

文章编号: 1000-8055(2009)06-1385-04

非轴对称处理机匣的周向处理范围的实验

刘建勇, 袁 巍, 陆亚钧

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 为了解决传统处理机匣对压气机“扩稳降效”的现象, 打破处理机匣结构的轴对称传统, 并设计了 5 种不同周向分布范围的非轴对称处理机匣. 实验结果显示压气机的稳定裕度随非轴对称处理机匣的周向处理槽数的增多而单调增加, 而效率则随处理槽数的增多先增加后减小. 当非轴对称处理机匣的周向处理范围为 120° 时, 能使压气机的稳定裕度和效率均有所增加, 起到“扩稳增效”的效果. 初步分析其原因是非轴对称的机匣结构改变了压气机叶尖的非定常流动.

关 键 词: 轴流压气机; 处理机匣; 非轴对称; 非定常流动

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Experimental investigation about the circumferential treating angle of non-axisymmetric casing treatments

LIU Jian-yong, YUAN Wei, LU Ya-jun

(National Key Lab on Aero-Engine, School of Jet Propulsion

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to solve the problem that traditional casing treatment increases the stall margin while reducing the efficiency of compressor, five innovative non-axisymmetric casing treatments with different circumferential treating angles were designed in this paper. In a series of experiments, the stall margin of a compressor increased with the rise of circumferential treating angle, while the isentropic efficiency rose up firstly and fell down later. It was interesting that the stall margin and efficiency of the compressor were both enhanced when the circumferential treating angle of the non-axisymmetric casing treatment was 120°, the reason of which was simply attributable to the fact that non-axisymmetric configuration changed the unsteady tip flow in the compressor.

Key words: axial compressor; casing treatment; non-axisymmetric; unsteady flow

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.

自从上世纪 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、折线斜缝槽和嵌叶片式凹槽等. 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” (参见图 1). 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

收稿日期: 2008-06-13; 修订日期: 2008-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(50476003); 北京航空航天大学博士生创新基金

作者简介: 刘建勇(1981-), 男, 湖南临湘人, 博士生, 主要从事叶轮机气动热力学研究.

种处理机匣结构设计只能按照已有的认识,通过实验方法,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.

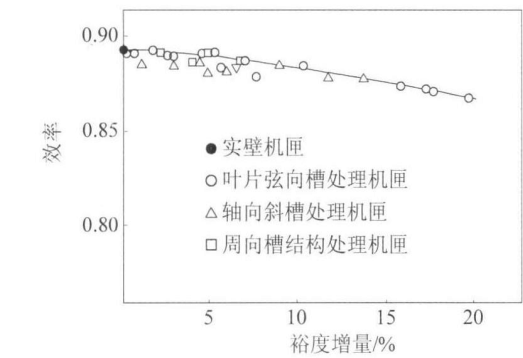


图 1 传统处理机匣的裕度增量和效率损失的关系^[1]
Fig. 1 Compressors' efficiency loss with stall range improvement by traditional casing treatment^[1]

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变得更方便,也取得了很多实质性的成果.但是压气机中的真实流动是非轴对称的:由于结构和工艺的原因,压气机的叶尖间隙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明显非轴对称的旋转失速团.近年来,人们也在考虑将压气机真实流动的非轴对称性考虑进来,包括进行非轴对称的叶尖间隙研究^[2-3]和非轴对称轮毂端壁造型^[4]等.因此为了打破处理机匣传统的轴对称设计,本文在一台单级低速轴流压气机实验台上进行了多种非轴对称处理机匣的研究.从另一个角度来分析,即用不对称的方法来对付不对称的流动现象,预期获得性能的改善.

1 实验设备和方法

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 4 大部分组成.该低速轴流压气机的主要设计参数如表 1 所示.根据压气机性能测试的需要,本实验台选用了 3 个测量截面.第 1 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 4 个静压孔,内径均为 1.5 mm.第 2 个测量截面为 F-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,由于进口为均

匀流场,在周向仅布置了一个总压梳.第 3 个测量截面为图中 III-II 级出口总压测量截面,周向分布有 4 个总压梳.

表 1 该轴流压气机主要设计参数
Table 1 Parameters of the low speed axial compressor

设计参数	参数值
外径 D_2 /mm	450
设计转速 N /(r/min)	3000
轮毂比 d	0.75
转子叶片数目 z_r	19
静子叶片数目 z_s	13
设计点流量 m /(kg/s)	2.9
设计点压升 Δp /Pa	1550

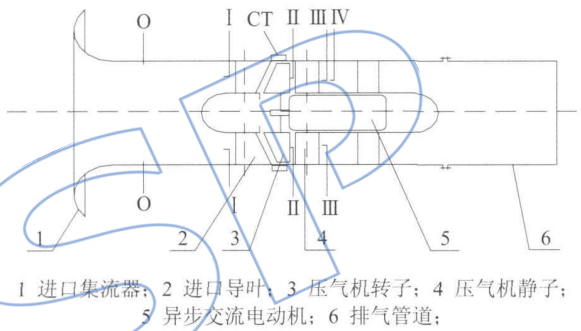


图 2 低速轴流压气机实验台结构简图
Fig. 2 Sketch map of the experimental low-speed axial compressor

因为静子出口为明显的非轴对称流场,4 个总压梳难以反映级出口的全部总压信息.为了更精确的捕捉到出口流场的信息,每个实验方案分 4 次测量,每次测量中保持出口总压梳固定不变而以一定的周向角度旋转非轴对称分布的处理槽,同时,测量过程中应保证每次测量的流量点与其它 3 次测量的流量点一致.取 4 次测量的结果平均所得为最终的出口总压.当把非轴对称分布的处理槽视作周向位置不变时,级出口流场则由 16 个总压梳采集所得,大大提高了对于非轴对称出口流场的测量精度.此 16 个总压梳的周向相对位置如图 3 所示.

处理槽的结构形式选取一种新型的圆弧斜槽式处理槽,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,压气机的效率仅有 1 % 左右的损失^[5].其在压气机中的安装位置为图 2 中所示的 CT(Casing treatment) 处.

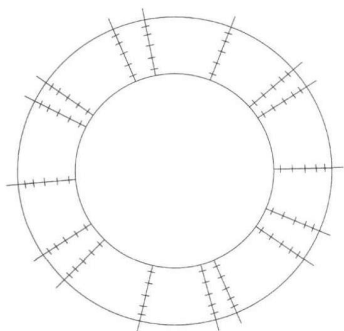


图 3 出口总压梳的周向分布图
Fig. 3 Circumferential station of total pressure combs at outlet

2 实验结果与分析

在进行非轴对称处理机匣的测试之前,本文对轴对称处理机匣的处理槽数进行了优化研究.当处理槽数为 80 时,该压气机的稳定裕度增加了 67 %,而效率仅损失 1 %.分析认为处理槽数为 80 时所决定的处理槽的周向间距能够对压气机叶尖流场产生有益的非定常激励频率.本文选择在槽数为 80 的圆弧斜槽处理机匣上去掉部分处理槽,那些连续分布的处理槽的周向间距仍然不变.因此,这种非轴对称处理机匣会给压气机叶尖流场产生与轴对称处理机匣同样的非定常激励频率.

在实验过程中,共设计了周向处理角度分别为 60° 、 120° 、 180° 、 240° 、 300° 的 5 种非轴对称处理机匣,它们所对应的处理槽数分别为 13、27、40、53 和 67.图 4 给出了周向处理角度分别为 120° 、 180° 和 240° 时的处理槽分布情况.

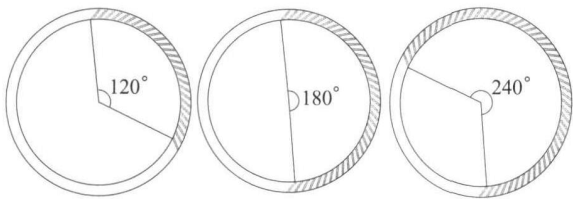


图 4 周向处理角度分别为 120° 、 180° 、 240° 时的处理槽分布图
Fig. 4 Distribution of casing slots at circumferential treating angle of 120° 、 180° 、 240° .

实验结果显示,非轴对称处理机匣的周向处理槽数对压气机的效率有较大的影响.图 5 给出了不同处理角度时压气机设计点附近的效率特性放大图.在图中所示的压气机效率在 7 种机匣结构下具有不同的水平,最大差别接近 2 %.而从图 6 可以看出随着非轴对称处理机匣的周向处理角

度的增加,压气机的最高效率是先增加后减小的变化趋势,并且在处理角度为 120° 时达到峰值,甚至比实壁机匣的压气机峰值效率还高了 0.5 %.而当处理角度增加到 360° 时,处理机匣成为轴对称的结构,此时的压气机峰值效率比实壁机匣时下降了 1.0 %.

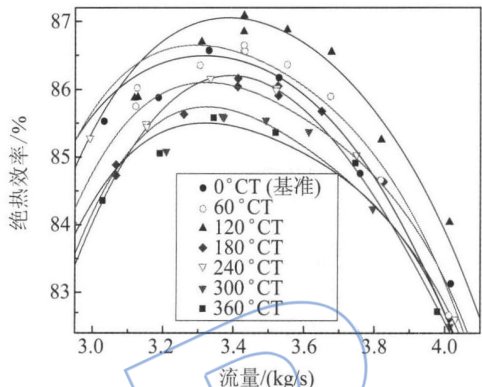


图 5 7 种机匣结构的压气机在设计点附近的效率特性
Fig. 5 Compressor's efficiency around design point under seven kinds of casing

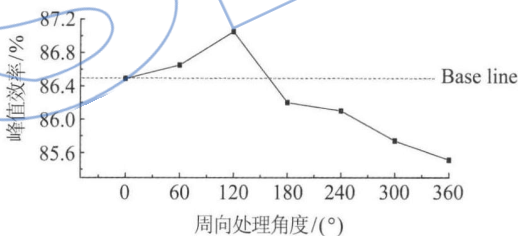


图 6 压气机的峰值效率随处理机匣的周向处理范围的变化趋势

Fig. 6 Trend of compressor's max efficiency with circumferential treating angle of casing treatment

周向处理角度为 120° 的非轴对称处理机匣相对于全周 360° 处理的轴对称处理机匣来说,处理槽数减少了 $2/3$.如果按照定常的分析方法,前者因处理槽数减少导致处理槽内的二次流损失相应地减少 $2/3$,那么压气机的效率损失也应该是全周处理时的 $1/3$.也就是说,从定常的角度分析, 120° 非轴对称处理机匣作用下的压气机峰值效率应该比实壁机匣时下降 0.33 %,而不是实验所测得的其峰值效率比实壁机匣时增加 0.5 %.因此,周向处理角度为 120° 的非轴对称处理机匣能够增加压气机效率的原因应该是非轴对称的处理槽布局方式导致压气机叶尖的非定常流场产生了变化.

图 7 给出了该压气机在 5 种非轴对称处理机匣作用下的总压升特性.由图可以看出,压气机的

增压能力受周向处理槽数的影响很大,当处理槽数越多时,压气机的最大总压升越高.同时可以看到压气机的工作范围随周向处理角度的增加而明显增加.由图8可以看到,随着处理角度的增大,压气机的稳定裕度逐步增加,从11.7%增加到66.7%.

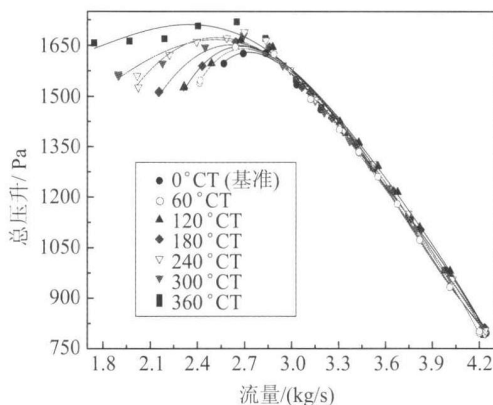


图7 7种机匣结构的压气机总压升特性

Fig. 7 Compressor's characteristics of total pressure rise under seven kinds of casing

此外,从图8可以看到稳定裕度随处理角度的增加而非线性增加:斜率随着处理角度增加逐渐变大.而图9则显示压气机的临界失速点流量

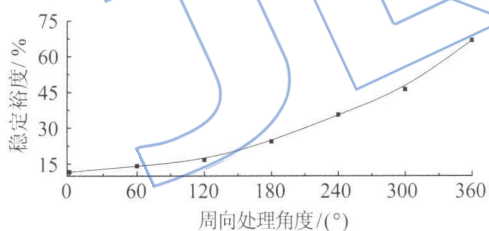


图8 压气机的稳定裕度随周向处理角度的变化关系

Fig. 8 Compressor's stable operating flow range with different circumferential treating angles

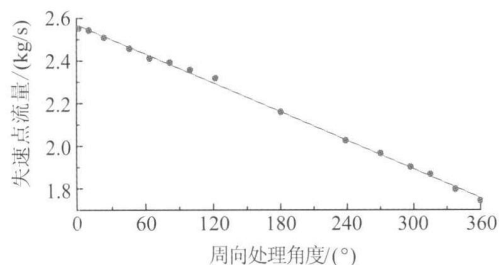


图9 压气机的失速点流量随周向处理角度的变化关系

Fig. 9 Stall mass of compressor with different circumferential treating angles

随处理角度增加而线性减小,也就是说,压气机稳定工作的流量范围随处理角度增加而线性增加.这里,稳定裕度随处理角度的变化关系与失速点流量不同的原因是:稳定裕度除了考虑临失速点的流量外,还考虑了临失速点的增压比,而临界失速点的总压升则是随处理角度的增加而非线性变化的.

3 结论

本文改变了传统处理机匣的轴对称设计,研究了多种非轴对称处理机匣对压气机性能的影响.通过改变处理槽的周向分布范围,本文获得能够对压气机产生“扩稳增效”的一种非轴对称处理机匣.当在周向120°的范围内分布圆弧斜槽时,该处理机匣在提高压气机稳定裕度6%的同时,使得压气机的峰值效率比实壁机匣时提高了0.5%.初步分析,此非轴对称处理机匣能使压气机的效率增加的原因是非轴对称的机匣结构使压气机内流场感受的非定常性发生了变化.此外,压气机稳定工作的流量范围随非轴对称处理机匣的处理槽数增加而线性增加.

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 K Y, Non-uniform compressor flow fields induced by non-axisymmetric tip clearance [D]. Korea: Inha University, 1998.
- [3] Graf M B, Wong T S, Greitzer E M, et al. Effects of non-axisymmetric tip clearance on axial compressor performance and stability [J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120(4): 648-661.
- [4] 高增珣,高学林,袁新.透平叶栅非轴对称端壁的气动最优设计[J].工程热物理学报,2007,28(4):589-591. GAO Zengxun, GAO Xuelin, YUAN Xin, Aerodynamic optimal design of non-axisymmetric endwall for a turbine cascade [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(4): 589-591. (in Chinese)
- [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. YUAN Wei, The research of the influence of casing treatment geometry on compressor characteristic [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003. (in Chinese)