

计及操舵效应的船用舵二维水动力数值模拟

侯立勋¹, 韩野², 叶礼裕³, 王超³

1. 山东科技大学 海洋科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 天津昊野科技有限公司, 天津 300401;

3. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为了揭示船用舵在动态操舵过程中的水动力特性,利用黏流计算流体动力学(CFD)技术建立了船用舵动态操舵水动力计算策略。基于静态试验结果研究确定最佳网格划分策略及静态计算时间步;开展远场边界影响分析,研究确定最佳远场边界,并基于静态分析结果研究确定最佳动态操舵时间步。结果表明,操舵效应对舵周围流场和水动力性能存在显著影响,使失速延迟,失速角随操舵速度的增加而变大。在动态操舵过程中,舵剖面的水动力最大值显著大于静态数值模拟结果,但动态操舵在静态失速前的效率显著小于静态效率,而在静态失速后的效率大于静态效率。研究策略和结论可为船用舵的设计、操作和性能预测提供技术支持。

关键词:船用舵;操舵效应;最佳时间步;远场边界;水动力特性

中图分类号:U664.33

文献标志码:A

Numerical simulation of two-dimensional hydrodynamic performance of marine rudder considering steering effect

HOU Lixun¹, HAN Ye², YE Liyu³, WANG Chao³

(1. College of Ocean Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Tianjin Haoye Technology Co., Ltd., Tianjin 300401, China;

3. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To reveal the hydrodynamic characteristics of marine rudders during dynamic steering process, this study established a hydrodynamic calculation strategy for dynamic steering by using viscous flow computational fluid dynamics (CFD) technology. Based on the static test results, the optimal mesh generation strategy and static calculation time step were determined. The influence analysis of the far-field boundary was carried out to determine the optimal far-field boundary. Based on the static analysis results, the optimal dynamic steering time step was determined. The results show that the steering effect has a significant influence on the flow field and hydrodynamic performance around the rudder and delays stall, and the stall angle increases with the increase of steering speed. During the dynamic steering process, the maximum hydrodynamic force of the rudder section is significantly greater than the static numerical simulation result. However, the efficiency of dynamic steering is significantly lower than the static efficiency before static stall, while it is higher than the static efficiency after static stall. The relevant research strategies and conclusions will provide technical support for the design, operation and performance prediction of marine rudders.

Key words: marine rudder; steering effect; optimal time step; far-field boundary; hydrodynamic characteristics

舵是船舶最重要的操纵装置,对船舶的航行安全至关重要。开展船用舵的水动力性能研究,可为船用舵的设计、操作和性能评估提供技术支持。

收稿日期:2025-02-24

基金项目:中国博士后科学基金项目(2020M680935)

作者简介:侯立勋(1986—),男,河南新乡人,教授,博士,从事船舶推进器及节能增效技术研究。E-mail:07093129@163.com

为了改善船舶操纵性并实现节能减排,人们围绕船用舵开展了较为系统的研究,提出多种新型舵,包括扭曲舵^[1]、舵附推力鳍^[2]、襟翼舵^[3]、门舵^[4-5]、马格努斯效应舵^[6]等,可一定程度上提高船舶航行效率^[7],有效改善船舶操纵性^[8],被广泛应用到各类船舶上。Hou 等^[9]充分汲取现有船用舵的优点,提出一种新型扰流舵,有效弥补了有关舵的不足,具有很好的应用前景。目前,基于黏流计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)的数值计算已成为船海领域水动力评估常用且有效的手段^[10-12]。针对船用舵,刘江波等^[13]利用 FLUENT 软件开展了船用敞水舵水动力数值模拟。结果表明,数值模拟对敞水舵水动力性能研究和设计具有重要意义。田森杰^[14]采用黏流 CFD 技术对襟翼舵在敞水情况下的水动力性能进行了数值模拟,并研究了船体相对水流有侧滑角情况下对襟翼舵水动力的影响,将受船体影响时的襟翼舵舵力的数值模拟结果应用到了船舶回转半径的计算中。随着 CFD 技术的发展和计算能力的提升,人们实现了船用舵更为精细的流场和性能分析,Liu 等^[15]系统评估了二维舵剖面的水动力特性,建立了舵剖面构型与船舶操纵性能的定量关系;林钦城等^[16]通过求解雷诺平均纳维-斯托克斯(Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS)方程并选取剪切应力传输(shear stress transport) $k-\omega$ 湍流模型(SST $k-\omega$ model),对不同参数下的 NACA00 系列敞水舵模型黏性流场进行了数值模拟,对其水动力性能进行了数值预报,重点探究了几何参数对敞水舵水动力性能的影响。

有关船用舵的最新创新已通过数值计算得到严格验证。Ahn 等^[17]利用数值方法分析了大型集装箱船 X 形扭曲舵的水动力性能,发现采用 X 形扭曲舵可提高航速,且操纵性优异,特别是该舵具有很好的左右舷操纵平衡性。Tahsinu 等^[18]采用 CFD 研究了鱼尾形剖面对舵水动力特性的影响,结果表明,此类舵能在较低攻角下产生较大的升力,适用于拖船等特殊船型。Shin 等^[19]计及船尾伴流的影响研究了扭曲舵的水动力特性,证明了扭曲舵具有优异的失速延迟特性和更高的升阻比,其数值预测结果与试验值吻合良好。类似地,杨洋等^[20]采用 RANS 方程研究了襟翼舵主副舵间隙大小与尺度效应对其水动力性能的影响,得到了不同间隙大小与缩尺比下的襟翼舵升力阻力和压力分布,并对周围涡结构与流场进行分析,发现升力随着缝隙增大而减小、阻力先减小再增大的规律。

湍流模型的发展进一步增强了数值计算的工程应用能力。Tong 等^[21]采用大涡模拟(large eddy simulation, LES)方法量化了非对称舵对螺旋桨推力脉动的影响,建立了舵角与瞬态力特性之间的相关性。Hou 等^[9]提出一种新型扰流舵,利用分离涡模拟(detached eddy simulation, DES)湍流模型证明了其水动力效率相比传统构型有显著提升。Hou 等^[22]进一步开展了二维参数研究,以确定最佳适配舵角和扰流板张开角,并进一步研究了扰流舵非定常特性和结构优化,确定了扰流舵最佳构型。Zhang 等^[23]建立了分离涡模拟-有限体积法(DES-finite volume method, DES-FVM)耦合方法,研究了船用舵在螺旋桨尾流中的振动模态。

由上述分析可知,现有研究为船用舵的设计、性能评估和工程应用提供了较为系统的方法和技术手段。但是,相关研究主要局限于静态工况,未考虑操舵效应的影响。船舶在实际航行中需经常打舵以保持航向或实现转向,操舵效应对舵性能存在显著影响,故船用舵在动态操舵过程中的水动力性能与静态工况存在显著差异,有必要对船用舵在动态操舵情况下的水动力性能开展研究。本研究利用黏流 CFD 技术建立船用舵水动力性能计算模型,为了减少计算量,以舵剖面为研究对象开展二维水动力数值模拟;提出动态操舵计算策略,开展船用舵动态操舵数值模拟,以揭示操舵效应对船用舵水动力性能的影响。

1 方法、计算域及网格划分

本研究利用 Menter 提出的 SST $k-\omega$ 湍流模型构建船用舵二维水动力数值计算模型。为了提高计算模型的稳定性,对湍流项采用二阶迎风格式;采用全 $y+$ 壁面处理方法,以确保对壁面边界层内的流动和湍流参数进行准确预测。本研究重点关注舵剖面在不同工况下的升力 L 、阻力 D 和舵杆扭矩 M 。图 1 给出了 2D 模拟中表达这些水动力参数的 O - XY 坐标系,原点 O 位于弦线、舵杆上, X 轴指向下游, Y 轴指向上方;升力和阻力分别沿 Y 轴和 X 轴方向;舵杆扭矩以原点 O 为基点,沿逆时针方向为正;舵角 α 为弦线与来流 V_0 之间的夹角。

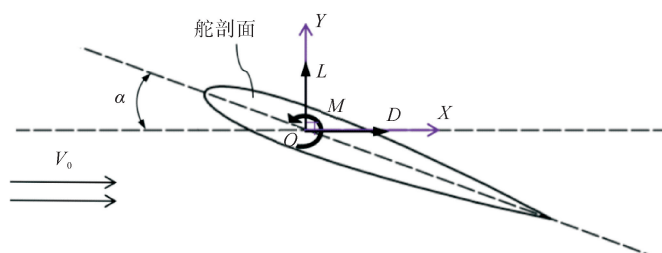


图1 坐标系及水动力参数表征

Fig. 1 Coordinate system and hydrodynamic parameter characterization

本研究涉及的舵剖面水动力参数用无因次系数来表征,包括升力系数 C_L 、阻力系数 C_D 和舵杆扭矩系数 C_M ,具体计算式为:

$$C_L = \frac{L}{0.5\rho V_0^2 C}, \quad (1)$$

$$C_D = \frac{R}{0.5\rho V_0^2 C}, \quad (2)$$

$$C_M = \frac{M}{0.5\rho V_0^2 C^2}. \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度, C 为弦长。

本研究利用 STAR-CCM+ 软件开展数值模拟,研究的舵剖面为 NACA0012 对称翼型,舵杆和舵叶前端距离为 $0.3C$ (C 设为 1.0 m)。建立如图 2 所示的二维矩形计算域,由舵剖面上下游分别延伸 L_F 和 L_A 的距离,计算域半宽为 B ,计算域的具体大小需进一步研究确定。为了提高数值模拟的精度,在舵剖面近场设置半径 $r_1 = 7.5C$ 的圆形近场加密区进行网格细化,并且在舵剖面周围设置半径 $r_2 = 2.5C$ 的小圆形附近加密区作进一步网格加密,以捕获舵剖面周围的流场特性。舵剖面前方和左侧边界设为速度入口边界条件,后方和右侧边界设为压力出口边界条件。

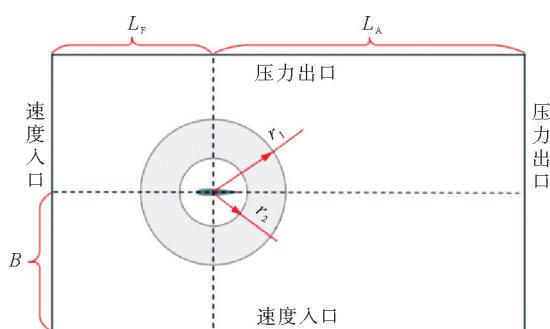


图2 计算域示意图

Fig. 2 Diagram of computational domain

本研究重点探讨舵剖面在动态操舵过程中的水动力特性,准确模拟动态操舵过程。目前,动网格、滑移网格和重叠网格技术已被广泛用于动态水动力数值模拟,但相关方法存在网格相关位置和信息交换易出现错误的问题。为了提高舵剖面动态操舵模拟的稳定性和精度,本研究针对整个计算域提出舵剖面动态操舵计算策略,如图 3 所示。具体而言,保持来流方向不变,设整个计算域相对原点 O 的旋转速度 Ω ,以实现舵剖面的操舵运动。考虑到操舵的左右对称性,仅考虑向右操舵的情况,操舵过程中,计算域右侧和后方边界为出口,故设为压力出口边界条件。设来流速度 V_0 为 1.782 m/s ,流体密度 ρ 为 997.561 kg/m^3 ,相应雷诺数为 2.0×10^6 。

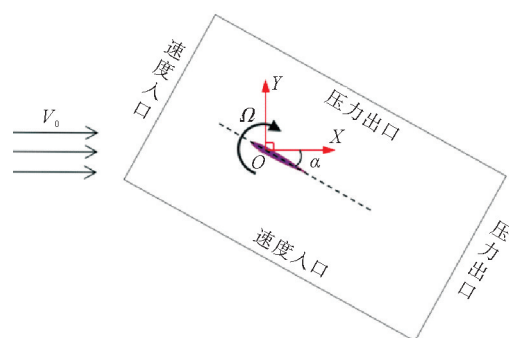


图3 动态操舵示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dynamic steering

图 4 给出了相应的网格划分图,整个计算域采用多边形网格,对舵剖面近场和周围进行了网格加密。

此外,考虑到舵剖面前缘和后缘存在显著的压力梯度,对这些区域进行额外的网格细化。在舵剖面表面设置边界层,边界层增长率为 1.1,第一层厚度设为 $6.1 \times 10^{-6} C$,相应的 $y+$ 值为 0.5,满足 SST $k-\omega$ 湍流模型的要求,边界层总厚度约为舵剖面表面的网格尺寸。

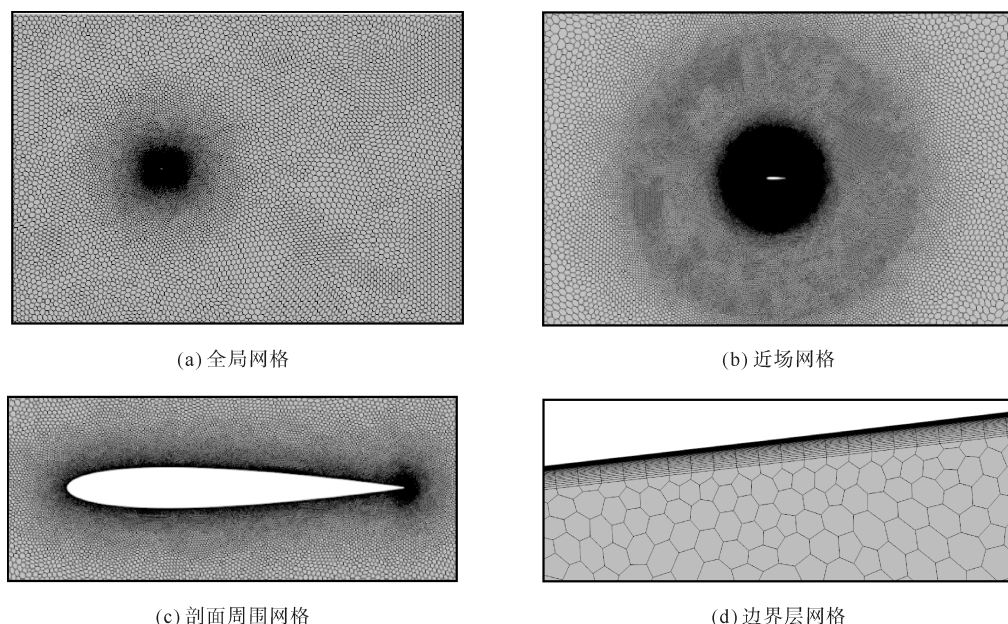


图 4 网格划分

Fig. 4 Mesh generation

2 网格划分策略、时间步及方法验证

2.1 网格无关性及静态计算时间步分析

利用网格无关性分析确定最佳网格划分策略,计算域自舵剖面向上下游分别延伸 $30C$ (L_F) 和 $60C$ (L_A) 的距离,半宽 B 为 $30C$ 。采用 Stern 等^[24]提出的三网格法开展网格无关性分析,生成粗网格(G01)、中网格(G02)和细网格(G03)三套网格。基于 G02,以 $\sqrt{2}$ 倍增加或 $1/\sqrt{2}$ 倍减少网格尺寸得到 G01 和 G03,由于第一层边界层厚度由湍流模型确定,所以三套网格具有相同的边界层底层厚度,仅通过改变边界层的层数来调整边界层的总厚度,使其约等于舵剖面表面网格尺寸。动态调整 G02 网格尺寸,直到计算结果随网格尺寸的变化很小。对于静态计算,时间步设为 0.001 s。

表 1 给出了舵角分别为 10.15° 和 15.25° 下的网格无关性分析结果,相应的 G01、G02 和 G03 的网格数分别为 0.85×10^5 、 1.21×10^5 和 1.77×10^5 ,收敛比值(R_G)、精度阶数(P_G)、网格非确定性(U_G)的定义及计算式详见文献[14]。对于 G02,远场边界及计算域网格尺寸为 $1.0C$,近场加密区和附近加密区网格尺寸分别为 $0.1C$ 和 $0.02C$,网格沿剖面弦向间距为 $1.65 \times 10^{-3}C$,边界层层数为 35,第一层厚度对应的 $y+$ 值为 0.5,G01 和 G03 边界层层数分别为 38 和 30。结果表明,收敛比值均为 $0 < R_G < 1$,水动力表现出单调变化的趋势,G02 和 G03 之间的网格变化对结果的影响很小,获得了足够小的网格非确定性 U_G 。所以,三套网格均可获得较好的网格无关

表 1 网格无关性分析结果

Table 1 Results of grid independence analysis

参数	$\alpha = 10.15^\circ$		$\alpha = 15.25^\circ$	
	C_L	C_D	C_L	C_D
G01	1.066 7	0.014 00	1.408 0	0.029 8
G02	1.061 4	0.013 74	1.428 6	0.029 3
G03	1.058 0	0.013 69	1.435 0	0.029 2
R_G	0.642	0.192	0.311	0.200
P_G	1.281	4.757	3.373	4.644
UG%G03	0.575	0.643	0.691	0.599

性。结果表明,收敛比值均为 $0 < R_G < 1$,水动力表现出单调变化的趋势,G02 和 G03 之间的网格变化对结果的影响很小,获得了足够小的网格非确定性 U_G 。所以,三套网格均可获得较好的网格无关

性。为了减小计算量,选用 G02 网格划分策略做进一步研究。

在网格无关性分析的基础上进一步研究了时间步 t_s 对静态数值模拟结果的影响。基准时间步取 $0.25 \times 10^{-3} \text{ s}$,以 2 倍递增获得另外 8 个时间步。考虑到舵剖面在较大舵角下具有更明显的非稳定性,相应的最佳时间步长较小^[15]。因此,选择 15.25° 舵角开展时间步研究。图 5 给出了舵剖面在不同时间步下的升力系数和阻力系数。由图 5 可以看出,在研究的时间步范围内,升力和阻力不随时间步变化。所以,时间步对 NA-CA0012 型舵剖面水动力性能的影响在低雷诺数下可以忽略不计,故依然采用 0.001 s 作为后续静态计算的时间步。

2.2 远场边界影响及方法验证

在网格划分策略和时间步研究的基础上分析远场边界对舵剖面水动力性能的影响,并结合试验结果,确定最佳计算域大小。通过放大远场边界以获得不同尺寸的计算域,引入放大因子 λ 来表示放大后的计算域尺寸与基准尺寸的比值,基准尺寸取 $L_F = B = 30C$ 和 $L_A = 60C$ 。放大因子 λ 取 $1.0 \sim 5.0$,每隔 0.5 取一个值。为了避免网格划分对计算结果的影响,不同计算域采用完全相同的远场边界和近场网格尺寸和划分策略。

图 6 给出了舵角 $\alpha = 15.25^\circ$ 时不同大小计算域获得的舵剖面升力系数和阻力系数。由图 6 可以看出,计算域大小对阻力存在显著影响,而对升力影响较小,所以在本研究的计算域尺寸范围内,远场边界对舵剖面水动力性能的影响主要体现在对来流方向分力的影响上。总体而言,随着计算域尺寸的增加,舵升力呈现先增后减的趋势,而阻力单调递减。当放大因子 $\lambda > 4.0$ 时,远场边界对舵剖面水动力性能的影响可以忽略不计。表 2 给出了 $\lambda = 4.0$ 时的水动力值及其相对试验值的误差,相关试验值来自文献[16],可知该计算域可取得理想的计算结果,所以本研究采用 $\lambda = 4.0$ 的计算域开展后续计算。

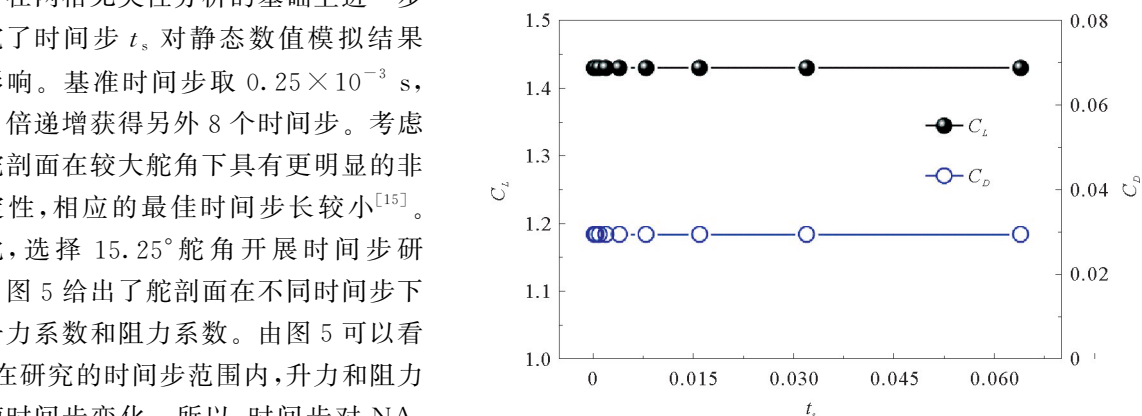


图 5 不同时间步下升力和阻力 ($\alpha = 15.25^\circ$)

Fig. 5 Lifts and drags for different time steps at $\alpha = 15.25^\circ$

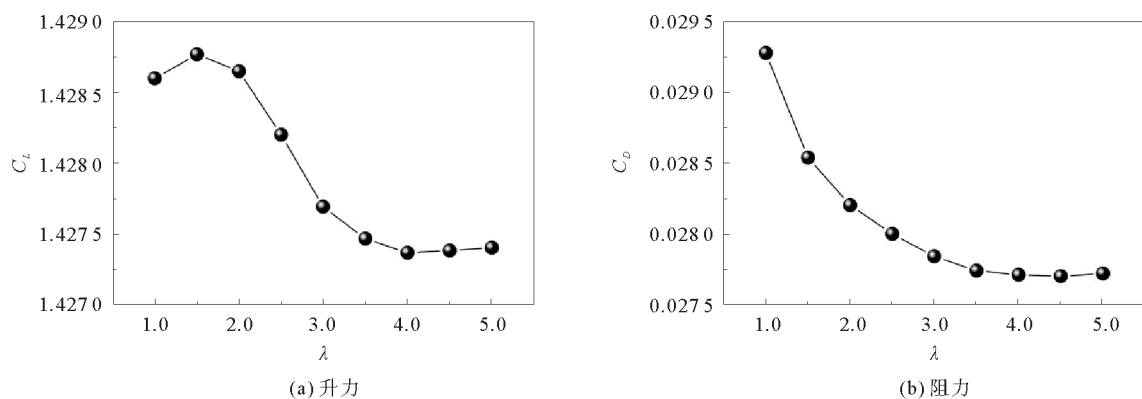


图 6 不同计算域获得的升力和阻力 ($\alpha = 15.25^\circ$)

Fig. 6 Lifts and drags in different computation domains at $\alpha = 15.25^\circ$

2.3 动态操舵时间步确定

在动态操舵过程中,桨叶附近流场和水动力性能变得更为复杂,呈现显著的非稳态特性,相对静态数值模拟,需采用更小的时间步以提高动态操舵水动力性能计算的精度。本节重点研究时间步对动态操舵水动力性能计算结果的影响,确定最佳时间步。本研究的操舵速度 Ω 为 $1 \sim 4^\circ/\text{s}$,考虑到舵剖面的非稳态

水动力特性随着操舵速度的增加变得更为显著,所以研究舵剖面在操舵速度为 $4^\circ/\text{s}$ 、不同时间步 t_d 下的非稳态水动力性能来确定最佳时间步。

以舵剖面静态模拟的最佳时间步 0.001 s 为基准时间步,以 0.5 倍比例依次减小获得额外 6 个时间步 ($5 \times 10^{-4} \sim 1.5625 \times 10^{-5}\text{ s}$),作为动态操舵时间 t_d 。为了真实模拟动态操舵过程,先静态计算至收敛状态,再激活操舵速度。图 7 给出了舵剖面在不同时间步下动态操舵的水动力参数(升力系数和阻力系数)变化曲线。由图 7 可以看出,一定操舵速度下利用不同的时间步可获得变化趋势相近的水动力变化曲线,特别是在失速前,利用不同时间步可获得基本相同的水动力计算结果。当处于失速(舵角约 26° 位置)状态后,时间步对水动力计算结果的影响逐渐趋于显著,尤其当时间步较大时该现象更明显,而当时间步小于 $2.5 \times 10^{-4}\text{ s}$ 时,其对计算结果的影响可以忽略不计。

因此,为了保证数值模拟精度并提高计算效率,本研究采用 $t_d = 2.5 \times 10^{-4}\text{ s}$ 作为后续动态操舵数值模拟时间步。

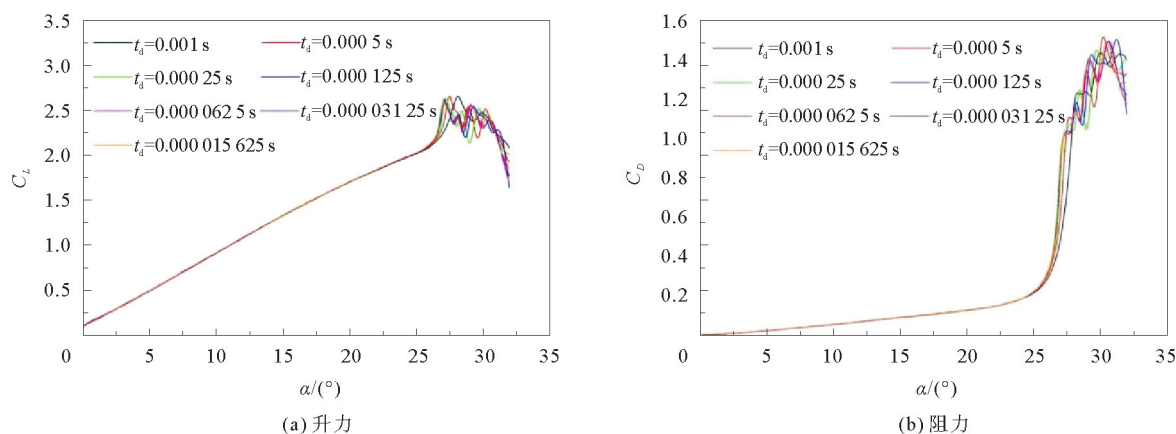


图 7 不同时间步下动态操舵水动力响应

Fig. 7 Hydrodynamic responses in the dynamic steering process using different time steps

3 船用舵动态操舵二维水动力特性

为了揭示操舵效应对船用舵水动力性能的影响,本研究以不同操舵速度对舵从舵角 0° 向一侧 32° 进行动态打舵,操舵速度 Ω 分别取 $1, 2, 3$ 和 $4^\circ/\text{s}$ 。为了直观分析动态操舵效应对船用舵水动力计算结果的影响,计算获得舵剖面在 Ω 为 0 、舵角为 $0^\circ \sim 32^\circ$ 时的静态水动力参数作为对比。静态水动力数值模拟时,每隔 2° 选取一个计算点。

图 8 给出了舵剖面在不同操舵速度下的水动力响应。可以看出,无操舵时,舵剖面升力随舵角的变大呈先增后减的变化趋势,而其阻力呈递增的趋势;舵剖面在 16° 舵角附近出现失速,失速后升力减小,阻力急剧增加。当动态操舵时,水动力响应与静态下的计算结果呈现类似的变化趋势,但操舵效应使失速延迟,失速角变大;随着操舵速度的增加,失速角逐渐变大,该变化趋势随操舵速度的增加逐渐减小。对于本研究的算例,在雷诺数较小且操舵速度较大时,操舵效应使升力在失速后仍然呈现明显的增长趋势,且阻力的增长趋势更为明显。

当舵角小于 16° 时,动态操舵下的升力小于静态计算结果且随着操舵速度的增加而减小,而相应的阻力呈现相反趋势,所以舵效率随着操舵速度的增加而减小。当舵角大于 16° 时,动态操舵下的升力显著大于静态计算结果,其阻力也整体上大于静态计算结果。所以,当舵角大于 16° 时,舵在动态操舵下的水动

力负荷明显大于静态条件下的结果。

由图 8(c)可知,在失速前舵杆力矩随着操舵速度的增加而增大,这表明随着操舵速度的提高,舵叶剖面合力的作用线向舵叶后缘方向移动。随着失速的延迟,合力作用线向舵剖面后缘移动。

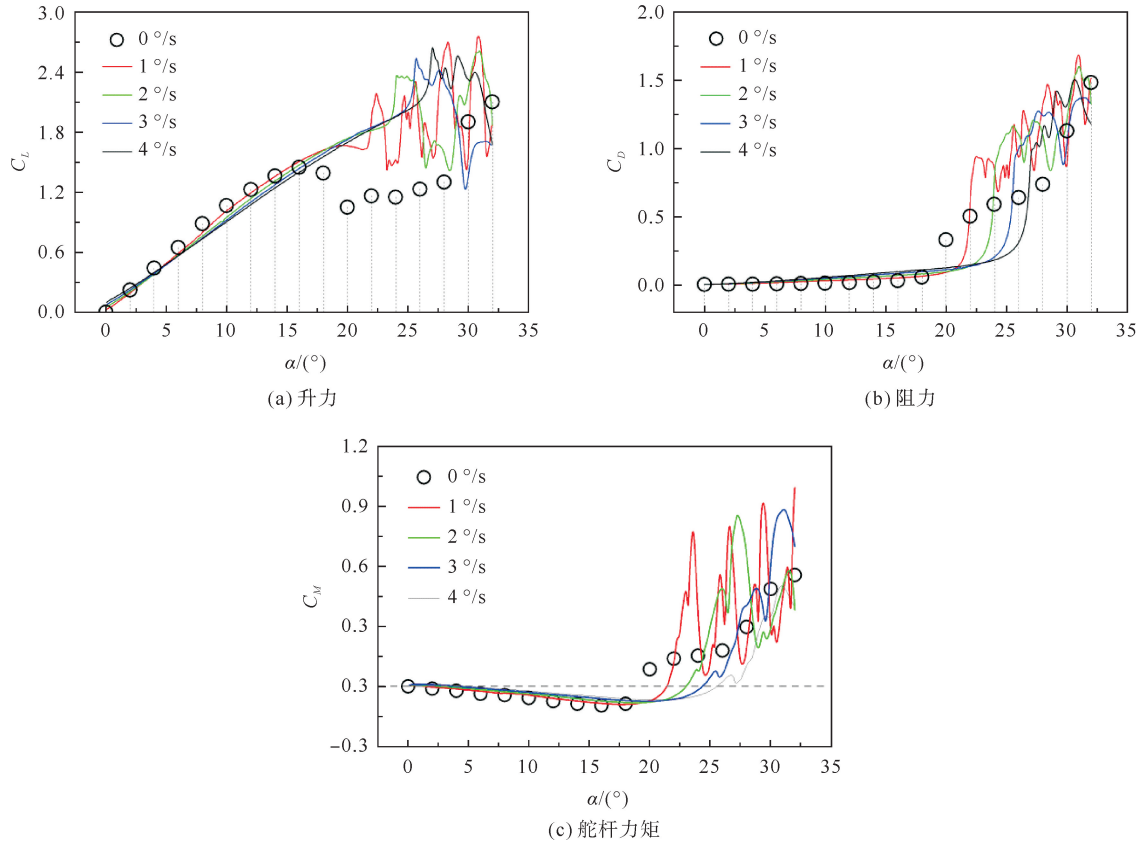
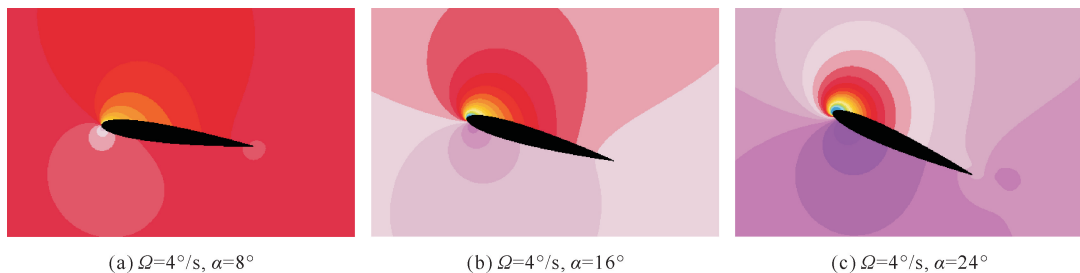


图 8 不同操舵速度下的动态操舵水动力响应

Fig. 8 Hydrodynamic responses in the dynamic steering process under different rotational speeds

为了更好地揭示动态操舵效应对舵水动力特性的影响,提取舵剖面在动态操舵过程中不同舵角位置处的周围流场压力分布及相应的湍流动能。考虑操舵速度为 $4^\circ/\text{s}$ 的情况,并以静态模拟($\Omega=0^\circ/\text{s}$)结果为参考进行对比,分析 8° 、 16° 和 24° 舵角下的计算结果,如图 9 和图 10 所示。对于静态模拟,流场在失速条件下存在显著的非稳态特性,相应的压力和湍流动能结果取计算收敛条件下的时域均值。

由图 9、图 10 可以看出,动态操舵对舵周围流场存在显著影响。舵剖面迎流面附近的高压区和背流面附近的低压区均由前缘驻点向后延伸。相对静态模拟,在静态失速角前动态操舵会显著抑制迎流面高压区,主要将其限制在翼肩前方区域,而使背流面低压区向后得到显著延伸。背流面翼肩前方低压力更有利于升力,而翼肩后方低压力更有利于阻力,迎流面压力对升力和阻力的贡献呈相反的趋势,在失速前动态操舵一定程度上会使升力减小、阻力增加,从而降低效率。



(a) $\Omega=4^\circ/\text{s}$, $\alpha=8^\circ$

(b) $\Omega=4^\circ/\text{s}$, $\alpha=16^\circ$

(c) $\Omega=4^\circ/\text{s}$, $\alpha=24^\circ$

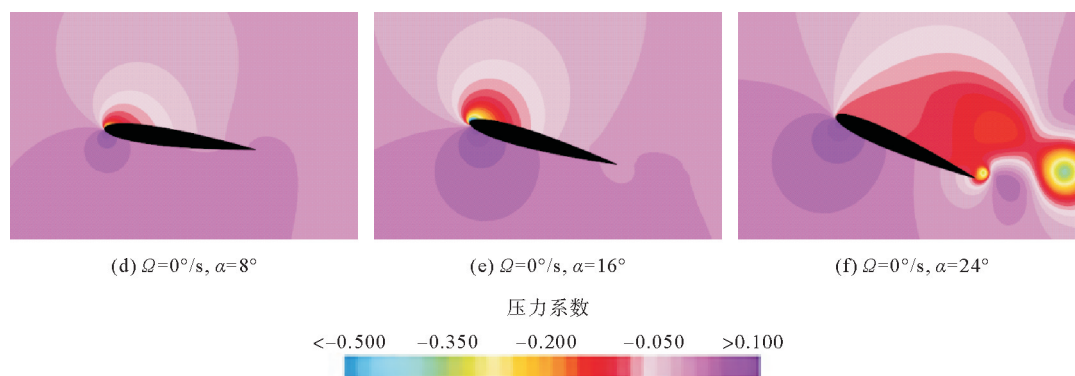


图 9 不同舵角下压力分布

Fig. 9 Pressure distributions under different rudder angles

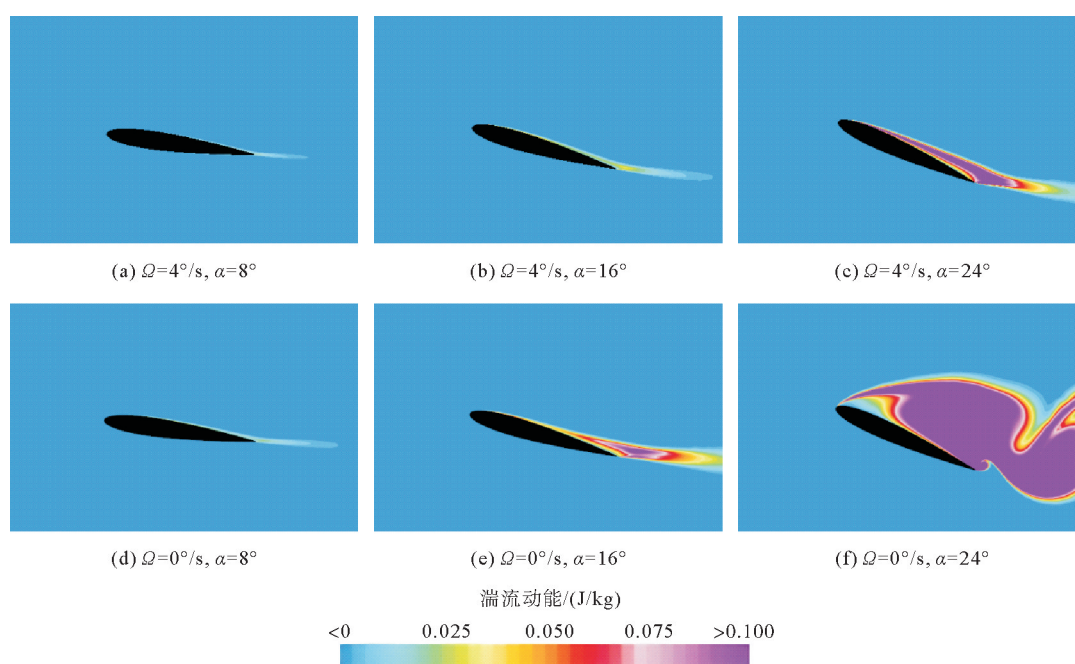
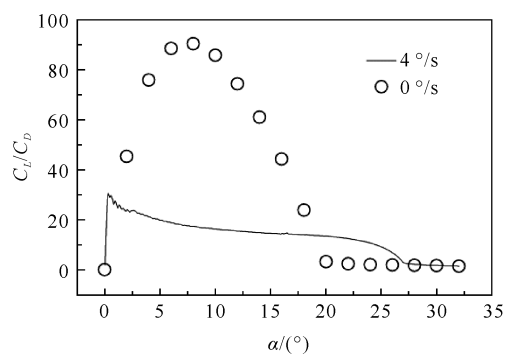


图 10 不同舵角下湍流动能

Fig. 10 Turbulent kinetic energy under different rudder angles

图 10 给出了不同舵角下湍流动能分布。可以看出,相同舵角下,动态操舵下的湍流动能小于其静态结果,该现象在大舵角下更为显著,动态操舵一定程度上可以抑制舵剖面扰动产生的湍流动能,使得湍流能量损失小于静态结果。所以动态操舵下在静态失速前的效率损失主要是由动态操舵改变近场压力引起的。

图 11 给出了 $0^\circ/\text{s}$ 和 $4^\circ/\text{s}$ 操舵速度下的舵效率,静态失速前的效率整体上大于动态操舵效率,静态操舵下,失速后的效率显著降低。在动态操舵失速前的舵角 24° 位置处,舵剖面表面的高、低压峰值得到显著提高,且背流面低压区向前缘收

图 11 $0^\circ/\text{s}$ 和 $4^\circ/\text{s}$ 操舵下的舵效率Fig. 11 Rudder efficiency under $0^\circ/\text{s}$ and $4^\circ/\text{s}$ steering operations

缩,而迎流面的高压区出现显著的向后延伸,舵效率显著大于失速后的静态计算结果。

4 结论

为了深入揭示船用舵在动态操舵过程中的水动力特性,本研究利用黏流 CFD 技术开展船用舵二维动态操舵水动力数值模拟,得到以下结论。

1) 建立二维舵剖面水动力计算模型,利用静态试验结果确定最佳网格划分策略及静态计算时间步;开展了远场边界影响分析,确定了最佳远场边界;基于静态分析,确定了最佳动态操舵时间步。

2) 操舵效应对船用舵水动力性能有显著影响,动态操舵使失速延迟、失速角变大,且操舵速度越大,失速角越大。动态操舵下,舵剖面周围流场压力分布和湍流动能与静态模拟存在显著差异。

3) 船用舵在动态操舵过程中的水动力最大值显著大于静态数值模拟结果,在舵设计过程中,需考虑动态操舵下的水动力负荷,开展结构设计和安全性评估。

本研究仅限于二维尺度分析,相关结论在三维场景应用方面存在一定的局限性,后续将开展船用舵三维水动力特性研究,并考虑船体和螺旋桨的影响。

参考文献:

- [1] KIM J H, CHOI J E, CHOI B J, et al. Twisted rudder for reducing fuel-oil consumption[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2014, 6(3): 715-722.
- [2] OMWERI O E, SHEN H, SU Y. Study on the design procedure of rudder attached thrust fin for merchant ship based on computational fluid dynamics[J/OL]. Ocean Engineering, 2021, 234(6). DOI: 10. 1016/j. oceaneng. 2021. 109263.
- [3] KERWIN J E, MANDEL P, LEWIS S D. An experimental study of a series of flapped rudder[J]. Journal of Ship Research, 1972, 16(4): 225-234.
- [4] SASAKI N, KURIBAYASHI S, FUKAZAWA M, et al. Towards a realistic estimation of the powering performance of a ship with a gate rudder system[J/OL]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(1). DOI: 10. 3390/jmse8010043.
- [5] CAICHEN A, TURKMEN S, PIAGGIO B, et al. Investigation of the manoeuvrability characteristics of a Gate Rudder system using numerical, experimental, and full-scale techniques[J/OL]. Applied Ocean Research, 2020, 106. DOI: 10. 1016/j. apor. 2020. 102419.
- [6] ABRAMOWICZ-GERIGK T, BURCIU Z. Investigations of hydrodynamic force generated on the rotating cylinder implemented as a bow rudder on a large-scale ship model[J/OL]. Sensors, 2022, 22. DOI: 10. 3390/s22239137.
- [7] 黎峰, 胡红斌, 李邦华, 等. 高性能舵的发展及技术现状[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(3): 61-74.
LI Feng, HU Hongbin, LI Banghua, et al. Current development and technology status of high performance rudders[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(3): 61-74.
- [8] LIU J L, QUADVLIEG F, HEKKENBERG F. Impacts of the rudder profile on manoeuvring performance of ships[J]. Ocean Engineering, 2016, 124: 226-240.
- [9] HOU L X, YANG J, HU A K, et al. Hydrodynamic characteristic investigations of a collaborative spoiled rudder under open water conditions[J]. Ocean Engineering, 2022, 253. DOI: 10. 1016/j. oceaneng. 2022. 111251.
- [10] 王澳, 王建华, 万德成, 等. 集装箱船外飘砰击载荷的 CFD 数值分析[J]. 中国造船, 2024, 65(1): 16-29.
WANG Ao, WANG Jianhua, WAN Decheng, et al. CFD analysis on flare slamming load of container ships[J]. Shipbuilding of China, 2024, 65(1): 16-29.
- [11] 朱军区, 侯立勋, 王庆才, 等. 计及展弦比影响的船用舵水动力机理[J]. 大连海事大学学报, 2023, 49(2): 33-41.
ZHU Junqu, HOU Lixun, WANG Qingcai, et al. Hydrodynamic mechanism of marine rudder considering the influence of aspect ratio[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2023, 49(2): 33-41.
- [12] CHILLCCE G, ZENTARI L, HOYDONCK V W, et al. Numerical calculation of hydrodynamic forces on inland waterway vessels during circular motion in shallow and extreme shallow waters[J/OL]. Ocean Engineering, 2025, 318. DOI: 10. 1016/j. oceaneng. 2024. 120095.
- [13] 刘江波, 周玉龙, 李密, 等. 敞水舵水动力的数值模拟[J]. 船舶工程, 2008, 30(1): 8-10.
LIU Jiangbo, ZHOU Yulong, LI Mi, et al. Numerical simulation of rudder hydrodynamic characteristics[J]. Ship Engi-

neering, 2008, 30(1): 8-10.

- [14] 田淼杰. 船用襟翼舵的设计及水动力性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
TIAN Miaojie. Research on the design and the hydrodynamic performance of the ship flap rudder[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [15] LIU J L, QUADVLIEG F, HEKKENBERG R. Impacts of the rudder profile on manoeuvring performance of ships[J]. Ocean Engineering, 2016, 124: 226-240.
- [16] 林钦城, 邹璐, 梅天龙, 等. 不同舵参数对敞水舵水动力性能影响的数值研究[J]. 水动力学研究与进展, 2021, 36(4): 540-546.
LIN Qincheng, ZOU Lu, MEI Tianlong, et al. Numerical study on influence of rudder parameters on hydrodynamic performance of free-stream rudder[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2021, 36(4): 540-546.
- [17] AHN K S, CHOI G H, SON D I, et al. Hydrodynamic characteristics of X-Twisted rudder for large container carriers[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2012, 4(3): 322-334.
- [18] TAHSINU H T, KARIM M M. Effect of fish wedge on the hydrodynamic characteristics of a marine rudder[J]. Procedia Engineering, 2017, 194: 136-143.
- [19] SHIN Y J, KIM M C, LEE J H, et al. A numerical and experimental study on the performance of a twisted rudder with wavy configuration[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2019, 11(1): 131-142.
- [20] 杨洋, 王支林, 耿建明. 基于CFD仿真计算的襟翼舵水动力研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(7): 46-50.
YANG Yang, WANG Zhilin, GENG Jianming. Numerical study on the flap rudder hydrodynamic simulation based on CFD[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(4): 46-50.
- [21] TONG X D, CHEN H Y, DONG X Q, et al. Experimental and numerical investigations on the unsteady thrust of a propeller in presence of an upstream rudder[J/OL]. Ocean Engineering, 2021, 237(4). DOI: 10. 1016/j. oceaneng. 2021. 109644.
- [22] HOU L X, WANG Q C, ZHU J Q, et al. Non-stationary characteristics and structural optimization of CSR section under open water conditions[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2024, 29: 372-386.
- [23] ZHANG W P, NING X S, LI F G, et al. Vibrations of simplified rudder induced by propeller wake[J/OL]. Physics of Fluids, 2021, 33(8). DOI: 10. 1063/5. 0058968.
- [24] STERN F, WILSON R V, COLEMAN H W, et al. Verification and validation of CFD simulations[R]. Iowa: The University of Iowa, 1999: IIHR Report No. 407.

(责任编辑: 齐敏华)