

文章编号: 1000-8055(2008)04-0662-09

非定常机匣处理扩大压气机稳定裕度实验

孙大坤, 侯睿炜, 孙晓峰

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 从非定常角度出发, 设计了一种通过改变斜槽和气室来调节壁面阻抗边界条件的非定常处理机匣, 并对其开展扩大轴流风扇/压气机旋转失速稳定性的实验研究. 研究工作包括: 对非定常处理机匣进行流量-压比特性实验, 研究其扩稳效果; 对处理机匣的结构参数(斜槽、气室)进行可调节特性实验; 对机匣处理的效率特性进行实验评估. 结果表明: 这种非定常机匣处理在三台低速风扇/压气机实验台上, 通过调节机匣参数, 不仅能够实现在不同的工作转速下对压气机稳定裕度有显著效果, 而且效率没有明显改变.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 旋转失速; 非定常机匣处理; 失速裕度

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

An experimental investigation of rotating stall margin improvement with unsteady casing treatments

SUN Da-kun, HOU Rui-wei, SUN Xiao-feng

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing-100083, China)

Abstract: Casing treatments are widely used to enhance the stall margin of fans or compressors of aircraft engines. However, the existing design of casing treatment is generally on the basis of trial and error method and its application always results in efficiency loss of fans or compressors. So, how to understand the mechanism of stall margin improvement with casing treatments and how to design better casing treatments have long been an area of vigorous research activity. Based on the knowledge of the unsteady characteristics caused by casing treatment, it is verified that recessed casing treatment can be modeled as a wall boundary condition, which can be calculated by means of vortex sound theory. In the present work, a series of experimental investigations were conducted with emphasis on the effect of unsteady casing treatments on the stall margin and efficiency of three different low speed fan/compressor facilities. The results show that the unsteady casing treatments do improve the stall margin without incurring recognizable efficiency loss of the concerned fan/compressor.

Key words: aerospace propulsion system; rotating stall; unsteady casing treatment; stall margin

风扇/压气机做为吸气式推进系统的关键部件之一,除了高效率和高负荷要求之外,足够的失速裕度是一个重要的指标.机匣处理是常用的扩稳手段,对压气机的失速裕度有不同程度的改善.

但其影响不仅是尖部流动和失速裕度,同时也影响压气机的压升性能和效率,应用的关键在于如何处理裕度和效率之间的关系.有观点认为机匣处理技术总是以效率损失为代价的.虽然有一些

收稿日期: 2007-04-02; 修订日期: 2007-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(50136010)

作者简介: 孙大坤(1981-),男,吉林农安人,博士生,主要从事风扇/压气机旋转失速稳定性理论与实验研究.

在改善裕度的同时不造成效率损失的案例, 如 Kang & Mckenzie^[1-2] 的“Recess Vaned”实验和楚武利^[3] 等的“折线斜缝式”处理机匣实验, 但不能从针对特定压气机取得较好效果的机匣处理中总结出通用的设计准则, 其工作基础仍是经验或“试凑”方式, 很难成功应用到其它地方, 这就需要重新认识机匣处理的作用机理。

那么, 带有气室的机匣处理究竟是改变了导致失速的叶片通道中的阻塞特征呢? 还是对失速起始阶段的先兆波发生了作用? 尽管没有控制的先兆波的发展将会导致阻塞甚至失速, 但如果认为机匣处理是抑制了失速的先兆波进而实现了扩稳, 则应用非定常方法来研究它对抗扰动波抑制的机理; 如果从传统的观点来看, 则应从定常的角度分析机匣气室回流所导致的动量、质量交换来解释扩稳的机理, 力求设计好气室内回流通道使机匣达到最大的扩稳效果, 并减小机匣内部的流动损失使压气机保持较高的效率。Kang^[1] 等人设计了各种机匣气室中的回流通道, 结果是在腔深一定的情况下, 气室内无论采用何种通道, 其效率是一样的。这说明气室内的流动相对于主流是一个小量, 对效率的影响是微不足道的。

从非定常角度出发, 怎样理解从高压叶尖区流进气室然后又从压力较低的叶片前缘区流出的气流作用呢? 景晓东等^[4] 设计了一个机理性实验, 研究了带有气室的多孔板或多缝板在有气体流入流出时所发生的非定常现象。研究发现, 尽管流进、流出气体流动的方向完全不同, 但只要绝对速度相等, 所导致的非定常边界或阻抗边界是相同的。而流进、流出的结果是在多孔板或多缝板出口产生涡环或涡街, 而这些涡将与作用在壁面的压力波(或声波)相互作用, 发生能量交换, 波能或声能转化为涡能。以波涡相互作用理论为基础, 发展了相应的计算模型和方法, 理论和实验结果非常一致^[5-7]。这些结果给人最直接的启示是: 带有气室的先进机匣处理实际上是提供了一种非定常“软”边界, 入射到机匣壁面的失速先兆波的能量转换成非定常涡能, 进而抑制了它的非线性放大所导致的失稳。不管是何种类型的失速先兆波, 在这种波涡相互作用的非定常控制机制下, 都能得到有效的抑制。

孙晓峰^[8-9] 在其三维可压缩旋转失速稳定性模型中提出一种方案, 机匣处理的影响通过反映边界特性的壁面阻抗值进入模型, 从而可以定性研究机匣处理的影响。于巍巍^[10-11] 继而发展了包

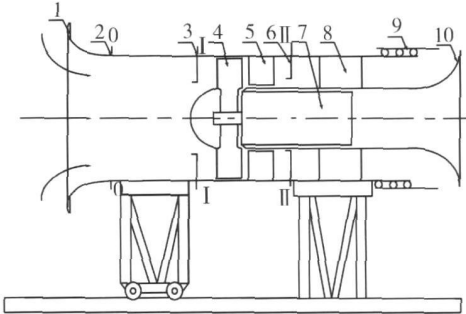
含机匣处理影响的三维跨音风扇/压气机稳定性模型, 该模型以等价分布源方法^[12] 为基础, 结合稳定性方程, 能够考虑带气室的处理机匣各种结构参数对稳定性的影响, 可用于带激波的多排叶栅的风扇/压气机失速起始点的预测。若从这一角度研究问题, 将对这种非定常机匣处理扩稳机理产生新的认识, 从而产生更有效的设计方法。

基于此, 设计了一种非定常处理机匣, 通过改变斜槽的参数调节壁面阻值, 通过改变气室容积调节壁面抗值, 通过合理的结构设计, 可以在不同工作状态下, 调节处理机匣的几何参数, 实现可变参数的被动控制——即主被动控制。这就从非定常的角度, 通过主动调节壁面阻抗边界条件, 实现了压气机旋转失速扩稳目的。

本文将对这种非定常机匣处理开展详细的实验研究, 研究的目的是要解决以下三个问题: 非定常机匣处理对风扇/压气机扩稳是否有效? 机匣参数的可调节性, 即主被动控制的效果怎样? 对风扇/压气机的效率有何影响?

1 实验平台简介

非定常机匣处理实验平台有三个: 低速风机实验台、中科院工物所低速压气机实验台和低速风扇实验台(图 1)。主要性能参数见表 1。



1. 流量管; 2. 壁面静压测点; 3. 进口总压测点; 4. 转子; 5. 静子; 6. 出口总、静压测点; 7. 电机; 8. 后支板; 9. 出口调节机构; 10. 堵锥

图 1 低速风扇实验台结构简图

Fig. 1 Configurations of low speed fan facilities

表 1 三台低速风扇/压气机设计参数
Table 1 Design parameters of three low speed fans/ compressors

实验台	设计转速/ (r/ min)	流量/ (kg/ s)	直径/ (mm)	动叶数/ 片
风机	2 900	4.5	462	9
压气机	2 400	2.6	500	58
风扇	3 000	7.5	600	20

2 非定常处理机匣的结构形式

处理机匣结构示意图如图 2 所示: 1. 处理机匣内环, 改变斜槽调节阻值; 2. 处理机匣外环, 形成封闭腔体; 3. 处理机匣支架, 内壁面加工有不同直径的槽道, 与外环配合形成不同容积的气室; 4. 帽锥, 固定在转子上, 随转子一起转动; 5. 气室, 通过改变其容积大小调节抗值; 6. 压气机转子; 7. 压气机静子。

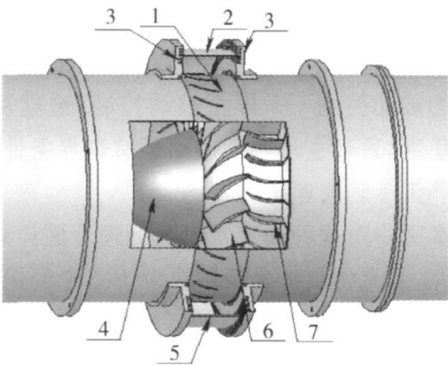


图 2 处理机匣结构示意图

Fig. 2 Configuration of the unsteady casing treatment

3 气动性能指标参数

为了更明显观察失速的起始, 采用流量-静压升系数($\Phi\phi$)特性曲线

(1) 流量系数 ϕ , 静压升系数 Φ

$$\phi = \frac{p_2 - p_1^*}{0.5\rho U_m^2} \tag{1}$$

$$\phi = \frac{V_x}{U_m} = \frac{q_v}{U_m A_0} \tag{2}$$

$$q_v = \alpha A_0 \sqrt{\frac{2(p_H - p_0)}{\rho}} \tag{3}$$

其中 V_x 为进口轴向速度; U_m 为叶中切向速度。

(2) 失速裕度 SM

$$SM = \left[\frac{\phi_s/\phi_{ss}}{\phi_{li}/\phi_d} - 1 \right] \tag{4}$$

流量裕度

$$SM_m = \frac{q_{md} - q_{ms}}{q_{md}} \times 100\% \tag{5}$$

其中 q_{md} 为设计点流量, q_{ms} 为失速点流量。

(3) 风扇效率 η

$$\eta = \frac{q_v(p_2^* - p_1^*)}{1\,000 N_k} \tag{6}$$

$$N_k = N_{电} \cdot \eta_{电} \cdot \eta_{机} \tag{7}$$

其中电机效率 $\eta_{电} = 0.89$, 机械效率 $\eta_{机} = 1.0$ 。实验以变频器输出电功率为电机输入功率 $\eta_{电}$, 并且

未考虑由于负载变化所引起的电机实际运行效率的影响。

4 固壁机匣实验结果

作为评估标准, 对固壁机匣的失速特性进行了详细的实验测定, 图 3 给出了低速风扇实验台 3 次不同大气压力和温度情况下的固壁重复性实验结果。可以看出, 数据的重复性较好, 实验数据是准确可信的。多次实验的平均值作为处理机匣比较的固壁结果, 最终可以确定流量误差在 0.5% 以内, 效率误差在 1% 以内。

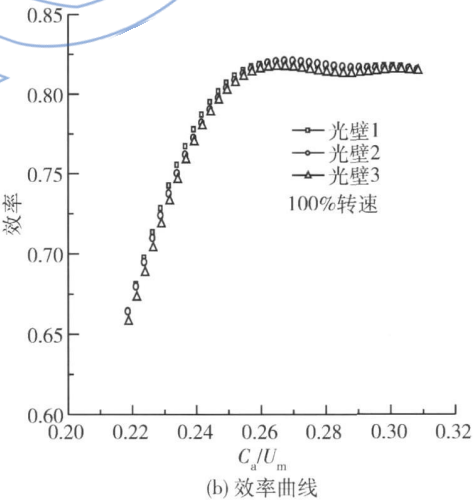
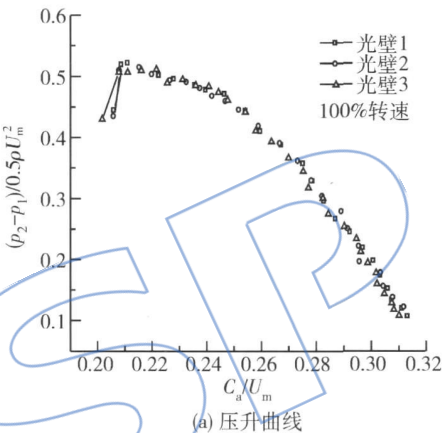


图 3 低速风扇固壁机匣重复性
Fig. 3 Characteristics of low-speed fan without casing treatment

5 非定常机匣处理实验结果

5.1 非定常机匣处理的扩稳效果

本文对非定常处理机匣在 3 台低速风扇/压气机上进行了实验, 图 4~ 图 6 分别给出了相应的实验结果。

从图中可以看到, 非定常处理机匣在 3 台低

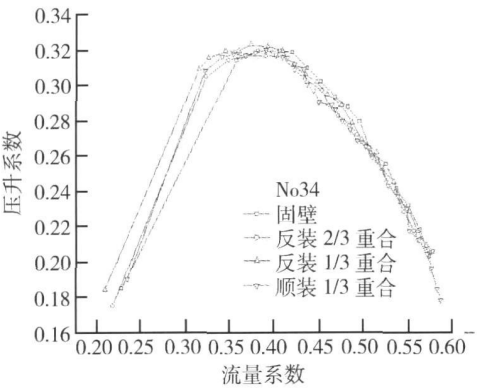
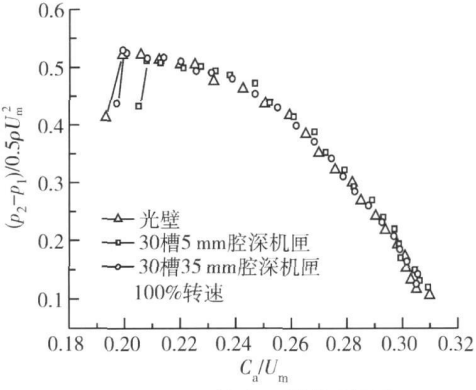


图 4 低速风机处理机匣结果

Fig. 4 Characteristics of low-speed blower with casing treatment



(a) 100% 转速 30 槽处理机匣

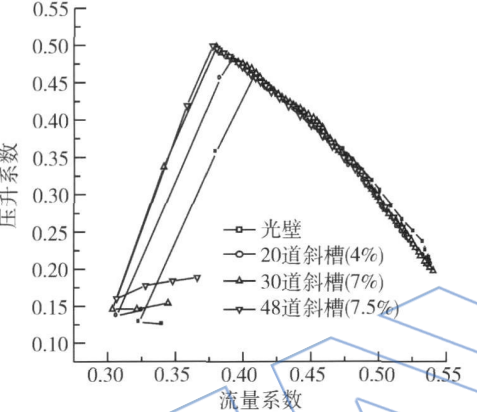
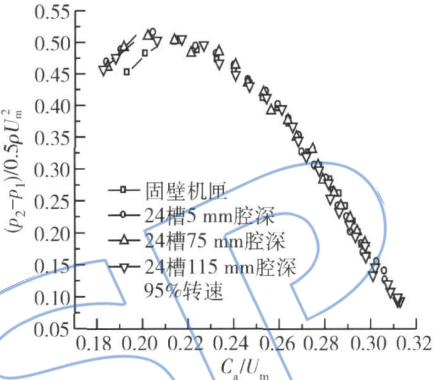
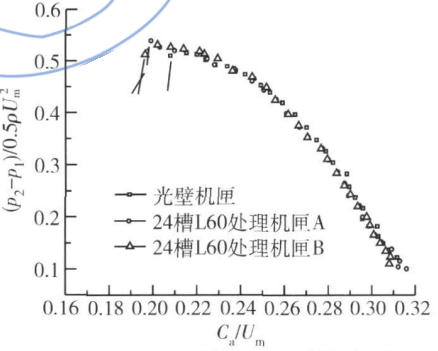


图 5 中科院低速压气机处理机匣结果

Fig. 5 Characteristics of low-speed compressor with casing treatment



(b) 95% 转速 24 槽处理机匣



(c) 100% 转速 24 槽 60 mm 腔深处理机匣

图 6 低速风扇处理机匣结果

Fig. 6 Characteristics of low speed fan with casing treatment

速风扇/压气机试验装置上均取得了较好的扩稳效果.

表 2、表 3 分别给出了非正常处理机匣在低速风扇试验台不同工作转速情况下, 改变开槽个数和腔深条件下的实验数据结果. 表 4 给出了相应的不同阻抗条件下的对比结果.

从数据结果来看, 在很小穿孔率(4% ~ 8% 左右)的情况下, 可以得到较大的裕度提高(约 5% ~ 8%), 明显扩大了风扇/压气机的稳定工作范围. 其中, 在低速风扇实验台上, 24 槽和 30 槽两种机匣处理情况下, 对流量裕度均有 3% ~ 5% 左右的改善, 而由流量系数得到的综合裕度有 8% ~ 11% 左右的提高.

值得注意的是, 不带气室的处理机匣也有一定的裕度改善, 但略逊于有气室的扩稳效果. 这是因为机匣壁面厚度(约 15 mm)较大, 壁面阻值对抗的影响占主导地位, 所以腔深的变化带来的抗的改变效果不够明显. 表 2~ 表 4 中阻抗特性

的规律性将放在接下来的非正常机匣处理的腔深可调节性部分中进行讨论.

图 7 给出了 24 槽 L60 机匣处理(见表 2 说明)对低速风扇在不同工作转速下的失速特性改善的结果, 可以看到, 机匣处理使得压气机在所有工作转速范围内的失速边界明显左移, 从而较好的实现了风扇/压气机的全面扩稳.

同时可以看到, 不同结构参数的处理机匣, 对不同状态的压气机特性改善情况是不尽相同的, 这就是机匣处理的调节性问题, 也是进行主被动控制的目的所在.

表 2 24 槽处理机匣的实验结果

Table 2 Results of low speed fan with 24 slot casing treatment

24 槽	腔深	70%	80%	85%	90%	95%	100%
流量裕 度提高/ %	5	4.23	4.34	3.74	3.44	3.84	4.82
	35	4.17	4.34	3.59	3.68	4.39	3.97
	55	5.33	4.60	3.82	3.52	4.68	3.98
	75	4.77	4.70	3.31	3.20	3.84	5.33
	95	4.37	4.79	3.92	3.72	4.19	5.04
	115	4.89	3.89	2.93	3.76	3.76	3.60
	L60	4.11	4.31	4.42	3.04	3.21	4.16
	L0	2.98	2.97	2.12	2.31	2.52	3.49
综合裕 度提高/ %	5	10.40	12.12	11.52	10.32	9.42	9.92
	35	8.74	11.40	8.73	9.38	8.93	11.08
	55	11.11	10.56	10.48	9.47	10.73	9.45
	75	9.64	10.37	10.84	11.31	10.22	10.31
	95	9.26	11.29	10.08	9.32	10.10	10.69
	115	9.32	11.57	10.25	9.63	9.68	10.43
	L60	12.20	14.42	15.04	12.32	14.71	12.73
	L0	8.20	9.73	7.68	8.81	9.82	7.52

注: L60 为 24 槽处理机匣加长了槽的长度(70 mm), 气室深度为 60 mm 的结果, L0 为其不带气室条件下的情况

表 3 30 槽处理机匣的实验结果

Table 3 Results of low speed fan with 30 slot casing treatment

30 槽	腔深	70%	80%	85%	90%	95%	100%
流量裕 度提高/ %	5	4.36	4.66	4.34	3.56	4.16	3.61
	35	4.36	3.97	3.61	3.18	4.03	3.84
	55	4.87	3.99	3.71	3.61	3.54	4.37
	75	3.53	3.66	3.68	3.34	3.55	3.21
	95	3.76	3.80	3.59	3.25	3.25	3.99
	115	3.88	3.31	4.22	3.16	3.55	3.63
综合裕 度提高/ %	5	9.14	9.13	7.37	9.48	9.32	10.10
	35	8.83	10.86	8.44	8.15	9.15	8.78
	55	10.47	11.08	8.48	9.16	9.15	8.91
	75	9.15	10.16	10.16	9.84	10.00	9.82
	95	9.94	10.43	9.67	8.73	9.39	8.98
	115	8.99	10.49	11.14	9.66	9.78	9.54

表 4 不同阻抗条件的非正常处理机匣实验结果

Table 4 Results of the unsteady casing treatment with different wall boundary conditions

试验台编号	机匣穿孔率/ %	机匣气室容积/L	流量裕度提高/ %
1- 低速风机	4(34 槽)	1. 1~ 1. 9	7~ 11
	4(20 槽)		4
2 低速压气机	6(30 槽)	2. 8	7
	10(48 槽)		7. 5
3 低速风扇	4(18 槽)	0. 2~ 3. 4	2~ 3
	6(24 槽)		4~ 5
	7. 5(30 槽)		3~ 4

注: 机匣穿孔率与壁面阻值相关, 气室容积与壁面抗值相关, 具体关系参考壁面阻抗模型[57] .

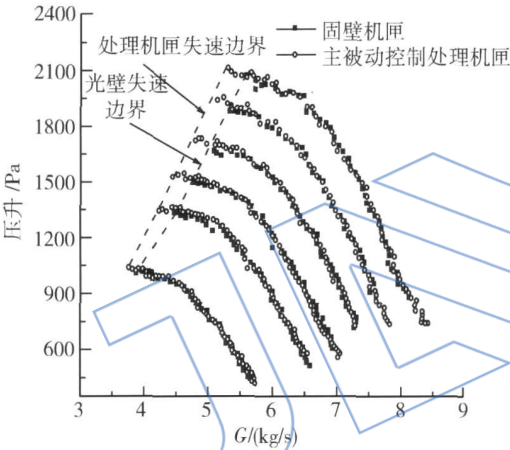


图 7 低速风扇 24 槽 L60 机匣处理扩稳曲线
Fig. 7 Characteristics of low-speed fan with L60 24 slot casing treatment

5.2 非正常机匣处理的可调节特性

对非正常机匣处理开展参数调节特性实验. 首先研究斜槽数目的改变对稳定裕度的影响, 结果发现, 在一定范围内(约 4% ~ 8% 左右), 稳定裕度会随着穿孔率的增加而提高, 但继续增加穿孔率, 裕度提高的幅度会明显变小. 对比表 2、表 3 中低速风扇试验台 24 槽和 30 槽(穿孔率分别为 6% 和 7.5%) 的结果, 就可以发现穿孔率的提高并没有带来明显的裕度改善. 从表 4 及图 5 中工物所低速压气机实验台上的结果也同样可以看到, 斜槽的个数并不是越多越好, 由 30 槽到 48 槽, 穿孔率提高 60%, 而裕度仅提高 0.5%, 裕度并没有随着槽的个数增加而显著增加. 这说明, 稳

定裕度会随着穿孔率的增加而提高, 但并非是线性增加, 即所付出的性能损失代价有可能会高于收到的扩稳效果.

接下来研究气室容积的改变对裕度的影响, 图 8 给出了低速风机的失速裕度随机匣气室深度的变化特性, 可以看到, 腔深的变化对流量裕度和综合裕度都会产生明显的影响(图 8(a)), 而且实验具有比较好的重复性(图 8(b)). 在低速风扇实验台上在 5 mm 到 120 mm 径向腔深范围内进行抗性实验, 详细的实验结果见表 2、表 3. 图 9 中给出了 100% 和 85% 转速下的腔深特性曲线, 可以看到, 腔深的变化会对处理机匣的扩稳效果带来较大的影响. 另外, 处理机匣并不是容积越大效果越好, 需要和穿孔率等结构参数匹配. 值得一提的是, 在腔深只有 5 mm(容积 0.2 L) 情况下, 非正常机匣处理依然有 4% 左右的流量裕度改善, 这意味着机匣的结构可以相当紧凑, 这对于工程实际应用有很大好处, 不至过于受到结构尺寸的限制.

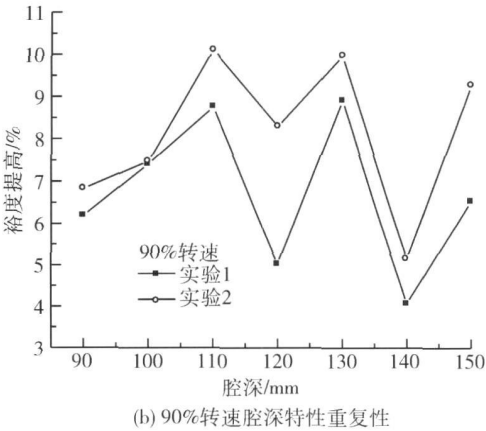
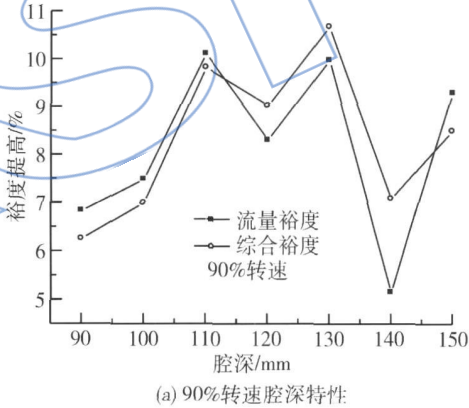


图 8 低速风机非正常处理机匣腔深特性
Fig. 8 Characteristics of low-speed blower with casing treatment
机匣处理结构参数(斜槽、气室等)的变化, 可

以改变壁面非定常阻抗特性,在这方面,孙晓峰等^[13]开展了相关的壁面阻抗主动控制研究工作,为带气室机匣处理的非定常阻抗边界调节提供了理论和实验基础.阻抗边界的改变,直接影响旋转失速的演化过程,并最终改变了风扇/压气机的稳定工作范围.壁面阻抗的非定常调节特性,在理论方面,和于巍巍^[11]的旋转失速稳定性模型中关于处理机匣的结构参数的理论结果得到了相互印证;在实际应用方面,为风扇/压气机气动稳定性问题提供了另外一种解决途径——非定常机匣处理主被动控制方案.

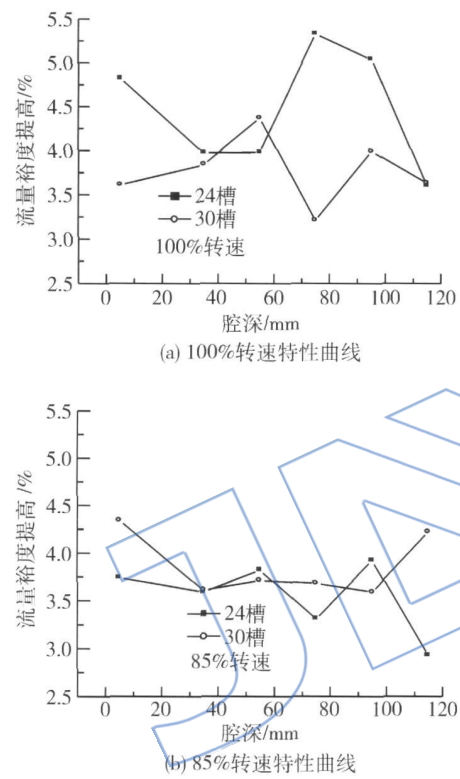


图9 低速风扇非定常处理机匣腔深特性曲线图
Fig.9 Characteristics of low-speed fan with casing treatment

风扇/压气机旋转失速主被动控制方案是把主动控制和传统处理机匣结合起来,不仅具有传统机匣处理的结构简单、效果明显的优点,而且能够对机匣结构进行主动调节,适用于不同工况下的扩稳需要,从而可以很好的解决前文提到的机匣处理设计通用性问题.现有的机匣处理设计工作,通常依赖于并不完善的模型结果或是采用经验设计,这种依靠经验或“试凑”设计的机匣处理,往往很难取得预期的效果.而采用主被动控制方案则可以通过调节机匣处理的结构参数,改变壁面的阻抗边界条件,进而可以实现不同转速下的风扇/压气机扩稳目的.

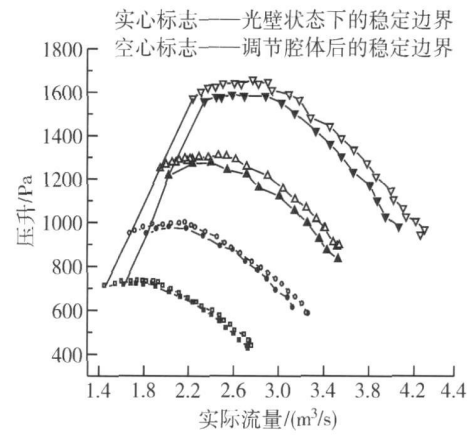


图10 低速风机机匣处理调节规律曲线
Fig.10 Controlling effects of low speed blower with casing treatment

图10是采用前馈控制方式,在低速风机上得到的机匣处理调节规律,使得压气机工作在不同转速时,预先将机匣处理参数调节到相应的最佳状态,以此来实现压气机整个稳定边界的拓宽.

6 非定常机匣处理的效率特性

压气机的作用就是在低流阻损失情况下对所流过的气流加功,因此效率是非常重要的参数指标.本文开展了非定常机匣处理对压气机效率的影响的实验评估工作.图11给出了非定常处理机匣对低速风扇效率的影响结果.

可以看到,在不同工作转速下,不论是24槽还是30槽的处理机匣,在整个截流过程中,相比固壁机匣,效率均没有出现明显变化.图11(c)所示30槽的处理机匣效率略低于固壁情况,图11(d)所示的24槽L60处理机匣效率要稍高于固壁机匣,但基本上都处在固壁机匣效率的误差带(约1%)以内.在流量低于固壁失速点流量时,效率会继续降低,这是由压气机本身的固有特性决定的.在中科院工物所低速压气机上进行的实验受实验条件限制,未能进行效率测试,但从特性线上可以看出,在有处理机匣的情况下压升与固壁情况相比并没有明显的下降,说明压气机的效率同样没有明显的变化.

7 非定常机匣处理作用机理初探

非定常处理机匣在明显改善风扇/压气机稳定裕度的同时,没有造成较大的效率损失,主要原因是由于机匣本身的穿孔率较低,在叶尖区域形成的回流量较小,对压气机主流场影响不大.带气室的机匣处理在工作时,叶尖气流会从斜槽后

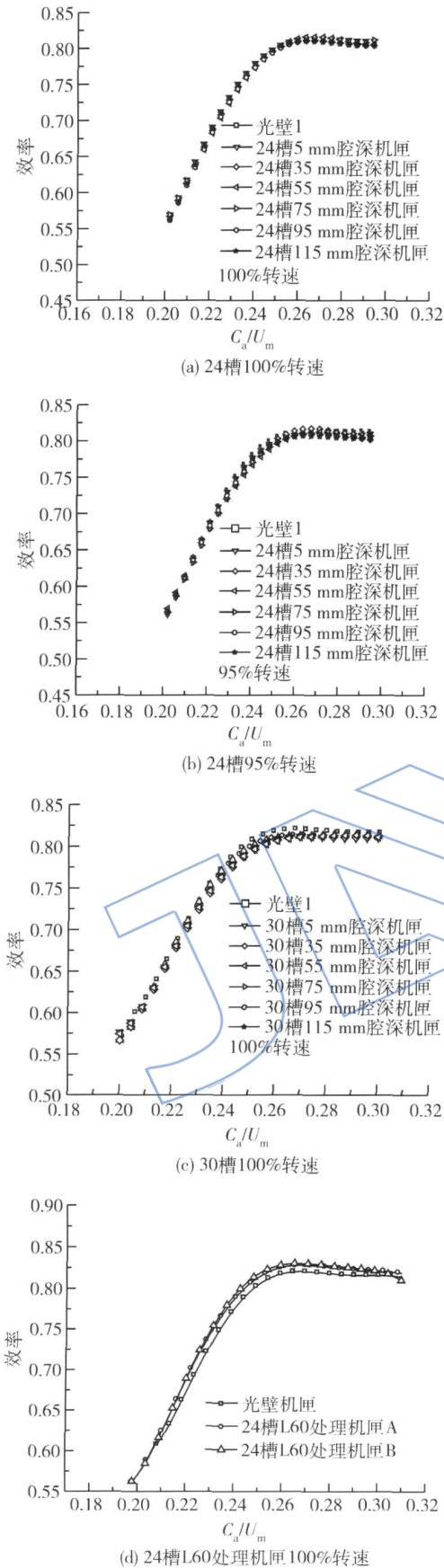


图 11 低速风扇处理机匣效率特性

Fig. 11 Efficiency characteristics of low-speed fan with casing treatment

缘流进气室, 再从斜槽前缘流出(如图 12), 这种流进、流出产生脱落涡街或涡环, 可以有效的吸收压力扰动波, 抑制失速先兆波的进一步发展, 这就是非正常机匣处理扩稳的机制所在(详细的讨论将在“非正常机匣处理对失速先兆波的抑制作用实验研究”一文中做进一步的介绍). 图 13 给出了不同结构形式机匣处理的示意图, 其中(a) ~ (e) 为传统处理机匣, (f) 为非正常处理机匣. 由于传统处理机匣的穿孔率一般较高(甚至超过 60%), 气流回流量相对较大, 会在叶尖区域造成比较大的流动损失, 这必然带来效率的损失. 而非正常机匣处理穿孔率($< 8\%$)很低, 流入流出的气流相对主流是极其微小的, 所以对效率的影响不至太大.

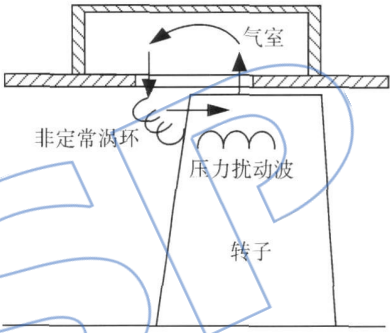


图 12 非正常机匣处理波涡作用示意图

Fig. 12 Sketch of vortex sound interacting on casing treatment

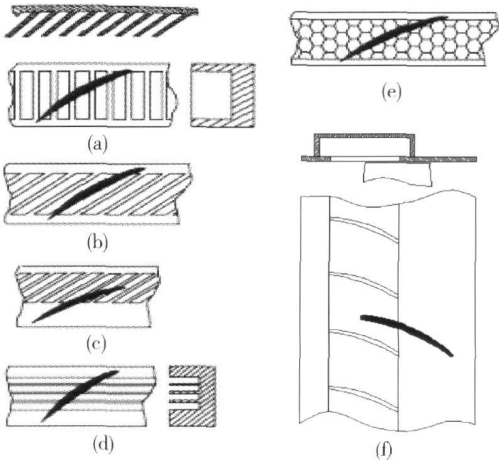


图 13 不同结构形式机匣处理示意图

Fig. 13 Configurations of different casing treatments

正如本文引言一开始就讨论的那样, 传统机匣处理是试图通过较高的壁面开孔率来改进叶间区流动阻塞作用, 强调的是对局部流动的控制. 而非正常机匣处理强调的是对风扇/压气机系统失速先兆的抑制, 出发点完全不同. 所以, 穿孔率低、效率没有明显损失是非正常机匣处理与传统机匣

处理最为明显的优点之一,它可以较好地处理了风扇/压气机提高稳定裕度和保持高效率之间的关系,加之结构紧凑,可以进行主被动调节,能够适合不同工作状态的扩稳需求,使得非定常机匣处理技术很可能在工程实际中拥有良好的应用前景.

8 结 论

- (1) 非定常处理机匣对扩大风扇/压气机旋转失速稳定工作范围具有明显效果.
- (2) 非定常机匣处理参数调节,可实现不同工作转速的扩稳目的,为主被动控制打下一定基础.
- (3) 非定常处理机匣穿孔率低,能够在改善低速风扇/压气机稳定裕度同时,保持较高的效率.
- (4) 非定常机匣处理的实验研究工作,一方面对已有的旋转失速稳定性模型进行验证,同时将有进一步发展和完善包含机匣处理影响的稳定性模型.
- (5) 非定常机匣处理在高速跨声风扇/压气机上的实际应用,还有待于进一步的实验验证工作.

参考文献:

[1] Kang C S, McKenzie A B, Elder R L. Recessed casing treatment effects on fan performance and flow field[R]. ASME 95-GT-197. 1995.

[2] Azimian A R, Elder R L, McKenzie A B. Application of recess vaned casing treatment to axial flow fans[R]. ASME 89-GT-68. 1989.

[3] 楚武利, 刘志伟, 朱俊强. 折线斜缝式机匣处理的实验研究及机理分析[J]. 航空动力学报, 1999, 14(3): 270-274.

CHU Wuli, LIU Zhiwei, ZHU Junqiang. Experimental research and analysis of slope slotted casing treatment[J].

Journal of Aerospace Power, 1999, 14(3): 270-274.

[4] JING Xiaodong, SUN Xiaofeng. Experimental investigation of perforated liner with bias flow[J]. Journal of the Acoustical of America, 1999, 106(5): 2436-2441.

[5] JING Xiaodong, SUN Xiaofeng. Numerical simulation on the nonlinear acoustic properties of anorifice[J]. AIAA Journal, 2000, 38(9): 1565-1572.

[6] JING Xiaodong, SUN Xiaofeng. Wall thickness influence on the impedance of perforated plates with bias flow[J]. AIAA Journal, 2000, 38(9): 1573-1578.

[7] JING Xiaodong, SUN Xiaofeng. Sound-excited flow and acoustic nonlinearity at an orifice[J]. Physics of Fluids, 2002, 14(1): 268-276.

[8] SUN Xiaofeng. Three-dimensional compressible flow stability theory of rotating stall[R]. BUAA Technical Report, BH-B4765, May, 1996.

[9] SUN Xiaofeng. On the between the inception of rotating stall and casing treatment[R]. 32th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA-96-2579, 1996.

[10] 于巍巍, 孙晓峰. 跨音压气机/风扇旋转失速稳定性模型[J]. 航空动力学报. 2005, 20(6): 1018-1027.

YU Weiwei, SUN Xiaofeng. Rotating stall stability theory of the transonic axial compressor/s/ fans[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6): 1018-1027.

[11] 于巍巍, 王晓宇, 孙晓峰. 包含处理机匣影响的压气机旋转失速稳定性模型[J]. 航空动力学报, 2005, 20(5): 873-881.

YU Weiwei, WANG Xiaoyu, SUN Xiaofeng. Investigation on the theoretical model combined with the novel casing treatment with rotating stall[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(5): 873-881.

[12] SUN Xiaofeng, YANG Zifeng, WANG Xiaoyu. Effect of fan outlet guide vane on the acoustic treatment design in aeroengine nacelle[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 302(2): 287-312.

[13] ZHAO Hongwu, SUN Xiaofeng. Active control of wall acoustic impedance[J]. AIAA Journal, 1999, 37(7): 825-831.