

对转桨扇三维流场特性数值研究^{*}

王启航, 周莉, 王占学, 史经纬

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710129)

摘要: 对转桨扇 (Contra-rotating propfan, CRP) 是下一代民用航空推进备选方案开式转子发动机最重要的气动部件, 其气动性能对整机性能影响显著。对不同进距比下的对转桨扇三维流场进行数值模拟, 结合压气机及螺旋桨相关理论分析了对转桨扇内部流场及其滑流区涡结构和滑流特征。结果表明, 对转桨扇后排流动特征及性能参数变化幅度均超过前排。对转桨扇实际进口气流角受到轮毂附面层、诱导速度、抽吸效应的共同影响, 可根据不同叶高位置轴向速度的分布规律判断三种影响分别起主导作用的位置。在对转桨扇滑流区中, 桨尖涡是导致损失的主要原因, 径向涡量衰减比周向和轴向涡量衰减更快。对转桨扇滑流在径向上影响至3.5倍叶高位置。气流出后排桨扇后会持续加速直至静压达到环境压力, 加速区域长度约为5倍桨扇半径。

关键词: 开式转子发动机; 对转桨扇; 滑流; 涡系结构; 推进效率

中图分类号: V211.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 08-210207-10

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210207

Numerical Investigation on Three-Dimensional Flow-Filed Characteristics of Contra-Rotating Propfan

WANG Qi-hang, ZHOU Li, WANG Zhan-xue, SHI Jing-wei

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: Contra-rotating propfan (CRP) is the most critical aerodynamic component of open rotor engine, and its aerodynamic performance has a huge impact on performance of the whole engine. Numerical simulations of the three-dimensional flow field of CRP with different advance ratios were carried out. The internal flow field of CRP and its vortex system structure in the wake and slipstream characteristics were analyzed on the basis of the theories of compressor and propeller. Results show that the flow characteristics and performance of the rear rotor change more than that of the front rotor. The actual inflow angle of the CRP is affected by the hub boundary layer, the induced velocity and the suction effect. The dominant position of three effects can be determined according to the distribution of axial velocity at different spans. The tip vortex is the main cause of loss in the slipstream, meanwhile, the radial vorticity decays faster than the circumferential and axial vorticity. The slipstream of CRP affects 3.5 times of the blade height. The outflow of the rear propfan continues to accelerate until its static pressure achieves the ambient pressure, the length of acceleration area is about 5 times of CRP radius.

Key words: Open rotor engine; Contra-rotating propfan; Slipstream; Vortex system structure; Propulsion efficiency

^{*} 收稿日期: 2021-04-06; 修订日期: 2021-06-02。

基金项目: 国家自然科学基金 (51876176; 52076180; 51906204); 国家科技重大专项 (J2019-II-0015-0036); 陕西省杰出青年基金 (2021JC-10); 民机专项科研项目。

作者简介: 王启航, 博士生, 研究领域为对转桨扇气动设计及流动特性。

通讯作者: 周莉, 博士, 教授, 研究领域为航空叶轮机械/排气系统气动设计及流动控制。

引用格式: 王启航, 周莉, 王占学, 等. 对转桨扇三维流场特性数值研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8):210207. (WANG Qi-hang, ZHOU Li, WANG Zhan-xue, et al. Numerical Investigation on Three-Dimensional Flow-Filed Characteristics of Contra-Rotating Propfan[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8):210207.)

1 引 言

开式转子发动机因其巨大的降低燃油消耗率的潜力被认为是下一代民用航空推进动力的备选方案之一^[1-4]。开式转子发动机依靠对转桨扇(Contra-rotating propfan, CRP)提供推力,对转桨扇外形类似于螺旋桨,双排对转,没有外机匣,叶片稠度小,具有明显的滑流特征且对远场存在干扰。同时,由于飞行马赫数高,进口相对马赫数往往从高亚声速过渡到超声速,桨叶具有宽弦、薄叶型、后掠等特征,其流动特征又与压气机相类似。可见,对转桨扇兼具螺旋桨与压气机的流动特征^[5-6],导致其流动特征极为复杂。并且,对转桨扇作为开式转子发动机最关键的产生推力的部件,其流动特征以及性能优劣会对开式转子发动机整机性能产生巨大影响^[7]。因此,开展对转桨扇三维流场流动特征的研究具有非常重要的意义。

国外关于对转桨扇流动特征的研究始于 20 世纪 80 年代美国提出的先进涡桨项目^[8],随后 GE 公司在飞行平台上对开式转子发动机进行飞行试验^[9-10],测量其飞行性能。80 年代后期,由于油价下跌,对开式转子发动机需求降低,对转桨扇的发展停滞直至 21 世纪。Arne 等^[11-13]数值模拟了对转桨扇流场,并与 PIV 测量结果对比,发现前排桨扇尾流和桨尖涡对后排桨扇的性能影响显著。Marcus 等^[14]研究了对转桨扇与飞机机体的干涉效应。Bryan 等^[15]使用激盘模型求解了对转桨扇子午面静压及速度分布。Jonathan 等^[16]利用 PIV 技术测量了对转桨扇流场特征,捕捉了流场中的涡特征。Charles 等^[17]实验研究了前后排桨扇的相互影响,得到桨扇叶排间的速度分布。同期,国内学者对桨扇流场特征也进行了初步关注。刘政良等^[18]发现单排桨扇的桨叶大部分处于超声速区,激波对桨扇效率产生影响。张振臻等^[19]对不同进距比下的单排桨扇流场进行了数值研究。在对转桨扇方面,夏贞锋等^[20]发现对转桨扇相比于单排桨扇存在推力系数及功率系数差异,前排桨扇对后排桨扇产生周期性干扰。吴侃^[21]数值模拟了对转桨扇三维流动特征,得到其出口总压比、气流折转角等参数分布。

虽然国内研究者们对对转桨扇流动也开始了相关研究,但处于起步阶段,主要基于国外文献的桨扇几何数据开展数值模拟并展示相关流动现象,缺乏对对转桨扇复杂流场的细致机理性分析。由于对转桨扇流动特征与压气机及螺旋桨流动特征存在相似之

处,本文结合压气机和螺旋桨相关理论进行对转桨扇流场的精细化分析,获得不同近距比下对转桨扇前/后排桨扇的性能变化规律,分析对转桨扇的桨叶间内部流场、滑流流场特性和滑流区中的涡结构,研究对转桨扇进口气流及滑流区流场分布的特征及产生机制,以期为高性能对转桨扇设计提供指导。

2 计算方法及模型

2.1 计算模型

本文计算模型采用自行设计的某对转桨扇,对转桨扇单通道模型如图 1 所示,对转桨扇前/后排桨扇的桨叶数均为 8,桨尖处对应的桨扇半径为 2m。对转桨扇的设计点参数如表 1 所示。



Fig. 1 Geometry of CRP

Table 1 Design parameters

	Parameter	Value
Flight condition	Flight altitude/m	10668
	Mach number	0.785
Front rotor	Number of blades	8
	Rotation speed/(r/min)	1100
	Tip diameter/m	4
	Hub diameter/m	1.6
Rear rotor	Number of blades	8
	Rotation speed/(r/min)	-1100
	Tip diameter/m	4
	Hub diameter/m	1.6
	Rotor spacing/m	1.6

2.2 性能参数定义

参照螺旋桨,对转桨扇进距比 J 定义为

$$J = \frac{v_s}{nD} \tag{1}$$

式中 v_s 表示航速; n 表示对转桨扇转速, D 表示对转桨扇直径。

对转桨扇推力系数定义为

$$C_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \tag{2}$$

对转桨扇功率系数的定义为

$$C_p = \frac{P}{\rho n^3 D^5} \quad (3)$$

对转桨扇修正功率系数定义为

$$K_p = \frac{P}{A \rho n^3 D^3} \quad (4)$$

式中 T 表示对转桨扇的推力, P 表示对转桨扇的功率, A 为对转桨扇环形通道面积。

对转桨扇推进效率定义为

$$\eta = \frac{C_T}{C_P} J \quad (5)$$

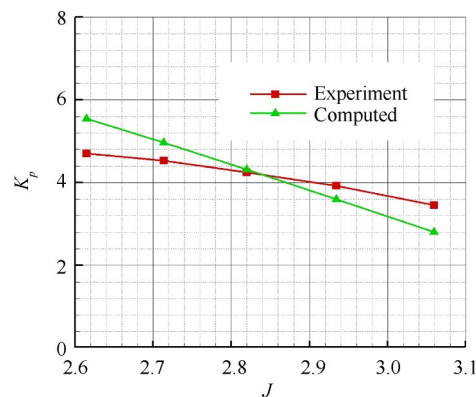
2.3 数值模拟方法

对转桨扇流场的数值模拟采用商用软件 NUMECA 进行三维定常可压缩流场求解。计算采用 Spalart-Allmaras 湍流模型, 空间离散采用中心差分格式。

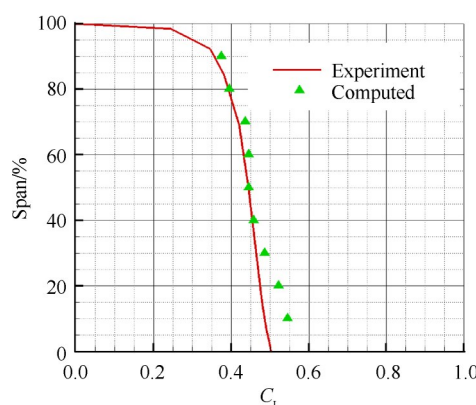
本文选取一个桨叶通道进行计算, 轮毂简化为无限长圆柱面。对于对转桨扇数值模拟, 其计算区域选择相比于压气机等内流流场, 需要考虑远场半径的影响。本文计算区域选取参考文献[22], 将桨尖处的半径计为桨扇半径, 远前方边界距离前排桨盘为 8 倍桨扇半径, 远后方边界距离后排桨盘 8 倍桨扇半径, 径向远场边界半径为桨扇半径的 6 倍。边界条件如图 2 所示。远前方边界及径向远场边界采用压力进口边界条件, 给定速度方向、总温及总压, 远后方边界采用压力出口无反射边界条件, 给定静压。周向边界采用周期性边界条件, 对转桨扇桨叶及轮毂表面采用绝热壁面边界条件, 前/后排桨扇交界面采用混合平面进行数据传递。网格采用结构化网格, 桨叶网格拓扑结构为 O4H, 第一层网格高度为 $10\mu\text{m}$, y^+ 值小于 10, 满足 Spalart-Allmaras 湍流模型的要求。计算网格如图 2 所示。

采用参考文献[23]中设计点飞行马赫数为 0.72, 进距比为 2.8 的 F7A7 实验模型和实验数据验证本文

采用的计算方法的可行性。图 3(a) 给出了不同进距比下, 修正功率系数 K_p 实验结果和数值模拟结果的对比, 可以看出不同进距比下 K_p 的数值模拟与实验结果吻合较好, 在设计点处, K_p 相对误差仅为 1.6%。图 3(b) 给出了设计点前排桨叶升力系数沿径向分布的实验结果和数值模拟结果对比, 在叶片的中部及桨尖的大部分区域, 数值模拟结果与实验结果吻合很好, 最大相对误差出现在 70% 叶高, 为 4.1%。由于文献未明确指出实验时所采用的轮毂造型, 本文在计算方法校核时采用了简化的轮毂造型, 因而, 在偏离设计点进距比较大的工况下及桨根附近区域, 数值模拟得到的修正推力系数、升力系数与实验测量值存在一定偏差。综合可见, 本文采用的数值模拟方法可以模拟出对转桨扇的流动特征。

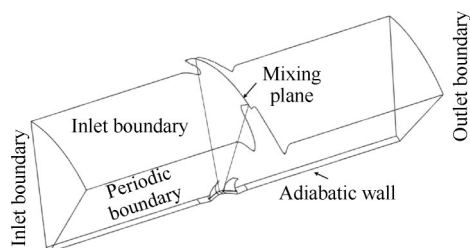


(a) Comparison and verification result of power coefficient

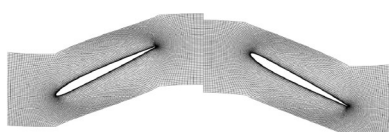


(b) Comparison and verification result of radial distribution of lift coefficient

Fig. 3 Comparison of experiment and CFD results



(a) Computational boundary conditions



(b) B2B grids

Fig. 2 Grid of CRP

为了验证网格的无相关性, 本文采用美国机械工程师协会推荐的网格收敛指数 GCI (Grid convergence index) 进行网格离散误差的评估^[24], 选择对转桨扇的推力系数及功率系数作为关键变量。 GCI 计算的安全系数选为 3, 表 2 示出了网格设置及最终计

Table 2 Grid convergence index		
Parameter	C_T	C_p
N_1, N_2, N_3	1662278, 3911810, 8448730	1662278, 3911810, 8448730
f_1, f_2, f_3	0.936, 0.869, 0.865	3.457, 3.209, 3.195
$\varepsilon_{12}, \varepsilon_{23}$	-0.067, -0.004	-0.248, -0.014
$\varepsilon^{12}, \varepsilon^{23}$	0.077, 0.005	0.077, 0.004
GCI_{12}, GCI_{23}	0.0177, 0.0013	0.0130, 0.0007

算得出的 GCI 。其中, N_1, N_2, N_3 分别代表粗网格、中等网格、细网格的网格单元数, f_1, f_2, f_3 分别表示三种网格密度下计算得到的关键变量值, $\varepsilon_{12}, \varepsilon_{23}$ 表示绝对误差, $\varepsilon^{12}, \varepsilon^{23}$ 表示相对误差, GCI_{12}, GCI_{23} 表示计算得到的 GCI 。可以发现, 中等网格与细网格计算得到的推力系数相对误差为 0.5%, 功率系数相对误差为 0.4%。中等网格与细网格的关键变量 GCI 均小于粗网格与中等网格的关键变量 GCI 。图 4 给出了三套网格计算得到的后排桨叶尾缘处静压沿径向的分布。可以发现, 中等网格计算结果与细网格结果的最大相对误差出现在 84.3% 叶高, 仅为 0.996%。综合考虑三套网格的 GCI 计算结果及后排桨叶尾缘静压沿径向的分布, 最终选取网格量约为 400 万的中等网格进行本文的数值模拟研究。

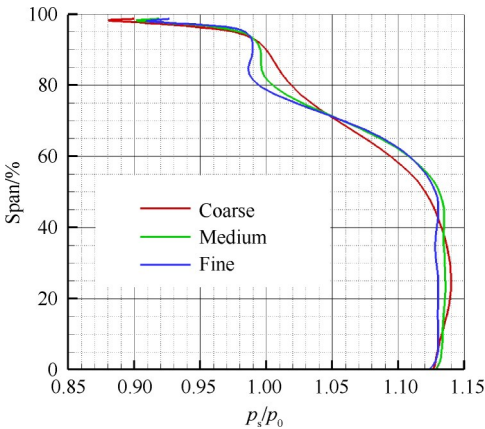


Fig. 4 Comparison of radial distribution of static pressure at rear rotor trailing edge with different grids

3 计算结果及分析

图 5 给出了不同进距比下对转桨扇性能参数分布, 其中设计点进距比为 3.17。进距比变化通过保证航速不变、改变前排及后排桨扇转速实现。可以发现, 在进距比增大时, 对转桨扇推力系数与功率系数均减小, 而推进效率先升高后降低。

图 6 给出了对转桨扇前排及后排桨扇的推力系数及推进效率随进距比的变化曲线。如图 6(a) 所

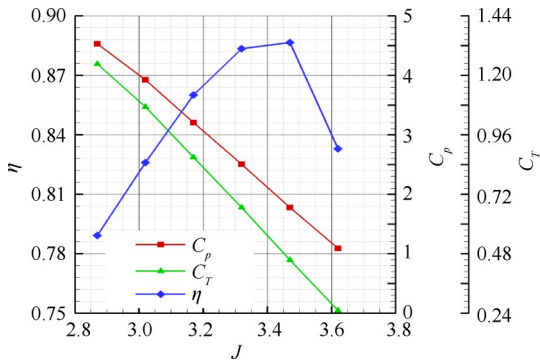
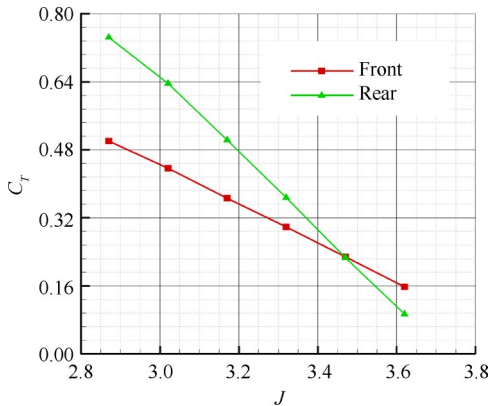
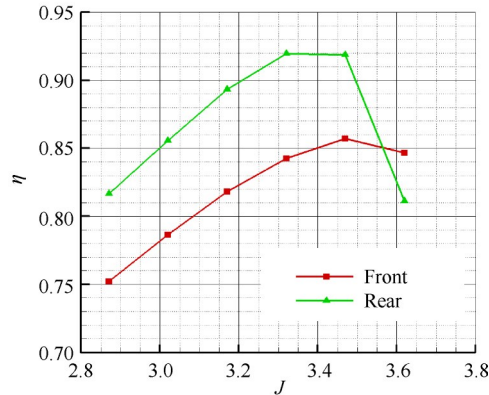


Fig. 5 Performance curve of the CRP with different advance ratio



(a) Thrust coefficient



(b) Propulsion efficiency

Fig. 6 Performance parameters of the front and rear rotors with different advance ratio

示, 前排及后排桨扇推力系数均随进距比增大而减小, 后排桨扇减小幅度大于前排桨扇减小幅度。如图 6(b) 所示, 前排及后排桨扇推进效率随进距比增

大先升高后降低,但是前排桨扇的效率最高点所对应的进距比大于后排桨扇的效率最高点所对应的进距比,并且随进距比增大,后排桨扇推进效率降低的幅度远大于前排桨扇。

为了分析不同进距比下对转桨扇性能参数变化的原因,本文以亚声速基元级速度三角形为例,进行不同进距比下对转桨扇截面速度三角形变化趋势的分析。图7给出了速度三角形示意图,包括了相对速度 w ,绝对速度 c 以及周向旋转速度 u 。角标数字1~4分别表示前排桨扇进口、前排桨扇出口、后排桨扇进口和出口。相对速度和周向方向的夹角为 β ,用角标区分,如 β_{w1} 为前排进口相对速度与周向的夹角。

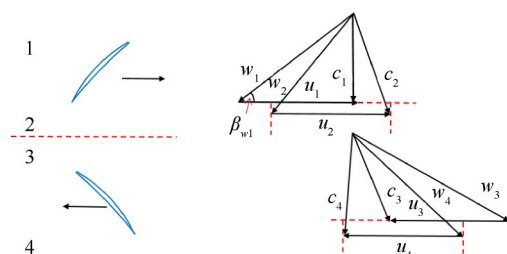


Fig. 7 Velocity triangle of CRP

在进距比增大时,由于前排及后排桨扇的周向旋转速度均减小,前排及后排桨扇的来流攻角均会减小。同时,若前排桨扇气流分离不严重,可认为 w_2 方向基本不变,而 u_2 减小,因而 β_{c2} 增大,即 β_{c3} 增大,所以前排来流攻角的减小会导致后排桨扇来流攻角的减小。因此,后排桨扇的来流攻角减小是由其自身周向旋转速度减小以及前排桨扇来流攻角减小的共同作用导致的,其减小幅度更加剧烈。根据平面叶栅攻角特性,攻角在一定范围内减小时,气流折转角成正比例减小而损失系数先减小后增大,所以前排及后排桨扇的推力系数均降低且推进效率先升后降。由于后排桨扇的来流攻角变化幅度更加剧烈,因而后排桨扇的推力系数与推进效率的变化幅度大于前排桨扇。

3.1 对转桨扇内部流场特征

由于开式转子发动机具有飞行马赫数高且对转桨扇直径大的特征,叶根至叶尖的相对马赫数由亚声速过渡至超声速,使得对转桨扇具有跨声速压气机的特征。相比于压气机,对转桨扇没有外机匣,没有严格的物理边界区分对转桨扇的内部及外部,为了便于研究及描述,本文选取对转桨扇的桨叶通道作为对转桨扇内部流场。

沿轴向选取四个控制面,分别作为前/后排桨扇

的进出口,对其进行流动特征的分析。其中,S1及S2面距离前排桨扇前缘及尾缘0.04倍桨扇半径。S3及S4面距离后排桨扇前缘及尾缘0.04倍桨扇半径。图8给出了S1面示意图。

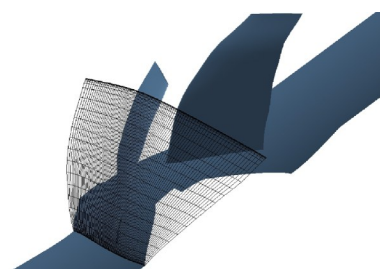


Fig. 8 S1 cross section

在设计点,即进距比为3.17时,对转桨扇前排及后排桨扇进口,即S1和S3面的相对马赫数径向分布如图9所示,由图可见,后排桨扇进口相对马赫数略大于前排,在桨叶中间往桨尖部分差距较大,并且前/后排桨扇在较大的一段叶高范围处于超声速进气条件,但沿叶高最大的相对马赫数不超过1.2。桨根附近受轮毂附面层影响,处于较低的马赫数范围。

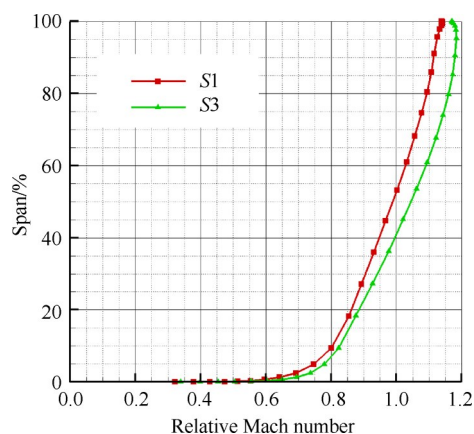


Fig. 9 Relative Mach number of the front and rear rotors' inlet

对转桨扇设计点不同叶高截面静压分布及相对马赫数云图如图10所示。参照图9可以发现,20%叶高处于亚声速来流条件,50%叶高处于跨声速来流条件,80%叶高处于超声速来流条件。因此,在前排及后排桨扇20%叶高的叶片通道内,仅可以观察到强度很小的激波,而在50%叶高,前/后排桨叶通道均出现激波,且后排激波强度大于前排激波。对于80%叶高的叶片通道,前排及后排桨扇均处于超声速进气情况,在大部分叶片通道内,气流相对马赫数均大于1。这些特征与双级对转压气机叶片通道内流动

特征类似^[25]。

对比图 10 中的静压分布可以发现,相同叶高位置,后排桨扇压力面静压值大于前排桨扇压力面,吸力面静压值小于前排桨扇吸力面,这是因为后排桨扇的进口相对马赫数更高,且后排桨扇进口气流已经经过前排桨扇的增压,后排桨扇进口气流总压比前排桨扇进口气流总压更高,相应的对气流做功能力大于前排桨扇,可以产生更大的推力。

为了进一步探究对转桨扇内部流动特征发展趋势,对非设计点的桨扇内部流动特征进行分析。图 11 给出了不同进距比下,对转桨扇前排及后排 50% 叶高的静压分布。

由图 11 可知,在进距比减小时,前排及后排桨扇载荷均增大,后排载荷增大幅度更大。并且前排压力面静压跃升位置基本不变,而后排压力面静压跃升位置后移,说明后排叶片通道中的激波位置随进距比减小而后移。这是因为在进距比减小时,前排及后排桨扇转速增大,前排桨扇进口总压基本不变,所以激波位置基本不变,但随着进距比减小,前排桨扇对气流做功能力增强,前排桨扇出口总压增大,后排桨扇叶片通道进口总压随之增大,因而后排叶片通道内激波向后移动。

图 12 为不同进距比下对转桨扇前排及后排桨扇 50% 叶高的相对马赫数分布云图,图中同样可以观察

到激波的后移,并且低进距比下,激波强度更大。随着进距比变化,前排桨扇桨叶通道流场变化程度小于后排桨扇,这与图 6 中性能参数变化特点一致。

3.2 对转桨扇的进口速度分析

与螺旋桨类似,对转桨扇实际进口气流角与理想进口气流角存在差别。图 13 给出了三个叶高位置,气流在进入 S1 截面之前轴向速度沿轴向的分布。其中, ΔZ_1 为距离 S1 截面的距离。

由图 13 可知,50% 及 80% 叶高位置气流在进入叶排前,轴向速度逐渐增大,20% 及 50% 叶高位置气流轴向速度在 $\Delta Z_1/R$ 为 -0.5 时出现斜率的变化,以这一位置为分界,两侧轴向速度变化规律发生明显变化。20% 叶高位置气流在进入叶排前,轴向速度逐渐减小,在 $\Delta Z_1/R$ 为 -0.04 时出现拐点,轴向速度迅速增大。因此,可根据不同叶高轴向速度变化的量值和斜率,将图 13 中轴向区域分成三部分。

在 $\Delta Z_1/R < -0.5$ 时,由于离叶排较远,轴向速度的变化主要由于轮毂附面层的影响。由于轮毂附面层厚度沿轴向逐渐增厚,气流被向上挤压,实际流通面积减小,因此附面层外气流轴向速度增大,50% 叶高和 80% 叶高的轴向速度沿轴向逐渐增大。20% 叶高的轴向速度沿轴向逐渐减小,这是因为 20% 叶高位置处于轮毂附面层中,随着轮毂附面层厚度增大,同一高度位置,附面层中轴向速度减小。由于附面层

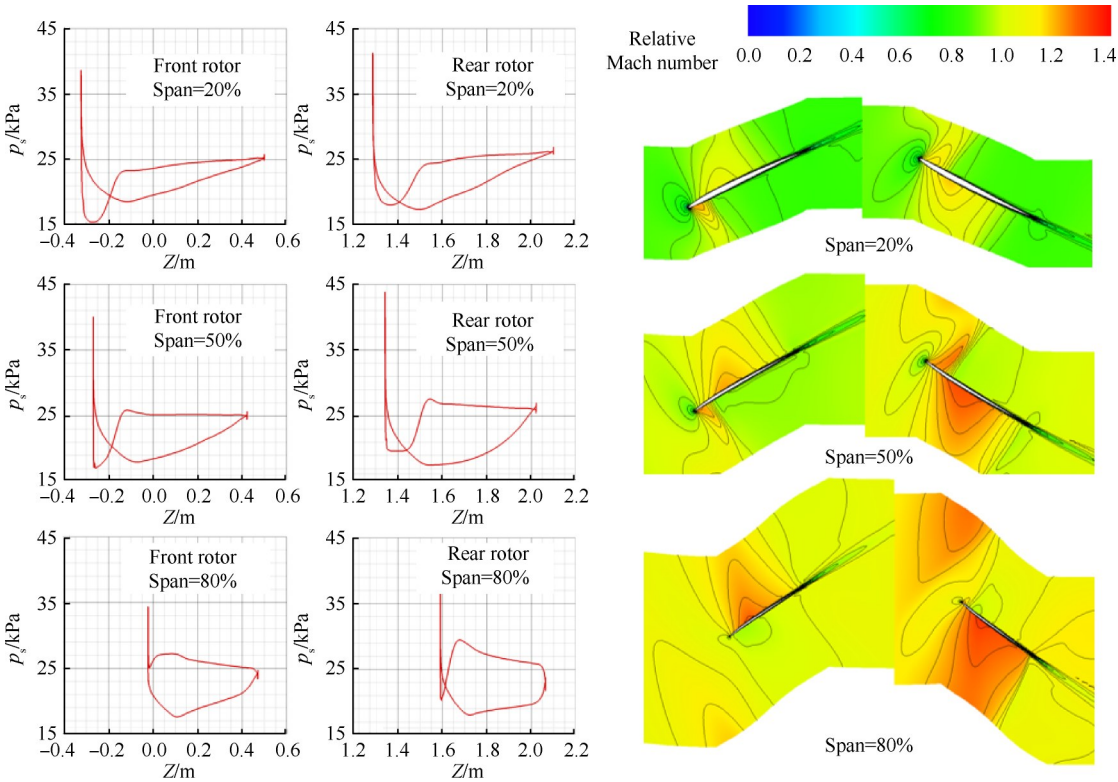
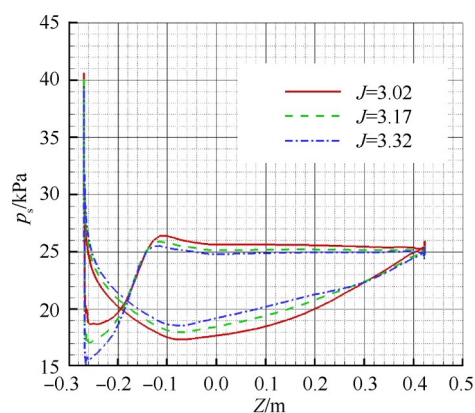
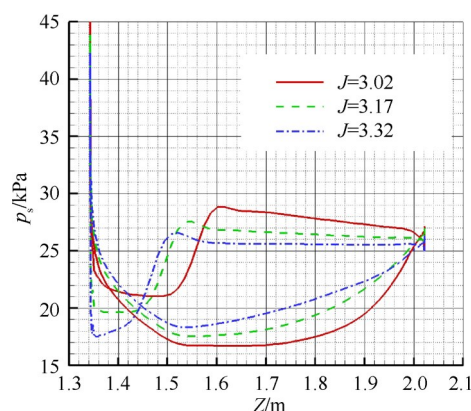


Fig. 10 Static pressure and relative Mach number distributions at different radial position of CRP



(a) Front rotor



(b) Rear rotor

Fig. 11 Static pressure distributions of CRP with different advance ratio at 50% span

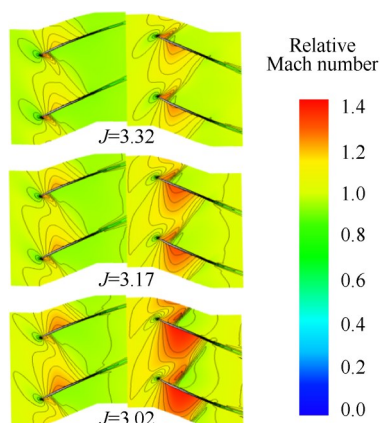


Fig. 12 Relative Mach number distributions of CRP with different advance ratio at 50% span

增厚需要较长的轴向流动距离,因此在轮毂附面层起主要影响的区域,轴向速度变化较小,轴向速度分布斜率基本不变。

当 $\Delta Z_1/R > -0.04$ 时,20%叶高、50%叶高、80%叶高的轴向速度都存在一个明显的加速过程。根据动量理论,这一加速过程产生原因是对转桨扇没有机匣限制,在接近叶排位置会对1倍叶高以上的区域气

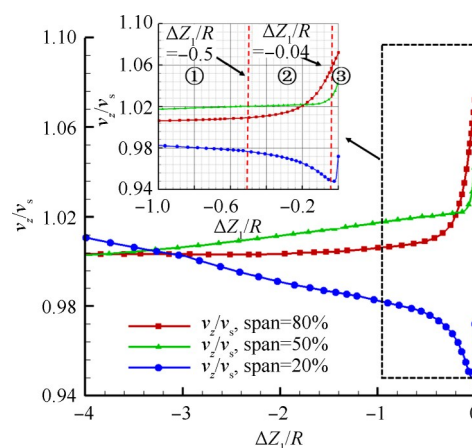


Fig. 13 Axial distribution of axial velocity of CRP at different radial position

流产生抽吸,使得径向上存在一个自上向下的流动,可以理解为叶排对1倍叶高区域气流抽吸导致1倍叶高范围内流量增大,使得全叶高范围内,轴向速度激增。

当 $\Delta Z_1/R$ 处于 $-0.04 \sim -0.5$ 时,反映出诱导速度对轴向速度的影响,最明显的特征是不同的叶高的轴向速度沿轴向以不同的变化速率变化,这样导致不同轴向位置的轴向速度径向分布的斜率发生明显变化。这主要是由于诱导速度大小由控制点与桨叶之间的距离控制,距离桨叶越近,诱导速度越大,轴向速度的变化幅度越大。

基于以上分析,可以发现,进口气流在进入桨扇叶排之前,受到轮毂附面层、诱导速度以及抽吸效应三种作用的影响,这三种作用分别有着起主导作用的轴向位置。轮毂附面层起主导因素的区域,速度分布斜率几乎保持不变,并且此斜率接近于零;在诱导速度起主导因素的区域,轴向速度沿轴向的分布斜率会不断发生变化,不同叶高处的分布斜率也会差别巨大,存在桨叶中上部轴向速度增大而桨根的轴向速度减小的现象。并且距离叶排越近,轴向速度变化越剧烈;在叶排抽吸效应起主导因素的区域,不同叶高轴向速度均快速增大。因此,可以根据不同叶高位置轴向速度沿轴向位置分布的斜率判断三种分别起着主导作用的轴向位置。

从图13也可看出,对于对转桨扇而言,轮毂附面层导致的速度变化量较小,抽吸效应导致的速度变化规律在全叶高保持一致,相对简单,但诱导速度的存在会导致全叶高范围内速度的不规律变化,其影响规律相对复杂,会对对转桨扇实际进口气流角产生显著影响,继而影响对转桨扇性能,因此本文基于

三种分别起主导作用的轴向位置的划分,选取诱导速度影响起主导作用的轴向位置,进行对转桨扇诱导速度沿径向分布规律的研究。给出对转桨扇轴向及周向诱导速度系数的定义

$$\begin{cases} a = (v_{z,(\Delta z_1/R = -0.04)} - v_{z,(\Delta z_1/R = -0.5)})/v_s \\ a' = (v_{\theta,(\Delta z_1/R = -0.04)} - v_{\theta,(\Delta z_1/R = -0.5)})/v_s \end{cases} \quad (6)$$

式中 a 和 a' 分别为轴向和周向诱导系数, v_z 和 v_θ 分别为轴向和周向速度, v_s 为航速。图 14 给出了轴向及周向诱导速度系数沿径向的分布规律。可以发现,轴向诱导速度系数从桨根到桨尖呈增长趋势,周向诱导速度系数在叶高的大部分区域接近 0,轴向及周向诱导速度系数在桨尖均存在突变。此分布规律与对转桨扇的对转特征相关,前排桨扇及后排桨扇在进口截面产生的诱导速度在轴向上相互叠加,在周向上相互抵消。

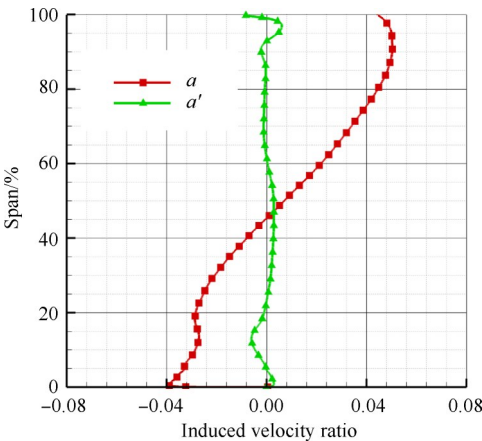


Fig. 14 Radial distribution of rotors' axial and tangential induced velocity ratio

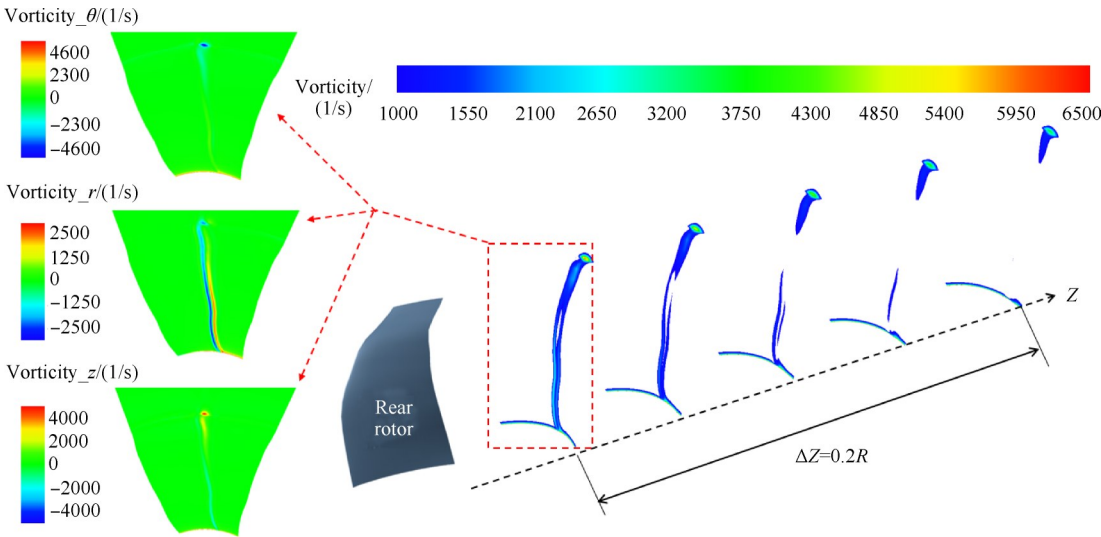


Fig. 16 Vorticity contours at different axial positions in CRP's wake flow

3.3 对转桨扇滑流区的涡特征

图 15 给出了对转桨扇桨尖流线及熵的分布图,由图可见,对转桨扇桨尖无机匣限制,由于桨叶吸力面与压力面间的压力差,会产生桨尖的气流上洗作用,由压力面转向吸力面,在桨尖,气流沿相对速度方向的运动叠加了上洗运动,形成一个螺旋形的流线,并且这道螺旋形流线穿过熵值高点,此旋涡运动是导致桨尖损失的主要原因。

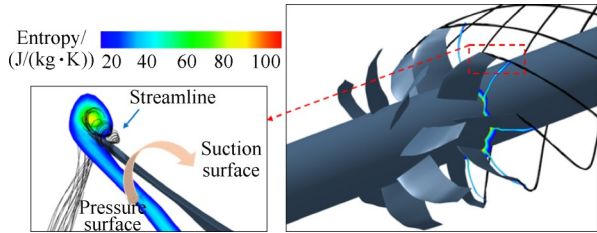


Fig. 15 Streamlines at tip of blade

图 16 给出了对转桨扇滑流区中涡量的空间分布以及三个涡量分量。可以发现,对转桨扇滑流区的涡结构中主要包括了轮毂附面层涡、桨叶尾缘逸出涡、桨尖涡。三种涡分别位于桨根、桨中、桨尖。桨尖及近轮毂处为截面涡量最大的位置。通过将每个轴向位置的涡量分解为周向、径向、轴向三个方向的涡量分量,可以发现桨尖涡导致了滑流区中轴向及周向涡量的产生,桨叶尾迹的掺混导致了滑流区中径向涡量的产生。轮毂附面层导致了周向及径向涡量的产生。对比不同轴向位置的涡量云图可以发现,径向涡量衰减比周向和轴向涡量衰减更快。

3.4 对转桨扇的滑流特征

对转桨扇由于没有机匣的限制,因此其外部流

动具有螺旋桨的滑流特征。对转桨扇会对径向远场以及下游滑流区产生干涉。

图17给出了不同截面位置轴向速度分布趋势。可以发现径向位置小于100%时,速度分布呈中间高两边低的分布规律,在径向位置大于100%时,前排及后排桨扇进口速度随径向位置增大而减小,后排桨扇出口速度随径向位置增大而增大,这是由桨尖涡叠加了远场的来流速度导致的。由于桨尖涡由压力面转向吸力面,因此在径向位置小于桨扇半径的区域,桨尖涡使轴向速度增大;在径向位置大于桨扇半径的区域,桨尖涡使轴向速度减小。随着径向位置增大,桨尖涡的影响逐渐减小,大约在350%叶高位置,远场速度几乎不再发生变化,可见对转桨扇会对约3.5倍叶高的流场区域产生影响,并且这种影响是通过桨尖涡实现的。

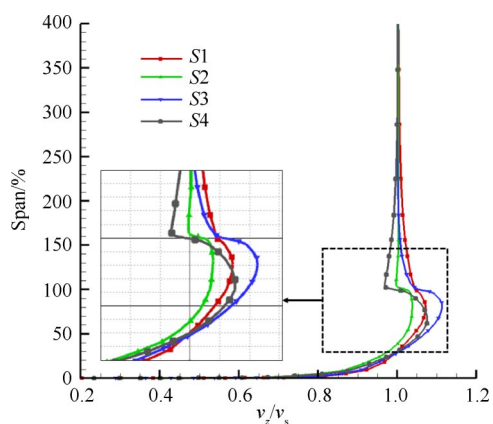


Fig. 17 Radial distribution of axial velocity of CRP at different axial position

气流过对转桨扇后进入滑流区,由于对转桨扇叶排中存在明显激波现象,因此对转桨扇的滑流区参数分布规律与常规低马赫数螺旋桨存在差异。图18给出了对转桨扇滑流区中总压及静压的空间分布,可以发现桨尖存在一个低总压区,这是由于桨尖涡的存在而导致的。高总压区集中于桨叶中上部,压力面一侧高总压区面积大于吸力面一侧。总压分布沿轴向变化较小且量值基本不变。静压分布与总压分布不同,高静压区集中于桨叶中下部,在桨尖存在一个径向发展的低压区,这与图10所示的对转桨扇吸/压力面静压分布规律相同,桨尖低压区则是由桨尖涡导致的。静压分布规律沿轴向变化较小,但量值不断减小并逐渐稳定。

当总压沿轴向基本不变而静压不断变小时,说明滑流区存在一个气流加速过程。为了显示滑流区

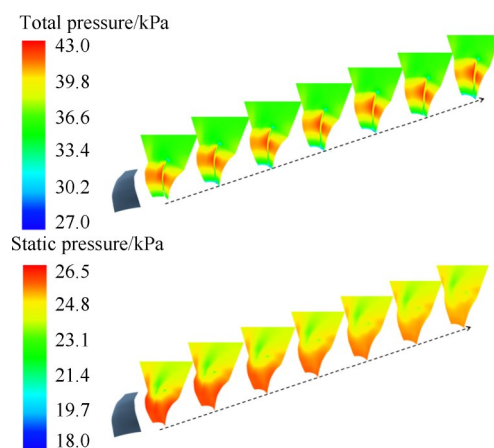


Fig. 18 Total pressure and static pressure distribution at different axial positions in CRP's wake

中速度轴向发展趋势及影响范围,选取50%叶高为典型高度进行研究。图19给出了50%叶高处的轴向速度及静压分布。可以发现,气流离开后转子后还会逐渐加速直到稳定,静压随之从高降低,直到和环境静压相同,根据动量理论,这是因为气流过桨扇叶排后总压突然上升,而速度无法突然变化,因而总压的增大表现于静压的增大,而气流最终需与环境静压相同,所以气流在滑流区中存在这个压力势能转化为动能的过程。整个加速区域约为5倍桨扇半径。

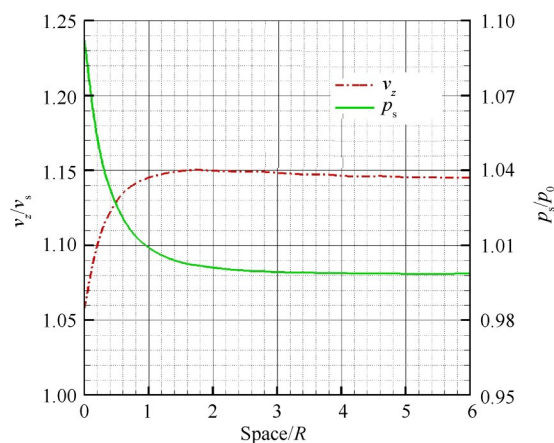


Fig. 19 Axial distribution of axial velocity and static pressure at 50% span

4 结论

本文对对转桨扇流场进行了三维数值模拟,基于压气机风扇和螺旋桨的相关分析方法进行了流场特性分析,可以得到以下结论:

(1)进距比增大时,对转桨扇推力系数与功率系数均减小,而推进效率先升高后降低。由于后排桨

扇的来流攻角受自身流动状态以及前排桨扇来流攻角共同作用影响,不同进距比下,对转桨扇后排流动特征及性能参数变化幅度均超过前排。

(2)前排及后排桨扇主要做功区域均处于桨叶中上部,后排桨扇对气流做功能力大于前排桨扇。对转桨扇50%叶高处于跨声速来流条件,前/后排桨叶通道均出现激波,且后排激波强度大于前排激波。随进距比减小,前排桨扇激波位置基本不变,后排激波位置后移。

(3)对转桨扇实际进口气流角受到轮毂附面层、诱导速度、抽吸效应共同影响。可根据不同叶高位置轴向速度沿轴向分布的斜率判断三种影响分别起主导作用的轴向位置。对转桨扇轴向诱导速度系数从桨根到桨尖呈增长趋势,周向诱导速度系数在叶高的大部分区域接近0。

(4)对转桨扇滑流区中的径向涡量衰减比周向和轴向涡量衰减更快。由于桨尖涡的存在,对转桨扇在径向上影响至约3.5倍叶高位置。轴向上,出桨扇叶排气流不断加速,加速区域约为5倍半径长度。

致 谢:感谢国家自然科学基金、国家科技重大专项、陕西省杰出青年基金和民机专项科研项目的资助。

参考文献

- [1] 胡晓煜. 开式转子发动机, B737/A320的后继机动力? [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007(3): 61-62.
- [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.
- [3] 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 Zhan-xue. Research Progress in Open Rotor Engine[R]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(9): 1921-1932.)
- [4] 王 轩. 开式转子发动机设计与应用浅析[J]. 电子测试, 2016(10): 18-19.
- [5] 周亦成. 桨扇推进器气动设计方法分析[J]. 航空动力, 2018(3): 45-47.
- [6] 周亦成, 单 鹏. 可压升力面理论桨扇气动设计反问题方法[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1456-1469.
- [7] 严成忠. 开式转子发动机[M]. 北京: 航空工业出版社, 2016.
- [8] Hager R D, Vrabel D. Advanced Turboprop Project[R]. NASA-SP-495, 1988.
- [9] Nichols H E. UDF Engine/MD80 Flight Test Program [R]. AIAA 88-2805.
- [10] Cartyle Reid, Cincinnati. Overview of Flight Testing of GE Aircraft Engines UDF Engine[R]. AIAA 88-3082.
- [11] Arne Stuermer. Unsteady CFD Simulations of Contra-Rotating Propeller Propulsion Systems [R]. AIAA 2008-5218.
- [12] Arne Stuermer, Marquez C O Gutierrez, Eric W M Roosenboom, et al. Experimental and Numerical Investigation of a Contra Rotating Open-Rotor Flowfield[J]. *Journal of Aircraft*, 2012, 49(6): 1868-1877.
- [13] Stuermer R A, Akkermans D. Validation of Aerodynamic and Aeroacoustic Simulations of Contra-Rotating Open Rotors at Low-Speed Flight Conditions[R]. AIAA 2014-3133.
- [14] Marcus Barth, Benoit Calmels, Bertrand Aupoix. Aerodynamics of Counter-Rotating Open Rotors at High Speed [R]. AIAA 2012-2786.
- [15] Bryan Farrar, Ramesh Agarwal. Computational Fluid Dynamics Analysis of Open-Rotor Engines Using an Actuator Disk Model [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 31(4): 989-993.
- [16] Jonathan Vlastuin, Clément Dejeu, Louet A, et al. Open Rotor Design Strategy from Wind Tunnel Tests to Full Scale Multi-Disciplinary Design[R]. ASME 2015-GT-43300.
- [17] Charles DeLorenzo, Jared Deleon, Paul E Slaboch. Effect of Aft Rotor on Forward Rotor Blade Wakes in Open Rotor Propulsion Systems[R]. ASME 2018-GT-76183.
- [18] 刘政良, 严 明, 洪青松. 开式转子叶片气动设计研究[J]. 航空科学技术, 2013(6): 37-40.
- [19] 张振臻, 李 博, 周诗睿, 等. 一种桨扇的气动设计和数值仿真研究[J]. 重庆理工大学学报, 2020, 34(1): 195-204.
- [20] 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.
- [21] 吴 侃. 基于内外域结构的开式转子流场数值模拟[J]. 科技创新与应用, 2015(32): 52-53.
- [22] Florian Danner, Christofer Kendall-Torry, Hans-Peter Kau. Aerodynamic Origin of Rotor-Rotor Interaction Noise from Unducted Propulsors [R]. ASME 2013-GT-95572.
- [23] Hoff G E. Experimental Performance and Acoustic Investigation of Modern, Counterrotating Blade Concepts [R]. NASA-CR-185158. 1990.
- [24] Roache P J. Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1997, 29(1): 123-160.
- [25] 王掩刚, 刘 波, 陈云永, 等. 双级对转压气机流场分析研究[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(1): 97-101.

(编辑:张 贺)