

对转螺旋桨流场气动干扰数值模拟

史文博, 李 杰
(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘 要: 基于结构网格动态面搭接技术,通过求解三维非定常雷诺平均纳维-斯托克斯(RANS)方程,对单独螺旋桨(SRP)滑流流场进行了数值模拟,结果与风洞试验数据吻合良好,在此基础上深入研究了对转螺旋桨(CRP)的非定常滑流效应及前后桨之间的气动干扰现象。计算结果表明:所采用的非定常 RANS 方法能够良好刻画对转螺旋桨滑流流场的发展变化特征,适用于分析前后桨气动干扰特性。前后桨桨尖涡的复杂相互作用是导致对转螺旋桨气动干扰的直接原因,后桨桨尖涡对于前桨桨尖涡具有一定耗散作用。在气动干扰影响下,对转螺旋桨气动力会产生周期性波动,波动周期与螺旋桨桨叶数相关,6×6 对转螺旋桨在 1 个旋转周期内产生了 12 次波动。气流穿过对转螺旋桨会发生两次加速,因此在相同工况下,对转螺旋桨的拉力系数和功率系数相比于单独螺旋桨分别增大约 1 倍,效率提升约 1.5%。

关 键 词: 对转螺旋桨; 滑流流场; 气动干扰; 结构网格动态面搭接技术; 非定常 RANS 方法
中图分类号: V211 **文献标志码:** A

Numerical simulation of contra-rotating propeller flowfield aerodynamic interactions

SHI Wenbo, LI Jie

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: On the basis of dynamic patched grid technology, numerical simulations were implemented on an isolated single-rotating propeller (SRP) configuration by means of solving three-dimensional unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) equations, and the numerical results were verified by wind tunnel test, showing good agreements with the experimental data. Subsequently, emphasis was placed on investigation of the unsteady flow-field characteristics and aerodynamic interactions of contra-rotating propellers (CRP) configuration. The results showed that the unsteady RANS approach allow for a detailed analysis of the developing characters of the slipstream flowfield and aerodynamic interactions between the two propellers. The main reason of the aerodynamic interactions lied in the mutual effects of the blade tip vortices generated by the front and aft propellers, and the aft propeller reduced the strength of the blade tip vortices of the front propeller. Aerodynamic interactions could lead to the periodic oscillations of the aerodynamic forces, and the frequency of the oscillations was linked to the blade numbers. The 6×6 CRP configuration had 12 aerodynamic oscillations in one full rotation. The freestream could be accelerated twice when passing through the CRP, therefore compared with SRP, the thrust coefficient and power coefficient

收稿日期:2018-05-22
基金项目:国家重点基础研究发展计划(2015CB755800)
作者简介:史文博(1989—),男,博士生,主要从事螺旋桨空气动力学研究。

引用格式:史文博,李杰. 对转螺旋桨流场气动干扰数值模拟[J]. 航空动力学报,2019,34(4):829-837. SHI Wenbo,LI Jie. Numerical simulation of contra-rotating propeller flowfield aerodynamic interactions[J]. Journal of Aerospace Power,2019,34(4):829-837.

cient of CRP almost would be doubled in the same working conditions, meanwhile the efficiency would increase by approximately 1.5%.

Key words: contra-rotating propellers; slipstream flowfield;
aerodynamic interactions; dynamic patched grid technology;
unsteady RANS approach

螺旋桨飞机具有起飞滑跑距离短、爬升速度大等良好的低速和起降性能,以及航程远、单位耗油率小、对机场跑道要求相对较低等优点,在航空领域发挥着重要作用。近年来,随着对环境问题的普遍关注,要求减少航空器排放对大气的污染,新颖高效、节能减排的螺旋桨动力系统需求大增。高效率低油耗的对转螺旋桨设计引起了人们的关注^[1-3]。

在螺旋桨的气动力设计中,螺旋桨滑流的非定常流动特性研究分析一直是空气动力学研究中的难点^[4-6]。对转螺旋桨的相对旋转运动,特别是前后桨滑流流场之间的相互作用,使其周围的空气流动变得更加复杂^[7-9],也是导致噪声和振动水平增加的主要因素,一定程度上制约了对转螺旋桨技术的广泛应用。随着计算机硬件水平和数值计算方法的不断发展,计算流体力学(CFD)已经成为分析旋转类流动问题的重要手段。国外Roosnboom等^[10]采用非结构嵌套网格模拟了对转开式转子的气动干扰,Stuermer等^[11-13]采用非结构与结构混合网格嵌套技术结合 deutsches zentrum fur luft-und raumfahrt(DLR)的TAU程序研究了开式转子的旋转运动^[14-15],计算结果与 particle image velocimetry(PIV)试验结果对比较好,但上述文献中关于对转螺旋桨气动干扰现象的机理分析还有待进一步丰富。

目前国内对于对转螺旋桨的研究还相对较少,相关流动机理分析尚不完善。为了进一步了解对转螺旋桨的滑流流动特性以及前后桨之间产生的气动干扰,本文在结构网格动态面搭接技术基础上,使用非定常 RANS 方法对对转螺旋桨模型滑流流动特性进行了数值模拟,开展了滑流流动特性、前后桨尖涡和桨叶尾流以及桨叶气动力分析^[16],进行了对转螺旋桨前后桨气动干扰问题的机理研究。

1 计算方法

N-S(Navier-Stokes)方程是描述黏性流体流动规律最完备的控制方程,基于非定常 RANS 方法的控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \mathbf{Q} d\Omega + \iint_S \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} = \iint_S \mathbf{F}^v \cdot d\mathbf{S} \tag{1}$$

其中 $\mathbf{Q}=[\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad \rho w \quad \rho e]^T$ 为守恒向量,(u,v,w)代表(x,y,z)方向的速度分量, ρ,e 分别代表密度、总能量。 Ω 为控制体体积, S 为控制体+表面矢量, $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{F}^v$ 为通过表面 S 的无黏通量和黏性通量。控制方程无黏项采用三阶迎风 monotonic upstream-centered scheme for conservation law(MUSCL)插值的 ROE 格式,黏性项采用中心差分格式离散,选用 Spalart-Allmaras(SA)湍流模型。为了提高非定常数值模拟的时间离散精度,可以采用 LU-SGS 双时间法进行时间推进^[17]。

2 单桨模型验证算例

为了验证基于结构网格动态面搭接技术的非定常 RANS 方法的准确性与可靠性,首先对单独螺旋桨模型进行数值模拟,并将数值模拟结果和风洞试验相关数据进行对照。

2.1 单桨模型风洞试验

单桨试验是在荷兰 DNW/LST 风洞中进行的。LST 风洞是一座回流式低速风洞。试验段尺寸为:3.0 m(宽)×2.25 m(高)×8.75 m(长)。试验风速可从 1.5 m/s 到 80 m/s,风速控制精度在 0.2%之内,流场水平、垂直气流偏角小于 0.1°,流场湍流度在 0.02%~0.03%。图 1 给出了 LST 风洞单桨试验的照片,风洞试验的螺旋桨为 1 个六叶桨结构。螺旋桨桨叶、旋转轴天平(简称 RSB)以及螺旋桨桨毂整流罩装配在一起,通过中心体连接到风洞支撑杆上,支杆连接于风洞外式天平。试验中一方面通过对比外式天平与 RSB 的数据来进行校验 RSB 的准确性,另一方面通过 RSB 获得螺旋桨的气动力。在本次单桨模型风洞试验中,螺旋桨桨叶角规定为螺旋桨桨叶 70%处弦线的角度。

单桨试验的主要目的是在螺旋桨桨叶角固定为 45.3°时,获得不同工况下螺旋桨拉力系数、功率系数。风洞试验工况如表 1 所示。



图 1 单桨风洞试验照片

Fig. 1 Single-rotating propeller configuration wind tunnel test

表 1 风洞试验参数

Table 1 Wind tunnel test parameters

序号	马赫数 Ma	攻角 $\alpha/(^{\circ})$	转速/ (r/min)	前进比 λ
1	0.2	0.03	2998	1.91066
2	0.2	0.03	3097	1.84620
3	0.2	0.03	3198	1.78863
4	0.2	0.03	3290	1.73779

2.2 螺旋桨拉力系数、功率系数和效率的计算

螺旋桨拉力系数、轴功率、功率系数和效率为

$$C_t = \frac{T}{\rho n_s^2 D^4} \tag{2}$$

$$P = 2\pi n_s M \tag{3}$$

$$C_p = \frac{P}{\rho n_s^3 D^5} \tag{4}$$

$$\eta = \frac{TV_{\infty}}{P} \tag{5}$$

式中 T 为螺旋桨产生的拉力, ρ 为空气密度, n_s 为螺旋桨转速, D 为螺旋桨桨盘直径, P 为螺旋桨的轴功率, M 为扭矩, η 为效率, V_{∞} 为来流速度^[18]。根据表 1 的四个状态进行风洞试验。

2.3 单桨模型与网格生成

计算模型在风洞试验模型基础上稍作改进, 移除尾部支杆, 保留中心体, 中心体长度为 $2D$ 。桨叶几何形状和桨盘直径与风洞试验模型保持一致, 桨叶角设定为 45.3° , 顺着气流流动方向看螺旋桨逆时针旋转, 单桨模型如图 2 所示。由于螺旋桨高速转动, 而中心体静止不动, 所以采用结构网格动态搭接技术, 将整体的结构网格分两部分生成, 一部分为包含中心体的静止域(如图 3 灰色网格所示), 另一部分为包含螺旋桨的旋转域(如

图 3 紫色网格所示)。两个区域的网格单独生成, 通过旋转域的搭接面进行流场信息传递, 计算模型整体网格如图 3(b)所示, 近壁面法向首层网格高度取 $10^{-5}c$, 满足近壁面 $y^+ < 1$, 网格总量为 700 万。数值模拟计算状态与风洞试验保持一致, 自由来流马赫数 $Ma=0.2$, 攻角 $\alpha=0.03^{\circ}$, 总共计算四个工况。采用课题组自研程序进行非定常 RANS 数值模拟计算, 计算的空间离散格式采用三阶 Roe-MUSCL 格式, 时间推进采用 LU-SGS 双时间法, 湍流模型选用 S-A 模型, 每个时间步长内进行 10 次牛顿子迭代, 结合三层网格加速收敛技术^[19-21]。单桨模型每个工况每个旋转周期计算 720 步, 一共计算 10 个周期。

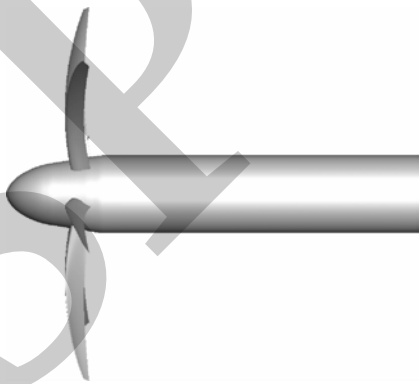


图 2 单桨计算模型

Fig. 2 Single-rotating propeller geometric layout

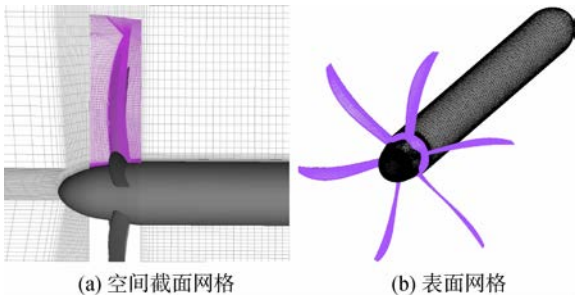


图 3 单桨计算模型网格

Fig. 3 Grids of single-rotating propeller geometric layout

2.4 与风洞试验数据对比

采用非定常 RANS 方法对单独螺旋桨模型四个工况进行了数值模拟计算, 计算结果与风洞实验结果进行对比分析。图 4 为风洞试验与数值模拟的拉力系数、功率系数以及效率的曲线对比, 表 2 为试验结果与计算结果的误差对比。

由表 2 可以看出, 非定常 RANS 数值模拟方法计算结果与风洞试验结果吻合良好, 拉力系数和功率系数误差较小。

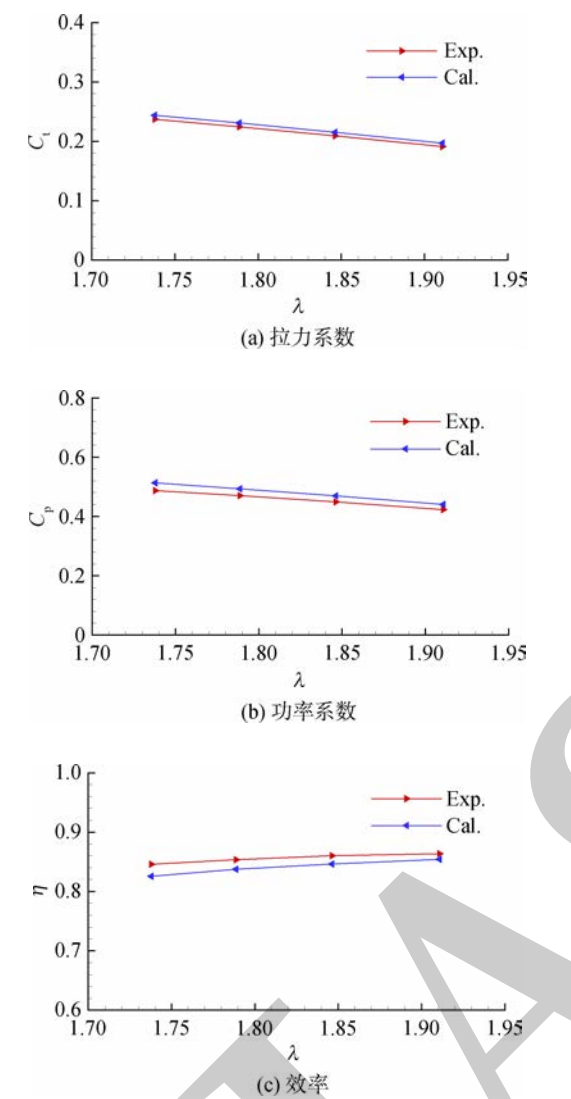


图 4 风洞试验与非定常 RANS 数值模拟方法结果对比
Fig. 4 Comparison of results of wind tunnel test and unsteady RANS approach

表 2 风洞试验与非定常 RANS 数值模拟结果误差对比
Table 2 Comparison of wind tunnel test and unsteady RANS method results on the relative error

序号	C_L (试验, 计算)	误差/ %	C_P (试验, 计算)	误差/ %
1	0.191, 0.197	3.14	0.423, 0.441	4.26
2	0.209, 0.215	2.87	0.449, 0.469	4.45
3	0.224, 0.231	3.13	0.470, 0.493	4.89
4	0.237, 0.244	2.95	0.487, 0.513	5.34

3 对转螺旋桨计算分析

基于结构网格动态面搭接技术的非定常 RANS 方法以及所采用的数值模拟计算策略,能

够准确地模拟单独螺旋桨的旋转运动,因此,在单桨模型基础上构造一个对转螺旋桨模型。

3.1 对转模型与网格生成

计算采用的对转螺旋桨模型在单桨模型基础上生成,由一个中心体和两个几何相同的六叶桨构成。对转螺旋桨前后桨直径与单桨算例直径相同,中心体长度为 $2D$,前后桨距离 $0.25D$,模型前后桨的桨叶角均设定为 45.3° 。对转模型如图 5 所示。顺着气流流动方向看,对转模型前桨逆时针旋转,后桨顺时针旋转,并且前后桨转速相同。对转模型同样采用网格动态面搭接技术生成结构网格,空间截面网格和表面网格如图 6 所示,近壁面法向首层网格高度取 $10^{-5}c$,满足近壁面 $y^+ < 1$,网格总量 1600 万。对转螺旋桨模型总共计算四个工况与单桨模型计算工况一致。数值模拟计算同样采用非定常 RANS 方法,计算的空间离散格式、时间推进、湍流模型均与单桨算例一致。每个时间步长内进行 10 次牛顿子迭代,考虑到对转螺旋桨滑流流场的复杂性以及对其滑流流场的模拟精确性,对转模型每个工况每旋转周期计算 1440 步,一共计算 10 个周期。

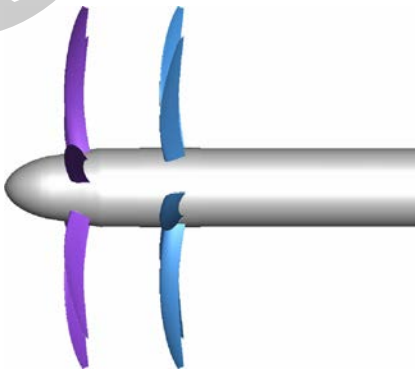


图 5 对转螺旋桨模型
Fig. 5 Contra-rotating propeller geometric layout

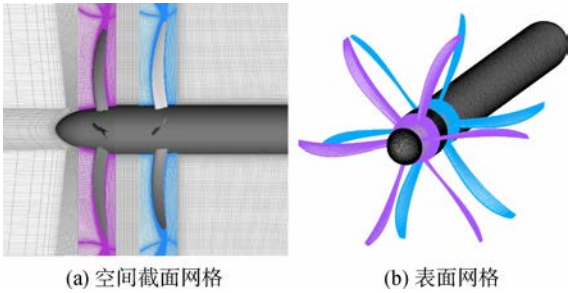


图 6 对转螺旋桨计算模型网格
Fig. 6 Grids of contra-rotating propeller geometric layout

3.2 对转螺旋桨滑流流场分析

螺旋桨滑流是一种典型的非定常流动,图7是对转螺旋桨在涡量值为0.02的涡量等值面(Iso-Q面)(当前螺旋桨转速为3290、3290 r/min,涡量取值范围为0.04~0.40),着色为马赫数。可以清楚地看出,流入对转螺旋桨前桨的气流通过旋转面流出,由于螺旋桨旋转的诱导作用,气流会向着螺旋桨旋转方向扭转,螺旋桨桨尖拖出螺旋状的涡,而在发展到后桨时由于受到后桨引起的桨尖涡的影响,且两个桨的旋转方向不同,两桨拖出的桨尖涡成网格状交叉分布,向下游发展。对转模型所采用的计算策略和网格分布可以准确地模拟滑流流场,并且在搭接面两侧涡量分布光滑过渡,说明采用动态面搭接技术是可行的。对于对转螺旋桨模型,前后桨的桨尖涡和桨叶尾流的相互影响,使得两者在中心体上互相缠绕,形成非常复杂的流动结构。前桨产生的桨叶尾流对于中心体处的复杂流动起主要诱导作用。对转模型的前后桨尖涡交汇时互相影响,形成的网状结构参差不齐,具有强烈的周期性和非定常特性。

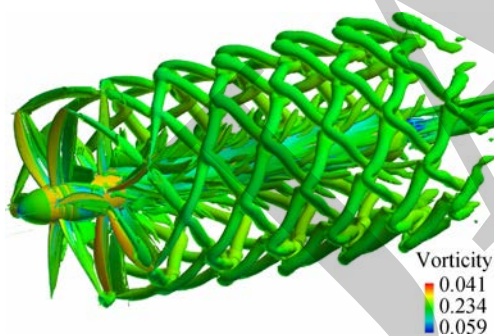


图7 对转螺旋桨涡量等值面 Iso-Q

Fig.7 Iso-Q surface of contra-rotating propeller

为了更详细的分析对转螺旋桨滑流的涡结构及其相互的影响,图8给出了对转螺旋桨滑流纵向截面上的瞬时涡量分布(当前螺旋桨转速为3290、3290 r/min,涡量取值范围为0~0.8)。图8能够更加直观的展示出对转螺旋桨前后两桨产生的桨尖涡和桨叶尾流之间的复杂干扰。对转模型前桨和后桨产生的桨尖涡相互干扰,前桨产生的桨尖涡在遇到后桨时桨涡半径逐渐减小,前桨产生的桨尖涡再向后发展的同时呈逐渐耗散的趋势,两个涡系一上一下向下游发展。根据质量守恒定律,通过滑流管的质量流量保持不变且流速增大,这就会导致滑流管的半径减小,这就是滑流

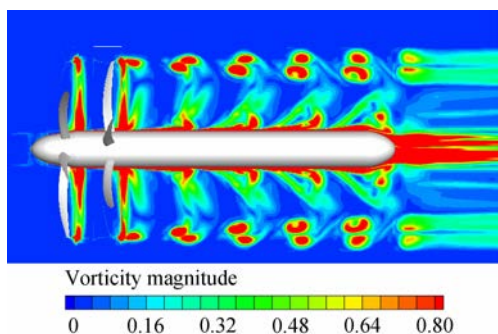


图8 纵向截面瞬时涡量分布

Fig.8 Cross-section instantaneous vorticity magnitude

的收缩效应。还能够看出,中心体附近的桨叶尾流较为复杂,需进一步研究,而中心体下游涡量值明显增大。

3.3 对转螺旋桨气动干扰分析

图9为单独螺旋桨和对转螺旋桨 $x/R=0.68$, $x/R=1.68$ 和 $x/R=2.37$ (x/R 为轴向截面站位)处轴向截面的瞬时涡量分布图(ω 为角速度, r 为半径, U 为自由来流)。图9(a)可以看出,单桨模型产生的桨尖涡在 $x/R=0.68$, $x/R=1.68$ 和 $x/R=2.37$ 轴向截面的涡量峰值不断减小,说明桨尖涡在向下游发展的过程中不断耗散。 $x/R=0.68$ 处的涡量峰值位于88%径向位置, $x/R=1.68$ 和 $x/R=2.37$ 处的涡量峰值位于86%径向位置,说明桨尖涡在向下游发展不断耗散的过程中同时也会有一定程度的收缩。

图9(b)为对转模型轴向截面涡量分布,其中 $x/R=0.68$ 处的涡量峰值位于88%径向位置,并且此处的涡量峰值低于单桨模型 $x/R=0.68$ 处的涡量峰值,说明对转模型的后桨对前桨产生了气动干扰。当前桨桨尖涡发展到下游 $x/R=1.68$ 和 $x/R=2.37$ 处轴向截面处时,由于桨涡的自然耗散以及后桨产生的桨尖涡的干扰,前桨桨尖涡的涡量峰值比单桨模型 $x/R=1.68$ 和 $x/R=2.37$ 轴向截面处的涡量峰值有所减弱。对比图9(a)和图9(b)可以看出,单桨模型 $x/R=1.68$ 和 $x/R=2.37$ 轴向截面处的涡量峰值位于86%的径向位置,而对转模型 $x/R=1.68$ 和 $x/R=2.37$ 轴向截面处的涡量峰值位于80%的径向位置,由此表明,对转模型的后桨使得前桨产生的桨尖涡收缩效果更加显著。

对于对转螺旋桨来说,由于存在前后两个螺旋桨并且旋转方向相反,在不同桨叶相位角时几何构型将会不同,所以气动特性在一个旋转周期内将会发生变化,如图10所示(图中 ϕ 为相位

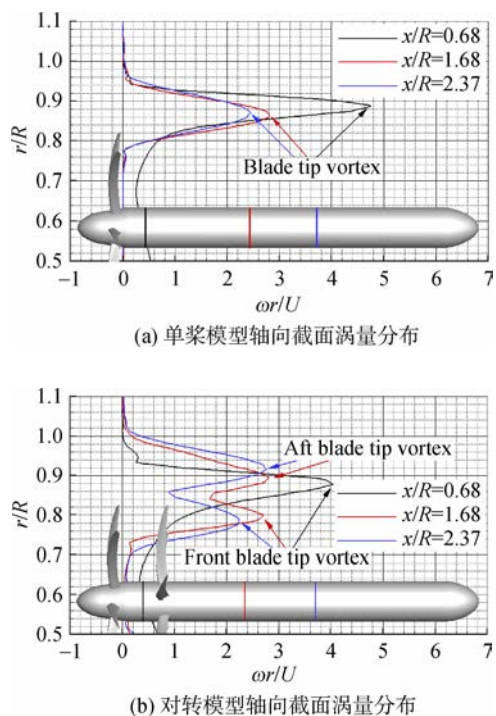


图 9 单桨和对转模型轴向截面的涡量分布对比
Fig. 9 Comparison of vorticity magnitude at axial position between SRP and CRP

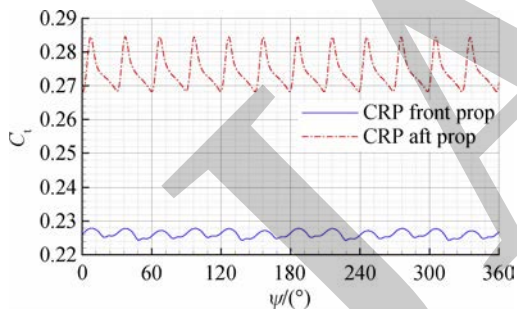


图 10 对转螺旋桨一个旋转周期内气动特性变化
Fig. 10 Aerodynamic changes of contra-rotating propellers during one full rotation

角)。在一个旋转周期内,对转螺旋桨的前后桨拉力系数均出现了 12 次波动,这是因为前后两个螺旋桨都为六叶桨且转速相同方向相反,两桨沿各自的方向每旋转 30° 相位角会发生重合,前后两桨的振幅同时达到最大,从而引起对转螺旋桨气动特性的变化。由图 10 还能够看出,后桨的拉力系数大于前桨的拉力系数,这与 Deconinck 等人^[22]的研究结果是一致的。这主要是因为后桨当地气流经过前桨加速,动压得到提升。另外,由于气流的轴向速度和切向速度均有增加,后桨当地的迎角并不一定减小。后桨拉力系数振幅明显大于前桨拉力系数振幅。这是因为在低速流场

中,虽然扰动可以波及全场,但上游对下游的扰动必然强于下游对上游的扰动。所以,前桨对于来流的改变影响了后桨的气动特性,而后桨的存在也影响了前桨的气动特性。波动周期与螺旋桨桨叶数相关。

图 11 给出了对转螺旋桨模型纵向截面瞬时马赫数分布(当前螺旋桨转速为 3 290、3 290 r/min,取值范围为 $0 \sim 0.25$)和中心体不同站位处时均轴向速度(图中 u 为轴向速度, V_∞ 为来流速度)。由图 11(a)可以看出,自由来流通过对转螺旋桨第一个桨叶后气流有一个加速,随后通过第二个桨叶气流再次被加速,两次加速使得来流的马赫数明显增大。为了进一步分析气流的加速效应,图 11(b)为对转模型转速 3 290、3 290 r/min 相位角为 0 时, $x/R=0.68$ 、 $x/R=1.68$ 和 $x/R=2.37$ 轴向截面站位处时均轴向速度的径向分布情况。由图中黑色曲线可以看出,当气流通过对转模型前桨但没有通过后桨时,气流的轴向速度增大。当气流继续通过对转模型后桨时,轴向速度进一步增大(如图中红色曲线所示)。因此,自由来流通过对转螺旋桨将进行两次滑流的加速。当滑流继续向中心体下游发展时,轴向速度还会进一步增大(如图中蓝色曲线所示),但此时轴向速度增大的幅度随着滑流向下游发展逐渐减弱。由图 11(b)还可以看出,对转螺旋桨对于来流的

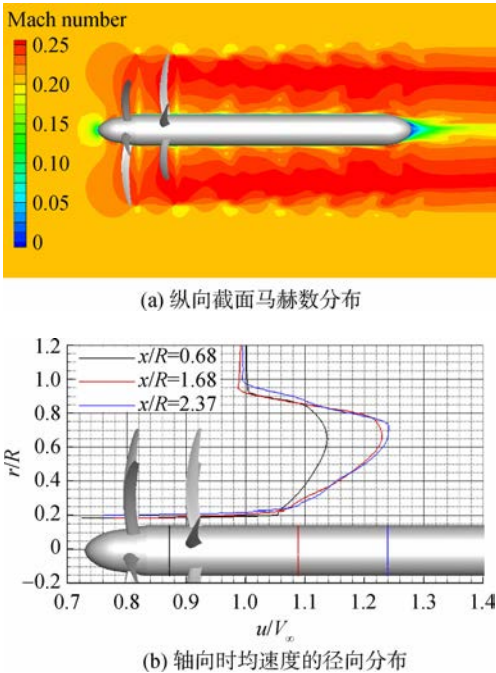


图 11 时均轴向速度
Fig. 11 Time-averaged axial velocity profiles

两次加速作用主要发生在 40% 和 90% 之间的螺旋桨桨叶径向位置。

图 12 为四个相同轴向截面站位处的切向速度(v)和径向速度(w)。由图 12(a)可以看出,当自由来流依次穿过对转螺旋桨前后桨时,桨叶 60% 至 90% 径向位置的切向速度趋于 0 (如图中红色曲线和蓝色曲线所示),可以说明由于对转螺旋桨后桨的存在且旋转方向与前桨相反,前桨产生的滑流遇到后桨产生的滑流发生了桨涡减弱的现象。图 12(b)可以看出位于桨叶 20% 径向位置到桨尖的区域中径向速度为负,说明滑流发生了收缩。随着滑流不断向中心体下游发展径向速度逐渐减小,说明滑流的收缩逐渐减弱,并且最终逐渐趋于零,由此表明滑流收缩的结束。

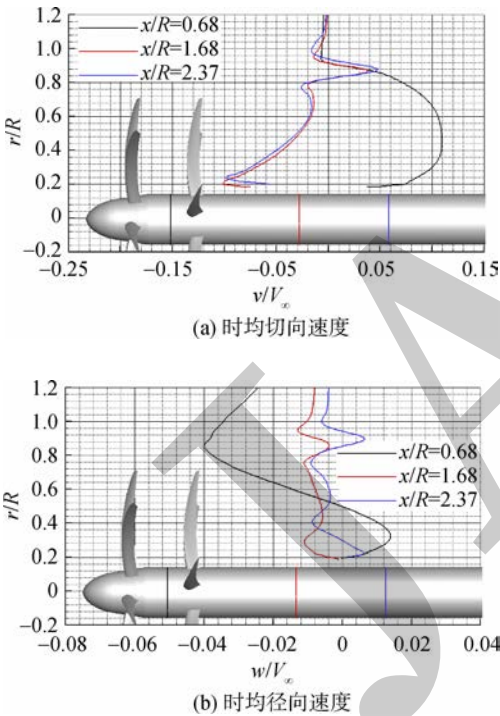


图 12 时均切向和径向速度
Fig. 12 Time-averaged azimuthal and radial velocity profiles

图 13(a)为对转螺旋桨与单独螺旋桨的拉力系数对比,图中 λ 为前进比。可以看出,在相同工况下,对转螺旋桨前桨的拉力系数小于单独螺旋桨的拉力系数,而对转螺旋桨后桨的拉力系数大于单独螺旋桨的拉力系数。对转螺旋桨后桨产生的拉力大于前桨产生的拉力是由于前桨产生的桨涡遇到后桨时发生的桨涡恢复作用。因此,在桨叶角和转速给定的情况下,对转螺旋桨产生的总拉力明显大于单独螺旋桨产生的拉力,飞机的短

距起降性能更好。图 13(b)为对转螺旋桨与单独螺旋桨的功率系数对比,可以看出相同转速下对转螺旋桨前桨的功率系数明显高于后桨,而单独螺旋桨的功率系数则介于两者之间,并且与对转螺旋桨后桨的功率系数更为接近。由图 13(c)可以看出,相同工况下,对转模型的气动效率比单桨模型的效率有所提升。

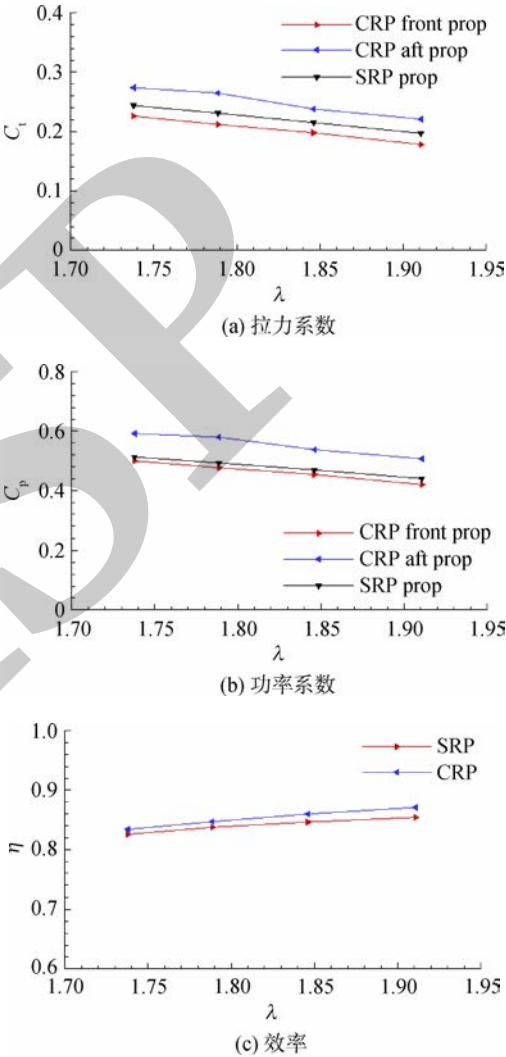


图 13 对转螺旋桨与单独螺旋桨拉力系数、功率系数和效率对比
Fig. 13 Comparison of CRP and SRP thrust coefficient power coefficient and efficiency

4 结 论

本文基于结构网格动态面搭接技术,采用非定常 RANS 方法对对转螺旋桨模型进行了数值模拟,得出以下结论:

1) 基于结构网格动态面搭接技术的对转螺旋桨滑流效应的非定常 RANS 数值模拟可以真

实准确的模拟其滑流流动特性,通过对验证算例单独螺旋桨模型的分析研究,计算结果与风洞试验结果吻合良好,验证了该技术的可行性与准确性。

2) 对转螺旋前桨产生的桨尖涡受到后桨的气动干扰,其滑流流场会发生明显的收缩效应,滑流半径逐渐减小直至收缩完毕。

3) 由于对转螺旋桨前后桨产生的桨尖涡和桨叶尾流之间的气动干扰,对转螺旋桨的气动特性会产生周期性的波动,波动周期与螺旋桨桨叶数相关。前桨对于来流的改变影响了后桨的气动特性,而后桨的存在也影响了前桨的气动特性。对转螺旋桨上游对下游的扰动强于下游对上游的扰动。

4) 对转螺旋桨后桨能一定程度上减弱前桨桨尖涡的强度,具有增加桨涡耗散速度的作用。

5) 自由来流穿过对转螺旋桨会发生两次气流加速,后桨当地气流经过前桨加速,动压得到提升。另外,由于气流的轴向速度和切向速度均有增加,所以在给定桨叶角和转速情况下,相比同等桨叶数和桨叶直径的单独螺旋桨,对转螺旋桨总体拉力系数较大,且随着转速的增大,对转螺旋桨拉力系数增大。相同工况下,对转模型的气动效率比单桨模型的效率有所提升。

致谢:

感谢中国航空工业集团公司第一飞机设计研究院在螺旋桨风洞试验模型和数据方面的大力支持。

参考文献:

- [1] MOENS F, GARDAREIN P. Numerical simulation of the propeller/wing interactions for transport aircraft [R]. AIAA-2001-2404, 2001.
- [2] KELLER D, RUDNIK R. Numerical investigation of engine effects on a transport aircraft with circulation control [J]. Journal of Aircraft, 2015, 52(2): 421-438.
- [3] VAN DEN BORNE P C M, HENGST J V. Investigation of propeller slipstream effects on the fokker 50 through in-flight pressure measurements[R]. AIAA-90-3084, 1990.
- [4] 杨小川, 王运涛, 王光学, 等. 螺旋桨非定常滑流的高效数值模拟研究[J]. 空气动力学学报, 2014, 32(3): 289-294.
YANG Xiaochuan, WANG Yuntao, WANG Guangxue, et al. Numerical simulation of unsteady propeller slipstream [J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2014, 32(3): 289-294. (in Chinese)
- [5] 许和勇, 叶正寅. 螺旋桨非定常滑流数值模拟[J]. 航空动力学报, 2011, 26(1): 148-153.
XU Heyong, YE Zhengyin. Numerical simulation of unsteady propeller slipstream[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(1): 148-153. (in Chinese)
- [6] 麻蓉, 高飞飞, 颜洪, 等. 螺旋桨飞机滑流非定常数值模拟研究[J]. 航空计算技术, 2016, 46(1): 27-30.
MA Rong, GAO Feifei, YAN Hong, et al. Research on unsteady numerical simulation of propeller aircraft slipstream [J]. Aeronautical Computing Technique, 2016, 46(1): 27-30. (in Chinese)
- [7] STUERMER A. Unsteady CFD Simulations of propeller installation effects[R]. AIAA 2006-4969, 2006.
- [8] STUERMER A. Validation of URANS-simulations of contra-rotating open rotor-powered aircraft at take-off conditions[R]. AIAA 2018-1265, 2018.
- [9] STUERMER A, YIN J P. The case for counter-rotation of installed contra-rotating open rotor propulsion system[R]. AIAA 2012-2785, 2012.
- [10] ROOSENBOOM E W M, STUERMER A, SCHRÖDER A. Advanced experimental and numerical validation and analysis of propeller slipstream flows[J]. Journal of Aircraft, 2010, 47(1): 284-291.
- [11] STUERMER A, GUTIEERREZ C O M, ROOSENBOOM E W M, et al. Experimental and numerical investigation of a contra-rotating open-rotor flowfield [J]. Journal of Aircraft, 2012, 49(6): 1868-1877.
- [12] STUERMER A, AKKERMANS R A D, DELFS J W. Active flow control for interaction noise reduction of contra-rotating open rotors[R]. AIAA 2013-3799, 2013.
- [13] STUERMER A. Unsteady CFD simulations of contra-rotating propeller propulsion systems[R]. AIAA 2008-5218, 2008.
- [14] ENVIA E. Contra-rotating open rotor tone noise prediction [R]. AIAA 2014-2606, 2014.
- [15] HOUSEMAN J A, KIRIS C C. Structured overlapping grid simulations of contra-rotating open rotors noise[R]. AIAA 2016-0814, 2016.
- [16] STUERMER A, AKKERMANS R A D. Validation of aerodynamic and aeroacoustic simulations of contra-rotating open rotors at low-speed flight conditions[R]. AIAA 2014-3133, 2014.
- [17] 夏贞锋, 杨永. 螺旋桨滑流与机翼气动干扰的非定常数值模拟[J]. 航空学报, 2011, 32(7): 1195-1201.
XIA Zhenfeng, YANG Yong. Unsteady numerical simulation of interaction effects of propeller and wing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(7): 1195-1201. (in Chinese)
- [18] 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.
- [19] 龚小权, 马明生, 张健, 等. 基于非结构重叠网格的螺旋桨滑流非定常数值模拟[J]. 航空动力学报, 2018, 33(2): 345-354.
GONG Xiaoquan, MA Mingsheng, ZHANG Jian, et al. Unsteady numerical simulation of propeller slipstream based on unstructured chimera grid [J]. Journal of Aerospace

Power,2018,33(2):345-354. (in Chinese)

[20] 洪俊武,梁孝平,王光学,等. 多重网格拼接技术应用研究 [J]. 空气动力学学报,2007,25(1):45-49.

HONG Junwu,LIANG Xiaoping,WANG Guangxue,et al. The research of application for cross-multigrid technology [J]. Acta Aerodynamic Sinica,2007,25(1):45-49. (in Chinese)

[21] VATSA V N,WEDAN B W. Development of a multigrid code for 3-D Navier-Stokes equations and its application to a grid refinement study[J]. Computers and Fluids,1990,18(4):391-403.

[22] DECONNINCK T,CAPRON A,BARBIEUX V. Sensitivity study on computational parameters for the prediction of noise generated by counter-rotating open rotors[R]. AIAA-2011-2765,2011.

(编辑:李岩梅)