

文章编号: 1007-7294(2025)03-0409-11

## 端板型对转螺旋桨空化性能分析

陈振纬<sup>1</sup>, 陈旭鹏<sup>1</sup>, 张 驰<sup>2</sup>, 周赵焯<sup>1</sup>, 胡成海<sup>1</sup>, 郑天江<sup>2</sup>, 李华民<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 中国科学院 宁波材料与工程技术研究所, 浙江 宁波 315201)

**摘要:** 为提高对转桨的推进性能, 减小空化效应, 将端板螺旋桨应用于对转桨, 分析端板型对转桨的片状空化性能和推进性能。基于 RANS 及 Schnerr-Sauer 空化模型, 对由常规侧斜螺旋桨组成的对转桨和端板螺旋桨组成的新型对转桨, 在系柱及低进速下进行空化性能分析及推进性能校核。研究发现: 端板的添加使对转螺旋桨具备更佳的抗空化性能, 系柱状态下( $J=0$ )桨叶表面片状空化范围减小约 59%,  $J=0.1$  时空化延迟发生; 且在低进速条件下, 端板对转桨具备更高的推进效率, 较常规侧斜对转桨高出 0.9%~3.1%; 在不同转速下, 端板型对转桨的敞水仿真结果与实验数据较为吻合。本研究将端板螺旋桨创新性地应用于对转螺旋桨, 适合于低速潜航器的推进及作业需求。

**关键词:** 对转螺旋桨; 端板螺旋桨; 计算流体力学; 空化性能; 推进性能

**中图分类号:** U661.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.03.007

## Cavitation analysis of end-plate contra-rotating propeller

CHEN Zhen-wei<sup>1</sup>, CHEN Xu-peng<sup>1</sup>, ZHANG Chi<sup>2</sup>, ZHOU Zhao-ye<sup>1</sup>, HU Cheng-hai<sup>1</sup>,  
ZHENG Tian-jiang<sup>2</sup>, LI Hua-min<sup>2</sup>

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, CAS, Ningbo 315201, China)

**Abstract:** In order to improve the propulsion performance of contra-rotating propellers and reduce the cavitation effect, an end plate was applied to the contra-rotating propeller. The cavitation performance and propulsion performance of the end-plate contra-rotating propeller were analyzed. The RANS method with Schnerr-Sauer cavitation model was used for analyzing. Then the propulsion performance of contra-rotating propellers composed of conventional skewed propellers and end-plate propellers were checked for comparison. It is found that the addition of an end-plate makes the contra-rotating propeller possess better anti-cavitation performance. The sheet cavitation range is reduced by about 59% in the bollard state ( $J=0$ ), and the cavitation is delayed when  $J=0.1$ . In addition, under the condition of low advance speed, the end-plate contra-rotating propeller shows a higher propulsion efficiency by 0.9%~3.1% than the conventional one. The open water performance of the end-plate contra-rotating propeller was tested at different rotation speeds, and the data were in good agreement with the simulation results considering the cavitation model. In this study, an end plate is innovatively applied to the contra-rotating propeller, which is suitable for the propulsion and operation requirements of low-speed submersibles.

收稿日期: 2024-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U23A202790); 中科院宁波材料技术与工程研究所资助项目(529203-I21902)

作者简介: 陈振纬(1980-), 男, 博士, 副教授, 通讯作者, E-mail: cwchen@zju.edu.cn; 陈旭鹏(1999-), 男, 硕士研究生; 张 驰(1978-), 男, 博士, 研究员; 周赵焯(1998-), 男, 硕士; 胡成海(1999-), 男, 硕士研究生; 郑天江(1984-), 男, 博士, 高级工程师; 李华民(1979-), 男, 博士, 高级工程师。

**Key words:** contra-rotating propeller (CRP); end-plate propeller; computational fluid dynamics; cavitation performance; propulsion performance

## 0 引 言

对转螺旋桨 (contra-rotating propeller, CRP) 作为螺旋桨的一种特殊形式, 在可实现平衡自身旋转扭矩的同时, 具有更优的推进效率, 且在空泡和噪声特性上表现出一定的潜力, 在船舶及水下航行器的推进应用方面, 有着重要的作用<sup>[1]</sup>。

螺旋桨的空化研究有仿真模拟和实验测量两种方法。其中, 空化仿真所涉及的要点包括湍流模型、空化模型和衡量准则的选取, 及计算域中网格的划分和构建<sup>[2]</sup>。目前使用的湍流数值模拟方法有直接数值模拟法 (DNS), 以及包括基于 RANS 方程的雷诺平均法、大涡模拟法 (LES) 和分离涡模拟法 (DES)<sup>[3]</sup> 在内的非直接数值模拟法, 其中基于 RANS 方程的模型运用较为普遍。螺旋桨的空化模型则可分为基于状态方程和基于运输方程两种类型, 后者又包含 Singhal、Kunz、Zwart、Schnerr-Sauer 等空化模型<sup>[4-6]</sup>。

目前, 国内螺旋桨空化的仿真研究聚焦于对单桨的评估和预测。陈影等<sup>[7]</sup> 采用 SST  $k-\omega$  湍流模型和 Zwart 空化模型, 将螺旋桨区域加密与基于气体体积分数的网格自适应技术相结合, 精确地捕捉到流场的空化形态和规律, 发现空化会使涡量最大区域从中心转移; 吴思源等<sup>[8]</sup> 采用 STAR CCM+ 商业软件, 基于 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型和 Schnerr-Sauer 空化模型模拟 PPTC 螺旋桨在空化条件下的水动力学性能, 其片状空化仿真结果与实验结果吻合良好; 赵旺<sup>[2]</sup> 采用延迟分离涡模型 (DDES) 计算 E779A 对转桨在均匀流与非均匀流条件下的空化性能, 发现非均匀来流会增加片状空化体积的波动幅度; 胡健等<sup>[9]</sup> 将大涡模拟方法与 Schnerr-Sauer 空化模型相结合, 预测 E779A 螺旋桨的梢涡空化模式, 其预测结果与实验结果接近; 赵昱晟等<sup>[10]</sup> 研究了在非均匀流下 Kunz 及 Schnerr-Sauer 空化模型对螺旋桨空化仿真的影响, 评估后认为 Schnerr-Sauer 空化模型在模拟中具有更佳的效果。

国外业界则更注重复杂工况下的螺旋桨空化性能的预测。Kim 等<sup>[11]</sup> 采用非定常 RANS 方法, 对吊舱式对转螺旋桨在直航和转弯条件下的空化流进行了模拟, 发现其在不同流向中的空化表现差异极大; Lloyd 等<sup>[12]</sup> 应用自适应网格技术和延迟分离涡方法分析螺旋桨在均匀流中的片状空化情况, 实现了以更少的总网格数捕捉桨叶叶梢端的空化; Yilmaz 等<sup>[13]</sup> 提出体积控制和自适应网格细化相结合的网格划分策略, 应用于 RANS 求解器中, 采用 Schnerr-Sauer 空化模型计算螺旋桨梢涡空化, 其计算结果与实验相比非常接近; Ge<sup>[14]</sup> 等比较了 STAR CCM+ 和 OpenFOAM 两款 CFD 软件在模型尺度下对螺旋桨在集装箱船船后尾流场的空化仿真效果, 发现两者的仿真效果一致; Lee<sup>[15]</sup> 等评估了全空化模型、Zwart-Gerber Belamri 模型和 Schnerr-Sauer 模型在螺旋桨空化仿真上的应用效果, 与实验数据比较, Schnerr-Sauer 模型能够更精确地预测空化和推力; Viitanen 等<sup>[16]</sup> 基于 RANS 求解器在斜流工况下对螺旋桨进行空化仿真, 发现仿真中的空化现象较实验观测到的空化更早发生。

本文以端板对转桨为研究对象, 在系柱状态 ( $J=0$ ) 和低进速 ( $J=0.1$ ) 下, 计算对比由常规侧斜螺旋桨组成的对转桨和端板螺旋桨组成的对转桨的空化性能, 并校核低进速下端板对转桨在空化流中的敞水推进性能, 与实验结果进行比较, 验证仿真结果的准确性。端板螺旋桨拥有特殊的叶梢构造, 其桨叶叶尖向吸力面弯折, 可削弱叶尖处压力面向吸力面的绕流, 降低叶尖梢涡的强度, 提升螺旋桨的推进效率。

## 1 研究对象及数值模拟方法

### 1.1 研究对象——对转桨

本文计算的对转桨包括两型, 分别为常规带侧斜对转桨 CRP-Kap01N 和端板型对转桨 CRP-Kap01S。

端板螺旋桨 Kap01S 是在常规侧斜螺旋桨 Kap01N 的基础上,由叶尖向吸力面弯折而成。本文以对转桨 CRP-Kap01N 为对照组,探究叶尖端板对螺旋桨片状空化的影响。组成对转桨的各螺旋桨的几何参数如表 1 所示,  $X_s/D$  为桨叶叶梢处纵倾  $X_s$  与螺旋桨直径  $D$  的比值,用以表征桨叶端板弯折的程度;各对转桨前后桨盘面间距均为 0.06 m,桨叶翼型均为 NACA66  $mod/a=0.8$ <sup>[17]</sup>。桨叶 Kap01N 与 Kap01S 的  $X_s/D$  径向分布如图 1 所示。对转桨的模型如图 2 所示。

表 1 各螺旋桨的主要参数<sup>[18]</sup>

Tab.1 Main parameters of the propellers

桨型	Kap01N	Kap01N	Kap01S	Kap01S
直径 $D/mm$	270	260	270	260
桨叶数	4	5	4	5
0.7R 处螺距比 $P/D$	1.028	1.028	1.028	1.028
盘面比	0.595	0.744	0.606	0.758
叶梢处纵倾比 $X_s/D$	0	0	-0.025	-0.025
螺旋桨旋向	左旋	右旋	左旋	右旋
相对位置	前桨	后桨	前桨	后桨

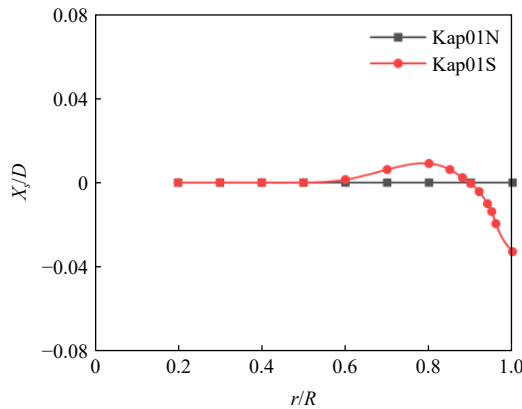


图 1 桨叶纵倾比值径向分布

Fig.1 Radial distribution of dimensionless blade rake

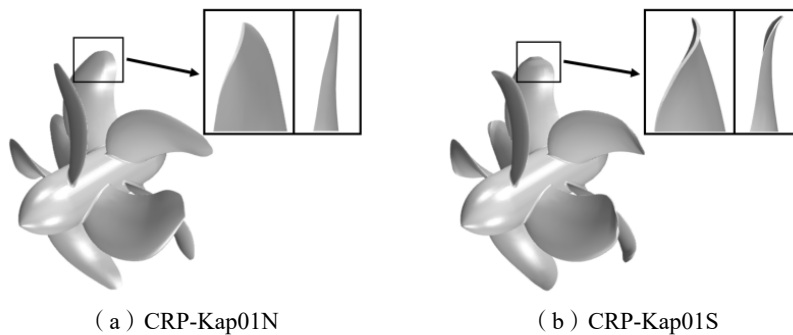


图 2 对转桨模型

Fig.2 Models of the contra-rotating propellers

1.2 螺旋桨无量纲参数

螺旋桨的敞水性能以无量纲参数推力系数  $K_T$ 、扭矩系数  $K_Q$  和推进效率  $\eta$  为衡量参考。记对转螺旋桨的前桨直径为  $D_F$ ,后桨直径为  $D_A$ ,前后桨转速均为  $n$ ,前桨推力为  $T_F$ ,后桨推力为  $T_A$ ,前后桨推力

之和为  $T$ , 前桨扭矩为  $Q_F$ , 后桨扭矩为  $Q_A$ , 前后桨总扭矩为  $Q$ , 流体密度为  $\rho$ , 流体进速为  $V_A$ , 计算域远处入口的流体速度为  $V_\infty$ , 计算域远处入口的流体压强为  $p_\infty$ , 水的饱和蒸汽压为  $p_v$ , 则对转螺旋桨的进速系数  $J$ 、推力系数  $K_T$ 、扭矩系数  $K_Q$ 、推进效率  $\eta$  及空化数  $\sigma$ <sup>[19]</sup> 分别为

$$J = \frac{V_A}{n \cdot (D_F + D_A)/2} \quad (1)$$

$$K_T = K_{T_F} + K_{T_A} = \frac{T_F}{\rho n^2 D_F^4} + \frac{T_A}{\rho n^2 D_A^4} \quad (2)$$

$$K_Q = K_{Q_F} + K_{Q_A} = \frac{Q_F}{\rho n^2 D_F^5} + \frac{Q_A}{\rho n^2 D_A^5} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{T V_A}{2\pi n Q} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (5)$$

式中, 前桨扭矩  $Q_F$  和后桨扭矩  $Q_A$  不考虑旋向, 即在式中均取正值; 对转桨计算扭矩系数的扭矩视为前后桨各自扭矩的绝对值叠加。此外, 为方便讨论螺旋桨的空化性能, 本文将以对转桨的载荷系数  $K_T/J^2$  与空化数  $\sigma$  的关系曲线作为评估依据。在相同载荷时, 即载荷系数相同的情况下, 对应的空化数的数值越大, 螺旋桨的抗空化性能越优良。

### 1.3 湍流模型与空化模型

本文采用 RANS 求解器和 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型, 空化模型选用 Schnerr-Sauer 模型。Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型具有广泛的适用性和合理的求解精度, 较标准模型添加了一个新的湍流耗散率传输方程<sup>[20]</sup>。模型的临界系数  $C_\mu$  以平均流量和湍流特性的函数来表示, 而非标准模型一般假设为常数。结合两层方法, 可获得全壁面  $y^+$  处理的额外灵活性<sup>[21]</sup>。Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型的方程<sup>[22]</sup> 如下:

湍动能  $k$  方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

耗散率  $\varepsilon$  的运输方程为

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (7)$$

式中,  $\rho$  为流体密度,  $t$  为时间变量,  $x_i$  和  $x_j$  为空间变量,  $u_i$  为时均速度,  $\mu_t$  为湍流黏度,  $\mu$  为流体动力黏度,  $\nu$  为流体运动黏度,  $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  分别为湍动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  对应的 Prandtl 数,  $G_k$  为平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项,  $E$  为时均应变率项,  $C_1$  和  $C_2$  为经验常数。

Schnerr-Sauer 空化模型是基于 Rayleigh-Plesset 简化方程并忽略气泡增长加速、粘性效应和表面张力效应。文献[23-26] 均对 Schnerr-Sauer 空化模型进行了验证, 证明了该模型在高转速运动空化中的计算准确性。其中, 空化气泡增长率  $R$  采用的惯性控制增长模型<sup>[27]</sup> 如下:

$$p \leq p_v \quad R_c = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2(p_v - p)}{3 \rho_l}} \quad (8)$$

$$p \geq p_v \quad R_c = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2(p - p_v)}{3 \rho_l}} \quad (9)$$

式中,  $p_v$  为给定温度的饱和蒸汽压,  $p$  为周围液体的分压,  $\rho_l$  为液体密度,  $\rho_v$  为水蒸气密度,  $\rho_m$  为气液混合物密度,  $\alpha$  为水蒸气体积分数,  $R_B$  为气泡直径。

### 1.4 计算域及网格划分

本文采用 CFD 商业软件 STAR CCM+ 进行仿真计算, 参考采用了 Han 等<sup>[28]</sup> 及兰加芬<sup>[29]</sup> 关于计算

域的设定和湍流模型的选择,计算域及边界条件划分如图 3 所示。将对转桨的前后两个单桨分别划入旋转域  $A$  和旋转域  $B$ ,采用多参考系法计算。计算域整体长度为  $9D$ ,设置旋转域的直径为  $1.6D$ ,速度进口位于前桨盘面上游  $4D$  处,压力出口位于前桨盘面下游  $5D$  处,此处  $D$  指前桨直径。除对入口和出口进行边界条件设置外,其余边界均设置为壁面无滑移条件。

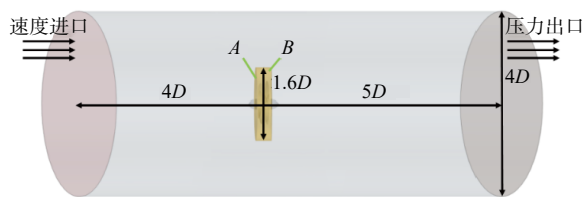


图 3 计算域及边界条件划分示意图

通过使用计算软件中的自动网格划分功能,采用切割体网格生成器对整体计算域及旋转域进行网格划分及局部加密。为更精确地捕捉对转桨梢涡的形态和发展规律,采用圆管形加密区对尾流场进行加密,如图 4(a)所示。

Fig.3 Computation domain of the contra-rotating propeller

为更精确地捕捉对转桨梢涡的形态和发展规律,采用圆管形加密区对尾流场进行加密,如图 4(a)所示。

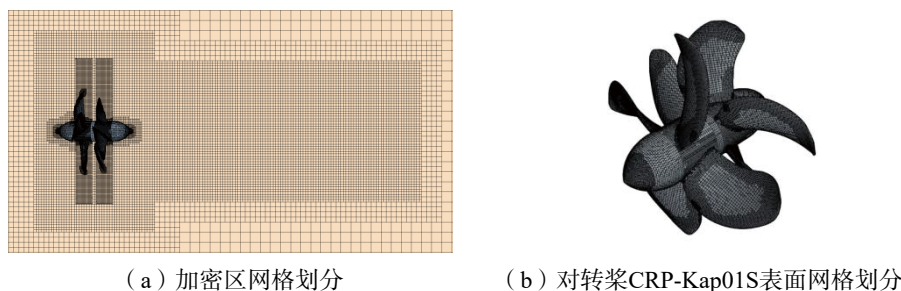


图 4 计算域网格划分情况

Fig.4 Mesh of the computation domain

在相同网格划分策略下,通过调节基础网格尺寸来调整计算域网格总数,进行网格无关性分析。设置计算工况进速系数  $J$  为 0.1,对转桨前后桨转速均为 1500 r/min。所采用的仿真计算模型如 1.3 节所介绍。对对转桨 CRP-Kap01N 和 CRP-Kap01S 均设置 11 组网格算例,对应的网格基础尺寸分别为 0.15 m、0.125 m、0.1 m、0.09 m、0.084 m、0.08 m、0.075 m、0.068 m、0.06 m、0.056 m 和 0.05 m(网格总数依次增大),计算得到的推力系数  $K_T$  和扭矩系数  $K_Q$  如图 5 所示。由图可知,当网格基础尺寸小于或等于 0.08 m 时,计算结果开始趋于稳定。基于计算时长和资源的考量,本文统一采用 0.08 m 基础网格尺寸的设置,对应对转桨 CRP-Kap01N 和 CRP-Kap01S 的计算域网格总数分别为  $2.736 \times 10^6$  和  $2.703 \times 10^6$ 。

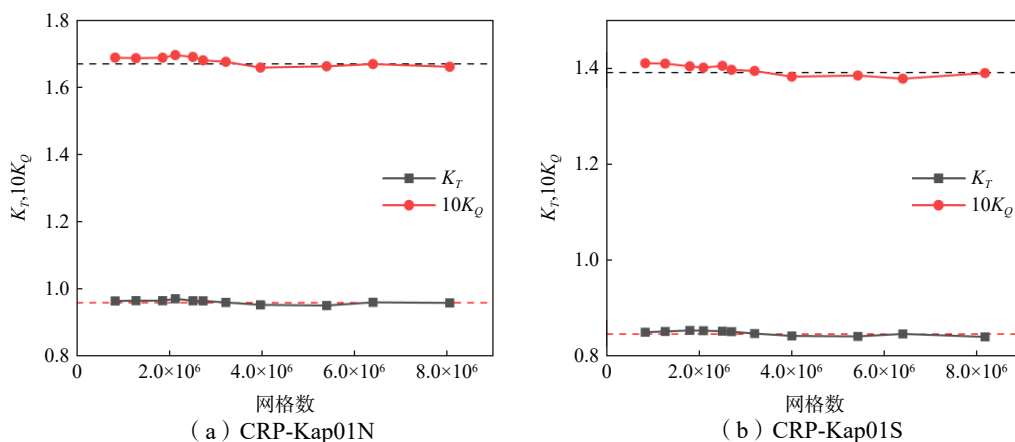


图 5 网格无关性分析

Fig.5 Mesh independence analysis

## 2 空化分析

### 2.1 对转桨片状空化分析

在 1500 r/min 转速的系柱状态( $J=0$ )和低进速状态( $J=0.1$ )下进行空化仿真,探讨 CRP-Kap01N 和 CRP-Kap01S 两组对转桨的片状空化性能,其中对  $J=0$  的工况计算结果做详细描述。在空化仿真中,取空泡数  $\sigma$  为 2.0,饱和蒸汽压  $P_v$  为 2338 Pa,应用 Schnerr-Sauer 空化模型和 VOF 二相流模型。文献[26–27]对水汽体积分数  $a=0.1$  定义空界面的合理性做了验证,其计算结果和试验结果吻合良好。因此,本文对空泡界面的定义亦取为水汽体积分数  $a=0.1$  的等值面。

#### 2.1.1 系柱工况 ( $J=0$ , 1500 r/min)

系柱状态下,对转桨 CRP-Kap01S 在高转速下的桨叶表面片状空化程度明显偏低,如图 6 所示。CRP-Kap01N 前桨叶表面的空化区域占其盘面积的 8.17%,空化现象较为严重;而 CRP-Kap01S 的前桨表面空化区域占其盘面积的 2.36%,较 CRP-Kap01N 降低约 71.1%,空化程度较低。CRP-Kap01N 后桨叶表面的空化区域较其前桨小,占盘面积的 6.03%;而 CRP-Kap01S 的后桨表面空化程度则较前桨高,空化面积占盘面积的 3.21%,较 CRP-Kap01N 降低约 46.8%。与 CRP-Kap01N 相比,CRP-Kap01S 表现出更优良的抗空化性能,前后桨片状空化区域面积平均降低约 59%。

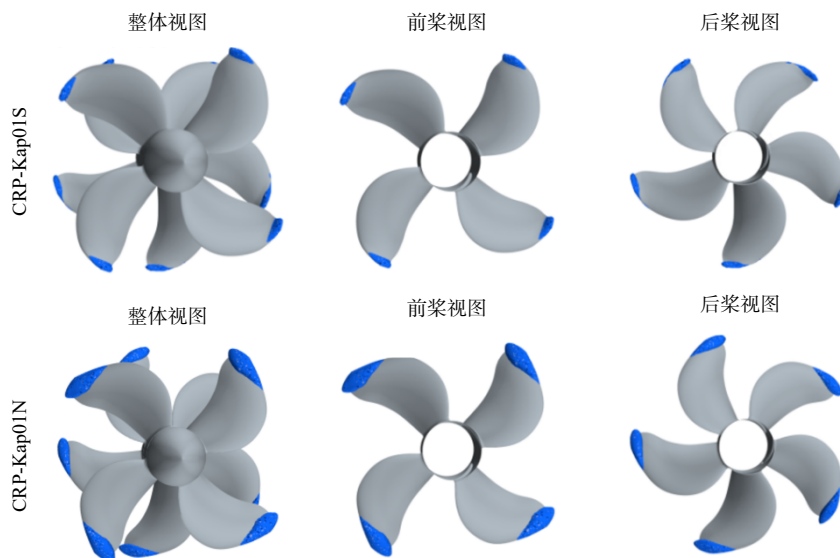


图6 对转桨 CRP-Kap01N 和 CRP-Kap01S 的片状空化分布 ( $J=0$ , 1500 r/min)

Fig.6 Sheet cavitation distribution of contra-rotating propellers CRP-Kap01N and CRP-Kap01S ( $J=0$ , 1500 r/min)

对转桨 CRP-Kap01N 和 CRP-Kap01S 的桨叶表面压力分布如图 7 所示。两组对转桨的主要负压区均位于桨叶吸力面上的叶梢端,桨叶表面片状空泡的位置与压力分布图中的负压区中高幅值范围基本一致。CRP-Kap01S 负压区的幅值低于 CRP-Kap01N,其原因在于叶尖端板阻碍了桨叶压力面向吸力面的绕流,降低了吸力面一侧流速,呈现较低的负压幅值。同时速度分布图 8 显示,CRP-Kap01S 的尾流轴向速度分布更均匀,尾流区直径更小,端板螺旋桨具有收缩聚拢尾流的效果。

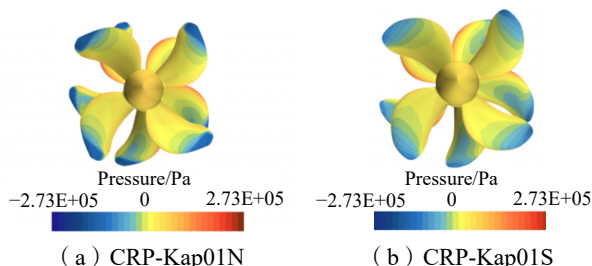


图7 对转桨桨叶表面压力分布图 ( $J=0$ , 1500 r/min)

Fig.7 Pressure distribution of contra-rotating propellers CRP-Kap01N and CRP-Kap01S ( $J=0$ , 1500 r/min)

#### 2.1.2 低进速工况 ( $J=0.1$ , 1500 r/min)

$J=0.1$  工况下,对转桨 CRP-Kap01N 与 CRP-Kap01S 桨叶吸力面上的片状空泡分布如

图 9 所示。与  $J=0$  的工况(图 6)相比,该工况下两型对转桨的片状空化程度均有所下降。CRP-Kap01N 前桨桨叶表面的空化区域占其盘面积的 6.04%,而 CRP-Kap01S 的前桨表面空化区域占其盘面比的 0.03%,较 CRP-Kap01N 降低约 99.5%,片状空化程度极低。

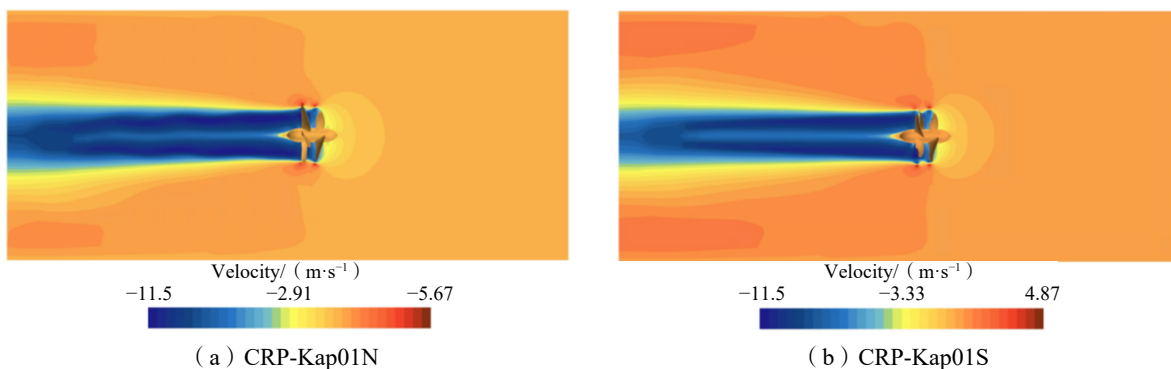


图 8 对转桨尾流轴向速度分布云图 ( $J=0$ , 1500 r/min)

Fig.8 Axial-velocity distribution in wake region of contra-rotating propellers CRP-Kap01N and CRP-Kap01S ( $J=0$ , 1500 r/min)

CRP-Kap01N 后桨表面的空化区域较其前桨小,占盘面积的 3.35%,而 CRP-Kap01S 的后桨表面则几乎观察不到空化。在低进速工况  $J=0.1$  下,对转桨 CRP-Kap01S 同样表现出更优良的抗空化性能,前后桨的片状空化区域面积平均降低约 99.8%。

### 2.2 对转桨梢涡分析 (系柱状态)

为研究两型对转桨的梢涡结构,若直接采用涡量进行螺旋桨梢涡结构的可视化,将会导致部分较弱的涡结构的可视化损失,而采取  $Q$  准则能弥补这一缺点。 $Q$  准则的定义如下:

$$Q = 0.5 (\|\mathbf{S}\|_F^2 - \|\boldsymbol{\Omega}\|_F^2) \quad (10)$$

式中,  $\boldsymbol{\Omega}$  为速度梯度对称张量,  $\mathbf{S}$  为速度梯度反对称张量。

取  $Q$  值为  $500/s^2$  的等值面,用以描述梢涡的形态结构。如图 10 所示,两组对转桨的后桨相对前桨产生反向梢涡,与前桨的梢涡交叉形成网状涡结构。CRP-Kap01S 前桨叶尖处,由于端板的存在,流经桨叶片表面的湍流被部分阻挡,阻碍了叶梢处的绕流,使叶尖涡强度减弱,同时使梢涡形状更为稳定,有助于提高能量利用效率。

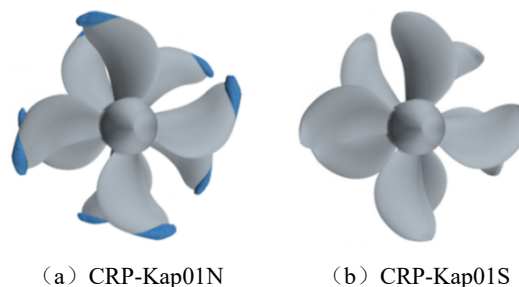


图 9 对转桨 CRP-Kap01N 和 CRP-Kap01S 的片状空化分布 ( $J=0.1$ , 1500 r/min)

Fig.9 Sheet cavitation distribution of contra-rotating propellers CRP-Kap01N and CRP-Kap01S ( $J=0.1$ , 1500 r/min)

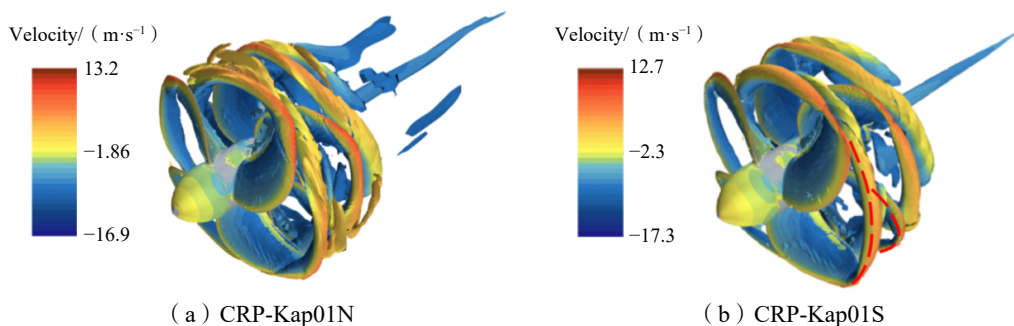


图 10  $Q=500/s^2$  梢涡分布图 ( $J=0$ , 1500 r/min)

Fig.10  $Q=500/s^2$  tip vortices distribution of contra-rotating propellers CRP-Kap01N and CRP-Kap01S ( $J=0$ , 1500 r/min)

### 3 推进性能校核

#### 3.1 敞水性能计算

采用空化模型,分别计算两组对转桨在进速系数  $J$  为 0~0.5 范围内的敞水性能,如图 11 所示。在低进速状态下,对转桨 CRP-Kap01S 更高效,效率高出 CRP-Kap01N 桨 0.91%~3.13%;在相同载荷下,CRP-Kap01S 也更高效,如图 11(c)所示。就推力系数而言,CRP-Kap01S 在  $J$  为 0~0.5 范围内均低于 CRP-Kap01N。

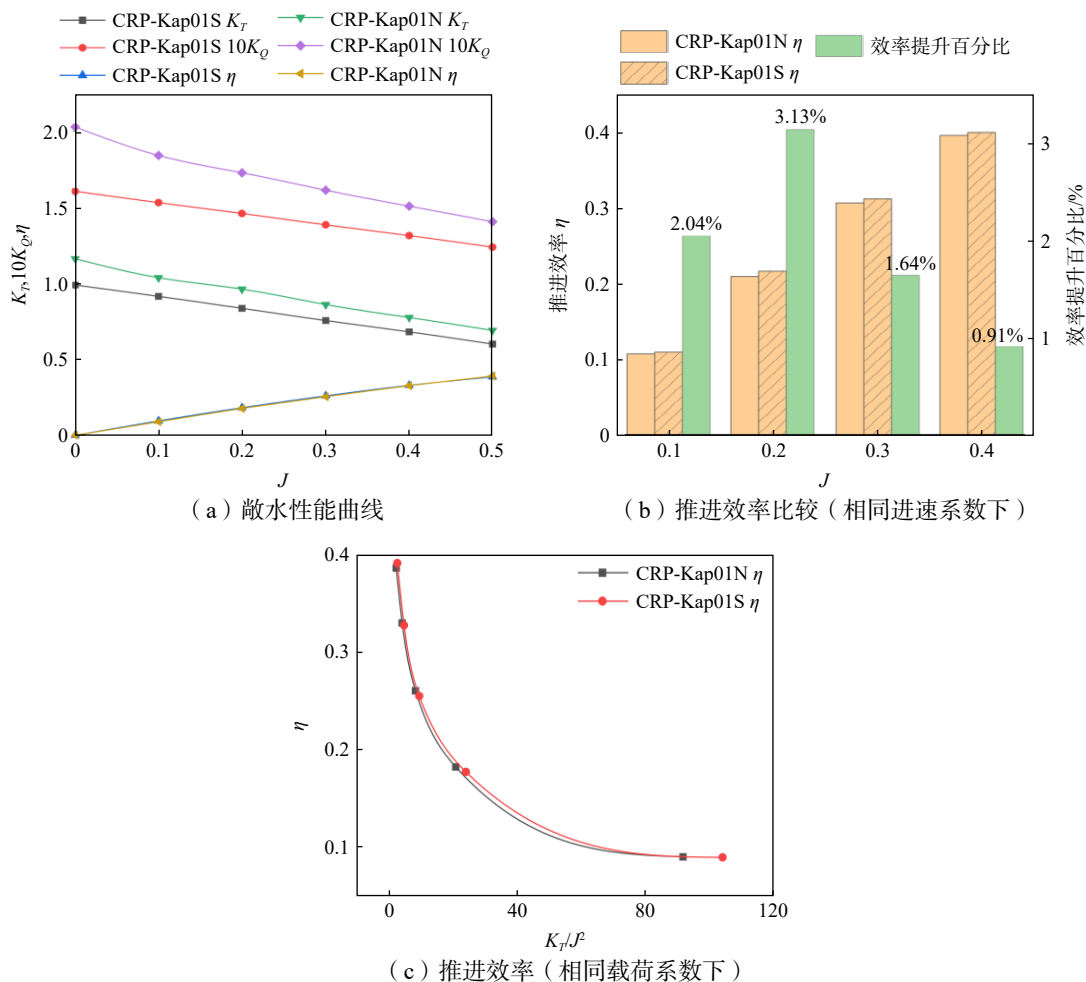


图 11 CRP-Kap01N 和 CRP-Kap01S 两组对转桨敞水性能曲线

Fig.11 Open water performance of propellers CRP-Kap01N and CRP-Kap01S ( $J=0\sim 0.5$ )

#### 3.2 系柱工况敞水实验

本研究在系柱状态的不同转速下,测量对转桨 CRP-Kap01S 的推力和功率,验证空化仿真结果的准确性。螺旋桨功率  $P$  与其前后桨叠加扭矩  $Q$  和转速  $n$  存在换算关系,如式(11)所示,故后文以功率表征螺旋桨扭矩来进行比较。实验采用大型断面水槽,该水槽长为 75 m,宽为 1.8 m,高为 2.0 m,如图 12(a)所示。

$$P = 2\pi nQ \quad (11)$$

分别在 400 r/min、600 r/min、720 r/min 和 800 r/min 转速下进行实验测量,将计算值和实验值进行对比,并计算误差,对比结果如图 13 所示。由图 13(c)可知,除在转速为 400 r/min 时的推力计算误差大于 5% 外,其余转速时的计算误差均小于 5%。实验过程中,在 400 r/min 的转速下,实验机构发生了

共振,产生较大的噪音,导致该点测力出现较大的偏差。通过总体对比,采用空化模型的敞水仿真结果与实验数据较为吻合,进一步验证了本文计算的准确性。



(a) 大型断面水槽 (b) 实验侧视图

图 12 大型断面水槽及对转桨 CRP-Kap01S 实验场景

Fig.12 Large-section experiment flume and propeller CRP-Kap01S in testing

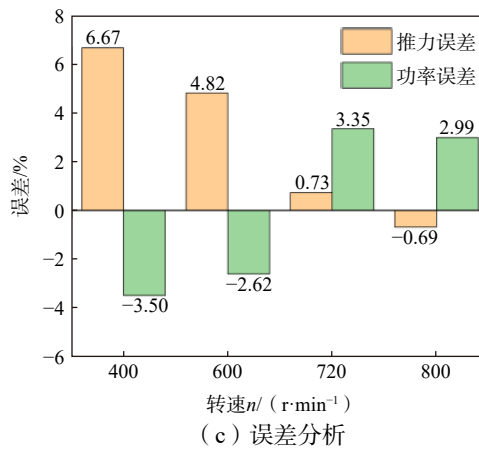
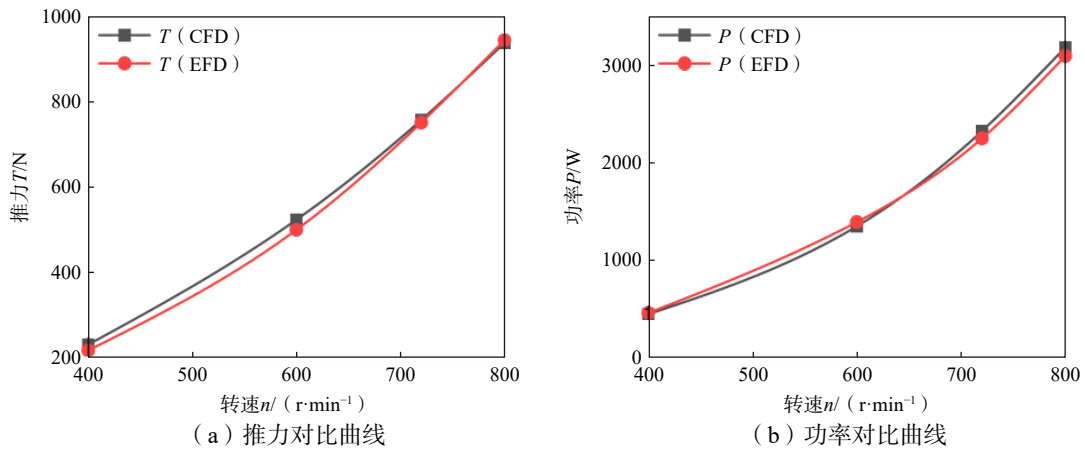


图 13 计算误差分析

Fig.13 Calculation error analysis

## 4 结 论

本文对常规侧斜对转螺旋桨 CRP-Kap01N 及相应衍生而来的端板型对转螺旋桨 CRP-Kap01S 进

行了空化分析和推进性能校核,得出以下结论:

(1)采用叶尖端板螺旋桨,有助于提高对转螺旋桨的整体抗空化性能。对侧斜对转螺旋桨 CRP-Kap01N 和端板型对转螺旋桨 CRP-Kap01S,应用空化模型在系柱状态( $J=0$ )及低进速状态( $J=0.1$ )下进行了空化仿真,系柱状态下端板型对转螺旋桨 CRP-Kap01S 相比于侧斜对转螺旋桨 CRP-Kap01N,前者桨叶表面片状空化区域减少约 59%,而在  $J=0.1$  时对转螺旋桨 CRP-Kap01S 呈现空化延迟。

(2)端板型对转螺旋桨在低进速下表现出更高的推进效率。在进速系数  $J$  为 0.1~0.4 范围内,对转桨 CRP-Kap01S 相对对转桨 CRP-Kap01N 推进效率提升 0.91%~3.13%。本文在不同转速下,测试了对转桨 CRP-Kap01S 的敞水性能,与空化仿真结果进行了比较,两者数据较为吻合。端板型对转螺旋桨适用于低速深潜器,具体应用值得进一步研究。

## 参 考 文 献:

- [1] Huang Y S, Dong X Q, Yang C J, et al. Design of wake-adapted contra-rotating propellers for high-speed underwater vehicles[J]. Applied Ocean Research, 2019, 2(4): 91–97.
- [2] 赵 旺. 对转桨水动力、空化及噪声性能数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.  
Zhao W. The research on performance of counter rotating propeller's hydrodynamics, cavitation and noise[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021. (in Chinese)
- [3] Delannoy Y, Kueny J L. Two phase flow approach in unsteady cavitation modelling[C]//ASME Cavitation and Multiphase Flow Forum, Toronto, 1990.
- [4] Singhal A K, Athavale M M, Li H, Jiang Y. Mathematical basis and validation of the full cavitation model[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124: 617.
- [5] Zwart P J, Gerber A G, Belamri T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Multiphase Flow, Yokohama, Japan, 2004.
- [6] Schnerr G H, Sauer J. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics[C]//Proceedings of 4th International Conference on Multiphase Flow, New Orleans, USA, 2001.
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] 吴思源, 张怀新, 姚慧岚. 基于 CFD 软件的均流中空化螺旋桨的水动力性能预报[J]. 船舶与海洋工程, 2022, 38(3): 17–24.  
Wu S Y, Zhang H X, Yao H L. A research on the hydrodynamic performance of cavitating propeller in uniform flow based on CFD software[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2022, 38(3): 17–24. (in Chinese)
- [9] 胡 健, 王雅楠, 王 晴, 等. 基于螺旋加密网格的螺旋桨梢涡空化数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 30–34.  
Hu J, Wang Y N, Wang Q, et al. Numerical simulation of propeller tip vortex cavitation based on helical mesh encryption[J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 48(3): 30–34. (in Chinese)
- [10] 赵旻晟, 万德成. 螺旋桨在非均匀流场中的空化模拟[J]. 中国造船, 2020, 61(S2): 247–253.  
Zhao M S, Wan D C. Simulation of propeller cavitation in non-uniform flow field[J]. Shipbuilding of China, 2020, 61(S2): 247–253. (in Chinese)
- [11] Kim S H, Choo S H, Park J Y, et al. Numerical simulation of cavitation phenomena for hybrid contra-rotating shaft propellers[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2015.
- [12] Lloyd T P, Vaz G, Rijpkema D, Reverberi A. Computational fluid dynamics prediction of marine propeller cavitation including solution verification[C]//Fifth International Symposium on Marine Propulsors, VTT Technical Research Center of Finland Ltd, Espoo, Finland, 2017.
- [13] Yilmaz N, Atlar M, Khorasanchi M. An improved mesh adaption and refinement approach to cavitation simulation (MARCS) of propellers[J]. Ocean Engineering, 2018, 171(2019): 139–150.

- [14] Ge M, Svennberg U, Bensow R E. Investigation on RANS prediction of propeller induced pressure pulses and sheet-tip cavitation interactions in behind hull condition[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 209(2021): 107503.
- [15] Lee Y H, Yang C Y, Chow Y C. Evaluations of the outcome variability of RANS simulations for marine propellers due to tunable parameters of cavitation models[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 226(2022): 108805.
- [16] Viitanen V, Sipilä T, Sánchez-caja A, Siikonen T. CFD predictions of unsteady cavitation for a marine propeller in oblique inflow[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 266(2022): 112596.
- [17] 何东亚, 万德成. 不同设计参数下对转桨水动力性能研究[J]. *海洋工程*, 2018, 36(2): 11.  
He D Y, Wan D C. Study on hydrodynamic performance of counter-rotating propeller under different design parameters[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 36(2): 11. (in Chinese)
- [18] 陈振纬, 陈历万, 周赵焯, 等. 新型具有端板效应的对转桨系柱工况的研究及验证[J]. *中国造船*, 2022, 63(4): 70–82.  
Chen C W, Chen L W, Zhou Z Y, et al. Study of novel counter-rotating propeller with end-plate effect under bollard working condition and verification[J]. *Shipbuilding of China*, 2022, 63(4): 70–82. (in Chinese)
- [19] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理(下)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.  
Sheng Z B, Liu Y Z. Principles of naval architecture (Part 2)[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2004.
- [20] Tsan-Hsing S, William W L, Aamir S. A new  $k-\varepsilon$  eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows: Model development and validation[J]. *Computers & Fluids*, 1995, 24(3).
- [21] Rodi W. Experience with two-layer models combining the  $k-\varepsilon$  model with a one-equation model near the wall[C]//29th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 1991.
- [22] 姚仁太, 郭栋鹏, 杨秋林, 等. 计算流体力学基础与 STAR-CD 工程运用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.  
Yao R T, Guo D P, Yang Q L, et al. Fundamentals of computational fluid dynamics and STAR-CD engineering applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [23] 陈铠杰, 万德成. PPTC 螺旋桨空化流动的数值模拟[C]//第二十九届全国水动力学研讨会论文集(上册), 2018: 657–665.  
Chen K J, Wan D C. Numerical simulation of cavitation flow of PPTC propeller[C]//Proceedings of the 29th National Symposium on Hydrodynamics (Part I). China Ocean Press, Beijing, 2018. (in Chinese)
- [24] 毛翼轩, 王英铸, 李 涛, 等. 不对称导管对船后桨空化性能的影响[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2021, 42(7): 959–966.  
Mao Y X, Wang Y Z, Li T, et al. Effect of asymmetric duct on cavitation performance of ship's rear propeller[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2021, 42(7): 959–966. (in Chinese)
- [25] 傅慧萍, 李 杰. 轻载下的螺旋桨空化流场数值模拟[J]. *上海交通大学学报*, 2018, 52(6): 631–635.  
Fu H P, Li J. Numerical simulation of propeller cavitation flow field under light load[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2018, 52(6): 631–635. (in Chinese)
- [26] Vaz G, Hally D, Huuva T, et al. Cavitating flow calculations for the E779A propeller in open water and behind conditions: Code comparison and solution validation[C]//Proceedings of the Fourth International Symposium on Marine Propulsors 2015, Ocean Engineering Group, The University of Texas at Austin, 2015.
- [27] 徐嘉启, 熊 鹰, 王展智, 等. HCRSP 推进器操舵工况空泡性能数值模拟[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(12): 1873–1879.  
Xu J Q, Xiong Y, Wang Z Z, et al. Numerical simulation of cavitation performance of HCRSP propeller in steering condition[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, 39(12): 1873–1879. (in Chinese)
- [28] Han J A, Wu O, Csab C, et al. Numerical investigation on hydrodynamic performance of a novel shaftless rim-driven counter-rotating thruster considering gap fluid[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 188(2022): 102967.
- [29] 兰加芬. 对转无轴轮毂推进器水动力性能分析及优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.  
Lan J F. Hydrodynamic performance analysis and optimization of counter-rotating shaftless rim propeller[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. (in Chinese)