

处理机匣激励频率对跨声速压气机性能的影响^{*}

脱 伟, 陆亚钧, 袁 巍, 周 盛, 李秋实

(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: 通过改变处理机匣槽数来改变处理机匣对压气机内部流场的非定常激励频率, 对 4 种激励频率下压气机性能进行了测试。实验结果表明, 处理机匣槽数对应的非定常激励频率是影响压气机性能的关键因素之一。通过优化处理机匣对压气机非定常激励的频率, 压气机性能可以得到全面提升: 对于实验用跨声速压气机, 在近设计转速下峰值效率、综合裕度和最大流量分别提高 0.17%, 19.86% 和 0.81%, 而在低转速下这三个增量最大分别可达到 1.13%, 57.84% 和 1.57%。

关键词: 跨声速压气机; 处理机匣; 非定常流; 激励频率

中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2009) 04-0430-05

Effect of exciting frequency of casing treatment on transonic compressor performances

TUO Wei LU Ya-jun YUAN Wei ZHOU Sheng LI Qiu-shi

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

Abstract Experiments were conducted to explore the effect of unsteady exciting frequency of casing treatment on transonic compressor performances. Unsteady exciting frequencies were changed by changing the slot number of casing treatment. Compressor performances under four different exciting frequencies were respectively measured. Experimental results indicate that the unsteady exciting frequency due to number of slots of casing treatment is one of the most important factors for compressor performances. Compressor performances can be overall enhanced through optimizing this unsteady exciting frequency. For the transonic compressor herein, peak efficiency, stall margin and maximum flow mass can be improved by 0.17%, 19.86% and 0.81% respectively at near design rotating speed and these increases can be maximally extended to 1.13%, 57.84% and 1.57% respectively at low rotating speed.

Key words Casing treatment; Transonic compressor; Unsteady flow; Exciting frequency

1 引 言

上世纪 60 年代 Koch C C^[1] 发现处理机匣可以扩大压气机稳定裕度, 至今, 一些新式的处理机匣获得了很好的性能指标^[2~4], 从而打破了“处理机匣扩大稳定裕度必降低效率^[5]”的规律。但是, 对处理机匣的作用机理还不是很清楚, 还不知道哪些才是最关键的几何参数, 怎样才能改善压气机的性能, 尤其是压气机的失速裕度和绝热效率。

现在普遍认为, 叶尖泄漏涡与叶片通道内逆压力梯度的干扰以及泄漏涡在前缘附近破碎是导致旋转

失速发作的直接原因^[6] (在叶根或轮毂首先失速的压气机除外)。所以, 抑制叶尖泄漏涡, 减小叶尖区域的堵塞, 就能推迟旋转失速的发生。在压气机转子前方布置的处理机匣恰好就实现了这样的功能: 由于逆压力梯度的存在, 泄漏涡产生的低能团能够从下游进入处理机匣, 经过处理槽的整流在处理机匣上游重新喷出回到主流, 叶尖泄漏涡和堵塞被有效地抑制了。仔细分析这一过程还会发现, 由于处理机匣与转子存在转静相对运动, 再加上处理机匣上下游轴向逆压力梯度在周向方向上的不均匀性, 流体在下游进入处理机匣而从上游喷出这一过程必定呈现非定常性。

* 收稿日期: 2008-08-07; 修订日期: 2008-11-12。

基金项目: 国家自然科学基金 (10577002)。

作者简介: 脱 伟 (1982—), 男, 博士生, 研究领域为航空发动机气动热力学。E-mail: tiw i@ sjp. buaa. edu. cn

本文就是从这点出发,在一台跨声速压气机实验台上对处理机匣与压气机的非定常作用进行了探索研究。

从数学物理定解问题的角度来看,处理机匣对压气机的作用就相当于在转子叶尖施加了一个非定常激励边界。因此,就可以从决定非定常激励的三要素(激励频率、幅值和位置)来入手,探索处理机匣对压气机的非定常作用。本文选择最能反应处理机匣非定常性的激励频率作为探索研究的切入点,根据处理机匣激励频率与处理机匣槽数成正比这个关系,通过固定处理机匣的其他几何参数(结构形式,敞开比,搭接量,槽深等),仅改变处理机匣的槽数(这样近似可以认为处理机匣对转子的激励因素中只是激励频率发生了变化),以此来研究处理机匣的激励频率这一单一因素对压气机性能的影响。

2 实验设备及测量方法

实验是在北京航空航天大学航空发动机气动热力重点实验室的跨声速压气机实验台上进行的,实验台简图如图 1 所示。实验试件选用一台单级跨声速轴流压气机。该压气机转子叶片数 17,轮毂比 0.565,设计转速 22 k/rmin,叶尖相对马赫数 1.4,静子采用串列设计,总弯角为 52°,叶片数为 29。

实验用处理机匣全部采用圆弧斜槽结构形式(如图 2 所示),大量实验结果表明^[3-7,8],该形式处理机匣具有扩稳效果好,效率损失小的优点。为了探索处理机匣激励频率这一单一因素的影响,实验用处理机匣采用同样的敞开比和搭接量,分别为 50% 和 35%,处理机匣径向斜角统一为径向角度 45°。

采用传统的绝热效率和总压比特性表征压气机的性能。通过压气机级前后周向均布的总压探针先

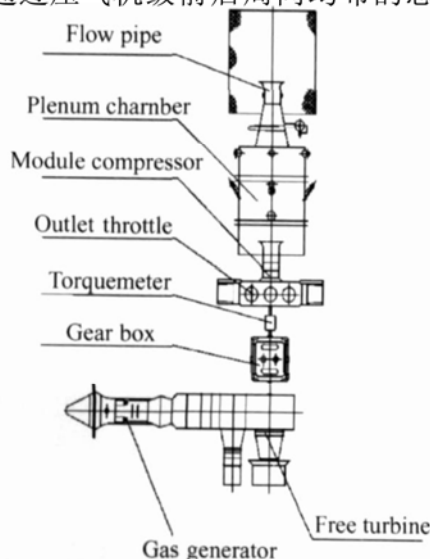


Fig 1 Schematic of the transonic compressor facility

径向面积平均再周向算术平均得到总压比,通过测扭器测得扭矩而最终得到扭矩绝热效率。在压气机级后叶中截面放置高频响动态总压传感器来检测压气机的流动状况,以压气机叶中截面出现不稳定流动时的流量作为压气机不稳定工作边界点。

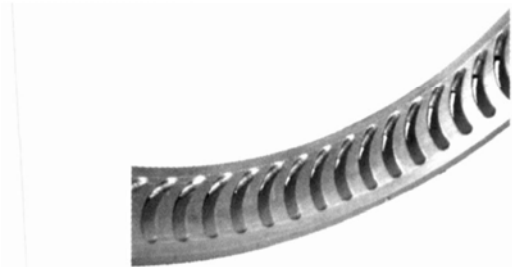


Fig 2 Arc skewed slot casing treatment ring

3 实验结果及讨论

为了探索处理机匣的非定常效应,实验对 4 种不同槽数的处理机匣进行了性能测试。由于相对运动的存在,对于压气机转子,不同槽数的处理机匣对应着不同的激励频率,该激励频率 $f_{\text{slot}} = z_{\text{slot}} \cdot n_{\text{rotor}} / 60$ 其中 z_{slot} 为处理机匣槽数, n_{rotor} 为转子转速 (r/min)。由于是在同一转速下比较分析,定义无量纲频率 f 来表示处理机匣对压气机内部流场的激励频率: $f = f_{\text{slot}} / (n_{\text{rotor}} / 60) / z_{\text{blade}}$ 其中, z_{blade} 为转子叶片数。4 种处理机匣的无量纲激励频率 f 分别为: 4 5.2 6.4 7.5。

3.1 处理机匣激励频率对压气机特性线的影响

实验对跨声速压气机在 65%, 78%, 88% 和 98% 4 个折合转速 n_{cor} 下的性能进行了测量。图 3 和图 4 为处理机匣激励频率对跨声速压气机效率 η 和总压比 p_r^* 特性的影响,其中横坐标都采用了标准状况下的折合流量 m_{cor} ,为了图线表达清晰起见,图中仅给出了实壁和处理机匣中 $f=4$ 和 $f=6.4$ 时的特性线。从图中可以看到加圆弧斜槽处理机匣后,压气机的稳定工作范围都有大幅度增加,而不同的处理机匣激励频率对于压气机的性能影响有很大差异。

3.2 处理机匣激励频率对压气机峰值效率和综合裕度的影响

(1) 峰值效率增量 $\delta\eta_{\text{peak}}$

$$\delta\eta_{\text{peak}} = (\eta_{\text{peak}} - \eta_{\text{peak solid}}) / \eta_{\text{peak solid}}$$

式中 η_{peak} 为当前机匣峰值效率, $\eta_{\text{peak solid}}$ 为实壁机匣峰值效率。

(2) 综合裕度增量 $\delta\phi$

$$\delta\phi = \frac{p_{r \text{ stall}}^* / \dot{m}_{\text{cor stall}}}{\dot{m}_{\text{cor stall solid}}} - 1$$

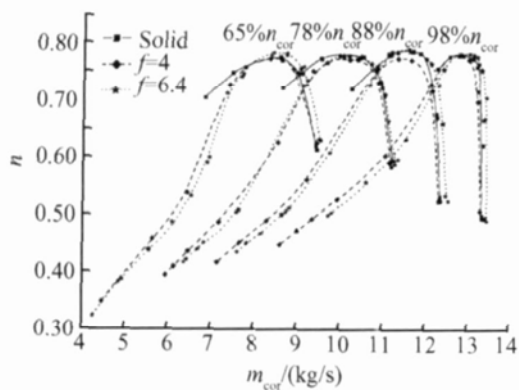


Fig. 3 Isentropic efficiency characteristics under different exciting frequencies of casing treatment

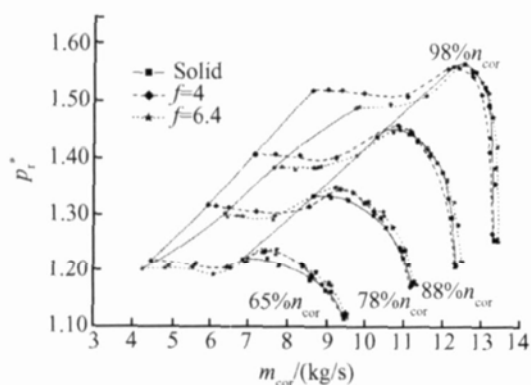


Fig. 4 Total pressure ratio characteristics under different exciting frequencies of casing treatment

式中 $p_{r\text{ stall}}^*$ 和 $m_{\text{cor stall}}$ 为当前机匣失速点总压比和折合流量, $p_{r\text{ stall solid}}^*$ 和 $m_{\text{cor stall solid}}$ 为实壁机匣失速点总压比和折合流量。

图 5 为压气机不同转速下综合裕度和效率增量随处理机匣激励频率的变化曲线, 以实壁作为基准 (实壁机匣效率增量和综合裕度都为 0 将其定义为槽数为 0 的“处理机匣”), 曲线揭示了处理机匣给压气机性能带来的收益。从图中可以看到, 处理机匣激励频率对压气机性能有很大影响: 不同激励频率下峰值效率增量最多差值 1.86% (88% 转速时的 $f=4$ 与 $f=6.4$), 综合裕度增量最多差值 17.41% (98% 转速时的 $f=4$ 与 $f=6.4$)。分析不同转速下激励频率的具体影响, 可以得到如下结论:

(1) 在峰值效率方面, 随着槽数的增加低转速 (65% 和 78% 转速) 和高转速 (88% 和 98% 转速) 呈现出不同的趋势。对于低转速, 槽数增加, 峰值效率增加; 而对于高转速, 随着槽数增加峰值效率先增大后略有减小, 在 $f=6.4$ 时达到极值。

(2) 在综合裕度方面, 随着槽数增加 65% 折合转速表现出与其他转速不同的趋势。在 65% 转速下,

随着槽数增加综合裕度不断提升; 对于其他三个转速, 槽数从 $f=5.2$ 增加到 $f=6.4$ 综合裕度有个突降, 在其他槽数变化范围内综合裕度则变化不大。

由此可见, 处理机匣激励频率与压气机峰值效率和综合裕度之间存在一种非线性关系, 存在最佳的非定常激励频率能使压气机峰值效率和综合裕度同时得到提升。当处理机匣激励频率为 $f=6.4$ 时, 实验用跨声速压气机性能相比实壁机匣有了全面提升, 在低转速下峰值效率和综合裕度分别最大提高 1.13% 和 57.84%, 在近设计转速下峰值效率和综合裕度分别提高 0.17% 和 19.86%。

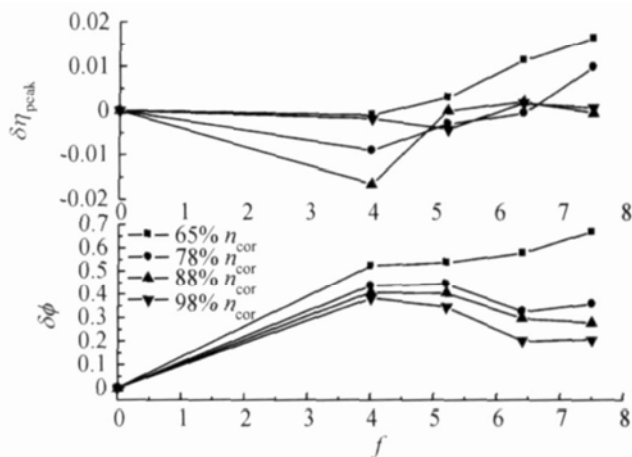


Fig. 5 Peak efficiency and stall margin under different exciting frequencies of casing treatment

3.3 处理机匣激励频率对压气机基元压比的影响

图 6 和图 7 分别为 65% 和 98% 折合转速下在实壁机匣近失速点级后总压比沿展向分布, 在图中分别对两个具有代表性的处理机匣与实壁机匣进行了对比。横坐标为基元总压比 (p_r^*), 纵坐标为叶展相对位置。在实壁近失速点, 处理机匣大大改善了压气机叶尖的加功能力, 这是处理机匣抑制叶尖二次流消除堵塞的结果, 也是处理机匣扩大压气机稳定工作裕度的直接原因。但也可以看到处理机匣在改善叶尖的同时也恶化了叶根流动, 叶根的加功能力大大削弱。这可以解释为: 在同一比较流量下, 处理机匣改善了压气机尖部流动状况, 减小了尖部流动堵塞, 中部和根部的流体就会向尖部集中, 根部流量的减小增大了根部基元级的攻角, 从而加剧了根部区域的分离。对比图 6 和图 7 高低转速级后压比分布的不同, 结合图 5 中显示的不同激励频率下的稳定裕度大小, 可以认为在低转速下处理机匣对叶尖的改善大小决定了处理机匣扩稳程度, 而在高转速下处理机匣对叶根的恶化程度限制了处理机匣扩稳的增加。

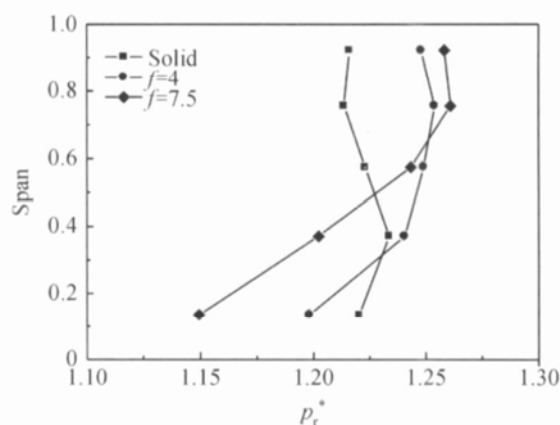


Fig. 6 Spanwise distribution of total pressure ratio near stall of solid case at 65% design speed

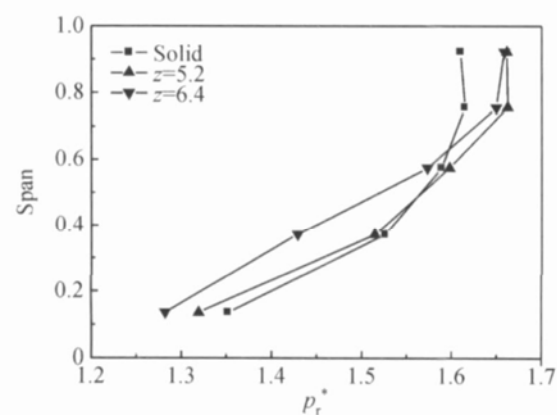


Fig. 7 Spanwise distribution of total pressure ratio near stall of solid case at 98% design speed

3.4 处理机匣激励频率对压气机最大流量的影响

从图 3 和图 4 还可以看到, 不同处理机匣激励频率下压气机的最大流量 (同一压比水平下的流量最大值) 有比较大的变化。以实壁机匣为基准, 定义最大流量的变化

$$\delta m_{\text{cor max}} = (m_{\text{cor max}} - m_{\text{cor max, solid}}) / m_{\text{cor max, solid}}$$

式中 $\delta m_{\text{cor max}}$ 为最大流量相对增量, $m_{\text{cor max}}$ 为当前机匣压气机最大流量, $m_{\text{cor max, solid}}$ 为实壁机匣压气机最大流量。图 8 显示了采用不同机匣时压气机最大流量增量随转速的变化。从图中可以看到, 采用 $f=4$ 和 $f=5.2$ 的处理机匣, 压气机最大流量都略低于实壁机匣, 当槽数增加到 6.4 时, 各个转速下的最大流量都突然增大, 在 88% 转速时最大流量增量达到 1.57%, 当槽数继续增加到 7.5 时, 各个转速下的最大流量又有回落, 但仍然高于基准实壁机匣, 在 98% 转速时为 0.81%, 压气机最大流量与处理机匣激励频率之间呈现强烈的非线性关系。

回顾前人工作, 采用处理机匣后, 压气机最大流量可能保持不变^[9], 可能增加^[10], 也可能减小^[11]。

由于对处理机匣作用机理还不是很清楚, 这些现象还没有得到有效解释。在本文的工作中, 仅仅改变处理机匣的激励频率, 压气机最大流量就能从略小于实壁机匣变为高于实壁机匣, 最大增加幅度达 1.87%。由此看来, 处理机匣与转子之间的非定常作用是影响压气机最大流量的主要因素之一。

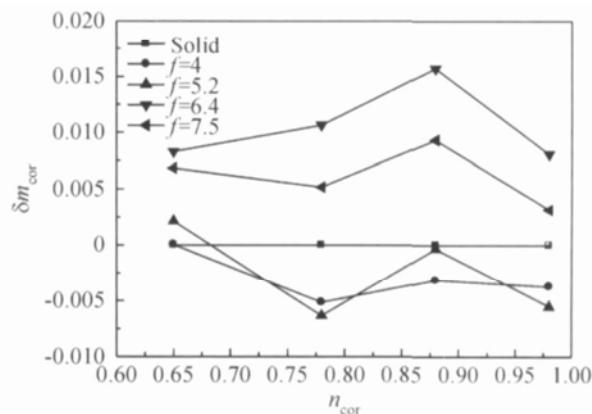


Fig. 8 Maximum flow mass under different exciting frequencies of casing treatment

4 结 论

实验结果表明, 压气机性能 (稳定裕度, 峰值效率与最大流量) 都与处理机匣的激励频率之间存在强烈的非线性关系, 处理机匣与转子的非定常作用对压气机性能有重大影响。

设计处理机匣时如果能充分利用处理机匣与转子之间的非定常作用, 选择恰当的处理机匣槽数实现对压气机流场的有效激励控制, 就能使得压气机的性能得到全面提升。对于本次实验用跨声速压气机, 当圆弧斜槽处理机匣的无量纲激励频率为 6.4 时, 压气机性能有了全面提升: 在低转速下峰值效率、综合裕度和最大流量分别最大提高 1.13%, 57.84% 和 1.57%, 在近设计转速下峰值效率、综合裕度和最大流量分别提高 0.17%, 19.86% 和 0.81%。

对于处理机匣与转子的非定常作用的内在机理, 还需要做进一步的研究。

致谢: 在本文所涉及的实验工作中, 得到了冯毓诚教授、毛熙昌老师、李宝聚老师、刘春风老师、李志平博士、李绍斌博士和刘建勇的大力协助, 在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] Koch C C, Smith L H. Experimental evaluation of outer casing blowing or bleeding of single stage axial flow compressor[R]. NASA CR-54588 1968

(下转第 456 页)

- [5] 罗世彬. 高超声速飞行器机体发动机一体化及总体多学科设计优化方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004
- [6] 贺旭照. 高超声速飞行器气动力气动热数值模拟和超声速流动的区域推进求解 [D]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2007
- [7] 徐华松, 谷良贤. 高超声速飞行器后体尾喷管设计 [J]. 航空动力学报, 2007, 22(2): 257~ 260
- [8] 曹德一, 李春植. 高超声速飞行器尾喷管的优化设计 [J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(10): 1162~ 1165
- [9] Kalyanmoy Deb, Samir Agrawal, Amrit Pratap, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multiobjective optimization: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions On Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182~ 197.
- [10] 周尚波, 黎玉贵, 虞厥邦, 等. Lao(劳) 喷管扩张段优化设计的数值方法研究 [J]. 宇航学报, 2001, 22(5): 66~ 71.
- [11] Kalyanmoy Deb, Self-adaptive simulated binary crossover for real-parameter optimization [R]. *GECCO ' 07, London, England, United Kingdom July 7-11, 2007*.
- [12] Deb K, Agrawal R B. Simulated binary crossover for continuous search space [J]. *Complex Systems*, 1995, 9(4): 115~ 148

(编辑: 姚懿巧)

(上接第 433 页)

- [2] Lu X, Chu W, Zhang Y, et al. Experimental and numerical investigation of a subsonic compressor with bend-skewed slot-casing treatment [R]. *ASME 2006-GT-90026*
- [3] Yu Qing, Li Qingshi, Li Ling. The experimental researches on improving operating stability of a single-stage transonic fan [R]. *ASME 2002-GT-30640*
- [4] Hathaway Michael D. Self-recirculating casing treatment concept for enhanced compressor performance [R]. *ASME 2002-GT-30368*
- [5] Fujita Hideo, Takata Hiroyuki. Study on configurations of casing treatment for axial flow compressors [J]. *Bulletin of JSME*, 1984, 27(230): 1675~ 1681.
- [6] 徐力平. 轴流压气机的旋转失速的生成及其主动控制. 英国应用力学前沿课题选介 [M]. 北京: 科学出版社, 1996
- [7] 张燕东, 陆亚钧. 圆弧斜槽处理机匣的实验研究 [J]. 航空动力学报, 1998, 13(3).
- [8] 李 玲, 于 清, 陆亚钧. 处理机匣在单级跨声速风扇上的实验研究 [J]. 推进技术, 2000, 21(3). (LI Ling, YU Qing, LU Ya-jun. Experimental research of casing treatment on single stage transonic fan [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(3).)
- [9] Smith G D J, Cumpsty N A. Flow phenomena in compressor casing treatment [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1984, 106(3): 532~ 541.
- [10] Peng Z Y, Jeng D R. A comment on approaches for compressor performance map improvement [C]. *31st AIAA / ASME / SAE / ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, San Diego, CA*, 1995
- [11] 苗厚武, 邓 莹, 高金满. 处理机匣参数优化研究 [J]. 航空发动机, 1998, (4).

(编辑: 郭振伶)