

基于小波的周期信号中瞬态冲击特征提取*

哈尔滨工业大学 杨建国* 夏松波 须根法

【摘要】 小波变换具有优良的时频分析特性, 利用小波变换提取周期信号中的微弱瞬态冲击非常有效。为了消除 MALLAT 算法中的频率混淆, 本文提出了一种改进的二进离散小波变换快速算法, 并成功地利用小波变换提取了某型涡喷发动机滚珠轴承的早期故障特征, 实现了傅立叶变换所达不到的效果。

主题词: 变换 信号 故障诊断

分类号: V231.92

1 小波变换的基本概念

“小波”(Wavelet)作为一种近年来发展起来的数学理论和分析方法正在引起科学技术界广泛的注意^[1]。它已成为许多科学与工程领域的一个非常广泛、非常流行的话题。在数学领域, 它是泛函分析、傅立叶(Fourier)分析、样条分析、调和分析、数值分析的完美结合; 在工程应用领域, 其研究遍及信号处理、故障诊断^[2,3]、图像处理、语音分析、模式识别、量子物理等许多领域中, 被认为是近年来在工具和方法上的巨大突破。

信号 $f(t)$ 的小波变换定义为:

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

小波反变换为:
$$f(t) = \frac{2}{C_{\psi}} \int \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} (W\psi f)(b, a) \left[\frac{1}{a} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \right] db \right\} \frac{da}{a^2} \quad (2)$$

令:
$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{|a|^{1/2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3)$$

称 Ψ 为母小波, Ψ_{ab} 为小波基。

构造出的基本小波 Ψ 需满足如下允许性条件(Admissible Condition):

$$C_{\psi} = \int |\omega|^{-1} |\hat{\Psi}(\omega)|^2 d\omega < \infty \quad (4)$$

2 小波变换的时频分析特性

式(1)中 a 是表征频率的参数, b 是表征时间或空间位置的参数。

假定 t^* 和 ω^* 分别表示 Ψ 的时间窗和频率窗的中心, $\Delta\psi$ 和 $\Delta\hat{\psi}$ 分别表示 Ψ 的时间窗和频率窗的半径, 则小波变换 $(W\psi f)(b, a)$ 将信号 f 限制在时间窗 $[b + at^* - a\Delta\psi, b + at^* + a\Delta\psi]$ 和频率窗 $[a^{-1}\omega^* - a^{-1}\Delta\hat{\psi}, a^{-1}\omega^* + a^{-1}\Delta\hat{\psi}]$ 之内。时间窗的中心在 $b + at^*$, 窗宽为 $2a\Delta\psi$; 频率

窗的中心在 ω^*/a , 窗宽为 $2\Delta\omega/a$ 。当尺度增加时, 时间窗变宽, 而频率窗变窄, 适合于提取多成分信号中的低频成分; 当尺度减小时, 时间窗变窄, 而频率窗变宽, 适合于提取多成分信号中的高频成分。因此, 小波变换既具有时间局部化能力, 又具有频率局部化能力。

旋转机械, 当发生类似轴承等瞬态冲击故障时, 检测到的振动信号频率成分很丰富, 但冲击很小时, 从波形及频谱上往往很难看得出。小波变换在这一方面的作用非常突出。

3 小波变换的快速算法

在工程应用中, 多采用二进离散小波变换, 并有快速算法—MALLAT 算法^[4~7], 由正交镜像滤波器 h, g 和 H, G 对信号进行分解和重构。分解公式为:

$$A_0[f(t)] = f(t)$$

$$A_j[f(t)] = \sum_k h(k-2t)A_{j-1}[f(t)] \quad , \quad D_j[f(t)] = \sum_k g(k-2t)A_{j-1}[f(t)] \quad (5)$$

式中: $t=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, J, J=\log_2 N$ 。通过(5)式的分解, 在每一尺度 2^j 上, 信号 $f(t)$ 被分解为近似部分 A_j (即低频部分) 和细节部分 D_j (即高频部分)。

$$\text{重构公式为: } A_j[f(t)] = 2 \left\{ \sum_k H(t-2k)A_{j+1}[f(t)] + \sum_k G(t-2k)D_{j+1}[f(t)] \right\} \quad (6)$$

式中: $j=J-1, J-2, \dots, 1, 0$ 。

MALLAT 算法的框图如图 1 所示。图中 $\boxed{g}, \boxed{h}, \boxed{G}$ 和 $\boxed{H}$ 分别表示 g, h, G 和 H 的卷积, $\boxed{\uparrow 2}$ 表示隔点采样, $\boxed{\downarrow 2}$ 表示隔点插零。

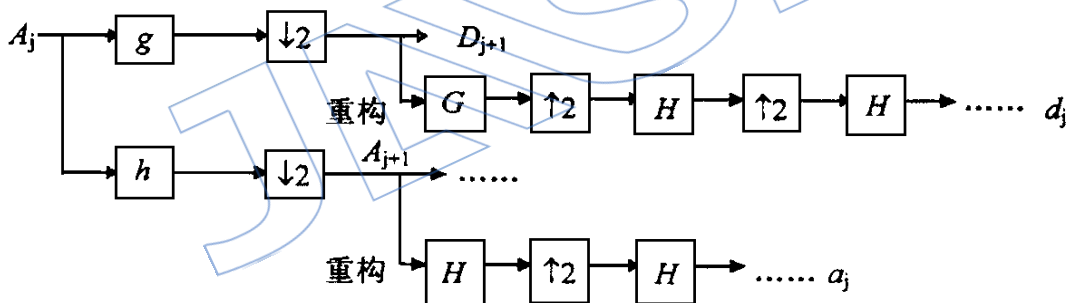


图 1 MALLAT 算法框图

作者经研究发现, MALLAT 算法存在频率混淆, 其结果不同于小波包分解中的频带混淆^[8]。信号中的频率成分愈多, 混淆愈严重。MALLAT 分解算法和重构算法中有 3 个关键步骤: (1) 与正交镜像滤波器卷积; (2) 隔点采样; (3) 隔点插零。这 3 个步骤均产生频率混淆。

正交镜像滤波器并非理想的滤波器, 由图 2 可见, 正交镜像滤波器 h (或 H, h 和 H 频域特性相同) 及 g (或 G, g 和 G 频域特性相同) 并不在 1500 Hz 的理想分界频率处截止, 而是互相延伸伸入对方一段。信号与 h (或 H) 及 g (或 G) 卷积后, 细节部分(d_j) 包含了多余的 $[f_c, 1500]$ Hz 频段的频率成分 (本属于近似部分 a_j), 近似部分(d_j) 包含了多余的 $(1500, f_d]$ Hz 频段的频率成分 (本属于细节部分 d_j)。另外, 近似部分 a_j 中多余的 $(1500, f_d]$ Hz 频段的频率成分, 细节部分 d_j 中的理论频段部分再经隔点采样, 由于不满足采样定理将产生频率折叠。其它小波的频域特性类似, 也产生类似的频率混淆。

工程应用中, 得到单频段的重构信号是非常有意义的。单频段重构算法如图 1 所示, 其中

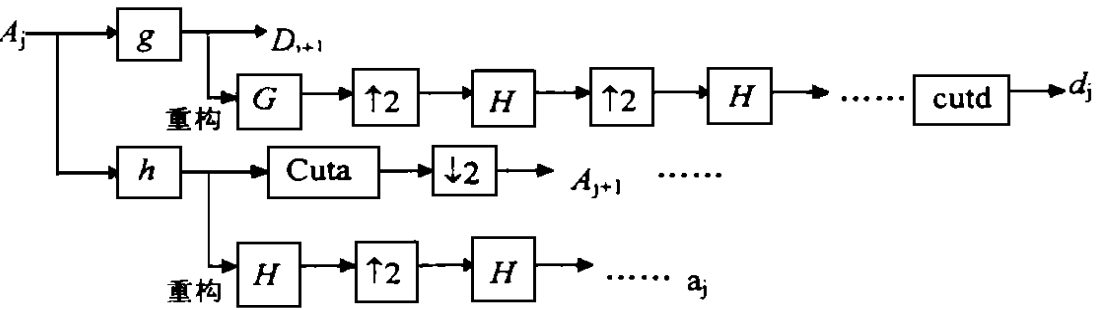


图 2 对应小波 sym3 和 sym5 的正交镜像滤波器的频域特性(采样频率为 6000 Hz)

关键步骤是隔点插零。隔点插零产生两个结果: (1) 信号采样频率增加一倍; (2) 产生虚假的频率成分。设采样频率为 f_s , 在 2^j 尺度将产生以 $f_s/2^{j+1}$ 为对称中心的与真实频率成分对称的虚假频率成分。经过隔点插零, 细节部分 d_j 中的理论频段部分在分解时, 产生的频率折叠被调整过来, 但产生的其它虚假频率成分以及多余的频率成分, 又产生新的虚假频率成分。

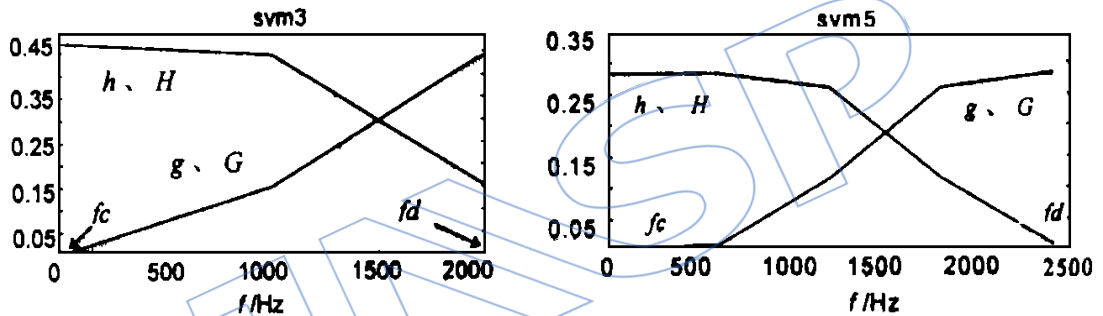


图 3 改进的二进离散小波变换快速算法

为了克服频率混淆, 作者对 MALLAT 算法作了改进, 提出如图 3 所示的二进离散小波变换快速算法。Cut_a表示去掉与 h 或 H 卷积后的多余频率成分, Cut_d表示去掉与 g 或 G 卷积后的多余频率成分。其去掉多余频率成分的方法为: 将信号进行 FFT, 将理论上不在该频段的频率成分置零, 然后进行 IFFT。这样就很好地解决了频率混淆问题, 但计算量有所增加。

4 基于小波的轴承故障特征提取

图 4 中试件尺寸与发动机后轴承部位完全相同, 包括转轴、滚珠轴承、涡轮轴、金属封油

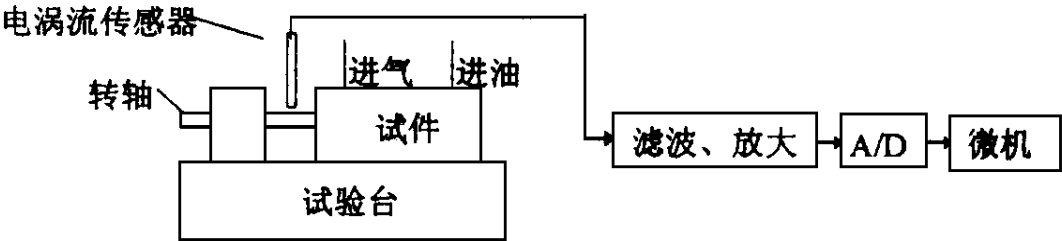


图 4 某涡喷发动机后轴承部位振动情况模拟试验台

环等主要零部件。图 5 是从此试验台上检测到的原始信号 x 及其谱图, 转速 22000 r/min, 采样频率为 12000 Hz。图 6 是利用图 2 所示改进算法对信号 x 进行小波分析的结果, 图 7 是利用

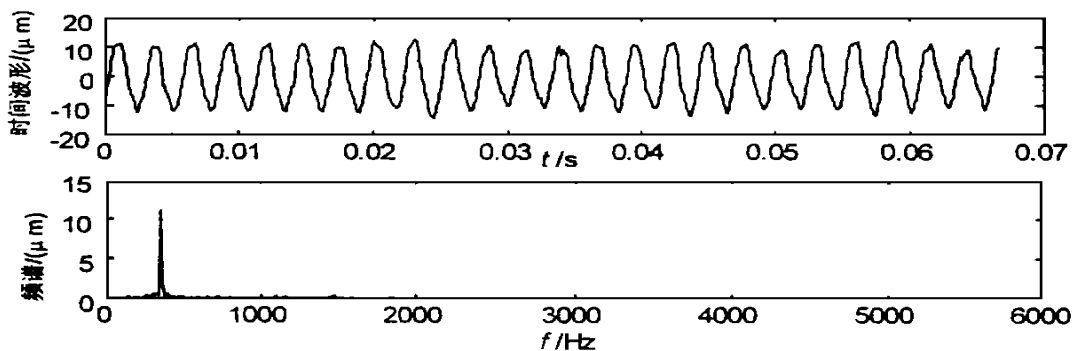


图 5 原始信号 x 及其谱图

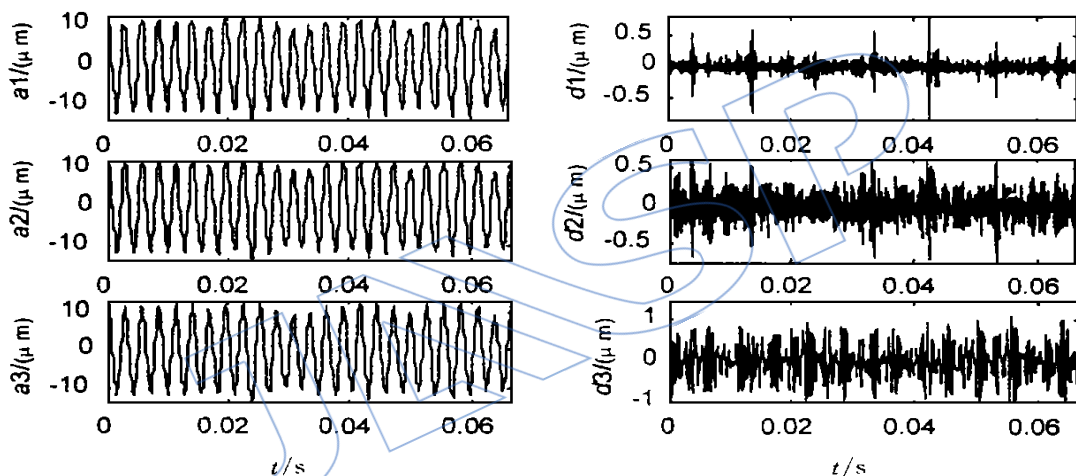


图 6 利用图 2 所示的改进算法对信号 x 的分析结果

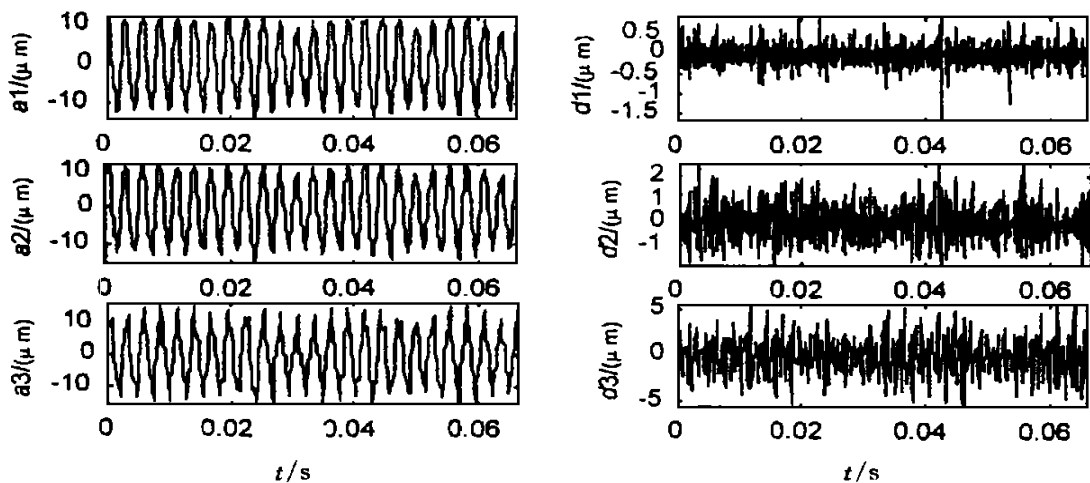


图 7 利用 Mallat 算法对信号 x 的分析结果

MALLAT 算法对信号 x 进行小波分析的结果。

观察原始信号 x , 波形比较规整, 其谱图也很光, 只有转速频率绝对明显, 由此似乎可以得出试件运转正常的结论。再观察图 7, $d1$ 频段(3000~6000 Hz)隐约有一点瞬态冲击的迹象, 但很不明显, 然而观察图 6 发现, $d1$ 频段(3000~6000 Hz)中明显有等间距的冲击存在, $d2$ 频段(1500~3000 Hz)中也能较清楚地看出等间距的冲击存在, 而且在时间上与 $d1$ 频段吻合, 初步判断可能是轴承故障。试验后拆开试件, 发现轴承内圈表面有一小块剥落, 其它部件正常。由此得出结论, 信号 x 的小波分析的结果中, $d1$ 频段是试件中滚珠轴承内圈表面剥落的故障特征。图 6 和图 7 中的结果实际上是信号 x 在各频段的时域波形, 因此, 小波分析的结果还确定出了瞬态冲击发生的时刻。比较图 6 和图 7, 可以发现两图各频段波形差异很大, 尤其是各细节部分的差别, 肉眼即可明显分辨得出, 其原因就是图 7 的结果中存在频率混淆。由于频率混淆的存在, 微弱的冲击特征未被提取出来, 也就掩盖了故障特征。

5 结 论

小波变换具有优良的时频分析特性, 对提取混入在周期信号中的微弱瞬态冲击非常有效, 并能确定冲击发生的时间位置, 这是傅立叶变换所难以实现的。本文对 MALLAT 算法的改进尽管增加了计算量, 但很好地解决了因原算法存在频率混淆而造成的信号失真。

参 考 文 献

- 1 崔锦泰, 程正兴译. 小波分析导论. 西安: 西安交通大学出版社, 1995
- 2 Wang W J, McFADDEN P D. Application of Wavelets to Gearbox Vibration Signals for Fault Detection. Journal of Sound and Vibration, 1996, 192(5): 927- 939
- 3 C James Li and Jun Ma. Wavelet decomposition of Vibrations for detection of Bearing- Localized Defects. NDT & E International, 1997, 30(3): 143- 149
- 4 Mallat. A Theory of Multiresolution Signal Decomposition. The Wavelet Representation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674- 693
- 5 Daubchies. Orthogonal Bases of Compactly Supported Wavelets. Communication on Pure and Applied Mathematics, 1988, XL: 909- 996
- 6 Ya Wu and Du R. Feature Extraction and Assessment Using Wavelet Packets for Monitoring of Machining Processes. Mechanical Systems and Signal processing, 1996, 10(1): 29- 53
- 7 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995
- 8 耿中行, 屈梁生. 小波包的移频算法与振动信号处理. 振动工程学报, 1996, 9(2): 145- 152

(责任编辑 王震华)

FULL- LENGTH PAPERS

A STUDY ON CAUSE FOR SOME GEAR FAILURES

Yan Litang and Ren Guangming

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

There were several gear failures, in which the gear was broken into two, one of which is only a little smaller than one quarter of the gear. Several researchers had studied the cause of such gear failures and concluded that it was resonant vibrations. However the conclusion was not yet completely acceptable. In order to further ascertain the cause of such gear failures, the self-exciting vibration and instabilities were analyzed. The vibration instability of the disk-shaped plain gear was studied with the multiple scale's method of nonlinear perturbation method. The vibration response of a disk-shaped bevel gear was measured on a test rig. Both theoretical and experimental investigations show that there exist self-exciting vibrations on the gears with traveling wave vibration. Under certain conditions the forward traveling wave vibration of the driving gear and the backward traveling wave vibration of the driven gear are instable and cause the gear failures mentioned above.

Key Words Gears Self-exciting vibrations Stability

EXTRACTION OF SHOCK CHARACTER FROM HARMONIC SIGNAL BASED ON WAVELET

Yang Jianguo, Xia Songbo, Xu Genfa

(2nd Dept. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

ABSTRACT

Wavelet transformation has very good characteristics of time-frequency analysis, and is very effective to extract the small instantaneous shock from harmonic signal. An improved fast algorithm is proposed to avoid frequency aliasing, which exists in the Mallat algorithm. The incipient fault character of the bearing in one aeroengine is extracted successfully by the wavelet transformations.

Key Words Transformation Signal Fault diagnosis

A FRACTIONARY DIMENSION IDENTIFICATION METHOD OF CRITICAL BIFURCATED PARAMETERS

Zhao Yucheng, Zhang Yulian, Xu Qingyu

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

ABSTRACT

The nonlinear behaviors of rotor systems set high requirements to the designing of motor system: Such as to take nonlinear elements into account; to avoid the unstable parameter points or regions where will appear nonlinear phenomena. For this purpose, from studying a typical fractional model- May model and Jeffcott rotor system, the map