

# 螺旋桨在非均匀流场中的空化模拟

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  
船海计算水动力学研究中心(CMHL), 上海 200240)

## 摘 要

基于开源 CFD 平台 OpenFOAM 中的两相流求解器及 Schnerr-Sauer 空化模型, 对螺旋桨在非均匀流场中的空化与水动力特性进行数值研究。采用环形加密的方法降低计算成本, 提高数值模拟效率。应用 Kunz 及 Sauer 空化模型预测非定常水动力学特征, 对推力系数、桨叶表面压力分布与空化形状等模拟结果进行分析和比较, 研究了不同的空化模型及非均匀流对螺旋桨空化的影响。

**关 键 词:** OpenFOAM; 空化流; E779A 桨

**中图分类号:** U661.1

**文献标志码:** A

## 0 引 言

空化是指局部液体的压力低于该处温度下的饱和蒸气压时发生的剧烈汽化现象。空化经常发生在水翼以及船舶的螺旋桨和泵上。随着各类水力装置转速的增加, 叶片吸力面上的压力显著降低, 不可避免地会出现空化, 导致材料磨损剥蚀并影响水动力性能。

借助各类实验设备, 科研人员对空化现象进行了全面的观察, 得到了许多重要的研究成果<sup>[1-4]</sup>, 为后续数值模拟与理论分析提供了基础。随着计算机性能的更新换代, 尤其是考虑粘流效应的 CFD 计算流体方法不断发展, 基于数值模拟的研究方法逐渐成为主流。

学者们在基于 Rayleigh-Plesset 方程推导得到的输运方程的基础上进行空化研究并加以改善, 同时空化现象涉及的动力学机理的分析也受到研究人员的重视。Huang 等<sup>[5]</sup>采用输运方程空泡模型与大涡模拟方法 (LES) 相结合的手段对三维 Clark-Y 水翼的空化现象进行了研究, 数值模拟结果很好地捕捉到了空泡的形成、发展以及沿水翼的移动和脱落, 与试验观测到的结果吻合; 片/云空泡在发展过程中与水翼前后部涡结构的相互作用也得到了验证。郑巢生<sup>[6]</sup>使用 RANS 湍流模型与旋转坐标系下的控制方程结合的数值求解方式, 研究了空泡情况下单独桨叶表面压力分布以及空泡形态等水动力性能, 与试验数据较吻合。Dang<sup>[7]</sup>提出了一种基于势流的低阶面元法来计算三维水翼的绕流问题, 研究了空腔闭合处的流动和再进入射流的形成机理。

螺旋桨由于其三维的结构和运动工况, 在数值模拟研究中的难度要远高于水翼及简单几何体。商用 STAR-CCM+与 Fluent 等软件在螺旋桨敞水特性计算和空泡流模拟中有较好的成果<sup>[8-10]</sup>, 包括非均匀来流及船后伴流螺旋桨特性捕捉等复杂工况<sup>[11-12]</sup>。这类商业软件由于无法开源, 在数值模拟的自主研

发中具有一定的局限性。

本文基于 CFD 开源软件平台 OpenFOAM, 采用 Schnerr-Sauer 空化模型、两相流求解器 interPhaseChangeDyMFoam 模拟计算了 E779A 桨在非均匀流流场中的水动力特性。将 E779A 螺旋桨在非均匀来流的数值计算结果与试验数据进行比较。还研究了螺旋桨桨叶表面片空化和梢涡空化的非定常特性。

## 1 数值方法

### 1.1 控制方程

按照 Schnerr-Sauer 空化模型中单相均质的假设, 汽、液组成的混合介质由统一的密度可变的单一流体来代替, 同时基于输运方程描述汽、液之间的质量交换过程, 可得连续性方程(1)和动量方程(2):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{U}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) \mathbf{U} = -\nabla p + \nabla \cdot \mu \nabla \mathbf{U} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{U}$  为绝对速度,  $p$  为静压力,  $\rho \mathbf{g}$  和  $\mathbf{F}$  分别为重力体积力和外部体积力,  $\rho$  为密度,  $\mu$  为黏性系数, 混合均质的密度和黏性系数由下式确定:

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

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

式中, 下标 v 和 l 分别代表气相和液相, 下标 m 表示混合介质,  $\alpha_l$  为液相体积分数。

### 1.2 空泡模型

Schnerr-Sauer 空泡模型是基于输运方程提出的, 用凝结和汽化过程中的源项来模拟水、汽之间的质量传递。它由 Rayleigh-Plesset 方程推导而来, 该方程如下:

$$\frac{|P_v - P_\infty|}{\rho_l} = \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{1}{\rho_l} \left( 4\gamma_L \frac{dR}{dt} + 2 \frac{\sigma}{R} \right) \quad (5)$$

$$\frac{dR}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{P_v - P_\infty}{\rho_l}} \quad (6)$$

式中,  $P_\infty$  表示空泡内气压,  $\gamma_L$  表示液体动力粘性,  $\sigma$  表示表面张力系数,  $P_v$  为对应温度的饱和蒸汽压力,  $R$  为空泡平均半径。

在使用 R-P 方程时, 粘性力项及表面张力项一般会被忽略, 同时 Schnerr-Sauer 模型中二阶导数项也被忽略, 得到式(6)。Liu<sup>[13]</sup>提出了一种保留二阶导数项进行推导的方法, 得到了一种新的空化模型, 并对螺旋桨表面空泡进行了模拟。

Schnerr-Sauer 空泡模型中的气相体积分数和气核密度及气核半径相关。表示凝结率和汽化率的质量源项表达式如下:

$$\dot{m}_c = C_c \frac{3\rho_v \rho_l \alpha_v (1 - \alpha_v)}{\rho R} \text{sgn}(P_v - P) \sqrt{\frac{2|P_v - P|}{3\rho_l}} \quad (7)$$

$$\dot{m}_v = -C_v \frac{3\rho_v \rho_l \alpha_v (1 - \alpha_v)}{\rho R} \operatorname{sgn}(P_v - P) \sqrt{\frac{2|P_v - P|}{3\rho_l}} \quad (8)$$

$$\alpha_v = \frac{n_0 \frac{4}{3} \pi R^3}{n_0 \frac{4}{3} \pi R^3 + 1} \quad (9)$$

式中,  $\dot{m}_c$  和  $\dot{m}_v$  分别为冷凝和汽化的质量源项,  $C_c$  和  $C_v$  为经验常数,  $n_0$  为液相中的空泡数目,  $\alpha_v$  为液相体积分数,  $P$  为局部压力。

### 1.3 模型与网格划分

本文以 E779A 螺旋桨为研究对象, 对其空化特性进行数值模拟。该螺旋桨具有丰富的试验数据和不同领域数值模拟研究的基础, 它与 PPTC 是目前空化研究中最常用的两种螺旋桨。数值模拟基于 OpenFOAM 中的两相流求解器 interPhaseChangeDyMFoam, 在实现螺旋桨旋转时, 不需要使用相对运动的旋转坐标系进行计算, 直接使用滑动网格技术来模拟螺旋桨在旋转工况下的实际流动。螺旋桨总布置及滑移面计算如图 1 和图 2 所示。为了保证足够的计算精度, 提高计算效率, 网格总量约为 500 万。

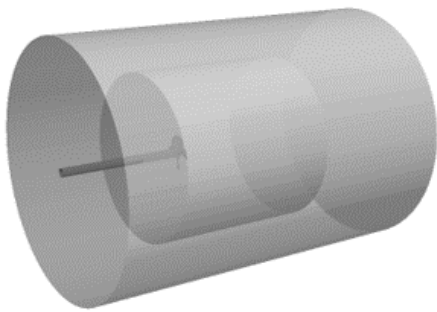


图1 计算域及滑移面布局图

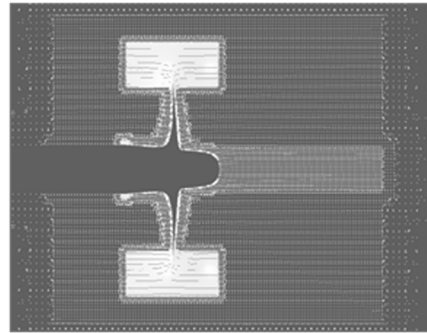


图2 螺旋桨周围网格分布

为了捕捉梢涡和毂涡空泡, 选择了一个环形加密区域来包围螺旋桨盘的边缘, 即梢涡出现的地方, 如图 3 所示。这样可以减小加密区域的面积, 即减少网格的数量, 同时提高捕捉尖涡空化的精度。螺旋桨后面的圆柱形加密装置则用于捕获毂涡空化。

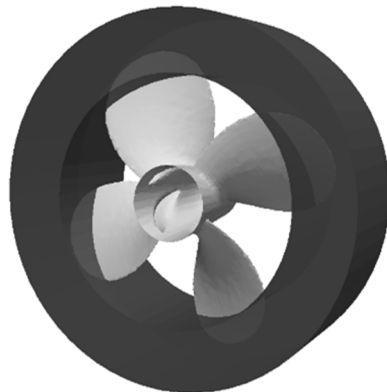


图3 桨叶周围环形加密区

## 2 E779A 螺旋桨空化特性分析

### 2.1 空化模拟

在模拟有空化的情况时, 依据螺旋桨转速  $n$  及空化数  $\sigma_n$  求出需要设定的远场压力  $P$ :

$$\sigma_n = \frac{P - P_v}{0.5\rho(nD)^2} \quad (10)$$

在图 4 中展示了使用 Sauer 及 Kunz 两种空化模型进行螺旋桨空泡模拟的结果。在均匀来流的工况下, 两种方法都能较好地模拟桨叶的梢涡空泡, 而且在沿桨叶导边处的脱落现象也很明显, 这与试验是较吻合的。对比两种空化模型计算结果的不同之处, 可以看出, Sauer 模型捕捉梢涡空泡形状的能力较好, 捕捉到的梢涡空泡形态更为完整和规则。因此在非均匀流工况的模拟中选择 Sauer 空化模型进行计算。

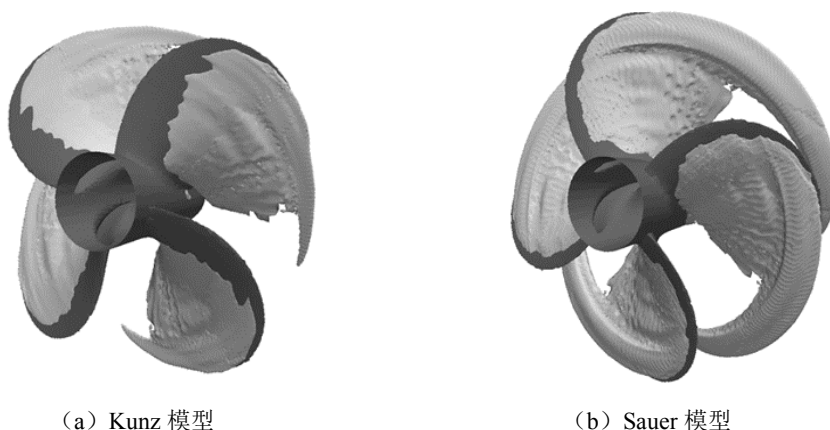


图 4 两种空化模型计算结果对比

图 5 展示了 E779A 螺旋桨在均匀来流工况下的空化发展过程。叶片空化首先发生在桨叶背面的吸力面上, 然后叶尖梢涡空化出现并沿叶梢向外发展。在梢涡空化向后延伸过程中, 空泡形状保持稳定且规则, 气泡体积在  $x$  轴方向的变化不大。梢涡空化的长度与上述螺旋桨周围环形密集区的长度基本一致。可以看出, 随着空化的发展, 桨毂处也出现了毂涡空化现象, 该处空化不稳定, 形状在变化。

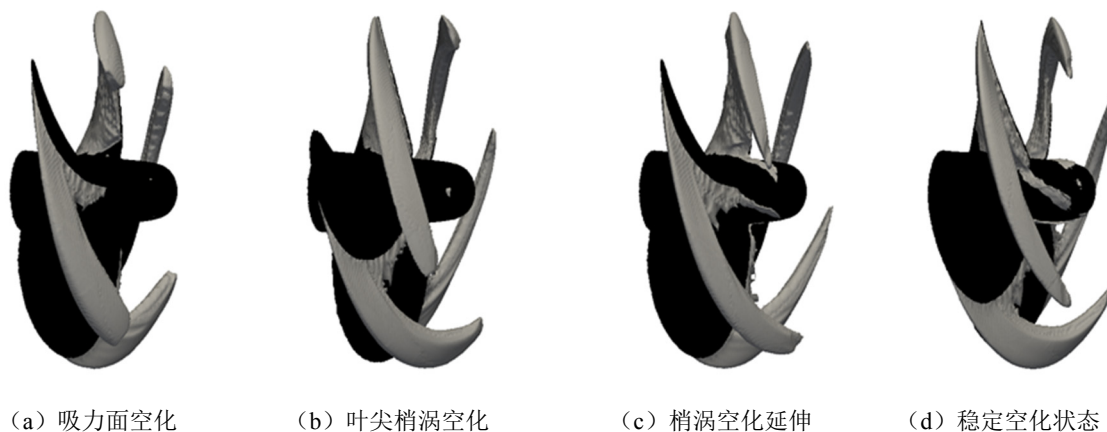


图 5 均匀来流工况下空泡形状展示

图 6 显示了非均匀入流条件下螺旋桨的空化形状。可以看出,梢涡空化在后向发展过程中形状变得不规则,并不像均匀流中的空泡那样沿螺旋线向后延伸。空化体积在  $x$  轴方向有明显的增大,空化的位置有沿  $z$  轴正方向移动的趋势,但这种趋势不明显;桨毂位置产生明显的毂涡空化,毂涡空化也不是一个圆柱,而是向后扩散,中间有一个空腔区,整体后向发展的距离明显大于均匀流动条件下的空化距离,因此毂涡空化未充分发展的原因不应是网格因素。总的来说,非均匀流条件下螺旋桨产生的梢涡和毂涡空化比均匀流条件下的体积大,形状更不规则。沿  $x$  轴向后发展的距离较长,不均匀性明显。

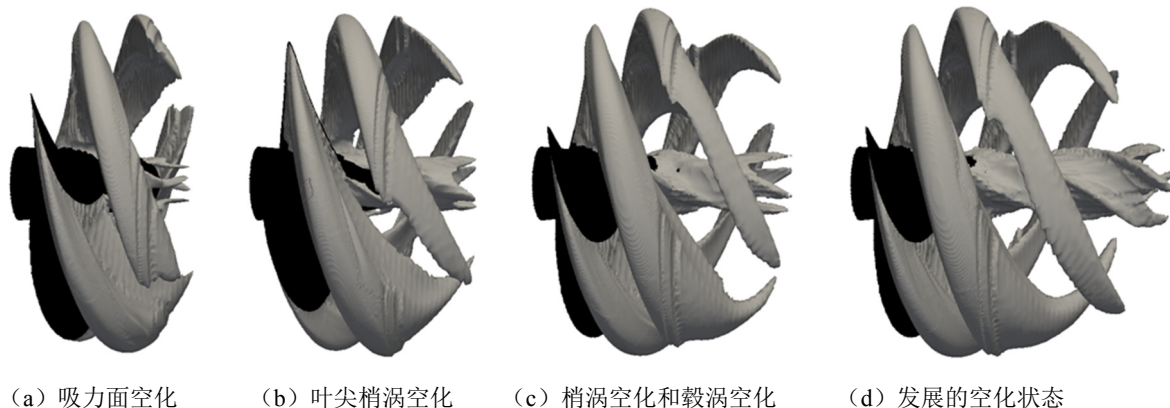


图 6 非均匀来流工况下空泡形状展示

## 2.2 压力分布情况

螺旋桨的推力来自于叶片吸力面和背面之间的压差。当来流到达叶片前缘时,在气流分离的作用下,在吸入侧形成一个低压区。然而,当吸入侧低压区的压力降至环境温度下液体的饱和蒸气压时,局部会发生空化,空化区的压力不再下降。将保持在饱和蒸气压的值,如图 7 所示。该区域的压力梯度很小,也就是说,空化区域会抑制低压区的形成。数值模拟结果与 Chen<sup>[14]</sup>对 PPTC 螺旋桨空化流动的计算分析结果一致,验证了模拟方法的可靠性。

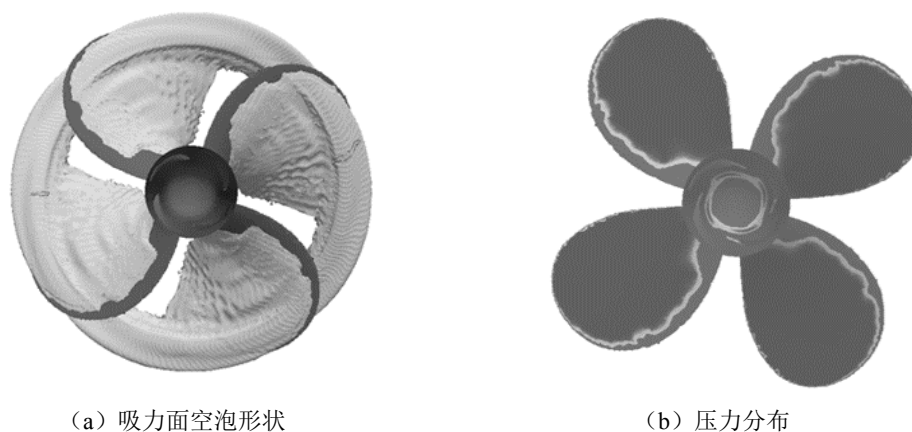


图 7 E779A 桨吸力面压力分布图与空泡形状

在表 1 中,对比了均匀流与非均匀流工况下螺旋桨推力系数的误差,从表中可以看出,发生空化的情况下,由于桨叶两面的压力差导致了推力系数的降低。在非均匀来流工况下,尾部流场与梢涡空泡更加不规则,非定常性的作用导致推力系数更低,同时毂涡空泡也使得桨叶水动力性能受到了影响。

表 1 均匀流与非均匀流工况推力系数对比

$J$	均匀流		非均匀流	
	$K_T$	误差/ %	$K_T$	误差/ %
0.6	0.270	7.85	0.262	10.58
0.71	0.222	10.12	0.211	14.57
0.77	0.189	12.09	0.178	17.21
0.83	0.144	15.29	0.134	21.18

### 3 结 论

基于开源 CFD 平台 OpenFOAM, 采用两相流求解器 interPhaseChangeDyMFoam 并与动态滑移网格结合对螺旋桨的空化和水动力性能进行数值模拟。从螺旋桨空化模拟结果可以得知:

(1) 对螺旋桨桨叶周围进行环形加密有助于梢涡空泡的模拟捕捉, Sauer 模型对螺旋桨梢涡空泡的模拟效果要优于 Kunz 模型, 空泡形状更完整规则。

(2) 在非均匀来流工况下, 螺旋桨梢涡空泡形状发生不规则变化, 长度增加, 并出现明显的毂涡空泡;

(3) 空化的存在对桨叶吸力面低压区的分布产生抑制作用, 使螺旋桨水动力性能发生损失, 主要表现为推力系数的减小。当进速系数增大后, 推力损失现象将十分明显。非均匀流动由于非对称性及对流场的影响也会影响螺旋桨的水动力性能。

### 参 考 文 献

- [1] DUTTWEILER M E, BRENNEN C E. Surge instability on a cavitating propeller [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001 (458): 133-152.
- [2] FOETH E J, Van DOORNE C W H, Van TERWISGA T, et al. Time resolved PIV and flow visualization of 3D sheet cavitation [J]. Experiments in Fluids, 2006, 40(4): 503-513.
- [3] FOETH E J, Van TERWISGA T, Van DOORNE C. On the collapse structure of an attached cavity on a three-dimensional hydrofoil [J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(7):933-943.
- [4] LABERTEAUX K R, CECCIO S L. Partial cavity flows. Part 2. Cavities forming on test objects with spanwise variation [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 431: 43-63.
- [5] HUANG Biao, ZHAO Yu, WANG Guoyu. Large eddy simulation of turbulent vortex-cavitation interactions in transient sheet/cloud cavitating flows [J]. Computers & Fluids, 2014(92): 113-124.
- [6] 郑巢生, 张志荣. 基于 OpenFOAM 的螺旋桨空泡数值模拟方法研究[C]//《水动力学研究与进展》编委会, 浙江海洋学院, 中国力学学会, 中国造船工程学会. 第二十五届全国水动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议文集(上册), 2013.
- [7] DANG J, KUIPER G. Re-entrant jet modeling of partial cavity flow on two-dimensional hydrofoils [J]. Journal of Fluids Engineering, 1999, 121(4):773-780.
- [8] 姜彭, 张超, 张宇. 基于 STAR-CCM+的螺旋桨水动力性能分析[J]. 中国修船, 2020, 33(1): 43-46.
- [9] 冯学梅, 陈凤明, 蔡荣泉. 使用 Fluent 软件的螺旋桨敞水性能计算和考察[J]. 船舶, 2006, 10(1): 14-19.
- [10] FENG Xuemei, CHENG Fengming, CAI Rongquan. Calculation of propeller open water performance by CFD software

- FLUENT [J]. Ship & Boat, 2006.
- [11] 龙云, 韩承灶, 季斌, 等. 船后非均匀进流条件下螺旋桨空化水动力性能的数值分析[C]// 中国力学学会, 中国造船工程学会. 第三十届全国水动力学研讨会暨第十五届全国水动力学学术会议论文集, 2019: 76-81.
- [12] 马娟, 赖明雁, 魏斌. 斜流中船后螺旋桨水动力数值分析[J]. 船舶工程, 2019, 41(8): 31-36.
- [13] LIU D. The numerical simulation of propeller sheet cavitation with a new cavitation model [J]. Procedia Engineering, 2015, 126: 310-314.
- [14] 陈铠杰, 万德成. PPTC 螺旋桨空化流动的数值模拟[C]// 中国力学学会, 中国造船工程学会. 第二十九届全国水动力学研讨会论文集, 2018: 632-640.

## Simulation of Propeller Cavitation in Non-uniform Flow Field

ZHAO Minsheng, WAN Decheng\*

(Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

### Abstract

Based on the two-phase flow solver and Schnerr-Sauer cavitation model in the OpenFOAM of open-source CFD platform, cavitation and hydrodynamic characteristics of a propeller in non-uniform flow field are numerically studied. The working condition is set as the non-uniform inflow, and the annular densification method is used to reduce the calculation cost and improve simulation efficiency. Unsteady hydrodynamic characteristics are predicted by Kunz and Sauer cavitation models respectively, and simulation results such as thrust coefficient, blade surface pressure distribution and cavitation shape are analyzed and compared.

**Key words:** OpenFOAM; cavitating flow; E779A propeller

### 作者简介

赵旻晟 男, 1994 年生, 博士研究生。主要从事基于 OpenFOAM 的水翼与螺旋桨空泡数值模拟与特性的研究工作。

万德成 男, 1967 年生, 教授、博士生导师、教育部长江学者特聘教授, 主要从事船舶与海洋工程数值水池、naoe-Foam-SJTU 和 MLPparticle-SJTU 求解器开发、计算流体力学软件集成与开发等方面的教学和研究工作。

\*通讯作者: 万德成