斜流和变沉深状态下螺旋桨的敞水性能试验

谢凤伟，张　立*，车霖源
（上海船舶运输科学研究所有限公司，上海　200135）

摘　要：[目的]为研究螺旋桨在不同斜流角与沉深工况下的敞水性能，[方法]开展多工况模型试验，以某型螺旋桨为研究对象，选取沉深/螺旋桨直径（h/D）为 0、0.5、1.0、1.6，以及斜流角为 0°、4°、8°、12°、15°的组合条件进行深水拖曳水池敞水试验，测量并计算各工况下不同进速系数 J 对应的推力系数 K_T、扭矩系数 K_Q 和敞水效率 η。在此基础上对比分析各工况的敞水性能变化。[结果]结果表明：当 h/D 为 0 和 0.5 时，由于存在吸气现象，螺旋桨的敞水性能显著降低；当 h/D=1.0 时，其敞水性能略低于 h/D=1.6；当 h/D 为 1.0 和 1.6 时，敞水性能随斜流角的增大而略有提升。[结论]在螺旋桨设计过程中，可适当设置螺旋桨的斜流角，以提高其推进性能。研究成果可为螺旋桨的设计和试验提供一定参考。

关键词：螺旋桨；斜流；沉深；敞水；模型试验
中图分类号：U671.99　　**文献标志码：**A　　【DOI】10.13788/j.cnki.cbgc.2026.10.05

Open-Water Performance Test of Propellers Under Oblique Flow and Variable Depth Conditions

XIE Fengwei, ZHANG Li*, CHE Linyuan
(Shanghai Ship and Shipping Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200135, China)

Abstract: [Purpose] To investigate the open-water performance of propellers under different oblique flow angles and submergence conditions, [Method] model tests are carried out under multiple operating conditions. A certain type of propeller is taken as the research object, open-water tests are conducted in a deep-water towing tank with the ratios of immerge depth h to propeller diameter D set as 0, 0.5, 1.0 and 1.6, and oblique flow angles set as 0°, 4°, 8°, 12° and 15°. The thrust coefficient K_T, torque coefficient K_Q and open-water efficiency η under different advance coefficients J are calculated for each condition, and the variations in the open-water performance of the propeller across different conditions are compared. [Result] The results show that when the submergence ratio h/D=0, 0.5, the open-water performance of the propeller decreases significantly due to the occurrence of ventilation. The open-water performance at h/D=1.0 is slightly lower than that at h/D=1.6. When h/D=1.0 and 1.6, the open-water performance increases slightly with the increase of oblique flow angle. [Conclusion] In the process of propeller design, appropriately adjusting the propeller angle can improve its propulsion performance. The research results can provide some references for the design and testing of propellers.

Key words: propeller; oblique flow; immerge depth; open-water; model test

0　引言

船舶航行时的姿态变化会使螺旋桨的桨轴与水流形成夹角，导致其处于斜流状态。此时，螺旋桨在不同相位角处受到的力和流场不均匀，桨叶载荷呈现出非定常特性，推力、扭矩和空化特性均与常规状态存在差异[1-4]，螺旋桨轴承受载不均匀，甚至

收稿日期：2025-12-16；**修回日期：**2026-03-11；**录用日期：**2026-04-07
基金项目：中远海运集团有限公司科研项目（2025-4-Z001-02）
作者简介：谢凤伟（1992—），男，工程师。研究方向：船舶模型试验技术。
通信作者：张　立（1991—），男，副研究员。Email：vzhangli@hrbeu.edu.cn。

可能影响轴系安全[5-6]。然而，在合适的斜流角和特定的进速系数下，螺旋桨敞水效率可能会提高，船舶可借此提升推进效率。在浅吃水工况下，螺旋桨又会发生出水现象，叶梢接近或高出水面，进而引发吸气[7]，此时部分螺旋桨叶片在水面上方而无法产生有效的作用力，同样会对螺旋桨性能产生影响，且此时存在临界沉深比。在开展螺旋桨模型的敞水试验时，国际船模拖曳水池会议（International Towing Tank Conference, ITTC）质量规程推荐桨轴沉深＞1.5 倍螺旋桨直径，即叶梢距静水自由液面大于 1 倍直径，但并未明确界定沉深对螺旋桨敞水性能的影响，而沉深会影响测试精度[8]，进而影响实尺度预报结果。因此，影响螺旋桨推进性能的因素十分复杂，其中，斜流和不同沉深对螺旋桨水动力性能的影响更为复杂。

在船舶设计阶段，研究人员通常更关注船舶和螺旋桨在常规状态下的性能，开展模型试验时较少涉及螺旋桨在斜流与变沉深综合作用下的性能，为探明这 2 个因素的作用，有必要系统开展不同斜流角和不同沉深下的敞水性能研究。计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）和试验流体力学（Experimental Fluid Dynamics, EFD）均为研究螺旋桨性能的重要手段。当前，采用数值模拟研究螺旋桨常规与特殊工况下的敞水性能已较普遍：李浩然等[9]利用雷诺平均纳维-斯托克斯（Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS）湍流模型对 KP458 螺旋桨在斜流中的水动力特性进行数值模拟，验证了数值方法的适用性。胡洋等[10]基于 CFD 方法分析了斜流中螺旋桨的水动力性能，发现斜流会显著增大桨叶载荷。王雅楠等[11]采用 RANS 方法计算了斜流工况下螺旋桨的敞水性能，数值结果与试验结果吻合良好。张磊等[12]用 RANS 湍流模型研究了不同沉深下螺旋桨的吸气现象及水动力性能，结果表明存在临界沉深比，沉深对敞水性能有明显影响。试验方法具有数据可靠、不确定度低、可作为基准验证方法等典型优点，但由于试验方法的经济、时间等成本相对较高，有关螺旋桨在斜流和变沉深工况下的试验研究仍相对较少。

基于螺旋桨性能科研项目，为充分研究螺旋桨在斜流和变沉深状态下的敞水性能变化，以某型主力船型的螺旋桨为对象，开展了多工况下的模型敞水试验。分别在螺旋桨角度为 0°、4°、8°、12°、15°，沉深比分别为 0、0.5、1.0、1.6，以及进速系数为 0～0.8 的条件下进行敞水试验，以分析各工况推力系数、扭矩系数和敞水效率的特性。

1　模型试验原理

1.1　试验方法

螺旋桨敞水性能数据用于船舶推进性能分析和功率预报，敞水试验的目的是通过模型试验获取其在开放水域中的各项特征因子。本试验以 ITTC 推荐的船用螺旋桨模型敞水试验规程 *Open Water Test* 为方法依据。对于直径为 D 的螺旋桨，进速系数 J、推力系数 K_T、扭矩系数 K_Q 及敞水效率 η 的计算式分别为

$$J=\frac{V_A}{ND} \tag{1}$$

$$K_T=\frac{T}{\rho N^2D^4} \tag{2}$$

$$K_Q=\frac{Q}{\rho N^2D^5} \tag{3}$$

$$\eta=\frac{J}{2\pi}\frac{K_T}{K_Q} \tag{4}$$

式（1）～式（4）中：V_A 为螺旋桨的进速；ρ 为密度；N 为螺旋桨转速；T 和 Q 分别为敞水试验过程中产生的推力和扭矩。

1.2　试验设备及步骤

螺旋桨模型敞水试验所使用的设备包括拖曳水池、拖车、螺旋桨模型和敞水动力仪等。通过改变螺旋桨的安装高度设定不同的沉深；通过沿纵剖面旋转敞水动力仪调整斜流角，此时敞水动力仪轴线与液面的夹角即为斜流角。试验中保持螺旋桨转速不变，改变拖车进速，在相应测量范围内同步测量螺旋桨转速、拖车进速、螺旋桨产生的推力和吸收的扭矩，试验示意见图 1[13]。

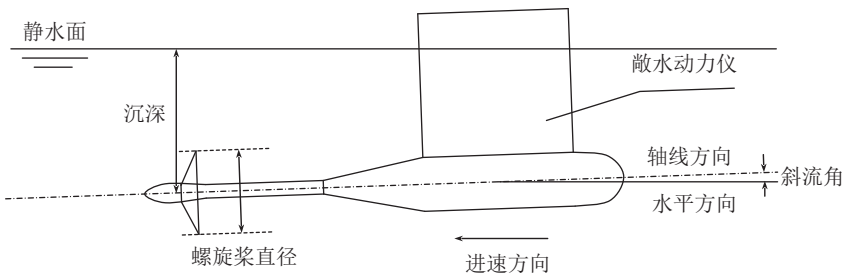


图 1　敞水试验安装示意

Fig. 1　Schematic Diagram of Open-Water Test Installation

2　研究对象和试验工况

为研究螺旋桨在不同沉深和斜流角下的敞水性能，在上海船舶运输科学研究所有限公司的深水拖曳水池中开展了系列敞水试验。水池长 192.0 m、宽 10.0 m、水深 4.2 m，拖车速度范围为 0.2 m/s～9.0 m/s。螺旋桨模型见图 2。敞水动力仪最大量程为 392.4 N，纵向可调角度为−15°～15°，见图 3。敞水试验示意见图 4，试验所用螺旋桨模型为水池适用标桨，该桨已完成敞水试验不确定度分析，结果见文献[8]。本次测试在典型工况下的结果与文献值对比，满足精度要求。

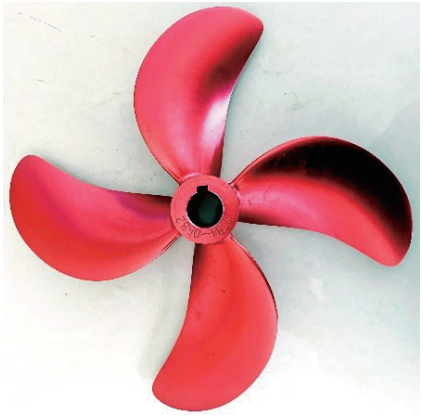


图 2　螺旋桨模型

Fig. 2　Propeller Model



图 3　敞水动力仪纵向角度

Fig. 3　Longitudinal Angle of the Open-Water Dynamometer

螺旋桨模型直径 D=250 mm，桨叶数为 4，盘面比为 0.48，桨模叶厚为 3.522 mm，螺距比 P_{mean}/D=0.803 2。在不同轴沉深和不同斜流角工况下，试验转速 N=16 r/s，水温为 19.4 ℃，密度为 998.329 1 kg/m^3，运动黏性系数 ν=1.018 2×10^{-6} m^2/s，基于模型直径与转速的雷诺数约 6.2×10^5。试验工况见表 1，其中，沉深比为沉深与螺旋桨模型直径的比值。通过改变拖车速度，敞水动力仪采集试验各进速系数下的推力 T 与扭矩 Q，进而换算得到推力系数 K_T、扭矩系数 K_Q 和敞水效率 η。由于重力影响可忽略，且斜流角的负向角度与正向角度对称，螺旋桨桨叶受力仅存在相位差异，而不会产生宏观测量力学性能差异，因此仅对正向斜流角进行讨论。



图 4　敞水试验示意

Fig. 4　Schematic Diagram of Open-Water Test

表 1　螺旋桨模型敞水试验工况

Tab. 1　Working Condition of Propeller Model Open-Water Test

沉深比	斜流角
0	0°，4°，8°，12°，15°
0.5	0°，4°，8°，12°，15°
1.0	0°，4°，8°，12°，15°
1.6	0°，4°，8°，12°，15°

3　试验结果及分析

根据不同的斜流角和沉深比这 2 个变量分别开展螺旋桨模型在不同工况下的敞水试验，并参照式（1）～式（4）计算其敞水性能，得到的结果见图 5～图 9。

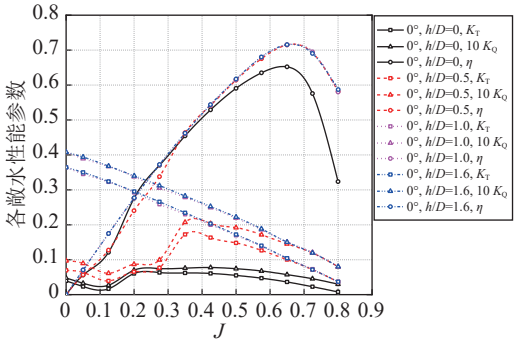


图 5　斜流角为 0°时不同沉深状态下螺旋桨的敞水性能

Fig. 5　Open-Water Performance of Propeller at Different Depths Under 0° Flow Angle

3.1　不同斜流角下的试验结果

斜流角为 0°时不同沉深状态下螺旋桨的敞水性能见图 5。

由图 5 可知，当斜流角为 0°、进速系数 J 为

0～0.4 时，随着沉深比 h/D 不断增大（依次为 0、0.5，1.0、1.6），螺旋桨的推力系数 K_T、扭矩系数 K_Q 和敞水效率 η 均小幅度增加；当沉深比为 0 和 0.5 时，K_T 与 K_Q 约为最大沉深时的 1/3，且数据波动较大，η 的波动较为明显。当进速系数 J≈0.35 时，K_T、K_Q 和 η 趋于稳定，且 η 在各沉深下近似相等。当沉深比为 1.0 和 1.6 时，二者的 K_T、K_Q 和 η 趋于接近，数据变化较小。

斜流角为 4°时不同沉深状态下螺旋桨的敞水性能见图 6。由图 6 可知，当斜流角为 4°、进速系数 J 为 0～0.4 时，随着沉深比 h/D 不断增大，螺旋桨的推力系数 K_T、扭矩系数 K_Q 和敞水效率 η 均有所增加，且当沉深比为 0 和 0.5 时，K_T、K_Q 和 η 的数据波动较大。当进速系数 J≈0.4 时，K_T、K_Q 和 η 趋于稳定，且 η 在各沉深下近似相等。当沉深比为 0 时，K_T、K_Q 和 η 均不稳定；当沉深比为 0.5 时，K_T 和 K_Q 仍有波动，但 η 已趋于稳定；当沉深比为 1.0 和 1.6 时，二者的 K_T、K_Q 和 η 趋于接近。

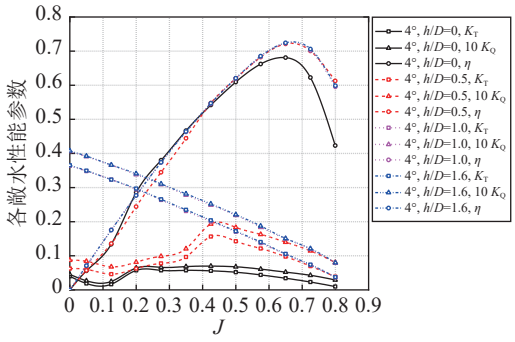


图 6　斜流角为 4°时不同沉深状态下螺旋桨的敞水性能

Fig. 6　Open-Water Performance of Propeller at Different Depths Under 4° Flow Angle

斜流角为 8°时不同沉深状态下螺旋桨的敞水性能见图 7。由图 7 可知，当斜流角为 8°、进速系数 J 为 0～0.4 时，随着深沉比 h/D 不断增大，螺旋桨的推力系数 K_T、扭矩系数 K_Q 和敞水效率 η 均明显增加，且当沉深比为 0 和 0.5 时，K_T、K_Q 和 η 的数据波动较大。当进速系数 J≈0.4 时，K_T、K_Q 和 η 趋于稳定，且 η 在各沉深下近似相等。当沉深比为 0 时，K_T、K_Q 和 η 均不稳定；当沉深比为 0.5 时，K_T 与 K_Q 仍有波动，但 η 已趋于稳定；当沉深比为 1.0 和 1.6 时，二者的 K_T、K_Q 和 η 趋于接近，数据稳定。

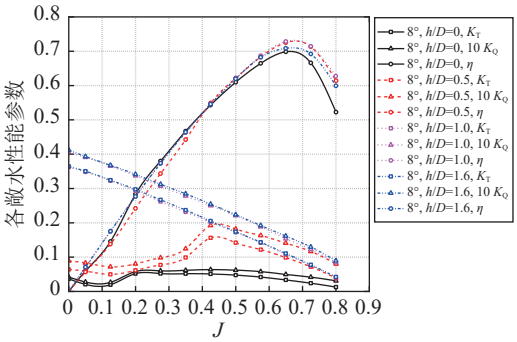


图 7　斜流角为 8°时不同沉深状态下螺旋桨的敞水性能

Fig. 7　Open-Water Performance of Propeller at Different Depths Under 8° Flow Angle

斜流角为 12°时不同沉深状态下螺旋桨的敞水性能见图 8。由图 8 可知，当斜流角为 12°、进速系数 J 为 0～0.4 时，随着沉深比 h/D 不断增大，螺旋桨的推力系数 K_T、扭矩系数 K_Q 和敞水效率 η 均明显增加，且当沉深比为 0 和 0.5 时，K_T、K_Q 和 η 的数据波动较大。当进速系数 J≈0.4 时，K_T、K_Q 和 η 趋于稳定，且 η 在各沉深下近似相等。当沉深比为 1.0 和 1.6 时，二者的 K_T、K_Q 和 η 趋于接近。

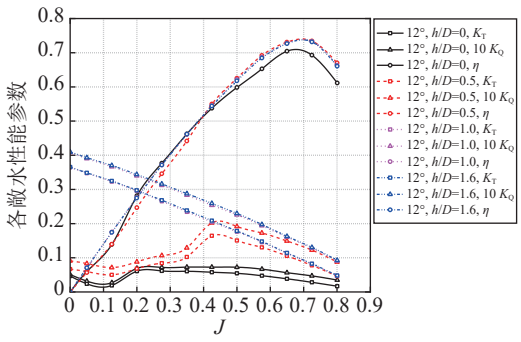


图 8　斜流角为 12°时不同沉深状态下螺旋桨的敞水性能

Fig. 8　Open-Water Performance of Propeller at Different Depths Under 12° Flow Angle

斜流角为 15°时不同沉深状态下螺旋桨的敞水性能见图 9。由图 9 可知，当斜流角为 15°、进速系数 J 为 0～0.4 时，随着深沉比 h/D 不断增大，螺旋桨的推力系数 K_T、扭矩系数 K_Q 和敞水效率 η 均逐渐增加，且当沉深比为 0 和 0.5 时，K_T、K_Q 和 η 的数据波动较大。当进速系数 J 约 0.4 时，K_T、

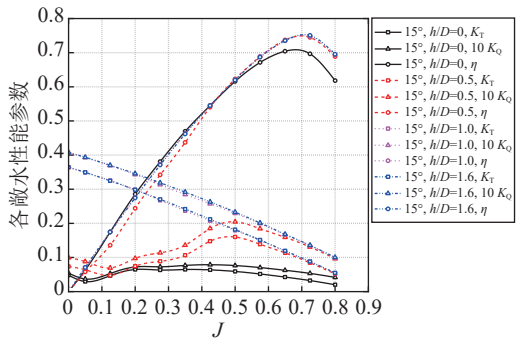


图 9　斜流角为 15°时不同沉深状态下螺旋桨的敞水性能

Fig. 9　Open-Water Performance of Propeller at Different Depths Under 15° Flow Angle

K_Q 和 η 趋于稳定，且 η 在各沉深下近似相等。当沉深比为 1.0 和 1.6 时，二者的 K_T、K_Q 和 η 趋于接近。

3.2 不同进速区间的敞水性能特点

3.2.1 低进速系数区间（J=0～0.4）

在低进速系数下，螺旋桨性能受沉深影响显著，受斜流角影响相对较小。当沉深较浅（h/D=0 和 0.5）时，K_T、K_Q 和 η 的数据均出现较大波动，且明显低于较大沉深工况，尤其当 J<0.35 时更为突出。随着沉深比增至 1.0 及以上，各系数变化趋于平缓，不同沉深间的性能差异逐渐减小。

3.2.2 中高进速系数区间（J=0.4～0.8）

当 J>0.4 时，各工况下的 K_T、K_Q 和 η 的数据逐渐趋于稳定。在固定沉深下，随着斜流角增大，K_T、K_Q 和 η 均呈上升趋势，且在较大斜流角（12° 和 15°）下的上升趋势更为明显。当 J≈0.7 时，沉深比 0.5、1.0 和 1.6 之间的性能已十分接近；当 J≈0.8 时，不同斜流角与沉深下的性能曲线几乎重合，表明此时斜流角与沉深的影响已显著减弱。

3.3 典型进速系数下的斜流影响定量分析

沉深比为 0：当斜流角为 0°～8°时，K_T 和 K_Q 变化不大，η 略有上升；当斜流角增至 12°、15°时，K_T、K_Q 和 η 显著提高。沉深比为 0.5：当斜流角为 0°～4°时，K_T 和 K_Q 变化较小，η 上升趋势明显；当斜流角≥8°时，各进速系数均显著增加。沉深比为 1.0：当斜流角为 0°～4°时，K_T 和 K_Q 基本不变，η 仍随斜流角的增加而增加；当斜流角≥8°时，K_T 和 K_Q 明显上升，η 持续增加。沉深比为 1.6：在所有斜流角下，K_T、K_Q 和 η 均随斜流角的增加而明显上升，且与沉深比为 1.0 的性能变化趋势相近。若以沉深比为 1.6 下斜流角为 0°的敞水结果为基准，其余斜流角下的性能对比见表 2。

表 2　沉深比为 1.6 时不同斜流角的敞水结果

Tab. 2　Open Water Results with Different Oblique Flow Angles at Depth Ratio of 1.6

J	4°			8°			12°			15°		
	K_T/%	$10K_Q$/%	η/%	K_T/%	$10K_Q$/%	η/%	K_T/%	$10K_Q$/%	η/%	K_T/%	$10K_Q$/%	η/%
0.20	0.61	0.22	−0.03	0.73	0.39	−0.08	0.77	1.10	−0.76	1.08	1.65	−0.97
0.42	0.39	−0.19	0.59	1.05	0.70	0.34	2.68	2.61	0.06	4.22	4.04	0.19
0.50	−0.02	−0.57	0.54	1.17	0.74	0.40	3.62	3.47	0.12	5.46	4.97	0.41
0.57	0.30	−0.37	0.73	2.34	2.09	0.30	5.48	4.87	0.62	7.90	6.93	0.96

4 结论

为研究不同斜流角和沉深对螺旋桨敞水性能的影响，以某型螺旋桨为对象开展敞水试验，获得了试验矩阵各工况下的推力系数、扭矩系数和敞水效率，并对其变化趋势进行了对比分析，主要结论如下：

1）斜流角和沉深均会对螺旋桨的敞水性能产生影响。浅沉深（尤其是沉深比≤0.5）易使螺旋桨引发吸气现象，从而使敞水性能显著下降且数据波动较大；当沉深比≥1.0 时，继续增加沉深对螺旋桨敞水性能的影响明显减弱。

2）当沉深满足试验要求后，沉深对螺旋桨敞水性能的影响不再显著，此时随着斜流角增加，螺旋桨的敞水性能提升，表明适当的斜流角有助于改善其推进性能。但斜流角的正面影响须考虑其对空化性能的潜在不利效应。

3）低进速系数下螺旋桨敞水性能受沉深影响显著；随着进速系数增加，斜流角与沉深的影响逐渐减弱，尤其当 J>0.6 后，各工况性能趋于一致。

参考文献：

[1] 张嶲, 王鑫宇, 王智程, 等. 大角度斜流下螺旋桨与导管桨尾流场特性[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(11): 1432-1441.
ZHANG Q, WANG X Y, WANG Z C, et al. Wake Field Characteristics of Propeller and Ducted Propeller Under Large-Angle Oblique Flow[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(11): 1432-1441.

[2] 郑巢生, 刘登成, 张国平, 等. 斜流下螺旋桨空泡及脉动压力数值预报研究[J]. 中国造船, 2023, 64(4): 240-247.
ZHENG C S, LIU D C, ZHANG G P, et al. Numerical Prediction Study of Propeller Cavitation and Fluctuating Pressure Under Oblique Flow[J]. Shipbuilding of China, 2023, 64(4): 240-247.

[3] 于凯, 成晨, 时光宇, 等. 斜流条件下螺旋桨空泡特性的数值研究[J]. 上海交通大学学报, 2024(10): 1-19.
YU K, CHENG C, SHI G Y, et al. Numerical Study on Propeller Cavitation Characteristics Under Oblique Flow Conditions[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024(10): 1-19.

[4] 朱显玲, 齐江辉, 陈艳霞. 斜流中七叶侧斜螺旋桨水动力及空泡性能研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8): 425-433.
ZHU X L, QI J H, CHEN Y X. Study on Hydrodynamic and Cavitation Performance of a Seven-Bladed Skewed

Propeller in Oblique Flow[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(8): 425-433.

[5] 马娟, 刘林华, 魏斌. 斜流中船后螺旋桨水动力载荷实尺度计算分析[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(23): 44-49.
MA J, LIU L H, WEI B. Full-Scale Calculation and Analysis of Hydrodynamic Loads of a Propeller Behind a Ship in Oblique Flow[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(23): 44-49.

[6] 李勇跃, 张立, 邢磊, 等. 双尾船舵角优化的阻力和自航数值模拟[J]. 船舶工程, 2025, 47(1): 30-37.
LI Y Y, ZHANG L, XING L, et al. Numerical Simulation of Resistance and Self-Propulsion for Rudder Angle Optimization of a Twin-Skeg Ship[J]. Ship Engineering, 2025, 47(1): 30-37.

[7] 谢凤伟, 伍锐, 马雪泉, 等. 不同桨轴沉深螺旋桨敞水性能试验[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2020, 43(3): 12-17.
XIE F W, WU R, MA X Q, et al. Open Water Performance Test of Propellers with Different Shaft Submergences[J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2020, 43(3): 12-17.

[8] 张立, 陈建挺, 陈伟民, 等. 螺旋桨模型敞水试验的不确定度分析[J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2021, 49(4): 1-6.
ZHANG L, CHEN J T, CHEN W M, et al. Uncertainty Analysis of Propeller Model Open Water Test[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(4): 1-6.

[9] 李浩然, 冀楠, 钱志鹏, 等. 斜流中操舵对螺旋桨性能影响研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(19): 52-58.
LI H R, JI N, QIAN Z P, et al. Study on the Influence of Steering on Propeller Performance in Oblique Flow[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(19): 52-58.

[10] 胡洋, 胡健, 刘亚彬. 斜流中螺旋桨的水动力性能研究[J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2019, 43(2): 262-268.
HU Y, HU J, LIU Y B. Study on Hydrodynamic Performance of a Propeller in Oblique Flow[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2019, 43(2): 262-268.

[11] 王雅楠, 代潞, 匡恒. 斜流中螺旋桨水动力及梢涡流场数值模拟[J]. 船电技术, 2023, 43(5): 62-66.
WANG Y N, DAI L, KUANG H. Numerical Simulation of Hydrodynamic and Tip Vortex Flow Field of a Propeller in Oblique Flow[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2023, 43(5): 62-66.

[12] 张磊, 周志勇, 张雨新, 等. 基于数值模拟的螺旋桨吸气及水动力性能研究[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(5): 96-101.
ZHANG L, ZHOU Z Y, ZHANG Y X, et al. Numerical Study on Propeller Ventilation and Hydrodynamic Performance[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(5): 96-101.

[13] ITTC. Open Water Test[S]. 2021.