

非对称处理机匣周向分区数的实验^{*}

刘建勇, 袁 巍, 郝晓林, 陆亚钧

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 为了改善传统的对称处理机匣对压气机“扩稳降效”的普遍现象, 设计了五种周向分区数的非对称处理机匣。实验结果显示, 非对称处理机匣的分区数对压气机的稳定裕度影响不大; 而对效率和总压升影响较大: 随着分区数增加, 压气机的性能先增加后降低。其中一种优选结构的非对称处理机匣能使压气机的稳定裕度扩大 13%, 同时使其峰值效率提高 0.8%。这种非对称处理机匣能取得明显优于轴对称处理机匣的“扩稳增效”的原因是它改变了处理槽对压气机叶尖作用的非定常信号。根据非定常耦合流动理论, 其产生的独特的低频激励信号能够对压气机叶尖复杂的非定常流场产生耦合整流效果。

关键词: 压气机; 非对称处理机匣⁺; 非定常信号

中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2009) 04-0434-05

Experiment on treating block number of non-axisymmetric casing treatment

LIU Jian-yong YUAN Wei HAO Xiao-lin, LU Ya-jun

(National Key Lab of Aircraft Engine, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract Traditional axisymmetric casing treatment always reduces the efficiency while improving the stall margin of a compressor. Five non-axisymmetric casing treatments with different circumferential block numbers were designed. It was proved that different numbers of treating blocks influence compressor stall margin little, but obviously change the efficiency and total pressure rise. Both of which rise is followed by a gradual decline at the process of increasing the number of treating blocks. An optimized non-axisymmetric casing treatment can not only increase the stall margin of compressor by 13%, but also raise the max efficiency by 0.8%. The cause for this is analyzed as that non-axisymmetric distributed treating slots change the unsteady exciting signal for the tip flow. Based on the Unsteady Cooperative Flow theory, the low-frequency exciting signal from the optimized non-axisymmetric casing treatment can coupled with the complicated vortex tip flow in the compressor.

Key words Compressor; Non-axisymmetric casing treatment⁺; Unsteady signal

1 引 言

航空发动机的压缩系统中因各种不稳定因素导致的旋转失速和喘振现象, 成为制约研制高性能发动机的主要问题之一。而在压气机内, 具有很强非定常性的二次流动往往是压气机进入非稳定工况的主要诱因。为了控制压气机叶尖间隙泄漏流和推迟旋转失速, 机匣处理技术经过几十年的发展已成为比较成功的控制方法, 并且因其扩稳效果好、结构简单等优点而被广泛应用于许多现役发动机中。

因为对叶尖流动机理认识的不足, 现有的绝大多数处理机匣都存在着对压气机“扩稳降效”的效果。自从 20 世纪 60 年代以来, 人们已经研究了多种结构形式的处理机匣, 有周向槽、轴向槽、折线斜缝槽等。Fujita 和 Takata^[1]在总结了各种机匣处理技术后认为: “机匣处理技术总是以损失效率为代价而提高扩稳裕度的, 而且扩稳裕度越大, 所蒙受的损失也越大”。由于对失速过程和处理机匣延迟失速的机理还存在一些认识不足之处, 在相当长的一段时间内, 各种处理机匣结构设计只能按照已有的认识, 通过实

^{*} 收稿日期: 2008-06-26 修订日期: 2008-09-25

基金项目: “凡舟”青年科研基金 (20060406); 北京航空航天大学博士生创新基金项目。

作者简介: 刘建勇 (1981-), 男, 博士生, 研究领域为流体机械。E-mail: liujy013@tm.com

验方法,在获得足够扩稳裕度的前提下,尽可能减少效率损失。但是这些处理机匣大多依据经验设计,对压气机内流动的复杂性考虑不够。例如处理槽的周向分布延续了以往的轴对称假设,而采用轴对称分布形式。

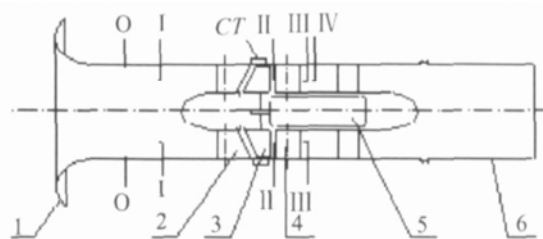
在对压气机的早期研究中,人们假设压气机内的流动是轴对称的。这种简化使得对压气机的研究更方便,也取得了很多实质性的成果。但是压气机中的真实流动却是非对称的:由于结构和工艺的原因,周向位置不同的叶片并不完全一样,压气机的叶尖间隙也很难保证全周都是均匀的;压气机进入失速工况时会在周向上产生具有明显非对称特征的旋转失速团。近年来,人们的一些研究也在考虑将压气机真实流动的非对称性考虑进来,包括进行非对称的叶尖间隙研究^[2,3]和非对称轮毂端壁造型^[4]等。

本文研究的目的是寻找一种既能较大幅度地扩大压气机的稳定裕度又能提高其效率的特殊处理机匣。在考虑了压气机真实流动的非对称性的前提下,本文打破了处理机匣轴对称设计的传统,在一台单级低速轴流压气机实验台上进行了多种非对称处理机匣的研究。从另一个角度来讲,本文的工作就是用不对称的方法来解决压气机中的不对称流动问题(包括周向不对称的旋转失速现象),以推迟旋转失速的发生和获得性能的提高。

2 实验装置和测量方法

实验台由低速轴流压气机、测试系统、动力装置及其控制系统、供电系统四大部分组成(结构如图 1 所示)。该低速压气机的设计转速是 3 kr/min ,设计点总压升为 1.55 kPa 。为了测试压气机的性能,本实验台选用三个测量截面。第一个测量截面为图 2 中的 O-O 流量测量截面,位于压气机叶排前,距压气机进口集流器前沿平直段 $0.25D$ 处。在实验进口集流器风筒上沿周向均布四个静压孔,内径均为 1.5 mm 。第二个测量截面为 I-I 进口总压测量站,位于压气机进口导叶前缘大约 1 倍进口直径 D 处,由于此进口截面为均匀流场,在周向上仅布置了一个总压梳。第三个测量截面为 III-III 级出口总压测量截面,周向上间隔 90° 左右分布了四个总压梳。

在非对称处理机匣作用下,压气机出口为明显的非对称流场,周向上应该布置多于四个的总压梳以更精确地反映出口的总压场。而又为了不增加测量总压梳对流场的堵塞,在测量非对称方案时,每个流量



1) Inlet flow collector 2) KV's 3) Rotor blades
4) Stator blades 5) Electromotor 6) Outlet pipe

Fig. 1 Sketch map of the experimental low-speed axial compressor

点工况的级出口分四次测量,并且每次测量只有四个总压梳。在每次测量中,保证出口总压梳与非对称处理机匣之间的周向相对位置与其它三次测量时错开一定角度。这样使得在相同流量下,相当于有 16 个总压梳在测量出口的非对称流场。此 16 个总压梳的周向相对位置如图 2 所示。

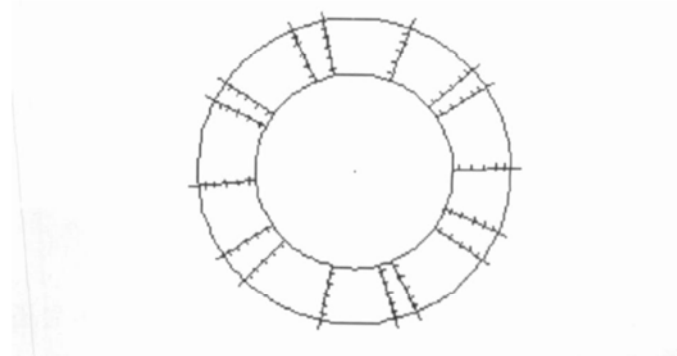


Fig. 2 Circumferential station of total pressure combs at outlet

处理槽的结构形式选取一种新型的圆弧斜槽式处理槽^[5],这种处理槽能将叶尖压力面附近的高压气体引到上游,从而达到控制间隙泄漏流,推迟失速的效果。已有的实验结果已经证明了这种形式的处理机匣能够大幅度提高风扇/压气机的稳定裕度,对压气机的效率损失很少。其在实验台中安装在图 1 所示的 CT 处。

3 实验结果与讨论

3.1 非对称处理机匣的周向分区数对压气机性能的影响

为了进行比较分析,本文首先设计了处理槽数为 40 的对称处理机匣(如图 3 所示),然后在保证总处理槽数不变的前提下,设计了几种不同的处理槽分区数的非对称处理机匣。本实验共设计了分区数分别为 1, 2, 3, 4, 5 的 5 种非对称处理机匣。图 4 显示了分区数分别为 1, 2 和 5 等 3 种方案的处理槽分布情

况。由图可知,处理槽连续分布形成的处理区与没有处理槽的实壁区相间分布。所有处理区的周向角度总和为 180° 且各分区一样大。因为五种非对称处理机匣和对称处理机匣都包括 40 个处理槽,前者的处理槽周向间距仅为后者的一半。



Fig. 3 Distribution of 40 treating slots on an axisymmetric casing treatment

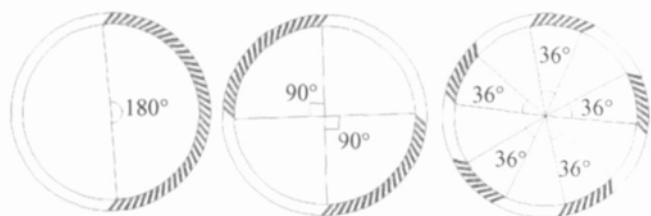


Fig. 4 Distribution of 40 treating slots on three non-axisymmetric casing treatments with blocks number of 1, 2 and 5

图 5 显示了包含实壁机匣、对称处理机匣和上述 5 种非对称处理机匣在内的 7 种方案下,压气机的总压升 Δp_t 特性。在大流量范围内,这几种机匣下压气机的总压升特性线很接近;但是在近失速区,压气机的增压能力受机匣结构影响有较大的差别。总体来说,在小于设计点流量的近失速区内,有处理槽结构的机匣使得压气机的增压能力相比于没有处理槽的实壁机匣下的压气机提高了很多,并且能够很大程度地减小压气机的失速点流量。此外,还可以看到,无论对称结构还是非对称结构的处理机匣使得压气机的失速点流量处于同一水平。也就是说,只要它们的处理槽数保持一致,改变处理槽的周向分布形式对处理机匣的扩稳能力变化不大。实验结果显示,它们都能使压气机的稳定裕度增加约 13%。

图 6 反映了压气机的最高效率 $\eta_{\max}$ 和最大总压升 $\Delta p_{t,\max}$ 随非对称处理机匣的分区数的变化关系,它们保持着相似的规律:单个分区时,总压升和效率都是较低的;分区数为 2 时,压气机的性能达到一个峰值;而当分区数继续增加时,最大总压升和峰值效率基本处于下降的趋势,直至分区数为 5 时的压气机的性能已经很接近于 40 槽对称处理机匣 (分区数为

40) 时的水平。在这里,分区数为 4 时压气机的性能取得仅次于分区数为 2 时的小峰值,后文将会解释其中的原因。

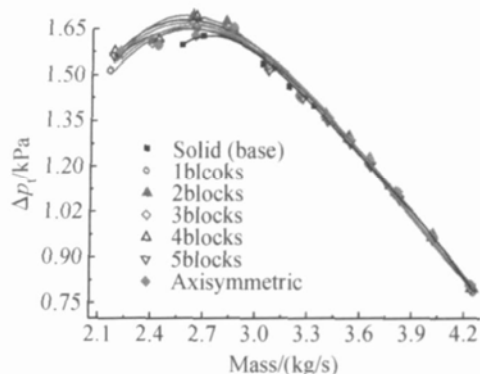


Fig. 5 Compressor's characteristics of total pressure rise under seven casings

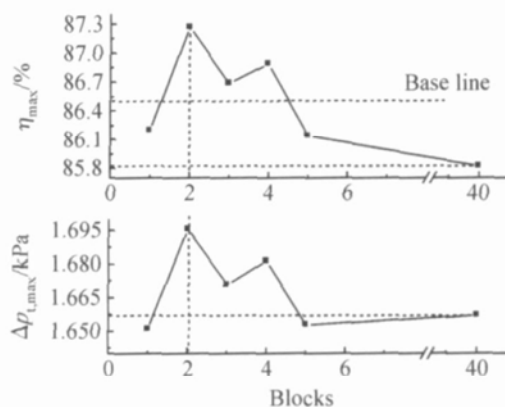


Fig. 6 Max efficiency and max total-pressure rise of compressors with different number of treating blocks

3.2 对称处理机匣与非对称处理机匣的比较

图 7 和 8 分别给出了三种机匣 (实壁机匣、对称处理机匣和 2 分区的非对称处理机匣) 作用下压气机的效率特性和总压升特性。由图可以看出,与实壁机匣相比,对称处理机匣使得压气机的稳定裕度提高了 13%,但是其效率下降了 1% 左右。这符合引言中所述的常规处理机匣在扩大压气机裕度的同时降低效率的规律。而在分区数为 2 的非对称处理机匣作用下,压气机的性能有更明显的提升:稳定裕度从 11% 增加到 24% 的同时,最高效率提高了 0.8%,最大总压升也提高了 65 Pa (相对增加 4%)。这种非对称处理机匣对压气机起到了明显的“扩稳增效”的效果,与对称处理机匣“扩稳降效”的效果形成鲜明对比。

图 9 给出了包含实壁机匣、对称处理机匣和 2 分区的非对称处理机匣在内的三种机匣作用下,压气机在峰值效率工况的基元级总压升沿展向的分布情况。与实壁机匣相比,对称处理机匣改变了压气机的基元

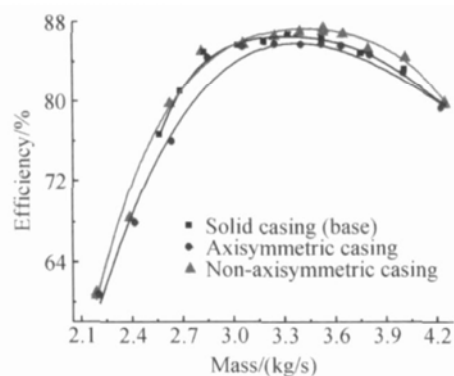


Fig. 7 Compressor's characteristics of efficiency

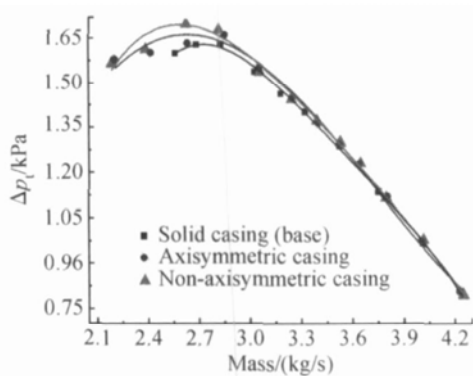


Fig. 8 Compressor characteristics of total pressure rise

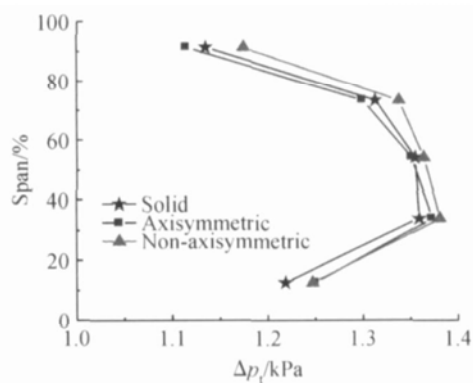


Fig. 9 Spanwise distribution of total pressure rise on S1 stream surfaces of the compressor under three casings

级加功量的径向分布: 根部加功量增加, 而尖部加功量减小。非对称处理机匣同样使得压气机的根部加功量增加, 但是尖部加功量不降反升。该实验压气机的轮毂比较大 (为 0.75), 动叶的展弦比为 1.08, 静叶的展弦比仅为 0.77, 因此压气机内的流动具有很强的三维性。这是两种处理机匣能够改变该压气机的根部加功量的原因。

值得注意的是, 与对称处理机匣相比, 非对称处理机匣使得压气机的加功能力主要在 60% 以上叶高范围内明显地增加。这反映了二者对压气机叶尖流场的作用机理存在较大差别。而这种差别就是 2 分区的非对称处理机匣能够在扩大压气机稳定裕度的同时增加其效率的原因。

为了分析对称与非对称两种处理机匣对压气机叶尖流场作用机理的不同, 本文数值计算了处理槽内的流动情况。由于处理槽内二次流动的影响, 会使压气机的叶尖流场产生很明显的压力亏损。在压气机转子的相对坐标系下, 叶尖流场会感受到处理槽快速扫掠形成的非定常作用。而在单个处理槽扫过的周期内, 叶尖区域某一点的压力随时间变化的波形可以近似为图 10 所示的正旋波形 (图中的静压为无量纲形式 p/p_0 , p_0 为没有尾迹干扰时的值)。在对称处理机匣的 40 个处理槽的作用下, 叶尖流场的压力随时间的波动为图 11 所示的连续性等间隔的非定常脉冲信号 (图中的 T 为转子的转动周期)。这种连续脉冲是一种单一频率的非定常作用信号。而将 40 个处理槽在周向上分成 2 个区后, 2 个处理区和 2 个实壁区对压气机叶尖流场的交替作用会产生如图 12 所示的间断性的非定常作用信号: 处理区内连续分布的处理槽仍会使压气机叶尖流场感受到一个高频的非定常作用信号; 而处理区和实壁区的交替作用会产生一个

低频的非定常作用信号。由图 11 和图 12 的对比可知, 非对称处理机匣产生了不同于对称处理机匣的非定常作用信号。其中, 低频的非定常信号是非对称处理机匣所独有的。

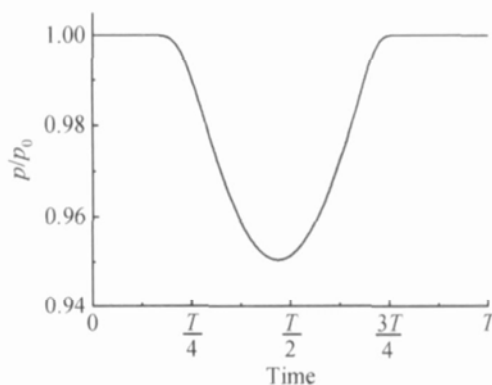


Fig. 10 Variation of total pressure at a certain point in rotor tip region influenced by a single treating slot

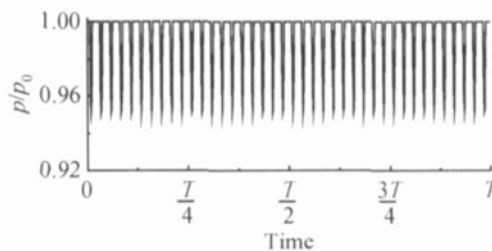


Fig. 11 Variation of total pressure at a certain point in rotor tip region influenced by 40 axisymmetric treating slots

根据本课题组此前关于非定常耦合流动理论的研究^[6~8], 在分析了压气机内旋涡运动的非定常特征的基础上, 当所施加的外部非定常激励频率与旋涡特征频率之间产生某种匹配关系时, 压气机内部的流动会从非定常自然流态转为非定常耦合流态, 流场从无序变为有序, 从而获得压气机性能的提升。

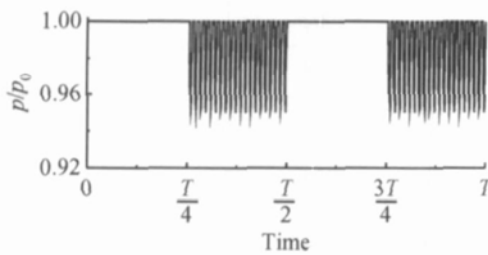


Fig. 12 Variation of total pressure at a certain point in rotor tip region influenced by a non-axisymmetric casing treatment with 40 treating slots and 2 blocks

压气机的叶尖流场是一个旋涡运动非常复杂的区域,这里存在着叶尖泄漏涡、附面层的刮削涡、分离涡、和通道涡等。而这些旋涡都有着非常强烈的非定常性和自身的非定常特征频率。如果处理槽的数目和周向分步形式处于比较合理的范围时,处理槽内的二次流动可以看作对压气机叶尖流场有益的非定常激励源。而改变处理槽的分区数意味着改变了非对称处理机匣对压气机叶尖流场的低频非定常激励信号的频率。而由图 8 可知,该低频非定常激励信号在分区数为 2 时达到自己的最优值 100 Hz。可以认为这时的处理槽二次流动和压气机叶尖某一旋涡之间产生了某种耦合整流作用,才会使得压气机的效率有所提升。

根据郑新前的研究工作^[8],当某一个非定常激励频率有益于改善流场时,它的倍频往往也能取得相似的效果。当分区数为 4 时,非对称处理机匣的低频非定常信号是 2 分区时的两倍值 200 Hz。因此才会出现图 8 所描述的现象:4 分区时压气机性能为接近于 2 分区时的小峰值。

4 结 论

本文改变了传统处理机匣的轴对称设计,首次提出了非对称处理机匣的新方法。通过对处理槽的分区数的优化,本文获得能够对压气机进行明显“扩稳增效”的一种非对称处理机匣。本文的工作可以获得以下几项结论:

(1) 非对称处理机匣的分区数对压气机的稳定裕度影响不大,而对峰值效率点附近的性能有较大影响:随着分区数的增加,压气机的峰值效率和最大总压升为先提升后降低的变化趋势。

(2) 就本实验压气机而言,40 槽 2 分区结构的非对称处理机匣能够起到明显不同于对称处理机匣的“扩稳增效”的效果:使得压气机的稳定裕度比实壁

机匣时增加 13% 的同时,其峰值效率能提高 0.8%,最大总压升也能相对增加 4%。

(3) 对称与非对称处理机匣对压气机影响的差别主要在 60% 以上叶高范围内,对压气机的叶尖流场产生了不一样的非定常作用:对称处理机匣对压气机叶尖流场产生连续性的非定常作用信号;非对称处理机匣因为处理槽周向不均匀的分布形式而对压气机叶尖流场产生了间断性的非定常作用信号,特别是产生了独特的低频非定常作用信号。根据非定常耦合流动理论,这个低频非定常信号的频率处于某一个合理值时能够与压气机叶尖的某个旋涡运动产生耦合整流效果。

参考文献:

- [1] Fujita H, Takata H. A study of configuration of casing treatment for axial flow compressor[J]. *Bulletin of Japan Society Mechanical Engineers*, 1984, 27: 1675~1681
- [2] Park KY. Non-uniform compressor flow fields induced by non-axisymmetric tip clearance[D]. *Department of Aerospace Engineering, Inha Univ. Korea*, 1998
- [3] Graf M B, Woag T S, Greitzer E M. Effects of non-axisymmetric tip clearance on axial compressor performance and stability[J]. *Transactions of the ASME*, 1998, 120(4).
- [4] Brenna G, Harvey N, Rose M, et al. Improving the efficiency of the trent 500HP turbine using nonaxisymmetric end walls—Part I turbine design[J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2003, 125(3).
- [5] 袁 巍, 处理机匣的几何结构对压气机特性的影响研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003
- [6] Sheng Zhou, Xinqian Zheng, Anping Hou, et al. Interaction of unsteady separated flow over multibodies moving relatively in the same flow-field[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 288: 981~1009
- [7] Xinqian Zheng, Xiaobo Zhou, Sheng Zhou. Investigation on a type of flow control to weaken unsteady separated flows by unsteady excitation in axial flow compressors[J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2005, 127(3): 489~496
- [8] Xinqian Zheng, Sheng Zhou, Anping Hou, et al. Unsteady cooperative flow type in axial compressor[J]. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(10).

(编辑: 郭振伶)