,产生更大的兴波波高,但有利的干扰会使兴波波高减小。
- 4) 三体船在不利的片体兴波影响下,主体尾流区会存在更大的回流区,同时主片体尾部会存在更大的低速区;相反主片体干扰相对有利时,主体尾流的后流区和主体尾部低速区会相对较小。

计算分析了 4 种不同片体位置三体船的阻力与兴波干扰,考虑到片体横向位置对于兴波干扰影响更多取决于航速影响,而同一航速下纵向片体位置影响相对横向片体位置影响更明显,暂只分析了纵向位置的影响,横向位置影响的细节将在之后模拟分析。本研究方法可为分析三体船主片体兴波干扰相关问题提供参考方案,也表明使用黏流 CFD 方法可为研究三体船水动力性能及片体位置影响提供有效的分析手段。

参考文献:

- [1] 吴广怀,陈徐均,吴培德,等. 三体船模型的阻力试验和数值预报[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2010, 11(4): 457-461. (WU Guanghuai, CHEN Xujun, WU Peide, et al. Model tests and numerical prediction on resistance of trimaran[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 11(4): 457-461. (in Chinese))
- [2] 周广利. 三体船型阻力预报、优化与系列性试验分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010. (ZHOU Guangli. Resistance prediction, hull optimization and series model tests of trimarans[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. (in Chinese))
- [3] 郇云,卢晓平. 高速三体船阻力性能研究[J]. 船舶力学, 2007, 11(2): 191-198. (LI Yun, LU Xiaoping. An investigation on the resistance of high speed trimarans[J]. Journal of Ship Mechanics, 2007, 11(2): 191-198. (in Chinese))
- [4] 李培勇. 三体船兴波阻力计算研究[J]. 江苏船舶, 2006, 23(2): 1-3. (LI Peiyong. Study on the calculation of wave-making resistance of trimarans[J]. Jiangsu Ship, 2006, 23(2): 1-3. (in Chinese))
- [5] 李江华,黄德波. 三体船构形与兴波阻力关系研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23(1): 26-32. (LI Jianghua, HUANG Debo. Relation between trimaran configuration and it wave-making resistance[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002, 23(1): 26-32. (in Chinese))
- [6] 邓锐,黄德波,周广利. 三体船阻力的数值计算研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(7): 673-676. (DENG Rui, HUANG Debo, ZHOU Guangli. Numerical calculation of resistance of trimarans[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(7): 673-676. (in Chinese))
- [7] 张英晟. 船舶阻力计算及三体船片体布局优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. (ZHANG Yingsheng. Research on calculation for ship resistance and optimization of side-hull location of a trimaran[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))
- [8] 陈京普,朱德祥,何术龙. 双体船/三体船兴波阻力数值预报方法研究[J]. 船舶力学, 2006, 10(2): 23-31. (CHEN Jingpu, ZHU Dexiang, HE Shulong. Reseaech on numerical prediction method for wavemaking resistance of catamaran/trimaran [J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(2): 23-31. (in Chinese))
- [9] 李乐宇,刘鑫旺,万德成. 基于黏流对三体船主体与片体间兴波干扰对其阻力的影响分析[C]//第三十一届全国水动力学研讨会论文集. 北京: 海洋出版社, 2020: 848-856. (LI Leyu, LIU Xinwang, WAN Decheng. Study on the effect of wave making interference between the hulls on the resistance of a trimaran base on viscous flow[C]//Proceedings of the Thirty-First National Symposium on Hydrodynamics. Beijing: China Ocean Press, 2020: 848-856. (in Chinese))
- [10] ZHA Ruosi, YE Haixuan, SHEN Zhirong, et al. Numerical computations of resistance of high speed catamaran in calm water [J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(6): 930-938.
- [11] 尹崇宏,吴建威,万德成. 基于 IDDES 方法的模型尺度和实尺度 VLCC 阻力预报与流场分析[J]. 水动力学研究与进展, 2016, 31(3): 259-268. (YIN Chonghong, WU Jianwei, WAN Decheng. Full scale VLCC resistance prediction and flow field analysis based on DES method[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, 31(3): 259-268. (in Chinese))
- [12] WANG J H, WAN D C. Investigations of self-propulsion in waves of fully appended ONR tumblehome model[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(12): 1345-1358.
- [13] WANG J H, ZOU L, WAN D C. CFD simulations of free running ship under course keeping control[J]. Ocean Engineering, 2017, 141: 450-464.
- [14] SHEN Z R, WAN D C, CARRICA P. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering[J]. Ocean Engineering, 2015, 108: 287-306.
- [15] WANG J H, WAN D C. CFD study of ship stopping maneuver by overset grid technique[J]. Ocean Engineering, 2020, 197: 106895.
- [16] 万德成,王建华,赵伟文. Naoe-FOAM-SJTU 求解器在船舶水动力性能数值预报中的应用[M]//徐鉴,郭兴明. 力学与工程-新时代工程技术发展与力学前沿研究. 上海: 上海科学技术出版社, 2019: 437-453. (WAN Decheng, WANG Jianhua, ZHAO Weiwen. Application of naoe-FOAM-SJTU solver in numerical prediction of ship hydrodynamic performance [M]//XU Jian, GUO Xingming. Mechanics and engineering-new era engineering technology development and frontier research of mechanics. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2019: 437-453. (in Chinese))