

文章编号: 1000-8055(2009)09-2128-05

转子叶片表面非定常气动力的构成及叠加分析

杜红军^{1,2}, 李 罡¹, 胡 骏²

(1. 空军第一航空学院, 信阳 464000;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 数值模拟了一个带有导叶的单级低速压气机中转子叶片表面的非定常气动力. 通过研究转子叶片根部、尖部前缘和尾缘局部位置的非定常气动力, 阐明了由尾迹和势扰动两种非定常性诱发的气动力在转子叶片表面的叠加特性. 结果表明, 上游尾迹的影响波及整个转子叶片弦长范围, 而下游静子叶片势扰动仅影响转子叶片尾缘附近的脉动压力, 改变上、下游叶片的时序位置, 当整个转子叶片表面脉动压力的幅值比最大值减小 19.4% 时, 其叶尖前缘脉动压力的幅值仅比最大值减小 9.4%.

关 键 词: 转子; 非定常气动力; 数值模拟; 尾迹; 势扰动; 叠加特性

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Composing and adding effect of rotor blade unsteady aerodynamic force

DU Hong-jun^{1,2}, LI Gang¹, HU Jun²

(1. The First Aeronautical College of Air Force, Xinyang 464000, China;

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

Abstract: The rotor blade unsteady aerodynamic force in a single-stage low speed compressor with inlet guide vane (IGV) was simulated numerically in this paper. By analyzing the unsteady blade force located on leading edge and trailing edge of the rotor tip and hub, the adding effect of the upstream wakes and downstream potential effect was illustrated. The upstream wakes affect the whole blade chord range while the downstream potential effect influences only part of the trailing edge. By shifting the clocking position of IGV and stator blade, the amplitude of whole rotor pulsant pressure force can be reduced by 19.4%, while on leading edge of the rotor tip, it can only be reduced by 9.4%.

Key words: rotor; unsteady aerodynamic force; numerical simulation; wake; potential effect; adding effect

叶轮机械中叶片表面的非定常气动力, 主要是由于其内流的非定常性引起的. 当前国内外针对减小叶片表面非定常气动力的问题开展了很多的研究, 主要都是从转、静子叶排间的相互干涉作用入手的^[1-5]. 对于多级轴流式压气机, 由于其内部存在多排相对运动的叶片, 各叶片排间的相互干涉作用十分明显, 随之而来的气动力脉动会使叶片工作时发生强烈震动, 引起颤振和高周疲劳,

导致叶片掉块、断裂等严重事故^[3]. 因此, 减小叶片表面的非定常气动力对于提高叶片的疲劳寿命是非常重要的. 本文针对一个带有导叶的单级低速压气机中转子叶片表面的非定常气动力开展了全面的数值模拟研究, 通过对转子叶根、叶尖局部敏感区域的气动力分析, 阐明了尾迹和势扰动两种非定常性对转子叶片气动力产生影响的时间特性和幅值特性, 提出了利用时序效应减小转子叶

收稿日期: 2008-09-01; 修订日期: 2008-12-08

作者简介: 杜红军(1980-), 男, 湖北老河口人, 讲师, 硕士生, 主要从事叶轮机内非定常流动研究.

片气动力脉动幅值的技术措施。

1 模拟对象简介

本文的数值模拟采用了 NUMECA 公司的 Fine/ Turbo 流场求解器。关于数值模拟过程的详细介绍请参阅文献[6]。模拟对象为加装了进口导向叶片的单级低速压气机,导叶为对称的直叶型,转、静子叶片叶型和安装角均与南航能源与动力学院低速压气机试验器^[7]相同,叶片数均为 30 个,这样在非定常计算时只需进行单个叶片通道的数值模拟,节约了计算机时。导叶和静子时序位置的确定如图 1 所示,以 t 代表当地时间, T 代表一个转子叶片通过周期 BPP (blade passing period), 在 $t/T=0$ 时刻, 转子叶片前缘点运动到导叶尾缘正下游, 此时静子叶片相对转子叶片尾缘分别位于 5 个不同的周向位置, 以静子叶片前缘点与转子叶片尾缘点之间的周向距离 Δt 与栅距 P_s 的比值表示不同的时序位置。模拟对象的流量特性线如图 2 所示, 圆点表示计算分析时压气机工作点, 该点流量系数为 0.755。

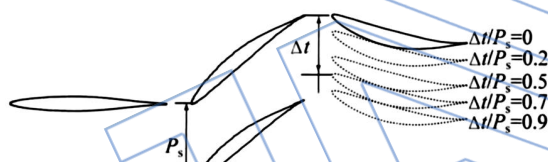


图 1 时序位置示意图
Fig. 1 Sketch of clocking position

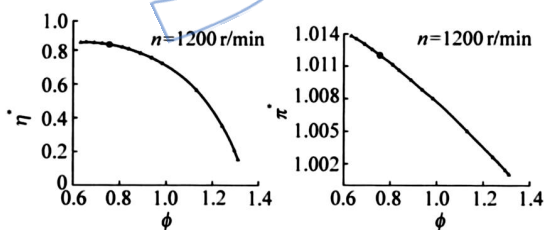


图 2 模拟对象的流量特性线
Fig. 2 Flow characteristic of the low speed compressor

2 时序位置对非定常气动力的影响

定义转子叶片面平均的非定常气动力(以下简称“脉动压力”)为: $\delta F_s = \left| \oint_{ds} \right| - \left| \oint_{ds} \right| / A$, 其中 A 为转子叶片的表面积, Ω 表示沿着整个叶片外表面的矢量积分。

图 3 是两周期内转子叶片表面平均脉动压力的变化曲线, 为了便于观察, 只给出了脉动压力变

化幅值最大和最小的两个位置, 其他时序位置脉动压力的变化幅值界于两者之间。结果表明, 5 个时序位置脉动压力的变化过程都比较近似于规则的正弦波形, 所有的时序位置均在 $t/T=0.3$ 时平均脉动压力达到最大值, 而在 $t/T=0.8$ 时达到最小值, 从脉动幅值的变化范围上来看, $\Delta t/P_s=0$ 的位置最小, 而 $\Delta t/P_s=0.5$ 的位置最大。

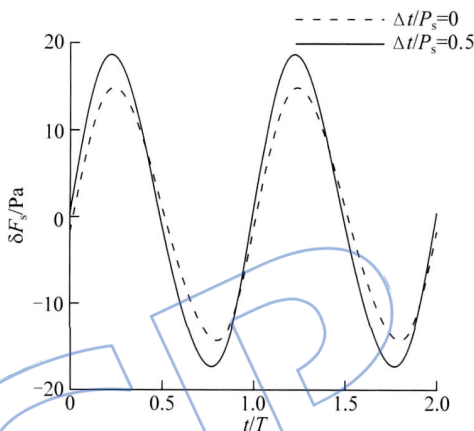


图 3 转子叶片表面平均脉动压力的变化曲线

Fig. 3 Average pulsant pressure force of the rotor blade

将各个时序位置转子叶片表面的脉动压力进行快速傅立叶变换 (FFT) 后, 对其幅频特性进行分析。结果表明, 转速为 1200 r/min 时, 无论哪一种时序位置, 转子叶片表面脉动压力幅频特性中频率为 600 Hz 的一阶分量均占有主导地位, 这表明引起转子叶片表面气动力脉动的扰动源频率与转子叶片通过频率相同, 即转子叶片表面的气动力脉动是由于上游导向器叶片的尾迹和下游静子叶片的势扰动引起的。图 4 表明, 在 5 个时序位置中, 当 $\Delta t/P_s=0.5$ 时, 脉动压力的一阶分量达到最大值, 而 $\Delta t/P_s=0$ 时达到最小值, 比 $\Delta t/P_s=0.5$ 时减小了 19.4%。这说明导叶和静子的周向相对位置变化时, 中间转子叶片表面的脉动压力强度将发生明显的变化, 从而为利用时序效应减小转子叶片表面的非定常气动力提供了依据。

3 叶根、叶尖前后缘的局部非定常气动力

近些年来, 在对风扇、压气机叶片损坏的事故调查中发现, 有相当多的一部分源自叶片局部的疲劳失效, 这些失效的敏感部位通常出现在风扇叶片的根部和尖部位置, 失效形式有叶尖区掉块, 根部裂纹扩展等等。针对这个问题, 本文以计

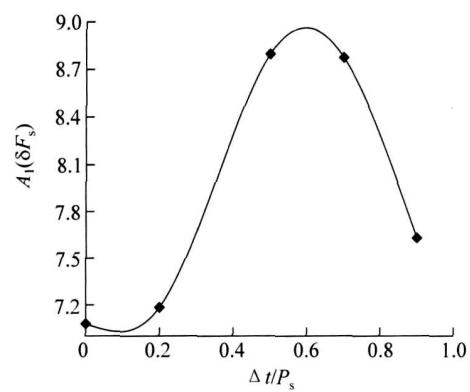


图 4 脉动压力一阶响应幅值与时序位置的关系
Fig. 4 First order in response of the pulsant pressure force versus clocking position

算数据为基础,对转子叶根前缘、尾缘以及叶尖前缘、尾缘 4 个应力比较集中的位置进行了局部脉动压力分析,研究了叶片局部位置脉动压力随时序位置的变化关系.

局部脉动压力的描述方法与前述的公式相同,其表达为:
$$\delta F_{\Omega} = \left[\left| \oint_{\Omega} ds \right| - \left| \oint_{\Omega} ds \right| \right] / S_{\Omega},$$
$$\Omega (i = 1, 2, 3, 4)$$
 分别表示 4 个选择在转子叶片叶根、叶尖前后缘局部位置的积分运算区域, S_{Ω} 为积分区域的面积.图 5 是只有上游导叶尾迹影响的情况下,转子叶片局部脉动压力的变化图.由图可见,尾迹的影响使转子叶尖前缘的脉动压力幅值达到叶尖尾缘的两倍以上,而且脉动压力的相位也发生了很大的变化,接近于 180° ;叶根的局部脉动压力与叶尖相比不是很强,且在叶根尾缘处,局部脉动压力很小,几乎可以忽略.

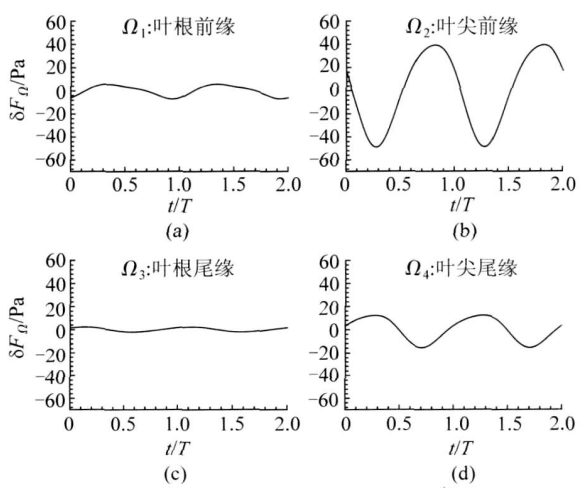


图 5 尾迹作用下转子局部脉动压力变化图
Fig. 5 Local pulsant pressure force in response to IGV (inlet guide vane) wake

在只受下游静子叶片势扰动影响的情况下,转子叶片表面局部脉动压力的变化情况如图 6 所示.在转子叶片前缘,叶根处局部脉动压力几乎不随时间变化,叶尖处的局部脉动压力波动也不明显,对比而言 $\Delta t/P_s = 0$ 和 0.5 两种结构叶尖前缘的脉动压力是反相位变化的.由于没有进口导叶,转子叶片表面的脉动压力是由静子叶片势扰动引起的,结合图 5 可以发现:在转子叶片前缘附近的位置上,静子势扰动引起的脉动压力强度与导叶尾迹引起的脉动压力相比几乎可以忽略不计;而尾迹和势扰动对转子尾缘脉动压力强度的影响则是相当的.图 6 直观地反映出了 $\Delta t/P_s = 0$ 与 0.5 两种结构在相位上的差异.

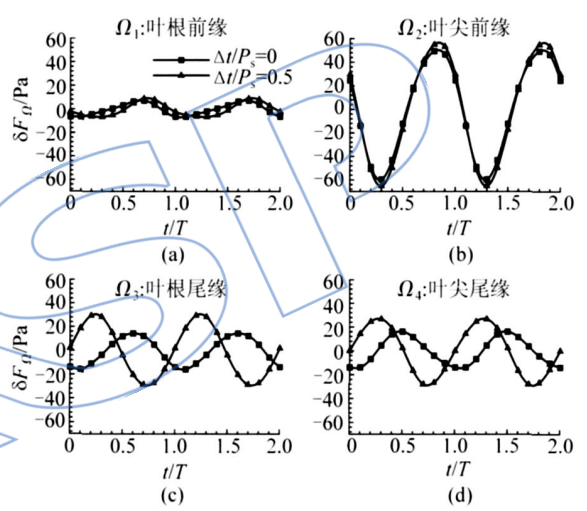


图 6 势扰动作用下转子局部脉动压力变化图
Fig. 6 Local pulsant pressure force in response to downstream potential effect

图 7 是完整的 1.5 级压气机中转子叶片表面脉动压力的变化图,压气机同样是工作在图 2 中标记点状态.为清晰起见,5 个时序位置中只画出了脉动压力最强和最弱的两个位置,其他三个位置的脉动压力幅值介于两者之间(未画出).由图 7 可见,转子叶片局部脉动压力的变化呈现如下的特点:叶根、叶尖前缘的脉动压力幅值几乎不受到时序位置变化的影响,不同时序位置局部脉动压力的时间和幅值特性几乎没有差别,叶尖前缘脉动压力的幅值几乎是叶根前缘的 4 倍;而在叶片尾缘的局部表面上,同一时序位置叶根和叶尖的脉动压力变化特性几乎完全相同.当时序位置发生变化时,转子叶片局部的脉动压力幅值也发生了明显的变化.从图中可以看到,尾缘点上叶根、叶尖区的局部脉动压力有明显的相位移动,脉动幅值也有显著差异.总体上来看,图 7 的 Ω 和

Ω 中依然是 $\Delta t/P_s = 0$ 附近的位置较小,而 $\Delta t/P_s = 0.5$ 附近的位置脉动较强。

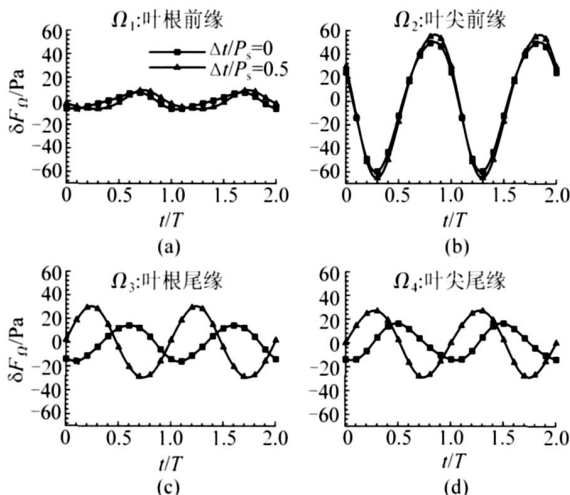


图 7 两种完整时序结构的局部脉动压力变化图

Fig. 7 Local pulsant pressure force in response to both IGV wake and downstream potential effect

结合图 5 和图 6 可以很直观的看到导叶尾迹和静子叶片势扰动引起的脉动压力在转子叶片表面叠加的情况。 $\Delta t/P_s = 0$ 时,由尾迹和势扰动引起的脉动压力在转子叶片表面的四个局部位置几乎都是反相位叠加的,因而整个转子叶片表面的脉动压力幅值减小;而当 $\Delta t/P_s = 0.5$ 时,两种非定常性引起的脉动压力在转子叶片表面同相位叠加而使得转子叶片表面的脉动压力得到加强。从数据处理的过程来看,局部脉动压力的变化,能够集中地反映导叶-静子周向相对位置变化对叶片表面非定常气动力变化的影响。从图 1 我们知道,来自上游导叶尾迹的扰动,在压气机转速和流量系数都相同的情况下,它对转子叶片前缘脉动压力的影响无论从时间上还是从强度上来看,都是相同的,因此转子叶片前缘的局部位置上,脉动压力将不会随着时序位置变化而存在差异,数值模拟的结果也很好地证实了这一分析。而转子尾缘脉动压力的变化,由于受到下游静子叶片势扰动的影响,表现出明显与前缘点不同的特征。由于每次的计算过程都是从转子叶片前缘点扫过导叶尾缘正下游时开始计时的,因此,时序位置变化时,下游静子叶片前缘相对扫过转子尾缘的时间各不相同,导致脉动压力的相位也随时序位置而变化,如图 6 所示。很明显,如果转子叶片尾缘的脉动压力只受到静子叶片势扰动的影响,那么当时序位置变化时,脉动压力只应当有相位上的差异而不会有幅值变化,但是图 7 中却可以很明显地看到

幅值的变化,这一现象说明,转子叶片尾缘的脉动压力同时受到上游尾迹和下游势扰动的双重作用,是两种作用叠加的结果。这也说明了上游导叶尾迹的影响波及下游转子叶片整个的弦长范围,而下游静子叶片的势扰动仅仅只能传播到上游转子叶片通道中有限的范围内。

可见,整个转子叶片表面的脉动压力,实际上是上游导叶尾迹和下游静子叶片势扰动两种非定常性引起的脉动压力叠加的结果,如果单从减小转子叶片表面脉动压力的强度上考虑,则应当使两种非定常性引起的脉动压力在转子叶片表面的大部分位置上反相位叠加。

4 结 论

1) 在本文研究的 1.5 级压气机中,上游导叶尾迹影响了整个转子叶片弦长范围内的脉动压力,而下游静子叶片的势扰动仅能对转子尾缘附近的脉动压力产生影响,势扰动对转子前缘的影响与导叶尾迹相比可以忽略。

2) 导叶和静子的周向相对位置变化时,中间转子叶片表面的脉动压力强度也将发生变化,当导叶和静子叶片处于特定的周向相对位置(本算例为 $\Delta t/P_s = 0$ 位置)时,可使中间转子叶片表面的脉动压力强度最小。

3) 改变转子上、下游叶片的时序位置,对减小转子叶片叶尖前缘脉动压力幅值的作用并不明显。对图 7 中叶尖前缘局部位置的脉动压力进行 FFT 变换后,发现当整个转子叶片表面的脉动压力一阶响应幅值减小 19.4% 时,其叶尖前缘的脉动压力一阶响应幅值只减小了 9.4%。

参考文献:

- [1] Hsu S T, Wo A M. Reduction of unsteady blade loading by beneficial use of vortical and potential disturbances in an axial compressor with rotor vlocking[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1999, 13(2): 0-16.
- [2] Saren V E, Savin N M, Zacharias R M. Experimental and numerical investigation of unsteady rotor-stator interaction on axial compressor stage performance [R]. Stockholm, Sweden: 8th International Symposium on Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity of Turbomachines, September 14-18, 1997.
- [3] Mailach R, Vogeler K. Aerodynamic blade row interactions in an axial compressor: Part II - Unsteady profile pressure distribution and blade force[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2004, 126(1): 45-51.
- [4] 王正明, 王嘉伟. 动静叶相互干扰非定常流动特性的数值

研究[J]. 燃气涡轮实验与研究, 2004, 17(1): 12-16.

WANG Zhengming, WANG Jiawei. Numerical investigation of unsteady flow characteristic of rotor-stator interaction[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(1): 12-16. (in Chinese)

[5] 候安平, 周盛. 轴流式叶轮机时序效应的机理探讨[J]. 航空动力学报, 2003, 18(1): 70-75.

HOU Anping, ZHOU Sheng. Probe into the mechanism of clocking effect in turbomachinery[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(1): 70-75. (in Chinese)

[6] 杜红军, 胡骏. 时序效应对转子叶片表面非定常气动力的影响[C]// 中国航空学会第 6 届动力年会论文集. 南京: 中国航空学会动力专业分会, 2006.

[7] 胡骏, 汤国才, 于再. 动叶尾迹对静子非定常气动性能的影响[J]. 航空动力学报, 1999, 14(4): 387-392.

HU Jun, TANG Guocai, YU Zai. Effect of rotor wake on the unsteady aerodynamic performance of stator[J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(4): 387-392. (in Chinese)

