

文章编号:1000-8055(2011)08-1887-06

轴流压气机失速特征识别

王春瑞, 岳 林

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

摘 要: 为了能够准确识别压气机旋转失速过程中失速团的数目, 将压气机旋转失速过程中脉动压力波动的相位和幅值特征绘制在极坐标中, 然后根据其在极坐标图中表现出来的特征来确定失速团的数目. 经过与传统方法对比说明该分析方法对于失速团数目的确定优于原有的方法, 具有抗噪性和一定的精度. 另外, 使用该方法可以可视化周向失速分布区域, 并能可视化压气机失速先兆的发生和发展.

关 键 词: 压气机; 失速团数目; 失速先兆; 旋转失速; 极坐标

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Identification of stall characteristics of axial flow compressor

WANG Chun-rui, YUE Lin

(College of Mechanical and Electrical Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to identify the number of stall cells during rotating stall process, a method was presented in this paper. Firstly, the phase and amplitude characteristics of pressure fluctuation during stall process were drew in the polar coordinate, and then the number of stall cells was obtained by judging the waveform displayed. After comparison with the traditional method, it shows that this method for determining the number of stall cell is better than original one thanks to its noise immunity and certain degree of precision. Besides, the method can also visualize the areas of stall in circumference and occurrence and development of stall inception in compressor.

Key words: compressor; the number of stall cell; stall inception; rotating stall; polar coordinate

轴流压气机失速的发生和发展机理和试验研究是提高发动机性能设计的关键问题. Emmons 等定义失速现象为失速团以同转速相反(相对坐标系)的方向绕着周向旋转^[1]. 所以失速团在失速的过程中扮演非常重要的角色. 可是压气机失速的过程中动压失速团的数目可能是不同的. 识别失速团的数目和对进一步认识失速以及对失速进行主动控制具有非常重要的意义. 根据国内外大量试验数据和计算结果表明, 失速团数目的多少对压气机旋转失速的压力场和速度场的分析都起到了直接和间接作用^[1]. 在公开发表的关于失速

试验和理论研究的文献中, Pismenny, Ciannissis, Day, Ehrich 等人^[2-6]利用传感器布局与失速团压力波动特征来确定失速团的数目. 程晓斌等根据压气机失速的时域特征与转子转速的关系来估算出失速团的数目^[7]. 然而他们所用的方法一般都是根据相位差和时间差的关系估算出失速团的数目, 并没有把具体的失速团的数目展现出来. 而且这些方法容易受到噪声以及其他因素的影响, 致使得到失速团的数目不够准确. 由此, 本文用一种可视化的方法^[2]将失速团的数目以图形的方式展现出来, 能够直观地看到失速团的数目, 从而更加

收稿日期: 2010-08-07; 修订日期: 2011-02-14

作者简介: 王春瑞(1984-), 男, 黑龙江佳木斯人, 硕士生, 研究方向为信号处理. E-mail: wodechuntian12345@163.com

深刻地理解失速团的物理意义, 并通过与传统方法对比证明了这种方法的直观性、准确性、快捷性. 同时还对方法进行改进, 对压气机的失速先兆进行了一定的分析, 并通过时域和频域的对比证明了该方法对失速先兆的分析具有一定的可靠性.

1 失速团数目的测量原理

失速团的定义: 在稳态失速的过程中, 所有的压力波动都有其自己的频率成分. 在脉动压力信号中, 把压力减少非常大的区域定义为失速团^[2]. 之所以把压力波动中的低压部分定义为失速, 是因为失速总是伴随着压力的减少. 这样, 能够把压气机在失速压力场中压力值很低部分的区域(低压区)叫做旋转失速团.

由于高低谐波的影响, 致使压力波动特征十分复杂. 因此, 为了简化分析, 首先看看处于失速状态下, 在压气机横截面周向上(周向有4个传感器)理想的压力波动情况. 如图1所示.

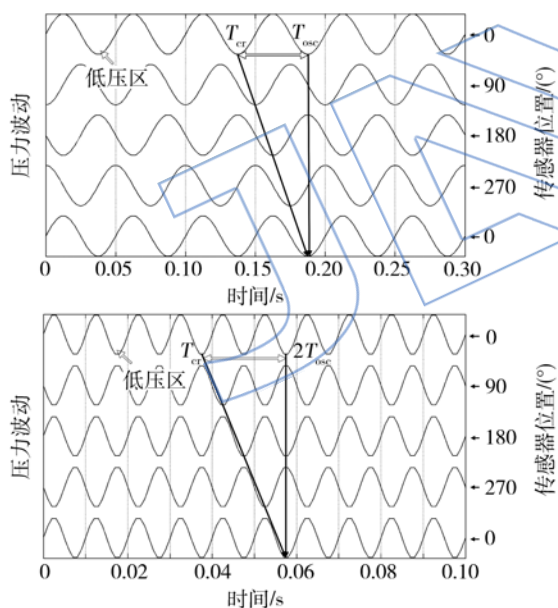


图1 随时间变化的理想压力特征

Fig. 1 Idealized characteristic of pressure variation versus time

图1中 T_{cr} 为4个传感器对脉动压力信号测得的失速团的旋转周期, T_{osc} 为单个传感器测得的脉动压力信号的压力波动周期. 因此可得失速团数目 n 为

$$n = T_{cr} / T_{osc} \quad (1)$$

从而可以判断出图1中两个理想正弦压力波动的失速团数目分别为1和2. 另外, 还必须知道, 在

实际情况下失速团的数目是确定的. 因为失速团的数目一定少于转子叶片的数目^[8].

压气机周向某一时刻的瞬时压力分布一定包含了这个时刻所有失速团的信息. 而压气机某一级横截面某一时刻周向的瞬时压力波动特征与在压气机横截面周向的某一位置随时间而变化的压力特征是十分相似的^[2]. 而压气机横截面的周向压力场中低压区域的数目就是失速团的数目. 因此, 根据理想脉动压力波动(图1所示)波动的频率 f 和时间 t , 求出其相位 $\varphi = 2 \times \pi \times f \times t + \varphi_0$ 以及对应相位的时域信号的幅值, 然后把相位和幅值分别作为极坐标中的极角和极径将它们对应并绘制在极坐标中. 如图2所示. 其中, 极径的长度代表时域信号(图1)的幅值的大小, 极角代表脉动压力在周向分布的流场中的位置. 极径最小处为低压区也就是失速团的所在位置. 图2中可以看出, 四个位置(I, II, III, IV)的传感器所测得脉动压力信号的极坐标图是相似的, 只因位置不

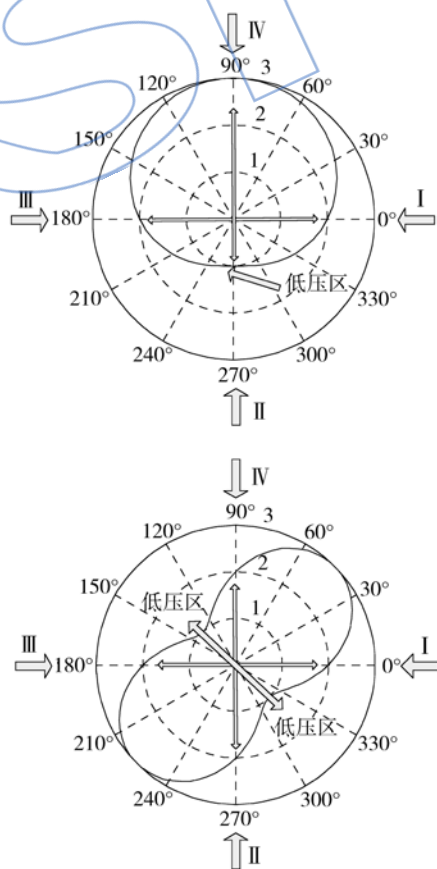


图2 由四个位置(I, II, III, IV)的传感器测得的在极坐标中的压力场

Fig. 2 Pressure fields from positions of four pressure sensors (I, II, III, IV) in polar coordinate

同而造成极角的不同而已.同时,根据低压区的数目判断出失速团数目为 1 和 2.与图 1 相符.

在失速过程中,失速团是伴随着压气机内部的压力场进行周向旋转的^[9].由此得出失速团的角速度 ω_{cr} 的两个参数.

- 1) 压力场的旋转角度为 $\Delta\theta$.
- 2) 压力场经过旋转角度所用的时间为 $\Delta\tau$.

$$\omega_{cr} = \Delta\theta/\Delta\tau \quad (2)$$

由于失速团是伴随着压力场进行旋转的,而压力场一周可能有多个失速团,所以一个传感器很难去确定失速团的旋转速度.因此需要多个传感器来测量失速团的旋转速度.但是决定失速团旋转速度的公式是不变的,如式(2).

2 动压试验失速状态参数分析

在压气机第二级的周向布置 3 个传感器,3 个传感器编号为 S21,S22,S23;3 个传感器布置在第二级周向的 $0^\circ,90^\circ,180^\circ$ 位置.

由于压力场在旋转的过程中容易受到高频谐波以及噪声的影响,致使在求取失速团旋转速度时会造成影响.因此需要对数据进行滤波.由于失速团旋转频率一般不会高于转子旋转频率的 90%^[10],根据这一条件设计滤波器的基本参数,如表 1 所示.滤波器类型为 FIR(finite impulse response)滤波器.

表 1 滤波器基本参数设置
Table 1 Basic parameters of the filter

通带截止 频率/Hz	阻带截止 频率/Hz	窗函数	滤波器类型
400	600	Hann	FIR

滤波后可以得出失速团(压力场)经过各个传感器之间的时间差和夹角(如图 3 所示).然后根据公式(2)即可求出失速团的旋转速度.

由此可得失速团的旋转速度为

$$\omega_{cr} = 2\pi/0.0052\text{ s} = 1.207 \times 10^3 \text{ rad/s} \quad (3)$$

通过公式(3)求得的失速团旋转速度,然后乘以对应的时间就得到了脉动压力的相位.通过对脉动压力信号滤波,然后根据相位将对应的脉动压力的幅值绘制在极坐标下,如图 4 所示.最后根据低压区的数目来判断失速团的数目.从图 4 可以看出压气机周向每个位置的传感器得到的极坐标图都有两个低压区,可以判定在压气机的第二

级有两个失速团.

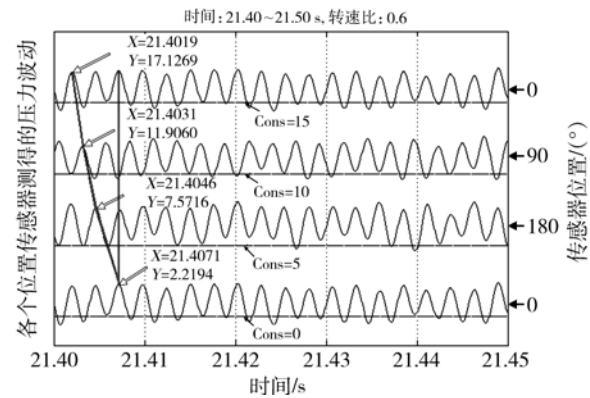


图 3 压力场经过周向各传感器的时间

Fig. 3 Time which pressure field passes the sensors in circumferential direction

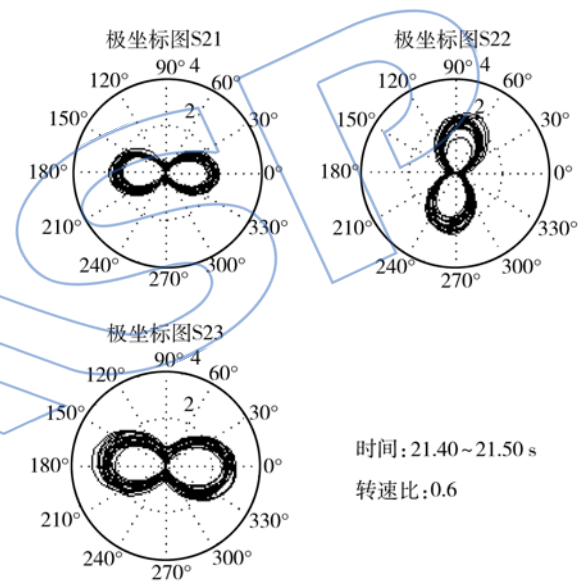


图 4 脉动压力波动的极坐标图

Fig. 4 Polar coordinate picture of pulse pressure fluctuation

失速先兆的分析可以从时域、频域中进行,希望尽早发现失速先兆.从图 5 可以看到,失速先兆从 S21 开始沿着斜箭头方向(周向)逐渐增大,最后在 S23 增大到一定程度,发生失速.

为了更加明了失速的特征,对信号进行频域分析,如图 6 所示.可以看出压气机在 21.40 s 时,180.9 Hz 的频率成分突然消失,而 380.9 Hz 的频率成分逐渐增大,表明压气机已经进入失速状态.但却看不出失速先兆的发展过程.

通过在时域和频域的分析,对失速发生和形成有了一些了解.那么在极坐标下会表现出什么特征呢.图 7(a),(b)可看出,小波动在周向上

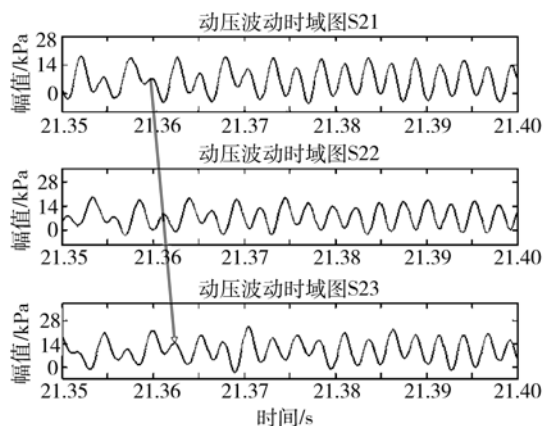


图5 脉动压力波动时域图
Fig. 5 Time-domain picture of pulse pressure fluctuation

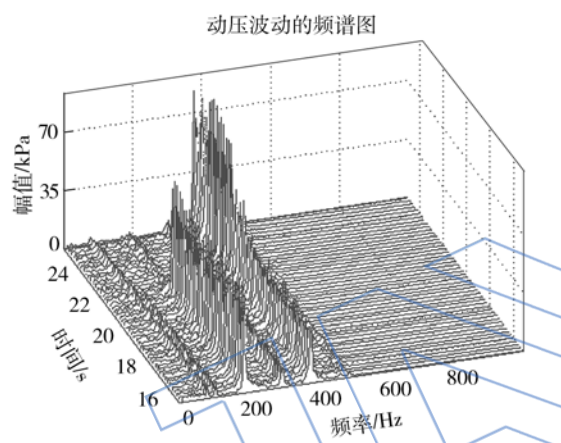
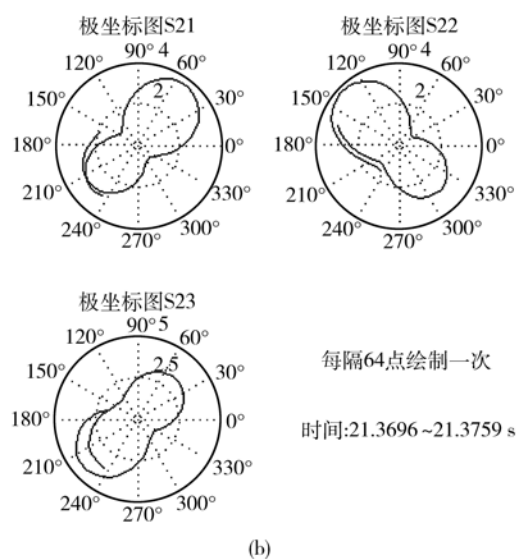
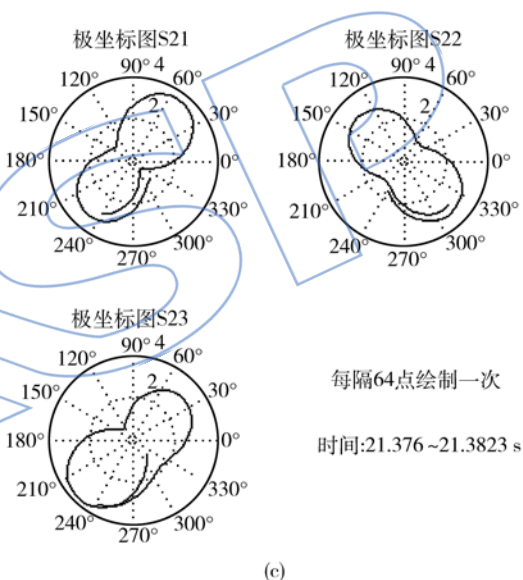


图6 脉动压力的频谱图
Fig. 6 Frequency spectrum of pulse pressure fluctuation

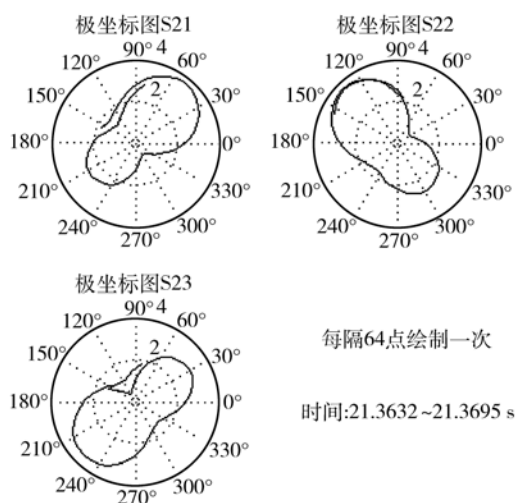


(b)



(c)

图7 脉动压力波动的极坐标图
Fig. 7 Polar coordinate picture of pulse pressure fluctuation



(a)

(S21→S22→S23)有逐渐增大的趋势. 当小波动增大到图7(b)的极坐标图S23时, 压气机就进入了失速状态, 失速后极坐标图如图7(c)所示. 此时小波动与大波动大小基本相同. 纵观图7(a)~(c)可以看出, 该方法把失速先兆的发展到失速的形成, 以图形化的方式诠释为小波动逐渐增大到基本维持不变的过程, 能够较直观地观察到失速发展过程, 这对在线识别失速先兆和失速具有重要的意义^[11].

3 与传统方法进行对比

为了能够验证失速团数目, 采用传统方法中非常可靠的互相关^[12]方法对其进行验证. 首先,

传感器的布局与上述方法一样.然后,根据失速时记录三处同性质的信号,求出两个传感器的信号时差 t 以及信号频率 f .最后根据公式

$$N = (360/\theta)(f \times t + m) \quad (3)$$

推算出失速团的数目.其中 m 为两个传感器之间所夹的失速团的数目.

3.1 失速频率求取

从图 6 可以看出失速之后压气机的失速频率成分为 380.9 Hz.

3.2 信号时差的求取

由于压气机失速信号的强随机性,将会使实录波形图上 t 的测量产生误差.因此在这里应用相关分析的方法来确定 t .下面对 S21 与 S22, S21 与 S23 在失速的情况下进行互相关分析,经过互相关之后求得的时延分别为 0.0014 s 和 0.0026 s,如图 8、图 9 所示.

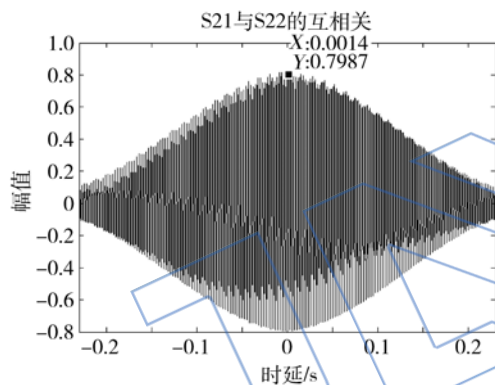


图 8 S21 与 S22 的互相关
Fig. 8 Cross correlation of S21 and S22

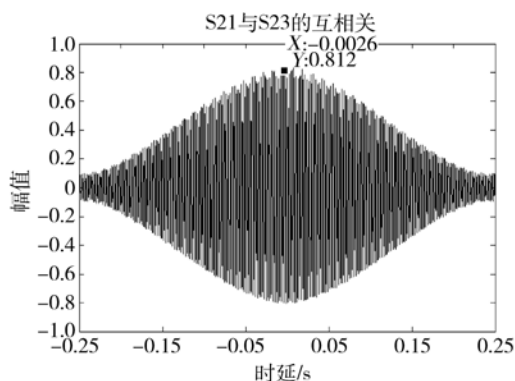


图 9 S21 与 S23 的互相关
Fig. 9 Cross correlation of S21 and S23

3.3 失速团数目计算

根据 3.1 和 3.2 所得的频率和时延,再根据公式(3)可得失速团的数目为

$$\begin{cases} N_1 = 2 + 4 \times m_1 \\ N_2 = 2 + 2 \times m_2 \end{cases} \quad (4)$$

由于在压气机同一级上求取失速团数目,所以求取的失速团数目 N_1, N_2 应该是相同的,又因为压气机转子的叶片数为 26. 所以求出它们的公倍数为 2, 6, 10, ..., 26. 当 $N=6$ 时,可以得出失速团的旋转周期 T 为

$$T = 1/f_{\text{stall}} \times 6 = 0.016 \text{ s}$$

即:失速团的旋转速度为 $1/T=62.5 \text{ r/s}$. 根据以往的实际经验:

1) 失速团旋转频率一般为转子旋转频率的 15%~90%之间.

2) 根据失速团的形成机理,一般要三个叶片才能形成一个失速团.

根据转子转速求取的失速团旋转频率为 70~380 Hz 之间. 而当 N 为其他值时又不符合失速团的形成机理. 最后确定失速团数目为 2.

4 结 论

1) 本文利用压气机脉动压力信号的相位和幅值特征绘制脉动压力的极坐标图,能够在极坐标图中看出失速团的数目. 实现了失速团数目的可视化. 且该方法较传统方法求取的失速团数目更加直观、快捷、准确.

2) 本文还对此方法进行改进,用来对失速先兆进行分析. 通过时域与频域的对比,说明了该方法用于失速先兆分析的直观性可以对失速进行在线识别和警报. 同时,利用该方法还对失速团在周向上的传播速度进行了分析.

参考文献:

- [1] Emmons H W, Pearson C E, Grant H P. Compressor surge and stall propagation [J]. Transactions of the ASME, 1955, 77(3): 455-469.
- [2] Pismenny J, Levy Y. The number and speed of stall cells during rotating stall in a multi-stage compressor [R]. Technion Project No 160-911, 2002.
- [3] Ciannissis G L, McKenzie A B, Elder R L. Experimental investigation of rotating stall in a mismatched three-stage axial flow compressor [J]. Journal of Turbomachinery, 1989, 11(4): 418-425.
- [4] Day I J, Freeman C. The unstable behavior of low and high-speed compressors [J]. Journal of Turbomachinery, 1994, 116(2): 194-201.
- [5] Ehrich F F, Spakovszky Z S, Martinez-Sanchez M, et al. Unsteady flow and whirl-induced forces in axial-flow compressors Part II: analysis [J]. Journal of Turbomachinery,

- 2001, 123(2): 446-452.
- [6] Pismenny J, Levy Y. Oscillation in multistage axial compressor during rotating stalls [R]. Haifa: TAE Report No 906, 2002.
- [7] 程晓斌, 陈静宜. 小波分析与压气机旋转失速先兆研究 [D]. 北京: 中国科学院, 2000.
CHENG Xiaobin, CHEN Jingyi. The study of wavelet analysis and rotating stall inception in compressor [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2000. (in Chinese)
- [8] Storace A F, Wishler D C, Shin H W, et al. Unsteady flow and whirl-induced forces in axial-flow compressors Part I: experiment [J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(1): 433-445.
- [9] 库赫曼, 维贝尔. 航空发动机空气动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1959.
- [10] Day I J. Stall inception in axial flow compressors [J]. Journal of Turbomachinery, 1993, 115(1): 1-9.
- [11] Inoue M, Kuroamaru M, Tanino T, et al. Comparative studies on short and long length-scale stall cell propagating in an axial compressor rotor [J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(1): 24-32.
- [12] 李晋. 脉冲声源无源声定位探测技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
LI Jin. Research on passive acoustic direction finding for pulse sound source [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)