

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03103>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 丁子秦, 代焱, 陈作钢, 等. 船模阻力 CFD/EFD 预报的不确定度抑制方法 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(6): 49–59.
DING Z Q, DAI Y, CHEN Z G, et al. Uncertainty suppression methods for CFD/EFD resistance prediction of ship model[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(6): 49–59.

船模阻力 CFD/EFD 预报的不确定度抑制方法



扫码阅读全文

丁子秦^{1,2}, 代焱^{1,2}, 陈作钢^{*1,2}, 冯榆坤^{1,2}

1 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240

2 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240

摘要: [目的] 旨在研究船模阻力预报不确定度的主要影响因素及机理, 并提出相应的抑制方法。[方法] 在循环水槽中对船长为 1.725 和 3.450 m 的 KCS 船模分别进行船模阻力试验与伴流测量试验, 通过对比试验结果总结模型尺度对阻力的影响; 开展 3.450 m 的 KCS 船模在无限水域/循环水槽中的数值模拟, 通过对比数值结果总结阻塞效应对阻力的影响, 验证简化田村公式的修正效果; 进行不同湍流强度循环水槽条件下 3.450 m KCS 船模绕流场的数值模拟, 总结湍流强度对阻力的影响。[结果] 结果显示, 对于小尺度船模, 低流速下过低的总阻力值会放大由数据采集、来流不均匀性等因素引入的不确定度; 对于大尺度船模, 阻塞效应会导致船体下沉、船体表面压力梯度增加和兴波波幅增大, 从而引起船模阻力增加; 未修正时, 循环水槽/无限水域下总阻力计算值 R_t 的平均偏差为 4.56%, 经简化田村公式修正后, 平均偏差为 2.25%; 当来流湍流强度由 1% 增大至 2% 后, R_t 平均增加了 3.75%; 流场中湍流强度沿流向衰减, 且从入口到船首的衰减是线性的。[结论] 研究表明, 要减小船模阻力预报的不确定度, 在船模试验中, 模型尺度不宜过小且应降低来流湍流强度并采用简化田村公式修正阻塞效应; 在数值预报中, 应根据湍流强度的衰减程度设置适当的入口湍流强度。

关键词: 循环水槽; 不确定度; 阻塞效应; 湍流强度; 阻力预报

中图分类号: U661.71

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03103

Uncertainty suppression methods for CFD/EFD resistance prediction of ship model

DING Ziqin^{1,2}, DAI Yi^{1,2}, CHEN Zuogang^{*1,2}, FENG Yukun^{1,2}

1 State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2 School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: [Objectives] This paper aims to study the influencing factors and mechanisms of ship model resistance prediction uncertainty, as well as proposing corresponding suppression methods. [Methods] Resistance tests and local flow measurements on the flow around KCS models of 1.725 m and 3.450 m are carried out in a circulating water channel. The effects of the model scale on the resistance predictions are obtained by comparing the results of the two tests. Numerical simulations of the flow around the 3.450 m model in an unbounded water area and circulating water channel are achieved. The results under the two conditions are compared to analyze the blockage effect and validate the simplified Tamura correction formula. Numerical simulations of the flow around the 3.450 m model under different turbulence intensities in a circulating water channel are then carried out to analyze the effects of turbulence intensities on resistance predictions. [Results] The results show that the resistance prediction uncertainty of small ship models due to statistics collections and inflow uniformity can be amplified if the inflow velocity is too low. This demonstrates that the blockage effect of the large model could increase hull sinkage, pressure gradients on the hull and wave amplitudes, leading to an increase in ship resistance. The average difference between the resistances predicted in the unbounded water area and circulating water channel is 4.56% without correcting for the blockage effect. The difference is reduced to 2.25% with the correction of the simplified Tamura formula. The total resistance increases by an average of 3.75% as the turbulence intensity increases from 1% to 2%. It is observed that the decay of turbulence intensity along the flow direction is linear from the entrance to the bow. [Conclusions] This study shows that reasonably large models should be used wherever possible and the turbulence intensity should be strictly controlled to reduce the uncertainty of ship resistance tests in circulating water channels. In addition, the simplified Tamura formula should be used to correct the blockage effect, and the appropriate inflow turbulence intensity should be used in numerical prediction according to the dissipation of the turbulence intensity.

Key words: circulating water channel; uncertainty; blockage effect; turbulence intensity; resistance prediction

收稿日期: 2022-09-19 修回日期: 2022-11-30 网络首发时间: 2023-11-14 13:02

基金项目: 海洋工程国家重点实验室基金资助项目 (GKZD010080)

作者简介: 丁子秦, 女, 1999 年生, 硕士生。研究方向: 船舶与海洋结构物设计制造, 计算流体力学。E-mail: ziqin0902@sjtu.edu.cn
陈作钢, 男, 1967 年生, 博士, 研究员。研究方向: 计算流体力学, 船舶水动力学, 风洞循环水槽研发与应用。
E-mail: zgchen@sjtu.edu.cn

*通信作者: 陈作钢

0 引言

海上运输是国际贸易的主要途径之一,船舶在向着大型化、高速化和高性能化方向发展的同时,还需满足节能减排、绿色环保等方面的要求,而进行船舶设计和性能优化的基础就是船舶阻力的准确预报^[1]。

当前,采取船模阻力试验结合阻力换算的方法是阻力预报的主要方法。循环水槽(circulating water channel, CWC)是进行阻力试验的重要设施,具有占地小、试验时间短、方便观察等优点^[2],被广泛应用于风浪流联合作用、喷水推进、船模水动力等试验中。Feng等^[3]对深远海养殖平台进行了船型优化,并在上海交通大学循环水槽(circulating flow measurement system, CFMS)中完成了初始船型和优化船型的模型阻力试验,验证了优化船型的水动力性能。汪向前^[4]通过循环水槽模型试验对某水下航行器的优化设计方案进行了论证,并通过数值模拟分析了试验中阻塞效应对水动力性能预报的影响。

虽然以循环水槽为平台进行船舶阻力预报已有多项实践,但船模加工、数据标定和测量、阻塞效应以及循环水槽特有的来流不均匀度与湍流强度等均对预报结果有一定的影响^[5]。若试验选取的船模尺度过小,尺度效应等因素会引起较大的阻力测量不确定度,故试验时倾向于选取大船模作为试验对象。但受试验段尺寸的限制,过大的船模尺度会引起阻塞效应,反而为阻力预报引入额外的不确定度。针对上述情况,学者们进行了相关研究。

在阻塞效应方面,目前最小化阻塞效应的方法是进行速度修正,修正公式分别基于平均流理论和风洞理论^[6]。赵大刚等^[6]以75000 DWT散货船和KCS集装箱船为研究对象,通过CFD方法研究了两类修正公式的适用性,研究显示,当阻塞比和弗劳德数 Fr 较大时,推荐使用基于风洞理论的修正公式。简化田村公式^[7](simplified Tamura formula)是基于风洞理论的代表性公式之一,其修正效果已经过大量的船模试验验证。但因未考虑壁面边界层和水波反射的影响,对于循环水槽的试验条件,该公式的适用性还有待进一步验证。刘晗等^[8]以KVLCC2船型为对象,研究了简化田村公式在循环水槽斜航试验中的修正效果,结果证明公式阻塞比为3.5%~5.0%时有效。寇莹^[9]利用CFD方法针对简化田村公式在CFMS船模阻力试验中的适用性展开了研究,结果表明该公

式具有良好的修正效果。

在湍流强度方面,Vickery^[10]和Nakamura等^[11]分别研究了入口湍流强度对圆柱和方柱绕流场的影响,发现柱体的受力会随湍流强度的增大而发生显著变化。2008年后,国际拖曳水池会议(international towing tank conference, ITTC)相继提出了关于船模试验流体力学^[5](experimental fluid dynamics, EFD)和CFD^[5]的不确定度分析规程。童寿龙^[12]根据该规程对CFMS船模阻力试验中由精度极限、天平标定、数据采集过程、来流不均匀度和湍流强度等因素引起的不确定度进行了量化分析,但未考虑水槽阻塞效应的影响,也未提出相应的抑制方法。

综上,本文将针对阻塞效应和湍流强度对循环水槽船舶阻力预报的影响展开研究,基于CFMS进行船模阻力试验和绕流场的数值预报,检验简化田村公式对阻塞效应的修正效果,探索来流湍流强度在流场中的分布规律,为降低船舶阻力预报中的不确定度提供参考。

1 船模试验与数据处理

1.1 试验设备

本文的船模阻力试验在CFMS中进行。CFMS主要由动力段、4个拐角段、扩散段、整流段和试验段组成。如图1所示,试验段长 $L=8.0$ m,宽 $W=3.0$ m,深 $H=1.6$ m,流速最高可达3.0 m/s,湍流强度保持在2%以内,可测试的最大模型长度为3.5 m,能够高效地进行船舶快速性、操纵性等模型试验。



图1 循环水槽试验段示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test section of the circulating water channel

1.2 试验对象及工况

本文选取KCS集装箱船为试验船型,其缩尺比为1:66.7和1:133.3。模型如图2所示,船舶主尺度参数如表1所示。



(a) 小船模



(b) 大船模

图 2 KCS 船体模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the KCS bare hull model

表 1 KCS 船模主尺度

Table 1 Main dimensions of the KCS ship model

主尺度	小船模	大船模
垂线间长 L_{pp}/m	1.725	3.450
水线间长 L_{wl}/m	1.744	3.488
水线宽 B_{wl}/m	0.241	0.483
吃水 T/m	0.081	0.162
桨盘面半径 R/m	0.030	0.059
排水量 Δ/m^3	0.022	0.176
中横剖面系数 C_m	0.985	0.985
中横剖面面积 A_m/m^2	0.019	0.077

所谓阻塞比,即船舶中横剖面面积与水槽断面面积之比。本文中大船模的阻塞比为 1.606%,小船模的阻塞比为 0.401%。

船模阻力试验在 $Fr = 0.07 \sim 0.30$ 时进行,分别测量 21 个不同来流速度下的阻力值。大船模试验的雷诺数 Re 范围为 $1.28 \times 10^6 \sim 5.03 \times 10^6$,小船模试验的 Re 数范围为 $4.19 \times 10^5 \sim 1.65 \times 10^6$,临界 Re 数范围为 $5.0 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^6$ 。虽然大、小船模试验的 Re 数大部分落在临界雷诺数附近,但试验时船首激流丝会激发表面边界层的转捩,故可认为船模周围流场处于湍流状态。

大船模的伴流测量试验在 $Fr = 0.256$ 时进行。速度测点分布如图 3 所示。图中,坐标原点位于桨轴中心, y 轴的正方向指向左舷, z 轴的正方向铅垂向上。测点纵向位置位于距艉封板 145 mm 的桨盘面处,周向间隔分别为 5° 和 30° ,径向分布从 $0.2R \sim 1.1R$,间隔 $0.1R$ 。大船模试验时的温度为 $13.7^\circ C$,小船模的为 $11.2^\circ C$ 。试验中,阻力和流速的测量取稳定后 60 s 的平均值,采样频率为 50 Hz。

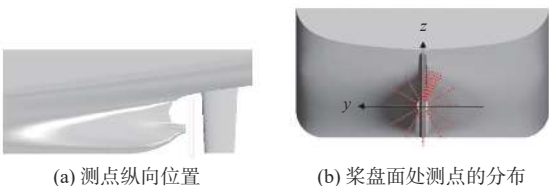


图 3 伴流场测点的分布

Fig. 3 Distribution of the measuring points for the wake field

1.3 阻力试验主要误差源

对于小船模试验,阻塞比小于 0.5%,可以不考虑阻塞效应的影响^[13]。但若船模过小,其阻力预报结果不仅会受到尺度效应的影响,还有可能在低流速时会因过小的阻力值而放大由数据采集、来流不均匀性等因素引起的不确定度。

对于大船模试验,阻塞比大于 1.5%,必须考虑阻塞效应的影响^[13]。因大船模阻力值的范围相对适中,故由精度极限、天平标定和数据采集过程引起的不确定度可以忽略^[5]。

在 CFMS 阻力试验中,最大的不确定度来自湍流强度^[5],而湍流强度对阻力的影响难以用 EFD 方法分析,故本文选择采用 CFD 方法。

1.4 试验结果

1.4.1 阻力结果

将试验测得的大、小船模总阻力值作无因次化,得到总阻力系数 C_t 。采用三因次换算法将小船模阻力换算到大船模尺度上,通过 1957 ITTC 公式计算摩擦阻力系数 C_f ,采用 Prohaska 法根据小船模阻力结果得到形状因子 $1+k = 1.0413$,不考虑粗糙度补贴系数和空气阻力系数。大、小船模的 C_t 和 C_f 随 Fr 数的变化曲线如图 4 所示。

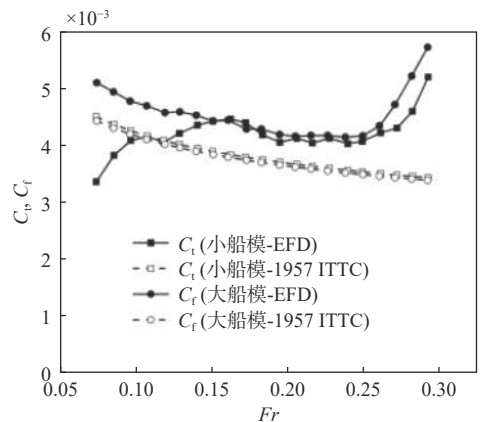


图 4 大、小船模阻力系数对比

Fig. 4 Comparison of the resistance coefficients of the large and small ship models

通过对比大、小船模的 C_t 曲线发现,在 $0.15 < Fr < 0.26$ 范围内两者吻合较好,但在流速较低和较高时大船模的 C_t 却远大于小船模的 C_t 。观察小船模的 C_t 和 C_r 曲线发现,在 $0.07 < Fr < 0.12$ 时出现了 C_t 小于 C_r 的现象,但这是违背常理的,而大、小船模的 C_r 曲线几乎重合,说明采用 1957 ITTC 公式计算小船模的 C_r 结果可信,故小船模 C_t 的误差可能在阻力测量时引入。试验中,采用单分量阻力仪采集阻力数据,其量程为 50 N,精度误差为量程的 0.25%。小船模在 $Fr = 0.07 \sim 0.12$ 时其阻力结果的范围为 0.115~0.396 N,仅为量程的 0.23%~0.80%,究其原因,可能是小船模的阻力值相对过小而放大了由数据采集、来流不均匀性等因素引起的不确定度,从而导致测量结果偏小。在确定阻力试验对象的尺寸时,除考虑尺度效应等因素的影响外,还需使其阻力值处于适宜的测量范围内。该结论同样适用于拖曳水池和空泡水筒等设备。

1.4.2 伴流结果

将试验测量得到的桨盘面流速 V_x 相对来流速度 V 作无因次化,得到如图 5 所示的未经阻塞效应修正的船尾伴流分布,图中坐标的规定与图 3 一致。由于船舶关于纵中剖面严格对称,故将左、右舷数据取平均值,以消除模型微小不对称和水槽流速分布微小不均匀的影响。经计算,试验测量得到的平均伴流分数为 0.317。

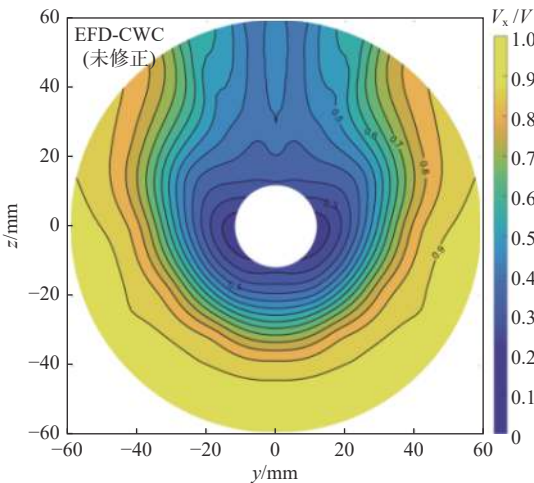


图5 试验中桨盘面处伴流场速度分布

Fig. 5 The velocity distribution of wake field at the propeller plane in the experiment

2 数值方法

2.1 控制方程

在船舶绕流流动中,流体的黏性和湍流作用不可忽略,故在船舶绕流场的数值模拟中采用三

维不可压缩雷诺平均 N-S(RANS) 方程组作为控制方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} + f_i \quad (2)$$

式中: u_i 和 u_j 分别为 i, j 方向上的雷诺平均速度分量; x_i 和 x_j 分别为 i, j 方向上的坐标; ρ 为流体密度; p 为雷诺平均压力; ν 为流体运动黏性系数; f_i 为质量力; 下标 $i, j=1, 2, 3$; $\partial \overline{u'_i u'_j} / \partial x_j$ 为雷诺附加应力,其中单引号代表物理量的脉动值。

2.2 湍流模型

Menter^[14] 提出的 SST $k-\omega$ 湍流模型在近边界层区域是采用标准 $k-\omega$ 公式处理,在远场区域则根据标准 $k-\varepsilon$ 公式进行计算。该模型不仅能自适应壁面距离,还能很好地处理高逆压梯度及剪切流的计算,故本文选择 SST $k-\omega$ 湍流模型对 KCS 船模绕流场进行数值模拟。

3 数值模拟

3.1 几何模型与计算域

本文对 3.450 m KCS 船模进行数值模拟,图 6 所示为模型示意图。



图6 KCS 船计算模型示意图

Fig. 6 Computational model of the KCS ship

数值模拟采用的计算域和边界条件如图 7 所示,其中循环水槽的计算域根据 CFMS 的试验段尺寸设置,范围为 $4.0 \leq x/L_{pp} \leq -9.0$, $-1.5 \text{ m} \leq y \leq 0 \text{ m}$, $-1.6 \text{ m} \leq z \leq 1.6 \text{ m}$; 无限水域 (unbounded water area, UWA) 的计算域范围为 $4.0 \leq x/L_{pp} \leq -9.0$, $-5.0 \leq y/L_{pp} \leq 0$, $-4.5 \leq z/L_{pp} \leq 3.5$ 。坐标原点为艉垂线与水线面的交点, x 轴正方向指向船首, y 轴正方向指向左舷, z 轴正方向铅垂向上。

3.2 网格划分与计算设置

在数值模拟中采用重叠网格技术,同时划分船体网格和背景网格。为捕捉自由液面兴波波峰和船体表面流动细节,在自由液面和船舶首、尾进行网格加密,采用壁面函数法处理近壁流动,网格壁单位 y^+ 按大于 30 进行设置,壁面增长率为 1.05。无限水域与循环水槽的网格划分一致,图 8 所示为重叠网格布置情况及网格细节。

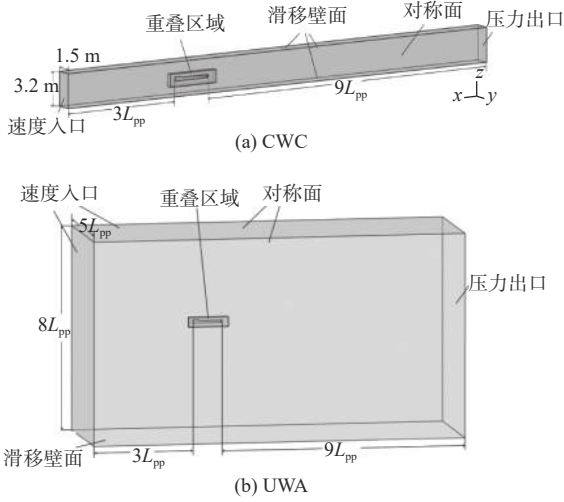


图7 计算域及边界条件示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the computational domain and boundary conditions

分别取 0.0218, 0.024, 0.0264 m, 3套网格分别记为 G_1, G_2, G_3 。入口来流速度 $v = 0.999$ m/s, 入口湍流强度 $I = 1\%$, 其他设置与 3.1 和 3.2 节中一致。不同网格的数值结果如表 2 所示, 其中 S_1, S_2, S_3 分别代表 3 种网格方案的计算结果。相同工况下的船模试验结果 $D = 4.631$ N, 随着网格的加密, 阻力数值结果逐渐向试验结果逼近, 偏差分别为 1.176%, 0.570% 和 0.148%。

表 2 不同网格的数值结果

Table 2 Numerical solutions of different grid

网格方案	S_i / N
G_1	4.624
G_2	4.604
G_3	4.576

3.3.1 验证过程

验证过程就是计算数值不确定度 U_{SN} 的过程, 根据不确定度合成定理, U_{SN} 由式(3)求得。

$$U_{SN}^2 = U_I^2 + U_G^2 + U_T^2 + U_P^2 \quad (3)$$

式中: U_I 为迭代不确定度分量; U_G 为网格不确定度分量; U_T 为时间步长不确定度分量; U_P 为其他不确定度分量。由文献[5]可知, 网格误差是 CFD 的主要误差源, 与 U_G 相比, U_I, U_T, U_P 均可忽略。

网格不确定度研究分 2 步: 第 1 步是通过式(4)~式(6)对 3 套网格进行收敛性判断^[6]; 第 2 步是根据式(7)~式(11)利用广义 Richardson 外推法^[17]得到网格不确定度分量 U_G 。验证过程的计算结果如表 3 所示。

$$\varepsilon_{12} = S_1 - S_2 \quad (4)$$

$$\varepsilon_{23} = S_2 - S_3 \quad (5)$$

$$R_G = \varepsilon_{12} / \varepsilon_{23} \quad (6)$$

$$P = |\ln(\varepsilon_{23} / \varepsilon_{12}) / \ln r| \quad (7)$$

$$\delta = \varepsilon_{12} / (r^P - 1) \quad (8)$$

$$C_G = (r^P - 1) / (r^{P_{th}} - 1) \quad (9)$$

$$\delta^* = C_G \delta \quad (10)$$

$$U_G = [1 - C_G] |\delta| \quad (11)$$

式中: ε_{12} 为精细网格解与中等网格解之差; ε_{23} 为中等网格解与粗网格解之差; R_G 为收敛因子, $0 \leq R_G < 1$ 表示网格单调收敛; P 为准确度阶数; δ 为误差; δ^* 为误差估计值; C_G 为修正因子; P_{th} 指当空间

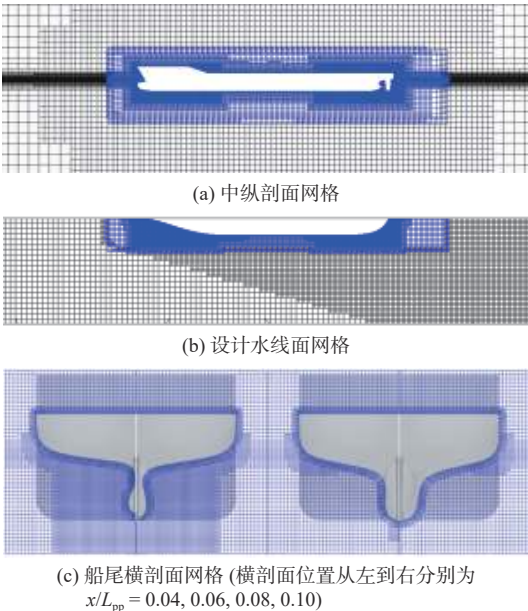


图 8 网格划分示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the grid division

采用商用 CFD 软件 STAR-CCM+ 进行数值模拟, 选用二阶迎风格式离散动量方程, 采用 SIMPLEC 算法求解压力-速度耦合方程, 采用流体体积 (volume of fluid, VOF) 法^[15-16] 捕捉自由面形状, 利用动态流体固体相互作用模块 (dynamic fluid body interaction, DFBI) 模拟船舶运动, 并在 0.4 s 后放开纵摇和升沉自由度, 缓冲时间为 2 s。CFD 预报的阻力、航态、压力、兴波和流速均取计算稳定后 60 s 内的平均值。

3.3 CFD 不确定度分析

根据 ITTC 关于 CFD 不确定度的分析规程^[12], 单方向网格加细比取 $r = 1.1$, 共生成 3 套网格, 基础尺寸分别取 0.2727, 0.30, 0.33 m, 边界层总厚度

表3 验证过程计算结果

Table 3 The verification process results

计算项	数值	计算项	数值
ε_{12}/N	1.953×10^{-2}	C_G	2.085
ε_{23}/N	2.807×10^{-2}	δ^*/N	9.298×10^{-2}
R_G	0.696	$ 1-C_d $	1.085
P	3.810	U_G/N	4.838×10^{-2}
δ/N	4.460×10^{-2}		

步长趋于0, 渐近线范围趋于1时首项准确度极限阶数的估计值, 计算中一般取 $P_{th} = 2$ 。

3.3.2 确认过程

确认不确定度 U_V 由式(12)求得, 根据童寿龙等^[5]的研究结论, 选取 $U_D = 2\%D$ 。确认过程计算结果如表4所示, 其中对比误差 E_1, E_2, E_3 分别为试验结果 D 与计算结果 S_1, S_2, S_3 之差。

$$U_V^2 = U_D^2 + U_{SN}^2 = U_D^2 + U_G^2 \quad (12)$$

式中, U_D 为试验不确定度。

表4 确认过程计算结果

Table 4 The validation process results

计算项	数值	计算项	数值
D/N	4.631	E_3/N	1.176%D
E_1/N	0.148%D	U_D/N	2%D
E_2/N	0.570%D	U_V/N	2.256%D

表4中, 3套网格的对比误差 E_i 均小于确认不确定度 U_V , 故认为3套网格的结果均得到了确认。因 G_2 方案的数值结果精度较高, 且相对节省计算资源, 后续计算中将均采用此套网格。因无限水域与循环水槽中的网格划分一致, 故认为其网格结果也得到了确认。

3.4 CFD 计算精度验证

3.4.1 阻力结果精度验证

在相同试验工况下对 3.450 m KCS 船进行阻力预报, 选取 13 个速度点计算, 其他计算设置同 3.1 和 3.2 节。数值预报的船舶总阻力 R_t 和摩擦阻力 R_f 以及由试验得到的 R_t 与 1957 ITTC 公式的计算值 R_f 随 Fr 数的变化曲线如图9所示。

由图9可知, 在试验所取的 Fr 数范围内, CFD 预报的 R_t 与 EFD 的结果吻合较好, CFD 预报的 R_f 与 1957 ITTC 公式的计算值差别也不大。将各速度点处 CFD/EFD 结果的相对偏差取绝对值后再平均作为平均偏差, R_t 的平均偏差为 1.97%, R_f 的平均偏差为 2.42%, 说明利用 CFD 方法预报船舶阻力可以得到较为准确的结果。

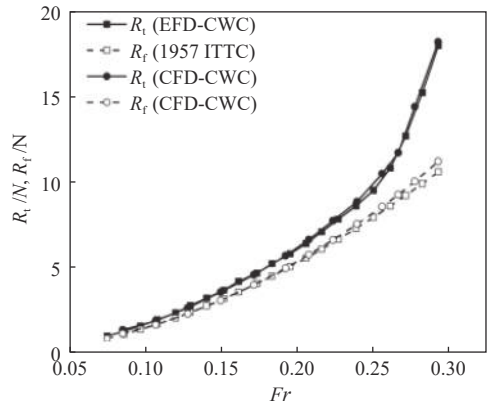


图9 CFD/EFD 阻力结果对比

Fig. 9 Comparison of the resistance results between CFD and EFD

3.4.2 船尾伴流场精度验证

在相同的伴流测量试验工况下对 3.450 m KCS 船尾伴流场进行数值模拟, CFD/EFD 下船尾伴流场对比如图10所示。图中, CFD/EFD 下桨盘面处流速 V_x 相对来流速度 V 作了无量纲化处理。

由图10可知, 相比 EFD 结果, CFD 模拟的桨盘面伴流低速区范围偏大且相对下移, 速度带的分布存在较大差异, 但预报的平均伴流分数为 0.319, 仅比试验值高 0.46%, 证明采用 CFD 方法预报循环水槽中船舶桨盘面处的平均伴流分数精度足够。

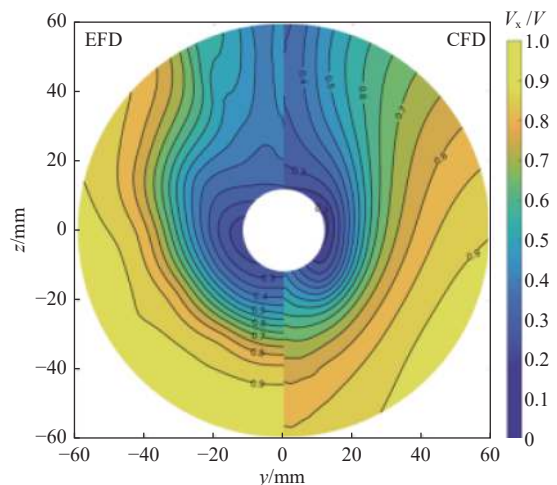


图10 CFD/EFD 下桨盘面处伴流场速度分布对比

Fig. 10 Comparison of the velocity distribution of wake fields at the propeller plane between CFD and EFD simulations

4 结果分析与讨论

4.1 阻塞效应对阻力预报的影响

根据图4所示的大、小船模阻力试验结果已知在 Fr 数较大时大船模的阻力系数偏大, 另前文提到在大船模阻力试验中不能忽略阻塞效应的影响, 误差也可能是由此产生, 所以本节将针对循环水槽/无限水域条件下 3.450 m KCS 船模的阻力

进行数值预报, 研究阻塞效应对阻力的影响。

在试验 Fr 数范围内选取 13 个速度点进行数值模拟, 水槽的阻塞效应采用简化田村公式^[7]进行修正:

$$\frac{\Delta v}{v} = 0.85 \cdot m \cdot \left(\frac{L_{pp}}{b}\right)^{\frac{3}{4}} \frac{1}{1 - Fr_{mh}^2} \quad (13)$$

式中: v 为来流速度; 阻塞效应会使船舶表面速度增加, Δv 为平均速度增量; m 为阻塞比; L_{pp} 为船模长度; b 为水槽宽度; $Fr_{mh} = v/\sqrt{gh}$, 为水深 Fr 数, 其中 h 为水深, g 为重力加速度。

通过式 (13), 得到来流速度为 v 时船舶表面的平均速度增量 Δv , 认为循环水槽中来流速度为 v 时预报的船模阻力与无限水域中来流速度为 $V(v+\Delta v)$ 时对应的阻力结果一致, 按此原理对阻塞效应影响下的船模阻力结果进行速度修正。在相同的伴流测量试验工况下, 对循环水槽/无限水域条件下的船尾伴流场进行数值模拟。

4.1.1 阻力结果对比分析

图 11 所示为采用 CFD 得到的无限水域/循环水槽条件下 R_t 和 R_f 随 Fr 数的变化曲线。由图可见, 未修正时, 循环水槽中的 R_t 和 R_f 均偏大, 在计算 Fr 数范围内, R_t 平均偏差 4.56%, R_f 平均偏差 2.04%, 可见阻塞效应会对船舶阻力预报结果造成

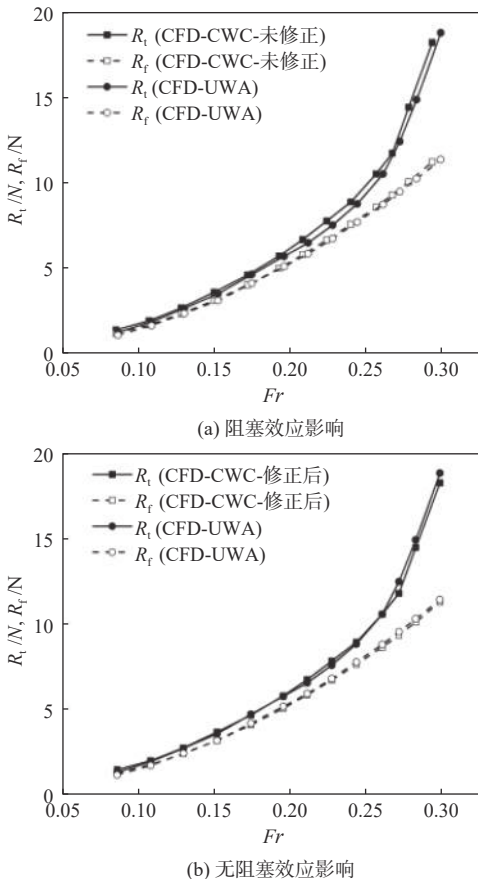


图 11 CWC/UWA 中的阻力结果对比

Fig. 11 Comparison of the resistance results in the CWC/UWA

较大影响。采用简化田村公式修正后, 在计算 Fr 数范围内, 循环水槽/无限水域条件下的 R_t 与 R_f 曲线吻合较好, R_t 的平均偏差为 2.25%, R_f 的平均偏差为 1.58%, 证明采用简化田村公式可以有效降低阻塞效应为阻力预报引入的不确定度。

4.1.2 船体姿态、压力分布及兴波波形分析

图 12 所示为无限水域/循环水槽中船舶航态随 Fr 数的变化曲线。由图可以看出, 船舶在航行过程中出现了船体下沉和“埋首”现象。随着航速的增加, 船体下沉量增大; 艏倾程度呈先增大后减小的趋势, 在 $Fr = 0.27$ 左右达到最大。经对比发现, 循环水槽中船体的下沉幅度更大, 且随着航速的增加差值增大, 但艏倾程度在两种水域中差别并不大, 说明阻塞效应对船体的升沉有较大影响, 对船体的纵倾影响不大。

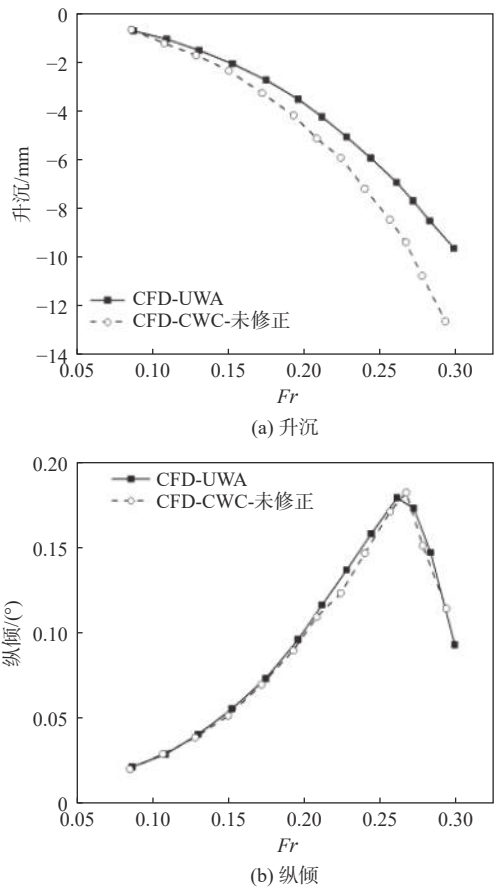


图 12 CWC/UWA 中船模升沉/纵倾对比

Fig. 12 Comparison of the ship heave/trim in the CWC/UWA

图 13 所示为 $Fr = 0.256$ 时无限水域/循环水槽纵剖面位置 $y/W = 0, -0.125, -0.25$ (其中 y 为船宽度方向的位置坐标, W 为水槽宽度) 处的波高分布曲线。图中, 坐标原点为水线面与艏垂线的交点, x 轴正方向指向船首, 横、纵坐标均相对船长进行了无量纲化。从图中可以看出, 在循环水槽中, 船体附近的波峰值与无限水域中波峰值的差异不大, 而波谷值则要比无限水域中的波谷值

更小,船后波浪的波峰和波谷值都更大,可见,阻塞效应会影响水槽中的船兴波,进而影响阻力结果。

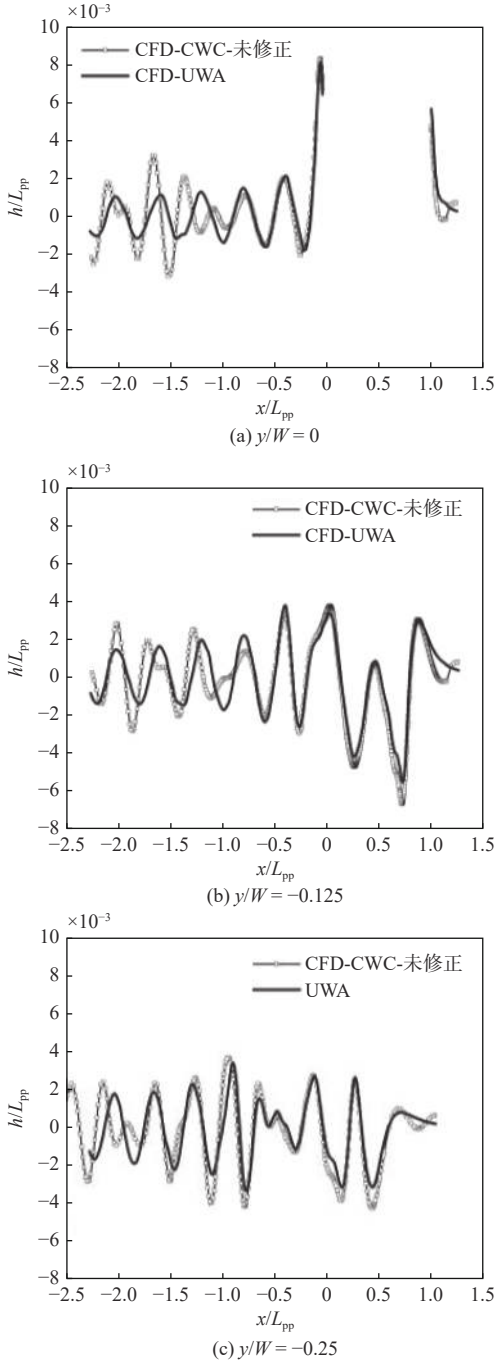


图13 CWC/UWA中船兴波波高对比

Fig. 13 Comparison of the wave heights in the CWC/UWA

$Fr = 0.256$ 时无限水域/循环水槽中船表面压力系数的分布如图14所示。图中,无量纲压力系数 C_p 的定义为

$$C_p = \frac{P_s - P_\infty + \rho g z}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (14)$$

式中: P_s 为船体表面压力; P_∞ 为来流压力; U_∞ 为来流速度。

对比船首部分,循环水槽中船舶表面低压区较大,高压区与无限水域中的差别很小,故船首

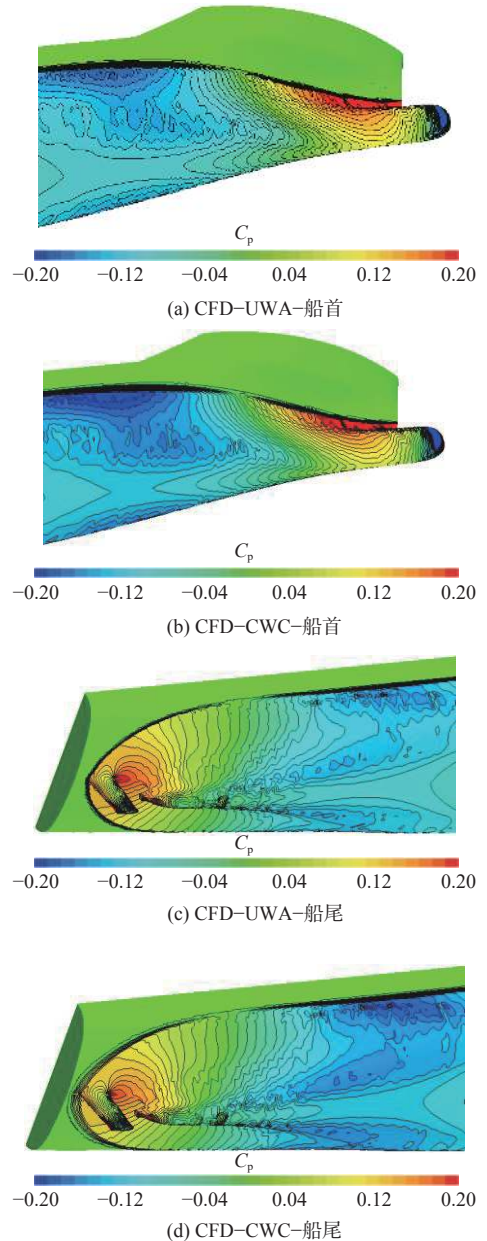


图14 CWC/UWA中船首、船尾压力系数分布对比

Fig. 14 Comparison of the pressure coefficient distributions near the bow and stern in CWC/UWA

的顺压梯度较大。对比船尾部分,循环水槽中船舶表面低压区较大,高压区与无限水域中的差别很小,故船尾的逆压梯度也较大。

综上,当船舶在循环水槽、拖曳水池、空泡水筒等这类限制水域中航行时,侧壁和池底对水流的限制会使船体表面回流速度增大,再加上船底、池底以及侧壁表面边界层的影响,回流速度将进一步增大,从而使得船底压力减小,船体下沉,湿表面积增加,摩擦阻力增大。同时,船体下沉还会改变球鼻艏的浸深,使船的兴波波谷更低,消耗更多的能量。此外,回流速度的增加代表水流相对于船体的速度增加,故船体表面压力梯度增大,黏压阻力也随之增加。当以大尺度船

模为对象进行阻力试验时, 阻塞效应将对船舶各个阻力成分产生影响, 为阻力预报引入较大的不确定度, 而简化田村公式正好可以有效降低循环水槽中阻塞效应对阻力的影响。

4.1.3 船尾伴流场对比分析

图 15 给出了 $Fr = 0.256$ 时无限水域/循环水槽中船尾伴流的分布, 图中将桨盘面流速 V_x 相对来流速度 V 作了无因次化处理。经对比发现, 无限水域中桨盘面处伴流低速区相对循环水槽中的有所下移, 但在 2 种水域中速度带的分布差异较小。无限水域中, 平均伴流分数为 0.326, 相对循环水槽中的结果偏大了 2.19%, 说明在阻塞效应的影响下, 桨盘面处平均伴流分数的预报结果偏低, 但差异较小, 可以不考虑阻塞修正。

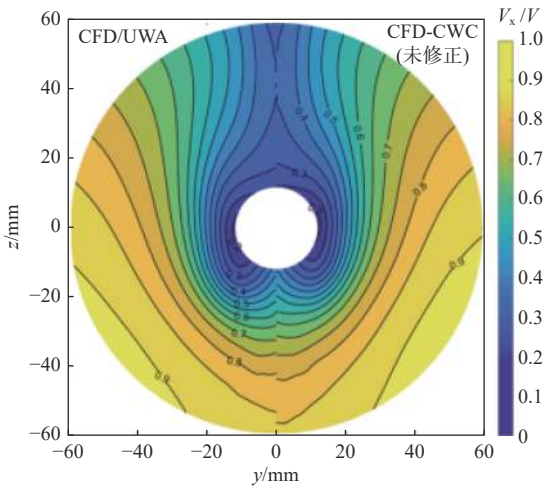


图 15 CWC/UWA 中桨盘面处伴流场速度分布对比

Fig. 15 Comparison of the velocity distribution of wake fields at the propeller plane in the CWC/UWA

4.2 湍流强度对阻力预报的影响

闭口的“循环水槽”, 即水洞的湍流强度很容易保持在 1% 以下, 而带自由面的循环水槽的湍流强度则很难降低。高质量循环水槽的湍流强度可以控制在 2% 以下, 甚至可以保持在 1%~1.5% 范围内, 但长年使用后, 湍流强度仍会增加。此外, 童寿龙^[12]的研究也表明, 循环水槽阻力试验最大的不确定度来自湍流强度, 故本节将针对循环水槽, 在来流湍流强度 $I=1%$ 和 $2%$ 时对 3.450 m KCS 船模阻力进行数值预报, 研究湍流强度对阻力的影响规律。

力的影响规律。

4.2.1 阻力结果对比分析

图 16 所示为在不同入口湍流强度情况下采用 CFD 预报的 R_t 和 R_f 随 Fr 数的变化曲线。从图中可见, 当湍流强度从 1% 增大至 2% 后, R_t 和 R_f 均增大, 在计算 Fr 数范围内, R_t 平均增加 3.75%, R_f 平均增加 2.83%。流场中, 来流湍流强度的增加会促使船体表面边界层内的湍流更充分地发展, 速度分布更丰满, 故速度梯度更大, 摩擦阻力也更大。

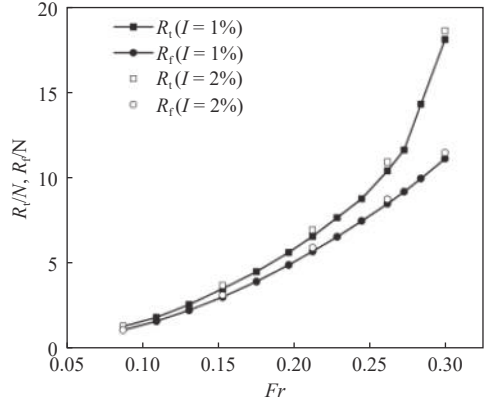


图 16 不同湍流强度时阻力结果对比

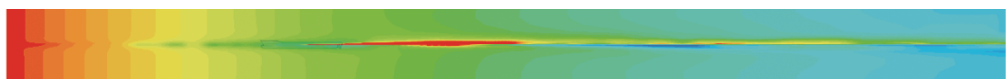
Fig. 16 Comparison of the resistance at different turbulence intensities

4.2.2 流场中的湍流强度分布

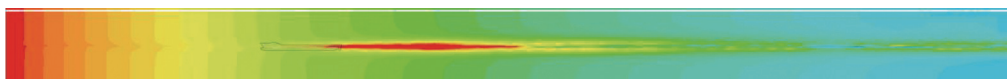
以入口湍流强度 $I = 2%$, $Fr = 0.086, 0.212, 0.299$ 时的工况为例, 给出循环水槽中 $y/W = -0.125$ 截面处的湍流强度分布如图 17 所示。经对比发现, 在不同 Fr 数下, 从速度入口到船首处均发生了湍流强度沿流向衰减的现象; 当水流流经船体时, 在船舶的扰动下流场中的湍流强度增加, 且流速越大, 增加得越明显; 水流流过船体后, 湍流强度将继续衰减。

图 18 为湍流强度 $I = 2%$, $Fr = 0.086, 0.212, 0.299$ 时从速度入口到船首处平均湍流强度沿流向的衰减情况。图中, 横坐标上的 0 点位于船首, 正方向指向船首方向。由图可知, 从速度入口到船首处湍流强度沿流向线性衰减, 且不同入口速度下的衰减程度几乎一致。

在 CFMS 试验段, 可以将湍流强度保持在 1.5%~2% 左右, 故在数值模拟时需保证船首的



(a) $Fr = 0.086$



(b) $Fr = 0.212$

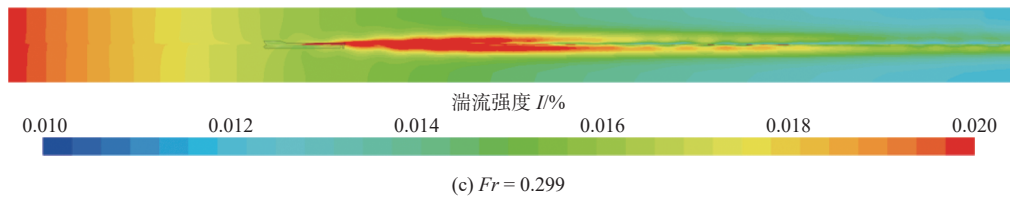


图 17 湍流强度流向分布

Fig. 17 Distributions of the turbulence intensity in the streamwise direction

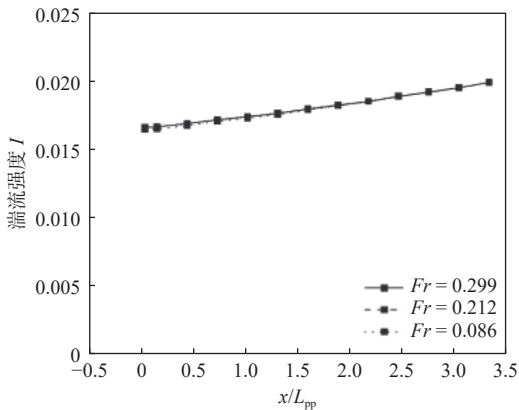


图 18 来流湍流强度沿流向的衰减

Fig. 18 The decay of turbulence intensity in the streamwise direction

湍流强度在此范围内。为节省计算成本,一般考虑速度入口到船首的距离为1倍船长。由图18中结果可知,1倍船长距离的湍流强度衰减约为0.102%,故入口处的湍流强度可以取为1.602%~2.102%。

综上,流场中湍流强度会对船舶阻力的预报产生较大影响,同时还出现了沿流向线性衰减的现象,故在使用CFD方法预报船舶阻力时,应根据其衰减程度设置适当的入口湍流强度以减小CFD的不确定度。在进行船模阻力试验时,降低来流的湍流强度具有重要意义。

5 结 语

本文采用EFD与CFD相结合的方法,主要从阻塞效应和湍流强度出发,开展了抑制船舶阻力预报不确定度的方法研究。首先,在循环水槽中以船长为1.725和3.450 m的KCS船模为对象进行了船模阻力试验和伴流测量试验,通过对比2个不同尺度船模的试验结果,总结了模型尺度对阻力的影响情况;其次,采用CFD方法对无限水域/循环水槽中3.450 m的KCS船模进行了数值模拟,通过对比这2个条件下的数值模拟结果,总结了阻塞效应对阻力的影响情况,同时验证了简化田村公式的修正效果;最后,完成了循环水槽条件下3.450 m的KCS船模在不同湍流强度时的数值模拟,分析总结了湍流强度对阻力的影响规律以及沿流向的变化规律。主要得到如下结论:

1) 对于尺寸过小的船模,低流速下过低的总阻力值会在一定程度上放大由数据采集、来流不均匀性等因素引起的不确定度,造成测量的阻力值失真。

2) 对于大尺度船模,阻塞效应在一定程度上会导致船体下沉、船体表面压力梯度增大以及兴波波幅上升,从而引起船模阻力的增加,但对平均伴流分数的影响很小;简化田村公式能有效降低由阻塞效应给阻力预报带来的不确定度。

3) 流场中湍流强度的增大将导致船舶阻力值增加,而湍流强度沿流向会出现线性衰减,故需根据其衰减程度设置适当的入口湍流强度以减小CFD的不确定度。

参考文献:

- [1] 刘桂杰,郭春雨,李茂华,等. 船舶阻力图谱计算与模型试验结果比较分析[J]. 中国舰船研究, 2014, 9(3): 38-42.
LIU G J, GUO C Y, LI M H, et al. Analysis and comparison of model trial results and ship resistance atlas calculation[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2014, 9(3): 38-42 (in Chinese).
- [2] ZHU G C, CHEN Z G, DAI Y. A numerical investigation on hydrodynamic characteristics of the circulating water channel[J]. Ocean Engineering, 2021, 236: 109564.
- [3] FENG Y K, CHEN Z G, DAI Y, et al. Multidisciplinary optimization of an offshore aquaculture vessel hull form based on the support vector regression surrogate model[J]. Ocean Engineering, 2018, 166: 145-158.
- [4] 汪向前. 太阳能AUV概念设计与水动力性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
WANG X Q. Conceptual design and hydrodynamic performance optimization of solar-powered AUV[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021 (in Chinese).
- [5] 童寿龙,陈作钢. 循环水槽船模阻力试验不确定度分析[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(4): 144-152.
TONG S L, CHEN Z G. Uncertainty analysis of ship model resistance measurement in circulating water channel[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(4): 144-152 (in Chinese).
- [6] 赵大刚,郭春雨,阚梓. 拖曳水池阻塞效应对不同船型影响数值研究[J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(6):

- 575–583.
ZHAO D G, GUO C Y, KAN Z. Numerical study of influence of blockage effect of towing tank on different ship types[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2016, 56(6): 575–583 (in Chinese).
- [7] TAMURA K. Study on the blockage correction[J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1972, 1972(131): 17–28.
- [8] 刘晗, 马宁, 顾解仲. 考虑侧壁效应修正的循环水槽船模斜航试验水动力计算 [J]. *上海交通大学学报*, 2017, 51(2): 142–149.
LIU H, MA N, GU X C. Calculation of the hydrodynamic forces of ship model oblique towing test in circulating water channel by considering side wall effect correction[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2017, 51(2): 142–149 (in Chinese).
- [9] 寇莹. 循环水槽阻塞效应的数值研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
KOU Y. Numerical study on the blockage effect of a circulating water channel[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014 (in Chinese).
- [10] VICKERY B J. Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1966, 25(3): 481–494.
- [11] NAKAMURA Y, OHYA Y. The effects of turbulence on the mean flow past two-dimensional rectangular cylinders[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1984, 149: 255–273.
- [12] 童寿龙. 循环水槽船模阻力试验不确定度分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
TONG S L. Uncertainty analysis of ship model resistance measurement in circulating water channel[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2020 (in Chinese).
- [13] 周广利, 黄德波, 李凤来. 船模拖曳阻力试验的不确定度分析 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2006, 27(3): 377–381, 390.
ZHOU G L, HUANG D B, LI F L. Uncertainty analysis of ship model towing resistance test[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2006, 27(3): 377–381, 390 (in Chinese).
- [14] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598–1605.
- [15] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201–225.
- [16] 孙寒冰, 肖佳峰, 王伟, 等. 船舶操纵水动力导数的数值求解及敏感度分析 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(1): 60–70.
SUN H B, XIAO J F, WANG W, et al. Numerical solution and sensitivity analysis of hydrodynamic force derivatives on maneuverability prediction[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(1): 60–70.
- [17] ROACHE P J. Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1994, 116(3): 405–413.

相关论文

- [1] 陈宇婷, 许士华, 时嘉昊, 等. 基于 STAR-CCM+的小型无人双体船水动力性能分析 [J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(5): 73–82. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.02936
- [2] 钟诗蕴, 孙鹏楠, 吕鸿冠, 等. SPH 理论和方法在高速水动力学中的研究进展 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(3): 29–48. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.02758
- [3] 李乐宇, 吴建威, 万德成. 基于 CFD 的带附体 KCS 船在波浪中的阻力及纵摇优化 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(2): 63–72. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.02169
- [4] 吕帮俊, 黄斌, 彭利坤. 基于 SR-UKF 的潜艇水动力系数辨识方法 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(3): 44–49. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.01893
- [5] 孙雷, 陆婷婷, 邓潇潇, 等. FPSO 水动力特性的完全非线性数值模拟 [J]. *中国舰船研究*, 2020, 15(1): 95–106. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.01726
- [6] 张明霞, 韩兵兵, 卢鹏程, 等. 基于 STAR-CCM+的小水线面三体船阻力数值仿真 [J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(4): 79–85. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.01128