

对转开式转子非定常气动干扰特性分析

夏贞锋, 杨 永

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

摘 要: 采用动态面搭接技术, 求解非定常雷诺平均 Navier-Stokes 方程实现对转开式转子的非定常气动数值模拟. 对 10 片桨叶单个转子和 10×10 对转开式转子构型分别进行模拟, 对比分析前后两个转子间的气动干扰和滑流流动干扰. 结果表明: 与单个转子相比, 对转开式转子前转子的拉力系数和功率系数减小, 后转子的拉力系数和功率系数则都增大, 并在一个旋转周期内都呈现 20 次周期性波动. 前后转子拉力系数的频谱分析显示振荡发生在桨叶通过频率的偶数倍, 且在 2 倍时后转子拉力的振幅最大. 前转子桨尖涡与后转子的周期性干扰, 引起后转子桨叶力分布的变化和非定常性. 与单个转子相比, 前转子后滑流轴向速度偏大, 周向速度偏小, 后转子对滑流有二次加速及旋涡恢复作用.

关 键 词: 对转开式转子; 气动特性; 非定常流动; 动态面搭接网格; 频谱分析; 涡结构; 干扰

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Characteristic analysis of unsteady aerodynamic interactions of contra rotating open rotor

XIA Zhen-feng, YANG Yong

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aerodynamic Design and Research, School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Unsteady aerodynamics of contra rotating open rotor (CROR) was simulated by solving unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes equations based on dynamic patched technology. To analyze the aerodynamic interactions and slipstream flows interactions between the front-rotor and aft-rotor, a 10×10 CROR configuration was adopted and compared with the 10-bladed single rotor. Result shows that, compared with the single rotor, the thrust coefficients and power coefficients of the front-rotor decrease while those of the aft-rotor increase, with 20 periodical oscillations during one rotation period. The spectral analysis of front-rotor and aft-rotor thrust coefficients show that the fluctuations occur at even multiple numbers of blade passing frequency of single rotor, and the amplitude of aft-rotor thrust at twice the blade passing frequency is prominent. Due to the periodical passing of blade tip vortices of front-rotor, the thrust distributions on aft-rotor blade are changed and fluctuate unsteadily. Compared with the single rotor, the axial velocity increases while the circumferential velocity decreases in the slipstream behind front-rotor. The aft-rotor accelerates the slipstream while recovers swirls.

Key words: contra rotating open rotor; aerodynamic characteristic; unsteady flow; dynamic patched grid; spectral analysis; structure of vortex flow; interaction

面对高油价带来的成本压力和碳排放等造成的环境问题,对转开式转子作为未来民机推进系统的有力竞争者,重新引起了人们的关注^[1]. 20 世纪 70 年代到 80 年代,为发展在高速巡航时仍能保持螺旋桨效率优势的高速螺旋桨, NASA 发起了先进涡桨计划(ATP)^[2], 曾对开式转子进行了大量的研究,并取得了重大的研究进展. 美国通用电气(GE)公司进行了 GE36 无涵道风扇发动机试验,验证了其低油耗和低噪声的潜力,并在波音 727 和 MD-80 飞机上进行了飞行试验^[3-4]. 但随着 1973 年石油危机过后油价的回落,市场对新型推进系统的需求也随之衰落.

虽然与现在的涡扇发动机相比,开式转子额外的高涵道比可以节约燃油达到 20%~30%,并由于其反向旋转的后转子能够恢复部分前转子涡流,在相同的飞行条件和输入功率下,对转开式转子的推进效率可以提高 7%~8%^[5]. 但将该推进系统投入实际运营也面临着很大的挑战,主要是起降阶段的噪声问题和对机体布局的安装影响. 欧洲的“激进的发动机架构系统验证”(DREAM)计划,罗罗公司、CFM 国际公司、德国宇航院(DLR)、荷兰航空航天实验室(NLR)等多家单位对开式转子开展了广泛的研究^[6-10]. 由于对转开式转子流场显著的非定常性,采用非定常的数值模拟方法有利于对转子气动特性和流动干扰及其发展过程进行细节分析^[7,11].

本文基于动态面搭接技术,对对转开式转子的气动性能进行非定常数值模拟. 通过与单个转子时的气动特性进行对比,重点分析前后两个转子间的气动干扰以及一个旋转周期内转子及桨叶力分布的变化和非定常振荡. 通过滑流涡量分布和速度分布对比,分析前转子的桨叶尾流和桨尖涡与后转子的干扰以及后转子的反向旋转对滑流流动特性的影响.

1 数值模拟方法

为了分析前后转子间的非定常气动干扰特性,并捕捉前后转子流动干扰的细节,本文采用在惯性系下直接模拟前后转子旋转时的非定常流动的方式.

惯性系下积分形式的非定常 Navier-Stokes 控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \mathbf{Q} dV + \iint_S \mathbf{f} \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (1)$$

其中 V 为控制体体积, \mathbf{Q} 为守恒变量矢量, S 为控

制体表面积, \mathbf{f} 为通过 S 的净通量矢量,包含黏性项和无黏项, \mathbf{n} 为表面 S 的单位外法向矢量.

采用有限体积法离散求解式(1). 无黏通量项采用 2 阶精度的 Roe 通量差分分裂迎风格式离散,黏性通量项采用 2 阶中心差分格式离散. 时间方向离散采用双时间迭代方法,在伪时间子迭代中采用隐式近似因子化法、当地时间步长等加速收敛措施^[12]. 采用全湍流假设, Spalart-Allmaras 湍流模型^[13]进行湍流计算. 程序采用 Fortran 语言编写.

由于转子与中心体以及对转的前后两转子间存在相对运动,在时间推进过程中,采用基于多块结构化网格的动态面搭接技术实现网格及部件之间的相对运动模拟^[14-15]. 在进行搭接面两侧的流场信息传递时,需要确定搭接面两侧网格单元的对对应关系及相应的插值系数. 以搭接面一侧的网格为源网格,另一侧的网格为目标网格. 在寻找目标网格单元对应的源网格单元的过程中,在源网格的搭接面上,通过牛顿迭代搜索与目标网格单元相关的网格单元,从而将目标网格单元中心坐标用源网格的当地坐标系表示,得到对应的插值系数. 在搭接面上采用双线性插值传递流场信息,在每一个物理时间步更新搭接面的插值系数. 该方法已经在对单独螺旋桨及其安装效应的非定常数值模拟中进行了验证及应用^[15-17].

2 几何模型与计算网格

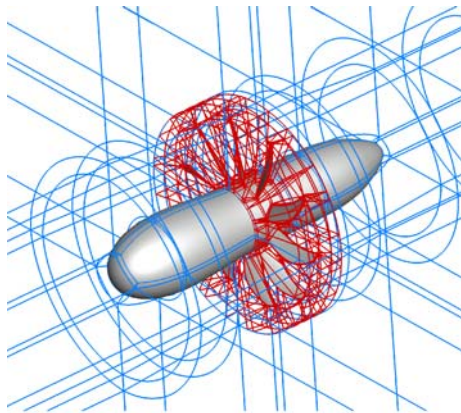
对转开式转子的几何模型选用 10×10 的构型,即前后都为 10 片桨叶的转子,分别记为“10A1”和“10B1”. 前后转子的桨叶相同,桨叶 75% 半径处的桨叶角为 35° ,直径 D 为 4.2672 m,两转子间距为 $0.25D$,中心体直径为 $0.355D$. 前后转子转速 n_s 都固定为 1100 r/min,顺流动方向从前向后看,前转子“10A1”绕顺时针方向旋转,后转子“10B1”绕逆时针方向旋转. 来流马赫数 Ma 为 0.2,对应的单位长度雷诺数 Re 为 4.66×10^6 ,根据前进比的定义

$$\lambda = \frac{Ma \cdot a}{(n_s/60) \cdot D}$$

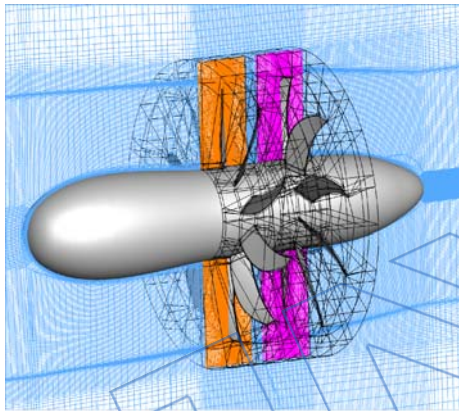
可知前进比 $\lambda = 0.87$,其中 a 为海平面声速.

为了对比分析对转开式转子前后两转子间的相互干扰及其对其气动特性的影响,本文分别对单个前转子和对转开式转子两种构型进行了滑流模拟和气动特性分析. 单个转子“10A”的几何构型与对转开式转子中的前转子“10A1”相同. 单个转

子“10A”和对转开式转子“10A110B1”的几何模型及计算网格如图1(a)、图1(b)所示。



(a) 单个转子



(b) 对转开式转子(CROR)

图1 单个转子和对转开式转子几何模型及计算网格
Fig.1 Geometry model and computational grids of single rotor and CROR

图1(a)中给出了单个转子的计算网格拓扑结构,计算网格分为两大部分:随转子一起旋转的包围转子的圆柱形网格部分,如图中红色所示;以及与中心体一起保持静止的外部网格部分,如图中蓝色所示.对转开式转子的网格拓扑结构与单个转子的类似,图1(b)显示了分别包围两个转子的圆柱形网格部分以及整体剖面网格分布.根据几何模型的轴对称性,首先生成包围单片桨叶的扇形网格,然后旋转生成转子网格,简化了网格生成过程并保证各个桨叶周围网格的一致性.由于转子网格拓扑结构复杂而外部网格拓扑简单,为了减少搭接面数,将前后两个转子网格隔离开来分别与外部网格对接.同时,为了捕捉桨尖涡及桨叶尾流的发展,对转子下游网格进行加密.另外,为了保证流场信息插值的精度,搭接面两侧网格单元法向尺度最好相等,切向尺度差异也不能过

大.单个转子总网格量为1300万,对转开式转子总网格量为1750万.

3 结果与分析

3.1 转子气动特性

来流攻角为 0° 时,在一个旋转周期内,单个转子和对转前后两转子的时均气动性能如表1所示.表1中, F_x 为桨叶拉力, C_t , C_p 和 η 分别为螺旋桨转子的拉力系数、功率系数和效率.

$$C_t = \frac{F_x}{\rho_\infty n_c^2 D^4}$$

$$C_p = \frac{P}{\rho_\infty n_c^3 D^5}$$

$$\eta = \frac{C_t \lambda}{C_p}$$

其中 P 为转子功率, ρ_∞ 为来流密度.

表1 单个转子和对转开式转子的时均气动特性
Table 1 Time averaged aerodynamic characteristics of single rotor and CROR

	F_x/N	C_t	C_p	$\eta/\%$
10A	53862	0.3945	0.5957	57.63
10A1	50437	0.3695	0.5600	57.40
10B1	55705	0.4080	0.6165	57.59
10A110B1	106142	0.7775	1.1765	57.50

表1中的数据只给出转子旋转部分的气动特性,静止中心体部分的气动力不包括在内.表1中的“10A”表示单个转子,“10A1”表示对转开式转子的前转子,“10B1”表示对转开式转子的后转子,“10A110B1”表示对转开式转子,是前后两转子气动特性之和,其中的功率系数 C_p 是基于单个转子几何数据计算的.从表1可以看出,与单个转子相比,对转开式转子的拉力和功率几乎为单个转子的2倍,可以在较小的桨叶直径下满足大功率需求.与传统的单个转子螺旋桨相比,低速时,对转开式转子拉力大,飞机加速性好,有利于实现飞机的短距起降,缩短起飞滑跑距离.与单个转子相比,由于前后转子间的干扰作用,前转子的拉力系数和功率系数都减小了6%左右,而后转子的拉力系数和功率系数则都增大,约为3.4%,但前后两个转子的效率都比单个转子时偏小.前后两个转子之间的气动干扰作用与桨叶数、转子间距、桨叶角等参数有关,这些参数设置不同,相互干扰的影响程度不同.

为了分析在一个旋转周期内对转开式转子气动力的变化,定义桨叶相位角 Ψ . 在桨叶位于竖直向上方向时 $\Psi=0^\circ$,随着转子旋转,分别沿前后转子旋转方向增大. 也就是说,从前往后看,前转子桨叶相位角 Ψ 沿顺时针方向增大,后转子桨叶相位角 Ψ 沿逆时针方向增大. 来流攻角为 0° 时,对于单个转子的每片桨叶来说,在任意相位角,几何构型及桨叶绕流都是相对不变的,所以,单个转子的拉力系数和功率系数是常数^[15]. 但是对于对转开式转子来说,由于前后转子的旋转方向相反,所以两转子间桨叶的相对位置是变化的,从而气动特性在一个旋转周期内也是变化的,如图 2 所示. 在一个旋转周期内,对转开式转子的拉力系数及功率系数出现了 20 次波动. 并且,拉力系数及功率系数几乎同时达到最大或最小值.

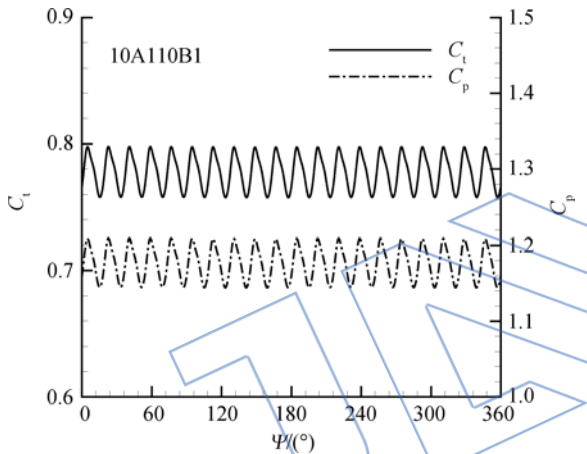


图 2 对转开式转子气动特性在一个周期内的变化
Fig. 2 CROR aerodynamic characteristics developments during one rotation period

分别对对转开式转子的前后两个转子在一个旋转周期内的气动特性变化进行分析,如图 3(a)、图 3(b)所示. 为了更清楚地对比前后转子的气动特性,图 3(a)、图 3(b)中坐标轴的取值范围相同. 可以明显看出,前后转子的拉力系数和功率系数都在一个旋转周期内出现了 20 次振荡,与参考文献[6]中 8F1×8A1 构型的变化规律一致,都为单个转子桨叶数的 2 倍. 这是由于前后两个转子桨叶数及转速相同,沿各自的旋转方向每旋转 18° ,前后转子的桨叶相位位置再次重合,从而引起转子气动特性的周期性波动. 对比图 3(a)、图 3(b),前转子在每次波动中都会出现一个小的振荡,后转子则没有. 并且,后转子的拉力系数和功率系数均比前转子的,振荡幅值也大得多. 前转子的拉力系数和功率系数的波动幅值分

别约为 3%和 5%,后转子的波动幅值则约为前转子相应系数波动幅值的 3 倍. 可以看出:不仅前转子对来流的改变影响到后转子的气动特性,后转子的存在也影响了前转子的气动特性.

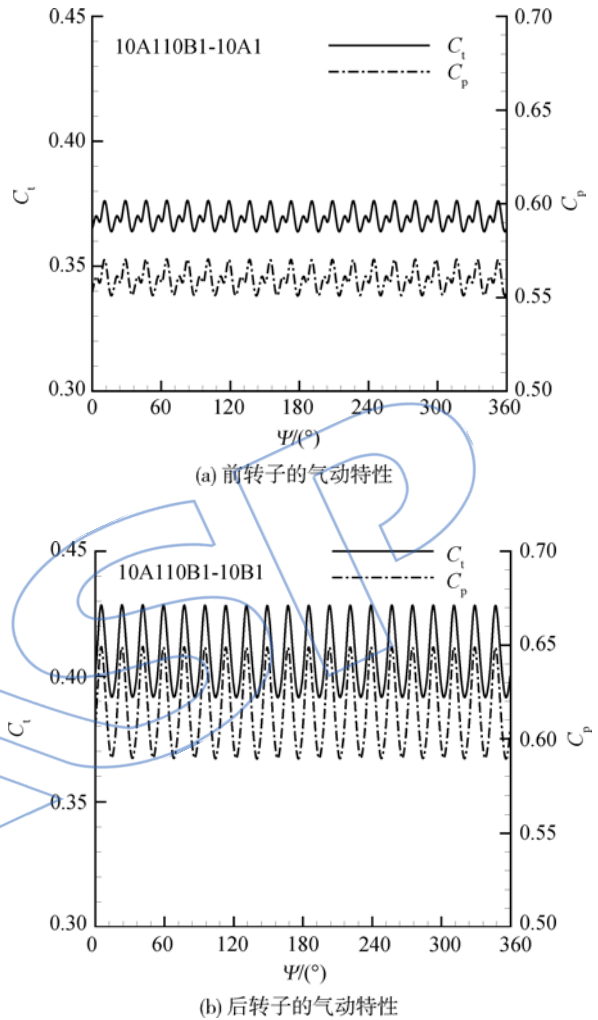


图 3 对转开式转子的前后转子气动特性在一个周期内的变化
Fig. 3 Aerodynamic characteristics developments of front-rotor and aft-rotor of CROR during one rotation period

从图 3(a)、图 3(b)可以看出,前后转子的拉力系数在一个旋转周期内是随桨叶相位角绕恒定的平均值上下波动的. 进一步对前后两个转子的拉力系数变化进行频谱分析,如图 4 所示. 图中的 f_{bp} 为桨叶通过频率,即单位时间内通过某一点的转子桨叶数. 由于前后转子桨叶数及转速相同,所以,前后转子桨叶通过频率相等, $f_{bp} = n_s/60 \cdot N = 183.3 \text{ Hz}$,其中 N 为桨叶数.

图 4 中红色柱状图所示为前转子拉力系数在各个频率的振荡强度. 可以看出,在频率为桨叶通

过频率的 2 倍时($2f_{bp}$),振幅最大;在频率为 $4f_{bp}$ 时,振幅较小;当频率为 $6f_{bp}$ 时,振幅更小.也就是说,前转子的拉力系数的振荡发生在频率为桨叶通过频率 f_{bp} 的偶数倍时,并在更高的倍数,也就是更高次谐波时,振荡强度逐步衰减.

图 4 中蓝色柱状图所示为后转子的拉力系数的频谱分布.整体分布规律与前转子相同,振荡发生在频率为 f_{bp} 的偶数倍的高次谐波,并随频率的增大振幅衰减.但很明显的,后转子拉力系数在频率为 $2f_{bp}$ 的振荡强度很大,到频率为 $4f_{bp}$ 时,振幅衰减非常明显.从该拉力系数的频谱分析可以看出,后转子拉力在频率为 $2f_{bp}$ 时的振荡强度最大.该振荡主要是由前转子的桨尖涡流经后转子的桨叶外段引起后转子桨叶力分布的剧烈变化导致的,具体分析见以下两节对桨叶力分布和滑流流动的非定常性分析.

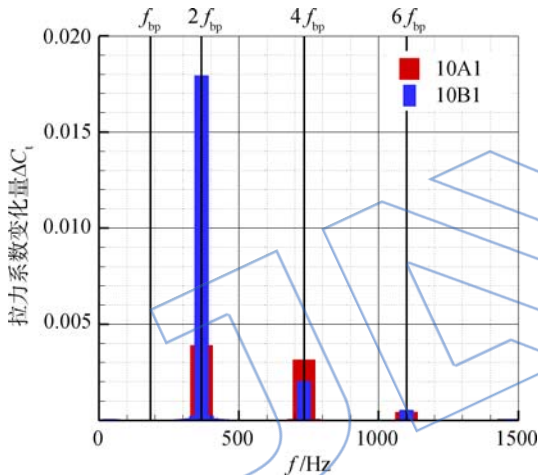
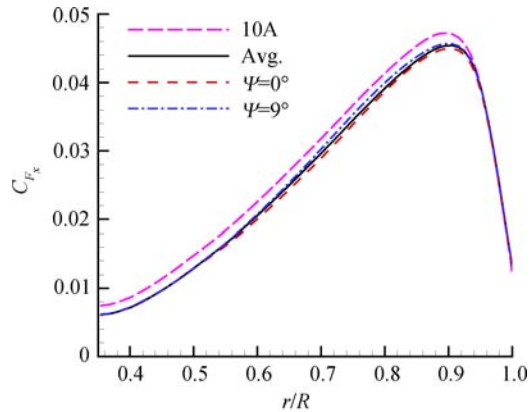


图 4 前后转子拉力系数的频谱分析(10A110B1)
Fig. 4 Spectral analysis of front-rotor and aft-rotor thrust coefficient (10A110B1)

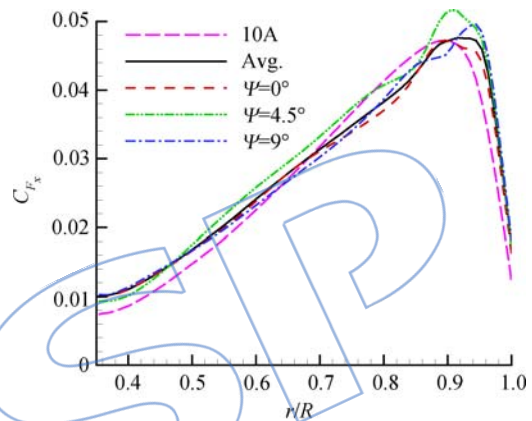
3.2 桨叶力分布

从上述对前后转子气动特性在一个旋转周期内的变化分析可知,对转开式转子的桨叶气动特性随着转子的旋转呈现强烈的非定常性.图 5(a)、图 5(b)分别给出了不同时刻前后转子桨叶上拉力沿径向的分布以及在一个周期内的时间平均分布(图中用 Avg. 表示),并分别与单个转子的桨叶拉力分布进行对比.图中 R 为转子桨叶半径, r 为桨叶剖面径向位置, C_{Fx} 为无量纲的桨叶拉力.来流攻角为 0° 时,单个转子桨叶拉力分布在一个旋转周期内是不变的,图中用“10A”表示.

从图 5(a)可以看出,前转子桨叶上的拉力沿径向的分布是光滑的,并且在不同时刻变化不大.



(a) 前转子桨叶



(b) 后转子桨叶

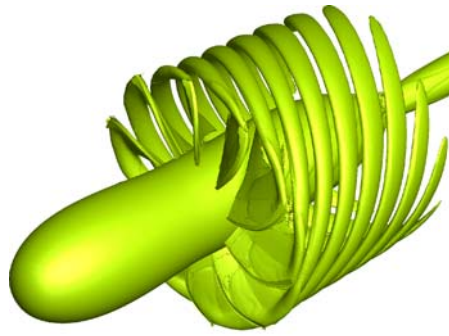
图 5 对转开式转子桨叶拉力沿径向的分布
Fig. 5 Radial distributions of thrust on blades of CROR

与单个转子桨叶拉力分布相比,前转子的桨叶拉力分布在整个桨叶上都偏小.图 5(b)中后转子的桨叶拉力分布在 $85\% \sim 95\%$ 径向位置会出现拐点,并且随着桨叶的旋转在不同时刻出现明显的振荡.这就是图 3(b)中后转子振荡幅度明显比图 3(a)中前转子振幅大的原因,也因此,图 4 中后转子拉力在 $2f_{bp}$ 时振荡强度最大.与单个转子时相比,后转子的桨叶拉力分布在桨叶中段偏小,在内段和外段则都增大.

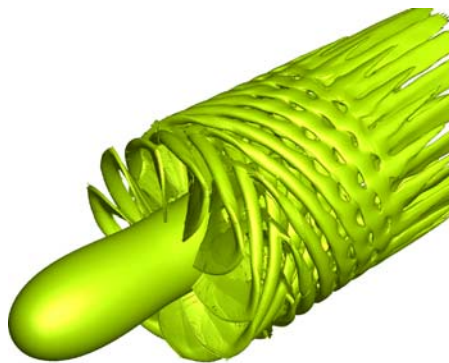
3.3 滑流流动

将对转开式转子的滑流流动结构以及滑流中速度分布分别与单个转子时进行对比,分析两个对转的转子间的相互干扰以及对滑流流动的影响.

图 6(a)、图 6(b)分别为单个转子和对转开式转子滑流中的涡结构示意图,图中所示为无量纲涡量值为 0.7 的涡量等值面分布.从图 6(a)中可以清楚地看出单个转子旋转引起的桨尖涡,而在图 6(b)中,前转子形成的桨尖涡发展到后转子时,受到后转子的干扰,并与后转子旋转引起的桨

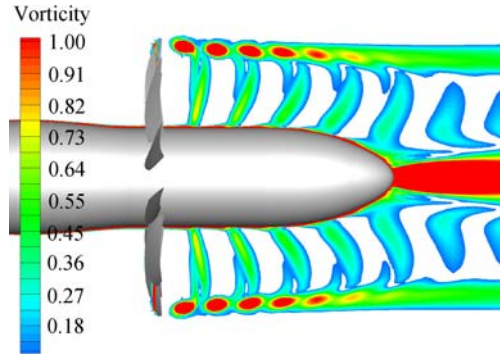


(a) 单个转子

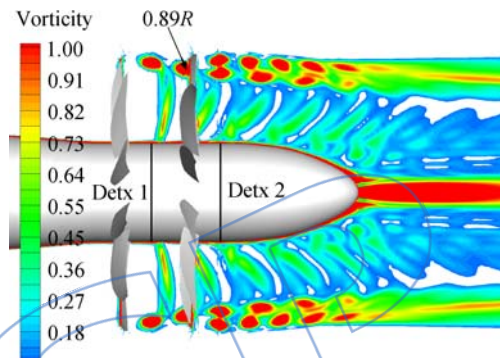


(b) 对转开式转子

图 6 单个转子和对转开式转子的涡结构对比
Fig. 6 Comparison of vortex structures between single rotor and CROR



(a) 单个转子



(b) 对转开式转子

图 7 单个转子和对转开式转子纵向截面涡量分布对比
Fig. 7 Comparison of vorticity distributions on vertical slices between single rotor and CROR

尖涡形成网格状交叉的涡量分布.

为了更详细地分析滑流中涡系结构的发展及其相互干扰,图 7(a)、图 7 (b)给出了两种构型滑流中纵向截面上的涡量分布对比,显示的无量纲涡量值范围大于 0.1,与图 7(a)中单个转子滑流中的涡量分布相比,图 7(b)中对转开式转子流场的涡量分布由于前后转子的桨叶尾流以及桨尖涡之间的相互干扰变得更加复杂.从图 7(a)、图 7 (b)的涡量分布也可以看出,采取的计算策略和网格分布满足准确捕捉流场结构的需要,并且保证在搭接面两侧涡量分布光滑过渡.此外,如图 7 (b)中所示,随着转子的旋转,在某一时刻,前转子的桨尖涡在 $r/R=0.89$ 径向位置处与后转子的桨叶相遇,从而改变了后转子桨叶力沿径向的分布.这就是图 5(b)中后转子桨叶拉力分布在 $85\% \sim 95\%$ 径向位置出现拐点的原因,而前转子桨尖涡和桨叶尾流的周期性通过造成了后转子桨叶力分布的非正常变化.同时可以看出,由于滑流的收缩作用,在到达后转子的滑流区时,前转子的滑流区半径较小.

图 8(a)、图 8 (b)则给出了对转开式转子滑

流中 2 个不同流向位置的涡量分布,无量纲涡量值显示范围大于 0.1. 流向位置如图 7(b)中所示,“Detx1”为前转子后 $0.2R$ 处流向位置,“Detx2”为后转子后 $0.2R$ 处流向位置. 涡量分布的视图为从转子前向后看. 图 8(a)中前转子后 $0.2R$ 处流向位置的涡量分布与单个转子相同位置处的分布几乎相同. 图 8(b)中后转子后 $0.2R$ 处流向位置的涡量分布显示了前后两个转子桨尖涡与桨叶尾流之间的强烈干扰,在桨叶和桨尖下游都形成非常复杂的流动结构.

进一步分析两个不同流向位置处对转开式转子流动速度沿径向的分布,如图 9(a)、图 9 (b)和图 10(a)、图 10(b)所示,其中 u_x 为轴向速度, V_θ 为周向速度, V_∞ 为来流速度. 图中给出了桨叶旋转过程中不同时刻滑流中垂直方向上的速度分布,以及在一个旋转周期内的时间平均分布. 在图 9(a)、图 9 (b)中,还将对转开式转子滑流在前转子下游 $0.2R$ 位置处的速度分布与单个转子滑流中相应位置的时均速度分布进行对比. 与图 8(a)中的垂直方向上的涡量分布对应,图 9(a)、图 9(b)中

$\Psi=0^\circ$ 时在桨尖下游明显的速度分布波动是由桨尖涡的通过引起的. 随着桨叶的旋转, Ψ 增大到 9° 和 18° 时, 速度分布的波动幅值明显减小. 与单个转子流动中的时均分布相比, 受后转子的影响, 对转开式转子滑流中前转子后 $0.2R$ 流向位置的轴向速度偏大, 周向速度则偏小.

比, 桨叶尾流区周向速度值明显减小. 这是由于经过与前转子旋转方向相反的后转子的作用, 滑流区流动的旋涡速度减小, 流动更倾向于轴向流动, 通常称为后转子的旋涡恢复或者滑流导直作用. 因此, 与传统的单个转子相比, 对转开式转子的滑流扭转部分带走的能量损失减少, 甚至为零, 从而提高转子效率.

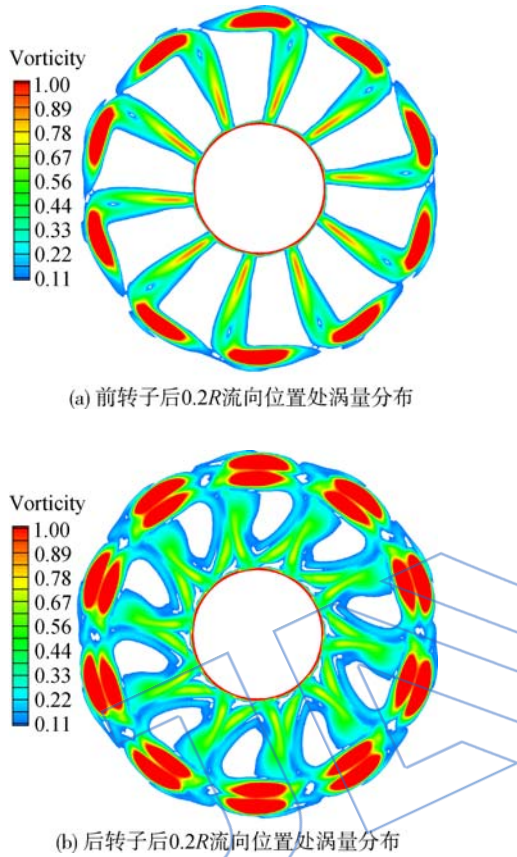


图 8 对转开式转子滑流中两个流向位置的涡量分布
Fig. 8 Comparison of vorticity distributions at two streamwise locations between single rotor and CROR

与图 8(b)中的涡量分布对应, 图 10(a)中 $\Psi=0^\circ$ 的轴向速度分布在桨叶外段的两次波动是由于前后转子的桨尖涡在不同径向位置同时通过引起的. 同时, 由于前后两个转子的旋转方向相反, 图 10(b)中 $\Psi=0^\circ$ 的周向速度分布在桨叶外段的前后波动表示相反方向的桨尖涡在不同径向位置同时通过引起的强剪切层, 在桨叶尾流区则由于相反方向的尾流叠加使得周向速度值变得很小. 与图 9(a)相比, 经过两次转子滑流的加速, 图 10(a)中的轴向速度明显增大, 因此, 对转开式转子的拉力比单个转子时明显增大. 虽然图 10(b)中在不同时刻的速度分布振荡非常明显, 具有强烈的非定常性, 但与图 9(b)中的周向速度分布相

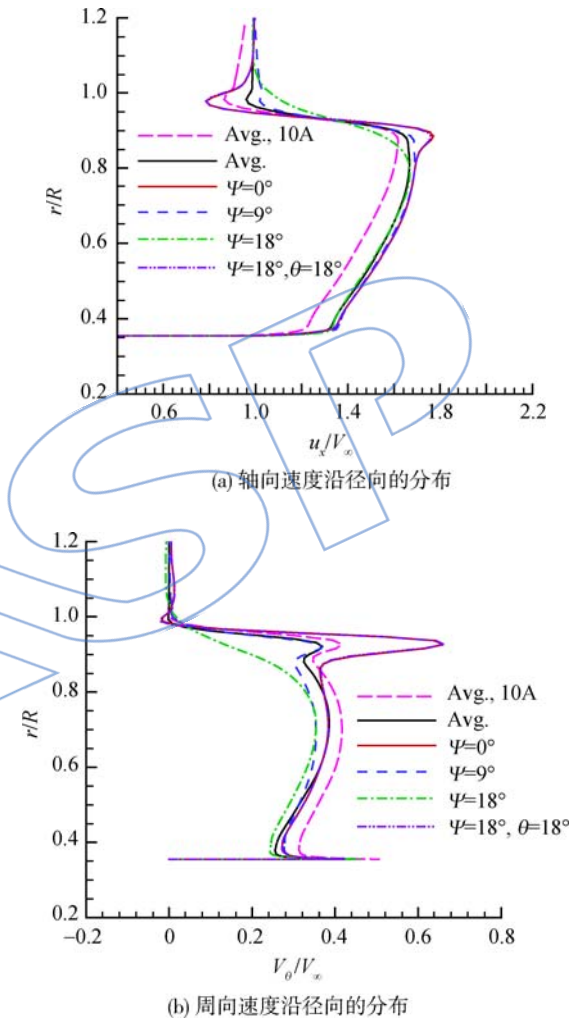
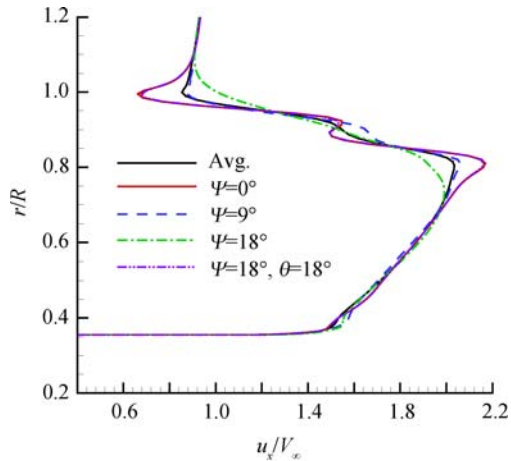
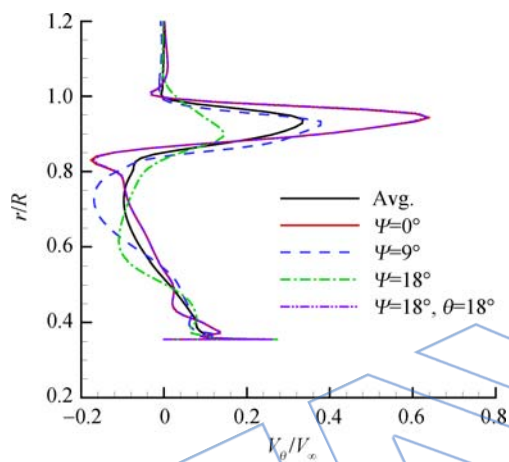


图 9 前转子后 $0.2R$ 处速度分布
Fig. 9 Velocity distributions at $0.2R$ downstream front-rotor

图 9(a)、图 9(b)和图 10(a)、图 10(b)中的“ $\Psi=18^\circ, \theta=18^\circ$ ”表示在 $\Psi=18^\circ$ 时刻, 在 $\theta=18^\circ$ 方位上的滑流速度分布. 方位角 θ 的定义为: 在竖直向上方向 $\theta=0^\circ$, 从转子前向后看, 沿顺时针方向增大. 该速度分布与 $\Psi=0^\circ$ 时刻在竖直方向上的速度分布重合. 这是因为前后转子向相反方向各旋转 18° 后, 前后转子的桨叶相位再次重合, 前后转子的桨尖涡同时在 $\theta=18^\circ$ 方位位置通过. 也就是说, 桨叶每旋转 18° , 前后转子的桨尖涡就会



(a) 轴向速度沿径向的分布



(b) 周向速度沿径向的分布

图10 后转子后0.2R处速度分布

Fig. 10 Velocity distributions at 0.2R downstream aft-rotor

在同一个相位同时通过,这就是在一个旋转周期内对转开式转子前后转子的气动特性出现20次周期性波动的原因。

4 结论

1) 与单个前转子的气动特性相比,对转开式转子中前转子的拉力系数和功率系数均减小,后转子的拉力系数和功率系数则都增大,并在一个旋转周期内都呈现周期性的波动。在前后转子转速及桨叶数相同时,波动次数为桨叶数的2倍。

2) 前后转子拉力振荡发生在桨叶通过频率的偶数倍,并在更高次谐波时振幅衰减,其中后转子在桨叶通过频率的2倍时振荡强度最大。

3) 前转子桨叶拉力沿径向的分布在不同时刻变化不大,但由于受到前转子桨尖涡和桨叶尾流的干扰,后转子的桨叶拉力沿径向分布在85%~95%径向位置出现拐点,并随桨叶旋转呈

现明显的非定常性。

4) 与单个转子的时均值相比,前转子后0.2R处流向位置的轴向速度偏大,周向速度偏小。由于后转子的二次加速,后转子后0.2R处的轴向速度增大,而反向旋转的旋涡恢复作用使得周向速度在桨叶外段前后波动、在尾流区内变得很小。

5) 与传统单转子螺旋桨相比,对转开式转子在同等桨叶直径下拉力大,飞机加速性好,可缩短起飞滑跑距离。并且,后转子的旋涡恢复能力提高转子整体效率。但前转子滑流,尤其是桨尖涡,会引起后转子桨叶气动力的振荡,需要对几何构型进行改进,避开前转子桨尖涡与后转子桨叶的直接干扰。

参考文献:

- [1] M'Bengue L. Toward ACARE 2020: innovative engine architectures to achieve the environmental goals[R]. Nice, France: 27th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2010.
- [2] Hager R D, Vrabel D. Advanced turboprop project[R]. NASA-SP-495, NASA, 1988.
- [3] Harris R W, Cuthbertson R D. UDF/727 flight test program[R]. AIAA 87-1733, 1987.
- [4] Whitlow J B, Sievers G K. NASA advanced turboprop research and concept validation program[R]. NASA Technical Memorandum 100891, 1988.
- [5] Strack W C, Knip G, Weisbrich A L, et al. Technology and benefits of aircraft counter rotation propellers[R]. NASA Technical Memorandum, TM82983, 1982.
- [6] Stuermer A. Unsteady CFD simulations of contra-rotating propeller propulsion systems[R]. AIAA-2008-5218, 2008.
- [7] Stuermer A, Yin J P. Low-speed aerodynamics and aeroacoustics of CROR propulsion systems[R]. AIAA-2009-3134, 2009.
- [8] Stuermer A, Yin J P. Aerodynamic and aeroacoustic installation effects for pusher-configuration CROR propulsion systems[R]. AIAA-2010-4235, 2010.
- [9] Laban M, Kok J C, Prananta B B. Numerical tools for contra-rotating open-rotor performance, noise and vibration assessment[R]. Nice, France: 27th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2010.
- [10] Lepot I, Leborgne M, Schnell R, et al. Aero-mechanical optimization of a contra-rotating open rotor and assessment of its aerodynamic and acoustic characteristics[R]. Istanbul, Turkey: European Turbomachinery Conference, 2011.
- [11] Bechet S, Negulescu C A, Chapin V. Integration of CFD tools in aerodynamic design of contra-rotating propeller blades[R]. Venice, Italy: 3rd CEAS Air and Space Conference, 2011.
- [12] Rumsey C, Sanetrik M, Biedron R, et al. Efficiency and accuracy of time-accurate turbulent Navier-Stokes computa-

- tions[J]. *Computers and Fluids*, 1996, 25(2): 217-236.
- [13] Spalart P, Allmaras S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows[R]. AIAA 92-0439, 1992.
- [14] Bohbot J, Grondin G, Corjon A, et al. A parallel multigrid conservative patched/sliding mesh algorithm for turbulent flow computation of 3D complex aircraft configurations [R]. AIAA-2001-1006, 2001.
- [15] XIA Zhenfeng, YANG Yong, JIAO Jin. Unsteady simulations of propeller flows based on dynamic patched-grid [R]. Xi'an: 2010 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 2010.
- [16] 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)
- [17] XIA Zhenfeng, YANG Yong. Time-accurate versus actuator disk simulations of propeller slipstream flows[R]. Brisbane, Australia; 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2012.

JASSP