文章编号：1007−7294(2026)07−1121−10

污损附着对螺旋桨敞水性能的影响研究

杨晶惠，汪春辉，高　锋，张国桢，王　超
（哈尔滨工程大学 船舶工程学院，哈尔滨 150001）

摘要：为详细探索螺旋桨在遭受生物污损附着后的敞水性能变化情况，本文以实尺度 KP505 螺旋桨为研究对象，根据污损在螺旋桨表面的附着规律进行污损的几何建模，基于粘流 CFD 方法和粗糙度函数模型，分别开展实尺度螺旋桨在光滑及不同污损附着工况下的数值模拟仿真。研究结果表明，附着的污损对敞水性能的影响很大，不同污损会导致螺旋桨的推力降低、扭矩增大、推进效率减小，尾涡的强度降低且消散得更快；污损还会导致螺旋桨桨叶及其周围流场的压力发生变化，污损越严重，变化越明显。纵使污损会加大流场能量的损失，造成许多不利影响，但污损可以减小螺旋桨后方流场的尾迹长度，这有助于减小对远后方流场的影响。

关键词：生物污损；粗糙度；实尺度 KP505 螺旋桨；敞水性能；数值模拟
中图分类号：U661　　**文献标识码：**A　　**doi:** 10.3969/j.issn.1007−7294.2026.07.007

Study on the influence of biofouling on the open water performance of propellers

YANG Jing−hui, *WANG Chun−hui*, *GAO Feng*, *ZHANG Guo−zhen*, *WANG Chao*
(College of Ship Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to explore the change of propulsion performance of propeller after biological fouling, the full-scale KP505 propeller was taken as the research object. The geometric modeling of fouling was carried out according to the fouling attachment law on the propeller surface, and then the numerical simulation of full-scale propeller under smooth and different fouling attachment conditions was carried out based on viscous fluids Computational Fluid Dynamics (CFD) method and roughness function model. The results show that the attached biofouling has a greater effect on the open water performance. Specially different fouling conditions lead to a reduction in propeller thrust, an increase in torque, a reduction in propulsion efficiency, a reduction in the strength of the wake vortex and the faster dissipation. The more severe the foulings is, the more obvious the change is. Although fouling can increase the loss of flow field energy and cause many adverse effects, fouling can shorten the wake length of the flow field behind the propeller, thereby mitigating its disturbance on the far-field flow.

Key words: biofouling; roughness; full-scale KP505 propeller; open water performance; numerical simulation

收稿日期：2026−01−12
基金项目：国家重点研发计划(2025YFE0215003; 2025YFE0215000)；黑龙江省自然科学基金资助项目(YQ2022E015)；国防基础科研产品创新项目资助(KY10100230067)
作者简介：杨晶惠(2000–)，女，硕士；汪春辉(1985–)，女，博士，副教授，E-mail: chunhui_wang@hrbeu.edu.cn；
高　锋(2000–)，男，硕士；张国桢(1999–)，男，硕士；
王　超(1981–)，男，博士，教授，E-mail: wangchao0104@hrbeu.edu.cn。

0 引 言

长期航行中的船舶,螺旋桨表面会受到各种海洋生物的附着及海洋环境的腐蚀[1−2],严重情况下,桨叶外形会发生变化,由此导致表面粗糙度增加,螺旋桨的敞水性能下降,最终消耗大量的燃油,排放更多的温室气体,这不利于营运经济性和环境友好性。虽然现在已有许多的技术手段来防止生物污损的附着及海洋环境的腐蚀[3−4],但随着时间的增长,生物污损还是不可避免地附着在船桨表面上,且污损附着的尺寸及覆盖面积会逐渐增大,因此探索生物污损附着后的螺旋桨敞水性能变化情况,可为减轻污损影响、优化防污策略及确定清污时机等提供一定的参考,这对船舶的节能减排和高效运营具有重要意义。

近年来,CFD 数值模拟方法因其具有成本低、方便快捷等优势被人们广泛使用,于是相关学者纷纷采用 CFD 方法探索了不同的粗糙度高度对螺旋桨敞水性能的影响情况。Owen D 等[5] 和 Soon S 等[6−7],基于 STAR-CCM+软件,利用粗糙度函数模型,分别探索了不同污垢对 PPTC 螺旋桨和 KP505 螺旋桨敞水性能的影响情况,发现严重污垢会导致螺旋桨敞水效率的降低幅度高达 30%。此外,污损还可减少轮毂的涡流空化,即污损对减少螺旋桨的空化具有一定的积极作用。李坚波等[8] 使用 CFD 方法探索了 DTMB4119 螺旋桨桨叶的敞水性能受生物污损附着的影响变化情况,发现当等效壁面粗糙度达到螺旋桨直径的 0.1% 时,推力系数将减小 8.08%,力矩系数将增加 10.72%,相应推进效率降低 16.97%,且当表面粗糙度超过螺旋桨直径约 0.03% 后,变化趋于缓和。漆超等[9] 采用 CFD 方法,探索了 NACA-4424 翼型在污损不同高度和密度下的水动力性能变化情况,发现污损使翼型的升阻比最大降低多达 80%,防污涂层本身的粗糙度最大可使阻力增大 20% 左右。

以上研究大多数仅仅将污损转化为粗糙度高度进行探索,这与真实螺旋桨表面遭受的污损附着存在一定差距,所得结论具有一定局限性。因此,本文以实尺度 KP505 螺旋桨为研究对象,根据真实污损在螺旋桨表面的附着规律,利用 Rhino 软件进行螺旋桨表面污损附着的几何建模,然后采用 CFD 方法,利用粗糙度函数模型探索不同的污损工况对螺旋桨敞水性能及其周围流场的影响情况。

1 数值方法

1.1 控制方程

本文使用 CFD 软件 STAR-CCM+进行数值模拟仿真,采用非定常不可压缩雷诺平均纳维-斯托克斯(Reynolds Averaged Navier-Stockes, RANS)方程进行数值求解,湍流模型选用 SST k-ω方程,使用有限体积法对控制方程进行离散,其中动量方程的对流项采用二阶迎风格式,时间项采用一阶格式,离散的代数方程用逐点 Gauss-Seidel 迭代法求解,并且采用代数多重网格方法加快求解的收敛速度。本研究的控制方程表达式为

$$\frac{\partial(\rho\overline{u}_i)}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho\overline{u}_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\overline{u}_i\overline{u}_j+\rho\overline{u_i'u_j'})}{\partial x_j}=\rho\overrightarrow{f}-\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i}+\frac{\partial\overline{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

$$\overline{\tau}_{ij}=\mu\left(\frac{\partial\overline{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{u}_j}{\partial x_i}\right) \tag{3}$$

式中,$\overline{u}$表示速度的时间平均值,ρ 为流体的密度,t 为时间,$\rho\overline{u_i'u_j'}$为湍流应力,$\overline{f}$为质量力,$\overline{p}$为平均压力,$\overline{\tau}$为平均剪切应力,μ 为流体的动力粘性系数。

1.2 粗糙度函数

螺旋桨表面的污损会增大其表面的粗糙度,而粗糙度效应对边界层内流体流动的能量损失有着重

要的影响，表面粗糙度会导致流体的湍流度增加，由此增加湍流应力和壁面切应力，最终会导致边界层内流体的速度降低。由于不同的壁面粗糙状态会导致流体速度下降的不同，因此可将粗糙度函数ΔU^+和粗糙度雷诺数k^+一一对应来进行相应的研究，而它们的确定通常需要进行试验得到，为此学者们通过各种理论研究和模型试验不断探索粗糙度和速度之间的具体关系，目前在数值模拟中常用的为Demirel 等提出的粗糙度函数模型。

Demirel 等[10−12]通过测量模型平板在不同防污涂层、不同尺寸及覆盖度的污损下的阻力，利用相应公式得出平板在不同污损工况下的粗糙度雷诺数k^+和粗糙度函数ΔU^+，通过拟合数据，结合理论公式最终得到适合于螺旋桨和船舶在几何污损工况下的粗糙度函数模型，并分别通过船模阻力试验验证了粗糙度函数模型的正确性，其中适用于螺旋桨在几何污损工况下的粗糙度函数模型如下式所示

$$U^+ = \frac{1}{\kappa}\ln y^+ + B - \Delta U^+ \tag{4}$$

$$k^+ = \frac{kU_\tau}{\nu} \tag{5}$$

$$\Delta U^+ = \begin{cases} 0(k^+ < 3) \\ \dfrac{1}{\kappa}\ln(0.26k^+)^{\sin\left[\frac{\pi}{2}\frac{\log(k^+/3)}{\log(5)}\right]}(3 \leqslant k^+ < 15) \\ \dfrac{1}{\kappa}\ln(0.26k^+)(15 \leqslant k^+) \end{cases} \tag{6}$$

式中，U^+为平均速度与剪切力速度之比的无量纲速度（$U^+ = U/U_\tau$），κ为冯卡门常数，通常取值为 0.42，B 为光滑壁对数律截距，ΔU^+为粗糙度函数，k^+为粗糙度雷诺数，k 为粗糙度高度，U_τ是剪切力速度，ν是运动粘性系数。

螺旋桨表面附着污损后，使用公式(4)~(6)来修正边界层内由于粗糙度导致的速度分布，以此将粗糙度效应定量地转化为 RANS 方程数值求解过程中对边界层速度的修正值，最终得出不同污损状态下的螺旋桨推力、扭矩和表面压力分布等结果。本研究将通过用户程序将此粗糙度函数模型嵌入进STAR-CCM+软件中进行数值模拟仿真，以得出更加真实合理的数值结果来探究不同污损工况对实尺度螺旋桨敞水性能的影响情况。

2 计算模型及结果验证

2.1 几何模型及工况设计

本文以实尺度 KP505 螺旋桨为研究对象，其几何模型基本参数和数值模拟参数如表 1 所示

表 1 KP505 螺旋桨的几何参数

Tab.1 Geometric parameters of the KP505 propeller

参数名称	参数值	参数名称	参数值
桨叶数	5	毂径比	0.18
直径D（m）	7.9	旋向	右旋
螺距比P/D（0.7R）	0.95	转速n（r/s）	1.6
盘面比AE/AO	0.8	进速系数J	0.2，0.3，0.4，0.5，0.6，0.7，0.8，0.9

目前污损附着的严重程度主要从污损类型、覆盖面积和生物大小这三个方面来判断，判断方法主要采用测量和目检法。由于真实污损生物及附着具有随机性，目前很难定量分析，因此普遍定性地将污损分为轻度、中度和重度这三大类，轻度污损的附着厚度很小，且整体附着较均匀，可仅仅用粗糙度高度进行代替，而中度污损和重度污损的附着厚度较大，且几何污损可改变船桨表面形貌，因此除了使用粗糙度高度外，还需进行污损的几何建模。

本文以实尺度 KP505 螺旋桨为研究对象，使用 Rhino 软件中的 Grasshopper 插件对螺旋桨表面进

行污损的几何建模。在具体建模过程中,以圆台代替常见的生物污损——藤壶来进行,圆台在螺旋桨表面的具体分布情况参考杨宗澄[13]和常江凡等[14]于2016年基于实船调查得到的污损生物在船桨表面附着的一般规律:螺旋桨上的污损主要集中在毂帽和毂轴上,桨叶上的污损较少,污损从根部到尖端逐渐减少。图1展示了真实螺旋桨污损附着的严重程度及螺旋桨污损附着的建模情况。

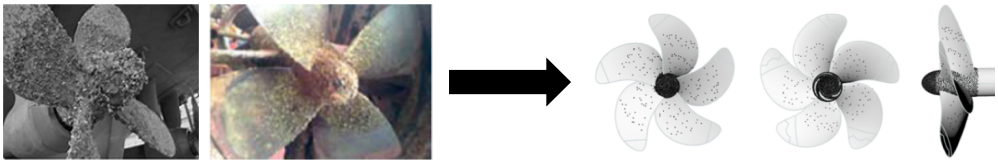


图1 螺旋桨表面污损的几何建模

Fig.1 Geometric modeling of propeller surface biofouling

在每种污损状态下,随着时间的推移,污损程度也会逐渐增加,因此本研究以粗糙度高度和圆台的尺寸来定量体现不同污损附着程度的生物污损,具体污损工况设计如表2所示。

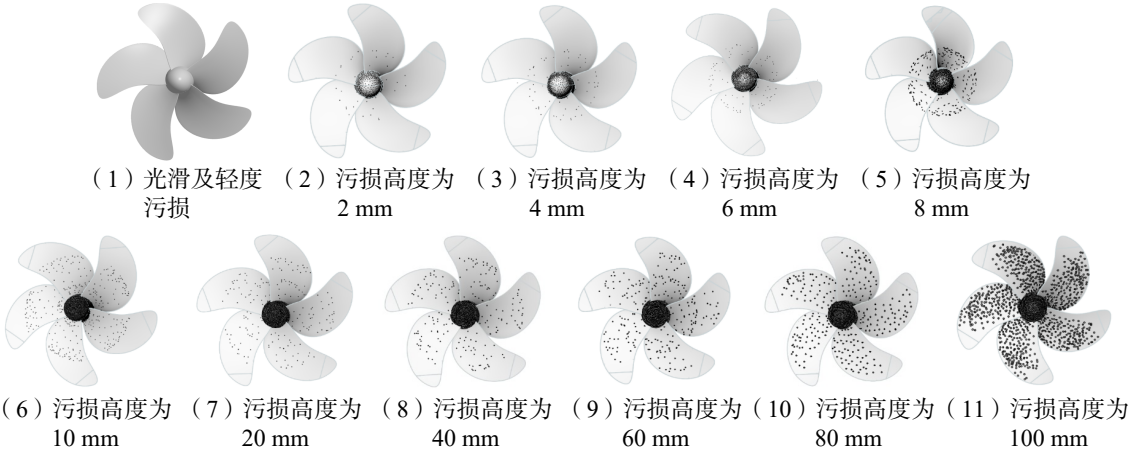
表2 污损工况设计

Tab.2 Parameter settings of biofouling condition

污损类别	污损工况
轻度污损	k=100、200、300、400、500、600、700、800、900、1000 μm
	1.k=2000 μm，R=1 mm，h=2 mm，r=0.5 mm
	2.k=4000 μm，R=2 mm，h=4 mm，r=1 mm
中度污损	3.k=6000 μm，R=3 mm，h=6 mm，r=1.5 mm
	4.k=8000 μm，R=4 mm，h=8 mm，r=2 mm
	5.k=10 000 μm，R=5 mm，h=10 mm，r=2.5 mm
	1.k=20 000 μm，R=10 mm，h=20 mm，r=5 mm
	2.k=40 000 μm，R=20 mm，h=40 mm，r=10 mm
重度污损	3.k=60 000 μm，R=30 mm，h=60 mm，r=15 mm
	4.k=80 000 μm，R=40 mm，h=80 mm，r=20 mm
	5.k=100 000 μm，R=50 mm，h=100 mm，r=25 mm

注：表中k为粗糙度高度，R为污损物圆台的底面半径，h为高度，r为顶面半径。

在污损建模过程中,通过逐步增加污损数量,并以目检法来判断其附着密集度,以确认污损的附着程度逐渐增加,最终不同污损工况的螺旋桨三维几何模型如图2所示。



（1）光滑及轻度污损 （2）污损高度为2 mm （3）污损高度为4 mm （4）污损高度为6 mm （5）污损高度为8 mm

（6）污损高度为10 mm （7）污损高度为20 mm （8）污损高度为40 mm （9）污损高度为60 mm （10）污损高度为80 mm （11）污损高度为100 mm

图2 实尺度KP505螺旋桨在不同污损状态下的三维几何模型

Fig.2 Three-dimensional geometric model of full-scale KP505 propeller under different biofouling conditions

2.2 计算域及边界条件设置

本研究通过滑移网格技术和 MRF 方法来数值模拟敞水螺旋桨在不同污损工况下的旋转运动，其计算域由螺旋桨的旋转区域和周围静止流体区域这两部分构成如图 3 所示，旋转域是直径为 1.5*D* 的圆柱区域，距离静止域的入口边界为 2*D*，距离静止域的出口边界为 6*D*，静止域是一个直径为 6*D* 的圆柱区域，整个计算域的尺寸远远大于螺旋桨的直径，以此保证螺旋桨的旋转运动不受边界的影响。

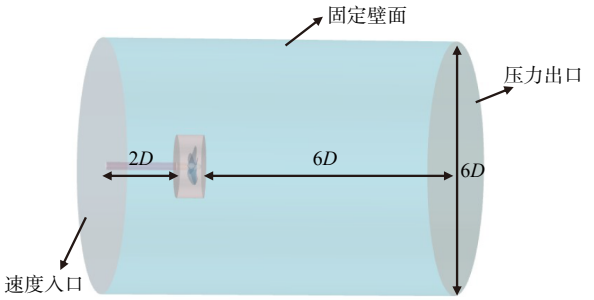


图 3 螺旋桨的计算域设置

Fig.3 Calculation domain of the propeller

螺旋桨表面设置为无滑移壁面(No-Slip Wall)，对于光滑状态的螺旋桨，不对壁面进行任何处理，保持默认值即可，而污损工况下的螺旋桨，需将壁面规格改为粗糙状态，且根据计算工况及粗糙度函数设置好对应的粗糙度高度、壁面粗糙度参数及切向速度。

2.3 网格划分及参数设置

本研究选用 STAR-CCM+软件自带的棱柱层和切割体网格来自动生成非结构化网格。光滑和轻度污损状态下的螺旋桨，其网格数量大约在五百万左右，而中度污损和重度污损状态下，由于藤壶尺寸较小、数量较多，网格数量是成倍增长的，最终网格数量至少在两千万左右，最多可达八千万。对于壁面棱柱层，共设 6 层，每层延伸率为 1.2，算例的 *y*+在 30~300，具体网格划分情况如图 4 所示。

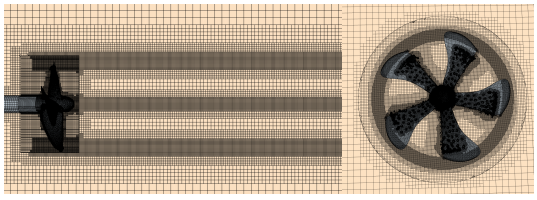


图 4 螺旋桨的网格划分

Fig.4 Mesh generation of propeller

本研究使用基于有限体积法的 CFD 软件 STAR-CCM+进行数值模拟计算，计算工况按照设计的污损工况来进行，螺旋桨转速均为 1.6 r/s，流体选择常温下的淡水，其密度和动力粘性系数均取默认值，分别为 997.561 kg/m^3、0.000 887 1 Pa·s。

2.4 网格数量无关性验证

网格数量过少会导致计算结果的误差较大，甚至导致结果发散，而网格数量太多、每个计算步长时间太小又会耗费大量的计算资源，严重增加计算时间。本研究中由于需计算的污损工况较多，污损物的尺寸较小，数量较多，网格数量及计算时间不可避免地成倍增加，因此需平衡好计算精度和计算时间，为此本文以进速系数为 0.7 的光滑螺旋桨为对象进行网格数量无关性验证(见表 3)。

螺旋桨的敞水性能具体包括推力系数 K_T，扭矩系数 K_Q 和推进效率 η，其具体表达式如下

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \tag{7}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \tag{8}$$

$$J = \frac{V_{\mathrm{A}}}{nD} \tag{9}$$

$$\eta = \frac{K_T}{K_Q}\frac{J}{2\pi} \tag{10}$$

式中，T 为螺旋桨产生的推力，Q 为螺旋桨的扭矩，ρ 为流体的密度，n 为螺旋桨的转速，D 为螺旋桨的直径，J 为进速系数，V_{A} 为来流速度。

表 3 网格数量无关性验证

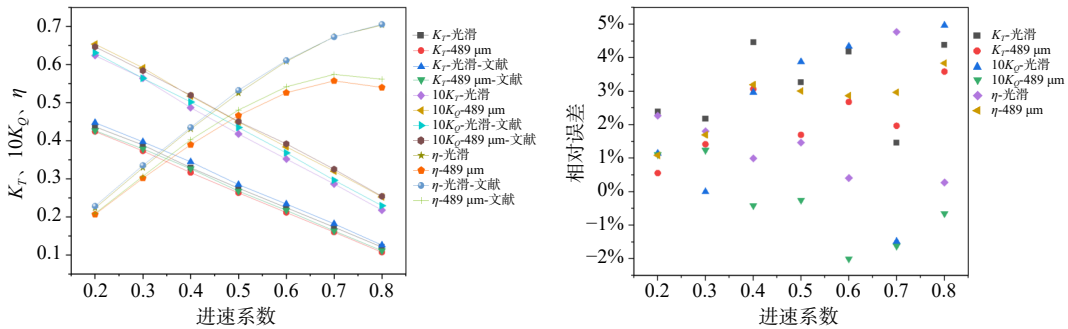
Tab.3 Grid independence verification

	网格设置	网格数量	K_T	相对误差	$10K_Q$	相对误差	η	相对误差
文献数据[6]			0.1816		0.2959		0.6721	
工况1	粗网格	2 570 896	0.1844	1.51%	0.2863	−3.27%	0.7176	6.76%
工况2	中网格	5 600 676	0.1833	1.46%	0.2916	−1.48%	0.7010	4.77%
工况3	细网格	12 169 809	0.1827	0.58%	0.2952	−0.24%	0.6896	2.59%

上表是光滑螺旋桨在不同网格数量下的数值结果，可见，数值结果与文献数据之间的相对误差在合理范围内，且会随网格数量的增加而减小，尽管网格数量越多，数值结果的精度更好，但只要将网格数量控制在合理范围内，结果就不会发生明显变化，且相对误差均可接受，因此本研究在实际数值模拟过程中，可通过合理调节网格数量来确保计算结果可靠的同时节省计算时间。

2.5 数值结果验证

为验证本研究数值模拟结果的可靠性，特将光滑状态和粗糙度高度为 489 μm 的数值计算结果与 Song 等[6] 的文献数据进行对比，如图 5 所示，可见，相对误差都在 5% 以内，本文数值计算方法可行。



（a）光滑和粗糙状况下的敞水性能　　（b）敞水性能的相对误差

图 5 数值结果与文献数据的对比

Fig.5 Comparison between numerical results and data in literature

3 污损对螺旋桨敞水性能的影响分析

3.1 螺旋桨的敞水性能曲线

图 6 为不同污损工况下，敞水螺旋桨的推力系数、扭矩系数和推进效率及其相对光滑情况时的变化幅度随进速系数的变化情况，其中，粗糙度高度为 100~1000 μm 的属于轻度污损，2000~10 000 μm 的属于中度污损，20 000~100 000 μm 的属于重度污损。

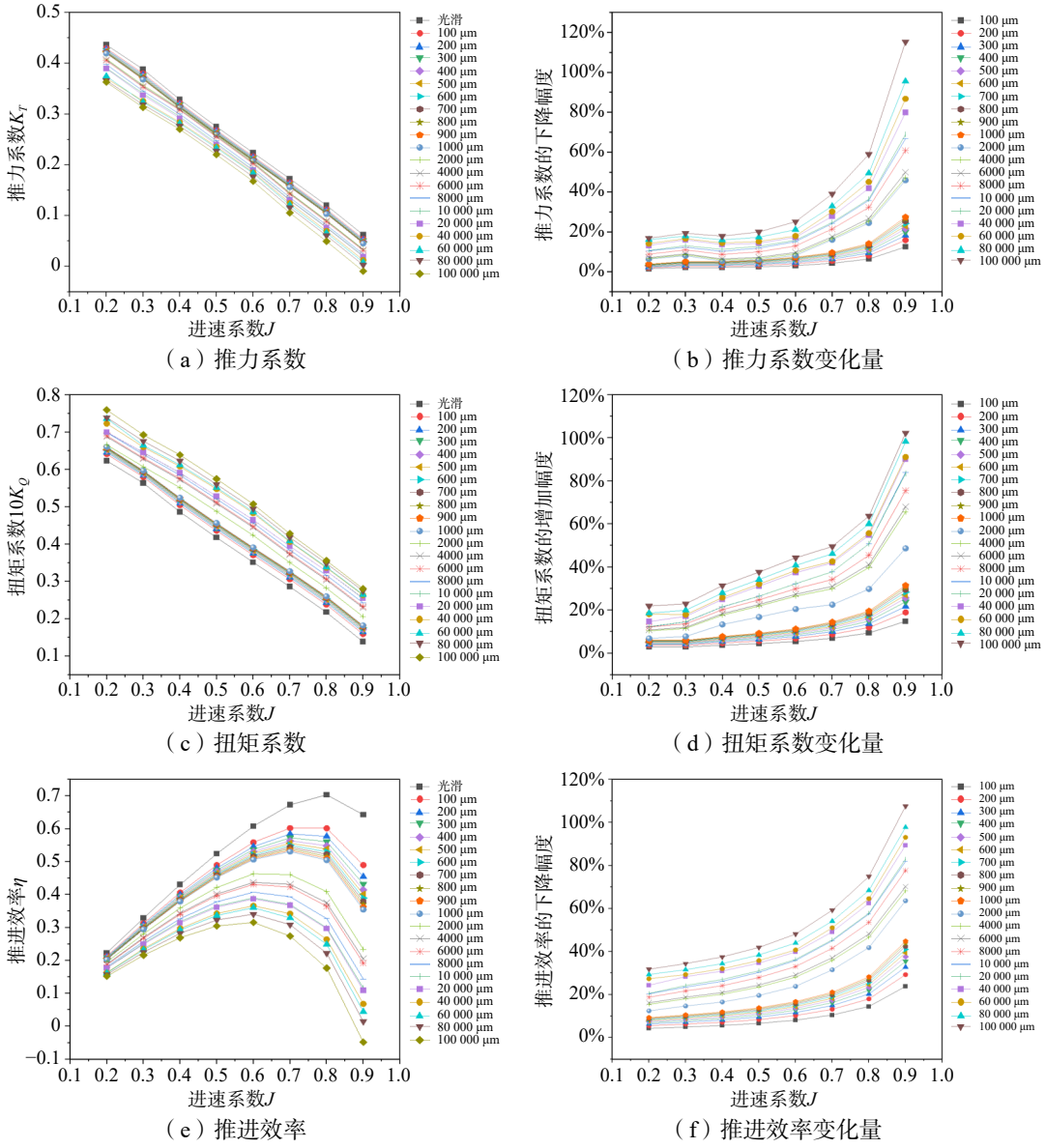
整体上看，随着污损程度的增加，螺旋桨的推力系数逐渐下降，扭矩系数逐渐增加，推进效率逐渐减小。在轻度污损状态下，随着污损的增加，推力系数、扭矩系数和推进效率的变化趋于稳定，在粗糙度高度达到一定值之后，数据变化趋于平缓，而在中度污损和重度污损状态下，数据变化明显，因此螺旋桨在遭受污损生物附着后，敞水性能受污损形貌的影响不可忽略。在重度污损后期，数据也都随着污损的增加而缓慢变化，也就是说，污损达到一定程度之后，螺旋桨的敞水性能不再发生变化，一直处于最低值，不过现实通常是当污损导致螺旋桨敞水性能不满足实际需要时就进行清污处理了。

如图 6(a)(b)所示，仔细观察推力系数的变化情况，可以发现在进速系数达到 0.7 之前，推力系数一直高于 0.1，且污损造成推力系数相比于光滑情况的下降幅度不超过 40%。进速系数在 0.2~0.6 时，下降幅度受进速系数的影响变化不大，且较大降幅几乎都在 20% 左右，但进速系数大于 0.6 之后，推力系数的下降幅度随着进速系数的增加而剧烈增加，最高可达 100%，因此污损对螺旋桨推力性能的影响程度与来流速度有关，若流速越大，污损的影响就越大，所以现实情况中，一般低航速的船舶受污损影响较

小，而高航速船舶受污损影响较大。另外，注意到当污损高度为 10 cm，且进速系数为 0.9 时，推力系数为负数，这是因为严重污损已根本改变桨叶的形貌，导致螺旋桨产生反向推力，这时船舶处于倒车状态，不过现实情况下，随着污损的增加，船舶的航速会下降，螺旋桨的转速会增加，因此一般不会观察到此现象。

如图 6(c)(d)(e)(f)所示，仔细观察扭矩系数和推进效率的变化情况，同样可以发现当进速系数大于 0.6 之后，系数的变化幅度剧烈增加，因此要想减小污损对螺旋桨敞水性能的影响，最好使进速系数保持在 0.6 以下，此时扭矩系数的增加不超过 45%，推进效率的降低不超过 50%。

另外，在图 6(e)中还可以发现推进效率最高点所对应的进速系数会随着污损程度的增加而减小。螺旋桨在光滑情况下，进速系数为 0.8 时的效率最大，其值为 0.7；在轻度污损状态下，效率最大值大约在 0.5~0.6 左右，所对应的进速系数为 0.7；在中度污损和重度污损状态下，效率最大值大约在 0.3~0.46 左右，所对应的进速系数为 0.6。也就是说，随着污损的增加，螺旋桨的推进效率不仅会下降，还会使最大效率所对应的进速系数下降，也即螺旋桨的设计工况发生了变化，这是由于粗糙度和污损形貌改变了螺旋桨的几何特性，因此，当螺旋桨遭受污损附着后，若想让螺旋桨的推进效率最大，则应减小进速系数。



（a）推力系数　（b）推力系数变化量

（c）扭矩系数　（d）扭矩系数变化量

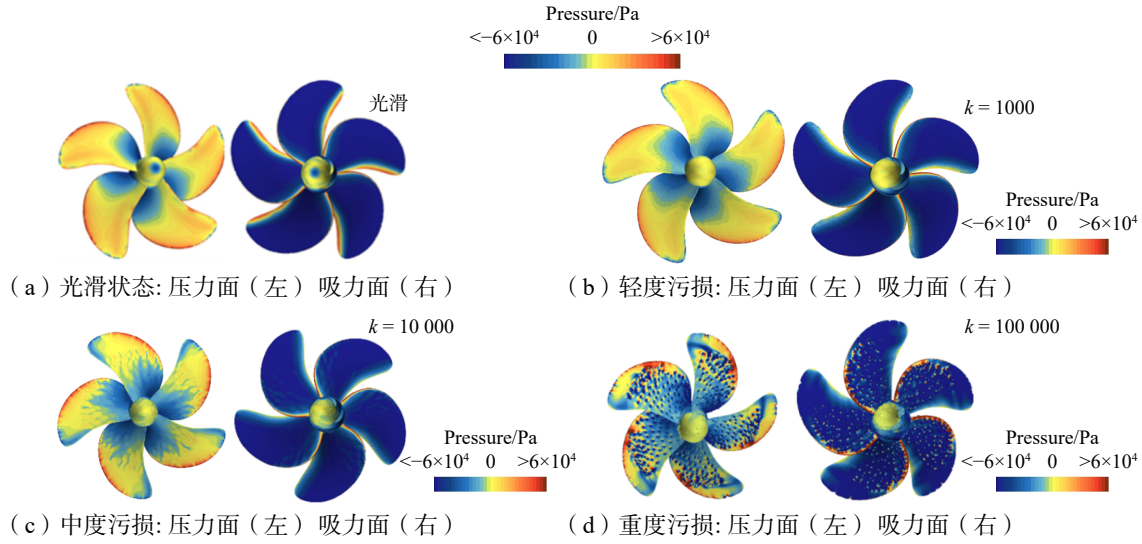
（e）推进效率　（f）推进效率变化量

图 6　不同污损工况下的敞水性能随进速系数的变化情况

Fig.6　Variation of open water performance with advance coefficient under different biofouling conditions

3.2 桨叶及流场压力分布

如图 7~8 所示，通过观察桨叶表面的压力分布及螺旋桨尾流场中的压力分布云图，整体上，可以明显发现污损会导致螺旋桨压力面的压力下降，吸力面的压力增加，螺旋桨桨叶后方的流场压力降低，这共同导致了螺旋桨前后压差减小，从而使推力降低。

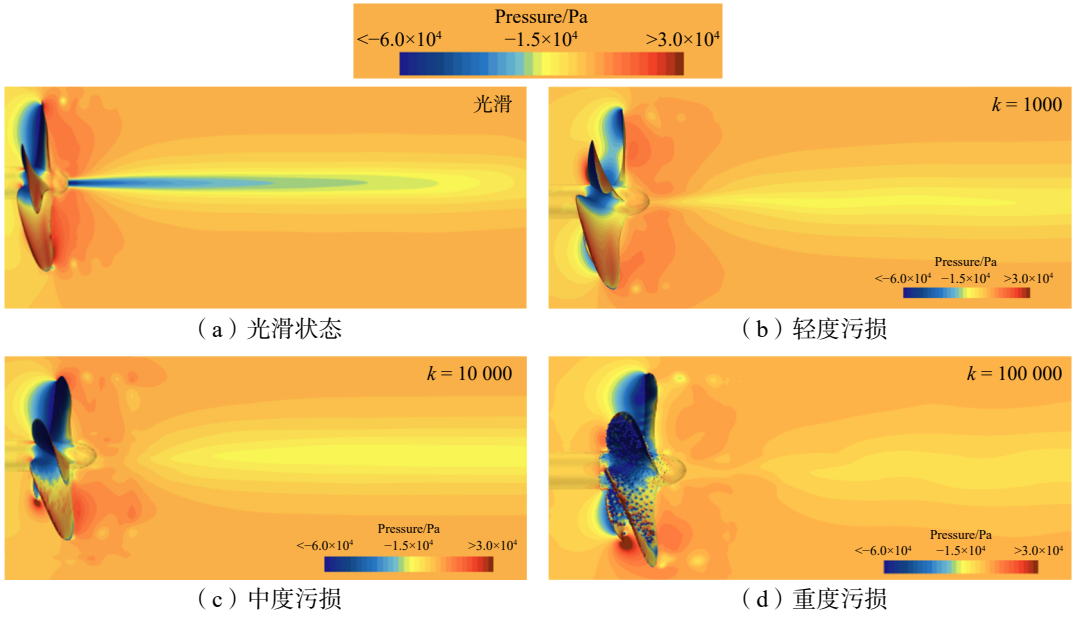


（a）光滑状态：压力面（左）吸力面（右）　（b）轻度污损：压力面（左）吸力面（右）

（c）中度污损：压力面（左）吸力面（右）　（d）重度污损：压力面（左）吸力面（右）

图 7 螺旋桨桨叶压力分布云图

Fig.7 Contour plot of pressure distribution on propeller blades



（a）光滑状态　（b）轻度污损

（c）中度污损　（d）重度污损

图 8 螺旋桨尾流场中压力分布云图

Fig.8 Pressure distribution in the wake field of the propeller

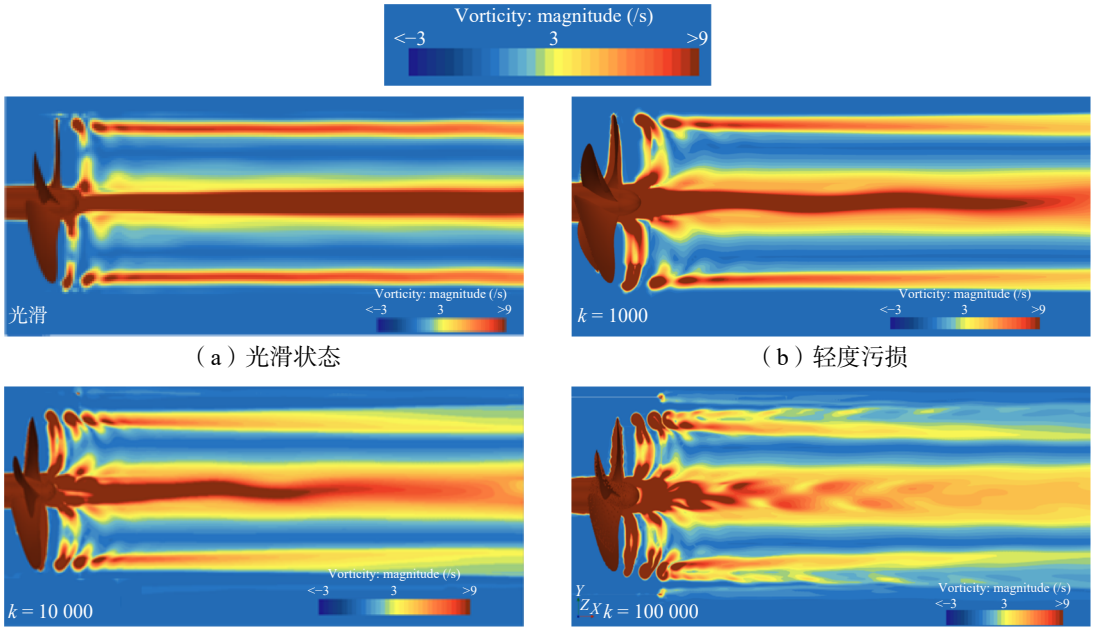
图 7 中，仔细观察不同污损工况下桨叶的压力分布情况，可以发现轻度污损相比于光滑状态，螺旋桨桨叶压力面的值均匀下降，毂帽周围的低压和叶梢及导边区域的高压均明显下降，且下降值随着粗糙度高度的增加而增加，但吸力面的变化程度相对较低。对于中度污损和重度污损，随着污损尺寸及数量的增加，压力面上的压力值大幅度下降，吸力面上的压力大幅度增加，污损物周围的压力变化特别明显。此外，还观察到每个污损周围存在明显的高压和低压，且高压靠近桨叶的导边，低压靠近桨叶的随边，因此每个污损物上存在自桨叶导边到随边的切向力，此切向力随着污损的增加而增加，而螺旋桨是

右旋方向，所以螺旋桨因污损的存在而受到较大的旋转阻力矩，由此扭矩在中度污损和重度污损状态下剧烈增加。

仔细观察图 8 的流场压力分布图，可以明显发现污损不仅降低了桨叶后方的压力，还增加了桨毂后方流场的压力，并且桨毂后方的流场会随污损的增加而更加分散，这可能由于污损加大了螺旋桨周围流场的扰动，增加了流场流动的复杂性，导致流场的能量耗散更加严重，从而污损使螺旋桨对后方流场的影响更小。

3.3 流场涡量分布

图 9 是螺旋桨尾流场中涡量分布云图，观察螺旋桨尾流场中的涡量随不同污损工况变化情况，发现污损会导致流场的涡量减小。对比光滑和轻度污损状态下的涡量云图，发现仅仅增加粗糙度，桨毂后方的涡量值在逐渐变小，整体上涡结构并没有发生变化。随着污损程度的加重，流场中的涡量发生明显变化，中度污损和重度污损状态下，桨毂后方的尾涡更加分散，且随着远离桨叶，尾涡消散得更快。粗糙度主要增加了壁面的剪切应力，促使边界层提前分离，加剧湍流脉动，增强流场能量的损失；而污损形貌进一步加剧了流场的不规则运动，增加流场运动的复杂性，进一步加大流场能量的耗散。由此随着污损程度的增加，桨叶及毂帽附近，流体分子之间的运动加剧，随着远离桨叶，能量逐渐耗散，尾迹长度逐渐减小，最终流场的涡量减小，尾涡更分散。



（a）光滑状态　　（b）轻度污损

（c）中度污损　　（d）重度污损

图 9　螺旋桨尾流场中涡量分布云图

Fig.9　Vorticity distribution in the wake field of the propeller

4 结　论

本文根据实际污损附着规律，建立了不同污损工况下螺旋桨的三维几何建模，并在恒定转速与来流速度的假设下，探究了不同污损工况对实尺度螺旋桨敞水性能的影响，得出以下结论：

（1）不同污损均会导致螺旋桨的推力系数下降、扭矩系数增加、推进效率降低，敞水性能的变化幅度受污损几何形貌的影响较大。

（2）进速系数越大，污损导致敞水性能的变化就越大，因此为尽可能减小污损的不利影响，需使螺旋桨的进速系数保持在 0.6 以下，此时推力系数的下降不超过 25%，扭矩系数的增加不超过 45%，推进

效率的降低不超过50%。

（3）污损会导致螺旋桨压力面的压力下降，吸力面的压力增加，螺旋桨桨叶后方的流场压力降低，螺旋桨尾流场中的涡量减小且更加分散。

（4）污损会导致流场能量的耗散加剧，因此越远离桨叶的流体能量越小，受其螺旋桨旋转的影响越小，所以污损有助于减小螺旋桨远后方流场的尾迹长度。

参 考 文 献：

[1] 田洪雨, 李加庆, 徐　超, 等. 船舶污损生物附着生长影响因素研究[J]. 中国水运, 2023, 23(22): 49–50.
Tian H Y, Li J Q, Xu C, et al. Study on factors affecting the attachment and growth of marine fouling organisms[J]. China Shipping, 2023, 23(22): 49–50. (in Chinese)

[2] 马士德, 陈　新, 郤　余, 等. 三亚海洋环境试验站污损生物生态研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(1): 38–46.
Ma S D, Chen X, Tai Y, et al. Study on fouling biology ecology of Sanya marine environment experimental station[J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2024, 44(1): 38–46. (in Chinese)

[3] 段继周, 刘　超, 刘会莲, 等. 海洋水下设施生物污损及其控制技术研究进展[J]. 海洋科学, 2020, 44(8): 162–177.
Duan J Z, Liu C, Liu H L, et al. Research progress on biofouling and its control technology of marine underwater facilities[J]. Marine Science, 2020, 44(8): 162–177. (in Chinese)

[4] 李增锋. 海洋生物污损及其控制技术现状和发展[J]. 广东化工, 2023, 50(21): 58–59.
Li Z F. Status and development of marine biofouling and its control technology[J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(21): 58–59. (in Chinese)

[5] Owen D, Demirel K Y, Oguz E, et al. Investigating the effect of biofouling on propeller characteristics using CFD[J]. Ocean Engineering, 2018, 159: 505–516.

[6] Song S, Demirel Y K, Atlar M . An investigation into the effect of biofouling on full-scale propeller performance using CFD[C]//OMAE2019, 38th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering, 2019.

[7] Song S, Demirel Y K, Atlar M. Propeller performance penalty of biofouling: CFD Prediction[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2020, 142(6): 1–22.

[8] 李坚波, 钟　伟. 海生物附着对螺旋桨推进性能影响的数值模拟[J]. 中国水运 (下半月), 2019, 19(12): 9–10.
Li J B, Zhong W. Numerical simulation of the effect of marine organism attachment on propeller propulsion performance[J]. China Water Transport (second half of the month), 2019, 19(12): 9–10. (in Chinese)

[9] 漆　超, 吕续舰. 基于CFD的海洋污底和防污涂层壁面阻力特性影响分析[J]. 江苏科技大学学报 (自然科学版), 2022, 36(4): 13–20.
Qi C, Lu X J. CFD based analysis of the influence of the resistance characteristics of marine fouling bottom and antifouling coating wall[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (NATURAL SCIENCE EDITION), 2022, 36(4): 13–20. (in Chinese)

[10] Demirel Y K, Uzun D, Zhang Y, et al. Effect of barnacle fouling on ship resistance and powering[J]. Biofouling, 2017, 33(9-10): 819–834.

[11] Turan O, Demirel Y K, Day S, et al. Experimental determination of added hydrodynamic resistance caused by marine biofouling on ships[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 1649–1658.

[12] Song S, Dai S, Demirel Y K, et al. Experimental and theoretical study of the effect of hull roughness on ship resistance[J]. Journal of Ship Research, 2021, 65(1): 62–71.

[13] 杨宗澄, 白秀琴, 姜　欢, 等. 船体表面海洋污损生物附着规律分析[J]. 船舶工程, 2016, 38(2): 29–33+79.
Yang Z C, Bai X Q, Jiang H, et al. Analysis on the attachment law of marine fouling organisms on the hull surface[J]. Ship Engineering, 2016, 38(2): 29–33+79. (in Chinese)

[14] 常江凡, 白秀琴, 袁成清. 武汉新港至洋山港江海直达船海洋污损生物附着分析[J]. 船海工程, 2016, 45(4): 89–93.
Chang J F, Bai X Q, Yuan C Q. Analysis on marine fouling organism attachment of river sea direct ship from Wuhan Xingang to Yangshan Port[J]. Ship Sea Engineering, 2016, 45(4): 89–93. (in Chinese)