

E7779A 螺旋桨斜流工况下的空泡数值模拟

赵旻晟, 万德成*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240, *通讯作者 Email: dcwan@sjtu.edu.cn)

摘要: 本研究对 INSEAN E779A 螺旋桨在斜流工况下产生的非定常空泡进行模拟。空化流模拟的数值计算结果基于开源的 CFD 软件平台 OpenFOAM 中的 InterPhaseChangeDyMFoam 求解器与 Schnerr-Sauer 空化模型, 并对 RANS 方法中的 SST k-Omega 湍流模型进行改造, 预测了螺旋桨的非定常特性。本文考察并分析了空化流中的螺旋桨水动力性能, 包括桨叶推力系数、机翼表面压力分布及其空泡形态。研究发现斜流工况会对螺旋桨产生的推力与转矩造成影响, 这一影响会随着来流与螺旋桨首尾线夹角的变化而增强。进一步对比分析全湿流及空化流结果, 可以发现空化的存在会在一定程度上减小螺旋桨桨叶两面的压力差, 从而降低螺旋桨产生的推力。

关键词: OpenFOAM; E779A 螺旋桨; 斜流; 非定常空泡

1 引言

空化是一种当局部压力降低到液体饱和蒸气压之下时发生的剧烈汽化现象。该物理现象包含了许多流体力学中已知的复杂流动, 直到今天人们对云空化的形成及空泡脱落动力学等的认知还有很大局限。水力机械发生空化后会产生振动、噪声、压力波动等, 并影响运输工具的水动力性能。因此对空化现象和空泡流的非定常特性的研究仍是目前水动力学研究的前沿课题之一。

对水力机械表面空化现象的研究开始于 20 世纪 50 年代, 借助实验积累了大量空化相关的数据, 为之后的研究打下了基础。Crimi^[1], Bark^[2], Ihara 等^[3]针对固定水翼表面空化进行了一系列的实验; Katz^[4]利用高速摄像技术研究了剪切涡对分离区空化的影响; Leroux 等^[5]测量了局部空化时的压力分布, 讨论了空化的非定常特性。但同样试验方法所需的软硬件条件^[6]也造成了局限性。

随着计算机技术的发展, CFD 数值模拟研究空化流成为一种趋势, 近年来, 基于黏性

流理论的数值模拟技术越来越重要,已经能很好地模拟螺旋尾流场速度和压力分布、水翼和水轮机等空化现象。

Shen等^[7]利用有限体积法解决了圆柱及NACA0015水翼绕流的N-S方程; Marsden等^[8]利用LES方法计算了NACA0012水翼在湍流中的噪声辐射. Li^[9]在RANS方法的基础上预报了一种大侧斜螺旋桨的敞水特性,与实验数据对比分析,推力系数 K_t 误差小于3%,转矩系数 K_q 误差小于5%, Zhu等^[10]采用了RNG k- ϵ 湍流模型及全空泡模型来预测了E779A四叶桨与P43811五叶桨在三维空化流动中的表现; Bugalaski^[11]使用RANS方法,并使用VOF模拟自由液面,进行了“船+桨+舵”的自航试验; 陈铠杰^[12]对PPT螺旋桨在全湿流和空化流条件下进行数值模拟,验证了利用OpenFOAM进行螺旋桨空化流模拟的可靠性。

本文基于OpenFOAM开源平台,使用InterPhaseChangeDyMFoam求解器及Schnerr & Sauer空化模型,对原有SST k- Ω 湍流模型进行粘性修正,模拟了斜流工况下的E779A螺旋桨水动力性能。研究发现斜流工况会对螺旋桨产生的推力与转矩造成影响,这一影响会随着来流与螺旋桨首尾线夹角的变化而增强。进一步对比分析全湿流及空化流结果,可以发现空化的存在会在一定程度上减小螺旋桨桨叶两面的压力差,从而导致螺旋桨产生的推力降低。

2 数值方法

2.1 控制方程

根据单相均质假设,可得汽液两相物质的连续性方程(1)和动量方程(2)

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho_m u_j)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

其中 ρ 为密度, μ 为粘性系数,并由下式确定:

$$\rho_m = \rho_l \alpha_l + \rho_v (1 - \alpha_l) \quad (3)$$

$$\mu_m = \mu_l \alpha_l + \mu_v (1 - \alpha_l) \quad (4)$$

式中,下标 l 和 v 分别代表液相和气相, α 为液相体积分数。

2.2 空泡模型

基于状态方程与输运方程的两种空泡模型是目前研究空化流问题的主要模型，后者由于更合理地模拟了液体的蒸发和水蒸气的凝结过程，所以能比较好的模拟出真实流动细节。Schnerr & Sauer 模型即为基于输运方程的空化模型，该模型将水、汽的混合物看做是包含大量球形蒸汽泡的混合物，并直接基于汽液净质量传输率的表达式，对其中的体积分数项进行了计算，代入后得到相变率如下：

$$\dot{m}_c = C_c \frac{3\rho_v \rho_l \alpha_v (1 - \alpha_v)}{\rho R} \text{sgn}(P_v - P) \sqrt{\frac{2|P_v - P|}{3\rho_l}} \quad (5)$$

$$\dot{m}_v = C_v \frac{3\rho_v \rho_l \alpha_v (1 - \alpha_v)}{\rho R} \text{sgn}(P_v - P) \sqrt{\frac{2|P_v - P|}{3\rho_l}} \quad (6)$$

$$R = \left(\frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \cdot \frac{3}{4\pi n_0} \right)^{1/3} \quad (7)$$

其中, R 为平均泡半径; n 为液相中的空泡数目; P_v 为对应温度的饱和蒸汽压力。

2.3 湍流模型及修正

空化区内的大量水蒸气使得水汽混合介质的影响不可忽略。考虑汽液两相混合密度的变化对湍流黏性系数的影响，对 SST k-Omega 模型进行修正——Reboud^[13] 等在论文中介绍了可以在传统的不可压 k-Omega 模型中虚拟地添加可压缩性的影响。这种想法的目的在于避免数值模型中的高扩散系数的影响，可以通过添加虚拟的黏性 (μ_t) 来实现。这种模型

是假设在多相介质中添加一个降低的、非线性的湍流黏度 $f(\rho)$ ，公式如下：

$$\mu_t = f(\rho) C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

$$f(\rho) = \rho_v + \left(\frac{\rho_m - \rho_v}{\rho_l - \rho_v} \right)^n (\rho_l - \rho_v); n \gg 1 \quad (9)$$

借助 Reboud 的思想，对 SST k-Omega 模型进行了修正，公式如下：

$$\mu_t = f(\rho) C_\omega \frac{k}{\omega} \quad (10)$$

$$f(\rho) = \rho_v + \frac{(\rho_m - \rho_v)^n}{(\rho_l - \rho_v)^{n-1}}; n \gg 1 \quad (11)$$

式中: k 为湍流动能; ω 为湍流耗散率; C_μ , C_ω 分别为常数; ρ 为流体密度。引入密度函

数后，特别在水蒸汽含量较高的汽液混合区域，可以减少湍流场对空化流计算的影响。

2.4 计算模型

本文采用的螺旋桨为 E779A 桨，由于有着丰富的实验数据，因此该桨是螺旋桨空化研究中应用最多的两个螺旋桨之一。E779A 桨为四叶桨，桨模直径为 0.253m。盘面比，螺距比等参数如表 1 所示。

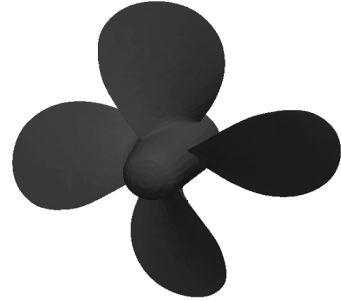


图 1 E779A 桨模型

表 1 E779A 桨模参数

项目	E779A	
直径 (m)	D	0.253
毂径比	d/D	0.200
螺距比	$P_{0.7}/D$	1.100
盘面比	A_e/A_o	0.689
叶数	Z	4

2.5 网格划分

本文采用 OpenFOAM 中的 interPhaseChangeDyMFoam 求解器，该动网格求解器针对空化问题，需要动网格与之对应。由于螺旋桨几何形状复杂，结构化网格并不适用，因此采用非结构化网格。螺旋桨整体模型布局、滑移面以及螺旋桨面网格等布置如图 2 和图 3 所示，为保证足够的精度并尽量降低计算量，最终确定网格总量大约为 340 万。

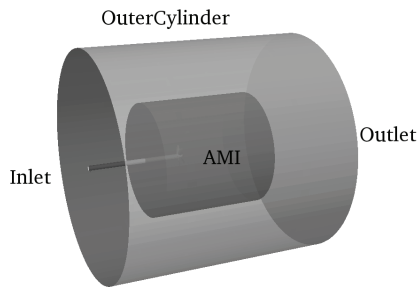


图 2 计算域及滑移面布局

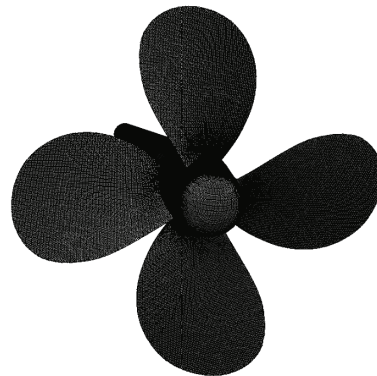


图 3 螺旋桨面网格分布情况

3 模拟结果与分析

3.1 敞水性能计算

首先对 E779A 螺旋桨的敞水性能进行模拟, 已验证数值方法的有效性, 进而进行空化流模拟。敞水工况螺旋桨转速为 25r/s^{-1} , 进速系数分别为 0.4, 0.6, 0.71 及 0.83, 均为法向正向来流。计算得到的推力系数曲线见表 2。

表 2 E779A 桨敞水性能模拟结果

J	K_T (实验)	K_T (模拟)	误差
0.4	0.391	0.382	2.30%
0.6	0.293	0.283	3.55%
0.71	0.247	0.235	4.81%
0.83	0.170	0.160	5.62%

由表 2 可以看出推力系数整体与实验数值比较接近, 在进速系数较小的时候误差小于; 但当进速系数升高后, 误差略微增大, 大约在 5% 左右。可以认为敞水性能模拟结果良好, 具有一定的准确度及可靠性。

3.2 空化模拟

螺旋桨在斜流下的空化计算分别设定 3 种不同的工况进行模拟, 来流与螺旋桨首尾线的夹角分别为 15° 、 30° 及 45° 。螺旋桨的空化计算分别在 3 种不同的工况下进行模拟。需要表明的是, 本次模拟列出的 3 种工况, 其法向来流速度相同, 是通过改变切向速度调整来流与螺旋桨首尾线夹角, 并非来流合速度相同。

实验值给出了这 3 种工况下有空化及无空化时的螺旋桨推力系数。在模拟空化的情况时, 采用 OpenFOAM 中的 interPhaseChangeDyMfoam 求解器, 可以依据螺旋桨转速及空化数求出需要设定的远场压力值, 公式如下:

$$\sigma_n = \frac{p - p_v}{0.5\rho(nD)^2} \quad (12)$$

表 3 空化模拟参数设置

参数	Case1	Case2	Case3
转速(r/s)	24.98	24.98	24.98
进速系数	0.71	0.71	0.71
空化数	1.515	1.515	1.515
饱和蒸汽压(Pa)	2818	2818	2818
水的运动粘性(m^2/s)	$9.34\text{e-}7$	$9.34\text{e-}7$	$9.34\text{e-}7$
水的密度(kg/m^3)	997.44	997.44	997.44
来流夹角 ($^\circ$)	15	30	45

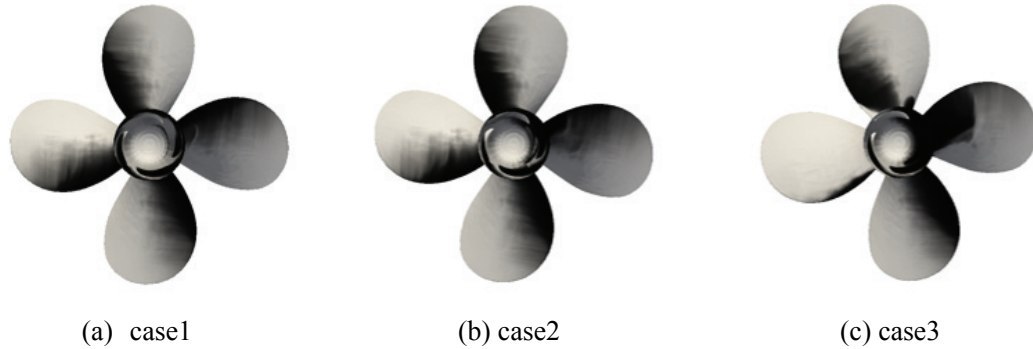


图4 桨叶表面空化分布情况

图4给出的是这3个工况下的螺旋桨桨叶表面空化分布情况。从图中可以看到，对于3种工况，空化均主要出现在螺旋桨吸力面的导边处（阴影部分）。从面积上看，3种工况下吸力面上的空泡面积大小逐渐减小，但是变化幅度并不明显。从空化位置分布上看，第一种工况下空化区域还是分布比较均匀，在四片桨叶上几乎一样；随着来流与螺旋桨首尾线夹角增大，空化区域的分布变得不均匀，在case3中，其中一片桨叶上几乎没有了空化出现，而在与之相对的桨叶吸力面上，空化区域面积变大，形状不规则。这种变化判断是由于来流速度与螺旋桨转速的夹角的变化。

空化的出现，主要对螺旋桨的水动力性能产生影响，同时也会对材料造成剥蚀作用，并发出振动和噪声。当来流角度增大，不对称现象将给船舶正常使用带来较大的干扰，同时对材料的损害也会有所提高。

3.3 螺旋桨推力系数对比

对比有空化及无空化情况下的推力系数，可以明显看到空化对于螺旋桨水动力性能的负面影响。敞水实验也给出了E779A桨在不同进速系数时的推力系数计算结果，可以用于与模拟结果进行比较。表4给出了模拟结果与实验结果的相对值，同时包含有无空化情况的差值对比，表中的推力系数为考虑斜流合速度后统一化的数值。

表4 推力系数对比

项目	Case1	Case2	Case3
K_T (斜流模拟)	0.2078	0.1949	0.1818
K_T (敞水实验)	0.251	0.251	0.251
K_T (正流模拟)	0.2404	0.2404	0.2404
推力系数损失(EFD)	-17.18%	-22.32%	-27.55%
推力系数损失(CFD)	-13.63%	-18.99%	-24.45%

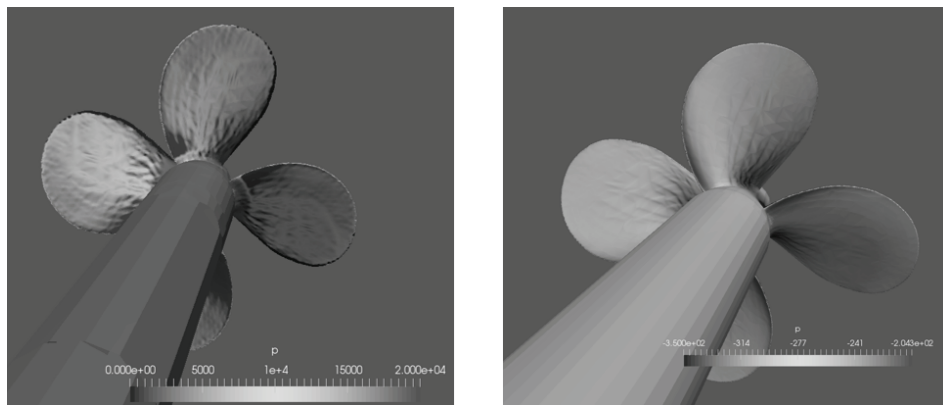
从表 4 可以看出, 随着来流与螺旋桨首尾线夹角增大, 推力系数明显降低。当来流与螺旋桨首尾线夹角为 15° 时, 推力损失在 15% 左右; 当夹角增加到 30° 度时, 与实验的推力系数误差已经超过 20%, 和空化流模拟结果也有接近 1/5 的误差; 当夹角继续增加到 45° 时, 推力系数误差已经达到 25%, 和实验的差别达到 1/4, 螺旋桨水动力性能已经明显有了变化。

本次数据对比是考虑到了来流合速度的影响, 在实际海况中, 合速度的干扰比数值计算结果要偏小, 推力系数的误差也要相对降低一些。同时敞水试验与非斜流工况下空化流模拟结果的差别也可以看出, 当空化发生时, 螺旋桨推力系数将会随之下降, 导致其水动力性能受到影响。在正流情况下该误差在 5% 左右, 比斜流工况下要低。

3.4 压力分布情况

螺旋桨背面(吸力面)有空化与无空化时的压力分布对比如图 5 所示。来流达到螺旋桨导边时, 由于流动分离将会在吸力面上形成低压区, 螺旋桨两面的压力差产生推力; 然而当低压区压力降低至该温度下饱和蒸气压时, 便会在局部出现空化, 空化区内压力不再降低, 保持在饱和蒸气压的大小。当气体在吸力面上远离导边后, 便会重新液化, 压力开始恢复到周围流场范围, 也就是说空化的存在会对低压区的生成产生一定的抑制作用, 这与陈铠杰^[12]对 PPTC 螺旋桨的空化流模拟结果类似, 验证了数值方法的可靠性。这种抑制作用导致螺旋桨压力差减小, 进而推力系数减小。从图 5 也可以明显看到有空化情况时, 低压区的范围明显小于无空化情况。

需要注意的是, 螺旋桨低压区是相对而言的, 实际由于桨叶所处的水深影响, 螺旋桨周围流场的压力较高, 因此空化脱离叶片后会很快溃灭, 对二维水翼的空泡特性研究验证了这一点。



(a) 无空化

(b) 有空化

图 5 螺旋桨有空化及无空化情况下桨叶吸力面压力分布

4 结论

本文基于 CFD 平台 OpenFOAM 中滑移网格空化求解器 interPhaseChangeDyMFoam 对 E779A 螺旋桨的水动力性能及空化特性进行了数值模拟。通过与敞水试验数据对比,验证了该数值方法具有一定的可靠性。在较低进速系数的工况下,螺旋桨推力系数与实验结果接近,误差在 5%左右。

E779A 螺旋桨在斜流工况下的空化流模拟结果表明,在来流与螺旋桨首尾线夹角较小的工况下,空化区域分布较均匀,空化面积较小,螺旋桨推力系数降低较少;随着来流与螺旋桨首尾线夹角增大,桨叶吸力面上的空化区域分布不均匀,形状也不规则,对螺旋桨性能造成一定影响。进一步研究表明,空化的产生会抑制螺旋桨吸力面区域压力的降低,减小桨叶两边压力差,进而导致螺旋桨推力系数的减小。

致谢

本文得到国家自然科学基金(51879159, 51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099)、上海高校特聘教授(东方学者)岗位跟踪计划(2013022)、上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)、工信部数值水池创新专项课题(2016-23/09)资助项目。在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 Crimi, P. "Experimental study of the effects of sweep on hydrofoil loading and cavitation," J. Hydraul. 1970,4:3-9.
- 2 Bark, G. "Development of violent collapses in propeller cavitation," Proc. Intl Symp. on Cavitation and Multiphase Flow Noise, Anaheim, CA, USA. ASME-FED, 1986, 45: 65-75.
- 3 Ihara, A., Watanabe. H. & Shizukuishi, S. "Experimental research of the effects of sweep on unsteady hydrofoil loadings in cavitation. Trans," ASME: J. Fluids Engng,1989,111:263-270.
- 4 Katz, J. "Cavitation phenomena within region of flow separation," J. Fluid Mech., 1984,140:397-436.
- 5 Leroux, J.B., Astolfi, J.A., Billard, J.Y.. "An experimental study of unsteady partial cavitation," J. Fluids Eng. ,2004,126: 94-101.
- 6 王蒙蒙, 赵德有. 螺旋桨诱导的船体表面力预报新方法. 船舶力学, 2006, 10(4): 18-24.
- 7 Shen. W. Z, Michelsen. J. A, and Sørensen. J.N, "A collocated grid finite volume method for aeroacoustic computations of low-speed flows," Journal of Computational Physics, 2004, 1969 (1): 348-366.
- 8 Marsden. O, Bogey. C, and Bailly. C, "Direct noise computation of the turbulent flow around a zero-incidence airfoil," AIAA Journal, 2008, 46(4): 874-883.

- 9 Li Da-Qing. Validation of RANS Prediction of Open Water Performance of A Highly Skewed Propeller with Experiments. Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics, China, 2006.
- 10 Zhu Z, Fang S.. Numerical investigation of cavitation performance of ship propellers. J Hydrodyn., 2012,24:347-353.
- 11 Tomasz Bugalaski, Pawel Hoffmann. Numerical Simulation of the Self-Propulsion Model Tests. Second International Symposium on Marine Propulsors, Germany, 2011.
- 12 陈铠杰, 万德成, PPTC 螺旋桨空化流动的数值模拟, 第二十九届全国水动力学研讨会论文集, 江苏镇江, 2018: 632-640.
- 13 Reboud, J. L, Stutz. B and Coutier-Delgousha. O. "Two Phase Flow Structure of Cavitation Experiment and Modeling of Unsteady Effects," Proc.3rd Int. Sym. Cavitation, Grenoble, France,1998.

Simulation of propeller cavitation in oblique flow based on OpenFOAM

ZHAO Min-sheng, WAN De-cheng

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240. Email: dcwan@sjtu.edu.cn)

Abstract: The present paper simulated the unsteady cavitation around the INSEAN E779A propeller in oblique flow. All the numerical results of cavitation flow simulation are solved by Inter Phase Change Dy MFOam in the open source CFD software platform OpenFOAM with Schnerr-Sauer cavitation model. The typical unsteady dynamics are predicted by the RANS method with a modified shear stress transport (SST) $k-\omega$ turbulence model. The numerical results such as cavitation shape, pressure distribution, the thrust coefficient K_t and the torque coefficient K_q are analyzed and compared with each other. The numerical results in of E779A propeller in uniform flow are basically in accordance with experimental data, indicating the reliability of the present method. It is found that the propeller operating in oblique flow outputs less thrust and torque, and the influence of the oblique flow on the cavitation and open water characteristics is also obvious. The disturbance of cavitation flow to pressure variation is also the reason for the reduction of propeller thrust coefficient. With the change of advance coefficient, this influence will be strengthened.

Key words: OpenFOAM; E779A propeller; oblique flow; unsteady cavitation.