

文章编号: 1000-8055 (2004) 02-0233-04

非轴对称尖部间隙对轴流压气机性能影响的实验研究

梁武昌, 楚武利, 朱俊强, 孙 玲

(西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

摘要: 在实际的压气机中, 转子尖部间隙总是不同程度地存在着非轴对称性。针对非轴对称尖部间隙对压气机性能的影响, 本文设计了一系列结构, 在一台亚音速单、双级轴流压气机实验台上对其孤立转子进行了实验研究, 分析和比较了各种结构形式对压气机性能的影响。实验表明, 非轴对称尖部间隙的存在, 将使压气机的稳态和过失速性能下降。

关键词: 航空、航天推进系统; 压气机; 尖部间隙; 性能

中图分类号: V321.3

文献标识码: A

Effects of Asymmetric Tip Clearance on Axial Flow Compressor Performance

LIANG Wu-chang, CHU Wu-li, ZHU Jun-qiang, SUN Ling

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Asymmetry of rotor tip clearance in compressors always exists to some extent. To investigate the effects of rotor tip clearance asymmetry on compressor performances, a series of nonaxisymmetric tip clearance casing configurations were designed and experimented on a low speed, axial flow compressor with a single rotor. For each geometry, experiments were taken under both 5059 r/min and 8130 r/min conversion velocities. According to the experiments, several phenomena could be obtained: (1) With tip clearance asymmetry increasing, the stall points on compressor performance curves shifted to the lower right, compared with the solid casing and symmetric tip clearance. To evaluate such shifting effects quantitatively, two parameters were defined. (2) With tip clearance asymmetry increasing, the average stall performance was also decreased. (3) On the other hand, however, the size of the stall-unstall hysteresis loops on the performance map decreased with the increasing of the tip clearance asymmetry, which showed that it was easier for the compressor to recover from stall. As a whole, the experimental results showed that, such treated casings were detrimental to the compressor performances.

Key words: aerospace propulsion system; compressor; tip clearance; performance

在实际的压气机中, 转子尖部间隙总是存在着一定的非轴对称性。当转子偏离中心线时, 或

者机匣形状不规则时 (比如椭圆形机匣) 都会造成转子尖部间隙的非轴对称性; 另一方面, 因为

收稿日期: 2003-04-22; 修订日期: 2003-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50176042); 航空科学基金资助项目 (00C53072)

作者简介: 梁武昌 (1974-), 男, 河南洛阳人, 西北工业大学航空动力与热力工程系硕士生。

诸如转子叶片重量分布不均匀, 或转轴缺陷等因素的影响, 转子在旋转过程中, 也会动态地产生不稳定的非轴对称尖部间隙。

非轴对称尖部间隙就是针对压气机中尖部间隙的这种非轴对称性而提出来的, 是一种新型的形式。Graf M B 等在文献 [1] 中阐述了压气机中非轴对称尖部间隙的形成原因, 并首次在一台低速试验压气机上对这种形式对压气机稳态性能的影响开展了一定的研究。

为了进一步研究转子尖部间隙的非轴对称性对压气机性能的影响, 本文设计了一系列非轴对称尖部间隙, 在一台压气机的孤立转子上开展了大量的实验研究, 讨论了尖部间隙非轴对称性对压气机性能的影响。

1 实验装置及测量系统

实验在西北工业大学单、双级轴流压气机实验台上进行, 该实验台由单级实验台扩建而来, 主要由直流电机 (250 千瓦、无级变速)、增速器、扭力测功仪、实验段、排气管道、孔板流量计和堵锥式节气门等部分组成。在实验时, 保留第一级的转子, 去除第一级的静子和第二级的转子, 即该实验针对孤立转子进行。

实验中, 分别在转子上游 45° 相位角和下游 120° 相位角位置布置坐标架和三孔针, 进行转子前后沿叶高方向的温度和压力测量。由三孔针和孔板流量计测量的多路压力经压力扫描阀转化为电信号后被 DAS20 稳态数据采集板采集, 最后由高性能实验计算机记录和处理。进口总温用 0.1 级水银温度计测量, 其最小刻度为 0.1℃; 用铜-康铜材料制成的单点带套管的热电偶感受转子的出口总温, 以 4 只均布进气罩周围相互并联的铜-康铜热电偶相串联, 测量进口和出口的总温升, 联合进口总温得到出口总温。总温升的测量仪器是用了一个自动切换量程的小量程电子电位差计, 精度为 0.5%。工作叶排的扭矩采用一台机械式扭力测功仪进行测量。本实验的测量系统详见文献 [2]。

2 机匣设计

图 1 给出了本文设计的非轴对称尖部间隙结构特征及主要的几何参数。图中虚线表示实壁机匣的内侧壁位置。对于本文设计的一系列结构, A 和 B 的值保持不变, C 和 D 值决定着转子尖部间隙值的水平和不对称性的

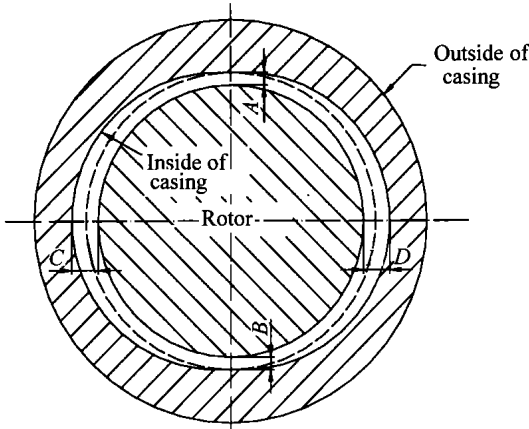


图 1 典型结构

Fig. 1 General structure of treated casing

本实验压气机转子的叶片高度为 58.0 mm, 转子叶片的轴向弦长为 18.19 mm, 在没有进行处理时, 压气机转子的原始间隙为 0.25 mm。表 1 是本文设计的非轴对称尖部间隙的主要参数。

表 1 非轴对称尖部间隙机匣结构
Table 1 Asymmetric tip clearance casing configurations

No	1	2	3	4	5
A/mm			0.25		
B/mm			0.25		
C/mm	0.25	0.60	0.95	1.30	1.30
D/mm	0.25	0.60	0.60	0.95	1.30

3 实验过程

实验中, 安装好处理机匣后, 用塞轨反复测量转子尖部间隙沿周向的分布, 确保图 1 和表 1 中所列各主要参数满足设计和实验的要求, 并记录误差值。然后完成整个实验段的安装, 三孔针的安装和各个相关测量仪器的准备工作。

压气机由稳定工作状态开始, 减小节气门开度, 使压气机流量下降; 工作点越过失速边界后, 继续减小流量, 使它在旋转失速状态下再工作一段时间, 然后增加流量, 压气机工作点沿失速特性线变化, 最后退出旋转失速, 恢复到稳定工作状态。这个过程, 具有与文献 [3] 中所描述的实跃型旋转失速相似的特征。

4 对压气机性能的影响

本文采用了两种裕度改进百分数的定义, 即

表 2 实验结果

Table 2 Results of different configurations

No	G _{cor} at stall point (kg/s)		Pressure ratio at stall point		$\Delta G_1/\%$		$\Delta G_2/\%$		Efficiency at stall point	
	n _{cor1}	n _{cor2}	n _{cor1}	n _{cor2}	n _{cor1}	n _{cor2}	n _{cor1}	n _{cor2}	n _{cor1}	n _{cor2}
1	2.9934	1.8259	1.0718	1.0277	—	—	—	—	0.8683	0.8752
2	3.1070	1.9087	1.0701	1.0272	- 3.7950	- 3.0115	- 3.7930	- 4.3846	0.8564	0.8963
3	3.1654	1.9871	1.0708	1.0272	- 5.7460	- 8.8285	- 5.5221	- 8.1571	0.8780	0.9062
4	3.3182	2.0823	1.0677	1.0267	- 10.8505	- 14.0424	- 10.1341	- 12.4073	0.8638	0.8930
5	3.3400	2.0882	1.0695	1.0268	- 11.5788	- 14.3655	- 10.5783	- 12.6377	0.8611	0.8844

流量裕度改进 (用 ΔG_1 表示) 和综合裕度改进 (用 ΔG_2 表示), 其定义为: $\Delta G_1= 1- G_{cor2}/G_{cor1}$, 其中 G_{cor2} 和 G_{cor1} 分别是对应的处理机匣和实壁机匣的失速点换算流量^[4]; $\Delta G_2= (G_{cor1}/G_{cor2} \times \pi_2^*/\pi_1^* - 1)$, 其中 π_2^* 和 π_1^* 分别是对应的处理机匣和实壁机匣的失速点总压比。

本文采用中、低转速进行实验, 前者对应的换算转速^[4]为 $n_{cor1}= 8130\text{ r/min}$, 后者对应的换算转速为 $n_{cor2}= 5059\text{ r/min}$ 。

4. 1 对压气机稳定工作裕度的影响

表 2 给出了非轴对称尖部间隙对压气机稳定工作裕度和失速边界点效率的影响, 其中包含 n_{cor1} 和 n_{cor2} 两组转速下的实验数据。

由表 2 可以看出, 与实壁机匣 (1 号) 相比, 在应用本文所设计的非轴对称尖部间隙以后, 随着转子尖部间隙非轴对称性的增加, 压气机失速点的流量增加。反映在压气机工作特性曲线上将是: 压气机的失速边界点向右下方移动, 压气机的压升能力下降。这从压气机的失速点总压比变化关系上也可以清楚地看出来。另一方面, 随着失速点的向右移动, 压气机的压升稳定工作裕度也有明显的下降, 特别是 4 号和 5 号机匣, 压气机的裕度下降已经达到了 10% 以上。这说明, 对于本文的实验, 当转子尖部间隙存在非轴对称性时, 压气机的稳定工作性能将急剧恶化。

4. 2 对压气机压升和过失速性能的影响

图 2 给出了小间隙和中等间隙水平下, 压气机转子中非轴对称尖部间隙的存在对压气机压升和过失速性能的影响, 图 3 是大间隙水平下的情况。实验在两个不同转速下进行。

从图 2 和图 3 中可以看到:

(1) 压气机在使用本文所设计的非轴对称尖

部间隙后, 压升能力、稳定工作裕度等性能出现了恶化的趋势。

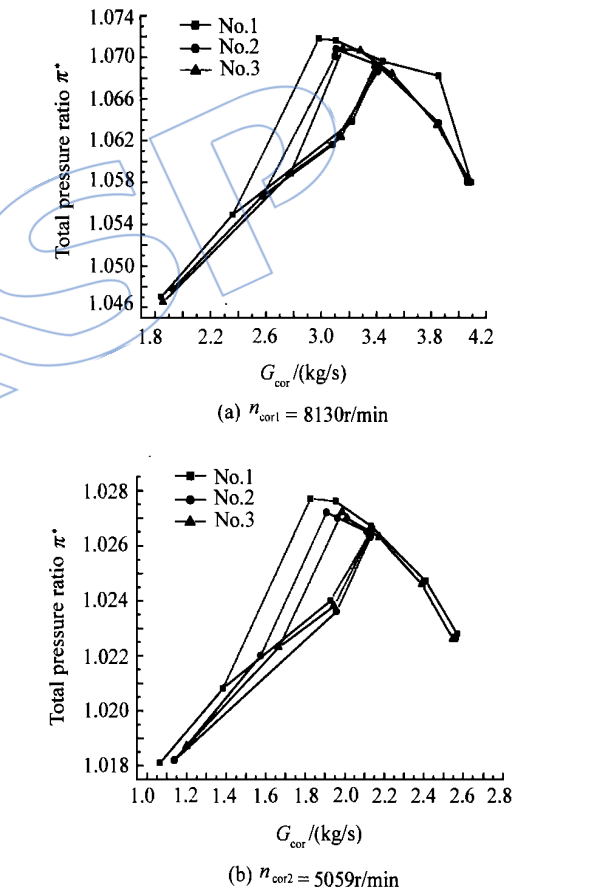


图 2 中、小非轴对称间隙对总压比的影响
Fig. 2 Effects of small and medium asymmetric clearances on total pressure ratio

(2) 在大间隙水平下 (图 3), 在使用 4 号机匣时, 压气机压升性能下降得更多。

(3) 随着间隙水平的增大, 压气机特性线上, 失速滞后环的面积缩小, 说明压气机的失速滞后性减小, 压气机更容易从旋转失速状态恢复到稳

定工作状态, 即压气机的失速恢复能力增强。

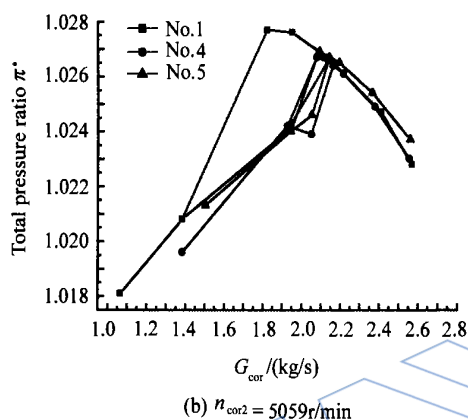
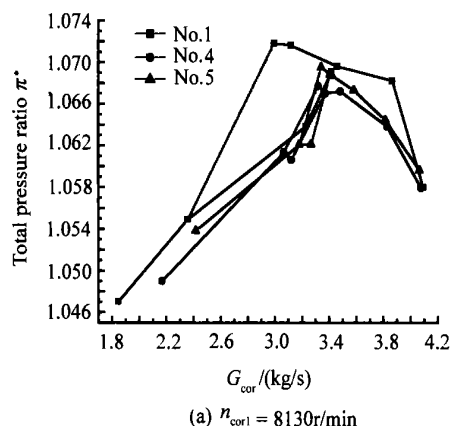


图 3 非轴对称大间隙对总压比的影响

Fig. 3 Effects of large asymmetric clearances on total pressure ratio

5 非轴对称尖部间隙的机理分析

文献 [1] 详细测量了采用非轴对称尖部间隙后, 压气机轴向速度沿周向的分布情况。根据文

献 [1] 的测量可以发现, 当关小气门开度, 减小压气机的流量时, 压气机轴向速度沿周向的分布变得越来越不均匀。在大叶尖间隙和小叶尖间隙之间的过渡区域, 由于尖部间隙减小, 转子叶尖的轴向速度增大。所以失速团往往首先在该区域形成, 之后失速团扩展, 进而形成旋转失速。所以, 采用非轴对称尖部间隙以后, 压气机更容易发生旋转失速, 从而压气机的稳定工作裕度降低。

6 结 论

(1) 一般来说, 当压气机转子尖部间隙存在非轴对称性时, 压气机的旋转失速压升性能将恶化; 在同等间隙水平下, C 不等于 D 时 (C, D 见图 1), 非轴对称尖部间隙对压气机压升性能的危害更大。

(2) 使用非轴对称尖部间隙的情况下, 失速发生后, 失速滞后环的面积缩小, 说明压气机退出旋转失速的滞后性降低, 压气机的失速可恢复性增强。

参考文献:

- [1] Graf M B, Wong T S, Greitzer E M, etc. Effects of Nonaxisymmetric Tip Clearance on Axial Compressor Performance and Stability [J]. Transactions of the ASME, 1998, 120 (4): 648–661.
- [2] 杜辉, 朱俊强, 楚武利, 等. “凹槽导流片式”机匣处理的结构尺寸优化研究 [J]. 推进技术, 1998, 19 (1): 70–74.
- [3] Day I J, Greitzer E M, Cumpsty N A. Prediction of Compressor Performance in Rotating Stall [J]. Journal of Engineering for Power, 1978, 100: 1–14.
- [4] 朱俊强. 航空叶片机原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1996.