

斜流中七叶侧斜螺旋桨水动力及空泡性能研究^{*}

朱显玲¹, 齐江辉², 陈艳霞²

(1. 武汉船舶职业技术学院, 湖北 武汉 430050;
2. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430064)

摘 要: 为研究七叶大侧斜螺旋桨斜流中的水动力及空化流场特性, 基于DDES(延迟分离涡方法)建立了斜流中螺旋桨空化流场数值预报模型。在空化数 $\sigma=2.024$ 时对三套网格进行了不确定度分析, 将斜流中螺旋桨(VP1304)水动力及空泡计算结果与试验结果进行了对比, 验证了本文所建立数值模型具有较好的精度, 然后对七叶大侧斜螺旋桨斜流中的水动力及空泡特性进行了计算。计算结果表明: 斜流中螺旋桨推力和扭矩相对轴向流中均有明显下降, 且随着进速系数 J 的增大, 下降幅度也逐渐增大, $J=1.0$ 时推力下降了82.1%, 扭矩下降了47.6%; 斜流中螺旋桨桨叶载荷呈周期性变化, 随着进速系数的增大桨叶载荷极值变化率逐渐增大, $J=1.0$ 时, 推力载荷极值变化率为163%, 扭矩载荷极值变化率为100%; 斜流中螺旋桨桨叶表面空泡形态十分不规则, 螺旋桨旋转过程中伴随着严重的空泡融合、溃灭、脱落等现象, 是桨叶表面载荷呈现脉动特性的重要原因, 同时对螺旋桨的隐身性能十分不利。

关键词: 七叶螺旋桨; 斜流; 延迟分离涡模拟; 桨叶载荷; 空泡特性

中图分类号: U661.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055(2022)08-210071-09

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210071

Hydrodynamic Performance and Cavitation Characteristics of Seven Blade Propeller with Skew in Oblique Flow

ZHU Xian-ling¹, QI Jiang-hui², CHEN Yan-xia²

(1. Wuhan Institute of Shipbuilding Techonlogy, Wuhan 430050, China;
2. Wuhan Second Ship Design Institute, Wuhan 430064, China)

Abstract: A numerical simulation perdition model of cavitation field in oblique flow was conducted based on the DDES(delayed detached-eddy simulation) to analyze the hydrodynamic performance and cavitation characteristics of a seven blade propeller with skew in oblique flow. The uncertainty analyzing was conducted through the three sets of grids under the condition of the cavitation number $\sigma=2.024$. The validation studies of the VP1304 propeller for hydrodynamic performance and cavitation in oblique flow were presented, and the calculation results were compared with the experimental results. It was verified that the numerical model established in this paper has good accuracy. Then the hydrodynamic performance and cavitation characteristics in oblique flow were simulated. The results indicated that the thrust and torque of the propeller in oblique flow were significantly decreased relative to the axial flow, and as the advance coefficient J increased, the decline gradually increased. As the advance coefficient $J=1.0$, the thrust dropped by 82.1% and the torque is reduced by 47.6%. The blade load in oblique flow changed periodically, and the change rate of the extreme value of the blade load gradually increased

^{*} 收稿日期: 2021-02-03; 修订日期: 2021-03-18。

作者简介: 朱显玲, 本科, 副教授, 研究领域为船舶流体力学。

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。

引用格式: 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):210071.
(ZHU Xian-ling, QI Jiang-hui, CHEN Yan-xia. Hydrodynamic Performance and Cavitation Characteristics of Seven Blade Propeller with Skew in Oblique Flow[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8):210071.)

with the increase of the advance coefficient. In light load condition ($J=1.0$), the extreme thrust load change rate was 163%, and the extreme torque load change rate was 100%. The cavitation on the propeller blade in oblique flow was very irregular. The rotation process of the propeller was accompanied by serious cavitation fusion, collapse and shedding which was an important reason for the pulsating characteristics of the blade load and was bad for the stealth performance of the propeller.

Key words: Seven blade propeller; Oblique flow; Delayed detached-eddy simulation; Blade loads; Cavitation characteristics

1 引言

在进行潜艇螺旋桨水动力性能研究时,通常是研究螺旋桨在轴向流动中的性能。而潜艇在操纵运动过程中,时常出现螺旋桨在斜流中运行的工况。斜流中螺旋桨水动力性能的准确预报是潜艇进行操纵性预报的关键。相比于轴向流工况,斜流中螺旋桨的负载变得更加复杂,桨叶进流场变得更加不均匀,使得桨叶上的载荷脉动更加强烈,对螺旋桨性能十分不利。近年来随着舰船向高速化的发展,螺旋桨的空泡性能预报也逐渐受到重视。而在斜流中,螺旋桨的空泡形态变得更加不对称,空泡的溃灭、脱落等现象会较轴向流中更加严重,空泡溃灭产生剧烈的脉动压力会产生较强的空泡噪声,这对潜艇的隐身性能十分不利。因此研究斜流中螺旋桨水动力及空泡性能变化规律是十分必要的,可为潜艇操纵性能及隐身性能设计提供理论依据。

空泡是螺旋桨研究的重要方向,从最初的自由线理论、薄翼理论^[1-2],到20世纪80年代发展应用广泛的升力面理论^[3]再到如今广泛应用的面元法^[4]理论,螺旋桨空泡预报方法逐渐成熟,螺旋桨的空泡性能预报能力已经有了长足的进步,前人也总结了很多宝贵的经验^[5-7]。然而真实流体中需要考虑粘性的影响,螺旋桨空泡的初生、成长及溃灭过程中伴随着复杂的湍流流动现象,这是利用势流理论无法准确描述的。而基于粘性流理论的计算流体力学方法(CFD)在选取合适的空泡模型后可以较为精确地模拟上述物理现象。在空泡预报方面也有较多研究成果,在空泡模型对比方面,Morgut等^[8]对不同空化模型的螺旋桨空泡预报差异进行了分析;刘登成^[9]基于FCM空化模型准确预报了某螺旋桨的空泡形态,并且数值结果与试验结果吻合较好;齐江辉等^[10]基于Schnerr-Sauer空化模型对某标准桨空泡特性进行了数值计算,数值结果与试验结果吻合良好。在斜流中的螺旋桨水动力性能研究方面,傅慧萍等^[11]对斜流中的螺旋桨空化及脉动压力进行了计算,并与试

验结果进行了对比;胡洋等^[12]基于CFD方法分析了斜流中螺旋桨的水动力性能并进一步分析了斜流角度的影响;张文照等^[13]采用Fluent软件分析了斜流中艇后螺旋桨的水动力特性;王辰等^[14]对斜流工况下不同斜流角、不同转速情况下的泵喷推进器推进性能进行了数值模拟。以上所述斜流中螺旋桨的性能研究,大部分是分析斜流对叶片载荷、螺旋桨效率等方面的影响,对于斜流中螺旋桨的空泡性能则很少涉及。

对于七叶大侧斜螺旋桨,其属于单侧大侧斜螺旋桨,具有优良的水动力及噪声性能,在潜艇中有广泛的应用,但关于其水动力性能特别是斜流中的水动力性能及空泡性能研究很少。为探究七叶大侧斜螺旋桨斜流中的水动力及空泡特性,本研究采用DDES(延迟分离涡方法)模型对斜流中的某七叶大侧斜螺旋桨开展了详细计算及分析。

2 计算模型

2.1 控制方程

不可压缩流动中,连续性方程可以写为

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

流体微元的动量守恒方程为

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

式中 ρ 为流体密度, u, v, w 为流体微元的速度分量, p 为流体微元压力, F_x, F_y, F_z 分别为流体微元三个方向的质量力。

2.2 湍流模型

计算湍流模型采用分离涡(DES)湍流模型,DES模型在近壁面区域采用精度较高的大涡模拟(LES)方法可以较为精确地模拟空泡的初生、融合、溃灭等

现象,而在远场则采用 RANS 方法,可以保证计算精度的同时大幅度地降低计算量,保证计算效率。而在边界层流动中,由于网格定义较为模糊,常常过早地开始 LES 模式计算,为解决该问题引入了耗散长度尺度进行校正,耗散长度尺度取决于湍流涡粘度和速度梯度值,大大提高了边界层附近的模拟精度,定义该方法为延迟分离涡方法 (DDES)。

2.3 Schnerr-Sauer 空化模型

对完整的 Rayleigh-Plesset 空化模型进行简化得到 Schnerr-Sauer 空化模型,该空化模型在工程中应用较为广泛。蒸汽相质量分数的输运方程如下

$$\frac{\partial(\rho f_v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j f_v)}{\partial x_j} = R_e - R_c \tag{3}$$

式中 ρ 表示混合介质密度, R_e 表示气泡增加质量, R_c 表示气泡减少质量, f_v 表示蒸汽相质量分数。

空泡成长速度通过下式进行控制

$$v_r^2 = \frac{2}{3} \left(\frac{p_{sat} - p}{\rho_l} \right) \tag{4}$$

式中 v_r 表示空泡成长速度, p_{sat} 表示饱和蒸汽压力, p 表示流体压力, ρ_l 表示流体密度。上式中忽略了流体的粘性和表面张力,对于大多数工程应用而言,通常可以忽略表面张力以及粘性的影响^[15]。

3 数值计算方法及结果分析

3.1 数值计算模型验证

数值计算模型验证采用第二届水下推进器国际会议中螺旋桨空化和性能研讨会测试算例,螺旋桨几何模型为德国波茨坦水池 (SVA) 提供的 VP1304 螺旋桨。会议提供的 Case 2.3 工况试验结果中捕捉到了较明显的梢涡空泡现象,而参会的各单位提供的数值模拟结果中均未捕捉到梢涡空泡,可见需要建立更加精确的数值模型才可以准确地复现试验结果。表 1 为螺旋桨模型的主要参数,模型文件及试验结果见 SVA 水池实验报告^[16]。其中, A_E 为螺旋桨伸张面积, A_0 为螺旋桨盘面积, D 为螺旋桨直径,几何模型如图 1 所示。

Table 1 Main parameters of the propeller	
Parameter	Value
Diameter (D/mm)	250
Number of blades (N)	5
Area ratio A_E/A_0	0.77896
Pitch ratio $r/R=0.7$	1.635
Hub diameter ratio	0.3

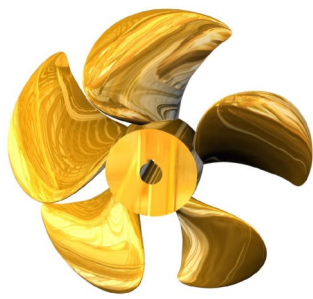


Fig. 1 Geometry model of propeller VP1304

空泡流数值模拟采用圆柱形计算域,计算域大小及边界条件定义如图 2 所示。为模拟螺旋桨旋转运动,将计算域划分为静止域和旋转域,旋转域设置为圆柱形,其尺寸如图 2 所示,虚线所表示区域即为旋转域。旋转域和静止域之间的数值传递通过交界面进行,因此为保证数值传递精度,在交界面两侧以划分一层边界层网格的形式使得两侧网格大小完全一致。为了提高螺旋桨叶梢处及尾涡流动的计算精度,在螺旋桨叶梢附近及尾流区域进行网格加密,网格划分结果如图 3 所示。

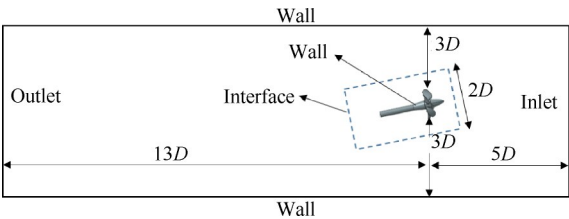
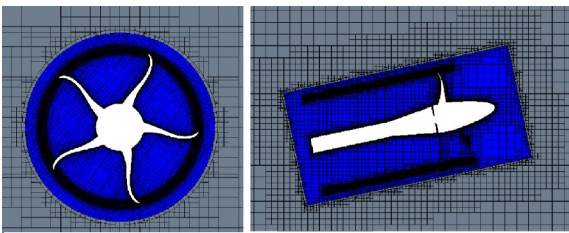


Fig. 2 Definition of calculate zone and boundary conditions



(a) Section $X=0$ (b) Section $Y=0$
Fig. 3 Sketch of mesh grid (propeller VP1304)

选取会议提供的 Case 2.3 算例进行数值方法验证,其中进速系数 $J=\frac{v}{nD}=1.408$,空化数 $\sigma=2.024$,流体运动粘性系数 $\nu=9.229 \times 10^{-7} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,饱和蒸汽压力 $p_v=2904 \text{Pa}$,其中空化数 σ 定义如下

$$\sigma = \frac{p - p_v}{0.5 \rho n^2 D^2} \tag{5}$$

由此可以计算得到环境压力 p 。
首先,进行网格不确定性分析,网格细化率参考

文献[17–18]的方法,共设计三套不同尺度网格,不同网格数之间的关系满足

$$k=(N_f/N_c)^{1/d} \tag{6}$$

式中网格细化率 $k=1.2$; N 为网格单元总数, N_f 表示细化网格数, N_c 表示粗糙网格数; $d=3$, 为网格空间维度。按照上述要求得到三套网格分别为 Mesh A, Mesh B 和 Mesh C, 最终网格数量分别为 3.84×10^7 , 6.82×10^7 , 1.18×10^8 。本文所采用网格划分均以螺旋桨直径 D 为基本尺寸, 边界层数均为 6 层, 具体参数如表 2 所示。

Table 2 Parameters of grid

Mesh	Base size/ D	Reference size of blade/ D	Thickness of first boundary layer/ D	Mesh number
A	8.0%	0.8%	0.2%	3.84×10^7
B	4.0%	0.4%	0.1%	6.82×10^7
C	2.0%	0.1%	0.05%	1.18×10^8

计算得到非定常空泡流中螺旋桨的推力系数与试验值的对比如表 3 所示。可知, 随着网格数量的增加, 数值计算结果与试验结果的差别逐渐缩小, 网格收敛性得到了验证。同时在 Mesh B 网格时, 数值结果与试验结果相差为 2.68%, 已经满足工程需要, 因此后续计算中均以 Mesh B 尺度进行网格划分。

Table 3 Comparison of K_T with experimental results

Item	K_T	ΔK_T
Experimental results	0.123	—
Mesh A	0.1295	5.28%
Mesh B	0.1263	2.68%
Mesh C	0.1245	1.22%

图 4 给出了 VP1304 螺旋桨斜流中数值模拟桨叶表面初始时刻的 Y^+ 值, 从图中可以看出桨叶表面 Y^+ 值为 $3.0 < Y^+ < 68.9$ 。在螺旋桨数值计算中, 通常 Y^+ 值 $11.6 \sim 30 < Y^+ < 200 \sim 400$ 即可满足底层网格布置在对数分布律范围内的要求, 因此该网格划分尺度满足计算需要。

在空泡形态捕捉方面, 不同尺度网格间空泡形态无定量参考标准, 因此仅通过试验值验证所采用数值模型在空泡形态捕捉方面的准确性。图 5 和图 6 分别给出了 Mesh B 网格下螺旋桨压力面和吸力面空泡分布与试验值的对比, 其中绿色部分代表空化发生区域。Case 2.3 算例进速系数较大, 同时桨叶空化特点为以压力面为主。从试验结果可以看出: 压力面在叶根附近发生雾状空化, 在导边附近产生较大面积片状

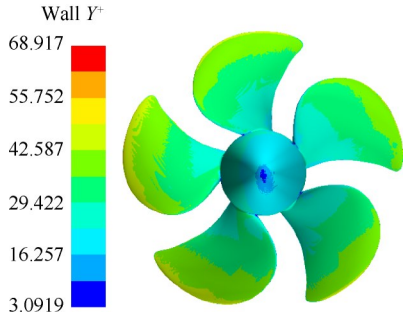


Fig. 4 Sketch of mesh grid

空化, 同时在叶梢附近产生梢涡空化; 吸力面 4 种空化形式均存在: 叶梢附近发生梢涡空化, 而雾状空化、片状空化和泡状空化基本存在于叶根附近。计算得到的空泡形态在压力面和吸力面均与试验结果吻合良好, 同时精确地捕捉到了梢涡空泡, 验证了所使用数值模型在空泡捕捉方面具有较好的精度。同时也要注意数值计算结果与试验结果仍存在一定的差异, 文献[19]对这种差异进行了系统性分析, 并认为基于 CFD 方法进行螺旋桨空泡数值模拟是相对成熟的。

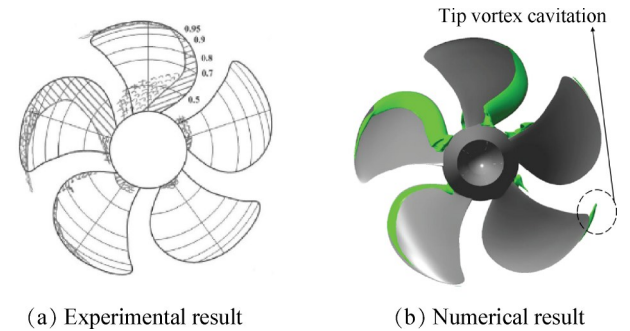


Fig. 5 Comparison of cavitation distribution with experimental results on pressure side

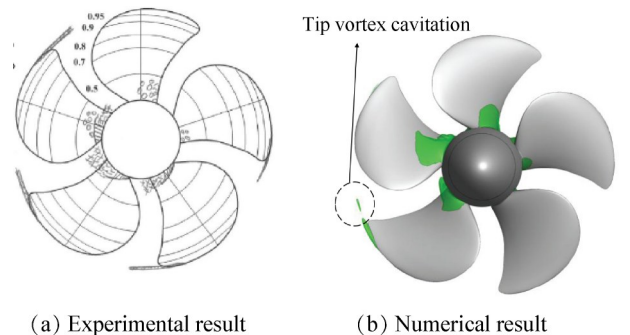


Fig. 6 Comparison of cavitation distribution with experimental results suction side

综合上述空泡流中数值计算结果, 认为采用 Mesh B 网格可以保证数值计算结果完全满足工程需要, 同时空泡形态捕捉也具有较高的精度, 因此在进行七叶大侧斜螺旋桨数值计算时也采用 Mesh B 网格

划分方案,网格划分结果如图 7 所示。由于上述网格划分尺寸均以螺旋桨直径为基本尺寸,因此参照 VP1304 桨的 Mesh B 网格划分方法进行七叶大侧斜螺旋桨计算在满足 Y^+ 值要求的情况下 ($2.7 < Y^+ < 129.54$) 也可满足工程精度要求,桨叶表面 Y^+ 值 ($J=0.7$) 如图 8 所示。

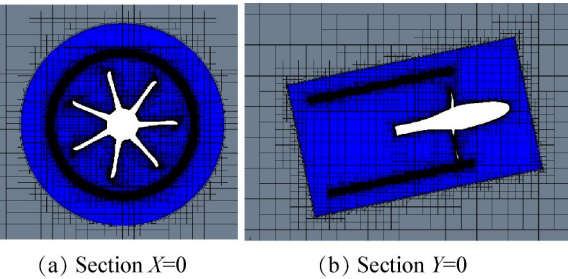


Fig. 7 Sketch of mesh grid (Propeller E1619)

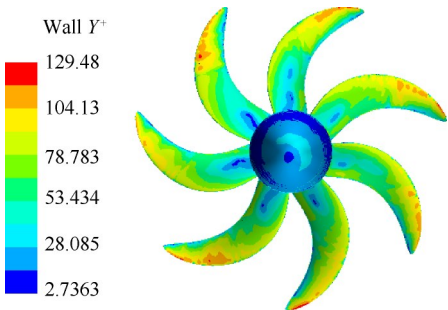


Fig. 8 Wall Y^+ of the seven blade propeller

七叶侧斜螺旋桨水动力系数数值计算验证选取 Nathan^[20] 论文中提到的 E1619 螺旋桨敞水试验数据。选取不同进速系数工况进行模拟,模拟结果如图 9 所示。可以看出,数值模拟结果与试验结果吻合良好,验证了数值计算方法的准确性。

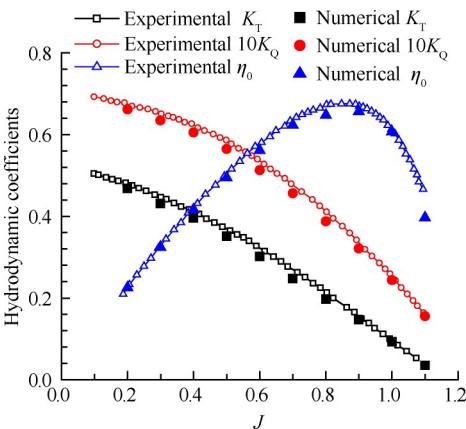


Fig. 9 Comparison of numerical and experimental results

3.2 斜流中桨叶速度多角形分析

为便于后续分析,利用桨叶剖面速度多角形对桨叶速度进行分析,如图 10 所示。 v 为螺旋桨进速,

$2\pi rn$ 为桨叶在半径为 r 处的周向速度, U_0 为合速度, θ 则为桨叶在半径 r 处的螺距角, β_0 为桨叶在半径 r 处的实际攻角。

螺旋桨在斜流中运动时,斜流角度如图 11 所示,此时进流速度 v 可以分解为轴向速度 $v \cos \alpha$ 和垂向速度 $v \sin \alpha$, α 为进流速度与桨轴的夹角。

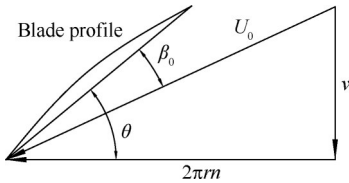


Fig. 10 Velocity polygon of blade profile

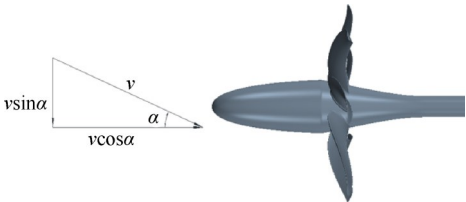


Fig. 11 Propeller in oblique flow

斜流中螺旋桨桨叶剖面速度多角形如图 12 所示。其中桨叶象限角 ϕ 定义如图 12(a) 所示,桨叶上轴向流体速度恒定为 $v \cos \alpha$,而轴向流体速度则由螺旋桨旋转速度 $2\pi rn$ 和斜流垂向速度分量 $v \sin \alpha \sin \phi$ 两部分组成。由速度多角形可知,螺旋桨斜流中旋转时, $v \sin \alpha \sin \phi$ 随象限角呈周期性变化,因此桨叶的攻角及迎流速度大小也会呈周期性变化,这也是桨叶表面水动力及空泡性能变化的根本原因。

3.3 斜流中七叶侧斜螺旋桨水动力特性

对某七叶大侧斜螺旋桨斜流中的水动力特性进行计算,该螺旋桨设计参数如表 4 所示,几何模型如图 13 所示。

螺旋桨转速 $n=8.571\text{r/min}$,改变进流速度得到不同进速系数工况。图 14 给出了空泡流中不同进速系数时,螺旋桨分别在轴向流和斜流中(斜流角度 $\alpha=12^\circ$) 的推力系数和转矩系数平均值。可以看出,斜流工况中螺旋桨推力系数和转矩系数随进速系数的变化规律与轴向流工况中一致,且相对轴向流工况均有所下降。表 5 给出了斜流工况相对轴向流工况螺旋桨水动力特性的变化情况,其中正值表示增大,负值表示减小。在三种典型进速工况下,相对于轴向流,斜流中螺旋桨推力系数和转矩系数均有较为明显的下降,且随着进速系数的增大推力系数和转矩系数下降的幅度也逐渐增大,在进速系数 $J=1.0$ 时,推力系数 (K_T) 下降了 82.1%,转矩系数 ($10K_Q$) 下降了

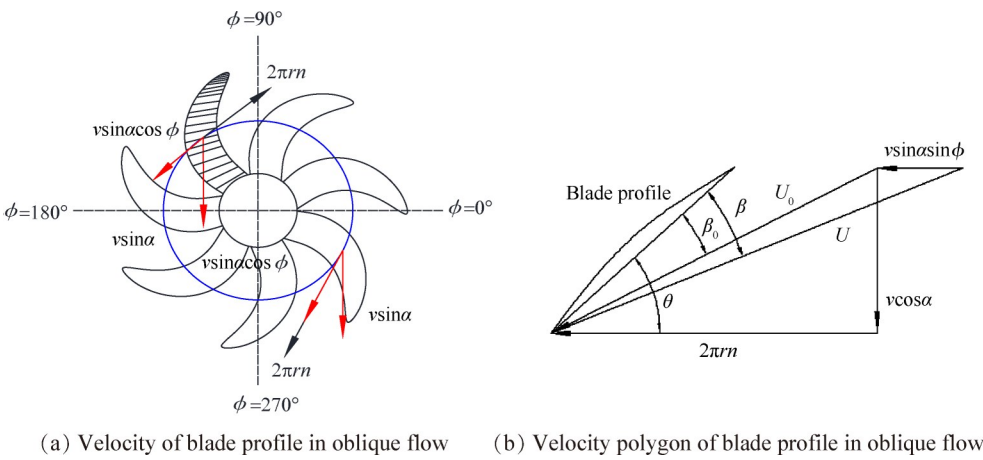


Fig. 12 Velocity analysis of blade profile in oblique flow

Table 4 Main parameters of a seven-bladed propeller

Parameter	Value
Diameter D/mm	485
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

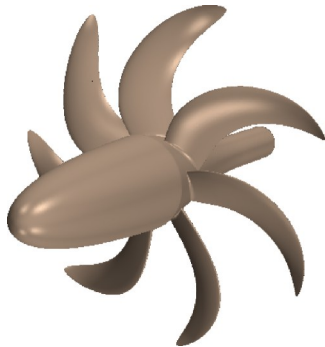


Fig. 13 Geometry of propeller E1619

47.6%。同时还可以看出,斜流中螺旋桨的效率在进速系数为 0.4 和 0.7 时分别较轴向流中提高了 5.5% 和 4.0%,而在进速系数为 1.0(即轻载工况)时则下降了 65.8%,这可能由于七叶大侧斜螺旋桨属于单侧大侧斜螺旋桨,在轻载工况时螺旋桨进速较高,由桨叶速度多角形可以知道此时桨叶剖面攻角相对轴向流工况增大,有可能使得部分桨叶剖面发生“失速”现象,从而导致升力系数急剧降低。

图 15 给出了不同进速系数时单个桨叶上轴向推力和转矩的时历曲线。可以看出,桨叶上的载荷随桨叶位置的变化整体呈周期性变化,载荷周期约为 0.117s,这与螺旋桨旋转一周的时间相吻合。通过桨叶旋转角度给出如图中所示各时间节点桨叶所在象限角。 $\phi = 0^\circ$ 时,斜流速度的周向分量为 $-v \sin \alpha \cos \phi$,

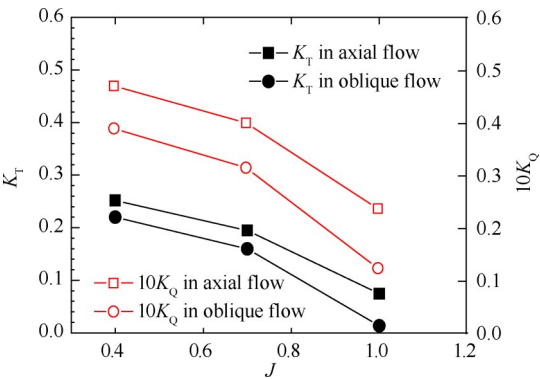


Fig. 14 Hydrodynamic characteristics of the propeller

Table 5 Comparison of hydrodynamic characteristics

J	0.4	0.7	1.0
Rate of change of $K_T/\%$	-12.6	-18.1	-82.1
Rate of change of $10K_Q/\%$	-17.2	-21.3	-47.6
Rate of change of $\eta/\%$	5.5	4.0	-65.8

与旋转速度方向相反,此时桨叶合速度最小且桨叶剖面攻角最小,因此桨叶产生载荷最小; $\phi = 180^\circ$ 时,斜流速度的周向分量为 $v \sin \alpha \cos \phi$,与旋转速度方向相同,此时桨叶合速度最大且桨叶剖面攻角最大,因此桨叶产生的载荷也最大。同时斜流中的桨叶载荷呈现较为明显的脉动特性,参考相关文献全湿流中斜流工况桨叶载荷同样呈现周期性但时历曲线较为平滑、光滑,因此空泡流中桨叶表面的空泡生成、溃灭、脱落等是其载荷呈现脉动性的重要原因。

表 6 给出了不同进速系数下单个桨叶载荷的变化情况。定义载荷极值变化率为 $|\text{load}_{\max} - \text{load}_{\min}| / \text{load}_{\max}$,推力载荷极值变化率最大时 $J=1.0$,此时变化率为 163%;转矩载荷极值变化率最大时 $J=1.0$,此时变化率为 100%。在轻载工况时,桨叶载荷变化最为剧烈,需要注意此时桨叶推力载荷会呈现正负交替特性,

这对螺旋桨强度及疲劳特性提出了更高的要求。

3.4 斜流中七叶侧斜螺旋桨空泡特性

图 16 为斜流中螺旋桨吸力面空化形态与轴向流中的对比,可以看出随着进速系数的增大,螺旋桨的表面空化面积都表现为下降趋势。通过 3.2 节中桨

叶速度多角形的分析并结合速度与空泡数的关系可知,斜流中的桨叶进流速度较轴向流减小,因此螺旋桨空泡数相对增大,因此图 16 斜流中螺旋桨空化程度整体相对轴向流较轻。同时斜流中的桨叶相当于有一个恒定速度的升沉运动,参考文献[10]中的结论,螺旋桨 $\phi=0^\circ$ 位置空化程度最轻,在图 13 中该结论也可以得到验证。两种流向工况中,空泡均未出现在叶根处。轴向流工况吸力面空泡基本呈现为片状空泡,且在重载工况下(对应 $J=0.4$),在 $0.95R$ 以外的叶梢部捕捉到了梢涡空泡。斜流工况螺旋桨吸力面空泡形态相对轴向流中很不规则,各桨叶上的空泡形态差异较大。从螺旋桨旋转一周的空泡形态变化来看,在螺旋桨旋转过程成伴随着较为严重的空泡融合、溃灭、脱落等现象,这对螺旋桨的水动力性能影响较大,是桨叶表面载荷呈现脉动特性的重要原因。同时空泡的溃灭和脱落等会产生强烈的辐射噪声,对螺旋桨的隐身性能十分不利。

图 17 为斜流中螺旋桨压力面空化形态与轴向流

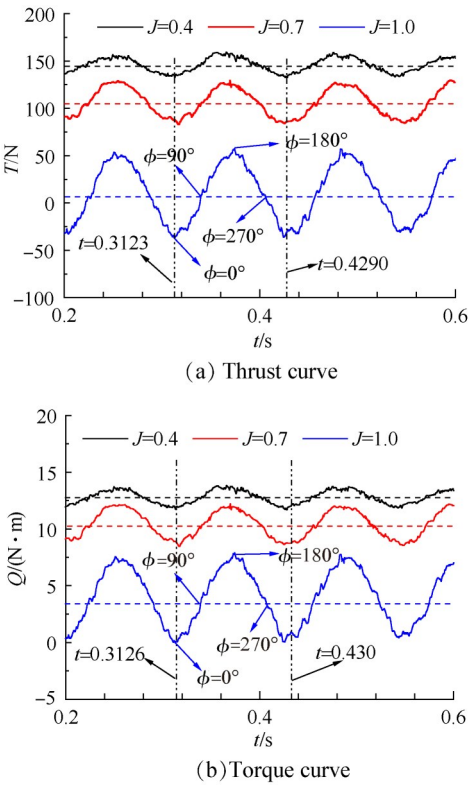


Fig. 15 Blade thrust and torque curve with different advance coefficient

Table 6 Blade thrust and torque extreme value with different advance coefficient

J	0.4	0.7	1.0
$T_{\max}/N$	157.4	129.5	57.5
$T_{\min}/N$	132.6	83.2	-36.2
$Q_{\max}/(N \cdot m)$	13.8	12.2	7.6
$Q_{\min}/(N \cdot m)$	11.8	8.4	0

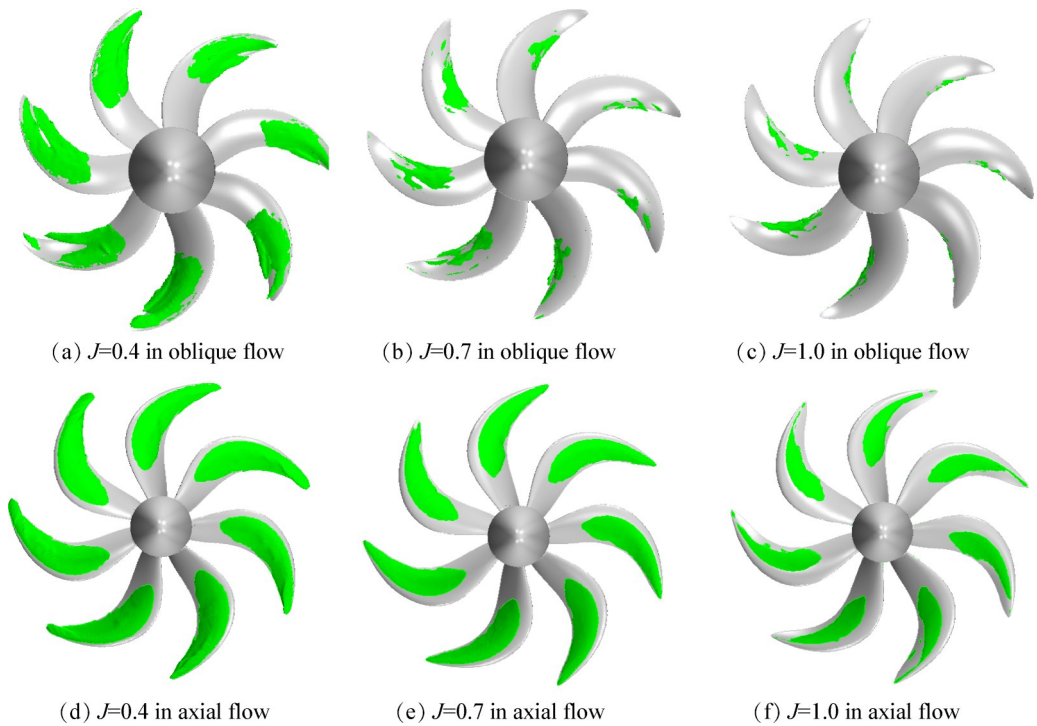


Fig. 16 Cavitation shape on suction side

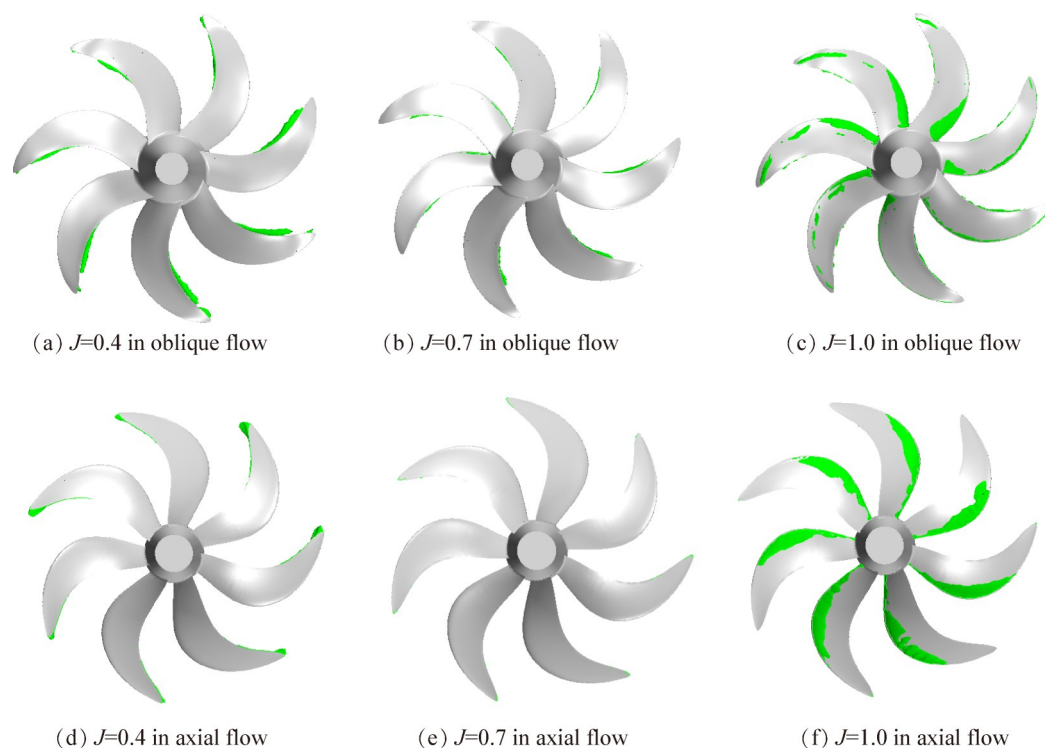


Fig. 17 Cavitation shape on pressure side

中的对比,可以看出两种流动工况中,螺旋桨均只在轻载工况时在压力面出现了较为明显的空泡,这是由于在轻载工况时螺旋桨进速较高,使得桨叶剖面的攻角较大,因此在压力面产生了明显的片空泡,这可能与该七叶侧斜螺旋桨的桨叶剖面特性有关。且与吸力面空泡不同的是,压力面空泡基本出现在导边附近,同时在叶根处也捕捉到了空泡。轴向流中,压力面随边附近基本没有空泡,而在斜流中压力面随边可以明显地捕捉到空泡沿随边脱出的现象,这也与吸力面空泡特征分析是一致的。

图 18 给出了不同进速系数时,螺旋桨单个桨叶表面空泡面积时历曲线,图中曲线取计算稳定段。可以观察到桨叶空泡面积与桨叶表面载荷特性类似,呈类似周期性变化,且变化周期与螺旋桨旋转一

周所用时间吻合。斜流中不同进速系数时,空泡面积 $J=0.4 > J=1.0 > J=0.7$ 。从图 16 和图 17 中也可以看出在重载工况时空泡面积最大,而轻载工况空泡面积大于 $J=0.7$ 工况是由于在轻载工况时,螺旋桨进速较高,桨叶剖面攻角较大,使得螺旋桨桨叶背部出现较为明显的空泡,导致整体空泡面积增大。

4 结 论

本文基于 DDES 方法对某七叶大侧斜螺旋桨斜流中的水动力及空泡性能进行分析,从推进效率、桨叶载荷特性、空泡特性等方面进行了分析,得到以下结论:

(1)不同进速系数下,本文所计算的七叶侧斜螺旋桨斜流中的推力和转矩相对轴向流中均有明显下降,且随着进速系数的增大,下降幅度也逐渐增大,同时在轻载工况时桨叶载荷急剧下降,推力下降了 82.1%,转矩下降了 47.6%,这可能是由于进速较高时斜流中的桨叶剖面攻角变大,部分桨叶剖面发生“失速”现象,需要进一步研究得到明确结论。

(2)本文所计算斜流中的七叶侧斜螺旋桨桨叶载荷周期性变化规律与桨叶剖面速度多角形分析结果一致,且在轻载工况时桨叶载荷变化最为剧烈,值得注意的是轻载工况桨叶载荷值会出现正负交替现象。同时载荷呈现明显的脉动特性,这与桨叶表面

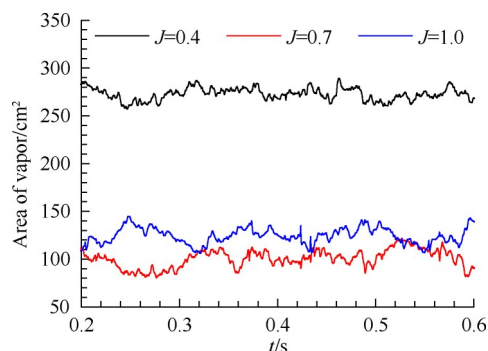


Fig. 18 Time history of cavitation area with different advance coefficient

空泡的生成、溃灭、脱落等有密切关系。

(3)本文所计算的斜流中七叶侧斜螺旋桨的空化程度在不同进速系数时均相对轴向流较轻,这是由于斜流中的进速减小使得空泡数增大所致,同时螺旋桨桨叶表面空泡分布也变得不均匀。斜流中的空泡形态相对轴向流变得十分不规则,在螺旋桨旋转过程中伴随着较为严重的空泡融合、溃灭、脱落等现象,对螺旋桨隐身性能十分不利。

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] 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.
- [6] 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.
- [7] Gaggero S, Brizzolara S. A Potential Panel Method for the Prediction of Midchord Face and Back Cavitation[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2001, 123(6): 311–319.
- [8] 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 smp*, 11, 2011.
- [9] Liu Dengcheng. The CFD Analysis of Propeller Sheet Cavitation[C]. *Nantes: Proceedings of the 8th International Conference on Hydrodynamics*, 2008.
- [10] 齐江辉, 吴述庆, 郭翔, 等. 耦合升沉运动的七叶侧斜螺旋桨空泡性能研究[J]. *推进技术*, 2020, 41(2): 461–468. (QI Jiang-hui, WU Shu-qing, GUO Xiang, et al. Numerical Simulation of a Seven-Blade Propeller with Skew on Its Cavitation Performance Coupled with Heave Motion[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(2): 461–468.)
- [11] 傅慧萍, 李杰. 斜流中的螺旋桨空化及压力脉动计算[J]. *中国造船*, 2018, 59(3): 1–12.
- [12] 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.
- [13] 张文照, 肖昌润. 斜流中艇后螺旋桨水动力数值计算方法[J]. *舰船科学技术*, 2014, 36(2): 55–59.
- [14] 王辰, 鹿麟. 斜流工况下泵喷推进器推进性能数值分析[J]. *推进技术*, 2020, 41(11): 2596–2604. (WANG Chen, LU Lin. Numerical Simulation of Propulsion Performance of a Pump-Jet Propulsor in Oblique Flow[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(11): 2596–2604.)
- [15] Brennen C E. Cavitation and Bubble Dynamics [M]. *UK: Oxford University Press*, 1995.
- [16] Heinke H J. Cavitation Tests with the Model Propeller VP1304 [R]. *Berlin: SVA Technical Report VP 3753*, 2011.
- [17] 王超. 螺旋桨水动力性能、空泡及噪声性能的数值预报研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [18] Robert W, Jun S, Fred S. Discussion: Criticisms of the “Correction Factor” Verification Method [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2004, 126(4): 704–706.
- [19] Vaz G, Hally D, Huuva T, et al. Cavitation Flow Calculations for the E779A Propeller in Open Water and Behind Conditions: Code Comparison and Solution Validation[C]. *Austin: Proceeding of Fourth International Symposium on Marine Propulsors*, 2015.
- [20] Nathan Chase. Simulations of the DARPA Suboff Submarine Including Self-Propulsion with the E1619 Propeller [D]. *Iowa: University of Iowa*, 2012.

(编辑:张贺)