

文章编号: 1000 8055(2010)05-1103-07

基于 CFD 技术的螺旋桨气动特性研究

许建华, 宋文萍, 韩忠华, 杨旭东

(西北工业大学 航空学院 翼型/叶栅空气动力学科技重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 通过求解绝对坐标系下的雷诺平均 Navier Stokes 方程数值模拟螺旋桨侧流黏性绕流, 计算螺旋桨非定常气动特性. 为了保证时间精度和提高计算效率, 采用含牛顿型 LU-SGS (lower upper symmetric Gauss-Seidel) 子迭代的全隐式双时间法并引入多重网格技术. 为了描述桨叶的相对运动, 采用运动嵌套网格技术. 对于轴流状态, 计算结果与实验值吻合良好; 对于侧流状态, 与工程算法 1P (once per revolution) 载荷法进行了比较, 验证了方法的有效性. 应用该方法计算螺旋桨在不同来流偏角下的周期性气动特性, 可有效地用于螺旋桨的设计.

关 键 词: 螺旋桨; 侧流状态; Navier Stokes 方程; 运动嵌套网格; 多重网格方法

中图分类号: V211.44

文献标识码: A

Aerodynamic performance research of propellers based on CFD technology

XU Jian-hua, SONG Wen-ping, HAN Zhong-hua, YANG Xu-dong

(The National Key Laboratory of Aerofoil/Foil Grid Aerodynamics,
School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Unsteady compressible Reynolds-averaged Navier-Stokes equations in absolute coordinate system were solved to simulate the flow around propeller for yawing configurations. A moving chimera grid methodology combined with multigrid scheme and a fully implicit dual time stepping method for simulating the viscous flows over propellers were presented. For zero-yaw configurations, the numerical results agreed well with the experimental data; and for yawing configurations, the results were compared with 1P (once per revolution) method. Both cases validate the method. The periodical characteristics of propeller performance at different yaw angles provide a guideline for propeller design.

Key words: propeller; yawing configuration; Navier-Stokes equations;
moving chimera grid; multigrid scheme

目前,螺旋桨气动特性计算的方法主要有:动量理论、叶素理论、动量-叶素理论、儒可夫斯基涡流理论等^[1]. Rankine 最初提出动量理论并由 Froude R E 进行了发展, Froude W 于 1878 年首先提出叶素理论的概念. 动量-叶素理论即这两种理论的结合. 儒可夫斯基在 1912-1915 年发表的 4 篇论文奠定了涡流理论的基础. 在此基础上发

展了升力线和升力面方法,并且在螺旋桨的气动设计中得到广泛应用. 20 世纪 70 年代以来, Sultivan^[2] 和陈泽民, 潘杰元等人^[3], 提出了改进的升力线方法,并在此基础上发展了螺旋的升力面方法(涡格法),通过翼型的升阻特性来进行黏性修正,取得了较好的效果. 西北工业大学的钟伯文, 乔志德等^[4]通过构造虚网格,利用升力线方法中

收稿日期: 2009 04 28; 修订日期: 2009 12 01

基金项目: 国家自然科学基金(90605004)

作者简介: 许建华(1984-),男,浙江衢州人,博士生,主要从事计算流体力学方向研究.

得到的积分公式,发展了一种螺旋桨气动性能计算的升力面计算方法,也取得了较好的结果.这些方法都属于理论分析方法,能够快速地计算螺旋桨轴流状态的气动特性并且具有较高的精度.

螺旋桨在实际工作中,风速方向往往不一定平行于桨毂.了解螺旋桨在侧流状态下的气动特性可以更全面地分析螺旋桨整体气动性能,进而更有效地指导螺旋桨的设计.但是应用上述理论分析方法计算螺旋桨侧流状态气动力的周期性变化是相当困难和复杂的.

螺旋桨侧流状态是完全非定常的,因此本文采用一种改进的含牛顿型 LU-SGS (lower-upper symmetric Gauss Seidel) 子迭代的全隐式双时间法求解绝对坐标系下的雷诺平均 Navier Stokes (N-S) 方程数值模拟螺旋桨侧流黏性绕流,计算螺旋桨侧流状态的气动特性.采用运动嵌套网格技术实现桨叶的相对运动.引入多重网格方法进一步提高计算效率.应用本文方法计算螺旋桨轴流状态下的气动特性,计算结果与实验值吻合良好,初步验证了程序的正确性.在此基础上,研究了来流偏角对螺旋桨气动特性的影响.

1 控制方程

螺旋桨侧流状态是完全的非定常流动,必须对全流场进行非定常计算.因此,采用惯性坐标系下的控制方程

$$\frac{D}{Dt} \iiint dV + \iint \vec{H} \cdot \vec{n} dS - \omega \iint \vec{H} \cdot \vec{n} dS = 0$$

(1)

式中

$$\vec{W} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{bmatrix}, \vec{H} = \begin{bmatrix} \rho(q - q_b) \\ \rho u(q - q_b) + pI_x \\ \rho v(q - q_b) + pI_y \\ \rho w(q - q_b) + pI_z \\ \rho H(q - q_b) + p q_b \end{bmatrix},$$

$$\vec{H}^v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx}I_x + \tau_{xy}I_y + \tau_{xz}I_z \\ \tau_{xy}I_x + \tau_{yy}I_y + \tau_{yz}I_z \\ \tau_{xz}I_x + \tau_{yz}I_y + \tau_{zz}I_z \\ \lambda I_x + \lambda I_y + \lambda I_z \end{bmatrix}$$

其中 $\rho(u, v, w)$, p , E 分别代表流体的密度、速度在直角坐标系下的三个分量、压力、单位质量总

能(它与单位质量焓值 H 的关系为 $H = E + p/\rho$). $q = (u, v, w)^T$ 为流体速度矢量, $q_b = u_bI_x + v_bI_y + w_bI_z$ 为控制体边界的运动速度矢量, I_x, I_y, I_z 分别为直角坐标系单位坐标向量. $\omega = 1$ 对应雷诺平均 N-S 方程, $\omega = 0$ 对应 Euler 方程.

该方程为惯性坐标下针对任意运动控制体的积分方程,适用于运动网格系统的有限体积方法求解.其中

$$\frac{D}{Dt} \iiint dV = \frac{\partial}{\partial t} \iiint dV + \iint q_b \cdot \vec{n} dS$$

(2)

为了保证时间精度和提高计算效率,采用含牛顿型 LU-SGS 子迭代的全隐式双时间法并引入多重网格技术^[4].湍流模型采用 B-L (Baldwin Lomax) 代数模型.

2 多重网格方法在运动嵌套网格技术中的应用

多重网格方法的基本思想简单地说就是在不同粗细网格上消除不同频率误差,从而加速解的收敛.从椭圆型方程迭代求解的误差分析可知,高频振荡误差可以很快被消除掉,但是低频误差却很难消除.采用多重网格技术后,细网格上的低频误差相对于粗网格成了高频误差,因此可以进一步消除这一部分的误差.这样在一系列不同粗细的网格上迭代消除不同频率的误差,再将消除了低频误差的值插值到细网格上,使得收敛速度大大提高.

本文的多重网格方法采用非线性方程的全近似格式(FAS 格式),细网格上和粗网格上存贮的是方程的解而不是误差.细网格上的流动解限制到粗网格上以及粗网格上的流动解插值到细网格上均采用体积加权.另外,为了消除插值过程引入的误差、提高格式的稳定性,本文对修正量采用了隐式光顺,光顺方法与残值光顺方法相同^[5].

运动嵌套网格技术中引入多重网格方法时,遇到了单块多重网格计算没有的问题:粗网格之间嵌套关系的确定.文献[6]提出了3种粗网格嵌套关系确定的方法,并在二维翼型和悬停旋翼多重网格计算中进行了验证后总结了这3种方法的优缺点.文献[5]在这3种方法的基础上提出了如下方法:

1) 根据细网格的洞点确定粗网格的洞点,即如果粗网格包含了细网格的洞点则该网格单元确

定为粗网格的洞点, 然后根据洞点确定粗网格洞边界;

2) 粗网格上洞边界和人工外边界的贡献单元直接在本块网格的细网格上搜寻;

3) 粗网格修正采用加权体积法.

该方法已经被成功地应用于前飞旋翼绕流数值模拟. 本文的螺旋桨侧流黏性绕流数值模拟就是在该前飞旋翼绕流数值模拟程序的基础上发展而来.

3 网格系统及边界条件

本文采用了文献[5, 7-8]发展的运动嵌套多重网格方法. 计算采用与桨毂固联的惯性坐标系, 如图 1 所示. 来流风速方向偏角 β 定义如图 2 所示, $\beta=0$ 对应轴流状态.

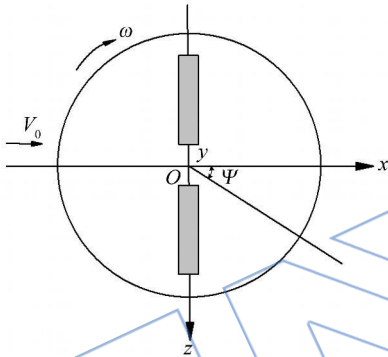


图 1 惯性坐标系示意图

Fig.1 Schematics of inertial coordinate system

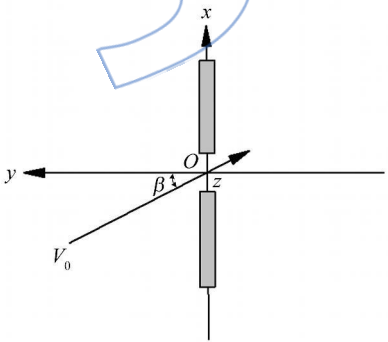


图 2 侧流偏角示意图

Fig.2 Schematics of yaw angle

用于螺旋桨侧流计算的嵌套网格系统包括 3 类网格: 静止的背景网格(background grid, 笛卡尔网格, 远场大小取 10 倍桨叶半径); 相对于背景网格旋转的中间过渡网格(intermedial grid, O-H 型网格, 圆柱半径取 2 倍桨叶半径, 高度取 2~3 倍桨叶半径); 相对于过渡网格静止的桨叶网格

(blade grid, 每片桨叶对应一块 G-H 型网格, 法向外边界大约取 3 倍弦长). 背景网格在中间过渡网格中存在洞边界, 中间过渡网格在桨叶网格中存在洞边界, 桨叶网格之间可以存在重叠区域. 这种网格布局方式有如下优点:

1) 圆柱形状的 O-H 型中间过渡网格在桨叶表面附近加密, 保证了良好的插值性能, 有利于近场尾涡的捕捉. 特别是有利于多片桨叶桨尖附近网格加密.

2) 桨叶网格与中间过渡网格相对静止避免了运动过程中每一个时间站位重新确定嵌套关系, 提高了运动时嵌套关系确定的效率. 同时可以避免运动幅度过大导致洞点在变为洞边界点之前直接成为计算点而导致较大误差.

3) 圆柱形的中间过渡网格在旋转过程中, 背景网格的洞点和洞边界不会发生变化, 即在运动过程中背景网格不需要重新搜索洞点和洞边界, 只需要重新搜索贡献单元, 进一步提高了运动时嵌套关系确定的效率, 在本文的计算中, 当桨叶运动到新位置时, 重新确定嵌套关系只需 0.5s 左右, 相对于费时的流场计算几乎可以忽略.

图 3 给出了侧流状态计算的网格总体示意图.

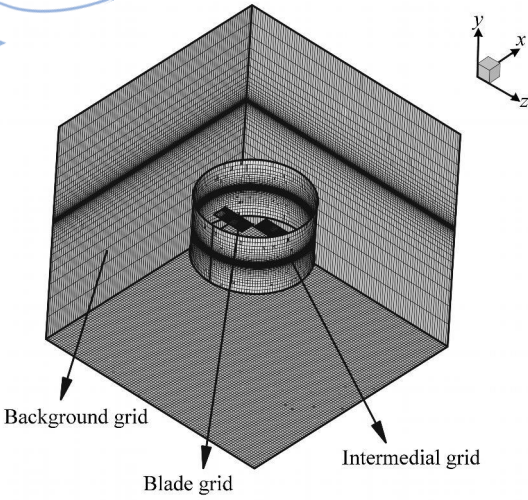


图 3 计算网格总体示意图

Fig.3 Schematics of chimera grids

图 4 为中间过渡网格俯视图, 从图中可以看出这种网格拓扑结构在桨叶物面附近加密适用于多片桨叶.

图 5 给出了两桨计算时四套网格挖洞效果示意图. 其中, 图(a) 为 $y=0$ 截面的俯视图; 图(b) 为桨叶径向某剖面视图.

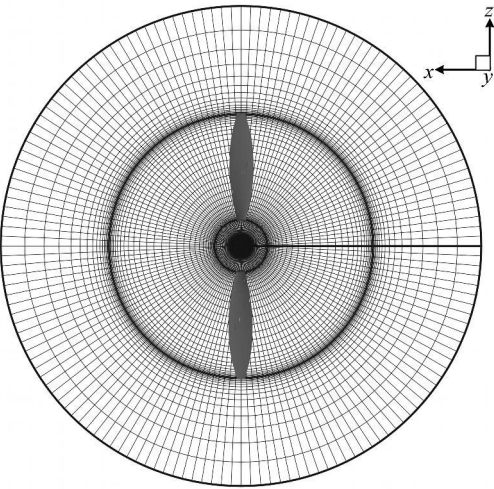


图 4 中间过渡网格与桨叶的俯视图
Fig. 4 Top view of intermedial grid and blades

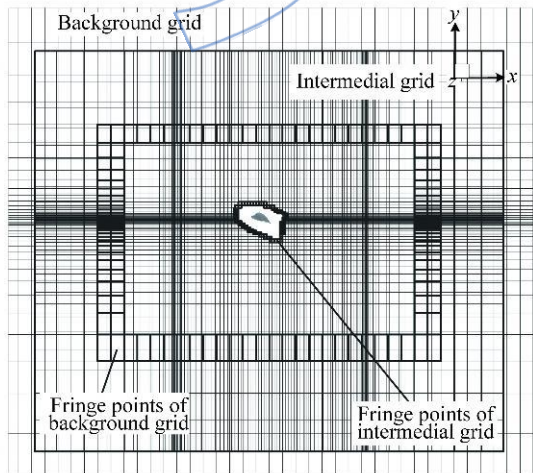
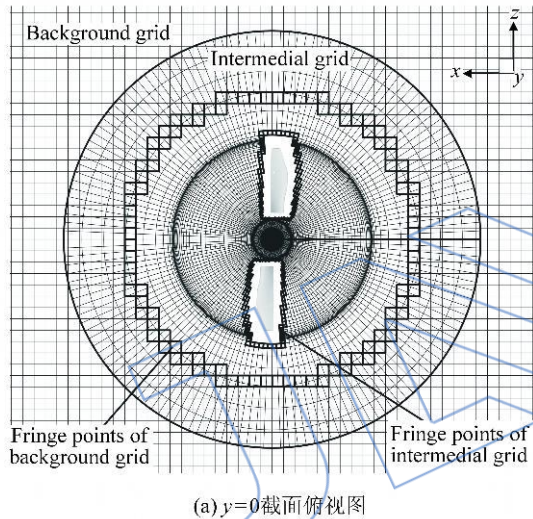


图 5 侧流计算网格挖洞效果示意图
Fig. 5 Schematics of holes on chimeræ grids

边界条件包括:物面边界条件、远场边界条件、割缝边界条件和人工边界条件.物面边界条件为无滑移边界条件(即物面上流动速度等于桨叶的运动速度)和绝热壁边界条件;背景网格的外边界是远场边界,采用一维黎曼不变量进行处理;背景网格在中间过渡网格上存在洞边界,中间过渡网格在桨叶网格上存在洞边界,中间过渡网格和桨叶网格的外边界称为人工外边界.洞边界和人工外边界上的流动变量值均采用三线性插值得到;另外,O-H型中间过渡网格的割缝使用周期性边界条件.

4 算例分析

选课题组设计的某直径 1.2 m 两叶螺旋桨,是一副小负荷螺旋桨.计算网格大小如下:背景网格 $93 \times 49 \times 93$;中间过渡网格 $153 \times 57 \times 61$;桨叶网格 $153 \times 41 \times 65$.计算采用 3V-1-2-3 (3 重 V 循环,每个循环在第一层、第二层和第三层分别迭代 1, 2, 3 步)多重网格循环,周期划分数 180,子迭代收敛精度取 1.0×10^{-5} ,最大子迭代步数取 50.

4.1 算例验证与分析

由于缺少螺旋桨侧流方面的实验数据,将螺旋桨轴流状态作为侧流状态的特例进行计算.计算状态如下:转速固定为 $n = 1800 \text{ r/min}$ 时,分别计算不同风速下的气动特性.由于该螺旋桨直径较小,因此在不同风速下,其桨尖马赫数只有 0.33 左右.

图 6 给出了轴向拉力、转矩、功率系数和效率的计算值与实验值的比较.可以看出,计算得到的气动特性与实验值都很接近,趋势基本一致.计算结果表明:轴向拉力随着风速的增加而减小,在 $0 \sim 13 \text{ m/s}$ 之间下降缓慢而在 13 m/s 之后下降很快;转矩先是随着风速的增加略有增大,当风速达到 13 m/s 左右时转矩达到最大,之后很快下降.

通过理论分析^[1]可知,在相同转速下,随着风速的增大,桨叶叶素的有效迎角逐渐减小,作用于叶素上的升力和阻力也相应减小.因此,螺旋桨的拉力和功率应由静止状态的最大值逐渐减小.本文的计算与理论分析的趋势是基本一致的.

表 1 定量给出了拉力、转矩、功率系数和效率的计算值与实验值之间的相对误差(只给出最大误差情况, $e_{\max} = |V_{\text{cal}} - V_{\text{exp}}|/V_{\text{exp}}$).可以看出,计算误差基本在 6% 以内,说明本文方法具有较高的精度.

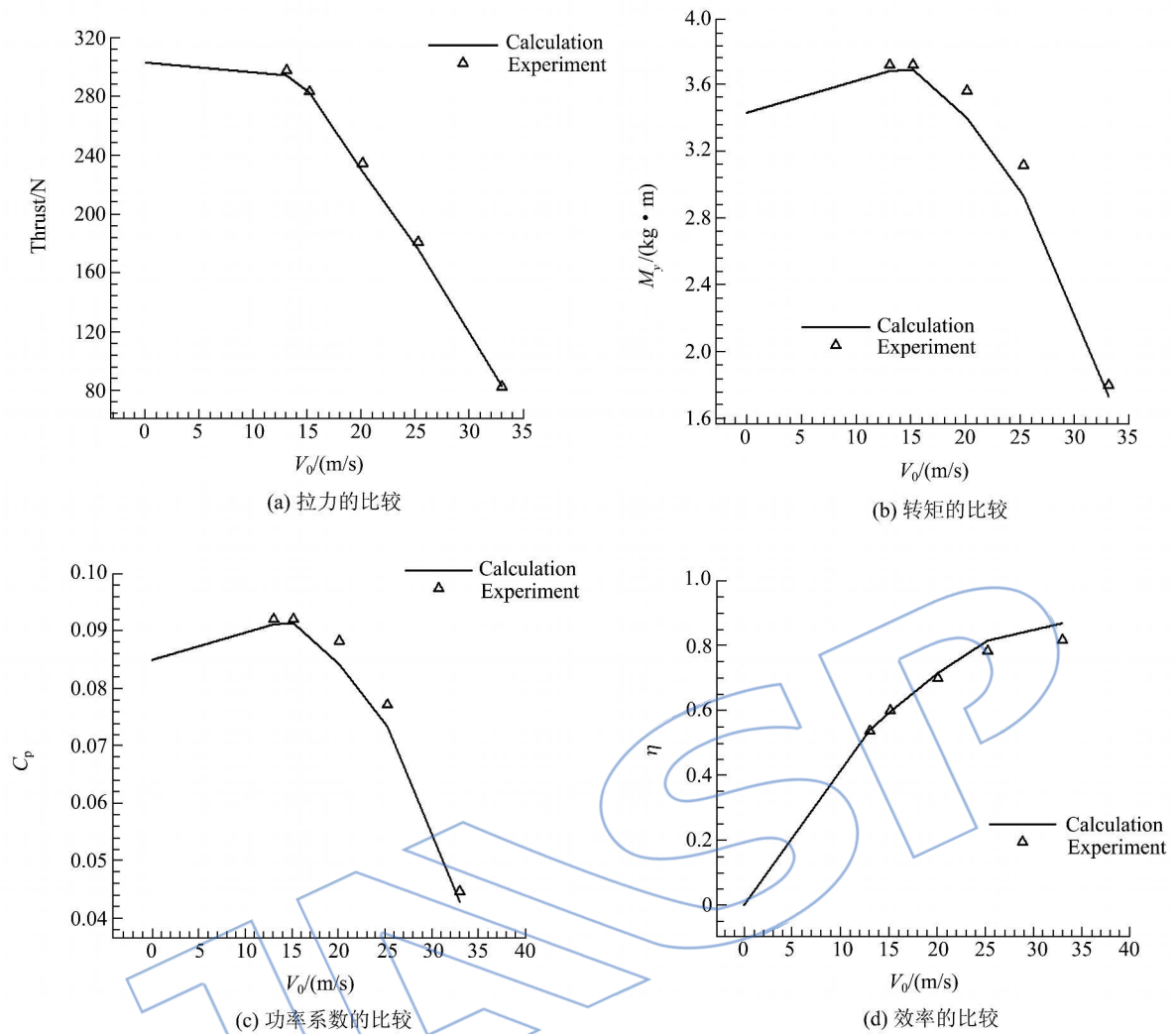


图 6 螺旋桨轴流状态气动特性计算值与实验值的比较

Fig.6 Comparison of aerodynamic performance between calculational and experimental data for zero yaw configuration

表 1 计算值与实验值的相对误差

Table 1 Relative errors between calculational and experimental data

	拉力	转矩	功率系数	效率
最大误差/ %	5.0	6.3	4.9	5.8

4.2 偏角对螺旋桨气动特性的影响

由于没有侧流状态的实验数据, 为了说明本文方法的有效性, 首先采用一种工程算法——1P (once per revolution) 载荷法^[9] 计算桨叶在一个旋转周期内的拉力, 桨叶剖面的升力系数由美国麻省理工学院的 Drela 博士开发的亚声速翼型分析软件 XFOIL^[10] 计算得到, 并与本文的数值模

拟结果比较. 计算转速 $n = 1800 \text{ r/min}$, 风速 33 m/s , 偏角 15° . 图 7 给出了两种计算方法所得拉力的比较. 可以看出, 两者的趋势基本一致且基本满足正弦规律, CFD (计算流体动力学) 计算结果峰值略高, 1P 载荷法计算结果的峰值出现在 90° (270°) 方位角, 而 CFD 方法计算结果有一定的延后. 文献[11]中的计算结果也有类似现象, 这说明数值模拟方法更能真实地反映螺旋桨在侧流状态下的气动特性.

为了研究来流偏角对螺旋桨气动特性的影响, 在转速固定为 $n = 1800 \text{ r/min}$ 时, 分别计算了相同风速 (33 m/s) 和相同轴向风速 (33 m/s) 下不同来流偏角的气动特性, 并做了比较研究及分析. 雷诺数固定为 6.1×10^5 .

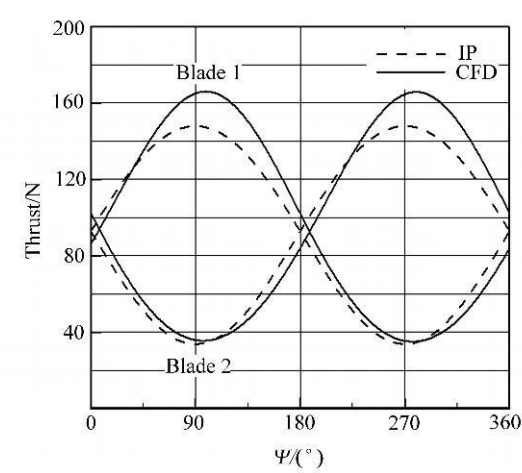


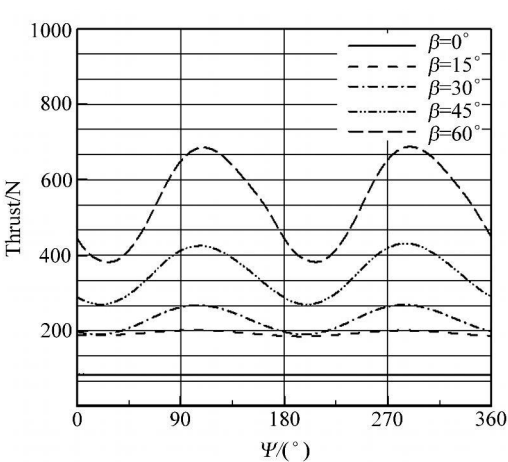
图 7 1P 载荷法与 CFD 方法计算结果对比
Fig. 7 Comparison between 1P method and CFD

图 8 (a) 给出了相同风速下不同偏角计算得到的拉力在一个周期内的变化情况. 从图中可以看出: ①拉力在一个周期内的振幅随着偏角增大而增大; ②桨叶在相同方位角时的拉力随着偏角的增大而增大.

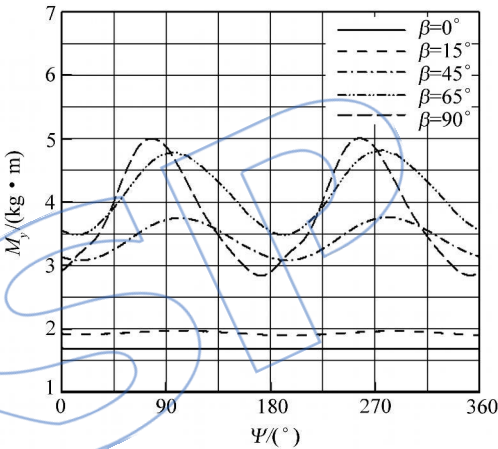
图 8 (b) 给出了相同风速下不同偏角计算得到的转矩在一个周期内的变化情况. 从图中可以看出: ①转矩在一个周期内变化的振幅随着偏角的增大而增大; ②在 65° 以内, 桨叶位于相同方位角时的转矩随着偏角的增大而增大; ③当偏角达到 90° 时, 转矩变化的振幅达到最大, 但是与其他偏角相比, 并不是每个方位角的转矩都是最大.

从拉力和转矩的周期性变化规律可以看出, 拉力和转矩在一个旋转周期内出现了两个极大值和两个极小值, 并且在方位上各相差 180° , 这是因为本文所计算的螺旋桨是两叶的. 偏角越大, 流动的非定常现象越明显, 因此, 拉力和转矩在一个周期内变化的振幅也越大. 在相同风速下, 偏角越大相当于轴向风速越小, 上述关于拉力和转矩的分析, 其变化趋势与 4.1 节中轴流状态下所得到的结论是类似的. 虽然没有实验验证, 但是通过与工程算法的比较以及理论分析, 可以认为计算结果是合理的.

表 2 给出了偏角分别为 0° , 45° 和 90° 时计算效率的比较. 可以看出, 随着偏角的增加, 计算所需迭代步数是增加的, 导致计算时间增加. 偏角为 0° 时, 螺旋桨工作于轴流状态, 计算收敛于稳态解, 其所用的计算迭代步数和计算时间最少; 偏角为 90° 时, 流动具有明显的非定常现象, 因此需要较多的子迭代步数.



(a) 偏角对拉力的影响



(b) 偏角对转矩的影响

图 8 偏角对螺旋桨气动特性的影响
(相同转速相同风速)

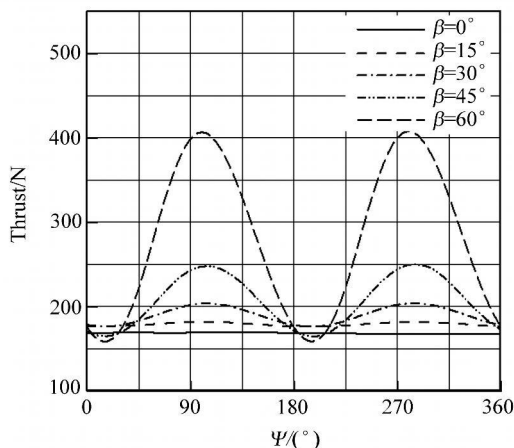
Fig. 8 Effects of yaw angles on propeller performance
(uniform rotational speed and wind speed)

表 2 不同偏角时计算效率的比较
Table 2 Comparison of computational efficiencies
among different yaw angles

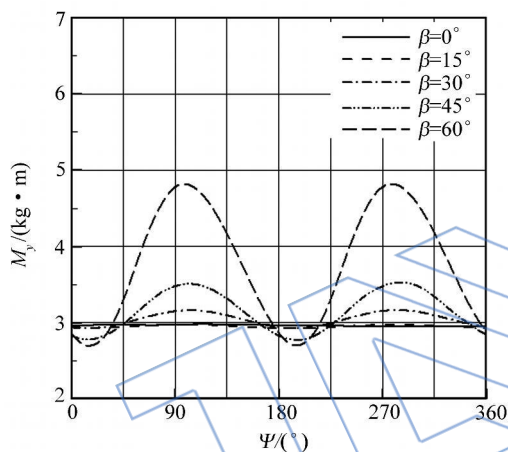
计算效率	偏角/($^{\circ}$)		
	0	45	90
总子迭代步数	3 570	4 491	7 832
平均子迭代步数	6.43	8.30	14.5
总计算时间/h	25.66	32.63	58.65

图 9 给出了相同轴向风速下不同来流偏角计算得到的拉力和转矩在一个周期内的变化情况. 从图 9(a) 中可以看出: ①拉力在一个周期内的振幅随着偏角增加而增大, 振幅的增加量随着偏角的增加迅速增大; ②当方位角不在 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 以及 $180^{\circ} \sim 225^{\circ}$ 范围内时, 桨叶在相同方位角时的拉

力随着偏角的增加而增大. 图 9(b) 是不同偏角计算得到的转矩在一个周期内的变化情况. 其变化趋势与拉力随偏角的变化趋势基本一致.



(a) 偏角对拉力的影响



(b) 偏角对转矩的影响

图 9 偏角对螺旋桨气动特性的影响
(相同转速相同轴向风速)

Fig. 9 Effects of yaw angles on propeller performance
(uniform rotational speed and axial wind speed)

5 结 论

本文运用有限体积法求解非定常的雷诺平均 N-S 方程数值模拟螺旋桨黏性绕流, 并计算螺旋桨轴流状态和侧流状态的气动特性. 以课题组的 1.2m 两叶螺旋桨为例, 首先计算了轴流状态下的气动特性, 计算结果与实验值吻合较好, 与理论分析基本一致, 且具有较高的计算精度, 验证了程序的正确性.

在转速固定时, 分别计算了相同风速和相同轴向风速下不同来流偏角的气动特性, 均得到周期性解. 总结了来流偏角对螺旋桨气动特性的影响, 更加全面地分析螺旋桨的气动特性. 虽然没有

相关的实验验证, 但是通过与工程算法——1P 载荷法的比较及理论分析可知所得结果是合理的.

采用本文的方法不仅可以得到侧流状态下任意时刻螺旋桨的受力, 最重要的是可以得到任意时刻的螺旋桨绕流细节. 全面地了解螺旋桨在各种状态下的流动状况可以更加有效地指导螺旋桨的设计.

参考文献:

- [1] 刘沛清. 空气螺旋桨理论及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [2] Sullivan J P. The effect of blade sweep on propeller performance[J]. AIAA Paper 77-716, 1977.
- [3] 陈泽民, 潘杰元. 一种计算螺旋桨性能的高效升力线方法[J]. 航空动力学报, 1991, 6(4): 295-299.
CHEN Zemin, PAN Jieyuan. Efficient lifting line method for computing performance of propeller[J]. Journal of Aerospace Power, 1991, 6(4): 295-299. (in Chinese)
- [4] 钟伯文, 乔志德. 螺旋桨性能计算的升力线与升力面方法[J]. 推进技术, 1994(5): 41-47.
ZHONG Bowen, QIAO Zhide. The calculation of propeller aerodynamic performance by lifting line and lifting surface method[J]. Journal of Propulsion Technology, 1994(5): 41-47. (in Chinese)
- [5] 韩忠华. 旋翼绕流的高效数值计算方法及主动流动控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
HAN Zhonghua. Efficient method for simulation of viscous flows past helicopter rotors and active flow control[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- [6] Juvinet X, Canonne E, Benoit C. Multigrid algorithms for the chimera method[J]. AIAA Paper 2004-758, 2004.
- [7] 杨爱明. 基于嵌套网格的直升机旋翼流场雷诺平均 Navier Stokes 方程数值模拟[D]. 西安: 西北工业大学, 2000.
YANG Aiming. Navier Stokes computation for helicopter rotors based on moving overset grids[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2000. (in Chinese)
- [8] 杨爱明, 乔志德. 基于运动嵌套网格的前飞旋翼绕流 N-S 方程数值计算[J]. 航空学报, 2001, 22(5): 434-436.
YANG Aiming, QIAO Zhide. Navier Stokes computation for a helicopter rotors in forward flight based on moving overset grids[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(5): 434-436. (in Chinese)
- [9] 周盛, 顾高墀, 潘杰元, 等. 航空螺旋桨与桨扇[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- [10] Drela M, Gilest M B. Viscous inviscid analysis of transonic and low Reynolds number airfoils[J]. AIAA Journal, 1986, 25(10): 1347-1355.
- [11] Aljabri A S, Lyman V, Parker R J, et al. Evaluation of propeller/nacelle interactions in the PTA program[R]. AIAA Paper 1986-1552, 1986.