

共轴对转螺旋桨的非定常气动干扰

闫文辉¹, 汤斯佳², 王奉明³, 王雪晨¹, 杨 骁⁴

(1. 北方工业大学 机械与材料工程学院, 北京 100144;

2. 中国航空工业集团有限公司 惠阳航空螺旋桨有限责任公司, 河北 保定 071051;

3. 先进航空动力创新工作站, 北京 101300;

4. 清华大学 机械工程学院 精密仪器系, 北京 100084)

摘 要: 为优化共轴对转螺旋桨的气动性能,研究前后桨之间复杂的非定常气动干扰,使用非定常雷诺平均 Navier-Stokes(URANS)方程的数值模拟方法,以及滑移网格技术,对 6×6 构型的共轴对转螺旋桨进行了三维非定常气动干扰计算,获得了共轴对转螺旋桨的气动特性变化规律,并给出了优化气动外形及运行控制的建议。计算结果表明:来流马赫数为 0.38 的情况下,由于非定常气动干扰导致的整个共轴对转螺旋桨的拉力系数和功率系数的脉动幅值为 1.5% 左右,推进效率的脉动幅值在 0.1% 左右。一个旋转周期内,前后桨均出现了 12 次周期波动,后桨由于能够吸收一部分前桨产生的切向滑流能量,推进效率比前桨更高一些,而且能够提高整个桨的效率。另外通过压力系数以及轴向速度的径向分布情况看,70% 左右的桨半径位置上非定常气动干扰强度相对较大。

关 键 词: 气动干扰; 共轴对转螺旋桨; 计算流体动力学; 滑移网格; 气动效率

中图分类号: V275

文献标志码: A

Unsteady aerodynamic interactions of contra rotating propeller

YAN Wenhui¹, TANG Sijia², WANG Fengming³,

WANG Xuechen¹, YANG Xiao⁴

(1. School of Mechanical and Materials Engineering,
North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. Huiyang Aviation Propeller Company Limited,
Aviation Industry Corporation of China, Limited, Baoding Hebei 071051, China;

3. The Advanced Aviation Power Innovation Institute, Beijing 101300, China;

4. Department of Precision Instruments,
School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to optimize the aerodynamic performance of a contra rotating propeller and study the complex unsteady aerodynamic interactions between two propellers of the contra rotating propeller, the unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (URANS) numerical simulation method and sliding mesh technique were implemented. The three-dimensional unsteady aerodynamic interaction of a 6×6 contra rotating propeller configurations was calculated, which indicated the variation of aerodynamic performance of the contra rotating

收稿日期: 2020-02-02

基金项目: 先进航空动力创新工作站项目(HKCX-2019-01-005); 北方工业大学科研启动基金(110051360002)

作者简介: 闫文辉(1979—),男,高级工程师、硕士生导师,博士,主要从事航空推进技术研究。

引用格式: 闫文辉,汤斯佳,王奉明,等. 共轴对转螺旋桨的非定常气动干扰[J]. 航空动力学报,2021,36(7):1398-1405. YAN Wenhui, TANG Sijia, WANG Fengming, et al. Unsteady aerodynamic interactions of contra rotating propeller[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(7): 1398-1405.

propeller. Furthermore, the suggestions for optimizing the aerodynamic layout and operation control method were given. The simulation results showed that the fluctuation of the thrust coefficient and power coefficient of the overall contra rotating propeller was about 1.5% and the fluctuation of the propulsion efficiency was about 0.1% due to the unsteady aerodynamic interference at the cruise Mach number 0.38. There were 12 periodic fluctuations in both the front and aft propellers during one rotation. Because the aft propeller of contra rotating propeller can take advantage of the tangential slipstream energy of the front one, it had much higher propulsion efficiency than that of the front propeller, and the efficiency of the overall rotor can be improved too. In addition, according to the distribution of pressure coefficient and axial velocity, the intensity of unsteady aerodynamic interaction was relatively large at 70% of rotor radius.

Key words: aerodynamic interaction; contra rotating propeller; computational fluid dynamics; sliding mesh; aerodynamic efficiency

螺旋桨飞机经济性好,适应性广,在当前的航空推进技术发展进程中依然具有重要的地位^[1]。比如在军用运输、民用支线客运、通用航空、分布式航空推进等方面都得到了普遍的关注。近年来随着对环境保护、绿色航空的进一步重视,高效率、高功率、零扭矩、低噪声的共轴对转螺旋桨(contra rotating propeller, CRP, 有时也被称为开式转子 contra rotating open rotor, CROR,)重新引起了人们的关注^[2-3],当前国际上也在这方面开展很多相关研究,如欧盟的“净洁天空计划”和 2014 年启动的“净洁天空计划 2”计划等。

共轴对转螺旋桨的前后双排桨存在强烈的气动干扰,而且运行调节参数比单排桨多^[4],因此,研究这种气动干扰的影响,设计高效的共轴对转螺旋桨并掌握良好的运行调节规律^[5]是具有相当的困难。国内外研究者对此做了一些有意义的研究。Stuermer^[6]使用了计算流体动力学和计算声学耦合的方法(CFD-CAA)研究了共轴对转螺旋桨工作特性。通过深入的分析和验证,可靠地预测了共轴对转螺旋桨推进系统的空气动力学和气动声学性能。Falissard 等^[7]研究了巡航、起飞等条件下桨叶变形对共轴对转螺旋桨气动特性和声学的影响,结果表明:前排桨叶变形较大,后排桨叶变形较小,但由于受到前排桨叶影响,后排气动性能表现出了显著变化。Envia^[8]基于 Ffowcs-Williams-Hawkins 方程的高叶片数近似的声学模型,对某共轴对转螺旋桨进行了噪声预测,并与风洞测量结果进行了比较。结果表明,虽然准确预测噪声的绝对频谱水平是困难的,但文中给出的混合方法可以很好地预测噪声趋势,并且计算

成本较低。Shi 等^[9]采用非定常 Reynolds 平均 Navier-Stokes(URANS)数值模拟方法,基于动态面搭接网格(dynamic patched grid, DPG)技术,研究了前桨桨叶尾迹和桨尖涡与后桨的气动干扰作用。研究表明,桨尖涡的相互作用是产生气动相互干扰的主要原因,后桨的存在降低了前桨桨尖涡的强度。Smith 等^[10]研究了锁定前后排桨叶相位、增大桨叶的后掠角、增大前桨直径等方式对降低共轴对转螺旋桨气动干扰造成的噪声的影响,获得了一定的改善效果。Stuermer^[11-12]研究了 URANS 方法在 DLR-TAU (Deutsche Zentrum fur Luft-und Raumfahrt)程序的外流空气动力学模拟中的适用性和准确性,并且使用 DLR-TAU 程序进行了共轴对转螺旋桨非定常数值模拟研究,详细分析两排桨叶之间复杂的气动相互作用,发现零攻角下共轴对转螺旋桨会表现出更好的气动特性。Barth 等^[13]研究了共轴对转螺旋桨发动机对飞机操纵品质和性能的影响,给出了共轴对转螺旋桨对飞行器整体气动特性参数和局部流动细节的数值结果。夏贞锋等^[14]基于 URANS 方法和动态对接网格技术,计算了共轴对转螺旋桨的非定常流动,发现前桨的拉力系数和功率系数减小,后桨的拉力系数和功率系数增大,由于后桨的旋涡恢复能力提高了共轴对转螺旋桨的整体效率,但前桨滑流和桨尖涡会引起后桨桨叶气动力的明显振荡。单鹏^[15]在研究桨扇推进系统中给出了拖动共轴对转螺旋桨/桨扇类气动负荷的差动行星齿轮机构的设计与分析方法,该方法可以快速得到一般总体设计问题中该类齿轮机构所有稳态设计参数的可行解区间与优化解。另外,在对螺旋桨滑流场的仿真及分析方面,赵帅、王科

雷、许和勇、杨小川、李鹏等^[16-20]都做出了大量工作,得到了很多有意义的结论。

本文使用 URANS 方法结合滑移网格(sliding mesh)技术对 6×6 构型的共轴对转螺旋桨进行了非定常气动干扰计算分析。该方法在文献[11,21-23]等多项研究中都得到了成功的应用,能够比较可靠地获得相对旋转物体之间的流场干扰信息,其中包括对转螺旋桨流场、旋翼间干扰流场,以及螺旋桨与机翼间干扰流场的计算。本文首先利用已经掌握的某三叶螺旋桨的风洞试验数据,验证该数值计算方法以及滑移网格技术使用的正确性和适用性。然后,在获得验证的计算方法及网格技术研究基础上,对 6×6 构型的共轴对转螺旋桨的前后桨之间非定常气动干扰流场进行了计算分析,研究了固定前进比、桨叶角、来流马赫数下,桨间干扰对其气动性能的影响规律,分析了共轴对转螺旋桨的拉力特性、功率特性和效率特性随桨叶旋转相位角的变化情况。此外,对单个桨叶受力变化情况,桨叶不同径向位置的压强系数分布,以及轴向速度随轴向和径向分布情况等也进行了详细的计算分析。最后,基于非定常计算结果,总结共轴对转螺旋桨前后桨气动干扰规律,提出了优化改进的措施。

1 计算方法及验证算例

1.1 流动控制方程

在惯性笛卡儿坐标下,当不考虑外加热源和彻体力时,积分形式的非定常 Navier-Stokes 方程组可写成如下形式:

∂/∂t ∫_V Q dV + ∫_∂V F n dS = 0 (1)

式中 Q=(ρ,ρu,ρv,ρw,ρe)^T 为守恒量,ρ、(u,v,w)和 e 分别为密度、直角坐标(x,y,z)下的速度分量和单位质量气体的总能量;t 表示时间;dV 为某一指定区域 V 的边界;n 为边界外法向量;矢通量 F 包括对流通矢量和黏性矢通量;S 为积分区域上的微元面积;湍流模型使用 SST(shear stress transport)模型。

为了后续讨论方便,下面给出用到的螺旋桨性能主要计算公式:

螺旋桨前进比

J = v/nD (2)

螺旋桨推进效率

η = Tv/P (3)

螺旋桨拉力系数

C_T = T/(ρn²D⁴) (4)

螺旋桨侧向力系数

C_x = F_x/(ρn²D⁴) (5)

螺旋桨升力系数

C_y = F_y/(ρn²D⁴) (6)

螺旋桨功率系数

C_P = P/(ρn³D⁵) (7)

其中 v 表示来流速度(飞行速度),n 表示螺旋桨转速(r/s),D 表示螺旋桨直径,T 表示螺旋桨拉力,F_x 表示螺旋桨的侧向力,F_y 表示螺旋桨的升力,P 表示螺旋桨耗功。

1.2 计算验证

针对共轴对转螺旋桨前后排桨叶强烈的非定常气动干扰流动,可以采用 Ansys CFX 的滑移网格方法进行复杂流场的计算。具体的实施策略为:计算域分为两个部分,内部为带有螺旋桨的旋转区域;外部为非旋转的固定外场区域。旋转区域与非旋转区域间设置 interface,选用 transient rotor-stator 方式进行数据的插值交换。空间离散格式均采用高精度格式(high resolution),在时间推进的非定常计算中,计算初场使用固定了前后排桨角相位的定常状态计算结果,每个物理时间步长设置为桨转过足够小的角度对应的实际时间,从而可以保证 Courant 数小于 5.0,达到计算的时间精度要求。计算网格使用 PointWise 软件进行划分,采用其中的 T-Rex(anisotropic tetrahedral extrusion)网格自动生成技术,能够快速、高效地生成包括边界层在内的高质量网格。通过调整第 1 层网格距物面法向间距来保证计算对边界层黏性流动的分辨率,保证最大 Y⁺ 小于 1.0。

为了验证本文所使用计算方法的准确可靠性,首先对某三叶变距单排螺旋桨进行了数值计算,并与试验结果进行对比分析,说明计算方法的准确适用性。该三叶桨直径为 1.0 m,几何模型及桨叶表面网格如图 1 所示。图 2 显示了该螺旋桨在风洞吹风试验台架上安装情况。试验与计算条件:高度为 0 m,来流速度为 82 m/s,攻角为 0°,75%R(R 为桨叶半径)处桨叶角为 55°,试验和计算的前进比 J 范围为 2.5~3.1。图 3 和表 1 中反映了螺旋桨拉力和拉力系数的试验值及计算值对比情况,通过对比,可以看出计算值与试验值的误差基本在 2% 以内,说明本文使用的计算方法准确性比较可靠,能够满足本文研究共轴对转螺旋桨非定常流动的要求。

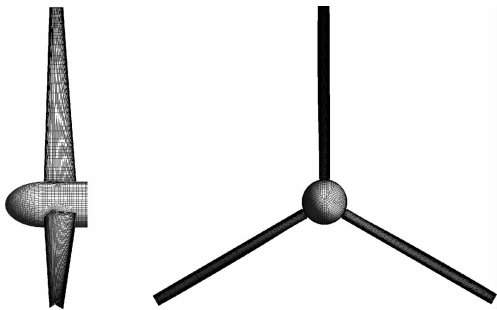


图 1 三叶螺旋桨网格
Fig.1 Grid of a three blade propeller

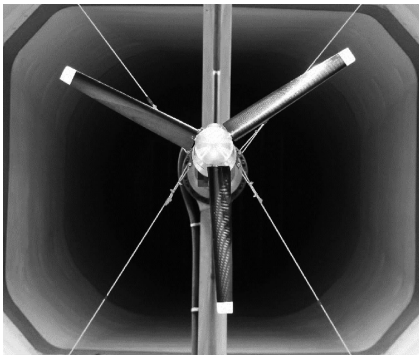


图 2 安装在风洞试验中的螺旋桨
Fig. 2 Propeller fixed in experimental wind tunnel

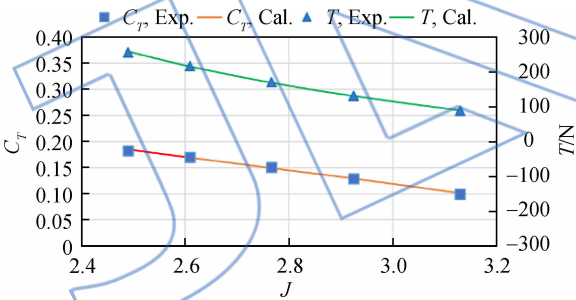


图 3 拉力及拉力系数计算值与试验值的比较
Fig. 3 Comparison of thrust and thrust coefficient between calculation and experiment

2 共轴对转螺旋桨计算分析

本文研究的共轴对转螺旋桨前排有 6 片桨叶,后排也是 6 片桨叶,为 6×6 构型,结构如图 4 所示,蓝色为前桨 Rotor A,红色为后桨 Rotor B。前后桨桨叶直径相同,前后桨距离为 0.17 倍的桨叶直径。前桨桨叶 $75\%R$ (R 为桨叶半径)处桨叶角为 50° ,后桨桨叶 $75\%R$ 处桨叶角为 48° ,前后桨对转,前桨旋转方向为 $-z$ (z 为螺旋桨轴向),后桨旋转方向为 $+z$ 。飞行高度为 9 000 m,来流马赫数为 0.38。前桨前进比 J_A 为 2.30,后桨前进比 J_B 为 2.43,每个物理时间步螺旋桨转动约为 7° 。为达到稳定的周期特性,本文计算了 10 个旋转周期。计算网格为 5 550 万,最大壁面 Y^+ 小于 1.0。图 5 显示了共轴对转螺旋桨桨叶与桨毂附近一部分计算网格,为清楚起见,设置了间隔显示。

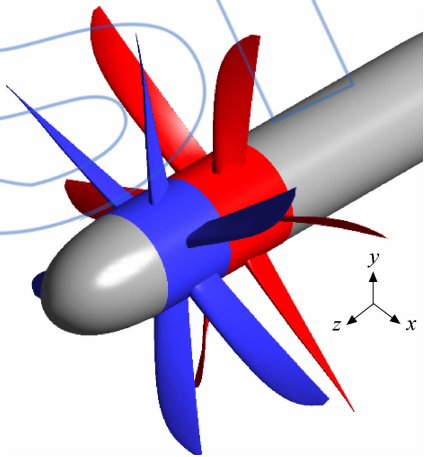


图 4 6×6 构型的对转共轴转螺旋桨
Fig. 4 6×6 contra rotating propeller configuration

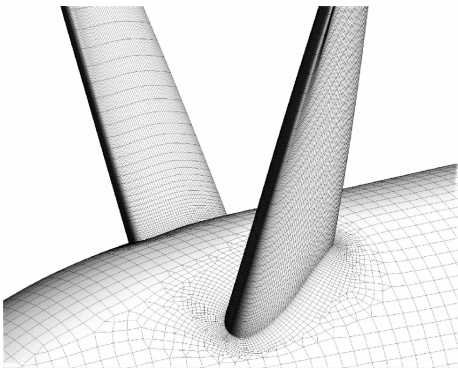


图 5 桨叶及桨毂部分的计算网格
Fig. 5 Partial grid of blade and hub

表 1 拉力系数计算结果与试验值对比

Table 1 Comparison of thrust coefficient between calculation and experiment

J	C_T		误差/%
	试验	计算	
3.13	0.0995	0.1012	1.72
2.92	0.1297	0.1294	-0.23
2.77	0.1511	0.1494	-1.13
2.61	0.1704	0.1697	-0.42
2.49	0.1826	0.1854	1.56

图 6 显示了一个旋转周期内,共轴对转螺旋桨前桨、后桨及整个桨的拉力系数、功率系数以及推进效率随桨叶旋转相位角的变化情况。由于该共轴对转螺旋桨为 6×6 构型,在一个旋转周期内,拉力系数、功率系数以及推进效率均出现了 12 次的周期脉动,显示了前后排桨叶对转引起的明显的非定常气动干扰现象。在该计算工况下,由于非定常气动干扰导致的整个共轴对转螺旋桨的拉力系数和功率系数的脉动幅度为 1.5% 左右,推进效率的脉动幅度在 0.1% 左右,非定常气动干扰对共轴对转螺旋桨平均气动性能的影响不是很大。通过计算还可以知道,该计算条件下,共轴对转螺旋桨的平均拉力系数约为 0.400,平均功率系数约为 1.073,平均推进效率约为 0.858。表 2 中给出了计算获得的共轴对转螺旋桨平均气动特性参数。由于前桨桨叶角略大于后桨桨叶角,前后桨的拉力和功率分配相近,相当于整体共轴对转螺旋桨的一半左右,如果进行桨叶角或者转速的微调,可以达到前后桨的扭矩相互抵消,体现共轴对转螺旋桨零扭矩的优点。另外,后桨由于能够吸收一部分前桨产生的切向滑流能量,导致后桨效率更高,并且提升整个共轴对转螺旋桨的效率。

为了进一步研究非定常气动干扰对单个桨叶气动性能的影响,图 7 给出了前桨(Rotor A)和后桨(Rotor B)中单个桨叶的拉力系数 C_T 、侧向力系数 C_x 、升力系数 C_y 在一个旋转周期内随桨相

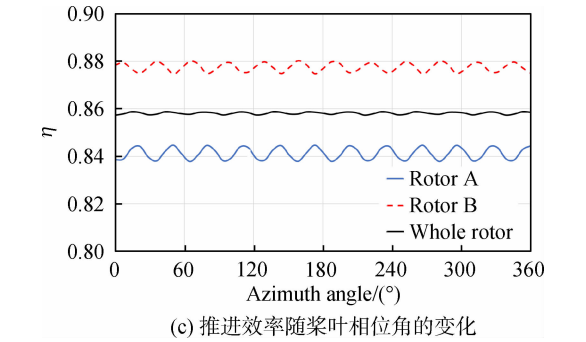
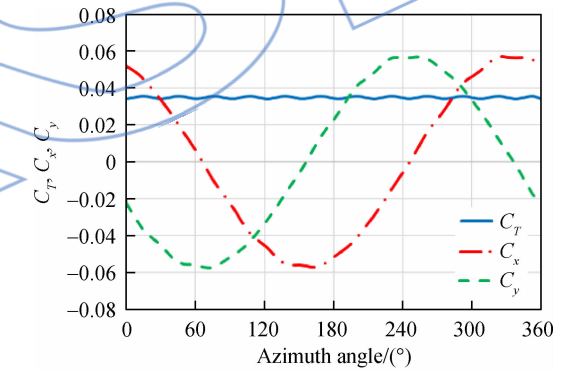


图 6 共轴对转螺旋桨在一个旋转周期内的气动特性
Fig. 6 Aerodynamic performance of the contra rotating propeller during one rotation

表 2 共轴对转螺旋桨的气动特性参数			
Table 2 Aerodynamic performance parameters of the contra rotating propeller			
特性参数	Rotor A	Rotor B	全桨
拉力系数	0.209	0.213	0.400
功率系数	0.572	0.501	1.073
效率	0.841	0.878	0.858



(a) 前桨单桨叶拉力系数、侧向力系数及升力系数随桨叶相位角变化
(b) 后桨单桨叶拉力系数、侧向力系数及升力系数随桨叶相位角变化
图 7 一个旋转周期内单桨叶拉力系数、侧向力系数及升力系数的变化
Fig. 7 Blade thrust, lateral and lift force coefficients of single blade during one rotation

位角的变化情况。可以看出,前后桨单个桨叶的拉力系数的大小基本一致,一个旋转周期内也都出现了 12 次波动,这与图 6 中分析的桨的整体情况一致。在 0° 来流攻角下,前后两个桨受到的侧向力和升力为零,而且在一个旋转周期内每个桨叶所受到的这两个力的平均值也为零,但是单个桨叶受到的侧向力和升力的瞬时值不为零,在一个旋转周期内出现一次幅值很大的正弦波脉动,这种交变的气动载荷对桨叶的强度和振动会产生较大的影响。对于同一个桨而言,单个桨叶的侧向力系数与升力系数刚好相差 90° 的相位角。另外,对比前后两个桨的桨叶受力情况,发现后桨桨叶的侧向力和升力的脉动值要略高于前桨,说明前后桨间的非定常气动干扰对后桨的影响会更大一些。

为了进一步观察后排桨叶受气动干扰的影响,在后桨桨叶半径(R)位置的 25%、55% 以及 75% 位置上取了三个截面,位置如图 8 所示。图 9 显示了后桨桨叶在这个三个半径位置上的翼型压力系数分布,其中横坐标 c 表示桨叶半径位置上的弦长, x 表示螺旋桨侧向距离。由图可以看到后桨桨叶沿着半径增大的方向,翼型压力面前缘位置的压力逐渐降低,在 75% R 位置时,桨叶压力面的前缘部分出现了一个很低的压力值,并且已经远低于了吸力面前缘位置的压力,这导致了一部分负拉力的产生,对共轴对转螺旋桨的效率造成了不利影响。进一步分析发现,在该工况下,后桨在 60% R 位置开始出现上述这种情况。这主要是因为前桨旋转造成的滑流切向分量与后桨的桨叶角、转速等没有达到完全理想的匹配,比如该工况显示在 75% R 位置,气流攻角偏小。通过对桨叶不同半径上翼型的压力系数计算分析,可以获得螺旋桨三维流动的具体情况,进而开展桨叶的扭转优化设计或转速、桨叶角等运行参数的优化匹配。

图 10 给出了共轴对转螺旋桨平均轴向速度沿轴向的变化情况。横坐标为轴向距离 x 与桨直径 D 的比值,纵坐标为平均轴向速度($\bar{u}$)与来流速度(u_0)的比值。可以看出,平均轴向速度在桨的前后有比较明显的增大,增大幅度接近 20%。图 11 显示了前后桨对转过程中,相邻的三个不同时刻下,后桨下游某径向位置上轴向速度的变化情况。三个不同时刻下,前后桨的旋转相位角不同,后桨能够明显感受到前桨的周期性尾迹的扫掠。图中横坐标为轴向速度 u 与来流速度

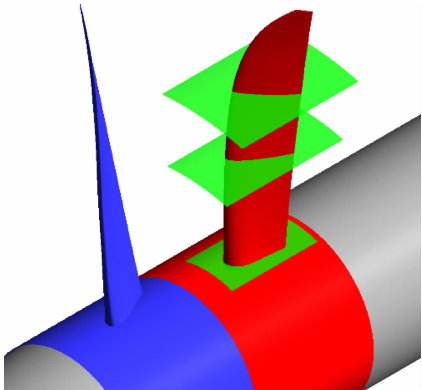


图 8 后桨桨叶不同半径位置的示意图
Fig. 8 Sketch of different radius positions of Rotor B

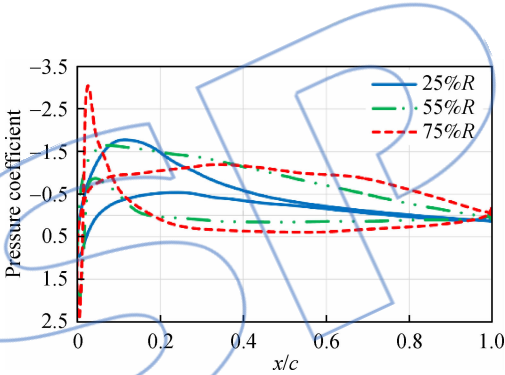


图 9 后桨桨叶不同半径位置上压力系数分布
Fig. 9 Pressure coefficient distribution at different radius position of Rotor B

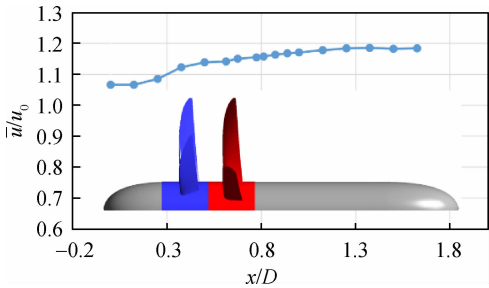


图 10 平均轴向速度沿轴向的变化
Fig. 10 Distribution of average axial velocity along the axis

u_0 的比值,纵坐标为不同径向距离 r 与桨叶半径 R 之比。可以看出由于前后桨对转产生的非定常气动干扰,引起了轴向速度的波动,特别在 70% R 位置上,非定常脉动较大。图 12 显示了共轴对转螺旋桨附近的流线分布情况,桨对转的三维流动形态能够看得比较清楚。

通过以上的仿真分析,对该共轴对转螺旋桨的气动干扰特性有了较深入的认识,为指导后续

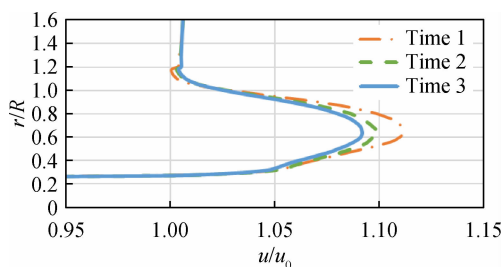


图 11 转子相互干扰引起的轴向速度非定常振荡
Fig. 11 Unsteady oscillations of axial velocity due to the rotor-rotor interactions

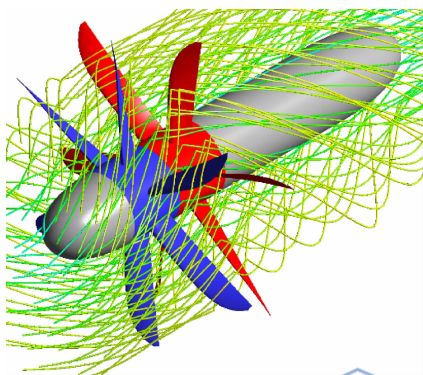


图 12 共轴对转螺旋桨流线分布
Fig. 12 Streamlines distribution of contra-rotating propeller

该对转桨风洞试验中的气动性能测试和控制规律优化提供了一定参考依据。

3 结 论

本文使用基于 URANS 的 CFD 方法及滑移网格技术对共轴对转螺旋桨的复杂流场进行了计算和分析,特别针对桨-桨间非定常气动干扰进行了较为细致的研究,可以得到如下结论:

1) 0° 攻角下, 6×6 构型的共轴对转螺旋桨的非定常气动干扰导致螺旋桨拉力系数、功率系数以及效率等气动参数周期性波动,波动频率为叶片数的 2 倍。为达到共轴对转螺旋桨零扭矩的情况,后桨桨叶角小于前桨桨叶角。后桨由于能够吸收一部分前桨滑流能量,效率更高,并且整桨推进效率介于前桨和后桨之间。

2) 就单个桨叶而言,受到的拉力脉动不大,受到的侧向力和升力脉动较大,并在一个旋转周期内呈现一次正弦脉动,旋转相位角相差 90° ,而且后桨桨叶脉动值要略高于前桨,非定常气动干扰对后桨的影响更大一些。在后续进行完该共轴对转桨风洞试验后,将进一步开展计算与试验的

对比分析。

3) 轴向速度在通过整个共轴对转螺旋桨后有明显的增大。前后桨对转产生的非定常气动干扰导致轴向速度在不同的径向位置出现脉动,特别是在后桨 $70\%R$ 位置上,非定常脉动较大。后桨桨叶不同半径位置的压力系数分布不同,前桨产生的非定常尾迹对后桨影响较大。通过对桨叶不同位置上压力系数的分析,可以对后续桨叶气动外形优化和该对转螺旋桨试验测试提供一定指导,并提高共轴对转螺旋桨的整体效率。

致谢:

感谢先进航空动力创新工作站和北方工业大学科研启动基金的资助,以及中国航空工业集团有限公司空气动力研究院的大力支持。

参考文献:

- [1] 周莉,是介,王占学. 开式转子发动机研究进展[J]. 推进技术, 2019, 40(9): 1921-1932.
ZHOU Li, SHI Jie, WANG Zhanxue. Research progress in open rotor engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(9): 1921-1932. (in Chinese)
- [2] 严成忠. 绿色动力: 开式转子航空发动机[J]. 航空科学技术, 2013(1): 6-12.
YAN Chengzhong. Green power: open rotor aero-engine[J]. Aeronautical Science and Technology, 2013(1): 6-12. (in Chinese)
- [3] 张帅,夏明,钟伯文. 民用飞机气动布局发展演变及其技术影响因素[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 30-44.
ZHANG Shuai, XIA Ming, ZHONG Bowen. Evolution and technical factors influencing civil aircraft aerodynamic configuration[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 30-44. (in Chinese)
- [4] 严成忠. 开式转子发动机[M]. 北京: 航空工业出版社, 2016.
- [5] 康瑞元,陈玉春,蔡飞超,等. 齿轮传动对转桨扇发动机总体性能建模[J]. 推进技术, 2019, 40(11): 2428-2435.
KANG Ruiyuan, CHEN Yuchun, CAI Feichao, et al. Performance modelling of geared contra-rotating propfan engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(11): 2428-2435. (in Chinese)
- [6] STUERMER A. Validation of installation effect predictions through simulations of contra-rotating open rotors at low-speed flight conditions[R]. AIAA 2015-2886, 2015.
- [7] FALISSARD F, BOISARD R, GAVERIAUX R, et al. Influence of blade deformations on open-rotor low-speed and high-speed aerodynamics and aeroacoustics[J]. Journal of Aircraft, 2018, 55(6): 1-15.
- [8] ENVIA E. Aeroacoustic analysis of a high-speed open rotor[J]. International Journal of Aeroacoustics, 2015, 14(3/4): 569-606.

[9] SHI Wenbo, LI Jie, ZHAO Yang, et al. CFD analysis of contrarotating open rotor aerodynamic interactions[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2018, 2018; 9538787. 1-9538787. 13.

[10] SMITH D A, FILIPPONE A, BOJDO N. Noise reduction of a counter rotating open rotor through a locked blade row[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 98; 105637. 1-105637. 16.

[11] STURMER A. Unsteady CFD simulations of contra-rotating propeller propulsion systems[R]. AIAA 2008-5218, 2008.

[12] STURMER A. Validation of an unstructured chimera grid approach for the simulation of propeller flows[R]. AIAA 2004-5289, 2004.

[13] BARTH M, CALMELS B, AUPOIX B. Aerodynamics of counter-rotating open rotors at high speed[R]. AIAA 2012-2786, 2012.

[14] 夏贞锋, 杨永. 对转开式转子非定常气动干扰特性分析[J]. 航空动力学报, 2014, 29(4): 835-843.
XIA Zhenfeng, YANG Yong. Characteristic analysis of unsteady aerodynamic interactions of contra rotating open rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(4): 835-843. (in Chinese)

[15] 单鹏. 对转螺旋桨/桨扇差动行星齿轮机构动力学设计方法与分析[J]. 航空动力学报, 2017, 32(4): 1012-1017.
SHAN Peng. Design method and analysis of differential planetary gear mechanism for contra-rotating propellers/propfans[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(4): 1012-1017. (in Chinese)

[16] 赵帅, 段卓毅, 李杰, 等. 涡桨飞机螺旋桨滑流气动干扰效应及流动机理[J]. 航空学报, 2019, 40(4): 163-174.
ZHAO Shuai, DUAN Zhuoyi, LI Jie, et al. Interference effects and flow mechanism of propeller slipstream for turboprop aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(4): 163-174. (in Chinese)

[17] 王科雷, 祝小平, 周洲, 等. 低雷诺数分布式螺旋桨滑流气动影响[J]. 航空学报, 2016, 37(9): 2669-2678.
WANG Kelei, ZHU Xiaoping, ZHOU Zhou, et al. Distributed electric propulsion slipstream aerodynamic effects at low Reynolds number[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(9): 2669-2678. (in Chinese)

[18] 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 slip stream[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(1): 148-153. (in Chinese)

[19] 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 Aerodynamica Sinica, 2014, 32(3): 289-294. (in Chinese)

[20] 李鹏, 招启军. 倾转旋翼典型飞行状态气动特性的 CFD 分析[J]. 航空动力学报, 2016, 31(2): 421-431.
LI Peng, ZHAO Qijun. CFD analyses of aerodynamic characteristics of tilt-rotor under typical flight conditions[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(2): 421-431. (in Chinese)

[21] 边若鹏, 管丙合, 朱建勇, 等. 桨距角对螺旋桨气动特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(4): 336-340.
BIAN Ruopeng, ZAN Binghe, ZHU Jianyong, et al. Influence of pitch angle on aerodynamic characteristics of propeller[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(4): 336-340. (in Chinese)

[22] 王军杰, 俞志明, 陈仁良, 等. 倾转四旋翼飞行器垂直飞行状态气动特性[J]. 航空动力学报, 2021, 36(2): 249-263.
WANG Junjie, YU Zhiming, CHEN Renliang, et al. Aerodynamic characteristics of quad tilt rotor aircraft in vertical flight[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(2): 249-263. (in Chinese)

[23] 闫文辉, 王雪晨, 周军伟, 等. 旋翼螺旋桨/机翼巡航状态气动干扰规律研究[J]. 推进技术, 2021, 42(2): 290-297.
YAN Wenhui, WANG Xuechen, ZHOU Junwei, et al. Aerodynamic interaction between rotor propeller and wing in cruise state[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(2): 290-297. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)