

PPTC 螺旋桨空化流动的数值模拟

陈锐杰, 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)

*通信作者: dcwan@sjtu.edu.cn

摘要: 本研究利用开源平台 OpenFOAM 中的 interPhaseChangeDyMFoam 求解器, 应用 SchnerrSauer 空化模型, 对 PPTC 螺旋桨在全湿流和空化流条件下进行数值模拟, 对这两类工况得到的推力系数进行对比, 来探究空化对螺旋桨水动力特性的影响。在本研究中, 由于空化算例的进速系数较大, 因此针对空化算例采用了 RANS 和 DES 两种不同的模拟方法, 最终将得到的 PPTC 螺旋桨的全湿流及空化流结果与 SMP'11(Symposium of Marine Propulsors, 2011)提供的实验结果进行对比, 验证了利用 OpenFOAM 进行螺旋桨空化流模拟的可靠性。对比分析全湿流及空化流结果, 可以发现空化的存在, 会在一定程度上降低螺旋桨的推力系数, 并且进速系数越大, 这一负面影响就越明显。

关键词: OpenFOAM; PPTC 螺旋桨; 梢涡空化; SchnerrSauer 空化模型

1 引言

空化是一种由于液体局部压力低于该温度下饱和蒸汽压而导致的液体剧烈汽化现象, 一般发生于水翼、螺旋桨、舵等高速运动或高速旋转的流体机械表面。空化的产生往往会造成严重的水动力性能损失, 并且还会伴有剥蚀、噪声、振动等不利影响。因此, 空化问题一直是水动力研究中的热点方向。

空化问题的研究对象, 最早期为一些几何形状简单的回转体或翼型。Rouse 和 Mcnown^[1] 用实验的方法研究了一系列具有不同顶端形状的圆柱在均匀来流下的空化现象, 属于早期研究空化现象的一批学者, 他们的实验结果在接下来的几十年中被大量学者用于测试空化算例, 甚至一直持续至今, 比如 Kunz^[2], Senocak, Ahuja^[3]。Kjeldsen^[4] 对水翼 NACA0015 的空化流动做了十分全面的实验研究, 给出了一系列完整实验数据, 表明水翼空化特性主要受到来流攻角及空化数的影响, 这些结果在之后得到了大量学者的验证^[5]。

而对于螺旋桨这类复杂模型的空化研究则是起于 20 世纪 90 年代, 在近 10 年来有了显著的发展。螺旋桨空化主要有叶面空化、梢涡空化和毂涡空化等, 由于其物理问题的复杂性, 目前十分依赖于模型试验, 凭借经验和模型试验数据进行空化性能研究。这种方法十分直观, 但是代价高, 存在尺度效应, 试验周期长, 因此螺旋桨空化研究的数值模拟方法

变得越来越受人重视。在数值模拟采用的各类螺旋桨中, INSEAN E779A 和 PPTC 是研究范围最广的两个。意大利船模水池 INSEAN 曾对 E779A 桨进行了一系列敞水和空化特性实验, 因此该桨被欧盟的 VIRTUE 项目选为研究对象, 组织不同单位对均匀来流和船尾流场下的螺旋桨空化进行了模拟计算; PPTC 桨则是由 SMP'11 会议主办方提供, 该会议组织了近 20 家不同单位进行盲算^[6-7], 并在会议上设立了专门的研讨会进行交流, 该桨的试验由 SVA 实验室完成, 之后 SMP'15 会议又对该桨的新工况再次组织了研讨会。

文中选取了 PPTC 这一螺旋桨, 利用开源平台 OpenFOAM, 对该桨在全湿流和空化流条件下进行数值模拟, 并主要从推力系数这一方面对这两类工况进行对比, 分析了空化对于螺旋桨水动力性能的影响。

2 数值方法与计算模型

2.1 控制方程

在数值模拟中, 将汽、液组成的混合介质看成一种变密度单流体, 并引入空化模型用于描述汽、液间质量交换。连续性方程和动量方程可以表示为:

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

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

其中, μ 为流体黏度, ρ_m 为混合相的密度, τ_{ij} 为雷诺应力或亚格子应力张量。

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

汽、液两相间的输运方程为:

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_l u_j) = (\dot{m}_c + \dot{m}_v) / \rho_l \quad (4)$$

其中, l 下标均表示液相, v 下标表示汽相, \dot{m}_c, \dot{m}_v 分别表示汽化速率和冷凝速率, 由采用的空化模型定义。

2.2 空化模型

由于在计算中将汽、液组成的混合介质看成是单一介质, 因此汽液间的质量变化需要由空化模型来进行描述。本研究采用的是基于输运方程提出的 SchnerrSauer 模型^[8], 汽相

体积分数与气核密度和气核半径相关，汽化率和冷凝率的公式定义为：

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

其中， R 满足

$$\alpha_v = n_0 \frac{4}{3} \pi R^3 / (n_0 \frac{4}{3} \pi R^3 + 1) \quad (6)$$

2.3 计算模型

采用的螺旋桨为 PPTC 桨，该桨是 SMP'11, SMP'15 的算例桨，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。PPTC 桨为右旋五叶桨，桨模直径为 0.250m。盘面比，螺距比等参数如表 1 所示。

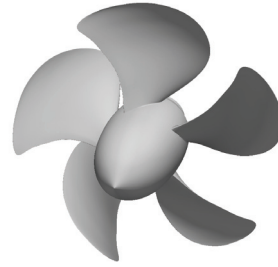


图 1 PPTC 桨模型

表 1 PPTC 桨模参数

PPTC		
直径 (m)	D	0.250
毂径比	d/D	0.300
螺距比	$P_{0.7}/D$	1.635
盘面比	A_e/A_o	0.779
叶数	Z	5

2.4 网格划分

计算采用了 OpenFOAM 中的 interPhaseChangeDyMFoam 求解器，该求解器是针对空化问题开发的动网格求解器，需要绘制与之对应的动网格。因为螺旋桨桨叶几何形状比较复杂，因此计算时采用非结构化网格，其模型布局、滑移面和螺旋桨面网格等情况如图 2 和图 3 所示，网格总量大约为 640 万。

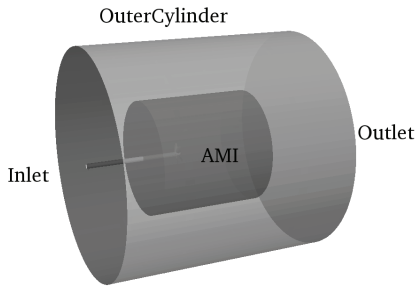


图2 计算域及滑移面布局

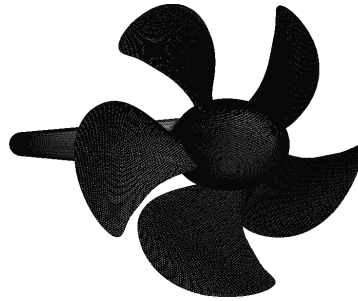


图3 螺旋桨面网格分布情况

3 PPTC 桨空化特性分析

3.1 敞水性能

在进行螺旋桨的空化流模拟之前，首先对敞水性能进行模拟，以验证螺旋桨数值模型的有效性。敞水工况螺旋桨转速为 15n/s,进速系数分别为 0.6,0.8,1.0,1.2 及 1.4。计算得到的推力系数曲线见表 2。

表 2 PPTC 桨敞水性能模拟结果

J	K_T (实验)	K_T (模拟)	误差
0.6	0.6288	0.6358	1.11%
0.8	0.5100	0.5165	1.27%
1.0	0.3994	0.4169	4.38%
1.2	0.2949	0.3126	5.99%
1.4	0.1878	0.1986	5.75%

从表 2 中可以看出，整体而言模拟结果与实验结果十分接近，特别是当进速系数较小时误差可以保持 2%以内，但当进速系数升高后，误差略微增大，大约在 5%左右。考虑到对于此螺旋桨的空化工况，螺旋桨进速系数均在 1 之上，并且具有更大的转速，因此在进行空化模拟时使用了 RANS 和 DES 两种模拟方法。

3.2 空化模拟

螺旋桨的空化计算分别在 3 种不同的工况下进行模拟。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。在模拟有空化的情况时，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：

$$\sigma_n = \frac{p - p_v}{0.5\rho(nD)^2} \quad (7)$$

对于无空化情况，依旧采用空化求解器 `interPhaseChangeDyMFoam`，但是需要将流场压力设置到足够大，从而阻止空化的产生。计算中设置水的表面张力为 0.07，其余参数保持与实验一致，详见表 3。

表 3 空化模拟参数设置

参数	Case2.3.1	Case2.3.2	Case2.3.3
转速(/s)	24.987	24.986	25.014
进速系数	1.019	1.269	1.408
空化数	2.024	1.424	2.000
饱和蒸汽压(Pa)	2818	2818	2869
水的运动粘性(m ² /s)	9.34e-7	9.34e-7	9.73e-7
水的密度(kg/m ³)	997.44	997.44	997.37

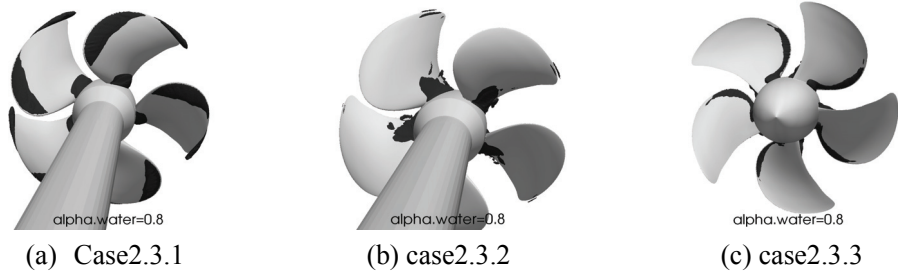


图 4 螺旋桨空化分布情况 (alpha.water=0.8)

图 4 给出的是这 3 个工况下的螺旋桨空化分布情况。从图 4 中可以看到，对于 case2.3.1，空化主要集中于桨叶吸力面的导边、叶梢以及吸力面叶根处；对 case2.3.2，空化主要集中于吸力面叶根处，另外在叶梢处也有极少量的空化出现；对 case2.3.3，此时空化主要分布在压力面的导边处。

3.3 空化及敞水工况对比

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。实验也给出了 PPTC 桨在 case2.3.1-3 这 3 个工况下有空化及无空化时的推力系数结果，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对比值，表明了模拟结果的可靠性，表 5 给出了有无空化的推力系数对比情况。

表4 推力系数的空化模拟结果及实验值

	Case2.3.1(J=1.019)	Case2.3.2(J=1.269)	Case2.3.3(J=1.408)
EFD(无空化)	0.3870	0.2450	0.1670
CFD(无空化, RANS)	0.4133	0.2652	0.1924
CFD(无空化, DES)	0.4072	0.2593	0.1750
误差(RANS)	6.80%	8.24%	15.2%
误差(DES)	5.22%	5.84%	4.79%
EFD(有空化)	0.3725	0.2064	0.1362
CFD(有空化, RANS)	0.4045	0.2382	0.1564
CFD(有空化, DES)	0.3958	0.2210	0.1457
误差(RANS)	8.59%	15.4%	14.8%
误差(DES)	6.26%	7.07%	6.98%

表5 有空化及无空化情况推力系数对比

	Case2.3.1(J=1.019)	Case2.3.2(J=1.269)	Case2.3.3(J=1.408)
K_T (无空化,CFD)	0.4072	0.2593	0.1750
K_T (有空化,CFD)	0.3958	0.2210	0.1457
推力系数损失(CFD)	2.80%	14.8%	16.7%
推力系数损失(EFD)	3.75%	15.8%	18.4%

从表4可以看出,整体而言模拟得到的推力系数值和实验值较为接近,稍大于实验值,RANS得到的结果误差相对偏大一些,特别是在case2.3.2和case2.3.3两类工况下误差明显,最大可能达到15%,而DES结果和RANS相比,误差相对较小,在无空化情况下误差基本保持在5%左右,有空化情况误差保持在7%。从表4中我们可以知道这3个算例进速分别为1.019,1.269,1.408,即从case2.3.1至case2.3.3进速系数是不断增大的,当进速系数相对而言并不大时,RANS结果误差略大于DES结果,但当进速系数进一步增大后,RANS误差将会增大许多,DES结果误差依旧可以保持在一个稳定值。

从表5的对比结果表明,由于空化的存在,将会影响螺旋桨的水动力特性,导致其推力系数减小,这一现象对于case2.3.1并不明显,推力系数值只减小了2.80%,但当进速系数进一步增大时,在case2.3.2和case2.3.3中,这一推力损失现象将变得极为突出,损失值均达到了15%左右,这一结果直观地阐明了空化的危害。

3.4 压力分布情况

图5给出的是case2.3.1的螺旋桨吸力面有空化及无空化时的压力分布情况。当来流到达螺旋桨导边时,便会出现流动分离,在吸力面上形成低压区,低压区压力降低至饱和蒸

汽压时，便会在该低压区出现空化，从而使得低压区的压力保持在饱和蒸汽压这一值，抑制了压力的进一步降低，当汽相在吸力面上远离导边后，便会重新液化，压力开始恢复，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，正是这一原因导致了螺旋桨推力系数的减小。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。

要注意的是，这里所说的低压区指的是吸力面上的压力相对于各自算例的外部流场而言压力较小。在实际计算中，为了得到 case2.3.1 的无空化情况，特地将该情况下的螺旋桨水深设置得很大，使得桨叶上无法产生空化，因此无空化时压力的绝对数值是明显远大于有空化情况的，但是它相对于自身的远场压力而言是明显偏小的，属于低压区。

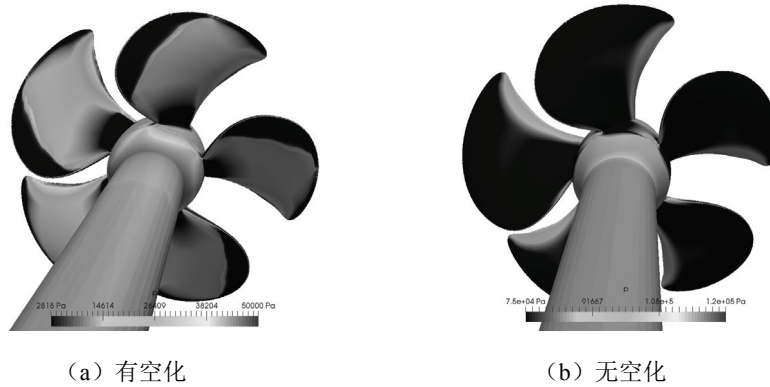


图 5 PPTC 桨有空化及无空化情况下桨叶吸力面压力分布

4 结论

(1) 采用 OpenFOAM 自带的滑移网格空化求解器 `interPhaseChangeDyMFoam` 模拟得到的 PPTC 螺旋桨的敞水性能和空化特性结果具有一定的可靠性。对于相对较低的进速系数，RANS 和 DES 均得到了较好的结果，当进速系数进一步增大后，RANS 方法误差相对偏大，而 DES 方法具有更好的稳定性，误差依旧保持在 5% 左右。

(2) 空化的存在会对桨叶吸力面低压区的分布产生抑制，从而使得螺旋桨水动力性能发生损失，主要表现为推力系数的减小；并且可以发现当进速系数相对不大时，这一数值并不大，但当进速系数进一步增大后，推力损失现象将会十分严重。

总而言之，空化的存在会使得螺旋桨推力系数减小，特别是在高进速系数情况下，这一特性尤为明显。在后续的研究中，可以进一步研究该螺旋桨在斜流及船尾流场下的水动力特性。

致谢

本工作获得国家自然科学基金项目(51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099), 上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022), 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300), 以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)资助。在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- 1 Rouse H, and Mcnown JS. Cavitation and pressure distribution: Head forms at zero angle of yaw. *Proactive Maintenance for Mechanical Systems*, 169-191.
- 2 Kunz RF, Boger DA, Chyczewski TS, Stinebring DR, Gibeling HJ, and Govindan TR. A preconditioned Navier-Stokes method for two phase flows with application to cavitation prediction. *Computers and Fluids*, 29(8), 849-875.
- 3 Ahuja V, Arunajatesan S, and Hosangadi A. Simulations of Cavitating Flows Using Hybrid Unstructured Meshes. *Journal of Fluids Engineering*, 123(2), 331-340.
- 4 Kjeldsen M. Spectral Characteristics of Sheet and Cloud Cavitation. *Journal of Fluids Engineering*, 122(3), 481-487.
- 5 Amromin E, Kopriva J, Arndt REA, and Wosnik M. Hydrofoil Drag Reduction by Partial Cavitation. *Journal of Fluids Engineering*, 128(5), 931-936.
- 6 Dengcheng Liu, Fangwen Hong. The Numerical Predicted of SMP11 Propeller Performance with and without Cavitation. *Second International Symposium on Marine Propulsors, SMP'11. Hamburg, Germany, June 2011.*
- 7 Keita Fujiyama, Chuel-Ho Kim, Daisuke Hitomi. Performance and Cavitation Evaluation of Marine Propeller using Numerical Simulations. *Second International Symposium on Marine Propulsors, SMP'11. Hamburg, Germany, June 2011.*
- 8 Schnerr GH, Sauer J. Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics. *Proc. 4th International Conference on Multiphase Flow, New Orleans, USA.*

Numerical simulations of cavitation flows of PPTC propeller

CHEN Kai-jie, 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, China, 200240, Email: dcwan@sjtu.edu.cn)

Abstract: In this paper, the hydrodynamic performance of PPTC propeller in open water and cavitation flow is simulated. All the numerical simulations in cavitation flow are carried out by interPhaseChangeDyMFoam solver in OpenFOAM with SchnerrSauer cavitation model. Because of the relatively high advance coefficient in cavitation case, both RANS and DES methods are used. The results are compared with the experiment data supplied by SMP'11(Symposium of Marine Propulsors, 2011) to check the reliability of numerical simulation method. The thrust coefficient and the vorticity of tip vortex are compared between open water case and cavitation case. It can be found that the thrust coefficient drops a lot in cavitation case, especially in the case with high advance coefficient.

Key words: OpenFOAM; PPTC propeller; tip cavitation; SchnerrSauer model