

# 某型发动机旋转失速压力信号的频谱分析

张 朴, 魏洋亭, 李应红  
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘 要:**为解决现役某型发动机的喘振问题,对该型发动机逼喘过程中压气机首先失速级压力信号进行频谱分析,发现了该型发动机在正常状态、进入和退出旋转失速状态、完全发展的旋转失速状态压力信号频谱的动态演化特征,并用频谱分析的方法成功确定了旋转失速边界。

**关键词:**发动机;旋转失速;压力信号;频谱分析

**中图分类号:** V231    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1009-3516(2003)04-0005-03

某型在役轴流式单轴涡轮喷气发动机在小转速时喘振裕度过小,且消喘调节机构设计有先天不足,导致发动机极易进入喘振,严重危及飞行安全,解决这一问题的要求极为迫切。

压气机首先失速级旋转失速是发动机喘振的诱因。一个高效的消喘调节系统要求在旋转失速之初即能准确地捕捉到失速信号。现役作战飞机的消喘调节系统一般根据表征压气机喘振情况的一些参程序控制导流叶片安装角和(或)放气活门的开度<sup>[1]</sup>。就检测喘振信号而言,这是一种后期检测的方式,与检测旋转失速信号的方法相比,在时间上有较大滞后。

## 1 试验的简要情况

本文所分析的数据来源于文献[2]相同的试验。所用设备有:发动机试车台,1个 DAS-50 高速数据采集板,1台计算机,1个直流稳压电源(0~30 V 可调),7个动态压力传感器,2个3孔测压探针及双芯屏蔽线和其他连接器材。发动机是7级轴流式单轴涡轮喷气发动机,设计转速  $4\,700^{+25}$  r/min,消喘装置为放气带。

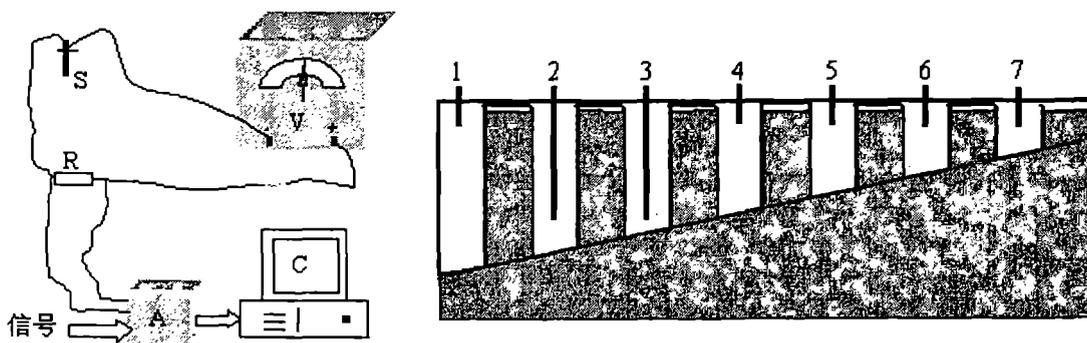


图1 测试系统传感器、探针安装位置及数据采集处理系统示意图

检测旋转失速压力信号的步骤分别为开车;手动关闭放气带;缓收油门至发动机喘振上限转速以上 20 r/min;启动数据采集系统;收油门直至发动机不稳定工作。

收稿日期:2002-06-18

基金项目:军队科研基金资助项目

作者简介:张 朴(1973-),男,四川汉源人,工程师,硕士生,主要从事航空发动机稳定性研究;  
李应红(1963-),男,重庆奉节人,教授,博士生导师,主要从事推进系统控制与可靠性研究。

## 2 检测数据的频谱分析

文献[2]指出,该型发动机的首先失速级是第三级,故本文对压气机第三级静子叶中的压力信号进行频谱分析。

### 2.1 压力信号的时-频分布

图2显示了压气机从正常状态进入旋转失速状态,然后退出旋转失速状态的压力信号(采样频率为10 kHz)。图2上是原始测量信号,图2下是经过滤波处理,所采用的滤波器是5阶的Butterworth滤波器,通带范围0~50 Hz,通带波纹小于3 dB,阻带为-30 dB。滤波器截止频率取50 Hz是因为该型发动机在喘喘时的旋转失速频率为27 Hz,而来自测量系统的干扰信号分布在50 Hz以上的频段<sup>[2]</sup>。滤波后的压力信号图清晰地显示出失速区有较大的低频压力脉动,且压力水平明显下降。

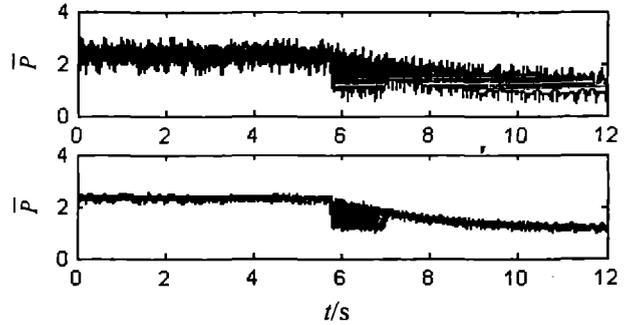


图2 滤波前后的压力测量信号图

由C. Freeman在Viper MK522型高速单轴轴流式涡喷发动机上所做的试验<sup>[3]</sup>和I. J. Day在剑桥4级轴流式压气机上所做的试验<sup>[4]</sup>表明,对于同一类型的压气机,失速团的旋转速度与失速时压气机的转速有一基本恒定的比例关系。对未经滤波的压力信号的频谱分析结果表明,在压力信号的频谱中,包含了强烈的27 Hz的频率分量,如图3所示。在所有17组测量数据中,喘喘时压气机进入失速时的转速都在3 600 r/min左右,检测到的失速起始时旋转失速频率均为27 Hz,即失速起始时失速团以压气机转速45%的恒定转速旋转。

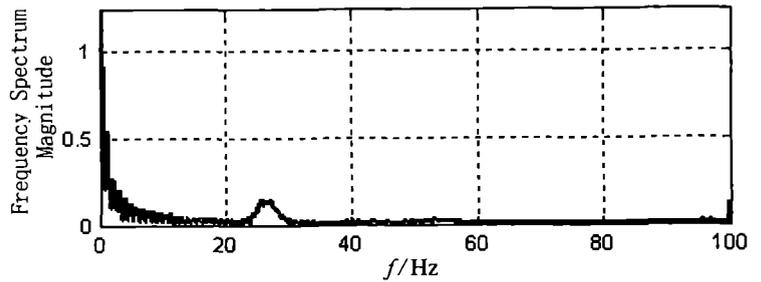


图3 压力测量信号的频谱图

### 2.2 未失速状态和完全发展的旋转失速状态压力信号的频谱特性

计算机作谱分析时,常用的傅里叶变换公式为 $X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{jn k \frac{2\pi}{N}}$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, n-1$ 。其中, $X(k)$ 为信号的离散傅里叶变换的第 $k$ 阶谐波的谱值, $k = 0$ 时对应信号的直流分量; $x[n]$ 为时域信号 $x(t)$ 的采样值。 $N$ 通常取为2的正整数次幂,可以利用基2的FFT(Fast Fourier Transform,快速傅里叶变换)获得较快的运算速度<sup>[5]</sup>。为确定压气机首先失速级在未发生旋转失速的正常状态和完全发展的旋转失速状态及二者相互转化的过渡过程的频谱特性,利用一个宽度 $\Delta w = 2^N$ 点, $N \in \mathbb{Z}^+$ ,步长 $h = 100$ 点(0.01 s)的滑动时间窗,从第1点开始,依次计算时间窗 $1 \sim \Delta w$ ,  $1+h \sim \Delta w+h$ ,  $1+2h \sim \Delta w+2h \dots$ 内 $2^N$ 个采样点的FFT,并绘制频谱特性曲线。根据所获得的曲线,可以观察到在典型的非失速区和完全发展的旋转失速区内压力信号频谱的明显差异。由图4( $N = 12$ )可见,压气机首先失速级未发生旋转失速时,压力信号几乎不包含27 Hz的频率分量。而压气机首先失速级进入完全发展的旋转失速状态后,27 Hz的频率分量激增。

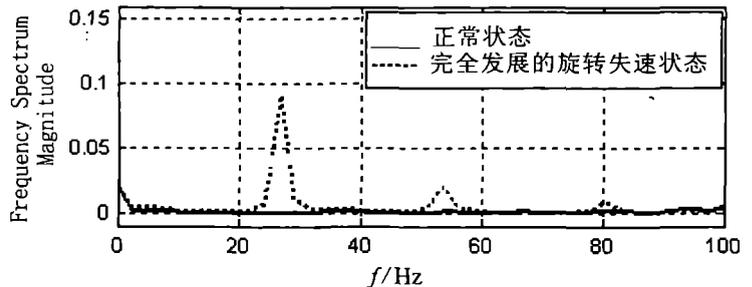


图4 正常状态和完全发展的旋转失速状态压力信号频谱特性

### 2.3 进入/退出旋转失速状态压力信号

#### 频谱的动态演化特性和旋转失速边界的确定

按2.2中的方法模拟了喘喘过程中压力信号频谱的动态演化过程。图5显示了演化过程中几个有代表

性的时间点的频谱。由图5可以明显看出,演化过程中各时间点压力信号低频频谱的差异主要表现在27 Hz频率分量的含量上。5.60 s以前,压力信号不包含27 Hz的频率分量,压气机首先失速级处于未失速工作状态。从5.76 s起,压力信号中27 Hz频率分量的含量开始增加,这标志着旋转失速的建立和迅速发展,首先失速级开始进入旋转失速状态。在6.52 s时首先失速级已处于完全发展的旋转失速状态。6.80 s~7.08 s的频谱图

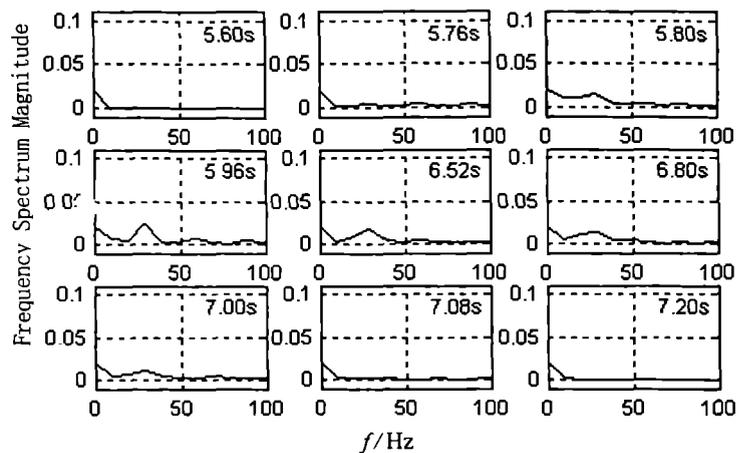


图5 旋转失速压力信号频谱的动态演进过程

显示旋转失速的退出以压力信号27 Hz频率分量的迅速减弱为标志。根据以上分析可判定对本组试验数据而言,旋转失速区间为[5.76, 7.08]s。由于所取的滑动时间窗步长 $h=100$ 点,在10 kHz的采样频率的前提下,这意味着所确定的旋转失速边界有小于0.01 s的滞后。减小步长 $h$ 可以减小失速边界的误差。对照图2滤波后的压力信号波形图,失速区间[5.76, 7.08]s恰好对应波形图中5.76~7.08 s的有较大压力脉动的区间。由此可见,由频谱的演化过程获得的失速边界与压力信号图反映出的失速边界相当吻合。

## 4 结论

频谱分析结果表明,该发动机压气机在喘振情况下首先失速级进入和退出旋转失速状态以压力信号在旋转失速频率27 Hz的频率分量的涨落为特征;完全发展的旋转失速包含强烈的27 Hz的压力信号分量。采用FFT可准确给出压气机首先失速级的失速边界。对压气机首先失速级旋转失速信号的早期检测是可行的。

将频谱分析的方法用于旋转失速信号的早期检测,需要设计一种可靠、快速的算法。如何实现这种算法,仍需进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 周宗才. 飞机推进系统控制[M]. 西安:空军工程学院,1997.
- [2] 姜涛,李应红. 某型发动机压气机最先失速级判定的试验研究[J]. 航空动力学报. 2002,17(1):80-82.
- [3] Day I J. Stall and Surge in Axial Flow Compressors[A]. Axial Flow Compressor Lecture Series[C]. Von Karman Institute for Fluid Dynamics,1992.
- [4] Freeman C. Stall in Axial Flow Aero Engine Compressors[A]. Axial Flow Compressor Lecture Series[C]. Von Karman Institute for Fluid Dynamics,1992.
- [5] 楼顺天,李博菡. 基于MATLAB的系统分析与设计——信号处理[M]. 西安:电子科技大学出版社,1998.

(编辑:姚树峰)

## Analysis of Rotating Stall Pressure Signal of a Certain Engine for Spectrum

ZHANG Pu, WEI Feng-tung, LI Ying-hong

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

**Abstract**·This paper, aiming at solving the surge problem of a certain engine on the active service, analyzes the spectrum of pressure signal measured from the starting stage resulting in rotating stall. The results of spectrum analysis show the dynamic evolving characteristics of the pressure signal spectrum under the conditions of normal state, entering and out of rotating stall states, and completely developed rotating stall state. And in this paper the boundary of rotating stall is successfully determined by adopting the spectrum analysis method.

**Key words**: engine; rotating stall; pressure signal; spectrum analysis