

文章编号:1000-8055(2013)12-2648-07

螺旋桨黏性流场非定常数值模拟

张 刘^{1,2}, 刘李涛², 章荣平², 黄志远²

(1. 中国空气动力研究与发展中心 空气动力学国家重点实验室, 四川 绵阳 621000;

2. 中国空气动力研究与发展中心 低速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 基于多块结构滑移网格, 采用多参考系模型(MFR), 对某六叶螺旋桨黏性流场进行了非定常数值模拟. 分别建立包围螺旋桨的旋转区域和螺旋桨以外的静止区域, 很好地解决了螺旋桨的相对旋转问题. 计算结果与实验结果吻合良好, 验证了计算方法的正确性. 对前进比为 0.90 和 0.75 情况下的桨后复杂流场进行分析, 得到了螺旋桨尾涡的一些静态和动态特征, 螺旋桨尾涡中包含正负两层, 与实验观察到的现象一致. 获得了螺旋桨对桨后轴向速度分布的影响规律: 螺旋桨对桨叶 45% 和 70% 半径处轴向速度增加远大于 90% 半径处轴向速度; 随前进比减小, 该区域内轴向速度继续增加, 90% 半径处轴向速度几乎不变.

关 键 词: 螺旋桨; 黏性流场; 非定常; 尾流场结构; 轴向速度

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Unsteady numerical simulation of the viscous flow fields of the propeller

ZHANG Liu^{1,2}, LIU Li-tao², ZHANG Rong-ping², HUANG Zhi-yuan²

(1. State Key Laboratory of Aerodynamics,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;

2. Low Speed Aerodynamics Research Institute,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: The viscous flow fields of a propeller with six blades have been numerically simulated with unsteady N-S equations based on structured sliding grids of multiple blocks. The rotational subzone containing the propeller and the stationary subzone was constructed separately based on MFR (multiple frames of reference), proving this is an effective approach to resolve the problems involving relative rotation of the propeller. The data of the calculation and the experiment agreed very well and proved that the method had good accuracy to simulate the fluids of a propeller. Then the complicated flow fields behind the propeller with advanced ratio of 0.90 and 0.75 were analyzed, and the static and dynamic features of the propeller trailing vortex the same as the phenomenon in the test were achieved: two opposite layers were incorporated into the propeller trailing vortex. The rules influenced by the propeller on the axial velocity were obtained: the increase of the income flow velocity in the area of 45% and 70% of the radius of the blade after the propeller is larger than the area of 90% of the radius; with the decrease of the advance ratio, the axial velocity still increases, and the area of the 90% of the radius almost keep unchanged.

收稿日期: 2013-04-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20131111.1602.002.html>

基金项目: 空气动力学重点实验室基金(JBKY13010303)

作者简介: 张刘(1986—), 男, 安徽阜阳人, 助理工程师, 硕士, 主要从事螺旋桨数值计算和低速风洞实验研究.

E-mail: lzh2607@126.com

Key words: propeller; viscous flow fields; unsteady; structure of the wake field; axis velocity

螺旋桨发动机具有低速飞行时拉力大、推进效率高、经济性好等特点,使得其在运输机领域有着不可替代的地位^[1].但螺旋桨高速旋转后的三维非定常流场结构复杂,梢涡、尾涡的高频脉动,采用传统的流场测量手段如皮托管等已无法满足要求,激光多普勒测速仪和 PIV (particle image velocimetry) 技术为螺旋桨这样的旋转机械流场测量提供了先进的测量工具^[2-7],但其时间长、费用高,且无法满足工程中大量使用要求.

随着计算技术和计算机水平的不断提高,计算流体动力学(CFD)得到了很大的发展,人们开始使用 CFD 方法来对螺旋桨流场进行数值模拟,常用的方法是基于动量理论的作用盘/激励盘模型^[8-10],这种方法简单,不考虑空间流动结构,无法提供螺旋桨非定常流场细节.文献[11-14]对螺旋桨数值模拟方法进行了大量的研究,但对螺旋桨尾流场特征及桨后速度分布规律等关注较少.

本文基于多块结构滑移网格,采用有限体积法离散求解三维雷诺平均 N-S 方程对某六叶螺旋桨非定常流场进行黏性数值模拟,获得了螺旋桨的拉力系数和扭矩系数、螺旋桨的非定常流动特征及螺旋桨对桨后轴向速度分布的影响规律.

1 模型及网格

计算采用某六叶螺旋桨,桨的直径为 4 m,毂径比为 0.2,从桨根到桨尖存在 30°的非线性几何扭转. x 轴为旋转轴,正向与来流方向相同, yOz 平面为旋转平面.沿 x 轴正向看,螺旋桨是顺时针旋转的.该螺旋桨在风洞中进行了大量的单桨带动力测力实验,实验数据比较全面,便于开展分析研究.实验模型为缩比状态,缩比为 1:6.计算与实验采用相同缩比模型,图 1 为螺旋桨计算模型.

采用 MRF,在流场中分别建立包围螺旋桨的旋转区域和静止区域,两个区域的交接处设立交界面.分别对两个区域进行数值求解,通过交界面传递旋转区域和静止区域之间的流场信息,很好地解决了螺旋桨旋转和桨毂等静止的问题.

采用多块结构网格分别对旋转区域和静止区域进行网格剖分,两者交接处定义为滑移网格交界面.在桨叶表面利用 O 型网格进行附面层网格生成.模型周期对称,仅对一个桨叶叶片进行网格

剖分,旋转即可得到六叶螺旋桨的网格,图 2 为单桨网格拓扑结构.对螺旋桨的旋转区和尾流区进行了适当的网格加密,以捕捉局部复杂流动,图 3 为螺旋桨表面及空间网格分布.旋转区域有 380 万网格单元,静止区域有 170 万网格单元,全流场有 550 万网格单元.

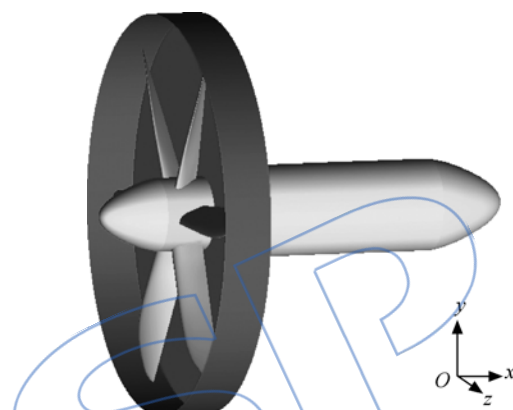


图 1 螺旋桨计算模型

Fig. 1 Calculation model of propeller

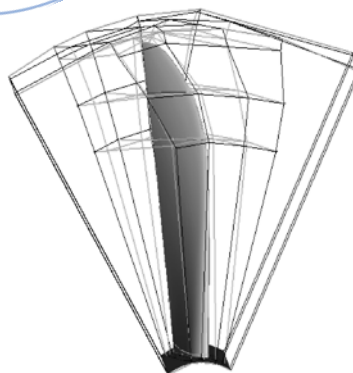
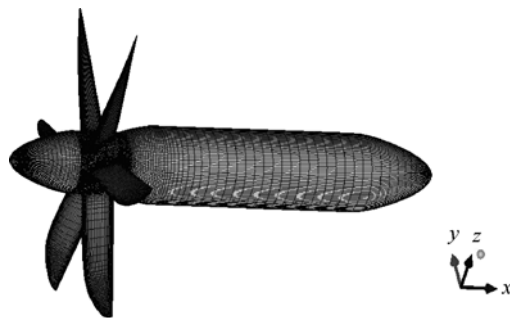
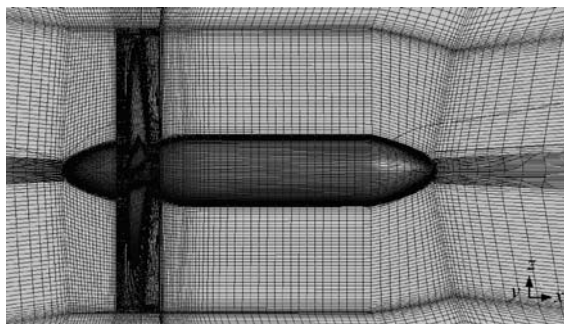


图 2 单桨拓扑结构

Fig. 2 Topology of single blade



(a) 表面网格分布



(b) 空间剖面网格分布

图3 螺旋桨表面及空间剖面网格

Fig. 3 Surface mesh and spatial section mesh of propeller

2 计算方法及计算状态

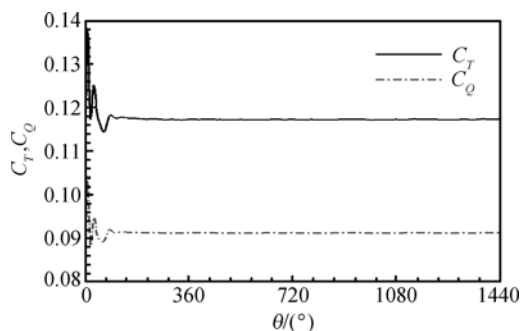
2.1 计算方法

通过求解三维雷诺平均 N-S 方程,对流动场进行非定常数值模拟. 积分形式控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} Q dV + \iint_{\partial\Omega} F(Q) \cdot n dS = \iint_{\partial\Omega} G(Q) \cdot n dS \quad (1)$$

式(1)中各个变量的定义见参考文献[15]. 采用格心格式的有限体积法对控制方程进行离散,空间离散格式为2阶精度的迎风格式,时间推进方式采用 LU-SGS (lower-upper symmetric Gauss-Seidel) 隐式时间推进算法,采用全湍假设,两方程 $k-\omega$ SST (shear-stress-transport) 湍流模型.

非定常计算耗时较长,为了加快收敛,首先对定常状态进行计算,用定常计算结果作为非定常计算的初值,螺旋桨叶片旋转3周,气动力已完全收敛. 图4为 $\lambda=0.90$ 时单桨叶片拉力系数

图4 $\lambda=0.90$ 时单桨叶片拉力系数和扭矩系数的收敛曲线Fig. 4 Convergence curves of the thrust coefficient and the torque coefficient of single blade at $\lambda=0.90$

和扭矩系数的收敛曲线,横坐标为桨叶旋转扫过的角度,纵坐标为无量纲的拉力系数和扭矩系数.

2.2 计算状态

计算了螺旋桨在不同前进比时的气动性能. 自由来流速度为 35 m/s ,方向与旋转轴相同,螺旋桨计算状态如表1. 螺旋桨转速可由式(2)计算得到.

$$\lambda = \frac{V}{nD} \quad (2)$$

表1 螺旋桨计算状态

Table 1 Propeller conditions of calculation

前进比 λ	自由来流速度 $V/(\text{m/s})$	转速 $n/(\text{r/min})$
0.90	35	3500
0.75	35	4200
0.70	35	4500
0.63	35	5000

3 结果分析

3.1 气动力分析

对单桨的气动性能进行了数值求解,得到单桨的拉力系数和扭矩系数,拉力系数和扭矩系数均以飞机气动力系数为基准,计算方法如式(3)、式(4).

$$C_T = \frac{2T}{\rho V^2 S} \quad (3)$$

$$C_Q = \frac{2Q}{\rho V^2 S} \quad (4)$$

式(3)、式(4)中, T 为螺旋桨拉力(N); Q 为螺旋桨扭矩($\text{N} \cdot \text{m}$); V 为自由来流速度(m/s); S 为参考面积(m^2); D 为螺旋桨直径(m); ρ 为空气密度(kg/m^3).

为了验证计算方法的正确性,对螺旋桨拉力系数和扭矩系数的计算值与实验测量值进行了对比. 表2和表3分别给出了拉力系数和扭矩系数的计算值与实验值的对比. 由表可见,计算结果与实验结果吻合得很好,说明该计算方法可以很好地模拟螺旋桨的气动性能.

前进比为0.90时,计算得到的拉力系数和扭矩系数均比实验测量值偏小,误差在5%以内. 前进比减小,螺旋桨的拉力系数和扭矩系数增加,计算值与测量值误差减小. 前进比为0.70和0.63时,计算得到的拉力系数、扭矩系数与实验测量值一致,误差在1%以内.

表 2 单桨拉力系数计算值与实验测量值对比

Table 2 Thrust coefficient of single blade comparison between calculation and experiment

前进比 λ	C_T		误差/%
	实验值	计算值	
0.90	0.1156	0.1102	偏小,4.7
0.75	0.1861	0.1829	偏小,1.7
0.70	0.2203	0.2186	偏小,0.7
0.63	0.2818	0.2838	偏大,0.7

表 3 单桨的扭矩系数计算值与实验测量值对比

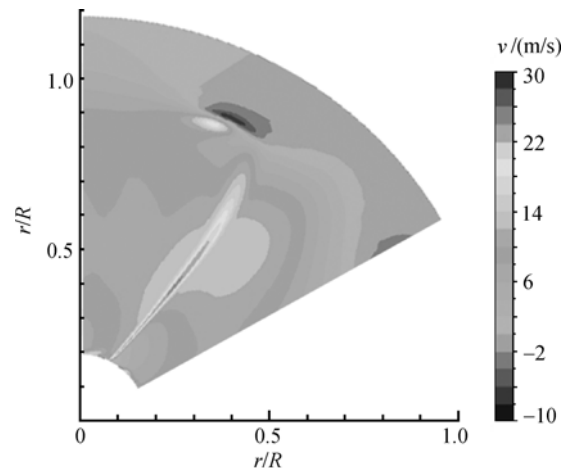
Table 3 Torque coefficient of single blade comparison between calculation and experiment

前进比 λ	C_Q		误差/%
	实验值	计算值	
0.90	0.0911	0.0887	偏小,2.6
0.75	0.1410	0.1386	偏小,1.7
0.70	0.1649	0.1637	偏小,0.7
0.63	0.2093	0.2094	偏大,0.1

3.2 流动结构分析

对前进比为 $\lambda=0.90$ 和 $\lambda=0.75$ 两种情况下的空间流场进行了对比分析。

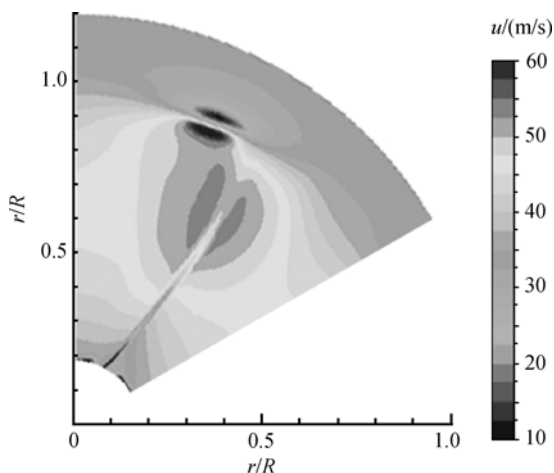
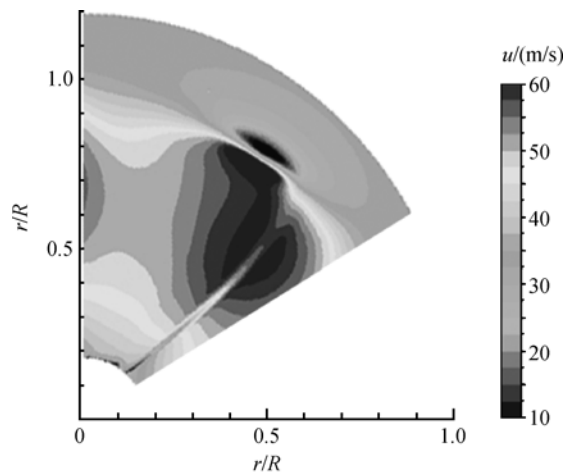
图 5 为 $\lambda=0.90$ 桨后横截面的速度云图,图 5(a)图为桨后横截面螺旋桨轴向速度云图,图 5(b)图为桨后横截面螺旋桨径向速度云图。从图中可以清楚地看到螺旋桨的尾流场结构,整个流场速度梯度清晰,轴向速度云图中存在一条清晰的低速带,由桨轴延伸至梢涡位置,此为尾涡片经

(b) $x/R=0.12$ 截面径向速度 v 图 5 $\lambda=0.90$ 时桨后横截面速度云图Fig. 5 Cross-section velocity contour of blade-back at $\lambda=0.90$

过区域,对应径向速度云图中表现为高速带。这一点与文献[16-17]中描述的现象完全一致。发生突变的速度区域是客观存在的,为沿轴向与螺旋桨一起做旋转运动的尾涡片穿透横截面所致^[17]。图 6 为 $\lambda=0.75$ 桨后横截面的速度云图,从图中可以得到一样的结论。

与图 5 相比,图 6 中轴向速度和径向速度的绝对值更大。说明 $\lambda=0.75$ 情况下,螺旋桨对桨后气流的加速作用和旋转作用更强,量值上表现为拉力系数和扭矩系数增加,这与单桨气动性能随前进比变化规律一致。

图 7 为前进比 $\lambda=0.90$ 时尾流场涡量云图,其中图 7(a)图为中 yOz 平面的 x 方向涡分量云图,显示为正负两块,桨叶内径和外径 x 方向涡方向相反。图 7(b)图为 xOz 平面 y 方向涡量云

(a) $x/R=0.12$ 截面轴向速度 u (a) $x/R=0.12$ 截面轴向速度 u

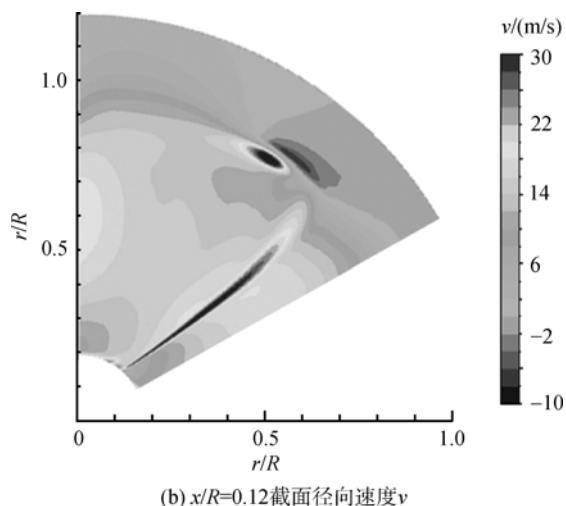
图6 $\lambda=0.75$ 时桨后横截面速度云图

Fig. 6 Cross-section velocity contour of blade-black at $\lambda=0.75$

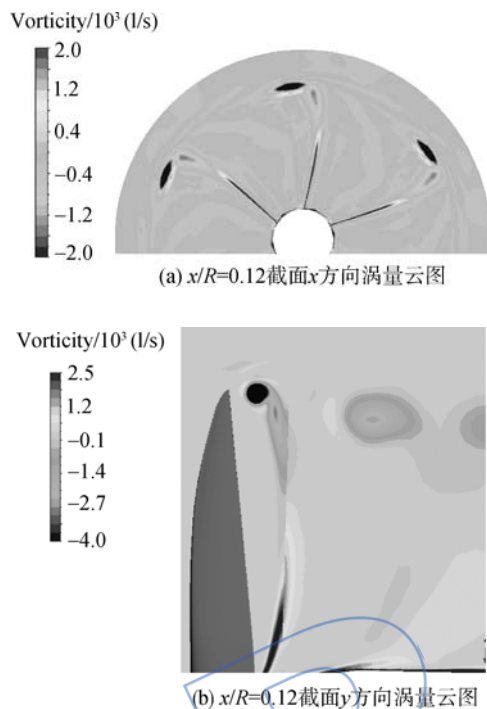
图8 $\lambda=0.75$ 时尾流场涡量云图

Fig. 8 Vorticity contour of wake field at $\lambda=0.75$

涡的强度迅速下降, 涡变得不明显.

3.3 轴向速度分析

图9为前进比 $\lambda=0.90$ 时不同径向位置、不同横截面, 无量纲轴向速度沿周向分布. 横坐标为横截面相位, 纵坐标为无量纲的轴向速度大小. 图9(a)为 $r/R=0.45$ 处的轴向速度分布, 在不同横截面上, 轴向速度沿周向变化很小. $x/R=0.12$ 处, 螺旋桨对桨后气流轴向速度的增加约为25%~35%, 流动向下游发展, 桨后气流的轴向速度增加, $x/R=1.44$ 处, 轴向速度几乎不再变化, 此时桨后轴向速度约为来流速度的1.5倍. 图9(b)为 $r/R=0.70$ 处的轴向速度分布, 在 $x/R=0.12$ 横截面上, 轴向速度在不同相位上变化很大, 变化范围在来流速度的1.3倍至1.55倍之间. 流动向下游发展, 桨后轴向速度增加, 沿周向

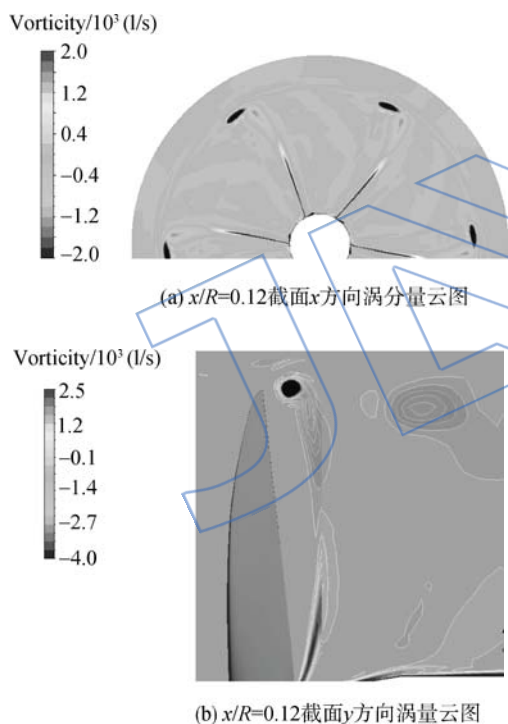
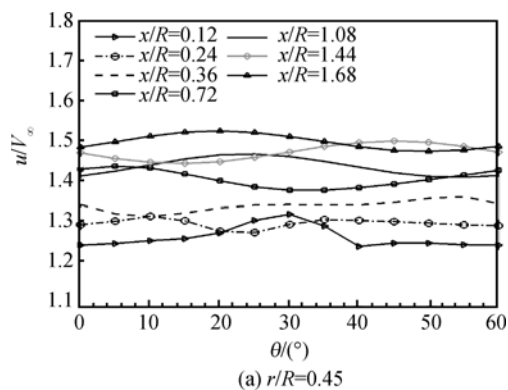
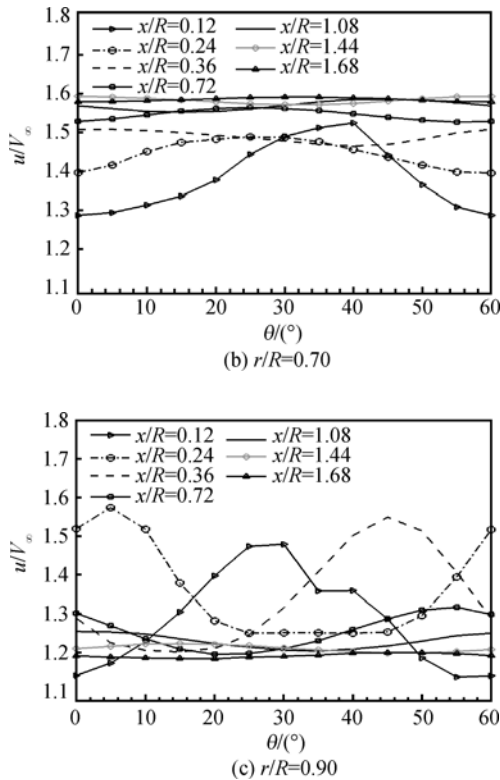
图7 $\lambda=0.90$ 时尾流场涡量云图

Fig. 7 Vorticity contour of wake field at $\lambda=0.90$

图, 同样显示为正负两层, 这主要是由于桨叶边界层的存在, 使得自由涡分成了方向相反的正负两层. 这一点与文献[17]结论相吻合, 正负两层的相对位置与螺旋桨旋转方向有关.

图8为前进比 $\lambda=0.75$ 时尾流场涡量云图. 与图7相比, 图8中的涡量绝对值更大, 说明前进比减小时, 螺旋桨对桨后流场的影响更显著. 从图7(b)和图8(b)可以看出, 随着流动向下游发展,

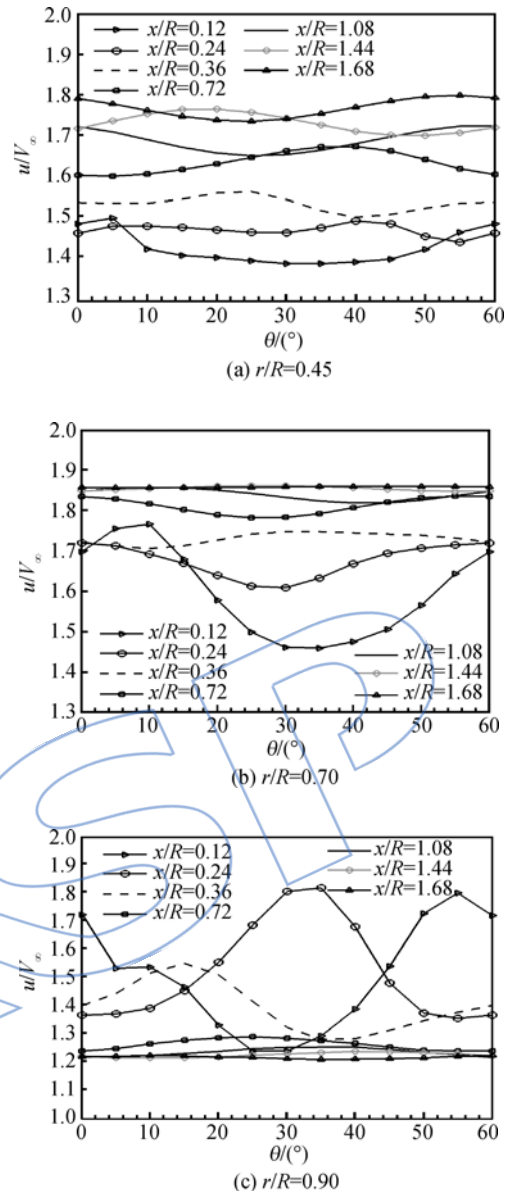
(a) $r/R=0.45$

图 9 $\lambda=0.90$ 时无量纲轴向速度沿周向分布Fig. 9 Dimensionless axial velocity distribution along circumference at $\lambda=0.90$

变化变小, 在 $x/R=0.36$ 处, 轴向速度几乎不再随相位变化, 此时桨后轴向速度约为来流的 1.5 倍. $x/R=1.08$ 处, 轴向速度几乎不再变化, 此时桨后轴向速度约为来流的 1.6 倍. 图 9(c) 为 $r/R=0.90$ 处的轴向速度分布, 在 $x/R=0.12$ 横截面上, 轴向速度在不同相位上变化范围在来流速度的 1.15 倍至 1.5 倍之间. 在 $x/R=0.24$ 横截面上, 轴向速度在不同相位上变化范围在来流速度的 1.25 倍至 1.6 倍之间. $x/R=1.08$ 处, 轴向速度几乎不再随相位变化, 也不随流动向下游发展而变化, 此时桨后轴向速度约为来流的 1.2 倍.

图 10 为前进比 $\lambda=0.75$ 时不同径向位置、不同横截面, 无量纲轴向速度沿周向分布. 从图中可以发现前进比 $\lambda=0.75$ 时无量纲轴向速度的分布与前进比 $\lambda=0.90$ 时的类似, 只是量值上略有不同. $\lambda=0.75$ 时, 45% 半径处, 稳定后的轴向速度约为来流速度的 1.8 倍; 70% 半径处, 稳定后的轴向速度约为来流速度的 1.85 倍; 90% 半径处, 稳定后的轴向速度仅为来流速度的 1.2 倍.

从图 9 和图 10, 我们可以得到 35° 桨叶角螺旋桨尾流场中轴向速度的分布规律: 在相同位置横截面上, 沿径向、轴向速度沿周向波动量逐渐增加, 且随前进比减小, 波动量变大; 桨后 1.68 半径

图 10 $\lambda=0.75$ 时无量纲轴向速度沿周向分布Fig. 10 Dimensionless axial velocity distribution along circumference at $\lambda=0.75$

范围内, 45% 和 70% 半径处, 轴向速度逐渐增加, 90% 半径处, 轴向速度逐渐减小; 轴向速度稳定需要的轴向距离随半径增加而减小; 45% 和 70% 半径处, 螺旋桨对桨后轴向速度增加在 50% 以上, 且随前进比减小, 轴向速度增加, 90% 半径处, 螺旋桨对桨后轴向速度只增加 20%, 且随前进比减小, 几乎不变.

4 结 论

本文基于多块结构滑移网格对某六叶螺旋桨进行了非定常数值模拟, 对比了不同前进比情况下单桨的拉力系数和扭矩系数, 并对螺旋桨的尾流场进行了比较分析, 获得了以下结论:

1) 滑移网格可以有效地处理螺旋桨和桨毂之间的相对旋转问题,计算结果与实验结果吻合较好,说明本文方法对于计算此类相对旋转问题的正确性。

2) 计算获得了有关螺旋桨尾涡的一些静态和动态特征,螺旋桨尾涡中包含正负两层,与实验观察到的现象一致。

3) 随螺旋桨前进比减小,螺旋桨的拉力系数和扭矩系数增加,尾流中的涡强度变大,轴向速度增加。

4) 桨后桨叶 70% 半径以内,螺旋桨对来流速度增加较大,外径处增加较小, $\lambda=0.90$ 时,45% 半径和 70% 半径处轴向速度为来流的 1.5 倍,而 90% 半径处,仅为来流的 1.2 倍。

5) 随前进比减小,桨后内径处轴向速度继续增大,外径处几乎不变, $\lambda=0.75$ 时,45% 半径和 70% 半径处轴向速度为来流的 1.8 倍,而 90% 半径处,仍为来流的 1.2 倍。

综上所述,本文方法可以较为准确地计算单独螺旋桨的气动性能,并可以得到螺旋桨的非定常流场细节,可作为螺旋桨设计和气动性能评估的手段。

参考文献:

- [1] Chandrasekaran B. Method for calculating effects of a propeller on aircraft aerodynamics at subsonic speeds[R]. AIAA 83-1216, 1983.
- [2] 陆林章. 组合式推进器摸底方案流场 LDV 测试报告[R]. 江苏 无锡: 中国船舶科学研究中心科技报告, 2003.
- [3] Chesnakas C, Jessup S. Experimental characterization of propeller tip flow[R]. Washington DC, US: USA 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, 1998.
- [4] Stella A, Guj G, Felice F D, et al. Propeller wake analysis by means of LDV phase sampling techniques[J]. Experiments in Fluids, 2000, 28(1): 1-10.
- [5] Cotroni A, Felice F D, Romanog P, et al. Investigation of the near wake of a propeller using particle image velocimetry [J]. Experiments in Fluids, 2000(suppl.): 227-236.
- [6] Calcagno G, Felice F D, Felli M. Propeller wake analysis behind a ship by stereo PIV[C]//Proceedings of the 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan: Office of Naval Research, 2002: 8-13.
- [7] Lee S J, Paik B G, Yoon J H, et al. Three component velocity field measurements of propeller wake using a stereoscopic PIV technique[J]. Experiments in Fluids, 2004, 36(4): 575-585.
- [8] Whitfield D L, Jameson A. Three dimensional Euler equation simulation of propeller wing interaction in transonic flow[R]. AIAA 83-0286, 1983.
- [9] Zori L A J, Rajagopalan R G. Navier-Stokes calculations of rotor airframe interaction in forward flight[J]. Journal of the American Helicopter Society, 1995, 40(2): 57-67.
- [10] Chffin M S, Berry J D. Helicopter fuselage aerodynamics under a rotor by Navier-Stokes simulation[J]. Journal of the American Helicopter Society, 1997, 42(3): 235-243.
- [11] 李巍, 王国强, 汪蕾. 螺旋桨黏流水动力特性数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(7): 1200-1204.
LI Wei, WANG Guoqiang, WANG Lei. The numerical simulation of hydrodynamics characteristic in propeller [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(7): 1200-1204. (in Chinese)
- [12] 韦喜忠, 黄振宇, 洪方文. 基于非结构网格的螺旋桨周围流场大涡模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(4): 419-425.
WEI Xizhong, HUANG Zhenyu, HONG Fangwen. Large eddy simulation of flowfield about marine propeller on unstructured meshes[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008, 23(4): 419-425. (in Chinese)
- [13] 张营川, 马骏. 螺旋桨旋涡发放数值模拟[J]. 中国舰船研究, 2011, 6(5): 55-60.
ZHANG Yingchuan, MA Jun. Numerical simulation on vortex shedding of propeller[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2011, 6(5): 55-60. (in Chinese)
- [14] 叶金铭, 熊鹰. 螺旋桨尾流场的数值计算方法[J]. 水动力学研究与进展, 2007, 22(2): 188-193.
YE Jinming, XIONG Ying. Numerical computation method of propeller wake field [J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 22(2): 188-193. (in Chinese)
- [15] 陈科甲, 白俊强, 朱军. 发动机短舱对翼身组合体跨音速气动特性影响研究[J]. 航空计算技术, 2010, 40(1): 63-66.
CHEN Kejia, BAI Junqiang, ZHU Jun. Research on transonic aerodynamic performance impact of the engine nacelle[J]. Aeronautical Computing Technique, 2010, 40(1): 63-66. (in Chinese)
- [16] 李广年, 张军, 陈正寿, 等. 基于 PIV 数据的螺旋桨尾涡结构分析[J]. 船舶力学, 2011, 15(10): 1110-1114.
LI Guangnian, ZHANG Jun, CHEN Zhengshou, et al. Propeller trailing vortex analysis based on PIV experimental data[J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(10): 1110-1114. (in Chinese)
- [17] 李广年, 张军, 陆林章, 等. PIV, LDV 在螺旋桨尾流测试中的比对应用[J]. 航空动力学报, 2010, 25(9): 2083-2090.
LI Guangnian, ZHANG Jun, LU Linzhang, et al. Comparative study of PIV and LDV measurements in the wake of a propeller[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(9): 2083-2090. (in Chinese)