

文章编号: 1000-8055(2008)04-0671-09

非定常机匣处理对失速先兆波的抑制作用 实验研究

孙大坤, 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: 非定常机匣处理在不影响效率的前提下可以明显提高压气机的稳定工作范围, 针对这种通过改变斜槽和气室来调节壁面阻抗边界条件的新型处理机匣, 从非定常角度, 开展其对失速先兆波产生及发展的影响的实验研究. 在压气机转子前缘附近沿圆周均匀布置八支高频响压力传感器, 采集壁面动态压力信号, 进行周向傅立叶分析(SFT)和功率谱密度分析(PSD), 捕捉到旋转失速先兆波的出现和发展的动态细节, 比较光壁和处理机匣两种情况的结果, 证实了处理机匣并非阻止了失速先兆波的出现, 而是有效的抑制了其非线性发展. 非定常机匣处理改变了压气机系统的阻抗边界条件, 能够在全过程中对低频扰动波进行有效的抑制, 从而推迟旋转失速的发生, 实现压气机的扩稳目的.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 失速先兆波; 非定常机匣处理

中图分类号: V231

文献标识码: A

An experimental study on inhibition of unsteady casing treatment on stall inception

SUN Da-kun, SUN Xiao-feng

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A kind of unsteady casing treatment was used to enhance the stall margin of an axial flow fan, which did not result in any recognizable efficiency loss. So, it is quite important to understand the mechanism of stall margin improvement with such casing treatment. The present investigation firstly developed a technical method for measuring and analyzing the inception wave, and then made some detailed comparisons with the existing results. The experimental results show that the unsteady casing treatment will delay the non-linear development of stall process by suppressing the propagation of inception wave in comparison to the evolution of the inception wave without casing treatments, while the inception point will not be changed with the application of the unsteady casing treatment.

Key words: aerospace propulsion system; stall inception; unsteady casing treatment

稳定裕度是高负荷、高级压比先进风扇/压气机重要的设计指标. 扩大风扇/压气机的稳定工作范围是现代高推重比航空发动机研制工作的主要技术问题之一. 目前, 主要的扩稳手段有两类: 主

动控制和被动控制.

随着旋转失速先兆波研究工作的开展, 特别是模态类型的失速先兆, 使得主动控制技术有的放矢. 主动控制采用的方法是首先获取系统的开

收稿日期: 2007-04-12; 修订日期: 2007-07-05

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.

环传递函数, 全程监测流场的压力或速度扰动信号, 对其进行实时分析, 在得到某些有可能被非线性放大的征兆信息(失速先兆波)时, 通过闭环反馈控制方法, 启动作动机构, 对在线性阶段的先兆波通过引入幅值相当、相位相反的扰动波的方法, 来抵消失速先兆波的影响, 从而实现推迟旋转失速出现的目的. 主动控制方式可以不影响压气机的正常工作状态, 只要在失速发生前启动“对消”可能导致失稳的失速先兆波. 但目前的主动控制在多排高速跨声压气机中的实现会存在一些困难, 诸如测点布置、失速先兆判定和控制装置等问题, 最为关键之处在于受反应时间的限制, 要想在一台完整的真实压气机中通过探测出失速先兆波, 然后迅速启动以机械传动为主的作动机构来消除它, 是非常困难的.

工程实际应用中, 经常出现设计人员在设计阶段对风扇/压气机的稳定性有很好的考虑, 但完成设计和制造的发动机由于某些不可预测的因素可能仍旧不能满足裕度的要求的情况. 这时, 就需要采用机匣处理等结构简单, 效果明显的被动控制方式来扩大风扇/压气机的失速裕度.

本研究组在非定常机匣处理方面开展了理论和实验两方面的研究工作, 在理论模型方面, 孙晓峰、于巍巍^[1-4]发展了相应的三维非定常旋转失速稳定性模型, 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, 可用于带有激波的多排叶栅的风扇/压气机失速起始点的预测以及带气室的机匣处理参数优化. 在实验方面, 孙大坤、侯睿伟等^[5]依照三维旋转失速稳定性模型给出的理论结果设计了一种带气室机匣处理, 并对其开展了提高压气机稳定工作范围的研究工作. 实验结果表明, 这种机匣处理能够在不影响效率的前提下, 明显地提高压气机的稳定工作范围. 这样, 对带气室的机匣处理的理论模型和宏观实验均取得了较好的结果.

带气室的机匣处理的扩稳机制是什么呢? 实际上, 带气室的机匣处理为风扇/压气机系统提供了一种非定常“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. 这意味着带气室的机匣处理扩稳实际上是一个典型的非定常问题. 将机匣的作用理解为改变系统的阻抗边界条件是对机匣处理扩稳机理的新的认识. 为此, 希望能够通过相应的非定常实验考察这种带气室的机匣处理对失速先兆波发生及发展的影响效果来验证这

一观点, 这就是本文研究的目的所在.

对旋转失速先兆波开展非定常实验研究, 要求发展相应的非定常的测试手段及数据处理方法. 在失速先兆波主动控制的研究工作中, Garnier^[6]和 Tryfonidis^[7]等人用沿压气机圆周布置热线等方式获取压气机流场内的速度扰动, 再通过空间傅立叶变换(SFT)、空间谱密度分析(PSD)等方法进行分析, 这恰恰可以作为开展非定常机匣处理对失速先兆的影响的工作基础. 和已有的一些工作进行了详细的对比, 利用校核后的测试方案及数据处理方法, 针对带气室的机匣处理对旋转失速先兆波的非定常作用展开实验研究工作.

1 失速先兆波测试技术和对比分析

低速压气机实验台的结构如图 1 所示: 1. 流量测量管, 由双扭线型面形成的进口集流器, 用于测量流量 G ; 2. 流量管壁面静压测点, 用于测量进口静压 p_0 ; 3. 压气机进口总压及动态壁面静压测点, 用于测量 p_1^* , $p_n(t)$; 4. 压气机转子; 5. 压气机静子; 6. 压气机出口总、静压测点, 用于测量 p_2^* , p_2 ; 7. 异步交流电动机; 8. 后支板; 9. 出口面积调节机构, 由步进电机带动外环调节出口截流面积, 以控制出口反压和流量; 10. 固定截流堵锥.

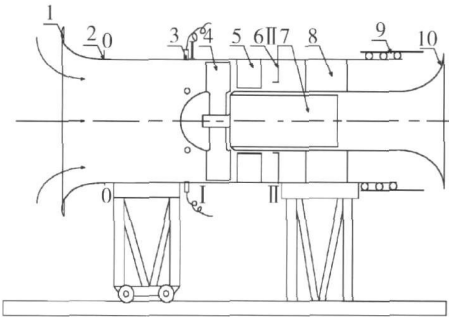


图 1 低速单级压气机实验台结构简图

Fig. 1 Schematic of low-speed fan facilities

为了获得失速先兆波, 采用 Kulite 高频响动态压力传感器对压气机上游的壁面动态静压信号进行实时采集, 测点位置在靠近转子前缘动叶机匣壁面上, 距离转子前缘约一个转子弦长位置. 8 支传感器沿周向均布(见图 1).

在对信号进行数据分析处理过程中, 本文采用了空间傅立叶变换、空间谱密度分析等方法. 对 8 支传感器测得的动态压力信号经过滤波(0.1~1.2 倍转子轴频率的通频带)以后进行空间傅立叶变换, 得到 k 阶谐波系数

$$C_k(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p_n(t) \exp\left[-\frac{2ikn\pi}{N}\right] \quad (1)$$

其中 C_k 为复傅立叶变换系数; p_n 为扰动压力; $N = 8, -3 \leq k \leq 4$.

谐波系数 $C_k(t)$ 是随时间变化的, 对其进行功率谱密度分析可以得到该谐波的传播频率及相应的能量的大小.

功率谱密度(Power spectral density)定义

$$P_{SD} = 10\log_{10} |F(\omega)|^2 / N \quad (2)$$

其中, $F(\omega)$ 为 $C_k(t)$ 的 Fourier 系数.

为了验证数据分析处理方法的正确性, 进行了细致的对比工作.

1.1 失速先兆波时间演化

图 2 给出的是压气机在逐渐截流进入失速阶段的动态压力信号的时间演化图. 对比 1995 年 Tryfonidis^[7] 的工作, 可以看到, 每支传感器采集到的信号都有明显的压力扰动出现, 而且可以清楚地看到其在压气机中沿周向传播(图中斜线所示), 并且逐渐增大最后进入失速的过程. 图 3 是将这一过程描绘成更为直观的三维时间演化图, 这里参考的是 1990 年的 McDougall^[8] 的工作. 其中, 图 2(b) 中横坐标单位是绝对时间 s, 而图 3 的横坐标为转子转数, 也就是用转子的转数作为描述失速这一过程的参考坐标.

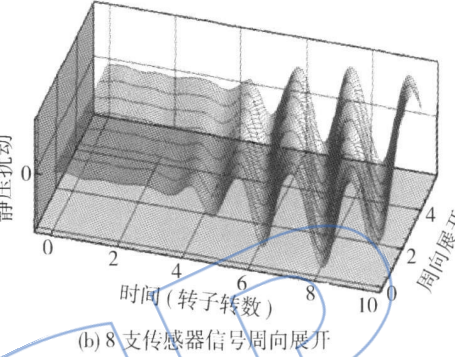
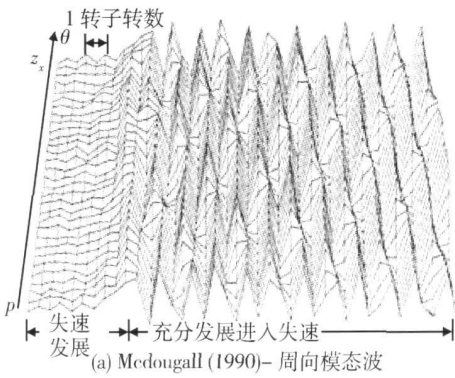


图 3 3 维旋转失速时间演化示意图
Fig.3 The time evolution of the circumferential static pressure distributions for a low speed fan system instability

1.2 失速先兆波功率谱密度(PSD) 分析

图 4 给出了在压气机近失速的某固定流量系

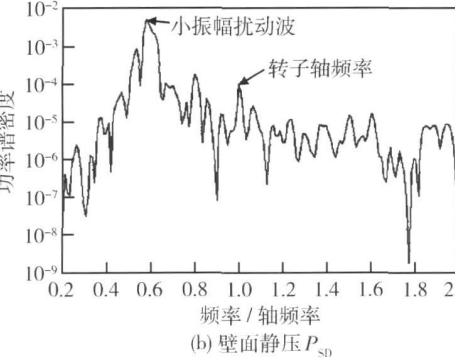
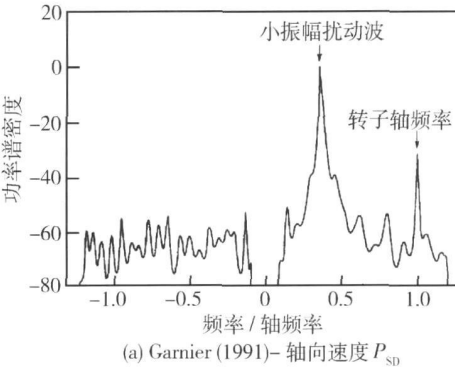


图 4 失速前一次谐波功率谱密度分析
Fig.4 Power spectral density of first spatial harmonic of the static pressure before stall

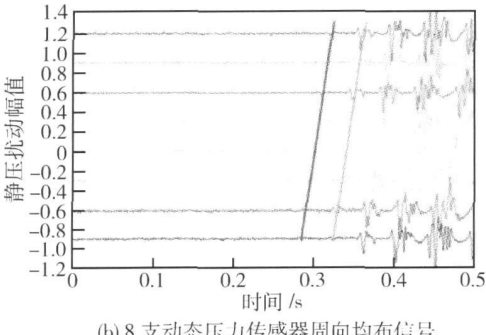
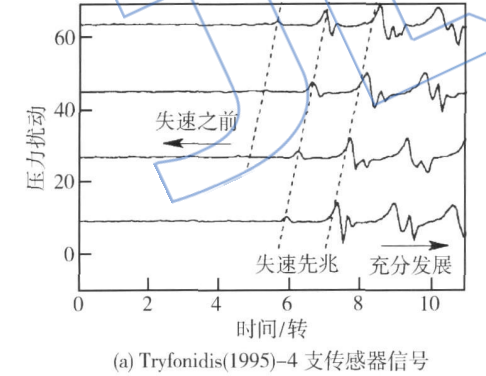
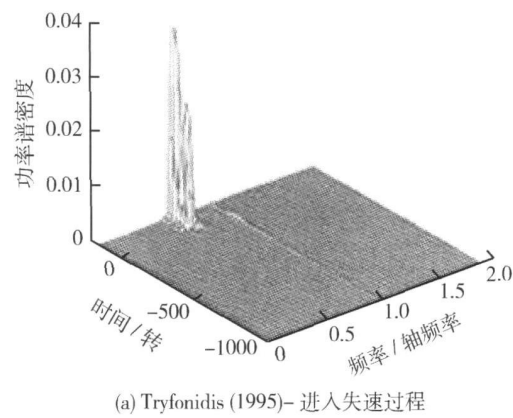


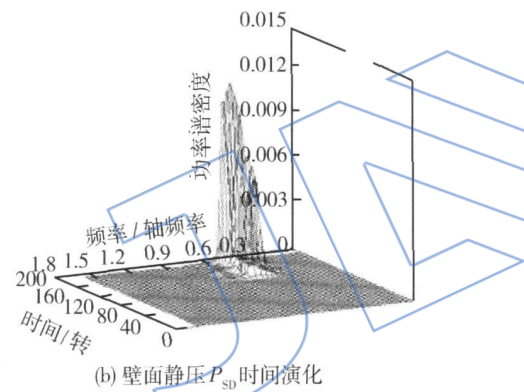
图 2 壁面静压时间演化示意图

Fig.2 The time evolution of the static pressure distributions

数下,在某一时刻壁面静压一次谐波的功率谱.和 1991 年 Garnier^[6]的工作做了对比.这里的横坐标是被转子轴频率无量纲化的频率,从图中可以看到,在近失速状态下,小振幅扰动波的能量会远远大于转子轴频率.在图 5 给出的 P_{SD} 的时间演化过程,更加直观的体现了随着流量的降低,低频扰动能量的放大过程,这里对比的是 Tryfonidis^[7]的工作.



(a) Tryfonidis (1995)- 进入失速过程



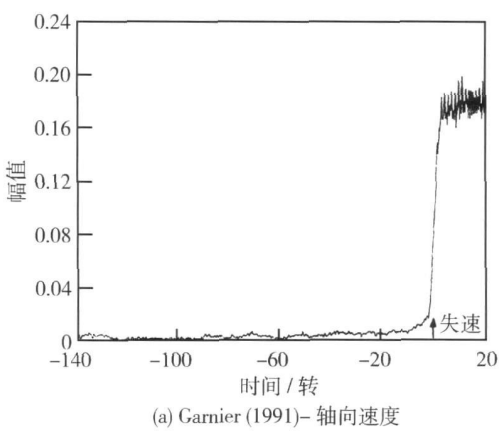
(b) 壁面静压 P_{SD} 时间演化

图 5 进入失速过程的一次谐波 P_{SD} 时间演化
Fig. 5 Time evolution of the P_{SD} of first Fourier coefficient

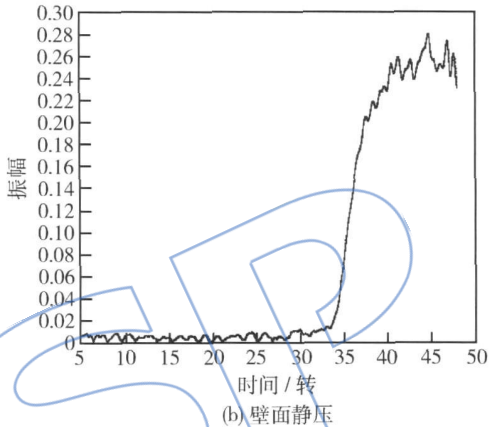
1.3 失速先兆波空间傅立叶分析(SFT)

图 6 给出了壁面静压一次谐波 SFT 幅值在进入失速时呈指数级放大的过程. 图 7 给出了相应的壁面静压一次谐波 SFT 相位在进入失速时,由不断的波动变化发展到相位固定的过程. 这里对比的是 1991 年 Garnier^[6]的相关工作. 相位的处理是参考 1992 年 Paduano^[9]在其报告第 188~189 页中给出的方式.

从图 2~ 图 7 的对比工作中可以看到,对失速扰动波的分析和处理与 Mcdougall, Garnier, Tryfonidis 等人的结果是一致的,说明以上发展的对失速先兆波的数据处理方法是完全可靠和有效的. 接下来将对处理机匣对失速扰动波的作用

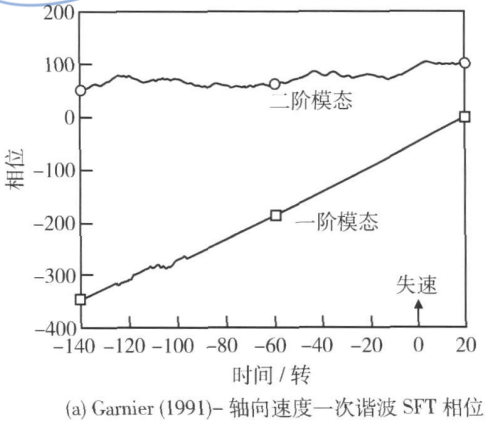


(a) Garnier (1991)- 轴向速度

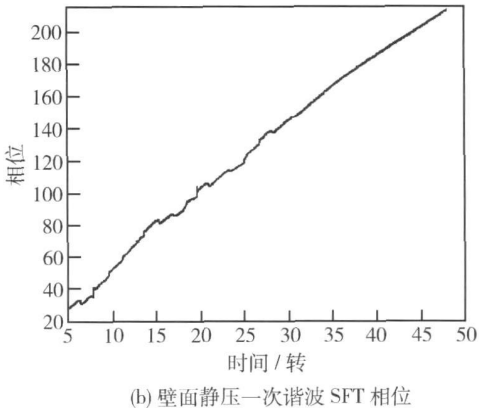


(b) 壁面静压

图 6 一次谐波空间傅立叶变换(SFT)的幅值
Fig. 6 Time history of the amplitude of first Fourier coefficient



(a) Garnier (1991)- 轴向速度一次谐波 SFT 相位



(b) 壁面静压一次谐波 SFT 相位

图 7 空间傅立叶变换(SFT)相位的时间演化
Fig. 7 Time history of the phase of first Fourier coefficient

机理进行详细的分析.

2 非定常机匣处理对失速先兆的实验结果和作用机理分析

在进行动态测试试验时, 选取 100% 转速下, 24 槽 60 mm 腔深情况下的处理机匣作为研究对象, 同时进行稳态特性和动态特性采集, 目的是为了能够在稳态压升特性曲线上指明比较的位置基准, 这样才能进行光壁机匣和处理机匣比较.

2.1 失速瞬间过程

如图 8 中给出的示意, 对进入失速这一过程进行比较, 分别选取光壁机匣和处理机匣在进入失速前约 1 s 作为时间历程的起始, 对各自的壁面扰动静压在失速之前相同时间内的扰动信号进行空间傅立叶分析(SFT).

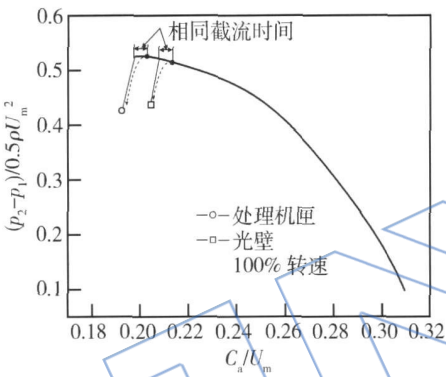
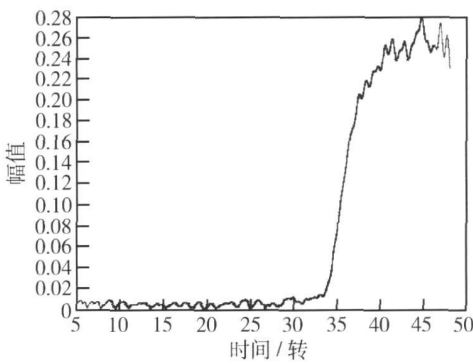


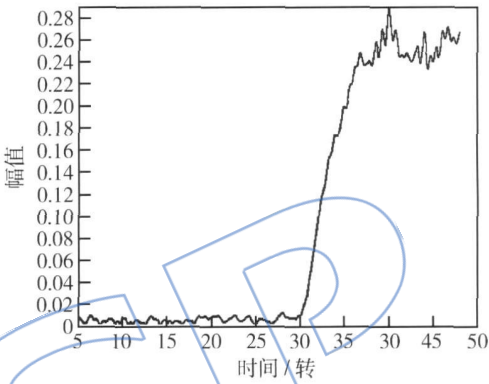
图 8 特性线上给出光壁与处理机匣进入失速的位置
Fig.8 The comparison of the stall inception points between casing treatment case and solid wall case

图 9 和图 10 分别给出了 SFT 幅值和相位的对比结果, 横轴为采用转子转数作为衡量标准的时间坐标. 可以看到, 进入失速时, SFT 的幅值都会呈指数级的放大, 二者无论是一次谐波还是二次谐波, 在量级和趋势上都是一致的, 并无明显的差别. SFT 的相位在失速后呈直线趋势, 说明失速团会以一定的速度传播. 但从图 9 还可以看到, 一次谐波都要比二次谐波的幅值要高出一个量级, 说明扰动能量主要集中在一次谐波中, 以下将主要针对一次谐波进行分析.

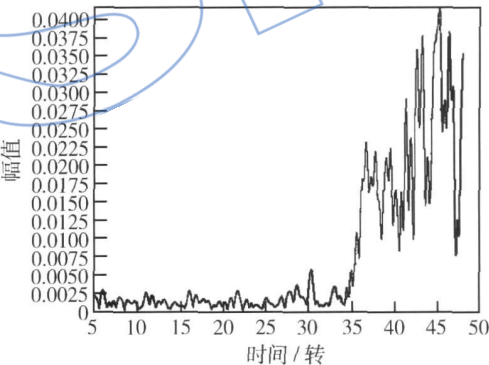
SFT 相位分析可以得到失速团的传播速度. 这里, 对 5 个不同的百分比转速下的失速团频率进行了实验(见表 1). 从实验结果来看, 处理机匣情况下的失速团传播速度要稍高于光壁情况.



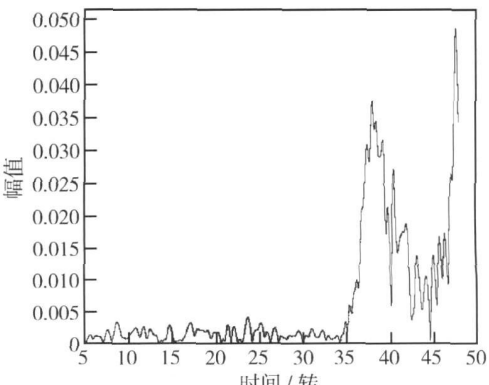
(a) 光壁一次谐波 SFT 幅值



(b) 处理机匣一次谐波 SFT 幅值



(c) 光壁二次谐波 SFT 幅值



(d) 处理机匣二次谐波 SFT 幅值

图 9 光壁和处理机匣的 SFT 幅值对比

Fig. 9 Comparison of the amplitude of SFT between casing treatment case and solid wall case

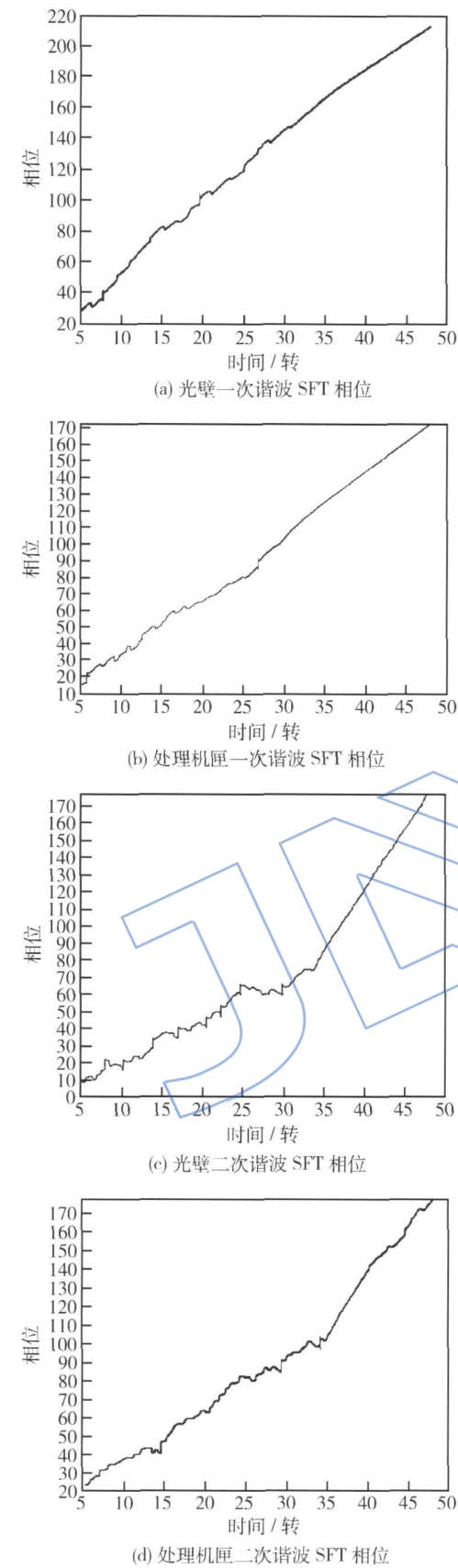


图 10 光壁和处理机匣的 SFT 相位对比
Fig. 10 The comparison of the phase of SFT between casing treatment case and solid-wall case

表 1 在不同工作转速下,失速团相对于转子的传播速度

Table 1 Speed of stall cell in different work condition		
失速团速度/ %	处理机匣/ %	光壁机匣/ %
100	58.6	55.9
95	56.8	55.8
90	58.0	56.5
85	58.8	55.9
80	57.3	57.3
70	59.3	57.9

由以上的分析可知,无论有无处理机匣,压气机进入旋转失速的情况几乎是一致的,没有明显的差异.

2.2 光壁失速点

选取光壁失速点作为研究的基准点(图 11),即选取一个流量参考点,对该流量条件下的壁面静压进行持续的动态采集.从动态压力信号(见图 12)可以看到,此时处理机匣情况下的压力信号中已经出现了明显的压力扰动.对该信号进行 PSD 分析(如图 13),其中 x 轴为以转子转数表示的时间轴, y 轴为被转子轴频率无量纲化的频率, z 轴为功率谱密度值(P_{SD}).从中可以清楚地看到,除了规则的转子轴频率的成分外,存在明显的低频扰动成分.这说明,在较低的流量条件下,由于压气机固有特性的存在,这种低频扰动波将不可避免的出现,并不因为处理机匣的存在而完全消除,在光壁条件下,从图 11 可以看出,进一步减小流量,压气机将进入失速.而在有处理机匣时,即便减小流量,这种扰动也不致被迅速放大,从而拓宽了压气机的稳定工作范围.

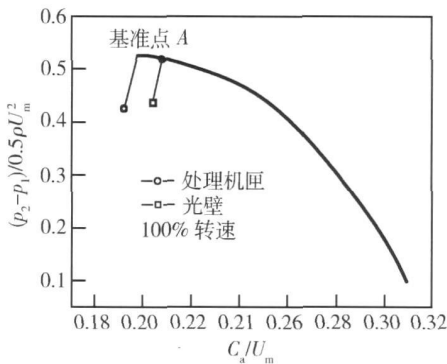


图 11 光壁情况下的失速动态分析基准点
Fig. 11 Reference points for dynamic signal processing

2.3 相同流量参考比对

在图 14 中,选定起始点 A,以相同的截流速度对光壁机匣和处理机匣两种情况进行实验,这

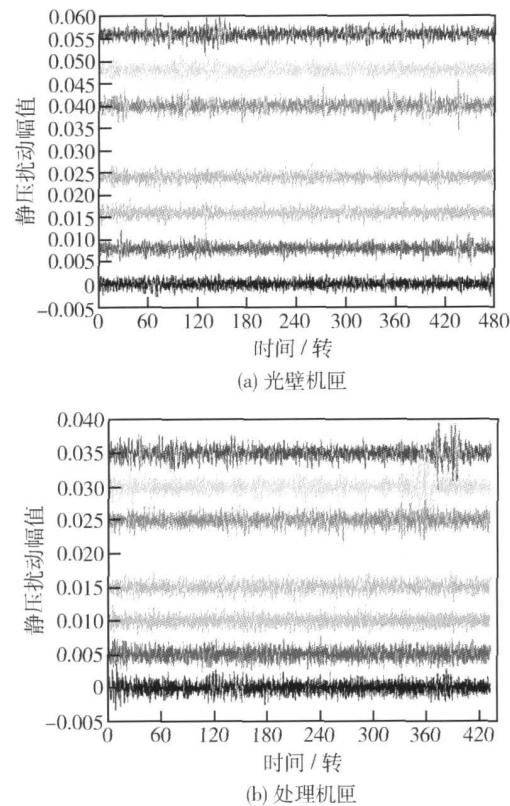


图 12 光壁失速点流量的时域信号对比
Fig. 12 The comparison of the time signal between casing treatment case and solid-wall case

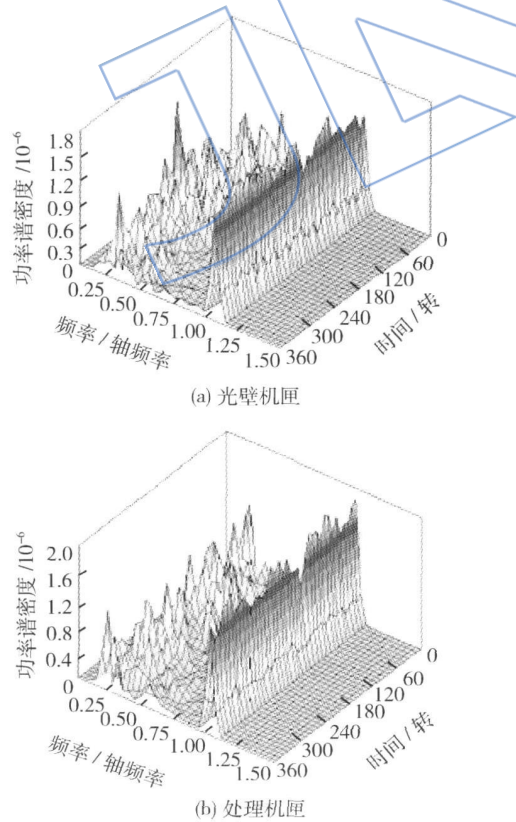


图 13 光壁失速点处的 P_{SD} 对比
Fig. 13 The comparison of P_{SD} between casing treatment case and solid-wall case

样可以使得二者的流量关系可以对应起来,在整个截流过程中保持大致相等. 对动态压力信号进行 SFT 分析,如图 15 所示,带有处理机匣的情况下,低频扰动的幅值会一直被抑制,直到继续截流到更小流量的情况才会突然放大进入失速. 在图 16 中,处理机匣情况下的扰动波的传播速度要比光壁情况快一些.

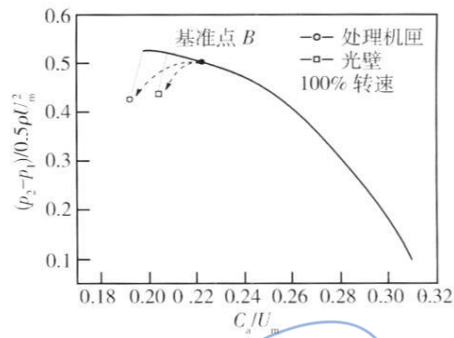


图 14 相同流量起始点,相同截流速度动态信号对比
Fig. 14 The comparison of the time signal between casing treatment case and solid-wall case with the same flow

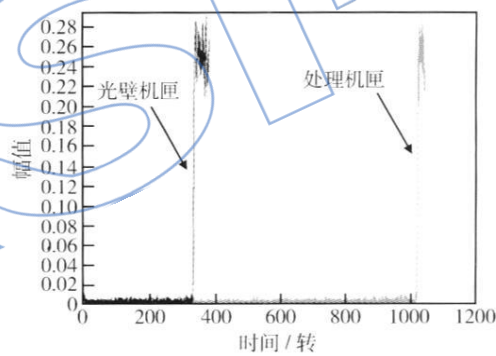


图 15 相同流量起始点,相同截流速度 SFT 幅值对比
Fig. 15 The comparison of the amplitude of SFT between casing treatment case and solid-wall case with the same flow

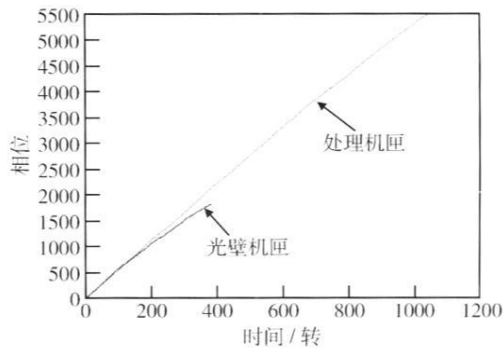


图 16 相同流量起始点,相同截流速度 SFT 相位对比
Fig. 16 The comparison of the phase of SFT between casing treatment case and solid-wall case with the same flow

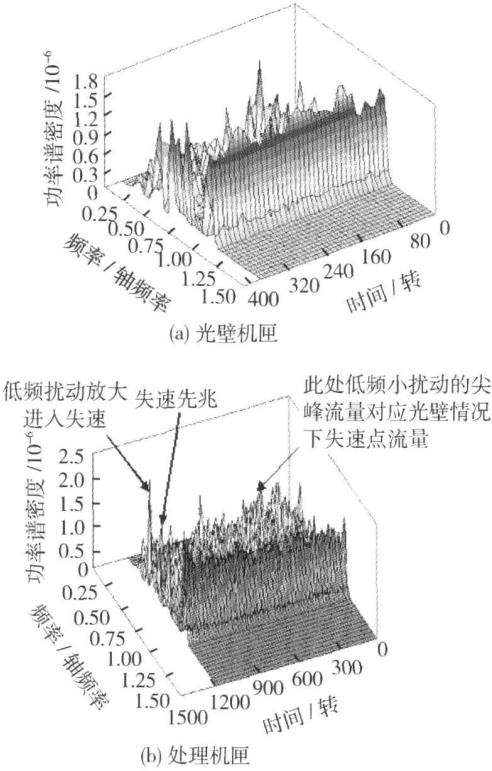


图 17 相同流量起始点,相同截流速度的 P_{SD} 对比
Fig. 17 The comparison of P_{SD} between casing treatment case and solid-wall case with the same flow

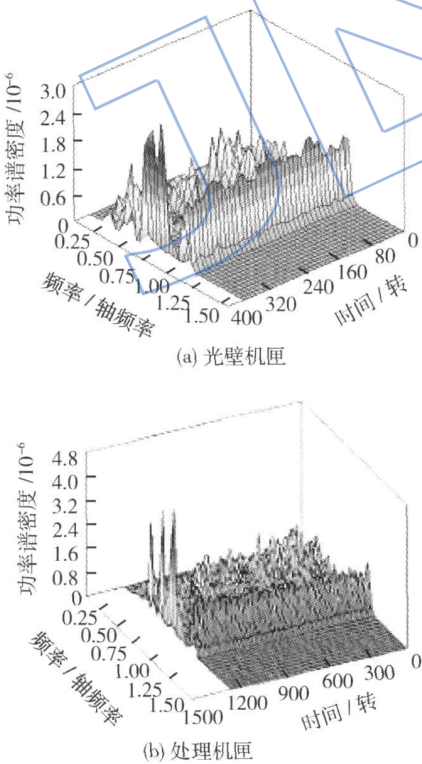


图 18 相同流量起始点,相同截流速度 P_{SD} 对比
(较图 17 时间历程前进 2 转)
Fig. 18 The comparison of P_{SD} between casing treatment case and solid-wall case with the same flow (two revs after Fig. 17)

对动态静压信号进行 PSD 分析(如图 17),可以看到,在相同流量起始点,相同截流速度时,低频扰动在光壁条件下,约 360 转之后被放大,而此时的处理机匣情况下,低频扰动也可以看到明显的尖峰,但没有被放大,充分说明处理机匣并没有改变失速先兆波的起始,而是能够有效的抑制失速先兆波的发展,直到 1200 转后才进入失速状态.图 18 分别给出了二者下一时刻(大约前进了 2 转)的对比结果,可以看到,失速先兆波均被放大,进入了失速.

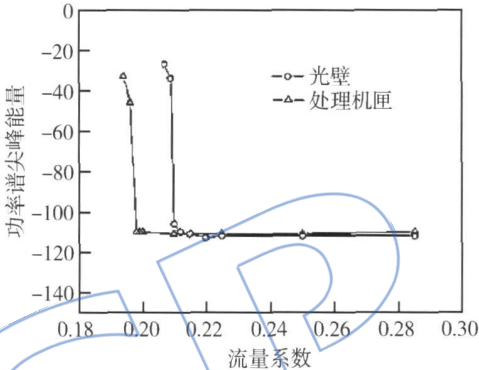


图 19 不同流量条件下的一次谐波 P_{SD} 尖峰能量图
Fig. 19 The peak power of the first spatial harmonic as a function of flow coefficient

为了考察低频扰动波的能量随流量系数的变化关系,给出了 P_{SD} 尖峰能量的结果,如图 19 所示.图中横坐标为流量系数,纵坐标为 P_{SD} 尖峰能量的分贝值,可以看到,随着流量的减小,扰动波的尖峰能量逐渐增加,这意味着低频扰动波的能量和压气机的稳定性密切相关.从图 19 中可以看出,在较大流量状态下,处理机匣存在情况下的 P_{SD} 尖峰能量和光壁情况下处于同一水平.随着流量的降低,扰动激励的幅值逐渐增加,扰动和阻尼二者之间的相互作用也逐渐加强.在光壁情况下,当系统阻尼无法克服不断增大的扰动时,系统将突然出现失稳,压气机进入失速状态.而在处理机匣存在情况下,使得系统的阻尼特性发生了改变,增强了对低频扰动波能量的吸收能力,可以抑制低频扰动波进一步放大,使其能量维持在较低水平.所以,从图中可以看到,处理机匣的尖峰能量在光壁机匣失速以后也一直保持在原有水平,直到降低到更低的流量才会出现失速.

3 结 论

(1) 采用空间傅立叶分析(SFT)、功率谱密度(PSD)分析等信号处理手段,对失速先兆波进

行频谱分析研究,验证了实验数据的分析处理方法的正确性。

(2) 通过对光壁情况和处理机匣情况下各自进入失速的过程对比可以看出,二者在失速瞬间,表现出的动态特性没有明显差别。

(3) 比较和光壁失速点流量系数相同的流量条件下的动态压力信号发现,二者均出现明显的低频扰动,说明此时扰动波均已被不同程度放大。

(4) 在近失速点附近,相同流量起始点,相同截流速度情况下,即保证流量变化趋于同步,在整个截流时间历程里,从低频扰动随流量系数的变化过程中可以看到,由于压气机固有特性的存在,在流量降低到一定程度时,低频扰动总会出现。不管是光壁情况,还是处理机匣情况,截流初期,二者的低频扰动能量基本处于同一水平。但随着流量逐渐降低,光壁情况下系统会较早的进入失稳状态,而处理机匣情况下,由于改变了系统地阻尼特性,使得低频扰动的能量始终维持在原有的较低水平,有效抑制其非线性放大,直到流场条件进一步恶化,才会进入失速。

(5) 这种带气室的非定常机匣处理,不管失速先兆波是何种类型,经过涡波的相互作用,都可以得到有效抑制。

(6) 对于失速先兆波与处理机匣之间波涡相互作用的细节,还有待于进一步的研究工作的开展来证实。

参考文献:

- [1] SUN Xiaofeng. Three dimensional compressible flow stability theory of rotating stall [R]. BUAA Technical Report, BH-B4765, May, 1996.
- [2] 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.
- [3] 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 compressors/fans [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6): 1018-1027.
- [4] 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.
- [5] 孙大坤,侯睿炜,孙晓峰. 非定常机匣处理扩大压气机稳定裕度实验. 航空动力学报[J]. 2008, 23(4): 662-670.
SUN Dakun, HOU Ruiwei, SUN Xiaofeng. An experimental investigation of rotating stall margin improvement with unsteady casing treatment [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(4): 662-670.
- [6] Garnier V H, Epstein A H, Greitzer E M. Rotating waves as a stall inception indication in axial compressors [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1991, 113: 290-302.
- [7] Tryfonidis M, Etchevers O, Paduano J D, et al. Prestall behavior of several high speed compressors [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1995, 117(1): 62-80.
- [8] McDougall N M, Cumpsty N A, Hynes T P. Stall inception in axial compressor [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1990, 112: 116-125.
- [9] Paduano J D. Active control of rotating stall in axial compressors [R]. GTL Report # 208, MIT, 1992.