

单级近失速工况全环非定常数值模拟研究

李雯玉,胡骏

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:对低速轴流单级使用数值模拟的方法,研究靠近稳定边界处,压气机内详细的流场结构。对于不同叶高,随着叶片高度增加,叶片的压差越大,负荷越大。对转子前缘的压力数值探针结果进行傅里叶分析且表明,转子周向上出现了两种不同旋转周期的静压扰动,分析不同周向点的压力结果,呈现的扰动现象不同。由于叶尖间隙的存在,产生了叶尖泄漏涡,并且与主流相互作用,不同周向位置的涡系结构存在区别。对于该压气机,在近失速点附近,质量流量过小,产生的泄漏涡强度有限,最终未出现经典的旋转不稳定现象,反而更接近于叶顶自激励非定常。

关键词:压气机;全通道;数值模拟;泄漏涡;自激励非定常

中图分类号:TP391 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)02-0087-04

Full-annulus Simulation Research on Single Stage Near Stall Condition

LI Wenyu, HU Jun

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: By numerical simulation method for single stage, the detailed flow field structure in the compressor near the stable boundary is studied. For different blade heights, as the blade height increases, the greater the pressure difference of the blade, the greater the load. The Fourier analysis of the pressure numerical probe results on the front edge of the rotor shows that there are two static pressure disturbances with different rotation periods in the rotor circumferential direction. The pressure results at different circumferential points analyzed indicate different disturbance phenomena. Due to the existence of the tip clearance, the tip leakage vortex is generated, which interacts with the main flow, and the vortex structure of different circumferential positions is different. For the compressor near the stall point, the mass flow is too small, so the leakage vortex generated is limited. The classic rotation instability does not appear in the end, but is closer to the unsteady tip self-excitation.

Keywords: compressor; full-annulus; numerical simulation; leakage vortex; self-excited unsteady

0 引言

转子作为压气机中的旋转部件,为了防止其由于转动造成的振动、安装误差等产生的与静止部件的碰撞,通常会在叶尖处设置一定长度的叶尖间隙。正是由于叶尖间隙的存在,使叶尖处产生泄漏流与主流相互作用,会降低压气机效率、压升能力和稳定工作范围。某些学者的研究表明,压气机失速是由叶尖处不稳定流动的径向与周向发展结果而成。以往的研究结果表明,不论在高速还是低速,轴流还是离心压气机中,都观察到过旋转不稳定现象。旋转不稳定一旦发生,就会造成叶片的激励和产生噪声。

近几年,对压气机不稳定性研究的主要目的是为了规避严苛的流动情形并且拓宽压气机的稳定裕度。KAMEIER F 等^[1]于 1992 年观测到在频谱图上低于叶片通过频率的范围内,存在一个狭窄的高频带,该现象为旋转不稳定性在频谱图上的体现。旋转不稳定性是一种能够在稳定工作范围内,通常是高负荷工作状态下发生在压气机叶尖区域的流动现象,并且可以通过静压斜槽等方

式,吹除叶尖的低能量区^[2]。但是经典的旋转不稳定经常还会在叶尖处产生泄漏涡结构,并且随着叶片的旋转,实现强—弱—强的转变。叶尖区域作为一个具有复杂流动结构的位置,通常都是由它引发大范围流动堵塞,最终形成失速。所以,对叶尖区域的流动研究非常重要。

1 研究对象

本文的数值模拟对象是一台课题组自研的低速轴流单级压气机。轮毂比为 0.75,转速为 2 300 r/min,进口总压为 101 325 Pa,进口总温为 288.15 K,轴向进气。

2 数值计算方法

本文采用的是 ANSYS 商用软件的 CFX 求解器求解三维雷诺平均 N-S (navier-stokes) 方程。由于整个模拟条件是低马赫数的,所以工质选用理想气体。湍流模型选用 CFX 中最为成熟的 Standard $k-\epsilon$ 模型。为了提高计算效率,采用了多重网格法、当地时间步长和隐式残差光顺

来加速收敛过程,减少计算时间。对于压气机的特性计算,可以忽略内部流动的非定常性,单通道出口采用背压边界条件,通过不断减小背压值,实现工作点从堵塞点到小流量边界点的移动。

本文首先对研究对象进行了网格无关性研究(图1)。一共划分了三套网格,分别对应着疏、中、密。为了保证较好的网格正交性,转子主通道采用H-O-H型结构化网格,叶尖间隙区域采用蝶形网格拓扑结构。图2为单通道计算域网格。并且对固壁附近进行了网格加密,设定固壁第一层网格厚度为 1×10^{-6} m。对三种网格的定常特性进行计算,得到图1所示的效率和总压比曲线,流量系数使用进口中径处轮缘速度来标准化。可以见得,三种网格的计算结果误差都保证在2%以内。所以,三种网格都满足了网格无关性验证的要求,最终为了追求计算准确性以及受计算资源的限制。本文的所有数值计算网格都参考Grid2的计算设置。单通道数值模拟所用到计算网格总量为610 000,长宽比 $<2\ 000$,最小网格交角为 31° ,延展比 <5 ,没有出现负网格,满足网格质量的要求。Grid2的网格细节如图2所示。采用无滑移、绝热的壁面边界条件,叶片两侧周向边界定义为周期性边界条件;进口边界条件为给定的标准大气总温、总压。

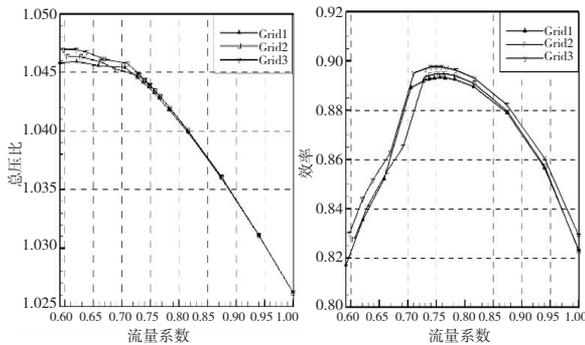


图1 总压比和效率-流量曲线

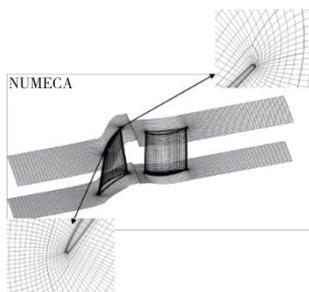


图2 Grid2 网格细节

在定常计算时,出口边界条件给定为背压边界条件,不断增大背压的值以模拟出压气机在全流量工作范围内的特性;在非定常全环计算时,为了匹配边界点处流量与压力相互影响的特点,使用节流阀边界条件来描述压气机的出口环境^[3]。本文进行数值模拟时,探针布置的位置如下:

1) 转子进口轮毂处周向静压探针。每个叶片通道前1/5弦长处均布两个静压信号监测点,周向共36个叶片,所以轮毂处探针共72个。

2) 转子进口轴向速度探针。为了研究哪一个径向位置率先产生扰动信号,在进口前10%、50%、90%叶高处,沿周向布置36个轴向速度信号监测点。

3 计算结果分析

3.1 数值计算结果与实验结果对比

对Grid2生成的全环网格进行定常计算,并将定常计算与实验结果进行了对比。如图3所示,二者保持了较高的一致性。

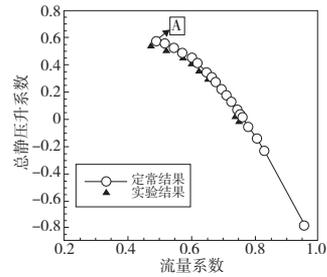


图3 实验与数值对比

定常计算的边界点流量系数值为0.57,实验得到的边界点为0.54,误差为5%,满足精度要求。所以认为接下来要进行的全环非定常数值模拟结果具有一定的准确性,并且能够揭示压气机中的某些流动细节。在全环定常计算结果的基础之上,以最后一个稳定工作点作为初场进行非定常计算。计算过程中,压力、速度三个分量的残差收敛最终稳定在 10×10^{-5} 量级以内,且不呈现继续增加的趋势,所以认为计算已收敛。

使用面积平均来表示流量系数和总静压升系数。流量系数和总静压升系数计算公式为:

$$\varphi = \frac{\dot{m}}{\rho U_{ave} A}, \pi_{st} = \frac{P_{out} - P_{in}^*}{\frac{1}{2} \rho_{in} U_{ave}^2}$$

式中:in代表单级进口;out代表单级出口; m 为物理质量流量; P 为压力; U_{ave} 为进口面平均切向速度; ρ 为密度。流量和总静压升在非定常计算完成后,相比之前的状态有下降的趋势,如图4所示,最后计算稳定点在特性图上的位置如图5所示。流量和总静压升最后能够稳定在一个值附近,可以见得该点还未发生失速,与定常结果的差异不大,内部存在一些细微的非定常现象。

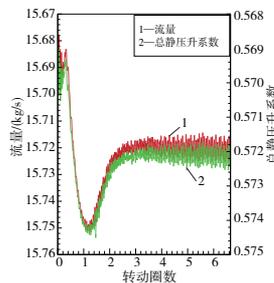


图4 流量、总静压升随时间收敛曲线

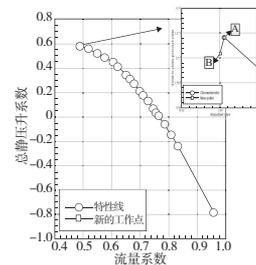


图5 非定常计算结果工作点位置

3.2 不同叶高负荷分析

图6(本刊黑白印刷,相关问题请咨询作者)展示了计算收敛时,转子叶片叶根、叶中和叶尖3个径向位置的叶片负荷,叶背的压力差别不大,但是叶盆的压力差别较大。90%叶高处的叶盆压力明显低于其他两个截面,意味着叶顶处出现了较大的流动分离,并且随着叶高的增加,叶盆和叶背的压力差增大,势必造成叶片负荷的增大。在叶尖处,较大的压力差会驱使气流从压力面由叶尖间隙流向吸力面,形成泄漏流,并且端壁和叶片存在相对运动,叶片刮蹭端壁的附面层,最终的结果形成了间隙漩涡。

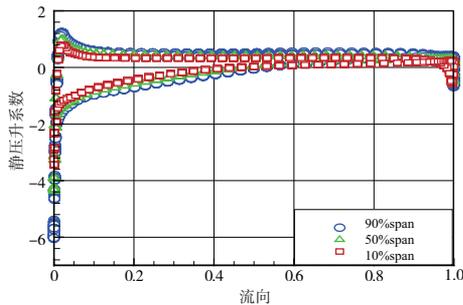


图6 各叶高静压升系数分布

3.3 压力探针结果分析

叶片通过频率在压力信号的频谱图上是可见的,它是由进口气流与转子叶片的相互作用而产生。将某3个相邻叶片前的6个探针压力信号提取出来,如图7所示,压力信号幅值呈弱—强—弱的规律交替变化。

转子进口轮毂6个周向位置的压力信号幅值存在明显的差异,是什么原因造成的呢?对该信号进行傅里叶变换,公式为

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt。$$

式中: $F(\omega)$ 为 $f(t)$ 的像函数; $f(t)$ 为 $F(\omega)$ 的像原函数。傅里叶变换即是从时域到频域的变换,而这种变换是通过一组正交基来实现。一般来说时域上的信号是杂乱无章的,而傅里叶变换后频域上的信号能够揭示信号本质上的东西。

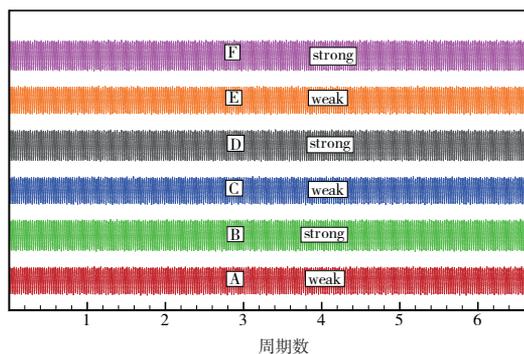


图7 转子前相邻6个测点压力信号

对每个监测点的原信号进行傅里叶变换后的频域信号如图8所示,横坐标轴为频率除以叶片通过频率的值。

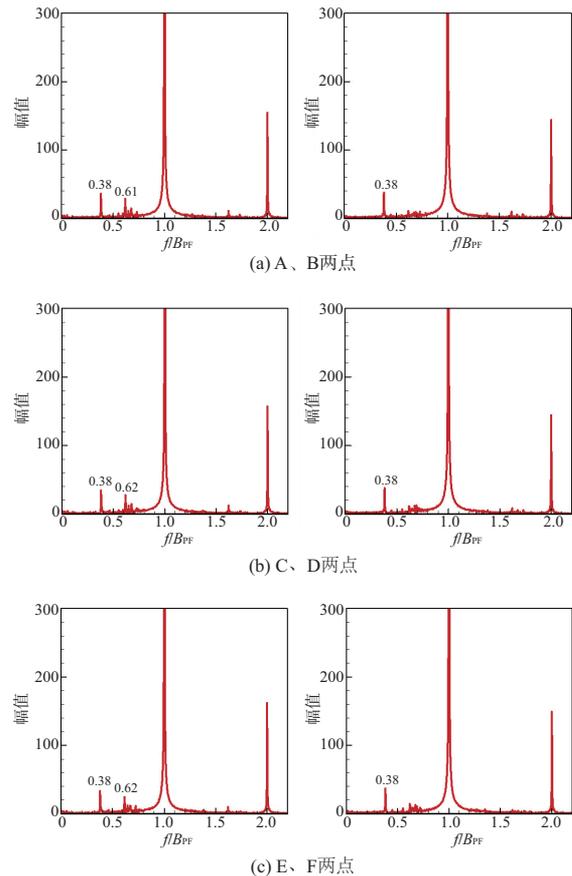


图8 监测点傅里叶变化结果

将转子进口前的静压信号进行傅里叶变化后,主频率为 $f_r = 1380 \text{ Hz}$,该频率正是转子的通过频率,即叶片在旋转过程中,对气流作用的一个表现,可通过以下的公式计算

$$f_r = \frac{1}{T} = \frac{n_b \cdot n}{60}$$

式中: n_b 为叶片数; n 为转速, r/min 。

6个位置的主要频率为叶片通过频率(B_{PF}),横坐标轴为2表示转子的倍频。此外,在A、C、E点还存在 f/B_{PF} 值为0.38与0.61的两个频率,在B、D、F存在一个值为0.38的频率。

$k_t = 12.8$ 时,转子叶尖处存在某种扰动信号,该信号的转动频率分别为当前叶片通过频率的0.38倍和0.61倍。学者们认为旋转不稳定性是由于叶尖间隙增加到一定值时,在 $1/2$ 叶片通过频率附近捕捉到了宽频带的幅值升高,该宽频带是由周向传播的气流扰动结构造成。MAILACH R等^[4]在对低速轴流压气机的实验研究中发现,转子叶尖泄漏涡在近失速工况和大间隙条件下会和相邻叶片发生周期性碰撞,表现出2-3个通道的周期性结构,认为这是由于泄漏涡影响到相邻叶片压力面引起的叶片载荷变化,使泄漏涡呈现“强/弱”交替变化,并将该现象命名为旋转不稳定性(RI)。本文对单级进行计算时,分别发现了38%和61%叶片通过频率两个宽频带。但是在MAILACH R所描述的旋转不稳定性特征中,压力信号的傅里叶变化结果不仅出现了宽频带的幅值升高,并且在叶尖间隙处捕捉到了明显的旋转不稳定性传播过程。如图

9所示,由于 t_1 时刻时,叶尖处叶片1前缘出现了强烈的泄漏涡,并在 t_2 时刻对叶片2前缘的流动造成了影响,使叶片2压力面的压力减小,自然叶片2的压差减小,形成的泄漏涡强度减弱,在 t_3 时刻时,对叶片3几乎不造成影响,于是叶片3又开始产生较强的泄漏涡……周而复始。MÄRZ J^[5]等在对旋转不稳定的数值研究中,使用速度向量图表示出了存在于叶顶区域通道中的涡结构,如图10所示。

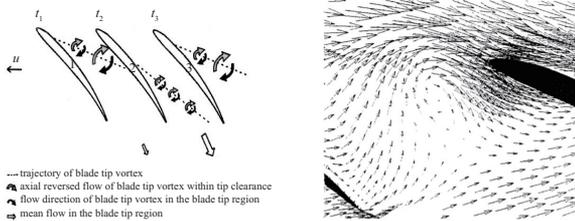


图9 旋转不稳定的传播过程 图10 叶片通道内的涡结构

虽然从叶片前信号的傅里叶变化中观察到了50%左右的叶片通过频率,但是对50%叶尖间隙高度的流场图进行分析,并没有发现MÄRZ J所描述的强涡系结构,50%叶尖间隙处相对速度矢量图如图11所示。

于是对流场的三维结构进行了分析。如图12所示,叶片1和叶片2之间产生了从叶片1叶背出发流向叶片2的涡结构。该云图使用静压升系数进行色彩显示,但是叶片1产生的涡结构过弱,在主流的强烈掺混下,无法到达叶片2的压力面,最终结束于机匣壁面。对于周向不同位置的泄漏涡结构,如图13所示,其大小是不同的。图中,三角符号表示较弱的涡结构,圆形符号表示较强的涡结构,有的周向位置呈现间隔3个较强涡结构的周期,而有的周向位置呈现间隔两个较强涡结构的周期。这样,便于与前面对转子前缘压力监测信号的傅里叶变化结果相对应。间隔3个较强涡结构的情况对应于频率为38%的叶片通过频率,而间隔两个较强涡结构的情况对应于频率为62%的叶片通过频率。周向位置上,前者为主要的流动现象,而后者只在部分通道内出现。

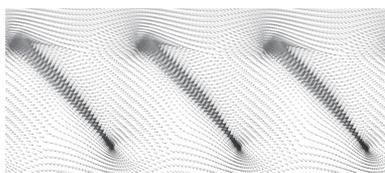


图11 相对速度矢量图

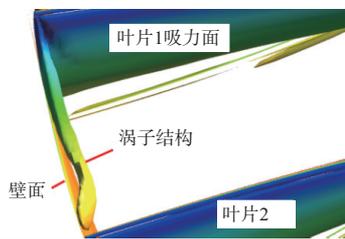


图12 泄漏涡空间结构

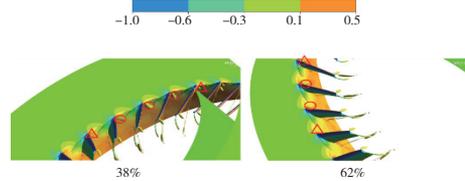


图13 不同周向位置的泄漏涡结构

3.4 转子叶顶自激励现象分析

在近失速点,由于叶片自身存在的叶尖间隙产生的泄漏涡与主流相互作用,引起了自发激励的非定常现象,将该现象命名为叶片自激非定常^[6]。通常由于质量流量较小,叶尖泄漏流与主流建立起动态平衡,使得叶尖泄漏涡呈一定幅度的摆动^[7]。图14展示了叶尖处10个叶片通过周期的泄漏涡摆动情况。 T_0 表示叶片通过周期,为转子周期与叶片数的商。叶片2在 $2/T_0$ 时刻,泄漏涡与主流相互作用,在叶片2压力面产生了一个低压区,该低压区的存在使得泄漏涡强度减小那么对于下一时刻,主流能够完全将泄漏涡卷走,于是在 $4/T_0$ 时刻,叶片2压力面又恢复了高压区。低压—高压的变化周而复始,于是产生了泄漏涡在叶尖区域不断摆动的现象。

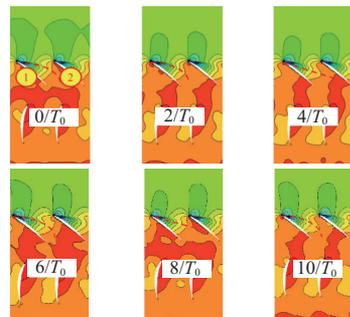


图14 不同时刻静压升系数对比

4 结语

本文通过对轴流单级进行边界点附近的全环非定常数值模拟,得到了以下结论:

- 1) 转子前缘静压数值探针的傅里叶分析结果表明,流场中产生了两种不同频率的扰动,分别对应于叶片通过频率的0.38倍和0.61倍;
- 2) 不同叶高处,叶片压力面压力数值近似,而吸力面随着叶高增加而变小,其中的主要原因是叶高增加,流动分离范围扩大,损失增加,静压减小;
- 3) 叶尖处存在轴向逆流,并且由于叶尖间隙的存在,产生了由压力面流向吸力面的泄漏涡结构。对泄漏涡结构进行三维分析发现,涡起源于叶背前缘,由于强度较小,在与主流作用后,涡系终止于机匣;
- 4) 转子叶顶区域并没有出现经典的旋转不稳定现象,而是产生了强度较弱的叶顶自激励现象。不同时刻,同一叶片通道内,叶尖泄漏涡呈一定幅度摆动。

(下转第115页)

GoogLeNet 网络、迁移学习预加载参数 ResNet 网络、随机初始化 GoogLeNet 网络和 ResNet 网络。迁移学习预加载参数 GoogLeNet 网络模型更适合钛合金烧伤图像的分类识别,分类准确率达到 97.71%,在中度烧伤图片上 F1-score 更是达到了 99%。使用该网络可以每秒预测约 30 张图片,为以后的在线检测磨削烧伤提供了强有力的支持。

参考文献:

- [1] 辛志杰. 超硬与难磨削材料加工技术实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [2] 许红平, 鲁建锋, 吴伟明, 等. 齿轮零件磨削烧伤的危害、检测和预防[J]. 专用汽车, 2019(1): 66-69.
- [3] SANTA - AHO S, VIPPOLA M, LEPISTÖ T, et al. Characterisation of case-hardened gear steel by multiparameter Barkhausen noise measurements[J]. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2009, 51(4): 212-216.
- [4] CHEN P H, LIN C J, SCHÖLKOPF B. A tutorial on v -support vector machines[J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 2005, 21(2): 111-136.
- [5] GONDY L A, THOMAS C R B, NAÏVE B. Programs for machine learning [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 1993, 79(2): 937-944.
- [6] ABEYWICKRAMA T, CHEEMA M A, TANIAR D. K-nearest neighbors on road networks [J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2016, 9(6): 492-503.
- [7] 章琳, 袁非牛, 张文睿, 等. 全卷积神经网络研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(1): 25-37.
- [8] DENG J, DONG W, SOCHER R, et al. ImageNet: a large-scale hierarchical image database [C]//2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, FL, USA: IEEE, 2009: 248-255.
- [9] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436-444.
- [10] GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Columbus, OH, USA: IEEE, 2014: 580-587.
- [11] 朱应钊. 异构迁移学习研究综述[J]. 电信科学, 2020, 36(3): 100-110.
- [12] PAN S J, YANG Q. A survey on transfer learning[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2010, 22(10): 1345-1359.
- [13] SZEGEDY C, LIU W, JIA Y Q, et al. Going deeper with convolutions[C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Boston, MA, USA: IEEE, 2015: 1-9.
- [14] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2016: 770-778.
- [15] WANG Y J, ZHOU P Y, ZHONG W Y. An optimization strategy based on hybrid algorithm of Adam and SGD[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 232: 03007.
- [16] ZHANG Y D, MUHAMMAD K, TANG C S. Twelve-layer deep convolutional neural network with stochastic pooling for tea category classification on GPU platform [J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(17): 22821-22839.

收稿日期: 2021-01-18

(上接第 90 页)

参考文献:

- [1] KAMEIER F, NEISE W. Experimental study of tip clearance losses and noise in axial turbomachines and their reduction[J]. Journal of Turbomachinery, 1997, 119(3): 460-471.
- [2] LI T, WU Y D, OUYANG H. Influence of axial skewed slots on the rotating instability of a low-speed axial compressor [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2021, 235(3): 385-401.
- [3] VAHDATI M, SAYMA A I, FREEMAN C, et al. On the use of atmospheric boundary conditions for axial-flow compressor stall simulations[J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(2): 349-351.
- [4] MAILACH R, LEHMANN I, VOGELER K. Rotating instabilities in an axial compressor originating from the fluctuating blade tip vortex[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(3): 453-460.
- [5] MÄRZ J, HAH C, NEISE W. An experimental and numerical investigation into the mechanisms of rotating instability [C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2001: Power for Land, Sea, and Air, New Orleans, Louisiana, USA: 2014.
- [6] 张晨凯. 多级轴流压气机内复杂流动结构的实验和数值研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [7] DU J, LIN F, CHEN J Y, et al. Flow structures in the tip region for a transonic compressor rotor[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(3): 031012.

收稿日期: 2021-01-27