

文章编号: 1000-8055(2008)06-1067-05

间隙流触发压气机内部流动失稳机制 及周向槽扩稳机理

王 沛^{1,2}, 朱俊强², 黄伟光²

(1. 中国科学院 研究生院, 北京 100080;

2. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100080)

摘 要: 利用高频响动态压力传感器对某低速轴流压气机转子的失速先兆和顶部流场进行了详细的测试, 探明该压气机内部存在与叶顶间隙泄漏流相关的突发型失速先兆, 对压气机转子内部流场进行了单通道定常和非定常数值模拟, 详细分析了压气机内部流动失稳过程中顶部流场结构的变化, 揭示顶部间隙泄漏流触发轴流压气机内部流动失稳机理. 在此基础上, 利用周向槽处理机匣结构对顶部间隙泄漏流进行控制, 并探讨了周向槽处理机匣结构提高压气机稳定工作裕度机理.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 轴流压气机; 流动失稳; 顶部间隙泄漏流; 周向槽处理机匣
中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A

Role of tip leakage flow on flow instability and its control with circumferential groove casing treatment

WANG Pei, ZHU Jun-qiang, HUANG Wei-guang

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: In order to provide a state-of-the-art understanding of the flow field in axial-flow compressor in the perspective of enhancing its stability by using passive means, the detailed tip flow structure and inception of rotating stall were measured in a subsonic compressor rotor with high response pressure transducers. The inception of spike-type rotating stall that correlated with the tip leakage vortex was detected in this compressor. The physical processes occurring when approaching stall and the role of complex tip flow mechanisms on flow instability in current subsonic compressors were assessed by using time-accurate single blade passage computations. Based on these observations, circumferential groove casing treatment was introduced to control the tip leakage flow; and the physical mechanism responsible for stall margin improvement attributed to circumferential groove casing treatment was explored.

Key words: aerospace propulsion system; axial-flow compressor; flow instability; tip leakage flow; circumferential groove casing treatment

收稿日期: 2007-06-01; 修订日期: 2007-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(50676095)

作者简介: 王沛(1983-), 男, 山东临清人, 硕士, 主要从事叶轮机械内部流动的研究.

为了使得发动机的整体性能指标显著提高,尤其是提高推重比,这就对压气机/风扇的设计水平提出了更高的要求.更高的单级压比和效率,在更少的级数上实现更高的负荷就成为压气机、特别是风扇研制所追求的目标.与此同时,叶尖切线速度提高、低展弦比、高叶片稠度等技术的应用,使得压气机内部流动更加复杂,叶顶间隙的影响也更趋严重.研究表明压气机内部流动失稳的发生与叶尖区流动状况有很大的关系,因此,数十年来,许多研究者在叶片顶部的间隙流动方面倾注了大量的心血,利用数值模拟和实验测试,广泛而深入的研究了间隙泄漏流特性^[1-3],从而对压气机转子叶顶间隙流特性及间隙流对压气机性能的影响都有了深刻的理解和把握.然而大多数研究仅仅局限于观察顶部间隙泄漏流特性,对于顶部间隙泄漏流在压气机内部流动失稳,特别是旋转失速发展过程中的作用,则没有深入探讨.为了发展更有效的流动失稳控制方法,必须对顶部间隙泄漏流触发压气机内部流动失稳的机理进行深入研究.

本文利用动态测试和数值模拟手段,对亚声速压气机内部流动进行了详细的试验测试和数值模拟,探索了顶部间隙泄漏流触发压气机内部流动失稳机理,同时利用周向槽处理机匣结构对顶部间隙泄漏流进行控制,揭示了周向槽处理机匣结构提高压气机失速裕度机理.

1 研究对象和研究方法

选取中科院工程热物理研究所的三级轴流压气机实验台的第一级转子为研究对象.在设计条件下转子的主要性能参数为:流量 2.6 kg/s , 压升系数 2.32 , 设计转速 2400 r/min , 转子主要几何参数为:进口轮毂比 0.75 , 顶部展弦比 1.86 , 叶片数 60 , 叶顶轴向弦长 33.3 mm , 顶部间隙大小约为 3.4% 叶顶周向弦长.由于其不稳定工况首先在叶尖部位诱发,故宜于作为顶部间隙泄漏流触发压气机内部流动失稳的研究对象.数值计算采用 Jameson 的有限体积差分格式并结合 Baldwin-Lomax 湍流模型对相对坐标系下的三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程进行求解,采用显式四阶 Runge-Kutta 法时间推进以获得定常解,同时加入二阶和四阶人工粘性项以消除数值计算中过程中的伪数值振荡,为提高计算效率,采用了多重网格法、局部时间步长和残差光顺等加速收敛措施.非定常计算采用了隐式双时间方法,为了节省计算时间,以定常计算结果为非定常计算的初场.

本文采用了多块网格分区技术,分别在顶部间隙和转子通道内生成各自的结构化网格.为了保证叶片前后缘附近较好的网格正交性,叶片区域采用了 O 型网格,而叶片的前后延伸段采用了 I 型网格.顶部间隙区采用了蝶型网格拓扑结构,并保持顶部间隙几何形状不变.需要指出的是叶顶间隙展向网格是均匀分布,并没有在机匣附近加密.为准确俘获到粘性流动现象,保证离开壁面的第一个网格的 $y^+ < 2$.

边界条件给定如下:进口根据实验给定总温,总压和气流角(轴向进气),出口给定轮毂处的静压,并按简化的径向平衡方程确定出口静压沿径向的分布.壁面采用了绝热无滑移边界条件,与转子叶片联结的轮毂壁和叶片壁转动,而轮毂壁的其它部分以及机匣壁则定义为静止.

2 压气机内部流动失稳的动态观测

图1是利用不同周向位置布置的5支动态压力传感器测量得到的压力信号曲线,每条曲线由相应传感器测得,为了减小相位误差,对动态压力传感器测得的信号进行了低通滤波.由图可见,脉冲从出现到完全失速只有几转的时间,并且失速前脉冲的传播速度大于失速团的传播速度,因此实验中旋转失速的先兆类型是突发型的.

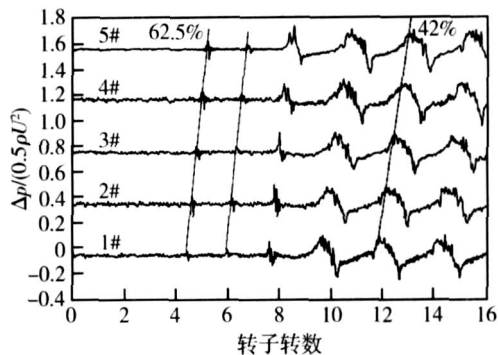


图1 周向动态压力信号

Fig. 1 Raw pressure at each circumferential position

如图2给出了利用弦向布置动态压力传感器,采用时间序列向空间系列转换得到的近失速

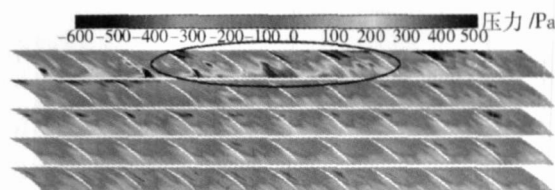


图2 近失速工况下转子叶顶动态压力谱

Fig. 2 Contour of static pressure in the tip region near stall

工况下转子叶顶动态压力谱,5 幅图首尾相连,给出了全周的动态压力谱.由叶顶区域动态压力谱可以看出,对于该转子来说,动叶顶部前缘首先出现了局部流动失稳征兆,这应该是由顶部间隙泄漏流所导致的.

3 压气机内部流动失稳触发机制

为了探明顶部间隙泄漏流在轴流压气机内部流动失稳过程中所起的作用,揭示轴流压气机内部流动失稳机理,对压气机转子内部流场进行单通道定常(稳定工况)和非定常数值模拟(失速工况).如图 3 给出了中等流量工况和近失速工况下叶顶周向平均总压损失分布,这里总压损失利用进口总压进行了无量纲化,高损失区即对应着间隙泄漏涡.在峰值效率工况下,来流/顶部间隙流交接面位于叶片通道下游,并且由于顶部间隙泄漏流导致的损失区较小;随着压气机转子向近失速工况推进,来流/顶部间隙流交接面(高损失梯度区)逐渐向转子叶片前缘移动,到达近失速工况时,来流/顶部间隙流交接面在叶片顶部与转子叶片前缘对齐.

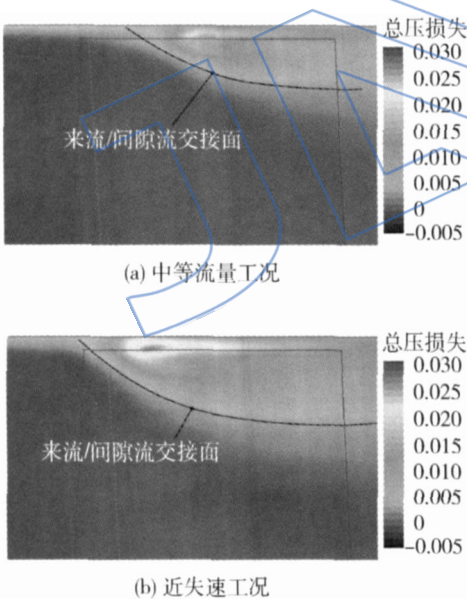


图 3 不同流量工况下周向平均总压损失分布

Fig. 3 Distribution of circumferential-average total pressure loss under different flow rate conditions

如图 4 给出了几个不同工况下压气机转子叶顶流场结构,图中所有切片均沿着叶片中弧线的法向方向截取并且沿轴向均匀分布,图中同时给出了转子叶顶来流和间隙泄漏流粒子示踪.可以看出,中等流量工况下,顶部间隙泄漏流产生于转子叶顶中上游位置并卷起形成间隙泄漏涡,在来

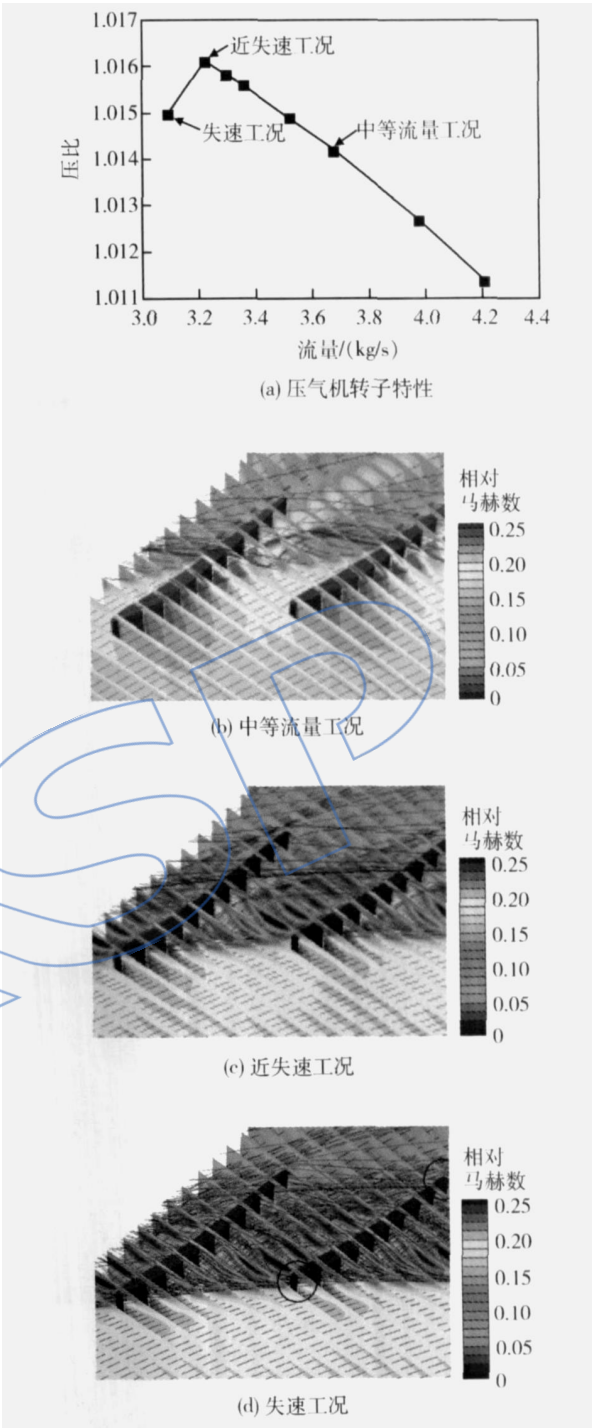


图 4 不同工况下叶顶流场结构

Fig. 4 Flow feature of the tip region under the different flow rate condition

流的作用下间隙泄漏涡被有效地抑制并向转子叶片通道下游发展,间隙泄漏涡轨迹基本沿着相邻叶片的弦长方向,叶顶阻塞很小.随着压气机向近失速工况推进,叶顶气动载荷的增加使得转子通道出口压力升高,迫使间隙泄漏涡转向相邻叶片压力面,间隙泄漏涡轨迹也变得更加接近切向,在此过程中由于顶部间隙泄漏流造成的阻塞不断增加.到达近失速工况时,由于顶部间隙泄漏流导致

的阻塞在相邻叶片压力面附近堆积,对通道主流形成较大的阻塞作用(如图 4(c)). 随着时间的进一步推进,到达失速工况时,由于顶部间隙泄漏流导致的阻塞区不断增长,并使得相邻叶片顶部以下前缘附近区域开始出现了间隙泄漏流溢流(图 4(d)). 另外,由图 4(d)可以看出此时在转子叶片尾缘处出现回流. 因此,该压气机转子遵守 Vo 等^[4]提出关于“突尖”型旋转失速出现的两个准则,即来流/间隙流交接面与转子叶片顶部前缘对齐以及转子叶片尾缘出现间隙流回流. 而不断朝转子叶片上游运动的间隙泄漏流所导致的阻塞是触发该压气机内部流动失稳的主要的机制.

4 周向槽处理机匣抑制流动失稳
机制探讨

由上一节分析可以看出,对于该压气机转子来说,不断朝转子叶片上游移动的顶部间隙泄漏流所导致的位于相邻叶片压力面附近的阻塞是触发该亚声速压气机内部流动失稳的主要机制,因

此,任何能够将抑制叶顶阻塞生成或者将叶顶阻塞吸除的措施都应该能够提高压气机转子的失速裕度. 为了验证这个推测,针对该压气机转子,参照文献[5]的经验,设计如图 5(a)所示的周向槽处理机匣结构,其中第一条周向槽前缘和叶顶前缘平齐. 周向槽槽宽为 3 mm,槽齿宽为 1.5 mm,槽深与槽宽之比为 3,叶尖与处理壁之间的径向间隙大小与未处理时相同,均为 3.4 %叶顶轴向弦长. 利用数值模拟方法对带该周向槽处理机匣结构的压气机转子内部流动进行了详细的数值模拟,如图 5(b)给出了对比了实壁机匣和周向槽处理机匣结构的压气机的特性,由图中可以看出,周向槽机匣处理使得压气机失速点流量减小了 10.55 %左右.

如图 6 给出了和实壁机匣近失速相同背压条件下,带周向槽处理机匣结构的压气机转子叶顶流场结构. 与实壁机匣结构相比,周向槽处理机匣结构的引入一方面对转子叶顶进行卸载,减小间隙泄漏流的驱动力,削弱了间隙泄漏流动;另一方面,采用实壁机匣结构时,顶部间隙泄漏流基本沿着垂直于叶片弦长方向,顶部间隙泄漏流导致的叶顶阻塞较大,对叶顶流场形成较大的阻塞作用;相比之下,周向槽处理机匣结构的采用使得顶部间隙泄漏流的方向接近叶片弦长方向,这两种机制使得叶顶区域由于间隙泄漏流导致的阻塞被大大消除(如图 6(a)). 另外,从周向平均总压损失

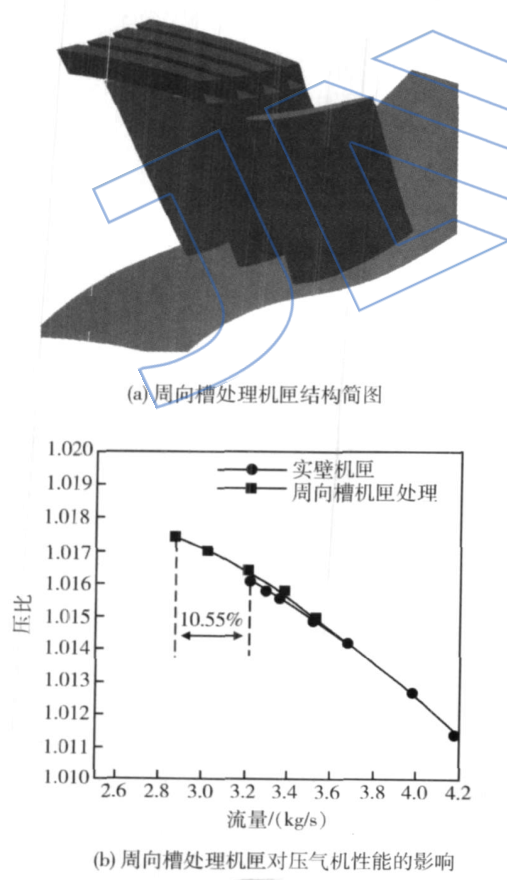


图 5 周向槽处理机匣结构及其对压气机性能的影响
Fig. 5 Schematic and the effect on the compressor performance of the circumferential grooves casing treatment

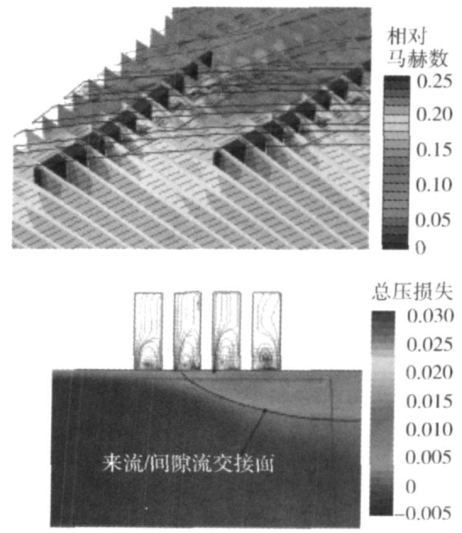


图 6 周向槽处理机匣结构对压气机转子叶顶流场结构的影响
Fig. 6 Effect of circumferential grooves casing treatment on the flow feature of the tip region

分布也可以看出,周向槽处理机匣结构的引入能够有效减小叶顶阻塞,并将来流/间隙泄漏流交接面向转子叶片尾缘推移,从而推迟了相邻叶片压力面前缘附近间隙泄漏流溢流的出现,有效地提高了压气机转子的失速裕度。

5 结 论

利用动态测试和数值模拟手段,对某低速轴流压气机转子内部流场进行了详细的测试和数值模拟,获得了以下研究结论:

1) 对于该压气机转子来说,顶部间隙泄漏涡导致该压气机转子内部出现突发型失速先兆。

2) 随着压气机的节流,顶部间隙泄漏涡不断向转子叶片上游运动,到达近失速工况时,来流/间隙流交接面与转子叶片顶部前缘对齐。同时该压气机转子遵守突尖型失速先兆出现的两个准则,即相邻转子叶顶前缘出现间隙流溢流以及转子叶片尾缘出现间隙流回流。间隙泄漏涡所导致的阻塞是触发该压气机内部流动失稳的主要的机制。

3) 周向槽处理机匣结构的引入能够有效地抑制叶顶阻塞地生成,延迟相邻叶片压力面前缘

附近间隙泄漏流溢流的出现,扩大了压气机的失速裕度。

参考文献:

- [1] Inoue M, Furukawa M, Saiki K, et al. Physical explanations of tip leakage flow field in an axial compressor rotor [R]. ASME Paper 98-GT-91, 1998.
- [2] Lakshminarayana B, Zaccaria M, Marathe B. The structure of tip clearance flow in axial flow compressors[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1995, 117(2): 336-347.
- [3] Chima R V. Calculation of tip clearance effects in a transonic compressor rotor[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(3): 131-140.
- [4] Vo H D, Tan C S, Greitzer E M. Criteria for spike initiated rotating stall [R]. ASME Paper 2005-GT-68374, 2005.
- [5] 楚武利,卢新根,吴艳辉. 带周向槽机匣处理的压气机内部流动数值模拟与试验[J]. 航空动力学报, 2006, 21(1): 100-105.
CHU Wuli, LU Xingen, WU Yanhui. Numerical and experimental investigations of the flow in a compressor with circumferential grooves[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(1): 100-105.