DOI: 10.3901/JME.2020.21.149

对转风扇排间干涉效应对下游转子颤振特性影响的数值模拟研究

李德刚¹ 张翔²

(1. 石油工业机械产品质量监督检验站 大庆 163316;
2. 西北工业大学动力与能源学院 西安 710072)

摘要: 为了探究对转风扇排间干涉效应对下游转子颤振特性的影响,在多叶排环境下,使用谐波平衡法进行振荡叶片非定常流数值模拟。通过颤振预测的能量法考察两种不同多排模型下叶片表面非定常压力响应和气流做功的差异,探讨了对转结构下上游扰动对下游转子气动弹性稳定性的作用机制。研究结果显示:下游振荡叶排的气动阻尼因上游转子的气动干涉而降低,造成这种颤振特性差异的主要原因除了排间非定常扰动引起时均流场中激波形态的变化,还有上游尾迹传播引发的下游转子进口气流角的周期性波动。

关键词: 对转风扇;谐波平衡法;非定常流;排间干涉;颤振

中图分类号: TG156

Numerical Simulation Research on Effect of Unsteady Inter-row Interaction on Flutter Characteristics of Downstream Rotor in Counter-rotating Fan

LI Degang¹ ZHANG Xiang²

(1. Petroleum Industry Mechanical Product Quality Supervision Inspection Station, Daqing 163316;
2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: In order to investigate the influence of the inter-row interaction on the flutter characteristics of downstream rotor in a two-stage counter-rotating fan, the harmonic balance method is used to simulate the unsteady flow of the oscillating blades in the multi-row environment. Through the energy method for flutter prediction, the difference of the unsteady pressure response and the aerodynamic work done on the blades is investigated using two different multi-row models. And the influencing mechanism of upstream disturbance on aeroelastic stability of downstream rotors under counter-rotating structure is discussed. The results show that the aerodynamic damping of the downstream rotor decreases due to the aerodynamic interaction. The main reason for the difference of flutter characteristics is not only the change of shock wave state in time-averaged flow field caused by unsteady disturbance between rows, but also the periodic fluctuation of inlet flow angle for downstream rotor caused by the upstream wake propagation.

Key words: counter-rotating fan; harmonic balance method; unsteady flow; inter-row interaction; flutter

0 前言

风扇/压气机是现代航空动力系统中的关键部件,随着发动机目标推重比的逐渐提高,对压缩系统提出了高负荷、轻质量和强紧凑性的要求。对转风扇由于对转布局取消静子叶排、具有减重和缩短轴向尺寸的优点而备受瞩目^[1]。然而,缺少了静叶的扩压和整流作用以及相邻转子间更高的相对旋转

速度,可能导致下游转子进口马赫数更大、流动折合频率更高,进而诱发更为强烈的排间干涉,因此针对对转压缩系统相邻转子间非定常效应的研究已得到广泛关注^[2]。

排间干涉是压气机固有的非定常现象,因其诱发的复杂扰动环境不仅对压缩系统的气动性能有较大影响,亦有可能对转子叶片的气动弹性稳定性构成重大威胁,其中,颤振作为一种高发的气动弹性失稳现象已受到广泛关注。LI等^[3]基于时域单向耦合方法研究了叶片排间距对转子气动阻尼的影响,发现存在一个可以显著改善叶片气动弹性稳定性的

最优间距。HUANG 等^[4]采用相同的数值方法针对某单级蒸汽涡轮也进行了类似的研究,发现对一阶弯曲振型,转子叶片气动阻尼对上游静子与下游转子的轴向间距呈现出强烈的依赖性。REDDY 等^[5]使用谐波平衡法在多叶排环境下进行颤振特性的研究,考察了相邻叶排的压力波反射对气动阻尼系数的影响。HSU 等^[6]建立全通道、多叶排计算模型,使用时域流固耦合分析方法探讨了压气机一级动叶的颤振特性,研究发现多排模型的预测结果与试验结果吻合度远好于单排分析模型。国内,杨慧等^[7]分别考察了在上、下游叶排干涉作用下转子叶片的颤振特性,研究表明对所采用的转子叶片必须考虑动静干涉作用,尾迹和势干扰的强度均随着轴向间距的减小而加强,并呈现加剧叶片气动弹性失稳的趋势。

上述研究多采用时域非定常流分析方法,虽具备解析多扰动的特点,但巨大的时间开销往往成为制约其在工程领域中广泛使用的瓶颈。除此,对转方案作为提高压缩系统紧凑性和负荷水平的有效途径,其特有的非定常流动特征对工作叶片颤振特性影响的研究鲜有涉及。为此,针对某高负荷对转风扇的下游转子,基于自主开发的叶轮机频域非定常流及气动弹性预测系统,通过能量法对比分析是否考虑排间非定常流扰动两种情况下叶片的气动弹性稳定性,考察下游风扇叶片表面气流做功的差异,研究排间干涉条件下振荡叶片的非定常压力响应特征,并探索对转风扇相邻转子叶排间流场非定常匹配效应对叶片颤振特性影响的物理机制。

1 数值方法

1.1 控制方程方法

为了考虑叶片振动引发网格变形对非定常流场计算的影响,需要在 Navier-Stokes 方程原始对流项中添加因网格运动产生的附加通量。并在此基础上推导得到控制方程在圆柱坐标系下的表达式

$$\iiint_{\Omega} \frac{\partial Q}{\partial t} d\Omega + \iint_{\partial\Omega} [(F - Qv_{gx})dA_x + (G - Qv_{g\theta})dA_{\theta} + (H - Qv_{gr})dA_r] = \iint_{\partial\Omega} (V_x dA_x + V_{\theta} dA_{\theta} + V_r dA_r) \quad (1)$$

式中 Ω ——网格单元的控制体积;

Q ——守恒变量;

A_x 、 A_{θ} 、 A_r ——网格单元表面轴向、切向和径向方向的投影面积;

F 、 G 、 H ——轴向、切向和径向方向的对流通量;

V_x 、 V_{θ} 、 V_r ——轴向、切向和径向方向的黏性通量;

v_{gx} 、 $v_{g\theta}$ 、 v_{gr} ——轴向、切向和径向方向的网格运动速度。

1.2 谐波平衡法

JAMESON^[8]提出的双时间推进方法虽然改善了时域非定常计算的效率,但过高的时间成本依然是制约非定常流动广泛应用的主要原因。HALL^[9]提出的谐波平衡法为周期性非定常流动提供了一个高效的模拟途径,即将时变守恒变量近似表示成有限数量的谐波组合,然后将谐波形式的守恒变量代入式(1),利用谐波平衡技术,结合离散傅里叶变换,并加入虚拟时间导数项可得

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega} \frac{\partial Q^*}{\partial \tau} d\Omega + \iint_{\partial\Omega} [(F^* - Q^*v_{gx})dA_x + (G^* - Q^*v_{g\theta})dA_{\theta} + (H^* - Q^*v_{gr})dA_r] = \iint_{\partial\Omega} (V_x^* dA_x + V_{\theta}^* dA_{\theta} + V_r^* dA_r) + \\ \iiint_{\Omega} (S^* + S_{HB}^*) d\Omega \end{aligned} \quad (2)$$

$$Q^* = [Q_1 \quad Q_2 \quad Q_3 \quad \cdots \quad Q_{2N} \quad Q_{2N+1}]^T \quad (3)$$

$$Q^* = [\bar{Q} \quad A_1 \quad B_1 \quad \cdots \quad A_{2N} \quad B_{2N}]^T \quad (4)$$

$$S_{HB}^* = \frac{\partial Q^*}{\partial t} = \frac{\partial E \tilde{Q}}{\partial t} = \frac{\partial E}{\partial t} \tilde{Q} = \frac{\partial E}{\partial t} E^{-1} Q^* \quad (5)$$

$$E =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \sin(\omega_1 t_1) & \cos(\omega_1 t_1) & \cdots & \sin(\omega_N t_1) & \cos(\omega_N t_1) \\ 1 & \sin(\omega_1 t_2) & \cos(\omega_1 t_2) & \cdots & \sin(\omega_N t_2) & \cos(\omega_N t_2) \\ 1 & \sin(\omega_1 t_3) & \cos(\omega_1 t_3) & \cdots & \sin(\omega_N t_3) & \cos(\omega_N t_3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & \sin(\omega_1 t_{2N}) & \cos(\omega_1 t_{2N}) & \cdots & \sin(\omega_N t_{2N}) & \cos(\omega_N t_{2N}) \\ 1 & \sin(\omega_1 t_{2N+1}) & \cos(\omega_1 t_{2N+1}) & \cdots & \sin(\omega_N t_{2N+1}) & \cos(\omega_N t_{2N+1}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

上式中 N 为频域非定常计算考虑的谐波阶数,式(3)为 $2N+1$ 个离散物理时刻下对应的守恒变量,式(4)为傅里叶系数,式(6)中的 $\omega_1 \cdots \omega_N$ 为对应各阶谐波的角频率。

频域控制方程式(2)和时域控制方程式(1)在形式上高度相似,除了描述流场变量关于物理时间变化的导数项转变为附加的谐波源项外,虚拟时间导数项仅起到推进频域方程组向收敛解发展的作用。这使得传统 NS 方程定常求解中广泛使用的空、时离散方法和加速手段均可用于频域方程的求解。并且,谐波平衡法的高效性主要体现在将传统非定常计算物理时间域逐步推进的过程转化为虚时间域中

定常控制方程的计算。

1.3 能量法

基于 CARTA 提出的能量法^[10], 通过考察叶片及其绕流之间的能量传递方向来判断结构的气弹稳定性, 即根据一个振动周期内非定常压力对简谐振动叶片所做的气动功, 来评估叶片是否存在颤振风险^[11]。为使气动弹性稳定性具有可比性, 通常使用量纲一的气动阻尼系数作为评估准则, 该参数能够反映叶片振动的对数衰减率^[11]。气动阻尼系数的公式如下

$$\log \delta = \frac{-W_{aero}}{2 \cdot E_{strain}} \quad (7)$$

$$W_{aero} = - \int_{t_0}^{t_0+T} \int_A (p \cdot \mathbf{v}_g \cdot \mathbf{n}) dA dt \quad (8)$$

$$E_{strain} = \int \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot A_x^2 \right) dV \quad (9)$$

式中 $\log \delta$ ——气动阻尼系数;

W_{aero} ——气动功;

p ——叶片表面的静压;

$\mathbf{v}_g$ ——当地网格的运动速度矢量;

$\mathbf{n}$ ——叶片表面网格单元的外法线矢量;

E_{strain} ——振动叶片的应变能;

ρ ——叶片的密度;

ω ——叶片振动的角频率;

A_x ——指当地单元的振幅。

当 $\log \delta$ 大于零时, 表明振动叶片的非定常绕流阻尼叶片振动, 颤振不会发生; 反之, 激励叶片振动, 表明叶片存在失稳风险。

2 结果与讨论

2.1 研究对象

选取自主设计的某高负荷对转风扇作为研究对象, 其三维实体模型如图 1 所示。该对转风扇由相

图 1 对转风扇的几何模型

对旋转的两个转子构成, 第一排叶片数为 20, 转速为 5 200 r/min(逆时针), 第二排叶片数为 30, 转速为 -4 100 r/min(顺时针), 两叶排相对旋转, 设计流量 230 kg/s, 设计压比为 2.22。

2.2 叶片结构动力学分析

进行颤振分析之前需要进行结构动力学分析, 选取风扇材料为钛合金, 其材料属性如表 1, 使用商业有限元计算软件 ANSYS, 采用如图 2 所示的 solid186 二十节点六面体单元, 弦长方向上布置 40 个单元, 叶高方向上分配 30 个单元, 在叶片厚度方向仅使用一层单元。颤振预测仅考虑叶片的一阶弯曲模态, 如图 3。计算得到叶片的自振频率为 221.6 Hz。

表 1 材料的属性

密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
4 680	112	0.3

图 2 有限元网格

图 3 一阶弯曲模态

2.3 定常特性分析

将相邻叶片间的单通道作为流动分析的计算域, 并划分单块 H 型网格。上、下游转子叶尖间隙均设置为 0.5 mm。为了提高计算稳定性、降低流场数值模拟对 y^+ 的要求, 近壁单元采用 DENTON 提出的壁面函数法, 使得叶尖间隙中仅布置两层网格

单元足以刻画间隙泄露流的主要特征。每一排在轴向、周向和径向方向网格点数如表 2, 其中间隙网格包含于径向网格数中, 整个计算域内的单元总数约为 89 万。计算网格如图 4 和图 5 所示。

首先对研究对象进行定常流动分析以获得对转风扇的特性。其次, 特性线上各工况的定常解可为后续颤振分析提供初值。设置进口总压为 101 325.0 Pa, 进口总温为 288.15 K, 采用轴向进气角, 排间数据传递通过 WANG 的混合平面法^[12]来实现。出口边界给定静压。通过调整出口背压改变工况, 可得到如图 6 所示的效率—流量和压比—流量特性, 下游转子颤振分析以设计压比作为基准, 图中标注了设计工况。

表 2 网格点数

叶片排	轴向	周向	径向
第一排	129	57	65
第二排	113	57	65

图 4 对转风扇 s1 面上的网格

图 5 对转风扇的三维计算网格

图 6 对转风扇的效率—流量和压比—流量特性

2.4 非定常流及叶片颤振特性分析

为了分析排间干涉引起的叶片气动弹性稳定性差异, 使用两种交界面模型对多排环境中下游风扇叶片进行颤振评估。其中, 第一种为频域/定常多排混合计算模型, 简称为混合模型, 具体方法参考文献[13], 该方法仅在振荡叶排上使用谐波平衡法, 其他叶排均采用定常计算, 通过混合平面法在振动和固定叶排间传递数据。第二种为多级频域谐波分析模型, 这种方法对每个叶排均采用非定常计算, 叶排间使用频域滑移面法交换数据^[12], 能够捕捉排间的势扰动和尾迹传播, 简称非定常模型。本节中对于前转子给定三阶谐波, 而后转子给定四阶谐波, 其中一阶用于考虑叶片振动的影响, 其余三阶用于捕捉排间的非定常干涉, 文献[14]中也采用了相同的谐波数设定。

非定常计算采用与定常计算设计工况相同的进、出口边界, 采用相位滞后边界条件实现单通道建模, 分别使用混合模型和非定常模型在多排环境下对下游振荡风扇进行频域非定常流分析。由于相同叶排上叶片安装具有循环对称的特点, 节径对叶片气动阻尼系数存在较大影响, 其与相位滞后边界中使用的叶间相位角(Inter blade phase angle, IBPA)存在如下关系

$$\text{IBPA} = \arctan\left(\frac{2\pi \cdot N_d}{N_b}\right) \quad \left(-\frac{N_b}{2} \leq k \leq \frac{N_b}{2}\right) \quad (10)$$

式中 ω ——当前叶排角速度;

N_d ——节径数;

N_b ——当前叶排的叶片数。

图 7 为第二级风扇气动阻尼系数随节径数的变化曲线。对比混合模型和非定常模型的计算结果及两者差值可见不同的计算模型得到气动阻尼系数关于叶间相位角的变化趋势基本相同, 表现为抛物线变化, 并均在后行波节直径数为-1 时达到最小阻尼状态。由于混合模型和非定常模型计算得到的最小气动阻尼均大于 0, 说明叶片不会发生气弹失稳。虽然考虑排间干涉并未导致预测做出完全相反的结论, 但对应波节处两种计算方法得到的气动阻尼还是存在一定差异的。在整个叶间相位角范围内, 混合模型计算得到的气动阻尼系数均大于非定常模型, 但两者差值随着波节直径数绝对值的减小而减小, 并在叶间相位角为零时达到最小值。

最小气动阻尼系数最能反映叶片的气动弹性稳定性, 表 3 分别给出了使用不同计算模型得到的叶片最小气动阻尼系数, 从中可见, 非定常模型相比于混合模型小 14.6%, 也就是说, 非定常干涉表现

为恶化叶片的稳定性的作用，可能导致叶轮机设计者对叶片气动弹性稳定性做出更加保守的评估。

图 7 叶片气动阻尼系数随波节数的变化

表 3 叶片的气动阻尼系数

计算模型	气动阻尼系数(%)	气动阻尼系数差值百分比(%)
混合模型	1.5668	0.0
非定常模型	1.3380	-14.6%

图 8 为不同计算模型得到的最小阻尼状态下叶片气动阻尼系数关于叶高的分布。由于振动为一阶弯曲模态，节径对应于叶根约束处，在小于 40% 叶高范围内，叶片振动幅值很小，对叶片振动的贡献的阻尼效应足以忽略。在 40% 至 60% 叶高区间，两种方法得到气动阻尼系数均为负值，但其强度较小，对叶片气弹稳定性的影响依然非常有限。从 60% 叶高直至叶顶，非定常绕流对叶片振动表现为较大的阻尼效应，并且不同模型的预测值基本表现为随着叶片高度的增加而递增的趋势。但混合模型预测得到的气动阻尼系数关于叶高线性正相关，使其值在 80% 叶高以上远大于非定常模型。正是该区域内气流做功的不同导致混合模型和非定常模型的气动阻尼系数存在一定差异。

图 8 叶片气动阻尼系数随叶高的变化

图 9 和图 10 分别为混合模型和非定常模型计算

得到的叶片吸力面和压力面上的时均静压。无论哪种计算方法，该下游转子的吸力面和压力面上均存在贯穿整个叶高的激波，这主要是由于对转设计下两叶排的相对旋转速度较大使得下游风扇进口马赫数较高所致。

图 9 混合模型叶片表面的时均静压分布

图 10 非定常模型叶片表面的时均静压分布

对比两种模型计算得到的静压分布可知，考虑排间非定常效应导致叶片表面激波的位置和强度表现出不同程度的差异。对于吸力面，混合模型靠近叶顶附近的激波位置更接近尾缘，且强度有所增大。压力面上的激波位置的变化与吸力面相似，但非定常效应反而表现出弱化激波强度的作用。

图 11 和图 12 分别为混合模型和非定常模型计算得到的叶片表面气动功分布。对照图 9 和图 10 的静压分布可以发现，吸力面上激波下游附近存在一个强度较高的正功区，伴随叶片振荡发生的激波运动是导致这一现象的主要原因。相较于混合模型，排间非定常流动应使得该正功区强度更高，作用范围更广。两模型吸力面上气流做功的差异不止于此，对于混合模型，叶顶前缘附近的强烈振动诱发的局

图11 混合模型叶片表面的气动功分布

图12 非定常模型叶片表面的气动功分布

部进气脉动表现为阻尼振动的负功。但对于非定常模型,从50%叶高至叶顶、从前缘至激波上游的广泛区域上气流做功呈现负功、正功交替的斑驳状。对于压力面,无论采用那种计算模型,激波振荡均诱发带状负功集中,且非定常模型的强度大于混合模型。此外,另一处不同出现于叶高中段、前缘至激波上游的区域,非定常模型预测得到的正功强度高于混合模型,且分布形态亦有显著差异。

图13a-c分别为60%、80%和95%叶高处时均静压关于量纲一弦长的分布。由图可知,所有叶高截面上非定常模型预测得到的激波位置较混合模型均发生前移现象,但排间干涉效应对激波形态的影响因上、下表面的不同而有所差异。对于吸力面,60%叶高截面上,混合模型预测的激波引发的静压突增梯度明显高于非定常模型,但另外两截面上非定常模型的激波强度更高、增压过程更为剧烈。对于压力面,混合模型的激波强度在三个不同的叶高截面上均大于非定常模型。基于上述分析,从整个弦长范围上来看,排间干涉非定常性的影响导致叶片加载规律的差异。

图13 叶片表面时均静压关于量纲一弦长的分布

图14分别为60%、80%和95%叶高处的一阶非定常静压幅值随弦长的变化。此处所说的“一阶”指的是瞬态流场中与叶片振动频率相等的谐波组分。对比图13所示相应叶高截面处的时均静压分布可知,无论吸力面还是压力面,激波均在其下游附近诱发出强烈的压力脉动。对于吸力面,混合模型计算得到的一阶脉动压力幅值均大于非定常模型,但后者受其作用产生的正功区范围更广。而压力面

图 14 叶片表面的一阶非定常压力幅值沿弦长的分布

上激波振荡引起的压力脉动并未因模型不同表现出明显的规律性差异。

两模型非定常压力特性的不同除了表现在激波区附近, 更大的差异出现于吸力面上叶片前缘至激波上游的区域。非定常模型预测得到的压力幅值在这一区域内关于量纲一弦长坐标呈现出规律性的波动, 并且, 随着叶高的增加波动区范围逐渐增大。但类似的现象并未出现于混合模型。虽然 80% 叶高处, 15% 至 40% 弦长范围上也存在局部幅值升高的现象, 但其和非定常模型所得压力脉动幅值变化的原因存在根本不同, 主要由振荡叶片当地较大幅度振动扰动流场所致。对于 95% 叶高处, 混合模型波前静压幅值存在小幅波动, 非定常模型 20% 弦长附近处亦发现类似现象, 但造成这种曲线不平滑的原因和非定常模型中幅值规律性波动是不同的。因为混合模型的进口来流通过排间混合平面法已进行周向平均, 流场信息间匹配建立在上游定常流和下游时均流之间的匹配, 并未计及上游尾迹和压力势干扰。

图 15 分别为 60%、80% 和 95% 叶高处的一阶非定常静压相位随弦长的变化。在三个不同的叶高截面处, 混合模型和非定常模型预测的非定常相位关于量纲一弦长的分布在压力面上近乎一致, 考虑排间非定常扰动的影响主要体现在吸力面前缘至 40% 弦长区域内, 即前缘至激波上游的区间。非定常模型得到一阶非定常相位在该范围内存在剧烈波动,

但该现象未在混合模型中出现。

图 15 叶片表面的一阶非定常压力相位随弦长的变化

图 16 分别为 60%、80% 和 95% 叶高处的气动功随弦长的变化。图 14 和图 15 所示非定常压力幅值和相位对气动功有直接影响。对照分析可知, 相应叶高截面处, 对于非定常模型, 压力脉动幅值和相位关于量纲一弦长剧烈波动的区间中, 气流做功表现为负、正交替分布, 在空间上表现为非等幅波动, 而混合模型在该区域内的气动功近似处于非定常模型波动曲线的平衡位置。

图16 叶片表面的气动功沿弦长的分布

对于混合模型,排间数据传递建立在上游定常解与下游时均解之间的周向平均匹配。此时,下游振动叶排的进口来流是定常的,流场的非定常性仅来自于叶片振动。文中所述混合模型叶顶前缘附近的负功仅仅来自于进口气流角周期性变化引发的当地压力脉动。当采用非定常模型进行颤振预估时,上游转子也进行频域非定常模拟,其尾迹被下游转子周期性切割,进口气流角的波动不仅受振动影响,尾迹产生的速度脉动亦不可忽略。由此在前缘至激波上游产生复杂的压力振荡,进而导致气动功在该区域上的分布与混合模型迥然相异。此外,上游压力势扰动向下游的传播对振动叶排当地静压振荡亦有所贡献。在上述效应和叶片振动的综合作用下,非定常模型在该区域上的气动功出现随着弦长的剧烈波动的现象。

3 结论

针对某型对转风扇,通过对比频域/定常流混合计算模型和多级频域谐波方法的数值结果,详细分析了上游扰动对下游转子气动功分布的作用机制,得到如下结论。

(1) 排间干涉效应并未改变下游转子最小气动阻尼系数对应的叶间相位角,但趋向于使叶片的气动阻尼系数降低,其对时均流场激波形态的影响是阻尼降低的原因之一。

(2) 上游尾迹传播使得振荡叶片进口气流角波动规律发生变化,从而引起吸力面叶尖前缘附近处一阶非定常压力幅值和相位出现复杂振荡,以致影响叶片表面当地气动功分布,这是导致下游转子气动阻尼降低的另一因素。

(3) 文中所用数值方法已针对标准算例的试验数据进行验证,但目前条件尚不具备进行高速对转风扇气动弹性试验台的搭建,后续考虑在低速平台上进行相关试验研究,进一步探索对转压缩系统叶片颤振特性特征。

参考文献

- [1] 徐强仁,刘智远,项效镭,等. 对转压气机外伸激波对叶顶泄漏流影响[J]. 航空动力学报, 2019, 34(9): 2027-2037.
XU Qiangren, LIU Zhiyuan, XIANG Xiaorong, et al. Impact of bow shock on tip leakage flow in counter-rotating compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(9): 2027-2037.
- [2] 徐强仁,马英群,叶树波,等. 高负荷对转压气机尾迹涡级间迁移影响因素研究[J]. 推进技术, 2018, 39(12): 103-111.
XU Qiangren, MA Yingqun, YE Shubo. Variables research on inter-stage transport of wake vortex in a high-load counter-rotating compressor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(12): 103-111.
- [3] LI H D, HE L. Blade aerodynamic damping variation with rotor-stator gap: a computational study using single-passage approach[J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 127(3): 321-330.
- [4] HUANG X Q, HE L, BELL D L. Influence of upstream stator on rotor flutter stability in a low pressure steam turbine stage[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power & Energy, 2006, 220(220): 25-35.
- [5] REDDY T S R, BAKHLE M. Aeroelastic computations of a compressor stage using the harmonic balance method[C]// 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010: 5420.
- [6] HSU K, HOYNIK D, ANAND M S. Full-annulus multi-row flutter analyses[C]// ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2012: 1453-1462.
- [7] 杨慧,沈真,郑赞. 上下游干涉对转子叶片颤振特性的影响[J]. 航空动力学报, 2016, 31(5): 1170-1177.

- YANG Hui, SHEN Zhen, ZHENG Yun. Influence of up-and downstream blades on the rotor blade flutter characteristic[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(5): 1170-1177.
- [8] JAMESON A. Time dependent calculations using multigrid, with applications to unsteady flows past airfoils and wings[C]// 10th Computational Fluid Dynamics Conference, 1991: 1596.
- [9] EKICI K, HALL K C. Nonlinear analysis of unsteady flows in multistage turbomachines using harmonic balance[J]. AIAA journal, 2007, 45(5): 1047-1057.
- [10] CARTA F O. Coupled blade-disc-shroud flutter instabilities in turbo-jet engine rotors[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1967, 89(3).
- [11] 张翔, 黄秀全, 张恒铭, 等. 激波对跨声速风扇叶片颤振特性的影响[J]. 推进技术, 2016, 37(3): 411-418.
- ZHANG Xiang, HUANG Xiuquan, ZHANG Hengming, et al. Effects of shock wave on blade flutter characteristic in transonic fan[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(3): 411-418.
- [12] WANG D X. An improved mixing-plane method for analyzing steady flow through multiple-blade-row turbomachines[J]. Journal of Turbomachinery, 2014, 136(8): 081003.
- [13] 黄秀全, 张翔, 张恒铭. 多级环境下基于非定常/定常流混合分析的叶片颤振预报方法[J]. 工程热物理学报, 2014, 25(7): 1304-1308.
- HUANG Xiuquan, ZHANG Xiang, ZHANG Hengming. Blade flutter prediction method based on hybrid unsteady/Steady flow analyses in a multi-Stage environment[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 25(7): 1304-1308.
- [14] SICOT F, GOMAR A, DUFOUR G, et al. Time-domain harmonic balance method for turbomachinery aeroelasticity[J]. AIAA journal, 2013, 52(1): 62-71.

作者简介: 李德刚, 男, 1975 年出生。主要研究方向为振动控制。

E-mail: lidegang75@163.com

张翔(通信作者), 男, 1987 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为叶轮机气动弹性力学。

E-mail: zhangxb.no1@163.com