螺旋桨非定常空化流场大涡模拟的模型参数影响研究

余超，王一伟，黄晨光，于娴娴，杜特专，吴小翠

(中国科学院力学研究所，流固耦合系统力学重点实验室，北京，100190，Email: yuchao@imech.ac.cn)

摘要：螺旋桨在非均匀尾流中旋转运动时可能会产生的非定常空泡演化及导致压力脉动一直是水动力学领域中的前沿和难点。本研究利用 OpenFOAM 开源软件，基于 Narvier-Stokes 方程，采用大涡模拟方法，结合 VOF(Volume of Fluid)多相流模型和 Kunz 空化模型，对非均匀尾流中螺旋桨空化现象进行了数值模拟。进一步开展了不同蒸发率和凝结率系数的模拟，对比了不同工况下空泡体积与空间测点压力脉动特征，分析了经验参数的影响规律，获得了参数影响的敏感区间。

关键词：大侧斜螺旋桨；大涡模拟；空化；蒸发率；凝结率

1 引言

近年来船舶向大型化和高速化发展，螺旋桨及舵的空泡、空蚀，船舶的振动等问题变得日益突出。对螺旋桨在尾流场中的空泡性能以及周围流场的精细结构的分析，一直是水动力学研究领域值得关注的难点。

非定常空化流动演化与漩涡运动联系紧密，因此湍流求解是相关数值模拟方法的关键问题之一。长期以来雷诺时均方法（RANS）是工程应用中的最主要手段模型，如 Watanabe, Takayuki[1]使用基于 RANS（展开）模型对 SEIUN-MARU 号常规螺旋桨在不均匀的尾迹的非定常流场进行了数值模拟；季斌，罗先武等[2-3]基于 SST(Shear Stress Transport)湍流模型对 SEIUN-MARU 号大侧斜螺旋桨非均匀尾流空化进行数值模拟,预报了空化条件下的压力脉动。

但雷诺时均方法在处理湍流脉动等细节问题具有很大的局限。相比之下，大涡模拟方法（Large Eddy Simulation）旨在直接求解非定常的大尺度涡结构运动，对湍流的瞬态特征预测的更加准确。近年来， Wang.[4], Bin[5] LIU 等[6]基于 LES 方法在水翼空化计算模拟中得到了很好的结果。然而对于螺旋桨非定常空化的大涡模拟研究讨论还需要更深入更细致的工作。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

本研究以 SEIUN-MARU 号大侧斜螺旋桨(High Skewed Propeller，HSP)为研究对象,在 OpenFoam 开源软件平台上，采用 LES 模拟湍流，结合 VOF(Volume of Fluid)多相流模型和 Kunz 空化模型，数值模拟了非均匀伴流场中螺旋桨的空泡演变过程，开展了不同空化模型包括蒸发率和凝结率系数的模拟，分析了经验参数的影响规律，获得了参数影响的敏感区间。

2 数值模拟方程

本文采用 LES 方法与 VOF 多相流模型，具体控制方程参见文献[9]。水的体积分数 α 的输运方程中相变源项 $\dot{m}$ 采用常见的 Kunz 空化模型计算:

$$\dot{m}^{+}=\frac{C_v\rho_v\min[0,p-p_{sat}]}{(0.5\rho_l/U_\infty^2)t_\infty} \tag{1}$$

$$\dot{m}^{-}=\frac{C_c\rho_v\alpha^2(1-\alpha)}{t_\infty} \tag{2}$$

$\dot{m}^{+}$ 表示水的蒸发率，$\dot{m}^{-}$ 表示水蒸汽的凝结率，C_v 和 C_c 为经验常数，本研究中选取多组值进行模拟。

3 数值计算

以模型尺度 (D=0.22m) SEIUN-MARU号大侧斜螺旋桨HSP为研究对象。HSP是第22届 ITTC 推进器技术委员会选定的考核非定常面元法的大侧斜螺旋桨。该桨原型和模型实验数据较为丰富。

3.1 几何模型及计算域

几何模型中使用O-xyz直角坐标系，x轴与桨轴重合，方向为沿螺旋桨的旋转轴指向下游, z轴与螺旋桨的某一桨叶的参考线一致，y轴服从右手定则。为了表述方便，将该桨叶参考线处于图 1中z轴的位置（即螺旋桨正上方）时记为 θ =0°，按逆时针记录桨叶所处位置 θ 的角度。

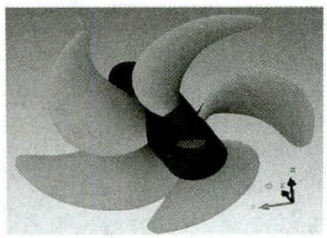

图 1 螺旋桨几何模型

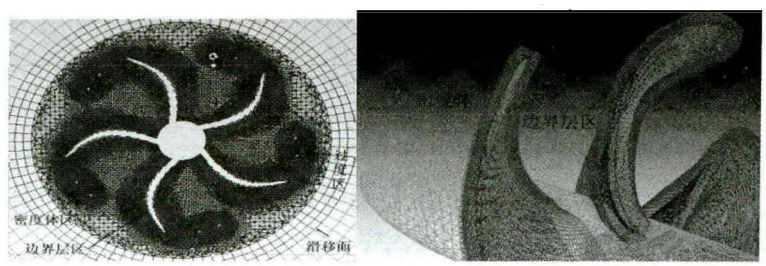

图 2 网格划分

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

计算域选取参照前人经验[2-3]，取为与桨轴同轴的圆柱形区域，以螺旋桨直径D为基准度量，上游入口边界距桨盘面0.7D，下游出口边界距桨盘面为5D，外部圆柱壁面边界距螺旋桨桨轴3D。采用混合型网格进行，网格数约350万。网格以圆柱形滑移面为界分为外部区域和内部动网格区域。外部区域及螺旋桨附近区域采用高质量的结构化网格，中间过渡区域采用非结构混合网格，在旋涡集中且易发生空化的叶梢处加密，并将三块区域合并而成（图 2）。

3.2 计算条件设置

本研究选择了一组试验数据丰富的工况：推力系数 $K_T=\dfrac{Thrust}{\rho n^2 D^4}=0.201$，转速 n=17.5r/min，空泡数 $\sigma=\dfrac{P_\infty-P_{sat}}{0.5\rho(nD)^2}=2.99$，其中 $P_{sat}=3540P_a$，为水的饱和蒸汽压。

数值模拟采用OpenFOAM中的interPhaseChangeDymFoam这一求解器。内部动网格区域如图 3 所示转动轴为 x 轴。入口条件为非均匀速度入口，速度场分布按实验测得的船模尾流速度场给出，如图 4 所示，其中 $W_X=1-V_X/V_\infty$ 。出口条件设置为压力出口。计算域外边界设置为可滑移壁面边界。

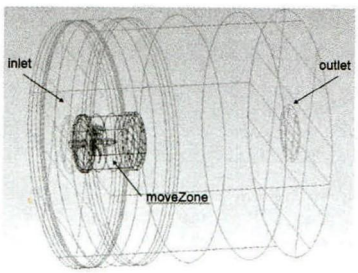

图 3　计算域

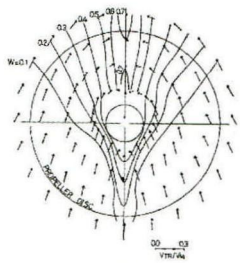

图 4　试验尾流速度场

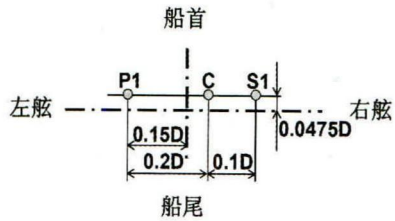

图 5　压力测点位置

4　计算结果及参数影响分析

空泡形态发展是首要关注的结果。图 是螺旋桨在旋转过程中桨叶处在不同位置时的空泡形态（按照水力机械行业的通常做法，图中蓝色曲面为水蒸气体积分数10%的等值面，用以表示空泡形态）。计算结果表明，当桨叶经过高伴流区时，空泡经历了从导边初生、向叶梢生长并在梢部形成梢涡空泡，之后空泡体积逐渐由叶根方向向叶梢方向收缩，直至在下游溃灭。这与实验[7-8]观察到的发展过程一致。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由于空化现象物理机制复杂，蒸发和凝结率公式中的经验参数通常没有确定的取值，在不同的研究中往往各有不同。我们选择了多组Kunz空化模型中表征蒸发率的Cv和凝结率的Cc参数值进行计算。

表征蒸发率的参数 Cv=100000 时，凝结率参数 Cc 分别取 100 和 10000 的空泡形态对比如图 所示。两组空泡形态基本相同，这能够从宏观形态角度，说明在一定范围内，蒸发率和凝结率参数调整对空泡形态影响不大。

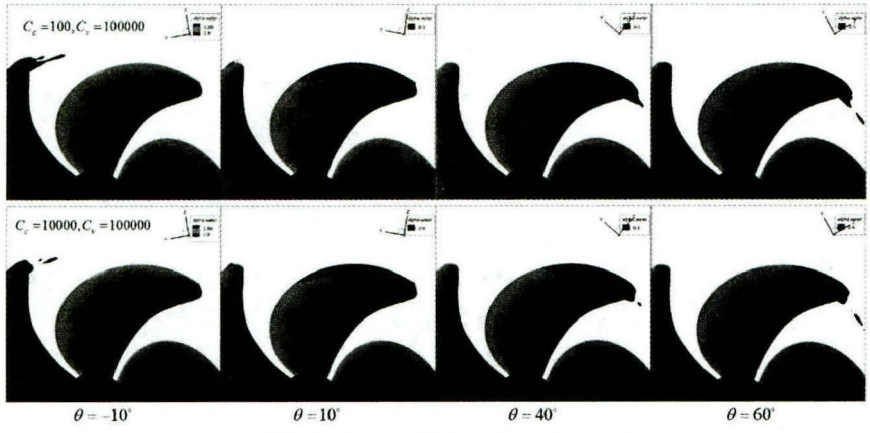

图 6　数值模拟非定常空泡形态对比

为了进一步分析对细节的影响，我们通过对比固定空间测点的压力脉动幅值变化，来分析其影响规律。压力测点位置如的图 5 所示。

采用无量纲测点压力值 $K_p = S_b \frac{p}{\rho n^2 D^2}$ 进行对比，通过做快速傅里叶变换 FFT 处理，即可得到各阶主叶频（主叶频等于叶数乘以转动频率）压力脉动幅值并用 ∇K_p 表示。Cv 取 100000 情况下，一阶主叶频压力幅值随凝结率经验参数变化如图 7 所示，在 Cc（50,500）区间内时波动很大，之后变化趋于平缓；二阶和三节主叶频压力幅值如图 8、9 所示，变化趋势虽有所不同，但波动和平缓区间基本一致。

对于空泡形态，$\theta=40^\circ$ 时刻即最大空泡的空泡体积随 Cc 变化如图 10 所示，其变化区间与压力也比较接近，敏感区间位于 Cc（50，500）。

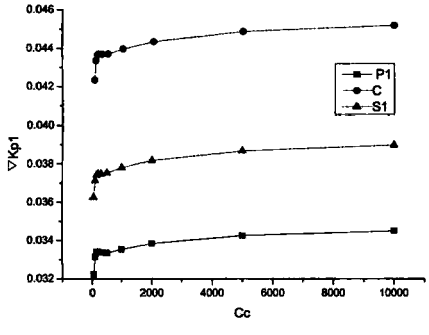

图 7 凝结率对一阶主叶频压力脉动幅值影响

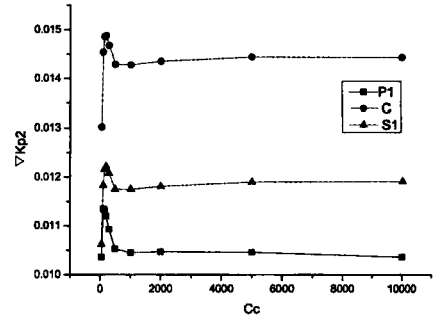

图 8 凝结率对二阶主叶频压力脉动幅值影响

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

另外，为保证空泡形态发展与实验一致，要求蒸发率参数 Cv 远大于凝结率参数 Cc。Cc 取 100 时，在 Cv（10000,1000000）区间内，各阶压力脉动幅值以及空泡体积都随 Cv 增大而缓慢增大，Cv 改变产生的影响相对较小。

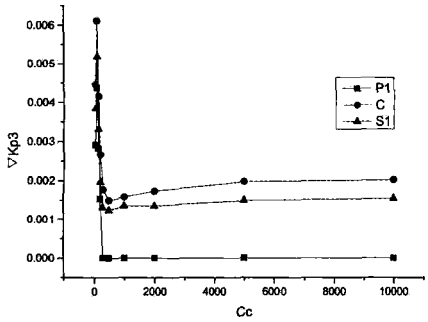

图 9 凝结率对三阶主叶频压力脉动幅值影响

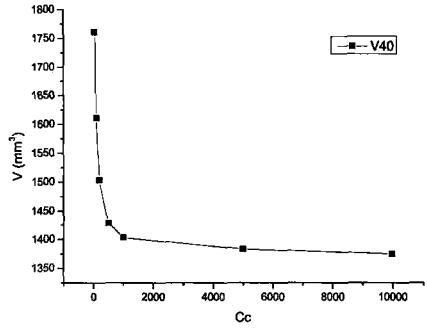

图 10 凝结率对空泡体积影响

5 总结与讨论

本文采用基于 OpenFOAM 和 LES 大涡模拟方法，结合 VOF(Volume of Fluid)多相流模型和 Kunz 空化模型，数值模拟非均匀伴流场中螺旋桨的空泡演变过程。

通过多组蒸发率与凝结率取值计算，发现该问题中凝结率参数 Cc 对压力脉动以及空泡体积影响敏感区域为（50,500），大于 500 时凝结率参数影响较小。

参 考 文 献

1 Watanabe T, et al. Simulation of steady and unsteady cavitation on a marine propeller using a RANS CFD code. Proceedings of the Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, 2003.

2 Ji, Bin, Luo Xianwu, Wang Xin, et al. Unsteady Numerical Simulation of Cavitating Turbulent Flow Around a Highly Skewed Model Marine Propeller. Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(1): 011102.

3 Ji, Bin, Luo Xianwu, Peng Xiaoxing, et al. Numerical analysis of cavitation evolution and excited pressure fluctuation around a propeller in non-uniform wake. International Journal of Multiphase Flow, 2012, 43: 13-21.

4 Wang G, and Ostoja-Starzewski M. Large eddy simulation of a sheet/cloud cavitation on a NACA0015 hydrofoil. Applied mathematical modelling, 2007, 31(3): 417-447.

5 Ji B, Luo X W, Arndt Roger E A, et al. Large Eddy Simulation and theoretical investigations of the transient cavitating vortical flow structure around a NACA66 hydrofoil. International Journal of

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Multiphase Flow, 2015. 68: 121-134.

6 LIU De-min, LIU Shu-hong, WU Yu-lin, XU Hong-yuan. LES numerical simulation of cavitation bubble shedding on ALE 25 and ALE 15 hydrofoils. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2009, 21(6): 807-813.

7 Kurobe Y, Ukon Y, Koyama K, et al. Measurement of Cavity Volume and Pressure Fluctuations on a Model of the Training Ship. SEIUN-MARU" With Reference to Full Scale Measurement," Ship Research Institute, Technique Report No.(NAID) 110007663078, 1983.

8 B.Della Loggia, O.Rutgersson. Session 1a On Full Scale Measurements. ITTC84, 1984: 319-342.

9 Yu XX, Huang CG, Du TZ, et al. Study of Characteristics of Cloud Cavity Around Axisymmetric Projectile by Large Eddy Simulation[J]. JOURNAL OF FLUIDS ENGINEERING-TRANSACTIONS OF THE ASME, 2014, 136(5): 51303.

Study on cavitation model parameters of cavitation flow around a propeller in non-uniform wake base on large eddy simulations

YU Chao, WANG Yi-wei, HUANG Chen-guang, DU Te-zhuan, WU Xiao-cui

(Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling System, Institute of mechanics, Chinese academy of sciences, Beijing, 100190.

Email: yuchao@imech.ac.cn)

Abstract: The evolution of the unsteady cavitation and the pressure fluctuations around the propeller in the non-uniform flow is a classic issue of the hydrodynamic field In the present paper numerical simulations of cavitation flow around the propeller were performed based on solving Navier–Stokes equations with large eddy simulation approach, Kunz cavitation model, VOF (Volume of Fluid) method and a moving mesh scheme. Furthermore, comparisons of the cavity volume and pressure pulsation characteristics under different evaporation rate and condensation rate coefficient are analyzed to obtain the influence and sensitive range of cavitation model parameters.

Key words: Highly Skewed Propeller ; Large Eddy Simulation; Cavitation; Evaporation rate; Condensation rate.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net