

螺旋桨敞水性能数值预报

何东亚，万德成*

(上海交通大学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)

摘要: 螺旋桨粘性尾流场的数值模拟和敞水性能预报是船舶快速性、节能减排, 减振降噪等问题的重要研究内容。本文应用基于开源平台 OpenFOAM 开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 利用重叠网格技术, 在保持 DTMB4119 螺旋桨转速不变的情况下, 通过改变来流速度来改变进速系数, 预报了螺旋桨在不同进速系数下的推力和扭矩。结果表明, 在进速系数小于等于设计值时, 计算值和试验值吻合比较好, 并可以清晰地捕捉到梢涡和毂涡的生成和耗散, 压力在吸力面和压力面的分布特点等流场特性。

关键词: DTMB4119; 重叠网格技术; 螺旋桨敞水性能; CFD

Numerical prediction of propeller's open water performance

He Dongya, Wan Decheng*

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240)

Abstract: The numerical simulation of propeller's viscous wake flow and prediction on its open-water performance plays an important role in ship speed and resistance, energy conservation and emission reduction, noise reduction, etc. This paper is based on CFD solver naoe-FOAM-SJTU with overset technology to resolve problems of naval architecture and ocean engineering, which is developed from open source toolbox openFOAM. Propeller's thrust and torque are obtained at different inlet velocity coefficient (J). It needs to mention that J is changed with different inlet velocity while keeping revolving speed constant. The final data suggest that computational results agree well with measurements when J is not beyond design value. Meanwhile, the generation and dissipation of tip and hub vortex is simulated well, and pressure is distributed reasonably on propeller's suction and pressure surfaces.

Keywords: DTMB4119, overset technology, propeller open water performance, CFD

作为船舶主要的推进器，螺旋桨的粘性尾流场是高度复杂的三维流动。为了获得其敞水性能，敞水试验是主要的研究方法，虽然这种方法可靠性高，但成本高，周期长，很难捕捉到细节流场。为了弥补这一缺陷，很多学者采用势流的方法，如升力面理论，面元法等。该方法计算效率高，可以获得相对准确的水动力系数，但忽略了流体粘性和旋度的影响，因而无法准确地预报桨叶边界层，螺旋桨尾流场结构等真实情况下的流场特性，同时无法计及尺度效应的影响。

随着计算机性能和数值方法的提高，通过求解 RANS 方程来获取粘性流场全场信息的 CFD 方法得到越来越多的应用。高富东^[1]基于 CFD 方法，通过求解 RANS 方程和雷诺应力封闭模型，数值模拟了 DTMB4119 螺旋桨的敞水性能，得到了不同进速系数下的推力系数和扭矩系数，螺旋桨粘性流动所特有的流动分离，梢涡与毂涡的形成与耗散等重要的流场信息，预报值与试验值吻合较好。顾铨璋^[2]运用 CFD 方法预报了船用螺旋桨在不同螺距下螺旋桨推力系数，扭矩系数和表面压力系数及尾流场的变化。吴建威等^[3]分别采用多重坐标参考系法 (MRF)，任意网格界面元法 (AMI) 和重叠网格方法 (OVERSET) 对某一 4 叶螺旋桨的敞水性能进行数值模拟，并通过与试验结果和不同方法间结果的比较，验证了三种 CFD 方法模拟螺旋桨敞水性能的可靠性和有效性，并总结了各方法的优劣。

本文将基于拥有重叠网格技术的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU，通过求解 RANS 方程，预报标模 DTMB4119 螺旋桨在不同进速系数下的水动力性能及尾流场信息。

1 数值方法

1.1 控制方程

对于粘性不可压流体，本文采用的质量守恒方程和动量守恒方程如下：

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

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

式中， \mathbf{U} 和 \mathbf{U}_g 分别表示流场速度和网格节点速度。 $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ 为流场动压力，等于总压力减去静水压力， \mathbf{g} 、 ρ 、 μ 分别为重力加速度、流体的密度和动力粘性系数。

本文采用 *SST k- ω* 湍流模型，该湍流模型考虑了湍流剪应力的输运特性，能够准确的预报由于逆压梯度导致的流动分离，同时，速度和压力的耦合采用 PIMPLE 算法求解。时间步取为 5E-4s。

1.2 重叠网格技术

重叠网格方法是将物体的每个部件单独划分网格，然后再嵌入到另一套网格之中，在经过挖洞处理后，非计算域的网格会被排除在计算之外。网格重叠区域可以通过建立插值关系相互传递流场信息。重叠网格技术允许多个相互独立的网格之间产生无拘束的相对运动，因此它可以很好地处理 6 自由度的相对运动问题。

重叠网格间插值关系的建立是由 Sugar^[4]程序计算而得的 DCI 数据来实现的。此程序分为四步。第一步是洞单元的搜寻，也称挖洞。Sugar 程序基于八叉树算法，将计算域之外的网格标记为洞单元并排除在计算之外。第二步是在第二套网格中为某一套网格的插值边界单元搜寻足够多的贡献单元，为插值边界单元提供插值信息。第三步则是求解每一组插值边界单元和贡献单元的插值系数。通过对这些单元的物理值和对应插值系数进行加权求和，最

终完成插值。

$$\phi_I = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \phi_i \quad (3)$$

式中， ϕ 是任意流场信息，如流场速度，压力等； ω_i 是第 i 个贡献单元的插值系数；

ϕ_i 是第 i 个贡献单元的流场信息值； ϕ_I 是插值边界单元的对应值。另外，插值系数必须无因次化，并满足条件

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (4)$$

最后一步是对重叠区域进行优化，寻找到匹配最佳的贡献单元和插值边界单元组合，以提高插值精度。示意图如图 1 所示。

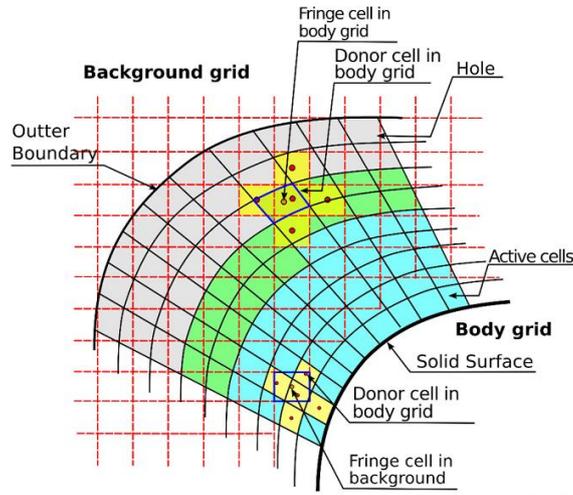


图 1 重叠网格示意图

Fig.1 Diagram of overset grid

2 计算模型

2.1 模型及工况

DTMB4119 是一种无侧斜无后倾分布的三叶螺旋桨，被 ITTC 选为考证数值方法预报精度的标准模型。桨叶直径为 304.8mm，盘面比为 0.6，剖面为 NACA-66(mod)，攻角 0.8，毂径比为 0.2。螺旋桨转速为 10r/s，桨的具体参数见表 1，JESSUP^[5]的博士论文提供了桨模信息及试验数据。

表 1 DTMB4119 桨叶参数

Table 1. Parameters of DTMB4119

r/R	P/D	纵斜角	侧斜角	C(r)/D	t ₀ /C(r)	f ₀ /C(r)
0.20	1.105	0.000	0.000	0.3200	0.2055	0.0143
0.30	1.102	0.000	0.000	0.3635	0.1553	0.0232
0.40	1.098	0.000	0.000	0.4048	0.1180	0.0230
0.50	1.093	0.000	0.000	0.4392	0.0902	0.0218

0.60	1.088	0.000	0.000	0.4610	0.0696	0.0207
0.70	1.084	0.000	0.000	0.4622	0.0542	0.0200
0.80	1.081	0.000	0.000	0.4347	0.0421	0.0197
0.90	1.079	0.000	0.000	0.3613	0.0332	0.0182
0.95	1.077	0.000	0.000	0.2775	0.0323	0.0162
1.00	1.075	0.000	0.000	0.0050	0.0316	0.0117

根据螺旋桨投影理论^[6], 可得将叶切面二维坐标转化为三维空间坐标的公式为

$$x_{\perp}(r) = x_m(r) + C(r)(s - 0.5) \sin \varphi(r) - (f(s) + t(s)) \cos \varphi(r) \quad (5)$$

$$\theta_{\perp}(r) = \theta_m(r) + C(r)(s - 0.5) \frac{\cos \varphi(r)}{r} + (f(s) + t(s)) \frac{\sin \varphi(r)}{r} \quad (6)$$

$$y_{\perp}(r) = r \cos \theta_{\perp}(r) \quad (7)$$

$$x_{\perp}(r) = r \sin \theta_{\perp}(r) \quad (8)$$

$$x_{\top}(r) = x_m(r) + C(r)(s - 0.5) \sin \varphi(r) - (f(s) - t(s)) \cos \varphi(r) \quad (9)$$

$$\theta_{\top}(r) = \theta_m(r) + C(r)(s - 0.5) \frac{\cos \varphi(r)}{r} + (f(s) - t(s)) \frac{\sin \varphi(r)}{r} \quad (10)$$

$$y_{\top}(r) = r \cos \theta_{\top}(r) \quad (11)$$

$$z_{\top}(r) = r \sin \theta_{\top}(r) \quad (12)$$

式中, “上” “下” 代表叶切面上下两边, $f(s)$ 为翼型上各型值点相对参考点的纵坐标,

$t(s)$ 为拱度。将得到的桨叶全局三维坐标导入 CATIA 建出的模型如图 2、图 3。

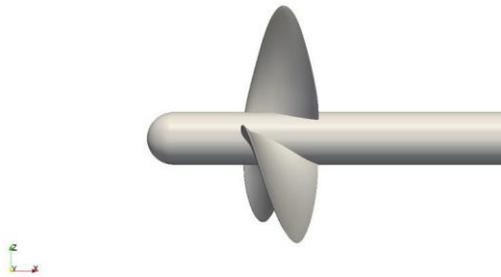


图 2 侧视图

Fig.2 Side view

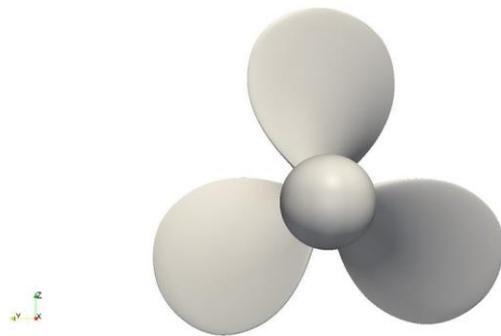


图 3 正视图

Fig.3 Front view

计算工况为在转速 rps 等于 10 不变的条件下, 通过改变进流速度, 计算螺旋桨在 J 为 0.5、0.6、0.7、0.833、0.9 下的水动力性能。

2.2 计算网格

大的背景网格由 OpenFOAM 自带的网格生成工具 blockMesh 生成，螺旋桨网格先由 blockMesh 生成背景网格，再利用 snappyHexMesh 从螺旋桨模型 STL 文件生成六面体及多面体网格，网格依靠迭代，将一个初始网格细化，并将细化后的网格变形以依附于螺旋桨表面。计算网格如图 3、图 4 所示，大的背景网格计算域为 $-1D \leq x \leq 4.66D$, $-2.34 \leq y \leq 2.34D$, $-2.34 \leq z \leq 2.34D$ ，包围螺旋桨的小计算域为 $-0.935D \leq x \leq 4.66D$, $-1.12 \leq y \leq 1.12D$, $-1.12 \leq z \leq 1.12D$ 。经过试算，发现 $yplus$ 等于 40 时结果最好。

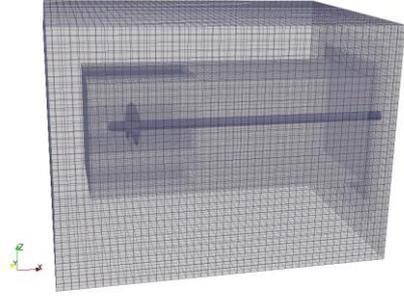


图 4 计算域网格
Fig.4 Grid of computational region

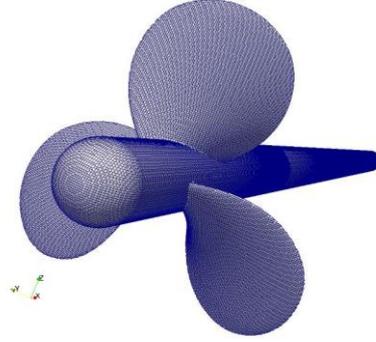


图 5 螺旋桨网格
Fig.5 Grid of propeller

2.3 边界条件

上下前后四个面命名为 farfield, $U = 0, \frac{\partial p}{\partial n} = 0$ ；速度入口处, $U = \text{进速}, \frac{\partial p}{\partial n} = 0$ ；速度出口处, $p = 0, \frac{\partial U}{\partial n} = 0$ ，螺旋桨定义为不可滑移边界条件。

2.4 网格收敛性验证

在进行多个工况计算之前，先选取 $J=0.833$ 时进行网格收敛性验证。网格收敛性验证包括不同进速系数 J 下的推力系数 K_T 、 K_Q 和敞水效率 η_0 ，这些系数定义如下：

$$J = \frac{U}{nD} \quad (13)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (14)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (15)$$

$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (16)$$

网格收敛性结果见表 2。

表 2 网格收敛性验证计算结果

Table 2 Computational results by three types of grid

	K_T	误差	$10K_Q$	误差	网格量(百万)
粗网格	0.2140	6.80%	0.3870	7.50%	1.30
中等网格	0.2092	4.62%	0.3794	5.38%	2.33
细网格	0.2088	4.39%	0.3882	5.06%	3.63
试验值 ^[5]	0.2000	-	0.3600	-	-

根据以上结果，为保证计算精度又兼顾计算效率，所有算例均采用中等网格。

3 计算结果与分析

3.1 敞水性能计算结果与分析

不同进速系数下的计算结果列于表 3 中。

表 3 DTMB4119 不同进速系数下的预报结果

Table 3 Prediction of DTMB4119's open water performance at different J

J	K_T (CFD)	K_T (EFD)	误差	$10K_Q$ (CFD)	$10K_Q$ (EFD)	误差	η (CFD)	η (EFD)	误差
0.500	0.303	0.285	6.3%	0.494	0.477	3.6%	0.488	0.475	2.7%
0.600	0.256	0.245	4.6%	0.437	0.410	6.6%	0.560	0.571	-1.9%
0.700	0.209	0.200	4.6%	0.379	0.360	5.4%	0.614	0.619	-0.7%
0.833	0.147	0.146	0.9%	0.296	0.280	5.6%	0.657	0.691	-5%
0.900	0.116	0.120	-3.3%	0.254	0.239	6.4%	0.653	0.719	-9.1%
1.100	0.025	0.034	-27.8%	0.112	0.106	5.3%	0.385	0.562	-31.4%

由上表可知，除进速系数 J 等于 1.1 外，各进速系数下的推力系数误差均在 7% 以内，在 J 小于 0.833 时，数值预报的 K_T 略大于试验值，且随着进速系数的增大，误差逐渐降低，至 J 等于 0.833 时，误差为 0.009，之后随着进速系数的增加，推力系数逐渐低于试验值，并在 J 等于 1.1 时，误差增大至 11.3%。而 $10K_Q$ 误差均在 7% 以内，略大于试验值。推力值和扭矩值均随着进速系数的增加而降低。同时，在进速系数小于设计进速系数 0.833 时，效率曲线与试验值均吻合较好，但当 J 大于 0.833 时，误差开始增大。造成 J 等于 1.1 时计算误差较大的原因一是在大进速工况下，桨叶切面的攻角较小，因为受网格量和计算湍流模型的限制，没有正确捕捉流场。二是此时推力系数和扭矩系数本身很小，所以导致相对误差增大。

为了直观比较，作敞水性征曲线于图 6

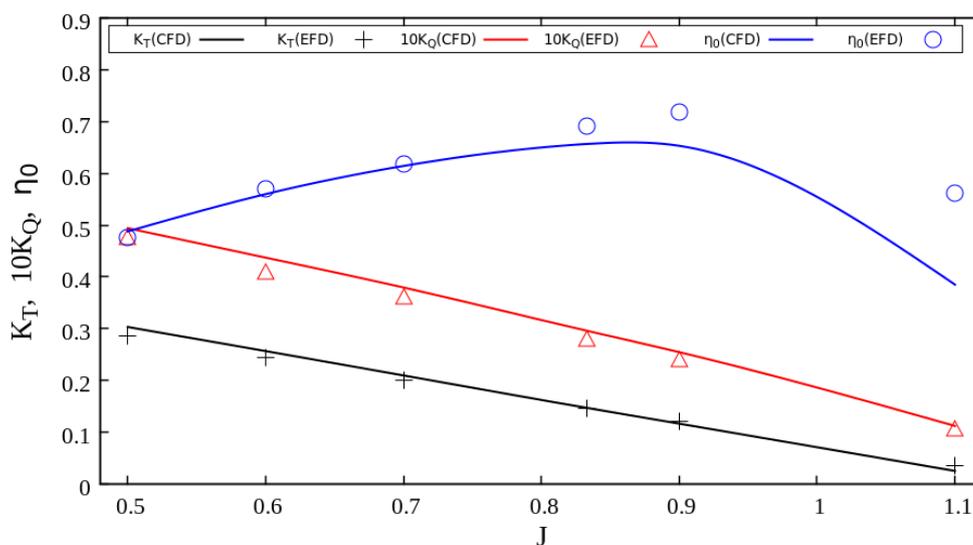


图 6 DTMB4119 敞水性征曲线
Fig.6 Open water curves of DTMB4119

3.2 螺旋桨压力云图及尾流场涡结构图

本文列举了进速系数为 0.6、0.7、0.9 时的压力云图。如图 6、图 7、图 8 所示。在同一进速系数下，正压峰值处于导边的压力面处，负压峰值出现在导边吸力面处，正是此压差提供了螺旋桨的推力。吸力面上的逆压梯度将造成流体的分离。同时，随着进速系数的提高，桨叶正压力和负压力都将减小。

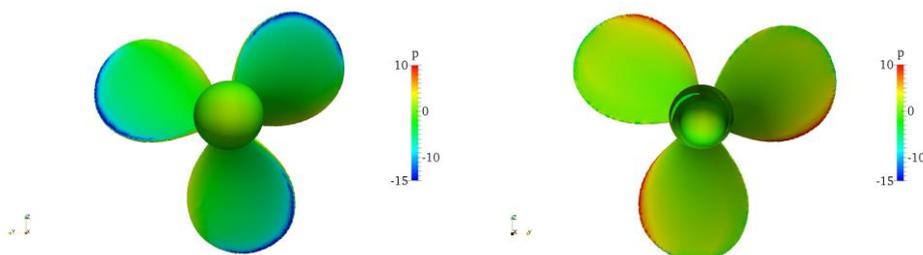


图 7 J=0.6 时吸力面、压力面压力分布
Fig.7 Pressure distribution on suction and pressure side at J=0.6

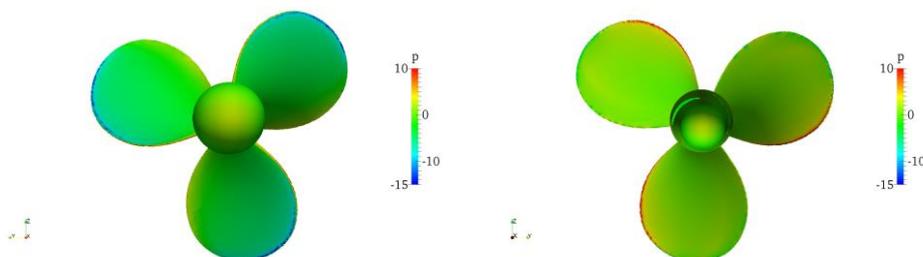


图 8 J=0.7 时吸力面、压力面压力分布
Fig.8 Pressure distribution on suction and pressure side at J=0.7

and pressure side at J=0.7

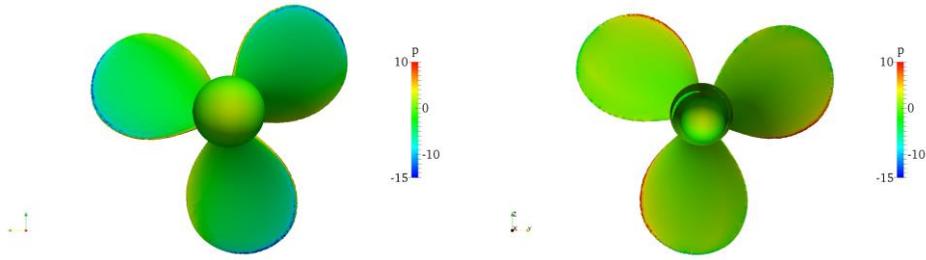


图9 J=0.9 时吸力面、压力面压力分布

Fig.9 Pressure distribution on suction and pressure side at J=0.9

CFD 方法的优势是可以获得螺旋桨详细的尾流场的信息，如图 9、图 10、图 11 所示， U_X 指速度沿 X 方向的分量，U 指流场的进速。可以看出毂涡量受进速系数的影响很大，并随之减小。并且，进流系数越大，桨后流场的速度被加速的越大，桨所受的载荷也越大。

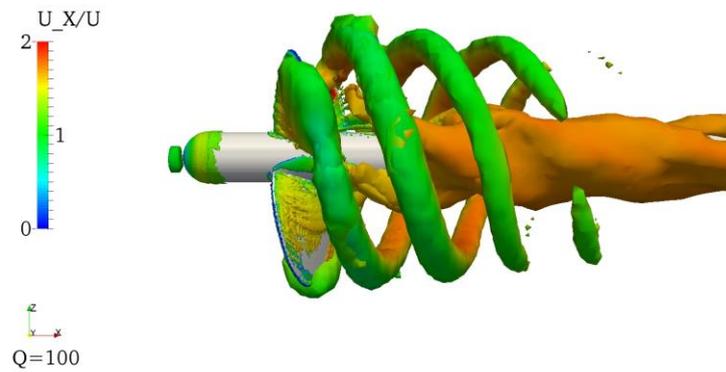


图 10 J=0.6 时涡结构图

Fig.10 Vortex structure at J=0.6

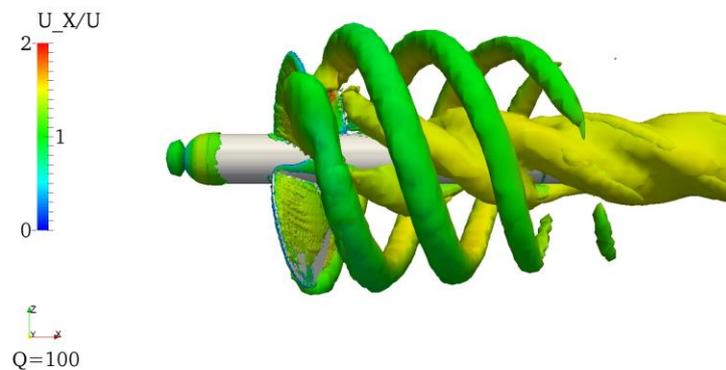


图 11 J=0.7 时涡结构图

Fig.11 Vortex structure at J=0.7

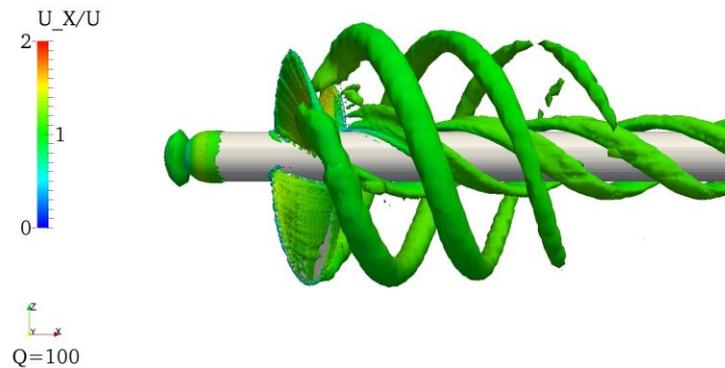


图 12 J=0.9 时涡结构图

Fig.12 Vortex structure at J=0.9

4 结论

本文根据螺旋桨投影理论，基于坐标变换法，最终得到了 DTMB4119 标模，并应用 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU，计算了螺旋桨在不同进速系数下的水动力性能。计算结果表明，在小于等于设计进速系数时，所得结果与试验值吻合均比较好，在大于设计进速系数时，计算结果误差逐渐增大，预报结果符合螺旋桨粘性流场数值模拟的普遍规律。说明本文采用的螺旋桨建模方法及粘性流场数值模拟方法的有效性，为以后深入研究螺旋桨粘性流场和提高敞水性能的预报精度奠定基础。由螺旋桨尾流场，我们可以清晰地看出毂涡和梢涡的形成及耗散，但为了得到更精细的尾流场，我们需要更先进的湍流模型、计算方法以及更大的计算量。

参考文献(References)

- [1] 高富东, 潘存云, 蔡汶珊, 等. 基于 CFD 的螺旋桨敞水性能数值分析与验证[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8):133-139.
Gao Fudong, Pan Cunyun, Cai Wenshan, et al. Numerical analysis and validation of propeller open water performance based on CFD[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(8):133-139.
- [2] 顾铨璋, 郑百林. 船用螺旋桨敞水性能数值分析[J]. 计算机辅助工程, 2011, 20(2):86-89.
Gu Chengzhang, Zheng Bailin. Numerical analysis on open water performance of ship propeller[J]. Computer Aided Engineering, 2011, 20(2):86-89.
- [3] 吴建威, 尹崇宏, 万德成. 基于三种方法的螺旋桨敞水性能数值预报[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2016, 31(2):177-187.
Wu Jianwei, Yin Chonghong, Wan Decheng. Numerical prediction of the propeller open water performance based on three numerical methods[J]. CHINESE JOURNAL OF HYDRODYNAMICS, 2016, 31(2):177-187.
- [4] NAOCK R W. A general capability for moving body overset grid assembly[C]. *In the Proceeding of the 17th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*, Canada, 2005.
- [5] JESSUP S D. An experimental investigation of viscous aspects of propeller[D]. Washington: The Catholic University of America, 1989.
- [6] 王国强, 董世汤. 船舶螺旋桨理论与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.

Wang Guoqiang, Dong Shitang. The theory and application of ship propeller[M]. Harbin:
Harbin Engineering University Press, 2007.