

七叶侧斜螺旋桨设计参数对空泡性能的影响研究^{*}

齐江辉, 郭 健, 郑亚雄, 郭 翔, 陈 强

(武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430064)

摘 要: 为建立有效的预报螺旋桨空泡性能的方法, 并基于该方法参数化分析七叶侧斜螺旋桨设计参数对空泡性能的影响, 基于CFD方法建立了螺旋桨全湿流和空泡流非定常数值计算模型。通过对DT-MB4381标准螺旋桨全湿流及空泡数值模拟结果与试验值的对比, 验证了计算模型的准确性。通过对网格的收敛性分析, 验证了收敛性并保证了计算精度。采用B样条曲线拟合方法拟合某七叶侧斜螺旋桨设计参数, 通过改变控制点的值改变设计参数的分布型式。在此基础上重点分析了该七叶侧斜螺旋桨桨叶侧斜、弦长以及纵倾分布型式对螺旋桨空泡性能的影响, 计算表明加大侧斜能够减小空泡面积, 使空泡的随边边界向桨叶中心偏移, 增大侧斜后螺旋桨平均推力较原型桨增大9.0%; 增加盘面比会使空泡面积增大, 但会降低螺旋桨单位面积的平均负载, 增加盘面比后螺旋桨平均推力较原型桨增大11.8%; 同时桨叶向压力面弯曲或向吸力面弯曲的计算都表明, 一定程度的纵倾有利于改善螺旋桨的空泡性能。

关键词: 螺旋桨; 空化; B样条, 非定常流; 参数优化

中图分类号: U664.33

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2019) 10-2366-07

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190009

Numerical Study on Effects of Design Parameters of Seven-Bladed Propeller with Skew on Its Cavitation Performance

QI Jiang-hui, GUO Jian, ZHENG Ya-xiong, GUO Xiang, CHEN Qiang

(Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

Abstract: In order to establish an effective method to predict cavitation characteristics of the seven-bladed propeller, the CFD method is adopted to predict unsteady cavitation on marine propeller in full wetted flow and cavitation flow. Then the effects of parameters of the propeller on its cavitation performance is analyzed. The validation studies of the DTMB4381 propeller for unsteady cavitation flow are presented, and the calculation results are in acceptable agreement with the experimental results and observations. Through mesh convergence analysis, the convergency of the mesh is completed thus guarantee the accuracy of calculation. Parameterization of the marine propeller is performed with the B splines for skew, chord and rake distributions. The effects of some parameters such as skew, chord and rake distributions on the seven-bladed propeller with skew cavitation performance are studied. The results show that with the skews increasing, the cavity extent will decrease and the cavitation boundary in side will shift to the centerline of the blade and the average thrust increased by 9.0% relative to the prototype. The cavity extent will increase and the average load per unit area of the propeller will decrease with the area ratio increasing and the average thrust increased by 11.8% compared to the original propeller. The calculation

^{*} 收稿日期: 2019-01-03; 修订日期: 2019-02-27。

基金项目: 国家能源应用技术研究及示范工程项目 (NY20150201)。

通讯作者: 齐江辉, 硕士, 工程师, 研究领域为舰船总体推进与节能技术。E-mail: qijianghui1028@163.com。

引用格式: 齐江辉, 郭 健, 郑亚雄, 等. 七叶侧斜螺旋桨设计参数对空泡性能的影响研究[J]. 推进技术, 2019, 40(10): 2366-2372. (QI Jiang-hui, GUO Jian, ZHENG Ya-xiong, et al. Numerical Study on Effects of Design Parameters of Seven-Bladed Propeller with Skew on Its Cavitation Performance[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(10): 2366-2372.)

tion of the rake distribution curvature to pressure side and suction side indicates that a certain degree of rake is beneficial to improve the cavitation performance of marine propeller.

Key words: Propeller; Cavitation; B spline; Unsteady flow; Parameter optimization

1 引言

随着各种新船型和高性能船舶的出现,近年来船舶不断向高速化和大型化发展,螺旋桨的空泡变得不可避免。螺旋桨空泡的生成溃灭过程对螺旋桨叶片产生剥蚀,对螺旋桨的强度造成破坏;空化过程的非定常性导致艏部的强烈振动,影响船上人员的舒适性,严重的会影响船桨配合效率。同时螺旋桨空泡产生的噪声是军用舰艇重要的噪声来源,对于军用舰艇的隐蔽性能有重要影响。

应用数值方法计算空泡特性已成为螺旋桨设计中的重要辅助手段,通过数值方法可以快速准确地了解空化的特性。螺旋桨的空泡问题,国内外都开展了许多研究。空泡的研究方法也从最初的自由线理论、薄翼理论^[1-3]发展到势流理论中的升力面^[4-5]、面元法^[6]等理论,得到了许多有价值的结论^[7-9]。然而无论是升力面法还是面元法都忽略了流体的粘性,即使面元法采用基于经验及试验结果的尾涡模型,但对数值模拟精度仍有一定影响。近年来,随着计算机技术的发展,基于粘流CFD技术的空泡预报方法也越来越受到专家学者的关注,螺旋桨空泡的脱落等是非常复杂的粘性問題,应用势流理论是无法求解的,而CFD技术预报空泡可以精细地模拟桨叶表面的流场以及空泡的生成及脱落过程。Morgut等^[10]对比了Zwart模型、FCM模型、Kunz模型对螺旋桨空泡形态的影响;Liu等^[11]采用FCM模型对螺旋桨空泡性能进行了预报,其预报的空泡形态与试验结果对比吻合良好,验证了模型的准确性。在螺旋桨设计参数对空泡性能的影响分析方面,螺旋桨参数化设计、多目标优化等也越来越受到专家学者的关注。温亮军等^[12]基于扰动速度势面元法分析了5600TEU螺旋桨的侧斜、纵倾及剖面型式对空泡性能的影响;赵晓春等^[13]基于CFD方法研究了盘面比、纵倾、螺距比及侧斜对螺旋桨空泡性能的影响。在螺旋桨设计参数方面,王超等^[14]基于原始侧斜叠加形状函数的方法分析了侧斜分布对螺旋桨性能的影响;王波等^[15]基于B样条曲线的方法对螺旋桨的剖面、参数分布进行了拟合,并在此基础上对某型五叶螺旋桨性能进行了优化;饶志强^[16]等基于B样条曲线方法对某七叶螺旋桨的多参数设计进行拟合,优化

了原有的设计方案。

从以上研究看来,对七叶侧斜螺旋桨的参数设计研究较少,尤其是其设计参数对空泡性能的影响。本文采用Schnerr-Sauer空化模型及SST(Menter) $k-\omega$ 湍流模型预报了DTMB4381的空泡性能,其预报结果与试验结果吻合良好,验证了本文计算模型的正确性。以某七叶侧斜螺旋桨母型为基础,采用样条曲线拟合方法得到其参数分布规律,并在此基础上改变其参数分布,分析不同弦长、纵倾和侧斜分布对螺旋桨空泡性能的影响,可为七叶侧斜螺旋桨抑制空化设计提供参考依据。

2 理论基础

2.1 控制方程

螺旋桨周围流动假定为不可压缩流动,其连续性方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

其动量守恒方程写为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v u) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w u) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{aligned} \quad (2)$$

式中 p 为流体微元的压力, F_x, F_y, F_z 是微元体上的质量力。

两方程湍流模型中, $k-\varepsilon$ 模型可以较好地模拟远场充分发展的湍流流动,而 $k-\omega$ 模型则更适用于各种压力梯度下的边界层问题。Menter提出的SST(Menter) $k-\omega$ 湍流模型则结合了两种模型的特点,是一种工程上得到广泛引用的混合模型,在近壁面保留了原始 $k-\omega$ 模型,在远场处采用 $k-\varepsilon$ 模型。SST(Menter) $k-\omega$ 湍流模型的方程组可以为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - Y_k + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) &= \\ \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) &+ G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \end{aligned} \quad (3)$$

式中 G_k 表示湍动能; G_ω 是 ω 方程产生的; Γ_k 和 Γ_ω 分别为 k 与 ω 的有效扩散项; Y_k 和 Y_ω 分别为 k 与 ω 的发散项; D_ω 为正交发散项; S_k 和 S_ω 为自定义源相。

2.2 Schnerr-Sauer 空化模型

计算空泡需要设置两项之间的关系,即空化模型。Schnerr-Sauer 空化模型是 Rayleigh-Plesset 方程的简化形式,其忽略了空泡生成的加速、粘性以及表面张力的影响。蒸汽相质量分数的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho f_v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j f_v)}{\partial x_j} = R_e - R_c \tag{4}$$

式中 ρ 为混合介质密度, R_e 为气泡增加质量, R_c 为气泡减少质量。空泡成长速度通过以下方程控制

$$v_r^2 = \frac{2}{3} \left(\frac{p_{\text{sat}} - p}{\rho_l} \right) \tag{5}$$

式中 p_{sat} 为饱和蒸汽压力, ρ_l 是流体密度。上式是与惯性、粘性影响和表面张力影响有关的 Rayleigh-Plesset 方程的简化形式。对于大多数实际应用而言,粘性和表面张力的影响是可以忽略的^[17]。

2.3 螺旋桨参数化表达

对螺旋桨的设计参数进行参数化表达,可以比较方便地修改参数,从而对各个参数对螺旋桨性能的影响进行准确的分析。通常采用 B 样条曲线拟合、形状函数叠加、多项式拟合等方法进行螺旋桨参数化表达。B 样条曲线拟合方法由于光顺性好、局部可控性等优点应用更加广泛,因此本文中对七叶侧斜螺旋桨设计参数的参数化表达中选用 B 样条曲线进行拟合^[18-19]。如图 1 中,对侧斜分布采用 B 样条拟合,其中 $N_1 \sim N_4$ 为曲线拟合控制点,通过改变控制点来改变不同的侧斜分布型式。 R 为螺旋桨半径。

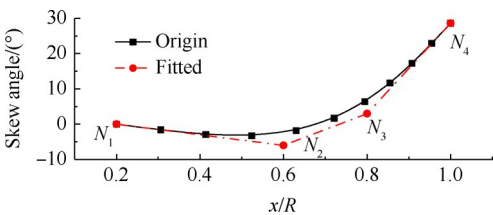


Fig. 1 Skew distribution fitting

3 数值计算及分析

3.1 数值方法验证

泰勒水池提供的 DTMB4381 标准桨模型试验结果被很多研究人员引用,本文中选取与试验过程相同的参数来验证所用数值方法的可靠性及计算精度。表 1 为 DTMB4381 标准桨模型的主要参数^[20]。

其中, A_E 为螺旋桨伸张面积, A_0 为螺旋桨盘面积。

为合理模拟螺旋桨运动特性,本文计算域为圆柱形计算域,计算域进口与桨盘面距离为 $5D$,出口与桨盘面距离为 $13D$,计算域外径距叶梢距离为 $1.5D$ 。本文计算采用滑移网格方法模拟螺旋桨旋转运动,因此计算域分为近场旋转域及远场静止域,近场旋转域也为圆柱形,其直径较螺旋桨稍大。计算域网格划分结果如图 2 所示。

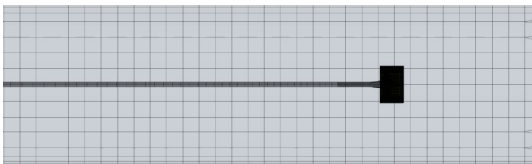


Fig. 2 Definition of calculate zone and grid

Table 1 Main parameters of propeller DTMB4381

Parameters	Value
Diameter D/mm	304.8
Number of blades N	5
Area ratio A_E/A_0	0.725
Shape of profile	NACA66 $a=0.8$
Hub diameter ratio	0.2

进行 CFD 数值分析时需要网格收敛性进行研究^[21],本文中选用满足一定细化率要求的三套网格用于网格收敛性分析,三组网格分别为 Mesh a, Mesh b 和 Mesh c,网格划分尺寸参数选取如表 2 所示,其中 D 为螺旋桨直径。选取与试验中相同的工况,进速 $V=3.048\text{m/s}$,转速 $n=14.28\text{r/s}$,模拟非定常工况下螺旋桨推力系数和转矩系数与试验值的对比如表 3 所示。从表中可以看出,随着网格数量的增加,推力系数和转矩系数与试验值的差别逐渐减小,采用 Mesh c 时推力系数和转矩系数与试验值的差别分别为 2.66% 和 0.72%,已经完全满足工程需要。

Table 2 Parameters of grid

Mesh	Base size	Reference size of blade	Thickness of first boundary layer	Mesh number
a	4.0% D	0.4% D	0.1% D	1342271
b	2.0% D	0.2% D	0.05% D	2507679
c	1.0% D	0.1% D	0.025% D	5310447

图 3 为进速系数 $J=0.7$,空泡数 $\sigma=3.5$ 时三种网格下的螺旋桨空泡性能,空泡数定义可参见文献^[20]。图 4(a)为 Boswell 等进行空泡试验的观察结果^[20],其中黑色区域代表发生空化的位置,图 4(b)为 Kim 的数值计算结果^[22],其中白色区域为发生空化的位置。

将本文数值计算结果与试验值进行对比可以发现,上述三种网格的空泡计算结果与试验值基本一致,与 Kim 数值计算结果吻合度更高,具体细节有一定差异;可以看出 Mesh b 和 Mesh c 与试验结果更为一致,而 Mesh a 空泡结果则差别略大。综合全湿流模拟结果与空泡模拟结果,认为采用 Mesh c 网格计算能够保证水动力性能和空泡性能的误差最小,上述网格划分尺寸参数均参照螺旋桨直径,该网格划分方法及收敛性验证结果同样适用于七叶螺旋桨计算,因此后续中的算例设置中均采用该尺度网格进行计算。

Table 3 Comparison of K_T and K_Q with experimental results

Parameter	K_T	$10K_Q$	$\Delta K_T/\%$	$\Delta 10K_Q/\%$
Experimental results	0.2890	0.5560	—	—
Mesh a	0.2785	0.5508	3.63	0.94
Mesh b	0.2803	0.5513	3.01	0.85
Mesh c	0.2813	0.5520	2.66	0.72

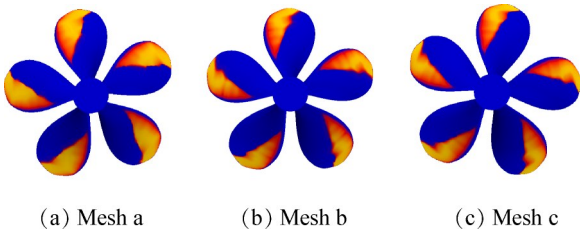


Fig. 3 Cavitation results of different mesh scale

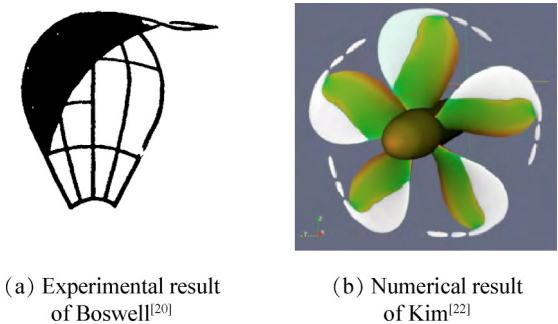


Fig. 4 Cavitation results of experiment and numerical simulation

3.2 螺旋桨设计参数说明

螺旋桨的设计参数中,对空泡性能影响较大的参数有纵倾、侧斜、盘面比、螺距比、拱度比等。对于七叶侧斜螺旋桨,纵倾、侧斜、盘面比等参数的分布对空泡性能的影响研究较少。本文在某型七叶侧斜螺旋桨的基础上,通过改变其纵倾、侧斜、盘面比等参数的分布型式分析设计参数对空泡性能的影响规律。该型七叶侧斜螺旋桨设计参数如表 4 所示。选

取的设计工况为设计点附近进速系数 $J=0.7$,空泡数 $\sigma=3.5$ 。

Table 4 Main parameters of a seven-bladed propeller

Parameters	Value
Diameter D/mm	283.65
Number of blades N	7
Area ratio A_e/A_0	0.7
Pitch at $r=0.7R$	0.5
Hub diameter ratio	0.226

螺旋桨设计参数纵倾、侧斜、弦长的定义可参照图 5。叶面中间的一根母线称为叶面参考线,即图中直线 OU 。若螺旋桨叶面为正螺旋面,则图中叶面参考线与螺旋桨轴线垂直;若为斜螺旋面,则参考线与轴线的垂线成某一夹角,即为纵倾角。桨叶在垂直于桨轴的平面上的投影外形轮廓为投射轮廓,如图 5(a)所示。若投射轮廓外形与参考线 OU 不相对称,则为不对称叶形,不对称的桨叶的叶梢与参考线间的距离称为侧斜,相应的角度即为侧斜角。将螺旋桨各半径处共轴圆柱面与桨叶相截的各切面展成平面后,以其弦长置于相应半径的水平线上,并光滑连接端点所得轮廓成为伸张轮廓,如图 5(b)所示,弦长即为各半径处叶切面的弦长。后续纵倾、侧斜、弦长的分布均为各参数沿半径的分布。

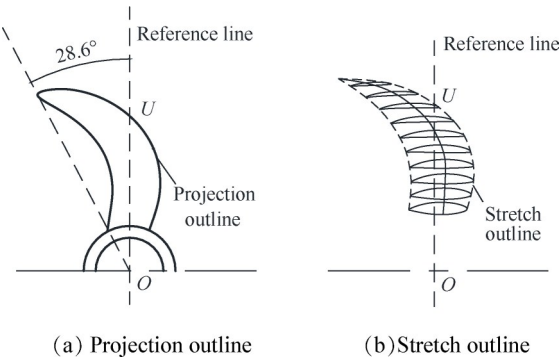


Fig. 5 Definition of propeller parameters

3.3 侧斜对螺旋桨空泡性能的影响

该原型七叶侧斜螺旋桨侧斜为 28.6° ,改变其侧斜分布,选取侧斜分别为 17° 和 40° ,原型桨及改型后的侧斜分布见图 6 所示。

表 5 中为不同侧斜分布时螺旋桨空泡面积、空泡体积、最大空泡长度以及螺旋桨平均推力的计算结果,图 7 中为三种侧斜分布型式时螺旋桨空泡形态图。

结合表 5 及图 7 中的计算结果,可以看出空泡面

积、空泡体积及最大空泡长度均随着侧斜的增大而减小,即在一定范围内增加螺旋桨的侧斜有利于空泡的减小。但需要注意,具有侧斜的螺旋桨产生的空泡不会延续到随边处而是在随边附近有一定程度的不连续,且随着侧斜的增加这种不连续程度会加大,这也意味着空泡的随边边界随着侧斜的增加逐渐向叶片中线偏移。同时从表4中可以看出,螺旋桨的平均推力随着侧斜的增大而增大,增大侧斜较原型桨的平均推力增大了9.0%,这也印证了增大侧斜有利于减小空泡体积,也有利于增加推力。

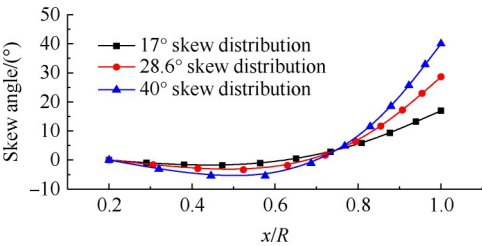


Fig. 6 Different skew distribution

Table 5 Cavitation performance with different skew distributions

Skew angle/(°)	Area of sheet cavitation/ A	Volume of cavitation/ R^3	Maximum length of cavitation/ R	Average thrust F/N
17.0	0.2183	4.89×10^{-3}	0.5916	847.4
28.6	0.2063	4.40×10^{-3}	0.5799	884.7
40.0	0.1548	3.36×10^{-3}	0.5544	964.3

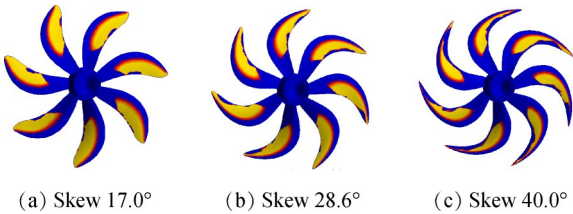


Fig. 7 Results of cavitation shape

3.4 盘面比对螺旋桨空泡性能的影响

螺旋桨的盘面比变化可以通过改变弦长沿半径的分布实现,原型桨0.7R处的弦长为0.327R(盘面比0.7),改变其弦长分布,0.7R处弦长分别为0.273R(盘面比0.6114)和0.373R(盘面比0.8373),原型桨及改型后的弦长分布见图8所示。

保证其它参数不变,仅改变叶片的弦长分布,得到空泡的形态图和空泡性能对比,分别如图9和表6所示。可以看出,随着盘面比的增大,螺旋桨的空泡面积和空泡体积都增大,而最大空泡长度随之减小。而盘面比的增加对空泡性能的影响不能仅仅看空泡

的尺度,还应从螺旋桨产生的平均推力做进一步的判断。图10为不同盘面比时的螺旋桨推力时历曲线,由于本文为非定常计算,因此显示的时历曲线在某一平均值附近做周期性脉动。可以看出,随着盘面比的增大螺旋桨的平均推力也随之增大,增大盘面比后螺旋桨平均推力较原型桨增大11.8%。进一步通过计算可以得到随着盘面比的增大,螺旋桨单位面积的平均负载下降,因此盘面比的增大有利于改善螺旋桨的空泡性能。

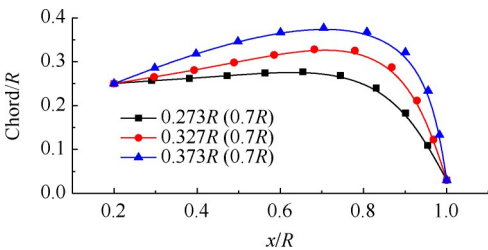


Fig. 8 Different chord distribution

Table 6 Cavitation performance with different chord distributions

Area ratio A_E/A_0	Area of sheet cavitation/ A	Volume of cavitation/ R^3	Maximum length of cavitation/ R
0.6114	0.1794	3.71×10^{-3}	0.5860
0.7000	0.2063	4.40×10^{-3}	0.5799
0.8373	0.2222	4.74×10^{-3}	0.5585

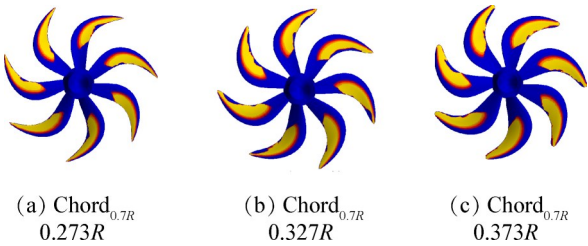


Fig. 9 Results of cavitation shape

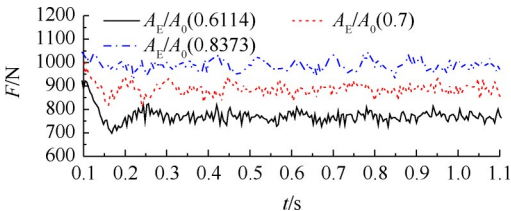


Fig. 10 Time history of thrust with different A_E/A_0

3.5 纵倾对螺旋桨空泡性能的影响

螺旋桨的纵倾对水动力性能影响不大,但纵倾对空泡性能的影响研究较少。原型桨为无纵倾桨,改变原型桨的纵倾分布型式,对比三种纵倾分布对

螺旋桨空泡性能的影响。本文中纵倾分布的三种型式示意图如图 11 所示,螺旋桨空泡形态如图 12 所示,螺旋桨空泡性能见表 7。

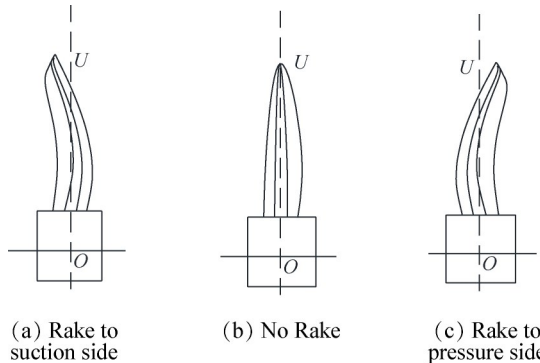


Fig. 11 Geometry model of different rake distributions

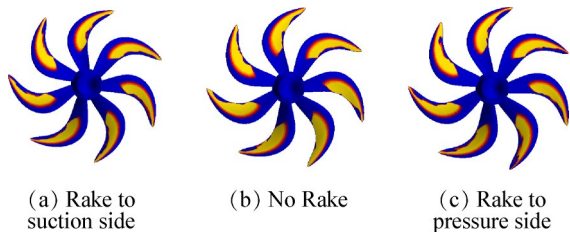


Fig. 12 Results of cavitation shape

Table 7 Cavitation performance with different rake distributions

Rake distribution	Area of sheet cavitation/A	Volume of cavitation/ R^3	Maximum length of cavitation/R
Rake to suction side	0.1819	3.93×10^{-3}	0.5695
No rake	0.2063	4.40×10^{-3}	0.5799
Rake to pressure side	0.1790	3.81×10^{-3}	0.5674

可以看出,无论是桨叶向吸力面弯曲还是桨叶向压力面弯曲,螺旋桨空泡面积、空泡体积、空泡最大长度均比无纵倾时减小,因此对于七叶侧斜螺旋桨,一定程度的纵倾有利于螺旋桨的空泡性能。

4 结 论

本文基于 CFD 方法建立了七叶侧斜螺旋桨空泡特性数值计算模型,得到如下结论:

(1) 基于 B 样条曲线拟合方法拟合七叶侧斜螺旋桨设计参数,通过调整设计参数沿半径的分布型式,可以分析设计参数对空泡性能的影响,通过参数优化的螺旋桨空泡性能较原型桨有较大改善。

(2) 在一定范围内增大侧斜可以有效地减少空

泡面积,会使空泡的随边边界向桨叶中线方向偏移;同时增大侧斜会使螺旋桨产生的平均推力增大,提高了螺旋桨的推进效率。

(3) 在一定范围内,增加盘面比使空泡面积增大,相对于空泡面积增加而损失的推力,盘面比增大的部分提供的推力较大,因此使得螺旋桨的平均推力增大,但进一步的计算表明螺旋桨单位面积的平均负载会下降;因此增加盘面比不利于减小空泡,但有利于推进性能的提升。

(4) 本文算例表明桨叶向压力面弯曲或向吸力面弯曲都会比较明显地减小空泡面积,因此一定程度的纵倾有利于改善螺旋桨的空泡性能,后续需要从螺旋桨噪声或强度方面论证纵倾方向的利弊。

致 谢:感谢国家能源应用技术研究及示范工程项目资金资助。

参考文献:

[1] Tulin M P. Supercavitation Flows—Small Perturbation Theory[J]. *Journal of Ship Research*, 1964, (4): 16–36.

[2] 董世汤. 二元超空泡翼栅的自由流线理论[C]. 上海: 中国造船学会年会, 1964.

[3] Geurse J A. Linearized Theory of Two-Dimensional Cavity Flows[D]. *Delft: Delft University of Technology*, 1961.

[4] Lee. Prediction of the Transient Cavitation on Marine Propellers by Numerical Lifting Surface Theory[C]. *Tokyo: 13th Symposium on Naval Hydrodynamics*, 1980.

[5] Kerwin J E, Lee C S. Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller Performance by Numerical Lifting-Surface Theory[C]. *Jersey: Annual Meeting of Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 1978.

[6] Hess J L, Smith A M O. Calculation of Non-Lifting Potential Flow about Arbitrary Three Dimensional Bodies [J]. *Journal of Ship Research*, 1964, 8(2): 22–44.

[7] 熊 鹰. 非均匀流中螺旋桨空泡及脉动压力的数值和试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002.

[8] 胡 健. 螺旋桨空泡性能及低噪声螺旋桨性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.

[9] Gaggero S, Brizzolara S. A Potential Panel Method for the Prediction of Midchord Face and Back Cavitation[J]. *Juournal of Fluids Engineering*, 2001, 123(6): 311–319.

[10] Morgut Mitja, Nobile Enrico. Influence of the Mass Transfer Model on the Numerical Prediction of the Cavitation Flow Around a Marine Propeller[C]. *Hamburg: Second International Symposium on Marine Propulsors*, 2011.

[11] Dengcheng Liu. The CFD Analysis of Propeller Sheet Cavitation[C]. *Nantes France: Proceedings of the 8th International Conference on Hydrodynamics*, 2008.

[12] 温亮军, 唐登海, 辛公正, 等. 螺旋桨设计参数对桨

- 叶片空泡性能的影响分析[J]. 船舶力学, 2016, 20(11): 1361-1368.
- [13] 赵晓春, 黄 胜, 王 超, 等. 螺旋桨自身参数对空泡性能的影响分析[J]. 应用科技, 2013, 40(12), 24-33.
- [14] 王 超, 熊 鹰, 何 苗, 等. 粒子群算法在大侧斜螺旋桨侧斜分布优化中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(3): 398-103.
- [15] 王 波, 张以良, 熊 鹰. 船用螺旋桨水动力性能优化设计[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, (4): 773-777.
- [16] 饶志强, 杨晨俊. 七叶侧斜螺旋桨水动力性能优化[J]. 中国造船. 2016, 57(4): 1-13.
- [17] Brennen C E. Cavitation and Bubble Dynamics[M]. Oxford: Oxford University Press, 1995.
- [18] Mishima S, Kinnas S A. Application of a Numerical Optimization Technique to the Design of Cavitation Propellers in Non-Uniform Flow [J]. *Journal of Ship Research*, 1997, 41(2): 93-107.
- [19] Bertetta D, Brizzolara S, Gaggero S, et al. CPP Propeller Cavitation and Noise Optimization at Different Pitches with Panel Code and Validation by Cavitation Tunnel Measurements[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 53(53): 177-195.
- [20] Boswell R J. Design, Cavitation Performance and Open Water Performance of a Series of Research Skewed Propellers[R]. Bethesda: Department of the Naval Ship Research and Development Center, Report 3639, 1965.
- [21] 朱德祥, 张志荣, 吴乘胜, 等. 船舶CFD不确定度分析及ITTC临时规程的初步应用[J]. 水动力研究与进展, 2007, 22(3): 363-370.
- [22] Kim S E. Multiphase CFD Simulation of Turbulent Cavitation Flows in and Around Marine Propulsors[R]. Carderock: David Taylor Model Basin, 1982.

(编辑:史亚红)