

文章编号: 1005-0523(2025)06-0110-11



基于重叠网格的反转毂帽鳍螺旋桨数值模拟研究

朱文才, 李志荣, 胡国良

(华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 通过对比反转螺旋桨毂帽鳍(CRPBCF)螺旋桨与基准螺旋桨的敞水特性和空化特性, 研究 CRPBCF 对螺旋桨水动力性能的影响。基于 VP1304 螺旋桨桨叶进行几何变换构建 CRPBCF 模型, 采用 STAR-CCM+ 软件中的重叠网格技术和大涡模拟方法开展数值模拟研究, 并通过与实验结果的对比验证了模拟的准确性和可靠性。CRPBCF 螺旋桨较基准螺旋桨水动力性能更优: 在辅桨转速 $n_s = 37.5$ r/s 时, 推进效率最大提升 4.18%, 推力最高提升 7.28%。在空化特性方面, 基准螺旋桨尾流中, 汽相体积分数达到 20% 的等值面清晰可见, 而 CRPBCF 螺旋桨中未出现, 表明其可有效抑制桨毂涡空泡(HVC)的产生。综上所述可知, CRPBCF 螺旋桨能够提高推进效率, 在低进速系数工况下可以提供更大的推力, 能有效抑制 HVC 的产生。

关键词: CRPBCF 螺旋桨; 重叠网格; 大涡模拟; 毂涡空泡

中图分类号: U664.33

文献标志码: A

本文引用格式: 朱文才, 李志荣, 胡国良. 基于重叠网格的反转毂帽鳍螺旋桨数值模拟研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(6): 110-120.

Numerical Simulation of Contra-Rotating Propeller Boss Cap Fins Using Overset Grid Method

Zhu Wencai, Li Zhirong, Hu Guoliang

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: By comparing the open-water characteristics and cavitation characteristics between the contra-rotating propeller boss cap fins (CRPBCF) propeller and the benchmark propeller, this paper investigates the influence of CRPBCF on the hydrodynamic performance of propellers. The CRPBCF model was constructed through geometric transformation of VP1304 propeller blades. Numerical simulations were conducted using the overset grid technique and large eddy simulation (LES) in STAR-CCM+. The computational results were validated against experimental data, demonstrating good accuracy and reliability. The results demonstrate that the CRPBCF propeller exhibits superior hydrodynamic performance compared to the benchmark propeller. At an auxiliary propeller speed of $n_s = 37.5$ r/s, it achieves maximum efficiency gains of 4.18% and thrust improvements up to 7.28%. In terms of cavitation characteristics, a distinct vapor volume fraction isosurface of 20% is clearly observed in the wake flow of the benchmark propeller, whereas no such phenomenon was observed for the CRPBCF propeller. This demonstrates that CRPBCF can effectively suppress the generation of hub vortex cavitation (HVC). In summary, the results demonstrate that the CRPBCF propeller not only enhances propulsive efficiency but also delivers greater thrust under low advance coefficient conditions while effectively suppressing the occurrence of HVC.

收稿日期: 2025-06-25

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目(20242BAB25260)

Key words: CRPBCF propeller; overset grid method; LES; hub vortex cavitation

Citation format: ZHU W C, LI Z R, HU G L. Numerical simulation of contra-rotating propeller boss cap fins using overset grid method[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(6): 110–120.

螺旋桨是船舶推进系统的核心部件,其性能优化对船舶能效提升和环保减排具有重要意义。通过优化螺旋桨设计、改进材料工艺或创新推进方式,能够显著降低船舶的能源消耗和运营成本^[1],这不仅契合全球航运业节能减排的发展趋势,也为船舶设计与运营提供了重要的经济优化路径。

从环保角度看,提升螺旋桨推进效率可直接减少船舶的碳排放和环境污染,对实现国际海事组织(IMO)的减排目标和推动绿色航运发展具有关键作用^[2]。此外,高效螺旋桨技术还能增强船舶的动力性能与航行稳定性,为大型化、智能化船舶的研发提供技术支持,从而促进船舶工业的技术升级和可持续发展。这一领域的研究不仅经济效益显著,还为应对气候变化和海洋环境保护提供了可行的技术解决方案。

近年来,螺旋桨优化研究在理论与应用层面均取得显著成果。Wang等^[3]的研究表明,采用混合吊舱对转螺旋桨推进可提高船舶总体推进效率约4.1%,其螺旋桨尾流中的高速尾迹区更长,绝对速度更大。Zhang等^[4]通过RANS方法数值模拟发现,对转螺旋桨系统中,前桨叶片载荷的波动主要源于船体-螺旋桨相互作用,而后桨的平均载荷及波动模式则显著受到对转桨间相互作用的影响。在附加节能装置方面,Mizzi、Kim等^[5-6]对螺旋桨毂帽鳍的数值研究表明,加装毂帽鳍能有效提升螺旋桨的

敞水效率和推力。王睿等^[7]对Kappel桨的研究揭示,其梢端弯折结构能有效抑制梢部绕流,在设计工况下,Kappel桨的敞水效率比传统螺旋桨高出约1.44%。王超等^[8]则发现,将CTL螺旋桨的端板宽度减小50%后,低进速工况下的推力最多可提高10%。

采用运动参考系(MRF)方法实现螺旋桨的旋转,在模拟螺旋桨的真实旋转运动存在一定的局限性。针对这一局限,有许多研究者采用了重叠网格。例如:胡健等^[9]采用重叠网格技术和大涡模拟方法,详细分析了螺旋桨速度场和涡量场,结果表明LES能准确捕捉梢涡形态。Jin等^[10]运用非定常RANS求解器与重叠网格,成功模拟了滑翔艇在静水及波浪中的运动,结果与实验数据高度吻合。

现有研究多采用运动参考系方法实现螺旋桨的旋转,且针对CRPBCF螺旋桨的研究较为匮乏。为此,本研究将重叠网格技术和大涡模拟方法相结合,采用单相流模型研究其敞水特性,并基于欧拉多相流模型对比分析基准螺旋桨与CRPBCF螺旋桨的空化特性。

1 螺旋桨几何模型

本研究采用SVA提供的VP1304可调螺距螺旋桨作为研究对象,该螺旋桨桨叶与桨毂连接处存在结构性的微小间隙,在数值模拟过程中对该间隙予以忽略。螺旋桨的几何模型如图1所示,表1列出

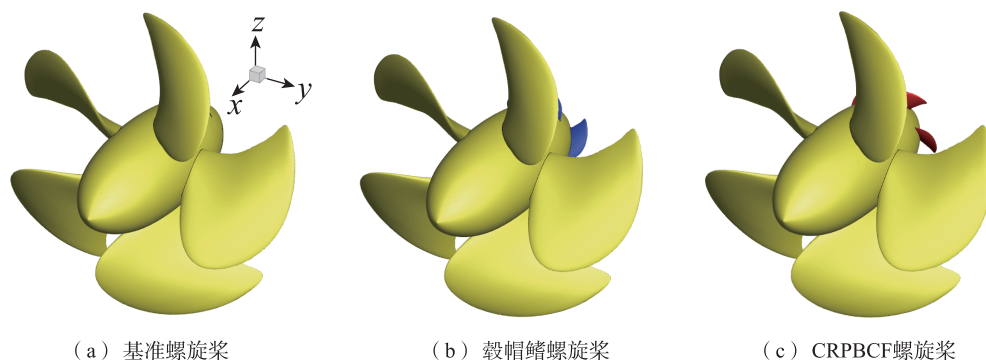


图1 螺旋桨几何模型

Fig. 1 Geometric models of propellers

表1 VP1304螺旋桨几何参数

Tab.1 Geometric Parameters of VP1304 Propeller

参数	数值
直径/m	0.25
0.7R弦长/m	0.104
盘面比	0.779
叶数	5
侧斜角/(°)	18.837
毂径比	0.3

了该螺旋桨的主要几何参数。为方便研究,我们将螺旋桨命名为基准螺旋桨,毂帽鳍螺旋桨,和CRP-BCF螺旋桨。并把CRPBCF螺旋桨中的两个螺旋桨分别命名为主螺旋桨和辅螺旋桨。

2 数值模型

重叠网格技术和大涡模拟方法应用于本研究。在求解过程中,通过预测-校正方法实现了连续性方程和动量方程之间的耦合求解,确保流场计算的守恒性。

1) 连续性方程

质量守恒定律在流体力学中的数学表达(即连续性方程)可基于控制体方法建立,可表示为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为密度, t 为时间, \mathbf{v} 为连续体速度。

2) 动量方程

动量方程描述了流体运动时的动量守恒规律,可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

式中: p 为静态压力, \otimes 为克罗内克积, $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ 为应力张量, $\rho \mathbf{g}$ 和 \mathbf{F} 分别为重力和外加力(例如,分散相相互作用产生的力)。应力张量 $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ 的表达式如下

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} = \mu \left[(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{I} \right] \quad (3)$$

大涡模拟方法因其在涡空化模拟中的优越性而被广泛采用^[11-12]。该方法的本质是瞬态模拟,其特点在于直接解析流场中的大尺度湍流结构,同时对小尺度涡采用模化处理。值得注意的是,该方法基于小尺度涡具有相似特性的假设。每个求解变量 ϕ 分为滤波值 $\tilde{\phi}$ 及亚格子值 ϕ' 存在以下关系

$$\phi = \tilde{\phi} + \phi' \quad (4)$$

式中: ϕ 代表速度分量、压力、能量或物质浓度。瞬

时流变量的滤波值定义为

$$\tilde{\phi}(t, \mathbf{x}) = \iint_{-\infty}^{\infty} G(\mathbf{x} - \mathbf{x}', \Delta) \phi(t, \mathbf{x}') d\mathbf{x}' \quad (5)$$

式中: $G(\mathbf{x}, \Delta)$ 是一个滤波函数,其滤波宽度 $\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3}$ 。

计算域由流体域和包含螺旋桨的重叠区域两部分组成(如图2所示)。其中,流体域的直径为 $5D$ (D 为螺旋桨直径),进口边界位于桨盘面上游 $2.5D$ 处,出口边界位于桨盘面下游 $7D$ 处。由于重叠区域的网格密度远高于流体域,直接耦合可能导致边界信息传递损失。此外,流体域的大尺度网格难以精确捕捉伴流场及梢涡的演化过程。为此,在流体域内增设了一个圆柱形背景区域,其直径为 $1.75D$,前缘距桨盘面为 D ,后缘距桨盘面为 $1.75D$,圆柱形重叠区域直径为 $1.2D$ 。该背景区域采用较密的网格,以减少重叠网格边界的数据传递误差。

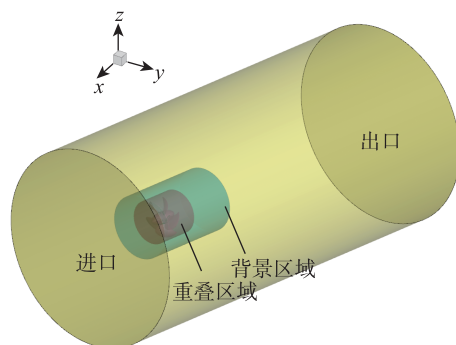


图2 计算域划分

Fig. 2 Division of computational domains

计算域的边界条件设置如下:左侧为速度进口,右侧为压力出口,来流方向沿 x 轴负方向,进口速度值根据不同的进速系数进行相应调整。数值计算采用隐式不定常求解器,基于不可压缩分离流假设。在壁面处理方面,采用全 y^+ 壁面处理策略。不同研究人员所设定的时间步长 Δt 也有所不同,但数量级大多都在 10^{-5} s 至 10^{-4} s 之间^[13-14],因此本研究采取时间步长 $\Delta t = 1 \times 10^{-4} \text{ s}$ 进行分析。

3 网格特征

计算采用重叠网格方法,该方法的核心在于将计算域划分为独立的背景区域和重叠网格区域(包围螺旋桨)。网格独立性消除了动态网格变形的需

求,保障了时间步进中的网格质量^[10,15]。

网格划分采用表面重构、切割体及棱柱层网格生成器。全局计算域设置基准网格尺寸为250 mm,对重叠区域进行加密(尺寸为基准尺寸的0.8%)。对叶片表面网格实施局部加密,其最小尺寸为基准尺寸的0.1%。边界层厚度为基准尺寸的0.4%(即1 mm),采用1.3的增长率和15层边界层网格。在此网格配置下,叶面表面的无量纲壁面距离 y^+ 分布如图3所示。分析表明,无论进速系数 J 为0.6、1.0还是1.4,叶片导边区域均呈现相对较高的 y^+ 值;而在叶片表面大部分区域, y^+ 值均在1左右,这表明近壁网格单元基本位于黏性子层内,满足壁面解析要求。

横向 x - y 与纵向 y - z 剖面上的网格分布见图4。鉴于远离螺旋桨的流场(如近进口、出口及远场壁面)对其水动力性能影响微弱,该区域采用了较粗

网格。

为了验证计算结果的网格无关性,本研究采用三种不同密度的网格进行数值模拟分析,三种不同密度网格分别命名为粗糙网格、中等网格、细网格,网格数量分别为329万、501万和845万。验证工况选取进速系数1.269的非空化流动状态,螺旋桨转速设定为15.0 r/s。采用网格收敛指数(GCI)法评估网格数量对数值模拟精度的影响。对于 K_T 、 $10K_Q$ 和 η ,细网格解的数值不确定性分别为0.04%、0.44%和1.02%(如表2所示)。综合考虑到求解时间和模拟精度的影响,采用细网格(网格数为845万,其中重叠网格为266万)策略分析和讨论了反转毂帽鳍对螺旋桨性能的影响。

4 敞水特性

为验证计算模型的可靠性,采用SVA拖曳水池

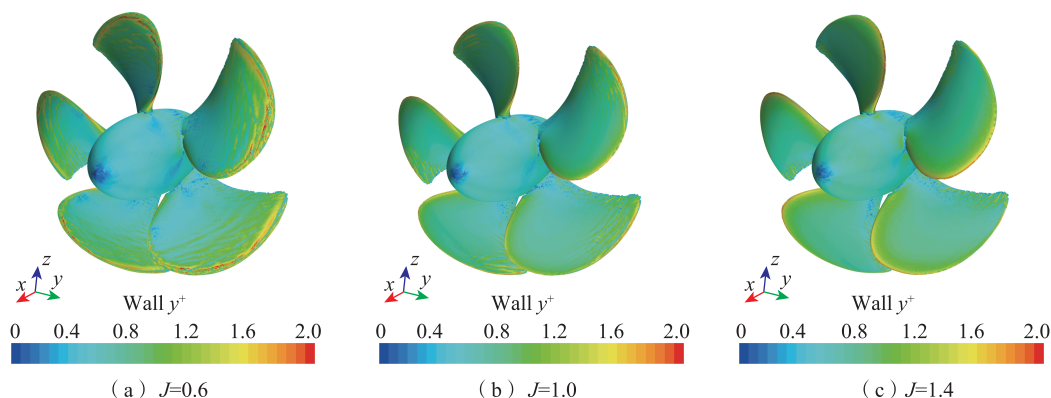
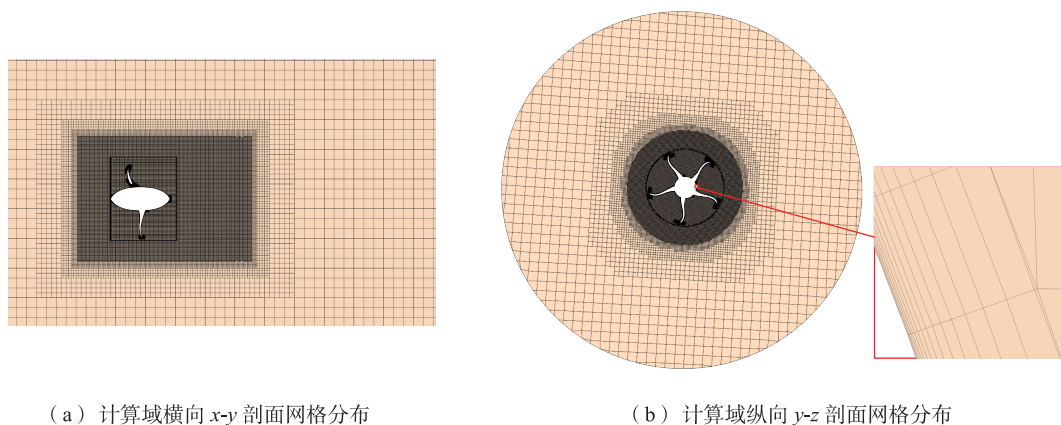


图3 壁面 y^+ 值
Fig.3 Wall y^+ plus



(a) 计算域横向 x - y 剖面网格分布

(b) 计算域纵向 y - z 剖面网格分布

图4 计算域网格
Fig.4 Computational domain grid

表2 网格敏感度
Tab.2 Mesh sensitivity

参数	K_T	$10K_Q$	η
r_{21}	1.236	1.236	1.236
r_{32}	1.195	1.195	1.195
ϕ_1	0.225 5	0.647 9	0.702 9
ϕ_2	0.227 1	0.656 5	0.711 5
ϕ_3	0.247 4	0.686 3	0.728 1
p	14.46	7.42	4.32
ϕ_{ext}^{21}	0.225 4	0.645 6	0.697 1
e_a^{21}	0.71%	1.33%	1.22%
GCI_{fine}^{21}	0.04%	0.44%	1.02%

中 Propeller VP1304 的试验数据 (Barkmann, 2011) 进行对比验证。在固定转速 15 r/s 条件下, 计算进速系数 $J=0.6\sim 1.4$ ($\Delta J=0.2$) 的敞水特性。鉴于计算采用的桨毂与 VP1304 存在几何差异, 给出了无桨毂螺旋桨的敞水特性和有桨毂桨叶的敞水特性, 与试验值进行对比分析。仿真 (CFD) 和实验 (EFD) 之间的比较如图 5 所示。

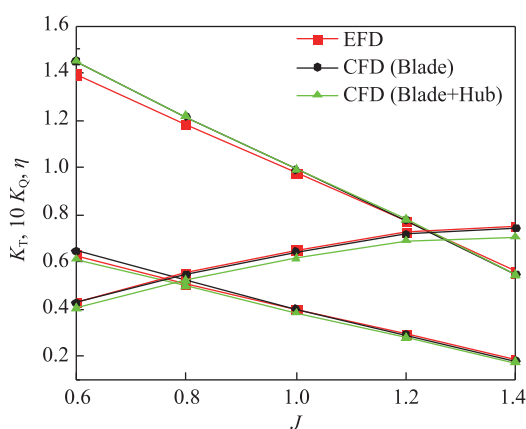


图5 EFD和CFD的比较

Fig. 5 Comparison between EFD and CFD

CFD 与 EFD 结果的对比显示, 带轮毂叶片的推力系数、扭矩系数和效率的偏差均值分别为 4.32%、2.19% 和 5.60%。对于无轮毂叶片, 相应的偏差均值分别为 0.20%、1.28% 和 1.07%。这些偏差值处于可接受范围, 满足数值模拟的要求。特别地, 在忽略轮毂影响时, CFD 与 EFD 结果吻合良好。因研究采用的桨毂与实验桨毂存在差异, 故带轮毂叶片的推力系数、扭矩系数及效率的偏差均值相对较高。综合来看, 数值模拟的敞水特性与试验结果吻合良好, 证明该数值方法可适用于

船用螺旋桨敞水性能研究。

在对 CRPBCF 螺旋桨进行分析时, 进速系数、推力系数、扭矩系数和敞水效率, 其表达式如下^[16]

$$J_m = \frac{V_A}{n_m D_m} \quad (6)$$

$$K_{Tm} = \frac{T_m}{\rho n_m^2 D_m^4}, \quad K_{Qm} = \frac{Q_m}{\rho n_m^2 D_m^5} \quad (7)$$

$$K_{Ta} = \frac{T_a}{\rho n_a^2 D_a^4}, \quad K_{Qa} = \frac{Q_a}{\rho n_a^2 D_a^5} \quad (8)$$

$$\eta_m = \frac{J_m \cdot K_{Tm}}{2\pi K_{Qm}}, \quad \eta_c = \frac{(T_a + T_m)V_A}{2\pi(n_m Q_m + n_a Q_a)} \quad (9)$$

$$\Delta\eta = \frac{\eta_c - \eta_b}{\eta_b} \times 100\% \quad (10)$$

式中: V_A 为进速, n 为转速, D 为直径, ρ 为流体的密度, T 为推力, Q 为扭矩。为了区分主、辅、基准和 CRPBCF 螺旋桨, 用下标 m、a、b 和 c 分别表示主、辅、基准和 CRPBCF 螺旋桨。

为分析辅螺旋桨转速对船用螺旋桨水动力性能的影响, 图 6 给出了进速系数 $J=1.2$ 时, 推力和扭矩系数随时间的变化曲线。从图 6 中可以看出, 主螺旋桨在计算时间超过 0.05 s 后, 其推力与扭矩系数基本稳定。而辅螺旋桨系数波动明显, 主要是因为主桨尾流场的非定常特性及其强脉动。鉴于波动幅度可控, 最终数据取 0.27 s 至 0.30 s 时间段的平均值, 用于后续推力系数和扭矩系数的分析。

数值计算结果如表 3 所示。在进速系数 $J=1.269$ 工况下, 基准螺旋桨效率为 0.704 2。需要特别指出的是, 辅螺旋桨与主螺旋桨的旋转方向相反。当辅螺旋桨转速较低时 (如 $n_a=15.0$ r/s 和 $n_a=22.5$ r/s), 其推力系数为负值, 表明其产生的推力方向与主桨相反, 导致 CRPBCF 系统的总效率 (η_c) 较基准螺旋桨分别下降了 6.5% 和 1.8%。随着辅螺旋桨转速提升至 30.0 r/s, 再逐步提升至 37.5 r/s 和 45.0 r/s, 其推力系数和扭矩系数呈现出先增大后减小的特征, 相应地, 系统总效率 η_c 也随之先升后降。

这种现象源于: 低转速下辅螺旋桨推力方向与主桨相反, 降低了系统效率。而转速提高后, 辅螺旋桨推力方向与主桨一致, 从而提升了整体效率。在研究的五种转速工况中, 辅螺旋桨转速为 37.5 r/s 时, η_c 相较于基准螺旋桨的提升幅度最大。为了充分对比 CRPBCF 螺旋桨与基准螺旋桨的敞水性能差异, 选择辅螺旋桨转速为 22.5、30.0 r/s 和 37.5 r/s

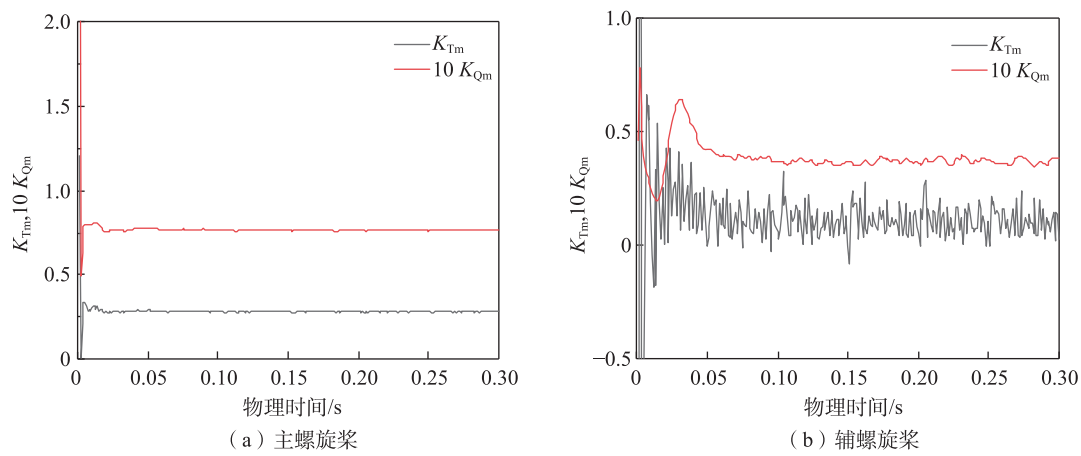


图6 推力和扭矩系数随物理时间的变化 ($J=1.269$)

Fig. 6 Thrust and torque coefficients as a function of physical time at $J=1.269$

表3 辅螺旋桨在设计点的转速 ($J=1.269$)

Tab.3 The rotational rate of the auxiliary propeller at the design point ($J=1.269$)

$V_A/(r/s)$	主螺旋桨			辅螺旋桨		CRPBCF	$\Delta\eta/\%$
	K_{Tm}	$10 K_{Qm}$	η_m	K_{Ta}	$10 K_{Qa}$	η_c	
15.0	0.246 6	0.689 6	0.722 2	-2.368 7	3.324 7	0.658 3	-6.504 9
22.5	0.244 3	0.687 6	0.717 6	-0.407 1	0.581 7	0.691 0	-1.857 6
30.0	0.242 0	0.681 9	0.716 8	0.078 4	0.267 9	0.718 9	2.095 9
37.5	0.242 9	0.682 0	0.719 5	0.197 5	0.636 5	0.723 5	2.744 3
45.0	0.243 0	0.683 4	0.718 1	0.033 5	0.119 7	0.717 1	1.838 9

进一步分析敞水特性。

表4汇总了辅螺旋桨转速 22.5 r/s 的工况下,基准螺旋桨与 CRPBCF 螺旋桨在推力系数、扭矩系数及效率方面的对比数据。结果表明:低进速系数时,CRPBCF 主桨推力系数高于基准桨。在进速 $V_A=5.25$ m/s 时,其主桨推力系数则低于基准桨,辅螺旋桨推力系数和扭矩系数随进速系数先减后增。与基准桨相比,在进速 $V_A=3.00$ m/s 时,CRPBCF 螺旋桨效率最高提升了 1.46%。在进速 $V_A=2.25$ m/s 时,推力最高提高了 2.42%。

三种转速下 CRPBCF 螺旋桨相对于基准螺旋桨在效率和推力方面的变化情况,如图 7 所示。辅螺旋桨转速 30.0 r/s 和 37.5 r/s 工况下其变化趋势与 22.5 r/s 工况一致:低进速系数时,CRPBCF 主桨推力系数高于基准桨。在 $V_A=5.25$ m/s 时,其主桨推力系数则低于基准桨。在效率提升方面,在 $V_A=3.00$ m/s 时,30.0 r/s 和 37.5 r/s 工况下的 CRPBCF 螺旋桨效率相较于基准螺旋桨分别最高提升 3.08% 和 4.21%。推力提升方面:在 $V_A=2.25$ m/s 时,对应工况的推力分别最高提升 4.88% 和 7.27%;不同的

表4 敞水性能 ($n_a=22.5$ r/s)

Tab.4 Hydrodynamic characteristics ($n_a=22.5$ r/s)

$V_A/(m/s)$	基准螺旋桨			主螺旋桨			辅螺旋桨		$\Delta\eta/\%$
	K_T	$10K_Q$	η	K_{Tm}	$10K_{Qm}$	η_m	K_{Ta}	$10K_{Qa}$	
2.25	0.611 0	1.449 2	0.402 6	0.641 7	1.454 7	0.421 2	0.489 5	0.487 2	1.375 5
3.0	0.497 1	1.215 3	0.520 8	0.517 5	1.216 0	0.541 9	0.324 0	0.287 7	1.464 5
3.75	0.384 5	0.990 3	0.617 9	0.397 4	0.990 5	0.638 6	0.231 2	0.014 3	1.366 0
4.5	0.280 8	0.778 7	0.688 6	0.282 3	0.765 5	0.704 2	0.205 1	0.236 9	-0.741 2
5.25	0.173 2	0.547 1	0.705 5	0.164 2	0.521 5	0.701 6	0.227 6	0.455 8	-6.604 6

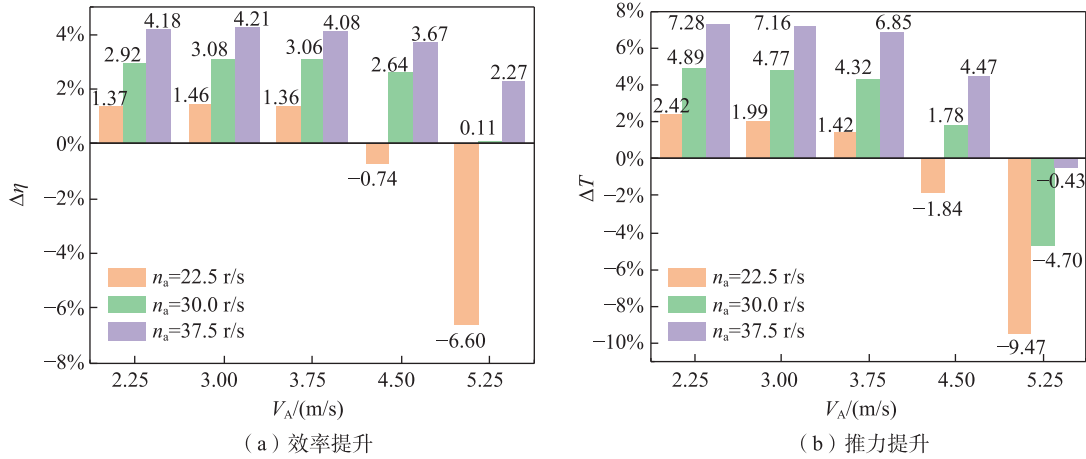


图7 CRPBCF螺旋桨较基准螺旋桨在效率和推力方面的提升

Fig. 7 The improvement of CRPBCF propeller in efficiency and thrust compared to the benchmark propeller

是,这两种转速下,辅螺旋桨推力系数随进速系数先增后减,扭矩系数则随进速系数增大而持续下降。

结果表明:在低转速($n_a=22.5$ r/s)配合高进速($V_A=4.50$ m/s和 $V_A=5.25$ m/s)工况时,CRPBCF螺旋桨的效率和推力均低于基准螺旋桨。在相同转速条件下,效率提升峰值出现在 $V_A=3.00$ m/s的工况下,而推力提升最大值则出现在 $V_A=2.25$ m/s的工况下。由图7(b)可见,在任何转速下,当进速达到 $V_A=5.25$ m/s时,CRPBCF螺旋桨的推力性能较基准螺旋桨均有所降低。值得注意的是,在相同进速工况下,随着转速升高,CRPBCF螺旋桨在效率和推力方面呈现上升趋势,这一规律与表3所呈现的数据特征吻合。

5 空化性能

在螺旋桨空化问题的CFD数值模拟中,为观察螺旋桨毂涡空泡现象,采用多相流模型并结合空化模型^[17-18]。本研究选用STAR-CCM+软件中的VOF-VOF相间相互作用和Schnerr-Sauer空化模型进行模拟,该模型基于简化的Rayleigh-Plesset方程建立,其特点在于忽略了气泡生长加速度、表面张力以及黏性作用等次要影响因素。VOF模型基本方程是求解等效流体的物理性质作为其组成相及其体积分数的物理性质的函数,其表达式如下

$$\rho = \sum_i \rho_i \alpha_i \quad (11)$$

$$\mu = \sum_i \mu_i \alpha_i \quad (12)$$

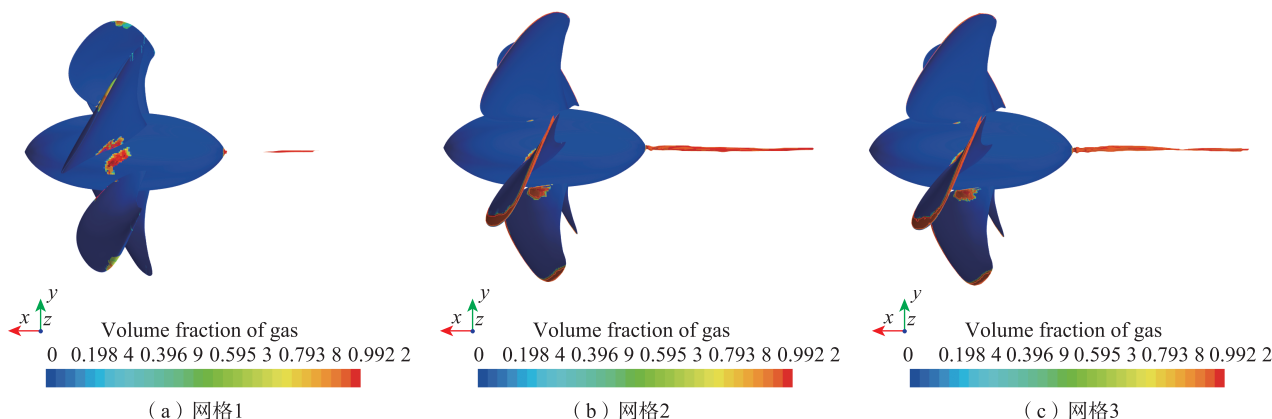
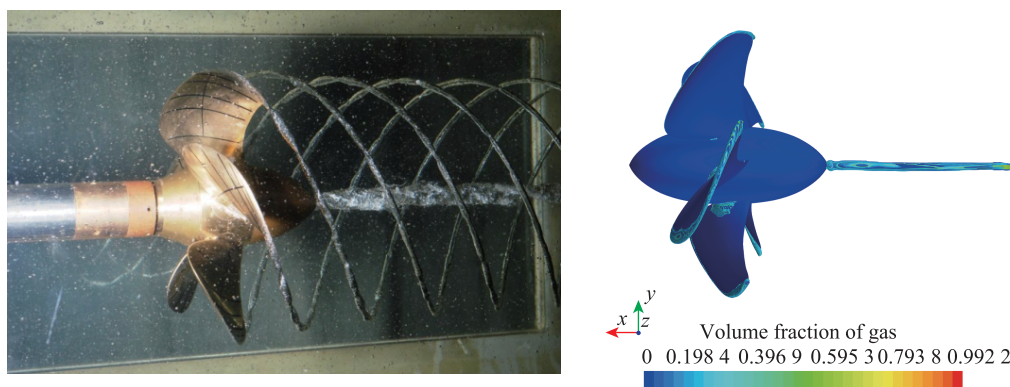
$$c_p = \sum_i \frac{(c_p)_i \rho_i}{\rho} \alpha_i \quad (13)$$

其中, $\alpha_i = V_i/V$ 为体积分, ρ_i 、 μ_i 和 $(c_p)_i$ 分别为第*i*相的密度、分子黏度和比热。

本研究选择的种子密度和种子直径值是STAR-CCM+软件中提供的默认值^[19],即分别为 1.0×10^{12} m和 1.0×10^{-6} m。为精确模拟毂涡空化现象,本研究在预测的空化发生区域实施了局部网格加密策略,分别对中等网格、细网格、精细网格(网格数1 520万)进行细化,细化后得到的网格分别命名为网格1、网格2、网格3。具体而言,在螺旋桨后方设置了一个轴向长度为0.165 0 m、半径为0.012 5 m的圆柱形加密区域,加密区网格尺寸为基准尺寸的0.2%。在空化数 $\sigma_n=2.024$, $J=1.019$ 工况下,分别采用网格1(网格数554万)、网格2(网格数963万)和网格3(网格数1 814万)进行数值模拟。如图8所示,在采用网格1进行数值模拟时,毂涡空泡现象几乎不可见。相比之下,网格2和网格3的模拟结果均能清晰地呈现毂涡的形态特征,且二者在涡结构上表现出一致性。基于计算精度与效率的综合考量,本研究最终选取网格2作为后续空化模拟研究的计算网格。

在空化模拟设置方面:基准螺旋桨和主螺旋桨的转速从15.000 r/s改变到24.987 r/s,副螺旋桨的转速是主螺旋桨转速的2倍,主、副螺旋桨的旋转方向相反。此外,主螺旋桨的进速系数为1.019。

为进一步验证数值方法的准确性,与实验现象进行比较。图9的对比结果表明,数值模拟获得的毂涡形态与实验结果吻合良好,验证了计算方法的可靠性。基于此,本研究选取Case2.3.1(空化

图8 网格尺寸对毂涡空化影响的比较($\alpha_v=0.95$, $J=1.019$, $\sigma_n=2.024$)Fig. 8 Grid size impact on hub vortex cavitation ($\alpha_v=0.95$, $J=1.019$, $\sigma_n=2.024$)图9 实验和仿真对比 ($\sigma_n=2.024$, $\alpha_v=0.2$, $J=1.019$)Fig. 9 Comparison of experimental and simulation results ($\sigma_n=2.024$, $\alpha_v=0.2$, $J=1.019$)

数 $\sigma_n=2.024$)作为典型工况开展后续空化特性分析。辅螺旋桨对梢涡空化的影响很小,因此在下面的章节中不讨论梢涡空化^[20]。

研究表明,桨毂涡在螺旋桨尾流中形成的强涡结构会导致显著的能量损耗。图10的对比清晰显示:在基准螺旋桨尾流中,汽相体积分数达到20%的等值面清晰可见,表明存在明显的HVC现象;而CRPBCF螺旋桨的尾流场中则未观察到该等值面,这表明辅螺旋桨能抑制HVC的产生。基于此可以推断,CRPBCF螺旋桨可以通过抑制HVC的产生,有效降低由此引发的振动和噪声问题。

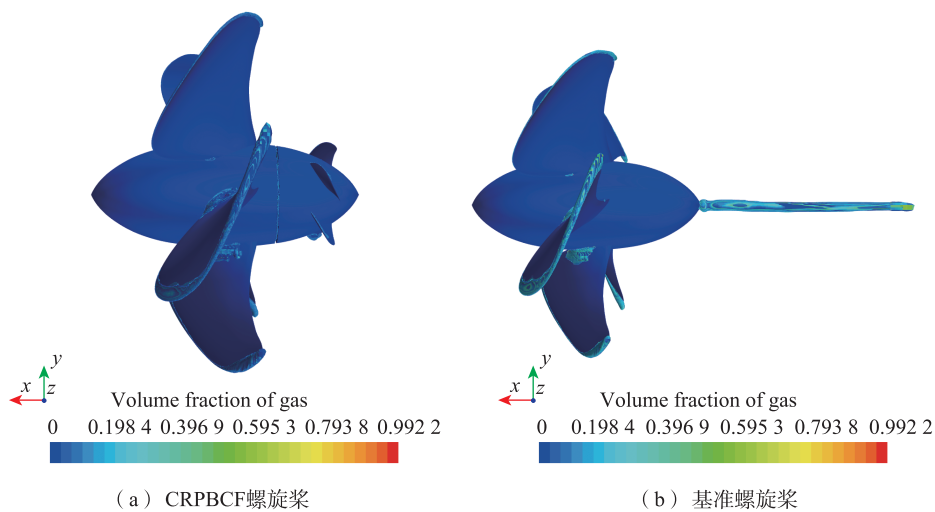
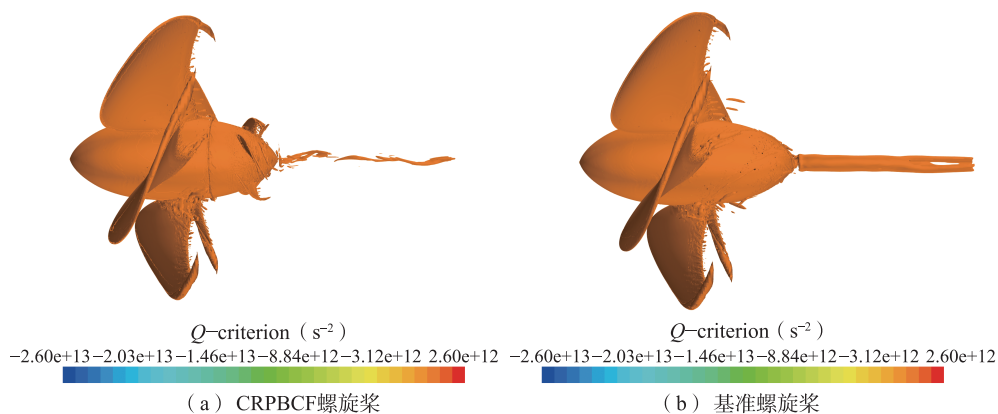
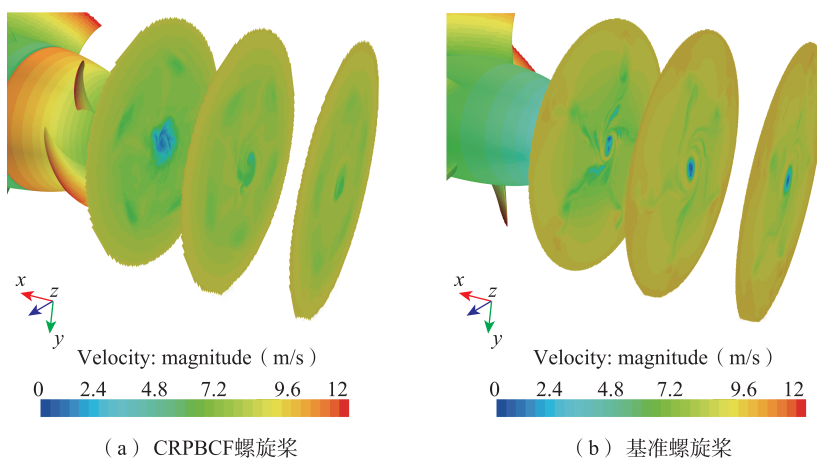
为探究辅螺旋桨对桨毂涡的影响,图11给出了基准螺旋桨和CRPBCF螺旋桨,在进速系数 $J=1.019$,空化数 $\sigma_n=2.024$, Q -criterion= $600\ 000\ s^{-2}$ 的等值面。

如图11所示,基准螺旋桨的毂涡结构完整且形

态显著,而CRPBCF螺旋桨的毂涡被明显抑制,涡结构几乎完全消散。这一现象与CRPBCF螺旋桨在空化性能上的表现一致,进一步验证了CRPBCF螺旋桨在抑制毂涡空化方面的有效性。

为了进一步探究桨毂尾流区域的速度分布特性,图12展示了3个平面($x/R=-0.8$ 、 -1.2 和 -1.6)上的速度大小分布。分析结果表明:在近场平面 $x/R=-0.8$ 处,CRPBCF螺旋桨的低速区覆盖范围显著大于基准螺旋桨。但随着向下游发展($x/R=-1.2$ 和 -1.6 截面),CRPBCF螺旋桨的低速区呈现快速衰减趋势,几乎完全消失。通过对比两种螺旋桨的尾流速度分布特征可以发现,CRPBCF螺旋桨在桨毂盖附近形成了更为显著的低速区,这一现象主要归因于辅螺旋桨采用了更高的转速设计。

在远离桨毂盖的中心轴区域,CRPBCF螺旋桨的低速区显著减弱。这一现象的关键原因在于主、

图10 毂涡对比 ($\alpha_v=0.2$, $\sigma_n=2.024$)Fig. 10 Comparison of hub vortex structures ($\alpha_v=0.2$, $\sigma_n=2.024$)图11 等值面 ($J=1.019$, $\sigma_n=2.024$, $Q\text{-criterion}=600\,000\text{ s}^{-2}$)Fig. 11 Isosurfaces ($J=1.019$, $\sigma_n=2.024$, $Q\text{-criterion}=600\,000\text{ s}^{-2}$)图12 平面 $x/R=-0.8$ 、 -1.2 和 -1.6 上的速度大小Fig. 12 Velocity magnitudes on planes $x/R=-0.8$, -1.2 and -1.6

辅螺旋桨采用反向旋转设计,使得两者的旋转流场在远离轮毂的区域相互干扰,从而削弱了流体的旋转运动。这种独特的流场相互作用机制,使得CRPBCF螺旋桨的桨毂涡在尾流中的耗散速度比基准螺旋桨更快。

6 结论

本研究采用STAR-CCM+软件中的重叠网格技术和大涡模拟方法开展数值模拟研究,直接模拟了螺旋桨的真实旋转运动。通过对比反转螺旋桨毂帽鳍(CRPBCF)螺旋桨与基准螺旋桨的敞水特性和空化特性,研究CRPBCF对螺旋桨水动力性能的影响,得出以下结论:

1) CRPBCF螺旋桨能够提高推进效率和推力。在相同转速条件下,效率提升峰值出现在 $V_A = 3.00$ m/s的工况下,而推力提升最大值则出现在 $V_A = 2.25$ m/s的工况下。在相同进速工况下,随着转速升高,CRPBCF螺旋桨在效率和推力方面呈现上升趋势。

2) 采用重叠网格方法对CRPBCF螺旋桨的旋转运动进行数值模拟,可有效预测毂涡空化特性。

3) 通过汽相体积分数等值面分析发现,CRPBCF螺旋桨能有效抑制HVC现象的产生。

本研究重点探讨了CRPBCF螺旋桨对船用螺旋桨水动力性能的改善作用,并发现采用重叠网格方法可有效预测CRPBCF螺旋桨毂涡空化特性,所得结论可为后续CRPBCF螺旋桨的优化设计提供理论依据。

参考文献:

- [1] 董文良, 郝金凤, 强兆新, 等. 国际航运碳达峰下的船舶技术经济性分析[J]. 交通节能与环保, 2024, 20(6): 110-114.
DONG W L, HAO J F, QIANG Z X, et al. Techno-economic analysis of ship operation under carbon peak of international shipping[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2024, 20(6): 110-114.
- [2] BACH H, HANSEN T. IMO off course for decarbonisation of shipping? Three challenges for stricter policy[J]. Marine Policy, 2023, 147: 105379.
- [3] WANG Z Z, MIN S S, PENG F, et al. Comparison of self-propulsion performance between vessels with single-screw propulsion and hybrid contra-rotating podded propulsion[J]. Ocean Engineering, 2021, 232: 109095.
- [4] ZHANG Y X, CHENG X K, FENG L. Numerical investigation of the unsteady flow of a hybrid CRP pod propulsion system at behind-hull condition[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2020, 12: 918-927.
- [5] MIZZI K, DEMIREL Y K, BANKS C, et al. Design optimisation of Propeller Boss Cap Fins for enhanced propeller performance[J]. Applied Ocean Research, 2017, 62: 210-222.
- [6] KIM D H, PARK J C, JEON G M, et al. CFD simulation for estimating efficiency of PBCF installed on a 176K bulk carrier under both POW and self-propulsion conditions[J]. Processes, 2021, 9(7): 1192.
- [7] 王睿, 熊鹰, 叶金铭, 等. Kappel桨水动力性能模型试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 17-22.
WANG R, XIONG Y, YE J M, et al. Experimental research on the hydrodynamic performance of Kappel propeller[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(2): 17-22.
- [8] 王超, 李秋月, 赵雷明, 等. 耦合黏-势流数值计算的CLT桨水动力性能预报[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 82-87.
WANG C, LI Q Y, ZHAO L M, et al. Prediction for hydrodynamic performance of CLT propeller by coupling viscous and potential numerical calculation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(4): 82-87.
- [9] 胡健, 耿冲, 冯峰. 基于大涡模拟的螺旋桨梢涡数值分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(11): 68-73.
HU J, GENG C, FENG F. Numerical analysis of propeller tip vortex based on large eddy simulation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(11): 68-73.
- [10] JIN S Q, PENG H X, QIU W, et al. Numerical simulation of planing hull motions in calm water and waves with overset grid[J]. Ocean Engineering, 2023, 287: 115858.
- [11] ASNAGHI A, SVENNERBERG U, BENSOW R E. Analysis of tip vortex inception prediction methods[J]. Ocean Engineering, 2018, 167: 187-203.
- [12] LIN C, WANG X C, LIU D C, et al. LES investigation of oblique inflow effects on propeller cavitating tip vor-

- tex[J]. Ocean Engineering, 2025, 325: 120868.
- [13] HU J, WANG Y Z, ZHANG W P, et al. Tip vortex prediction for contra-rotating propeller using large eddy simulation[J]. Ocean Engineering, 2019, 194: 106410.
- [14] 谢超凡, 柏铁朝, 吴方良, 等. 基于LES的螺旋桨精细流场特性分析与研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(23): 39-43.
- XIE C F, BAI T C, WU F L, et al. Analysis and research of propeller fine flow field characteristics based on LES[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(23): 39-43.
- [15] YU D, ZHAO Y, LI M, et al. Numerical analysis of propeller wake evolution under different advance coefficients[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(5): 921.
- [16] 侯志雅. 螺旋桨湍流转捩特性及其尺度效应研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.
- HOU Z Y. Research on turbulent transition characteristics and scale effects of propellers[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023.
- [17] LIU X R, WANG T, ZHAO X Y, et al. LES investigation of the tip vortex cavitating flow with special emphasis on the interaction between cavitation and vorticity by a modified cavitation model[J]. Journal of Hydrodynamics, 2023, 35(3): 594-606.
- [18] YILMAZ N, ATILAR M, KHORASANCHI M. An improved Mesh Adaption and Refinement approach to Cavitation Simulation (MARCS) of propellers[J]. Ocean Engineering, 2019, 171: 139-150.
- [19] 陈影, 余龙. 基于网格自适应技术的PPTC桨梢涡空泡数值模拟[J]. 船舶力学, 2022, 26(4): 499-510.
- CHEN Y, YU L. Numerical simulation of PPTC propeller tip vortex cavitation based on adaptive mesh refinement (AMR) method[J]. Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(4): 499-510.
- [20] ZHU W C, ZHOU F, SHU H J, et al. Effect of contra-rotating propeller boss cap fins (CRPBCF) on the performance of marine propellers[J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 112932.



通信作者: 朱文才(1992—), 讲师, 博士, 硕士生导师, 研究方向为磁流变智能器件及结构、船舶螺旋桨、计算流体力学(CFD)等。E-mail: wencai_zhu@163.com。

(责任编辑: 李根)