

文章编号: 1000-8055(2006)04-0754-5

基于小波分析的航空发动机旋转失速检测方法

谢 锋, 谢寿生

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要: 对试车检测到的压气机旋转失速压力数据, 进行了小波降噪处理, 并对处理后的数据进行多分辨率分析, 利用 dN 层小波系数重构相关频带内的压力信号分量, 当重构信号某处的幅值超过给定阈值时, 认为检测到了失速。研究表明, 小波分解能有效地区分信号中的突变部分和噪声, 达到降噪的目的; 对不同采样频率的压力数据进行分析, 给出了相应的阈值, 对 dN 层重构信号进行监测, 能有效检测到旋转失速的发生。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 旋转失速; 小波分解; 多分辨率分析

中图分类号: V263 45

文献标识码: A

Detection of rotating stall in aircraft engine based on wavelet analysis

XIE Feng, XIE Shou-sheng

(Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Stalled pressure data in compressor was de-noised by wavelet analysis and then resolved with multi-resolution analysis. The pressure signals in related frequency band were reconstructed by the wavelet coefficient in dN level. Rotating stall was considered to be examined out when the amplitude of the reconstructed signals was somewhere beyond the given threshold value. The results show that it is effective to identify the peak signal and noise by wavelet decomposition. Different threshold values are given with different sampling frequencies. By monitoring the dN level of the reconstructed signals, rotating stall can be detected.

Key words: aerospace propulsion system; aircraft engine; rotating stall; wavelet decomposition; multi-resolution analysis

轴流式压气机的旋转失速问题一直是发动机稳定性研究中的重要问题, 这一问题尚未得到根本的解决, 甚至对失速的本质机理也还没有得到完全一致的认识。随着对新一代飞机的超机动性、高推重比、超音速巡航等任务的要求, 从而对推进系统稳定性的要求也在不断提高。

目前, 在旋转失速先兆的定义上, 仍是以 Moore-Greitzer 的一维模型为基础。Fourier 变换在信号处理中是应用最广泛、最成功的分析方法。

但是 Fourier 变换对信号处理后得到的结果没有时间信息, 对高频段的细化分析难以实现, 并且它不能区分哪些是表现突变部分的有用的高频量, 哪些是属于噪声的无用的高频量^[1]。因此, 基于 Fourier 变换的谱分析主要适用于平稳信号。小波分析是在 20 世纪 80 年代后期从信号领域发展起来的, 为一种新兴的数学理论和方法已形成完整的理论, 已经在非线性科学、信号处理、逼近论、故障诊断方面取得巨大突破。小波分析的优

点在于它在时域和频域内同时具有良好的局部性质,既能在足够的时间分辨率前提下对信号的短时高频成分进行分析,又能在很好的频率分辨率下对信号的低频进行估计^[2]。本文通过对压气机压力数据进行小波分解,利用 dN 层小波系数重构相关频带内的压力信号分量,当重构信号某处的幅值超过给定阈值时,认为检测到了失速。

1 旋转失速的检测方法

1.1 数据的采集

本文采用文献[4]提出的方法采集数据,实验设备包括:发动机试车台,1 个 DSA-50 高速数据采集板采集数据,1 台计算机用来存储数据,7 个动态压力传感器,2 个 3 孔测压探针,该测压探针可同时获取叶根、叶中及叶尖压力数据,传感器及探针实验时固定,一台 7 级轴流式单轴涡喷发动机,其设计转速为 4 700 r/min,消喘装置为放气带。在保证强度和密封性的条件下,在上下机匣的一侧安装边上打 7 个孔,将 7 个动态压力传感器或测压探针安装到相应的 7 级静子叶片间,测量静子导流叶片之间的压力变化。如图 1 所示,1,4~ 7 安装动态压力传感器,2 和 3 安装三孔探针以测量叶尖、叶中部及叶根部的压力变化^[3]。

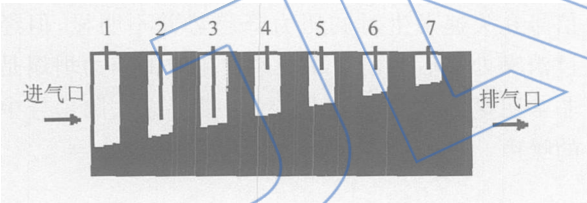


图 1 传感器和探针安装示意图

Fig. 1 Layout of probes and sensors

1.2 数据的预处理

发动机压气机静子叶片间的压力 p 主要由 3 部分组成,前面各级增压 p_0 ,由测量噪声引起的压力脉动 p_n ,以及在失速时由失速团引起的压力脉动 p_s ,即:

$$p = p_0 + p_n + p_s$$

p_0 是由发动机转子对气体做功得到的,其频率与发动机转子频率相等; p_n 是由测量噪声引起的,属于高频分量; p_s 是由失速团引起的压力脉动,其频率为转子频率的 40% ~ 60% 之间,是低频信号。3 种压力分量混在一起,利用时域内的波形分析方法是很难将它们分开的,尤其是在失速发生的开始阶段,相对于噪声信号,失速信号是比较

微弱的。因此,原始数据的预处理在研究失速信号的分析中显得极为重要^[4]。

2 基于小波理论的分析方法

2.1 小波逼近与多分辨分析

小波逼近(Wavelet Approximation)是小波分析领域的重要分支。David L Donoho 和 Johnstone I 提出用小波收缩的方法从带有噪声的采样数据中估计一维未知的非线性函数,这标志着小波分析用于非线性函数逼近的开始。之后,Delyon B, Juditskey A 等人指出了用符合框架性条件的小波基函数对非线性高维函数进行估计是一致收敛的,从理论上证明了小波估计的准确性。

多分辨分析(Multi-resolution Analysis)就是信号在不同尺度下的小波变换反映了信号在不同尺度空间中的信息,通过变换尺度,可得到具有多分辨分析的信息表达,有利于更深入了解信号特征。多分辨分析只对低频空间进行进一步分解,可以使低频频率的分辨率变得越来越高。频率内的多分辨分析实质上描述了小波的分频性能。

输入信号可以分解为两部分,如图 2 所示。第一部分被称为输入信号的逼近信号 A ,这一部分可看作小波变换时的低通滤波器,它包含了正常的结构频率和一些被削弱的噪声信号;第二部分称为输入信号的细节信号 D ,它可看作小波变换时的高通滤波器。按小波变换理论,近似信号代表了信号高尺度低频率部分,细节信号代表了同一信号低尺度高频部分的内容。

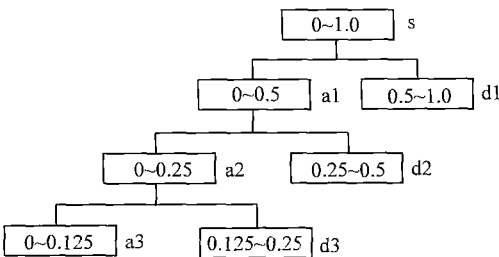


图 2 多分辨分析结构图

Fig. 2 Multi resolution analysis structure

对于嵌套的子空间 A_n ,它由标准正交基 $\Phi_k(t), k \in Z$ 构成多分辨空间。子空间 D_n ,由标准正交基 $\psi_{nk}(t), k \in Z$ 构成。

$$A_n \oplus D_n = A_{n-1} \tag{1}$$

对给定的参考尺度 N ,信号 $f(t)$ 的逼近信号可表示为:

$$f(t) = A_N + \sum_{n \in N} D_n \tag{2}$$

本文选择 Daubechies 8 小波进行多分辨率分析,因为比起其他 Daubechies 小波, Daubechies 8 小波具有更好的局部化特征,对于短而快的瞬态信号是一种很好的分析方法,并且它具有更好的重构能力^[1,5]。

2.2 小波去噪

通过小波分解,就可以进行信噪分离。实际应用中,有用信号通常表现出低频信号或一些比较平稳的信号,而噪声信号则通常表现出高频信号。而对于非平稳信号,除了含有非常有用的低频信号外,其突变部分通常反映了检测对象的某些重要特征,含有较丰富的高频信号。因此,对非平稳信号作滤波预处理,既要消掉噪声所表现的高频信号,又要保留那些反映信号突变部分得高频部分。与传统的滤波技术相比,采用正交小波分解能有效地区分信号中的突变部分和噪声,达到消噪预处理的效果^[6]。

假定带噪声信号:

$$y_i = f_i + e_i \tag{3}$$

其中 e_i 为高斯白噪声,即 $e_i \sim N(0, \sigma^2)$ 。令 f_i 为 f_i 的估计信号,构造估计模型的均方差为:

$$E \|f - f\|^2 = \sum E (f_i - f_i)^2 \tag{4}$$

小波去噪模型可描述为:

- (1) 计算信号 y_i 的小波系数;
- (2) λ 的计算:

$$\lambda = \sqrt{2 \lg n} \tag{5}$$

式中: n 为输入样本的长度。

$$\eta_\lambda = \begin{cases} \text{sign}(y)(|y| - \lambda) & |y| \geq \lambda \\ 0 & |y| < \lambda \end{cases}$$

把代入式(3)得。

(3) 对 θ 进行重构,得到 $f(t_i)$ 的估计值 $f(t_i) = W^T \theta$, W 为小波分解算子。

2.3 失速判据

选择适当取样周期 T , 在一个周期内,对 dN 层小波系数 C , 记录下最大值 $C_{\max}$ 及最小值 $C_{\min}$, 当 $C_{\max} - C_{\min} \geq C_{\text{thr}}$ (C_{thr} 为给定阈值) 时,认为检测到了失速。本文中取 $C_{\text{thr}1k} = 0.14$, $C_{\text{thr}5k} = 0.1$, $C_{\text{thr}10k} = 0.06$, $C_{\text{thr}k}$ 表示采样频率为 1 k 时的阈值。由于本实验的采样频率仅为 1 k , 5 k 和 10 k , 阈值 C_{thr} 与采样频率是否存在一定的函数关系还有待进一步研究。

3 试验分析

数据源于 1999.06~1999.07 的实验,实验测试了多组 WPX 发动机压气机级间数据。在实验中,关闭放气带逼喘,当发动机声音由尖锐的哨声转为较强的低沉声时(进入旋转失速),收油门停车退出旋转失速^[3,4]。

图 3 是第 2 级叶片叶尖数据的原始数据和消噪处理后的数据对比图。从图中可以看出,原始信号在失速发生时的压力降趋势并不明显,但经过消噪处理后的信号在失速发生时的压力坍塌是非常明显的。这说明小波变换能显著去除信号中的噪声。

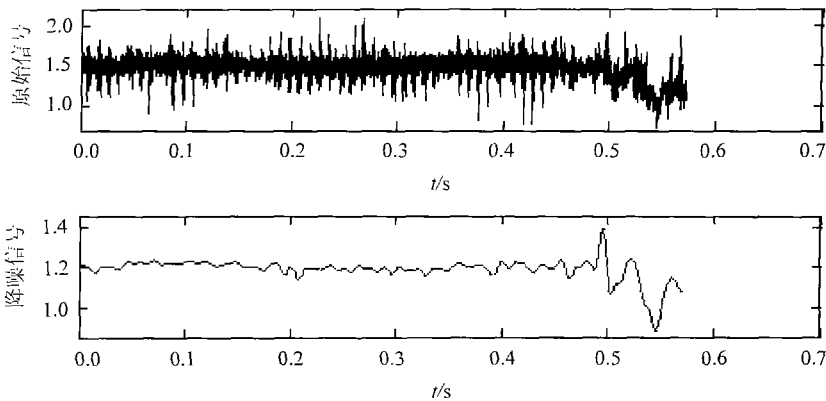


图 3 原始信号与降噪信号对比图

Fig. 3 Comparison between the original and denoised signal

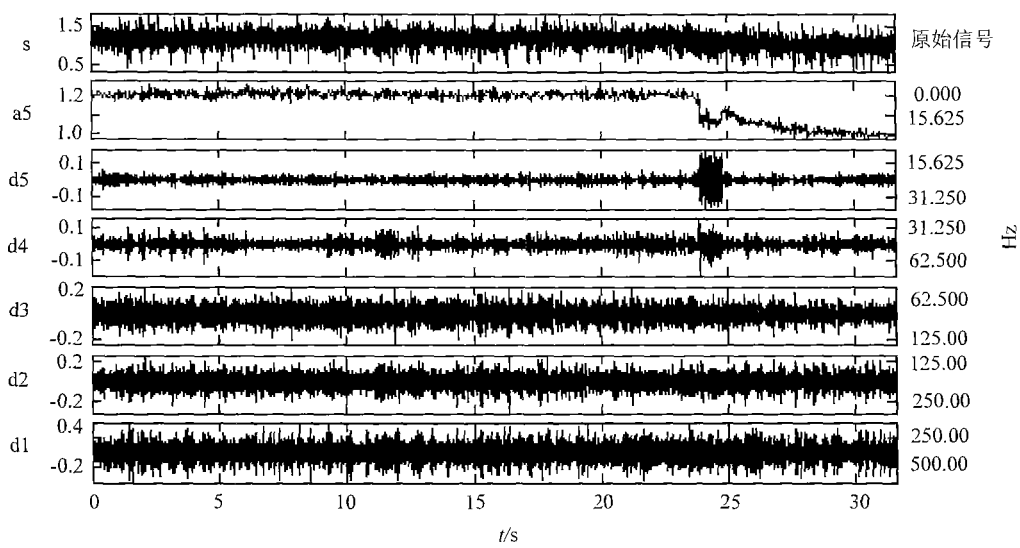


图 4 第 2 级压力数据的多分辨分析
Fig. 4 Multi resolution analysis of stage 2

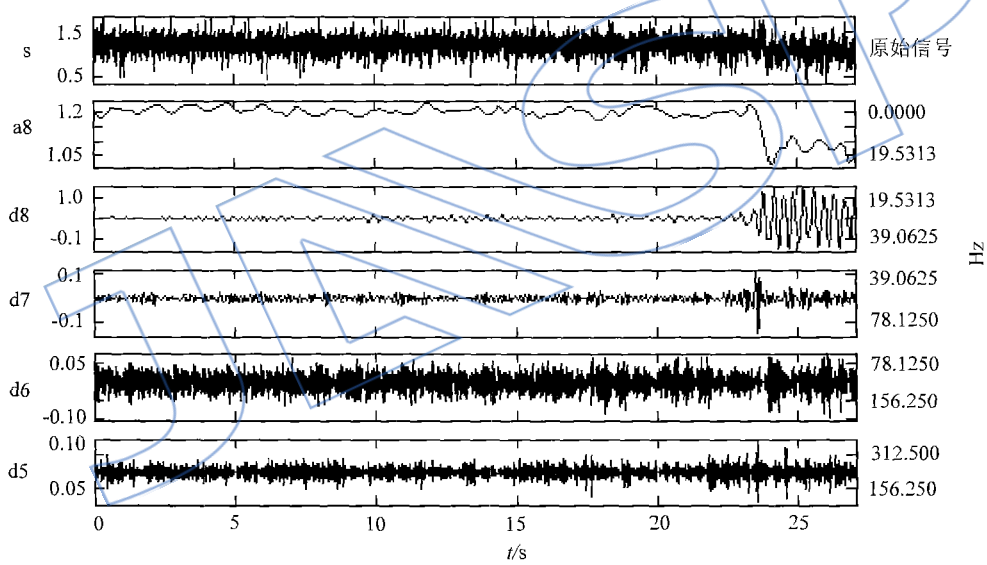


图 5 第 3 级压力数据的多分辨分析
Fig. 5 Multi resolution analysis of stage 3

对检测到的信号进行多分辨分析, 所用数据为收油门逼喘第 2 级叶片叶尖数据, 采样频率为 1 kHz。为方便分析, 取其中的一段数据, 多分辨分析结果如图 4 所示。

从图中可以看出, 在原始信号图上很难确定发动机最先失速的确切时刻, 但通过对压力数据的多分辨分析, 其中 d1~ d5 为细节信号重构, 从 d5 可以看出, 在开始记录数据后的 23.66 s 时刻能明显检测到压力的突变, 此时对应的频率在 15.625~ 31.25 Hz 范围内, 而失速围绕周向旋转

的频率(25~ 27 Hz) 正好在该范围内。因此, 从细节信号 d5 的第一次突变点, 可以认为压气机发生了失速。

同理, 对第 3 级叶片叶尖数据进行的分析, 其采样频率为 10 kHz, 如图 5 所示, d1~ d4 细节信号未给出, 从 d8 可以看出, 在第 22.99 s 可以检测到压力的突变, 其对应频率为 19.5313~ 39.0625 Hz, 失速围绕周向旋转的频率(25~ 27 Hz) 也处在该频率范围内, 对其它数据进行分析可以得到同样的结论, 从而证明了该方法的有效性。

4 结 论

本文利用小波分析对发动机失速检测数据进行了分析,利用小波分解对原始数据进行了降噪处理,结果表明该方法能有效去除信号中的高频噪声,提高了检测速度,增加了检测的准确性。通过对压力数据进行多分辨分析,利用 dN 层小波系数重构相关频带内的压力信号分量,能够对发动机失速信号进行有效检测。

致谢 感谢博士生张朴提供的压气机失速实验数据。

参考文献:

[1] 李美林,张春梅,王尚锦,等.用小波和分维数方法处理喘振实验数据[J].工程热物理学报,2002,2(32):175-176.
Li Meiling, Zhang Chunmei, Wang Shangjin, et al. Surge data processing based on wavelet analysis and fractal method [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2002, 2(32):

175-176.
[2] Yen Gary G, Lin Kuochung. Wavelet packet feature extraction for vibration monitoring[J]. *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 2000, 4(3): 653-655.
[3] 姜涛,李应红,李军.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):80-81.
Jiang Tao, Li Yinghong, Li Jun. An experimental research on identification of the first stall stage of a certain engine [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2002, 17(1): 80-81.
[4] 张朴.轴流式压气机失速检测研究[D].陕西西安:空军工程大学工程学院,2003.
[5] 张光莹,邓正隆.小波分析在系统辨识中的应用[J].电机与控制学报,2002,6(1):65-66.
Zhang Guangying, Deng Zhenglong. Application of wavelet analysis in system identification[J]. *Electric Machine and Control*, 2002, 6(1): 65-66.
[6] 石博强,申焱华.机械故障诊断的分形方法—理论与实践[M].北京:冶金工业出版社,2002.
[7] 徐长发,李国宽.实用小波方法[M].第2版.湖北武汉:华中科技大学出版社,2004.