

文章编号: 1000-8055(2006)02-0361-05

某双转子发动机冲击振动的分频小波 提取与故障分析

何卫锋, 程 礼, 李应红

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 采用小波-时频方法对某双转子发动机地面实测数据进行了分析, 得到了试车过程中系统在不同工作状态下振动的时频特征。在振动能量的时频分布图中, 不同的频率区间内含有不同的冲击成份; 在此基础上对信号在不同的频带进行谐波小波包分解, 分解信号能量主要集中在某一个频带范围内, 进一步分析可以确定系统滚动轴承失效模式。

关键词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 时频分析; 振动; 谐波小波

中图分类号: V 233. 45

文献标识码: A

Wavelet Extraction of Impact Vibration Frequency Component and Fault Analysis for a Twine Spool Aero-Engine

HE Wei-feng, CHEN G Li, LI Ying-hong

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

Abstract Noise and weak symptom give rise difficulties to aero-engine vibration monitoring and faults diagnosis. The conventional methods in time or spectrum domain are not so effective for it is hard to detect some kinds of fault symptoms. After measuring the data in an aero-engine on the ground, its time-frequency characteristics under different working conditions were analyzed. First, the signals were analyzed using Morlet wavelet and then the frequency component could be extracted from their time-frequency plane. Some impact components were obvious in the time frequency plane which indicated that some faults might occur in the rotor system. They were located in the band of bearing characteristic frequencies. Second, the signal was decomposed using hamonic wavelet whose resolving capability is high in both time and frequency domain in the bearing characteristic frequencies. Then the components of different frequencies were obtained by hamonic wavelet. Energy of the signal was concentrated in some frequency band. From these results of the hamonic wavelet analysis in the bearing characteristic frequencies, the kind of fault can be determined easily.

Key words aerospace propulsion system; aero-engine; time-frequency analysis; vibration; hamonic wavelet

收稿日期: 2005- 03- 18; **修订日期:** 2005- 09- 18

作者简介: 何卫锋(1977-), 男, 湖南桃江人, 空军工程大学工程学院一系发动机教研室博士生, 主要从事航空发动机振动测试与故障诊断研究

采用时频分析的方法可以知道频率成分怎样随着时间而改变,和 FFT 相比,它能提供更加有用的时频信息^[1]。近年来提出了多种不同的方法,如: STFT^[2]、Wigner-Ville 分布(WVD)^[3]和小波分析(WA)^[4]等。这些分析能将一维的非平稳信号分解到二维时频域上,将信号位于不同时间的频率成分直观地显示出来。

对 STFT,其时域和频域的分辨率由所选择的分析窗口确定,而窗的宽度是不变的,其时频域的分辨率始终是一个常数。WVD 将 FFT 和自相关结合,它能提供信号在时频域的能量分布。然而,WVD 在时频图上出现了负值,其结果有时难于解释^[3]。小波分析作为一种新的时频分析方法,它可以分析稳态和非稳态信号,在很多领域都得到了广泛的应用。

振动分析是判断航空发动机运行状态是否正常的一般手段,但航空发动机结构复杂,工作过程多变,常见的就有起动、慢车、巡航、最大、小加力和全加力等工作状态;可能发生的故障模式众多,也可能在不同的频带范围内出现不同的故障模式。因此,从发动机测得的数据一般是非稳态的,传统的 FFT 分析显然很难揭示有用的信息。另外,对基于振动分析的机械设备故障诊断而言,在时频域的多分辨率分析是尤其重要的,在这方面小波变换的多分辨率分析就显示出优势来^[5]。

本文采用小波时频分析的方法,对某航空发动机实测数据进行了分析,发现其在不同的频率范围内含有不同的冲击成份;然后采用谐波小波包对不同的频带进行分解后,成功地得到了其故障特征,正确地判断了故障。

1 小波时频分析和谐波小波包分解

小波分解将信号分解成“小波”之和,他们是时域紧支且具有一定的带宽,其时域和频域的分辨率随着小波的尺度发生改变,能对信号进行多分辨率分析^[5]。

设信号 $x(t) \in L^2(R)$, $x(t)$ 关于母小波 $\psi(t)$ 的连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

其中, $a > 0$ 为尺度因子, b 为位移,其值可正可负。 $\psi^*(t)$ 是母小波 $\psi(t)$ 的共轭,由于需要良好的时间和频率定位,本文采用 Morlet 小波对信号进行分析,它是高斯包络下的复正弦函数。

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{-t^2/2} e^{im t} \quad (2)$$

由 Morlet 小波的时域波形和频谱图可知,小波函数在时域和频域内不是无限的,若小波函数满足窗口函数的要求^[5],对于较小的尺度因子 $a > 0$,在时间域内,其窗口宽度变小,而中心频率增加,高频信号能够检测到;反过来, $a (> 0)$ 较大时,时间域内窗口增宽,而中心频率降低,能检测到低频成分。这正是小波时频分析的优点,能对不同的频率采用不同的分辨率,充分挖掘信号的信息。

Newland D E 根据尺度增加时小波函数的频域紧支性能越来越好的特征,提出了谐波小波理论^[6,7]。谐波小波具有盒状的频谱,其表达式为:

$$W_{m,n,k}(\omega) = \begin{cases} \frac{e^{-ik\omega/(n-m)}}{(n-m)2\pi} & m2\pi \leq \omega \leq n2\pi \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3)$$

其时域表达式为:

$$W_{m,n,k} \left(x - \frac{k}{n-m} \right) = \frac{e^{im2\pi \left\{ x - \left[\frac{k}{(n-m)} \right] \right\}} - e^{in2\pi \left\{ x - \left[\frac{k}{(n-m)} \right] \right\}}}{i2\pi(n-m) \left(x - \frac{k}{n-m} \right)} \quad (4)$$

其中, m, n 相当于小波分析中的尺度因子, k 相当于位移因子 b 。

谐波小波具有显著的优点,首先它是复小波,具有实部和虚部,所以无论信号的谐波频率成分的相位如何,经小波变换后均可得到各个谐波频率成分,具有相位的锁定功能;另外由于谐波小波的具有良好的滤波性能,使得其他的频率成分在变换后被屏蔽,只有所分析频段的频率成分才能通过。由于谐波小波没有尺度函数,因此不能采用 Mallat 算法对信号进行分解。由 m 和 n 的可调性,可以将信号分解到所需的频带内,这样不仅可以有良好的滤波效果,而且信号在小波变换后,在各个频带中仍然具有与原信号相同的频率分辨率,分解后的点数不减少,克服了 Mallat 算法小波包分解的问题。

2 发动机振动信号的时频分析

图1和图2为某航空发动机某轴承附近测量点的实测数据和频谱图。从图2中可以看到信号中存在低压转子工作频率及其倍频,而且具有丰富的高频谱线。但是,不管从时域信号还是频域信号,尤其是在轴承的特征频率范围内(1 200~2 200 Hz),都很难得到系统的故障特征。

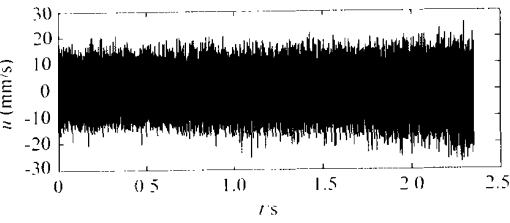


图1 振动实测数据

Fig 1 The vibration signal from an aero-engine

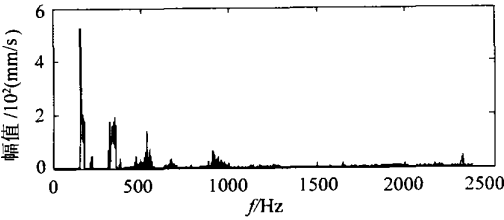


图2 某状态下实测数据的频谱

Fig 2 Spectrum of the vibration signal

图3和图4是两个不同工作状态下, 航空发动机该测点振动信号某一时间段的小波时频分布图。在图3、图4中的低频具有连续能量成份, 这主要是由于发动机基频振动。而在1 200~ 2 000 Hz 的高频范围内出现了基本上等时间间隔的能量成份, 其持续时间短, 频率范围广, 图4中发动机高频振动能量更加集中, 振动更加剧烈, 但是振动的冲击成份仍然十分明显。高频振动的时频分布没有一般高频噪声的特征, 说明系统有可能出现了故障。但是具体是何种故障仍需要进一步进行分析。

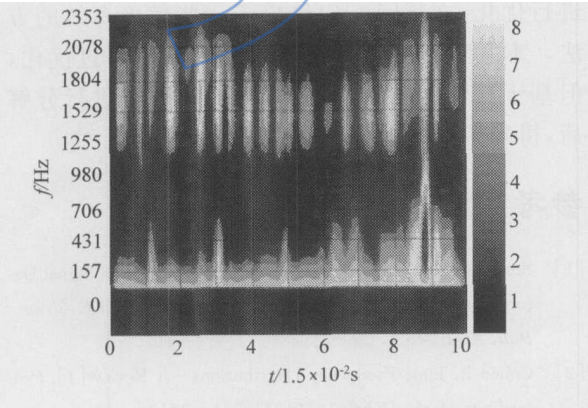


图3 状态 a 时信号连续小波时频图

Fig 3 Time-frequency decomposition of the vibration signal at state of a

下面将对图3对应的信号进行谐波小波分解, 提取故障的特征。

3 振动信号的谐波小波包分解

在发动机工作时, 比较常见的产生冲击振动的原因有转子碰磨和轴承故障。当航空发动机发生局部轻微摩擦时, 冲击性很突出, 此时, 出现特征频率为转子频率或者倍频, 这一般都是低频的, 图3、图4中可以看到在低频范围内存在几个明显的冲击, 其周期和转子的转动周期一致, 说明主要原因是转子存在轻微的碰磨。

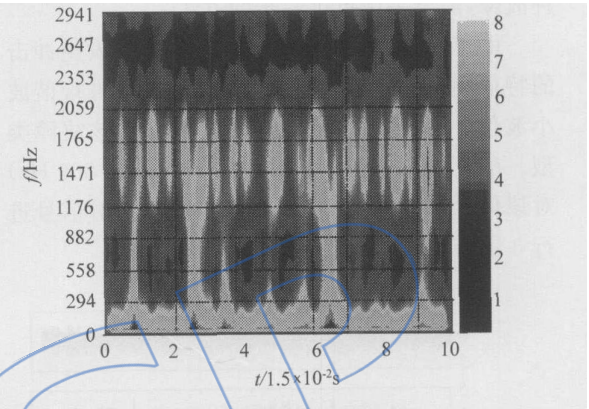


图4 状态 b 时信号连续小波时频图

Fig 4 Time-frequency decomposition of the vibration signal at state of b

在振动信号时频图中, 出现了高频的冲击振动, 频率范围从1 100 Hz 到2 100 Hz。而在频谱图中该范围的谱线很少, 振动的能量很小, 很难得到有用的故障信息。

轴承的外滚道, 内滚道, 滚动体和保持架都很容易发生故障, 在轴承特征频率上产生一系列的冲击振动。由于这些冲击振动的能量很小, 常常被噪声和结构的其它振动所掩盖, 在采用常规的FFT 分析振动信号时, 一般难以在频谱图上找到相应的谱成分。

而轴承的特征频率可以根据下式计算^[8]:

外圈损伤时:

$$F_o = \frac{n_b f_r (1 + \frac{d \cos \beta / D}{2})}{2} \quad (5)$$

内圈损伤时:

$$F_I = \frac{n_b f_r (1 - \frac{d \cos \beta / D}{2})}{2} \quad (6)$$

滚动体损伤时:

$$F_R = \frac{D f_r (1 - \frac{d \cos \beta / D^2}{d})}{d} \quad (7)$$

式中: f_r 内外滚道相对旋转频率, n_b 滚动体个数, β 接触角, d 滚动体直径, D 轴承节圆直径。这些公式是在纯滚动的假设下得到的, 在实际中不可

避免地存在滑动,所以上面的式子只能用来估算其特征频率。根据测点附近轴承的结构,其特征频率为: $F_o = 2\ 060 \sim 2\ 210\ \text{Hz}$, $F_i = 1\ 603 \sim 1\ 780\ \text{Hz}$, $F_R = 1\ 298 \sim 1\ 369\ \text{Hz}$ 。相应的时间间隔为: $t_o = 0.452 \sim 0.485\ \text{ms}$, $t_i = 0.562 \sim 0.624\ \text{ms}$, $t_R = 0.073 \sim 0.077\ \text{ms}$ 。

当轴承出现故障时会出现能量冲击,因此在高频区出现能量集中的条带。通过观察高频区(轴承的激振区)能量可以证明故障出现。但到底是何种故障,需要采用更进一步的方法。

由于已经知道了系统由于轴承故障发生冲击的特征频率,因此对图3状态下的信号进行谐波小波包分解^[9],希望在该频带内能识别该故障类型。在轴承的特征频率范围内($1\ 200 \sim 2\ 800\ \text{Hz}$)对该信号进行谐波小波包分解,图5为对信号进行3层谐波小波分解的结果图。

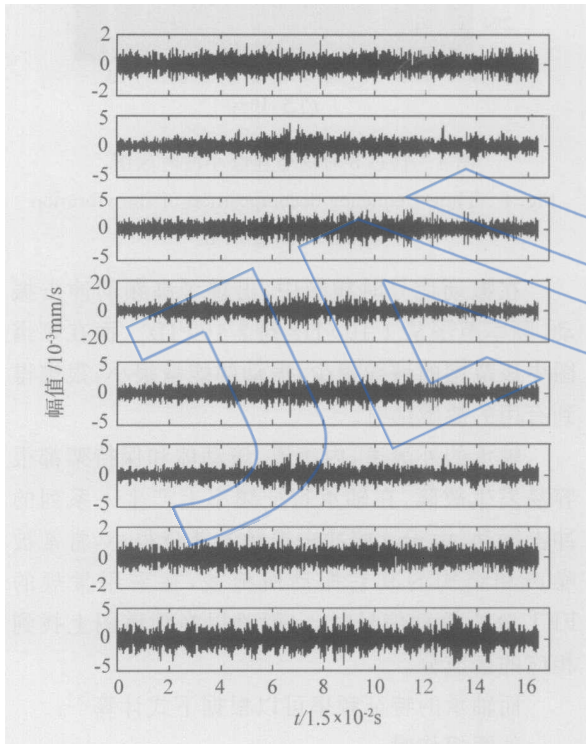


图5 状态 a 状态下信号的谐波小波包分解

Fig 5 Harmonic wavelet packet decomposition for the signal at the state of a

从图中可以明显看到明显的冲击现象,且能量大部分都集中在第四频带。将第四频带(频率范围为 $1\ 600 \sim 1\ 800\ \text{Hz}$)的分解信号局部进行放大,如图6所示。

由(3)式可知,谐波小波具有盒状的频谱,是理想的滤波器,对信号的谐波小波包分解能较大限度地滤除噪声,有较强的抗噪性能。

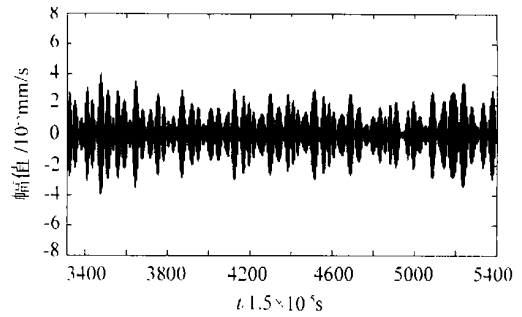


图6 谐波小波分解第4频带放大图

Fig 6 Detailed figure for the forth band

根据对第四频带进行分析,可确定其冲击发生的时间间隔大约为 $0.58\ \text{ms}$,结合式(5~7)对轴承特征频率的估算,内滚道磨损时冲击运动的周期为 $0.562 \sim 0.624\ \text{ms}$,因此可以判断其故障为内滚道磨损。这 and 实际检验结果一致,说明了该方法的有效性。

4 结 论

在分析航空发动机振动时,连续小波时频分析和谐波小波包分解能合理地分析其中的冲击成分。采用时频分析的方法容易确定振动能量在时间-频率平面上的分布,为故障的分析打下基础;而谐波小波对信号的分解继承了小波分析的优点,时频分解更加灵活,不受二进限制,通过 m 和 n 的调节,可实现任何频带的分解,算法简单,有利于快速准确地诊断故障。

采用小波时频分析时,为了适合所分析的问题,具有较高的分辨率,必须对小波函数及其参数进行优化,文献[10]中给出了一些简单有效的方法。本文采用的Morlet小波虽然没有经过优化,但基于其优良的时频性能,对振动信号进行分解后,得到了较好的结果。

参考文献

- [1] Stephane G Mallat A Theory for Multi-Resolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation [J]. IEEE, Trans Patt Anal Mach. Intell, 1989(11): 674~693.
- [2] Cohen L. Time-Frequency Distributions- A Review [J]. Proceedings of the IEEE, 1989(77): 941~981.
- [3] Neild SA, McFadden PD, Williams M S A Review of Time-Frequency Methods for Structural Vibration Analysis [J]. Engineering Structures, 2003(25): 713~728.
- [4] Newland D E. An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis [M]. Longman Scientific & Technical, 1993.
- [5] Daubechies I The Wavelet Transform, Time-Frequency

- Localization and Signal Analysis[J]. *IEEE*, 1990, 36 (5): 991~1006
- [6] Newland D E. Wavelet Analysis of Vibration, Part 1: Theory [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1994 (116): 409~416
- [7] Newland D E. Wavelet Analysis of Vibration, Part 2: Wavelet Maps[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1994 (116): 417~425
- [8] Peter W Tse, Peng Y H, Richard Yam. Wavelet Analysis and Envelope Detection for Rolling Element Bearing Fault Diagnosis-Their Effectiveness and Flexibilities[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2001 (123): 303~310
- [9] 李宏亮, 黄润华, 韩国明, 傅汝楫. 谐波小波的时频特性分析及其在故障诊断中的应用[J]. *机械强度*, 2000, 22: 81~85
- L I Hong-liang, HUANG Run-hua, HAN Guo-ming, FU Ru-ji. Analysis of Time-Frequency Characteristics of Harmonic Wavelet and Its Application in Fault Diagnosis[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2000, 22: 81~85
- [10] Tse P, Xu G, Qu L, Kumara S. An Effective and Portable Electronic Ear for Fault Diagnosis Using Machine Operating Sound Directly [J]. *International Journal of Acoustics and Vibration, an Affiliated Journal of the Institute of Acoustics and Vibration*, 2000 (6): 23~31.