

文章编号:1000-8055(2012)05-1015-07

组合压气机旋转失速特征的小波分析

单晓明^{1,3}, 姚峥嵘³, 岳 林², 黄金泉¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016;

3. 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 采用高频响动态压力探针测量了小流量轴流/离心组合压气机的旋转失速和喘振, 并采用基于 Morlet 小波时频分析和小波系数奇异分解的方法分析了压气机失速信号. 研究表明: 稳定工况下, 频率分量较多、幅值较小. 失速工况下, 特征频率能量较大, 且成倍频关系. 在该组合压气机的失稳过程中, 并没有引起大幅度的压力脉动. 压气机光滑地从失速前出现的模态波过渡到完全失速. 周向存在 2 个失速团, 失速团传播速度约为 44.8%~45.9% 转速.

关 键 词: 高频响探针; 失速; 压气机; 小波分析; 奇异值分解

中图分类号: V263.3

文献标志码: A

Wavelet analysis of features of rotating stall in a combined compressor

SHAN Xiao-ming^{1,3}, YAO Zheng-rong³, YUE Lin², HUANG Jin-quan¹

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. China Aviation Powerplant Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: A fast response pressure probe was applied to test the rotating stall and surge of an axial and centrifugal combined compressor. The pressure signals were analyzed by utilizing the method of the time-frequency analysis based on the Morlet and singular value decomposition. The experimental results indicate that, at the stable condition, there are many main frequency components in the frequency domain but the amplitude is small, while, at the stall condition, the energy of the frequency components becomes larger. In the process of unstall to stall, the larger amplitude of the pressure fluctuation does not produced by the stall cell in this compressor. The compressor enters smoothly into the full stall condition from the modal wave. 2 stall cells are measured around annulus and the propagation speed of the stall cell is from 44.8% to 45.9% rotor speed.

Key words: fast response probe; stall; compressor; wavelet analysis;
singular value decomposition (SVD)

国内航空涡轮轴发动机大多为轴流离心组合
式压气机, 转速高达 40 000 r/min 以上. 高速轴流

压气机在接近失速边界状态下工作时, 其压气机
的压比效率明显比设计点高, 但是其运行的稳定

收稿日期: 2011-07-02; 网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120525.1516.201205.1015_009.html

作者简介: 单晓明(1965—), 女, 江西婺源人, 研究员, 博士生, 主要从事航空发动机设计与测控技术研究.

性下降. 如果能够保证压气机稳定工作在靠近失速边界工况, 那么意味着压气机压比效率的提高. 换句话说, 在保证压气机性能不降低的情况下, 可以减少压气机级数, 从而降低发动机质量. 发动机的安全稳定性是保证发动机高性能的前提, 在发动机工作过程中, 失稳信号的检测与判定至关重要.

一般而言, 压气机失速可分为两种形式: 突变型失速和模态型失速. 1955 年 Emmons 等人^[1]最先勾画出了两类失速过程的形态. 之后 30 年间, 众多科研工作者一直在努力探索压气机失速机理. 限于当时理论和试验技术条件, 一直没有重大突破. 直到 1986 年 Moore 和 Greitzer^[2]从理论上预测了模态型失速先兆的存在. 几乎同时, Epstein 等人^[3]意识到失速先兆的重要意义, 首次提出了压气机主动控制概念. 这种方法必须确保尽可能地提前检测到失速信号, 从而可以提供足够长的时间, 使压气机能够及时采取主动控制措施抑制失速的发生. McDougall 等人^[4]和 Day^[5]试验证实了失速前会出现突变和渐近两种失速先兆形式.

自上世纪 90 年代以来, 国内外对失速形式和失速先兆检测进行了相当多的研究. Longley J P^[6]提出空间傅里叶分析, 可以获得模态波的幅值和相位的变化. McDougall 等人^[4]应用该方法, 通过试验研究发现模态波失速先兆. Bright 等^[7]采用相关积分法, 认为失速前 1000 r/min 左右能够检测到模态失速先兆. Tryfonidis 等人^[8]提出的行波能量法, 认为只能在失速前 100~200 r/min 能够检测到失速先兆. 而 2007 年 Cameron 和 Morris^[9]发展周向空间传感器信号互相关方法. 该方法有效地检测到突发型失速先兆. Torrence 等^[10]采用连续小波变换分析了气象数据, 获得了极大成功. LIN Feng 等人^[11-12]借鉴了 Torrence 等人^[10]的连续小波变换方法, 将这种小波分析方法引入压气机失速信号分析, 分析了轴流压气机在失速发展过程中扰动传播过程. Salunkha^[13]用这种方法探讨了进口畸变引起压气失稳过程的机理.

国内中国科学院工程热物理研究所聂超群等人^[14-16], 对失速形式以及失速先兆检测算法等相关方向做了大量的研究工作, 这里不再一一列举.

本文采用高频响动态压力探针测量某小流量轴流/离心组合压气机的旋转失速和喘振, 并采用基于 Morlet 小波时频分析和小波系数奇异分解的方法分析了该压气机失速信号.

1 Morlet 小波的时频滤波原理

对于任意的函数 $s(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 在实数域上平方可积, 则连续小波函数变换定义为

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} s(t) \varphi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

式中 $\mathbb{R}$ 表示全体实数的集合, $\varphi \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 为基小波 $\varphi(t)$ 的位移和尺度伸缩, 上标 $*$ 代表取共轭. b 是时间变量, a 是尺度参数.

本文选择能够调整信号频域分辨率的 Morlet 小波

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{\beta^2 t^2}{2} \right) \exp(-i\xi_i t) \quad (2)$$

式中 β 是可以根据激励信号特征选取的参数. β 决定了函数的形状, 在时域, β 变小时信号时间范围小; 在频域, β 变大时信号频域范围小. 其中 ξ_i 为中心频率, 当 $i = 1, 2, \dots, n$; 变化时可以得到 n 个小波基函数, 它们之间的间隔为 $\Delta\omega, \xi_i/2\pi$ 到 $\xi_{i-1}/2\pi$ 为分析频带. 在构造频域滤波器时, 为了实现频域的足够分辨率以利于保证系统参数识别的精度, $\Delta\omega = 1/T$ 应该足够小, 其中 T 为扫描周期.

为了简化运算, 取 $a = 1$ 时, 可以对信号进行 Morlet 小波频域滤波. 信号经过中心频率为 ξ_i 的 Morlet 小波滤波器滤波后相应的频谱是

$$W(\omega, \xi_i) = \text{FFT} \langle x(t), \Phi_{\xi_i}(t-b) \rangle = X(\omega) \cdot \Phi_{\xi_i}(\omega) \quad (3)$$

这里 $X(\omega)$ 和 $\Phi_{\xi_i}(\omega)$ 分别是信号和 Morlet 小波的傅里叶变换. 等式(3)是复数的小波基函数, 在频域滤波会带来相位失真. 信号重构相应也会相位失真. 为此仅用 Morlet 小波的实部构造滤波器, 使得重构的信号与原始信号同相位. Morlet 小波实部的傅里叶变换为

$$\Psi_{\xi_i}(\omega) = \frac{1}{2} \left[\exp \left(-\frac{(\omega - \xi_i)^2}{2\beta^2} \right) + \exp \left(-\frac{(\omega + \xi_i)^2}{2\beta^2} \right) \right] \quad (4)$$

然后对关注的频段进行傅里叶反变换, 从而可以重构小波系数时-频分布. 对应的时域系数为

$$W_R(t, f) = \text{IFFT}(X(\omega) \cdot \Psi_{\xi_i}(\omega)) \quad (5)$$

假设 A 为小波系数矩阵是 $m \times n$ 阶矩阵. m, n 分别为频率和时间离散点数. 通过矩阵的奇异值分解可以得到矩阵 A 的奇异值 λ_i , 即

$$A = \sum_{i=1}^R \lambda_i A_i \quad (6)$$

$$A_i = u_i v_i^T \quad (7)$$

其中 R 为矩阵的秩, 奇异值 λ_i 由大到小排列 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_R > 0$, 对应各个奇异值的正交向量为 u_i 和 v_i . 因为矩阵 A 由小波分解系数组成, 分解后的奇异值就对应了信号的主要频率分量.

2 试验数据分析

2.1 试验测试系统简介

试验在中国航空动力机械研究所某压气机试验台上进行. 在某轴流离心组合式压气机上, 用 3 支微型高频压力探针测量流场. 由于压气机转速较高达到 45 000 r/min, 为保证压气机试验台的安全、降低试验风险, 探针安装在轴流压气机第三级转子出口截面. 图 1 所示为周向 3 支探针的安装位置. 3 支探针采用活动安装座固紧, 探针插入深度约为 9.5 mm, 避开转子叶尖泄漏区. 另外保证探针测压孔对准气流方向.

孔周向位置示意图(从前往后看)

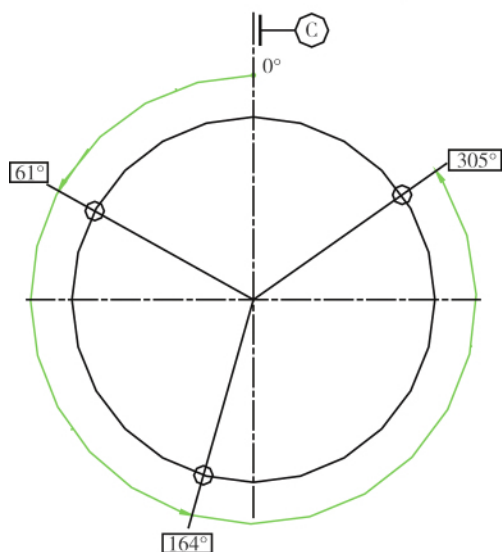


图 1 周向测点布置

Fig. 1 Circumferential array of probes

微型高频压力动态复合探针为自行设计的圆柱型单孔探针, 从美国 Kulite 公司定制, 探针型号为 XCE-20-093, 其头部结构见图 2. 微型高频

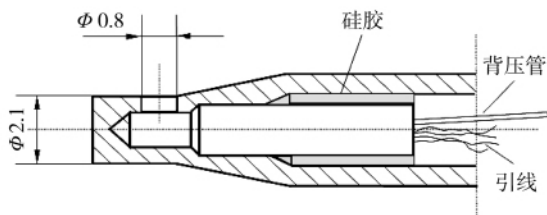


图 2 微型高频压力动态复合探针

Fig. 2 Small sized high frequency pressure probe

压力复合探针的静态精度约为 $\pm 1\%$.

采用激波管对复合探针进行动态校准, 得到 3 支动态压力传感器的响应频率均约为 $\omega_n = 17$ kHz, 约为 22 倍压气机设计转速的频率 $f_{\text{rotor}} = 750$ Hz. 一般而言, 压气机失速先兆、失速团的传播速度均小于转速, 因而探针的动态响应频率足以满足失速信号的测量.

采用美国 Nicolet 公司产品 Odyssey 动态数据采集系统进行试验数据采集, 系统精度 $\pm 0.4\%$, 最高采样频率为每秒 10^5 采样点每通道. 周向布置的 3 支动态探针并行采集, 采样速度为每秒 5×10^4 采样点每通道.

试验采集了压气机在 $\bar{n} = 0.45$ (两次), 0.5, 0.55, 0.6 四个转速下的特性曲线, 并在每一转速下, 采集了压气机稳定、失速以及喘振三个状态下动态压力信号. 本文以 $\bar{n} = 0.6$ 转速下测量数据进行分析讨论.

2.2 测试结果与分析

$\bar{n} = 0.6$ 转速下, 压气机转速频率为 450 Hz, 压气机第 3 级转子叶片数为 29 个, 因而, 叶片通过频率为 13.05 kHz. 试验时, 数据采样率为 50 kHz, 即平均每个叶片通道采样 3.8 个点.

如图 3 和图 4 为周向 3 支探针在稳定和失速两个工况下的时域信号. (图中 0.6t-2 表示相对转速 0.6 时稳定 (tranquilization) 状态第 2 次录取信号; 0.6s-2 表示相对转速 0.6 时失速 (stall) 状态第 2 次录取信号). 稳定工况下压力脉动幅值明显比失速状态要小.

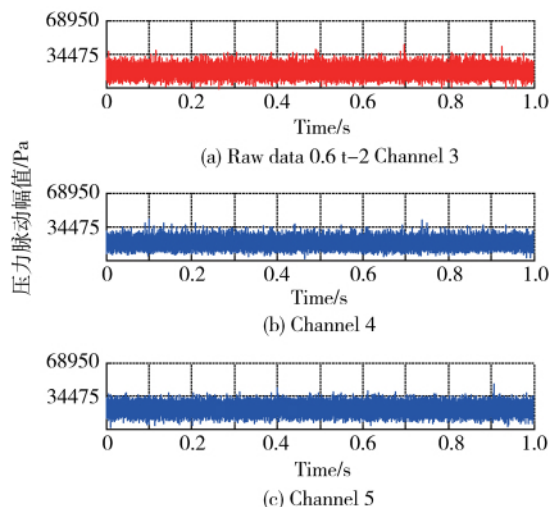


图 3 稳定工况下 3 个通道信号

Fig. 3 Signals of 3 channels at normal condition

对图 4 所示的信号进行互相关分析, 可得失速团连续经过 2 支探针的时间差; 然后, 对信号进行快速傅里叶变换, 从频谱上可得到失速团通过探针的频率; 从而, 可以计算出失速团为 2 个、传播频率为 200 Hz 左右, 即传播速度为 44.8%~45.9% 转速.

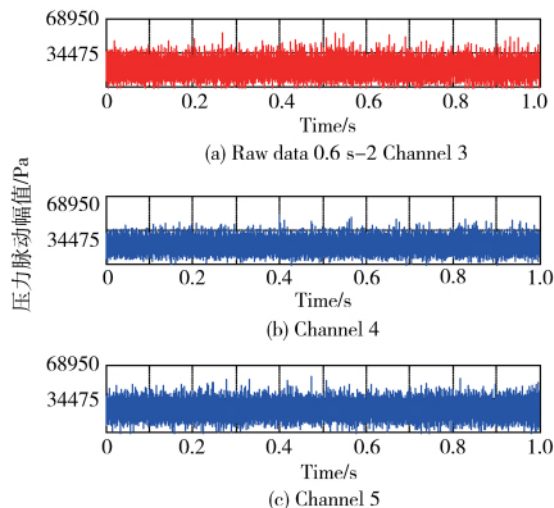


图 4 失速工况下 3 个通道信号

Fig. 4 Signals of 3 Channels at stall condition

图 5 和图 6 为通道 3 信号的频谱. 图 5 所示稳定工况下频率分量包括 200, 400, 600, 1 000, 1 200 Hz 多个倍频分量. 而图 6 所示失速工况下 200, 400 Hz, 800 Hz 这几个倍频分量幅值较大, 其中 200 Hz 频率分量为失速团传播频率. 由于周向存在 2 个失速团, 那么, 400 Hz 为失速团扫过探针的频率. 图 5 所示稳定工况下同样出现了 200 Hz 频率分量, 幅值只有失速状态下的一半. 目前, 尚不清楚稳定工况下 200 Hz 频率分量产生的原因, 需进一步地详细测试研究.

采用基于 Morlet 小波基函数的时频滤波方法对信号进行时-频分析, 得到如图 7 和图 8 所示的小波系数时-频分布. 稳定工况的 600, 1 000, 1 200 Hz 频率分量小波系数略大; 在失速状态下, 200, 400, 600, 800 Hz 频率分量小波系数非常明显, 频谱分量均是 200 Hz 的倍频. 这种分布趋势与图 5 和 6 所示频谱图一致.

图 7 和图 8 显示, 在数据段的开始与结尾处存在边沿效应. 可以通过分频段进行小波重构小波系数、适当地选择小波参数和增加采样数据点来消除这种效应.

将图 7 和图 8 对应的小波系数矩阵进行奇异值分解, 其矩阵的奇异值即为信号的特征频率分

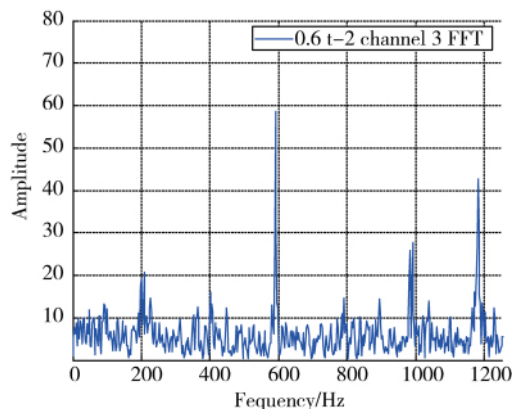


图 5 稳定工况下通道 3 信号的频谱分析

Fig. 5 Frequency analysis of Channel 3 at stable condition

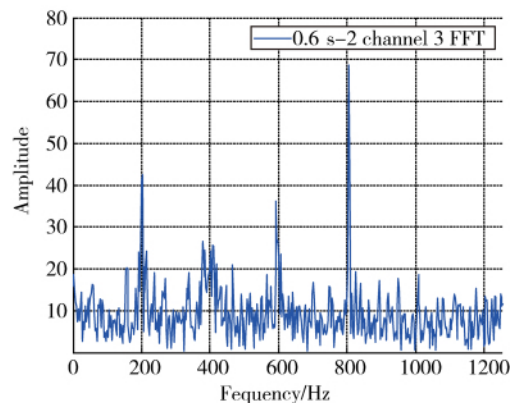


图 6 失速工况下通道 3 信号的频谱分析

Fig. 6 Frequency analysis of Channel 3 at stall condition

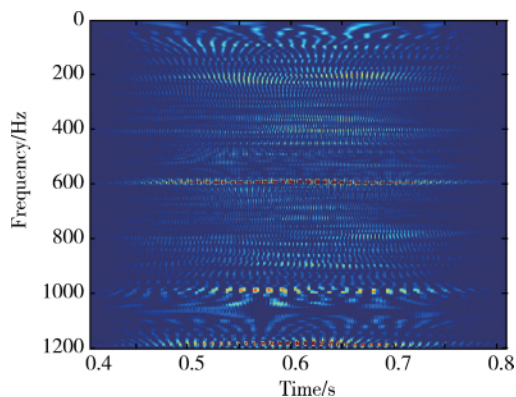


图 7 正常工况下通道 3 信号的时频分析

Fig. 7 Time-frequency analysis of Channel 3 at normal condition

量. 表 1 中每行频率特征值按照小波系数能量大小排列. 从表中可以得出以下规律:

1) 稳定工况下, 奇异分解可得到的频率分量比较多、能量较低, 如图 7 所示,

2) 失速状态下,通过奇异分解得到的特征频率只有 2 个分量,成倍频关系、能量较高,如图 8 所示.

如表 1 所示,失速工况的 2 个特征频率在稳定工况下也是存在的,能量较低.越接近失速,能量越大.

将这些频率成分绘成曲线,如图 9 和图 10 所示.稳定工况下,图例中曲线 1~曲线 5 为 5 个主要频率分量值随转速的变化.稳定和失速工况下,主要的频率分量值与转速成正比,且频率分量之间是倍频关系.失速状态下出现的成倍频关系的频率分量同样在稳定工况下也存在.

图 11 所示,压气机在 0.3~0.4 s 之间进入失速状态.失速前存在 200 Hz 和 400 Hz 的模式波.压气机失稳后,在周向形成两个失速团,失速团扫过探针频率即图 11 所示的 400 Hz 所示的频带.

图 12 为失速过程放大图.可知,压气机失速

约从 0.35 s 开始.图 11 和图 12 的时序信号可知,失速前和失速后压力脉动幅值并没有明显增大.从失速前存在的模式波光滑地过渡到失速团.失速前 200 Hz 扰动被失速团“吞食”.

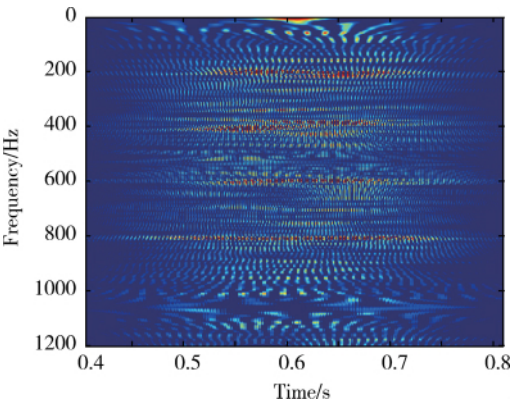


图 8 失速工况下通道 3 信号的时频分析
Fig. 8 Time-frequency analysis of Channel 3 at stall condition

表 1 频率分量对应奇异值能量大小分布

Table 1 Frequency distribution corresponding singularity values

	相对转速	频率 1/Hz	频率 2/Hz	频率 3/Hz	频率 4/Hz	频率 5/Hz
正常工况	0.45_1	440.4	737.6	879.7	296.7	585.8
	0.45_2	437.6	588.8	291.8	873.0	753.5
	0.50	335.7	671.4	1007.1		
	0.55	372.7	745.7	1118.6	930.8	557.6
	0.60	1181.0	591.2	995.7	790.2	401.3
失速数据	0.45	298.4	598.0			
	0.50	331.8	663.6			
	0.55	368.6	737.2			
	0.60	401.2	802.5			

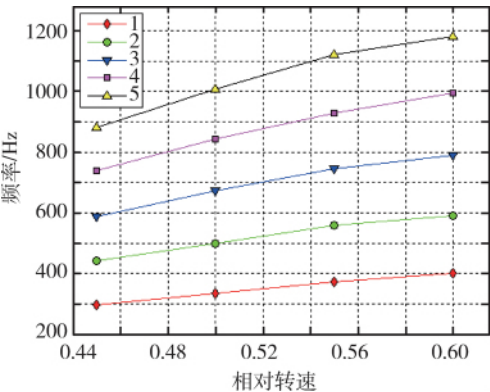


图 9 稳定工况下频率与不同转速的关系

Fig. 9 Frequency versus rotor speed at stable condition

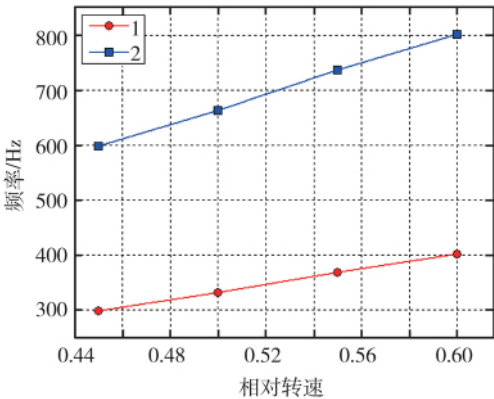


图 10 失速状态下特征频率与不同转速的关系

Fig. 10 Frequency versus rotor speed at stall condition

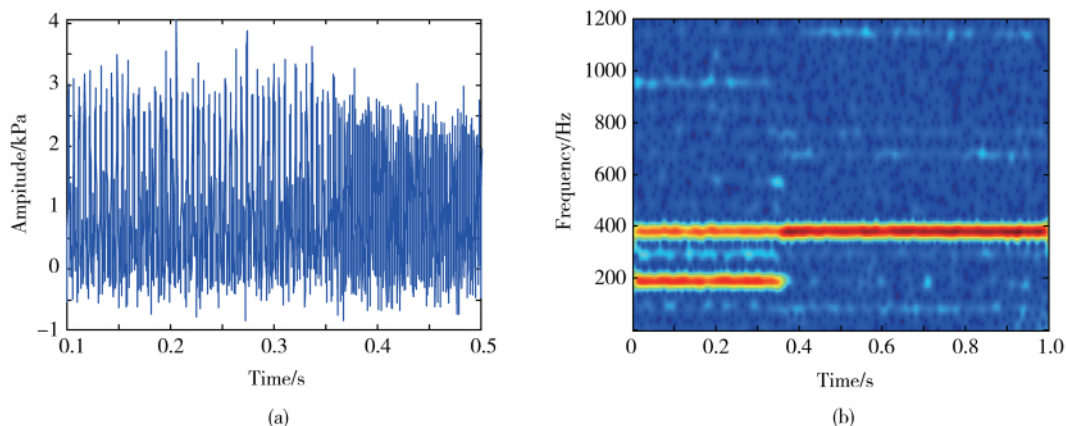


图 11 过渡过程时序信号及其小波时频谱(1 s)

Fig. 11 Pressure trace and the time-frequency of the wavelet spectrum from unstall to stall (1 s)

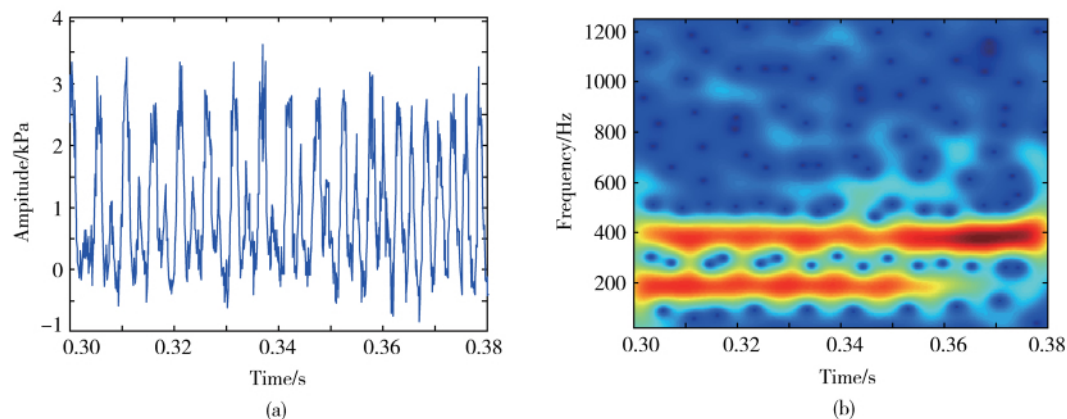


图 12 失速过程局部放大图

Fig. 12 Enlarged plots of the stall process

3 结 论

在小流量组合压气机试验台上,采用节流逼喘方法,进行了压气机失速/喘振试验研究,得出以下结论:

1) 稳定工况下,压气机的频率分量较多,能量分布比较分散,幅值较小;失速工况下,压气机失速团特征频率能量较大、且成倍频关系;因而,失速信号的特征频率幅值大小可以表示轴流压气机运行状态。

2) 在该型小流量轴流/离心组合压气机的失速过程中,并没有引起大幅度的压力脉动;压气机光滑地从失速前出现的模态波过渡到完全失速;周向存在 2 个失速团,其传播速度约为 44.8%~45.9% 转速。

参考文献:

[1] Emmons H W, Pearson C F, Grant H P. Compressor surge and stall propagation[J]. Transactions of the ASME,

1955, 77(2):455-469.

- [2] Moore F K, Greitzer E M. A theory of post-stall transients in axial compression systems Part 1: development of equations[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1986, 108(1): 68-76.
- [3] Epstein A H, Williams J E, Greitzer E M. Active suppression of aerodynamic instabilities in turbomachines[J]. Journal of Propulsion and Power, 1989, 5(2): 204-211.
- [4] McDougall N M, Cumpsty N A, Hynes T P. Stall inception in axial compressors[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1990, 112(1): 116-125.
- [5] Day I J. Stall inception in axial flow compressors[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1993, 115(1): 1-9.
- [6] Longley J P. Inlet distortion and compressor instabilities [D]. Cambridge: Cambridge University, 1988.
- [7] Bright M M, Qammar H K, Weigl H J, et al. Stall precursor identification in high speed compressor stages using chaotic time series analysis methods[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1997, 119(3): 491-499.
- [8] Tryfonidis M, Etchvers O, Paduano J D, et al. Pre-stall behavior of several high-speed compressors[J]. Journal of Turbomachinery, 1995, 117(1): 62-80.

- [9] Cameron J, Morris S. Spatial correlation based stall inception analysis[J]. ASME Conference Proceedings, 2007, 2007(47950):433-444.
- [10] Torrence C, Compo G. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1):61-78.
- [11] LIN Feng, CHEN Jingyi, LI Meilin. Wavelet analysis of rotor-tip disturbances in an axial-flow compressor[J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(2):319-334.
- [12] LIN Feng, CHEN Jingyi, LI Meilin. Practical issues of wavelet analysis of unsteady rotor tip flows in compressors[R]//Indianapolis, Indiana:38th AIAA/ASME/SAE/AS-EE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2002:2002-4082.
- [13] Salunkhe P B, Pradeep A M. Stall inception mechanism in an axial flow fan under clean and distorted inflows[J]. Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(12):121102-121115.
- [14] 张靖焯. 一种捕捉预示压气机失稳预警信号的新方法的研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(2):270-277.
- ZHANG Jingxuan. Study of a new method for giving warning signals of instability[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(2):270-277. (in Chinese)
- [15] 聂超群. 低速轴流压气机旋转失速先兆[J]. 工程热物理学报, 1998, 19(3):293-298.
- NIE Chaoqun. Experimental investigation on inception of rotating stall in low-speed axial compressor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1998, 19(3):293-298. (in Chinese)
- [16] 程晓斌. 小波分析与压气机旋转失速先兆研究[D]. 北京:中国科学院工程热物理研究所, 2000.
- CHENG Xiaobin. Investigation on the method of wavelet transform and the inception process of compressor rotating stall[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2000. (in Chinese)