

双自适应小波局部极大模方法及其在信号特征提取中的应用

于明月, 陈果

(南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016)

摘要: 将小波分析中的局部极大模方法采用双自适应提升算法进行改进, 用于机械故障冲击信号特征的提取, 获取了信号时域和频域冲击特征。将该方法应用于滚动轴承微弱冲击特征的提取, 并将原始信号直接进行包络分析、原始信号极大模包络分析、经典小波分析方法、第二代小波的细节信号方法进行了对比。结果表明, 双自适应局部极大模方法可以更有效的提取信号中的冲击特征, 对小波分解层数极不敏感, 表现出了很好的鲁棒性。新方法为进一步实施冲击型故障的诊断工作提供新的思路。

关键词: 双自适应; 提升算法; 极大模; 冲击信号; 滚动轴承; 特征提取

中图分类号: TB123 文献标识码: A

Double adaptive wavelet partial maximum modulus method and its application in feature extraction of impulse signals

YU Ming-yue, CHEN Guo

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The classic wavelet partial maximum modulus method was improved with a double adaptive lifting scheme. This method was used to extract features of impact signals in mechanical fault diagnosis and obtain impact features of signals in time domain and frequency one. The new method was used to extract rolling bearing weak impact features. After the original signal was analyzed with the envelope analysis method, and several classic wavelet analysis ones, respectively, the results were compared. It was shown that the double adaptive wavelet partial maximum modulus method is more effective for extracting features of impact signals and more insensitive to decomposing levels than the classic wavelet methods be. The new method provided a new idea for impact type fault diagnosis.

Key words: double adaptive; lifting scheme; maximum modulus; impact signal; rolling bearing; feature extraction

冲击型信号是一类常见的故障信号, 经常包含机械设备的重要状态信息, 如机械系统中动静件之间的碰撞, 工作中的带损伤的齿轮和轴承都会产生规律性的冲击信号^[1-3], 但由于冲击信号的非线性、非平稳性以及信号的微弱性, 增加了冲击特征的提取难度。由于良好的时频局部性, 小波变换得到了广泛的应用, 然而对于非光滑信号, 传统小波的线性近似就不能获得如光滑信号一样好的效果。基于提升算法的第二代小波变换, 是可以灵活的“构造”小波变换的一种方法, 它可以根据不同信号的不同特点, 自适应构造小波^[4-6]。第二代小波变换中自适应方法主要有尺度自适应、空间自适应等^[7-8]。尺度自适应是对某一层上全局的估计, 不能突出信号的局部信息, 因此本文采用空间自适

应算法, 该算法可以对信号的每个点进行自适应预测, 突出了信号的局部信息。小波变换局部极大模的位置及大小包含了信号的主要信息, 可以通过小波变换的局部极大模的位置和大小来完成对信号冲击特征表征和分析^[9]。基于此, 本文以提升算法为基础, 采用空间自适应方式, 设计了一种适合提取冲击信号特征的自适应小波, 并利用小波变换局部极大模的特点来提取信号中的冲击成分。最后将方法应用于滚动轴承微弱冲击信号的特征提取, 并将新方法与原始信号直接包络分析、原始极大模信号进行包络分析、及经典小波局部极大模方法进行了对比分析。结果表明本文方法可以更加有效的提取信号中的冲击成分, 在包络谱分析时对分解层数极不敏感, 表现出了很好的鲁棒性。

1 双自适应小波局部极大模方法

在信号处理中, 小波变换的极大模值所携带的信息可以用来进行奇异性检测^[9], 由此可以通过极大模的位置和大小来完成对冲击信号的表征和分析。本文

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61179057); 国家安全重大基础研究项目(613139)

收稿日期: 2011-08-23 修改稿收到日期: 2012-08-24

第一作者 于明月 女, 博士生, 1978年生

通讯作者 陈果 男, 博士, 教授, 博士生导师, 1972年生

提出的双自适应小波局部极大模方法的基本思想是：
 ① 利用提升算法构造自适应更新和自适应预测的小波函数；
 ② 利用构造的小波函数对信号进行极大模分析；
 ③ 对得到的极大模信号进行 Hilbert 包络；
 ④ 根据包络信号的冲击间隔，分析信号的时域冲击特性；
 ⑤ 对 Hilbert 包络分析后的信号进行频谱分析，分析信号的频域冲击特性。其基本流程如图 1 所示：

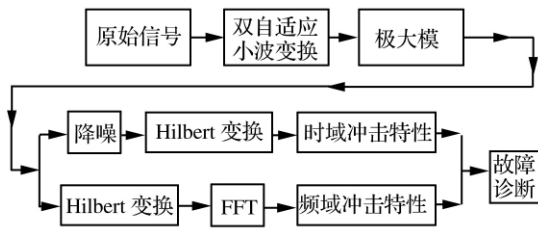


图 1 双自适应小波局部极大模方法流程图
 Fig. 1 The double adaptive lifting wavelet partial maximum modulus method

由于极大模方法对噪声较敏感，为更有效的提取信号的时域冲击特性，在时域冲击特性的提取过程中，对原始信号进行了小波降噪处理。

1.1 提升算法的基本原理

提升小波的关键在于预测器及更新器的确定，预测算子的构造多采用插值方式^[10]。本文采用先更新后预测的网络结构^[7-8]，预测算子不在级联迭代运算的循环内。实现了自适应更新和自适应预测的双自适应结构。假设一个信号序列为 X ，先更新后预测^[4-7]提升算法的步骤为：

(1) 剖分：将信号 X 分为偶样本 X_e 和奇样本 X_o 。

$$\begin{aligned} X_e(i) &= X(2i) \\ X_o(i) &= X(2i-1) \end{aligned} \quad \left(i=1, 2, \dots, \frac{n}{2} \right) \quad (1)$$

其中： n 表示原始信号的长度。

(2) 更新：用相邻的奇样本 X_o 和更新器 U ，合并偶样本获得分解的逼近信号 c ：

$$c = X_e + U(X_o) \quad (2)$$

其中： $U = [u_1, u_2, \dots, u_{\tilde{N}}]$ ， \tilde{N} 表示更新器系数的个数。更新是为了保持信号的某一全局特性不变，如均值、消失矩等。本文以均值不变为原则选择更新器，即：逼近信号 c 的均值等于原始信号的均值，这需满足：

$$\sum_{i=1}^{\tilde{N}} u_i = 1/2 \quad (3)$$

(3) 预测：用得到的逼近信号 c 和预测器 P 将估计误差 d 作为细节信号：

$$d = X_o - P(c) \quad (4)$$

其中： $P = [p_1, p_2, \dots, p_N]$ ， N 表示预测器系数的个数，要求 $N \geq \tilde{N}$ ，且：

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1 \quad (5)$$

为使小波函数能够有效地捕捉原始信号的瞬态变化，将预测偏差的平方为指标来选择预测算子^[8,10]，偏差越小，表明预测算子越能较好地匹配原始信号的局部信息^[5-7]，故本文选择预测偏差最小的预测器，即：

$$Q(p) = \min_p \| X_o - P(c) \| \quad (6)$$

重构过程为上述过程的逆过程。由于提升算法在构造小波滤波器的更新及预测阶段均考虑了原始信号的特征，能够自适应的根据信号的特点来构造不同的小波函数，特别是对传统小波的线性近似不能很好匹配的非光滑信号。故本文构造的小波函数相比经典小波函数能更好的匹配原始信号的特征。

当预测时采用 $X_e(k)$ 的个数 N 与更新时采用 $d(k)$

的个数 \tilde{N} 相等时的小波记为 (N, \tilde{N}) 小波，这样的小波具有良好的紧支性和广义线性相位^[11-12]，当 N 较小时，尺度函数和小波函数的支撑区间较小，一般地，支撑区间小的小波函数适合于处理非平稳信号，小波系数能够有效地描述信号的断点、冲击以及瞬态分量^[11-12]，故本文采用 $(4, 4)$ 小波。

1.2 小波局部极大模方法^[9]

设 $\theta(t)$ 是一适当光滑的函数，满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} \theta(t) dt = 1$ ，且 $\theta(t) = O(1/(1+t^2))$ ，令：

$$\left. \begin{aligned} \psi^1(t) &= d\theta(t)/dt \\ \psi^2(t) &= d^2\theta(t)/dt^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

如果 $\psi^1(t)$ 、 $\psi^2(t)$ 满足小波容许条件，则可以将它们用作小波函数进行小波变换。对函数 $\theta(t)$ 引入尺度参数 s ，表示为 $\theta_s(t) = \theta(t/s)/s$ 。则函数 $f(t) \in L^2(R)$ ，关于 $\psi^1(t)$ 、 $\psi^2(t)$ 的小波变换分别表示为：

$$W_f^1(s, t; \psi^1) = f(t) \psi_s^1(t) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \psi^1\left(\frac{t-\tau}{s}\right) d\tau \quad (8)$$

$$W_f^2(s, t; \psi^2) = f(t) \psi_s^2(t) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \psi^2\left(\frac{t-\tau}{s}\right) d\tau \quad (9)$$

小波变换 $W_f^1(s, t; \psi^1)$ 可表示为信号 $f(t)$ 在尺度 s 下被 $\theta_s(t)$ 平滑后的一阶导数；而 $W_f^2(s, t; \psi^2)$ 则是信号 $f(t)$ 在尺度 s 下被 $\theta_s(t)$ 平滑后的二阶导数。一般关心极大值，因此经常用到的是一阶导数。由以上分析可以看出 $f(t)$ 的突变点和 $W_f^1(s, t; \psi^1)$ 的模极大点之间存在对应关系。因此选择适当的小波函数，可以通过小波模极大点来检测信号的奇异点。

1.3 Hilbert 包络解调分析

对于任意一个时间序列 $x(t)$ ，其 Hilbert 变换 $y(t)$ 定义为^[9]：

$$y(t) = \frac{P}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (10)$$

其中: P 是 Cauchy 主值, 一般可取 $P = 1$, 通过该定义, 组合 $x(t)$ 和 $y(t)$ 可得到信号 $x(t)$ 的解析信号 $z(t) = x(t) + iy(t)$ 。对 $z(t)$ 求模得到其包络信号, 本文通过包络信号的间隔确定信号的时域冲击特征, 并对包络信号进行傅里叶变换得到信号的调制解调谱, 从而确定信号的频域冲击特性。

2 基于新方法的滚动轴承微弱冲击特征提取

目前, 在对滚动轴承进行故障诊断时, 常采用对轴承信号进行小波变换, 得到其细节信号, 对得到的细节信号进行 Hilbert 包络, 寻找轴承的特征频率的方法^[13]。但该方法对小波分解层数较敏感。基于此, 本文采用自适应算法构造匹配信号瞬时特性的小波函数, 利用得到的小波函数对轴承信号进行小波极大模变换, 并对得到的极大模信号进行 Hilbert 包络, 提取滚动轴承信号中的时域及频域冲击特性。新方法的具体实现过程为。

2.1 滚动轴承时域冲击特征的提取

- (1) 对各轴承信号均分解至四层;
- (2) 对分解后的信号进行小波极大模变换, 寻找极大模的位置及大小, 确定冲击点的位置及大小。
- (3) 对得到的极大模信号进行小波降噪处理, 降噪阈值为 $t_l = c\sigma_l$, 其中 t_l 为第 l 阈值, σ_l 为 l 层均方差, c 的取值为 $2.5 \sim 3.5$ ^[14], 在对每组数据进行分析时, 经典小波方法与本文方法所取阈值一致。
- (4) 根据滚动轴承共振解调原理^[13] 对得到的极大模信号进行 Hilbert 变换, 得到信号的时域冲击特性;
- (5) 根据时域冲击特性的冲击间隔, 判断该轴承是否有故障以及故障类型。

所有信号均取小波分解后第一层的极大模信号进行包络分析。在将本文方法构造的小波函数与经典小波函数对信号的冲击特征提取的比较过程中, 经典小波函数选择 db2 小波, 文中边界均采用零延拓方式。

2.2 滚动轴承频域冲击特征的提取

- (1) 重复上述 2.1 中步骤(1)、步骤(2);
- (2) 对得到的未经小波降噪的 1~4 层极大模信号进行 Hilbert 变换;
- (3) 对得到的 Hilbert 解析信号进行包络谱分析, 得到信号的频域冲击特性;
- (4) 根据频域冲击特性, 判别轴承是否有故障以及故障类型。

在轴承特征频率的提取过程中, 对原始信号直接进行包络分析、原始极大模信号包络分析以及经典小波和本文方法重构的细节信号及极大模信号进行包络分析, 并对六种实验结果进行了比较。

3 实验与应用

本文滚动轴承实验数据来自两种途径, 一为美国 Case Western Reserve University 电气工程实验室的滚动轴承^[15] 型号为 SKF6203 该轴承故障类型为电火花点蚀。二为自行研制的转子——滚动轴承试验台, 该组数据中轴承的故障类型为电火花线切割方式。自行研制的转子-滚动轴承试验台主要由调速电动机、转轴、转子圆盘、齿轮箱、轴承、轴承座和综合电子控制系统组成。转轴两端由滚动轴承支撑, 滚动轴承常见故障通过更换不同故障类型轴承来模拟, 轴承型号是 HRB6304。SKF6203 及 HRB6304 的轴承几何尺寸见表 1。

表 1 轴承几何尺寸(单位 mm)
Tab. 1 Rolling bearing geometry size (unit mm)

型号	内圈直径	外圈直径	厚度	滚动体直径	节径
SKF6203	17.0	40.0	12	6.75	28.5
HRB6304	20	52	15	9.6	36

转子-滚动轴承试验台如图 2 所示, 实际的轴承故障如图 3 所示, 本文从图 2 所示实验台的通道 2 采集对应正常、内圈故障、外圈故障、滚动体故障这四种状态的数据。本文以 f_r 表示转速频率, f_o 表示外圈特征频率, f_i 表示内圈特征频率, f_b 表示滚动体特征频率。文中幅值均进行了归一化处理。

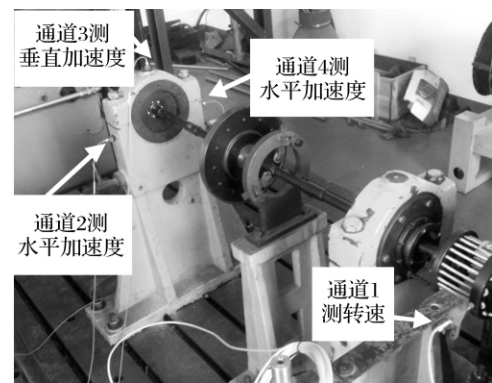


图 2 转子-滚动轴承试验台实物图

Fig. 2 Experimental equipment of Rotor rolling bearings

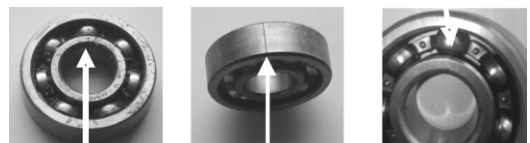


图 3 实际故障轴承

Fig. 3 Three types of faults

3.1 新方法与原始信号、原始极大模信号及经典小波方法在滚动轴承冲击特征提取中的比较

本文选取国外轴承数据中滚动体故障样本, 其轴

轴承型号为 SKF6203 转速为 1 775 r/min ,理论计算的内圈故障频率为 146.3 Hz ,外圈故障频率为 90.3 Hz ,滚动体故障频率为 118.0 Hz 。其中图 4 (a) 表示原始信号、图 4 (b) 表示原始信号频谱、图 4 (c) 表示经典小波极大模方法提取的冲击信号、图 4 (d) 表示本文方法提取的冲击信号,图 5 (a) 表示原始信号的 Hilbert 包络谱,图 5 (b) 表示原始信号进行极大模特征提取后的 Hilbert 包络谱,图 6 ~ 图 9 的 (a) ~ (d) 分别表示信号小波分解后第 1 2 3 4 层细节信号或局部极大模信号的 Hilbert 包络谱。

从图 4 (b) 可以看出原始信号频谱成分较复杂,不易判断轴承的运行状态,图 4 (c) 可以看到一定的冲击信号存在,但冲击间隔不明确,不能进行进一步的分析,而图 4 (d) 可以清楚的看出冲击信号的间隔为 0.008 6 s ,该间隔对应的频率为 116.3 Hz ,与滚动体的特征频率 118.0 Hz 一致,可由此判断轴承为滚动体故障,与轴承的实际故障类型一致。图 5 (a)、图 5 (b) 的原始信号及原始信号极大模值的包络谱中可以看到滚动体故障频率的存在,但其它频率成分较多,滚动体的故障频率并不突出。图 6 ~ 图 7 为细节信号的 Hilbert 包络谱,图 8 ~ 图 9 为极大模信号的 Hilbert 包络谱。从图 4 ~ 图 9 可以看出滚动体故障特征频率的存在,但通过比较可以明显看出,对原始信号直接进行包络分析及对原始信号的极大模值进行包络分析均不能有效的提取滚动体的故障频率。经典小波的细节信号及极大模信号的包络谱对分解层数较本文方法更加敏感。

3.2 滚动轴承时域冲击特征的提取

图 10 ~ 图 17 (a) 表示原始信号,图 10 ~ 图 17 (b) 表示本文方法提取的冲击信号。

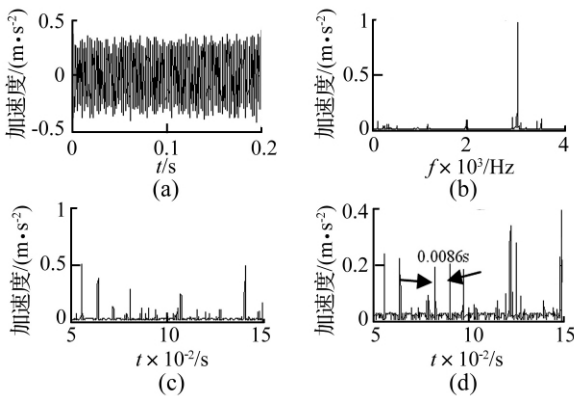


图 4 时域冲击特征比较

Fig. 4 Comparing the impact characteristics of time-domain

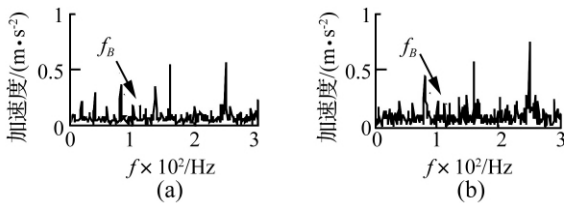


图 5 原始信号包络谱及原始极大模信号包络谱

Fig. 5 Envelope spectrum of original signal and original signal partial maximum modulus

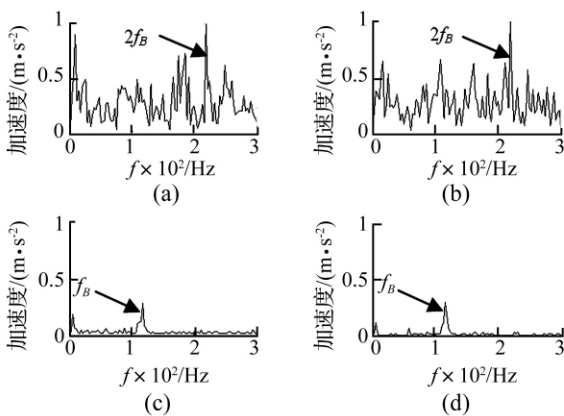


图 6 经典小波细节信号包络谱

Fig. 6 Classic wavelet envelope spectrum of detail signal

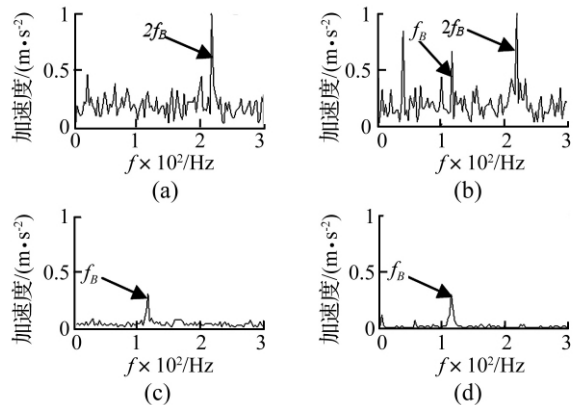


图 7 双自适应小波细节信号包络谱

Fig. 7 Double adaptive wavelet envelope spectrum of detail signal

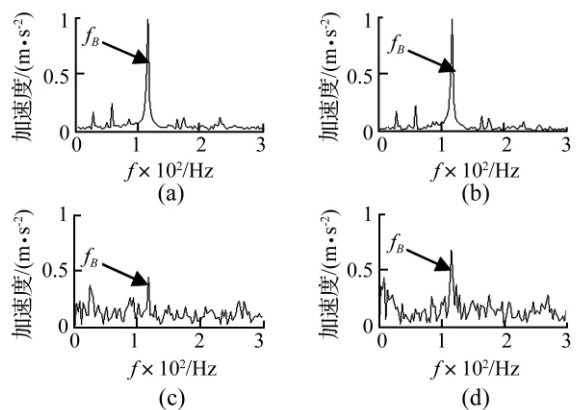


图 8 经典小波局部极大模信号包络谱

Fig. 8 Classic wavelet envelope spectrum of partial maximum modulus signal

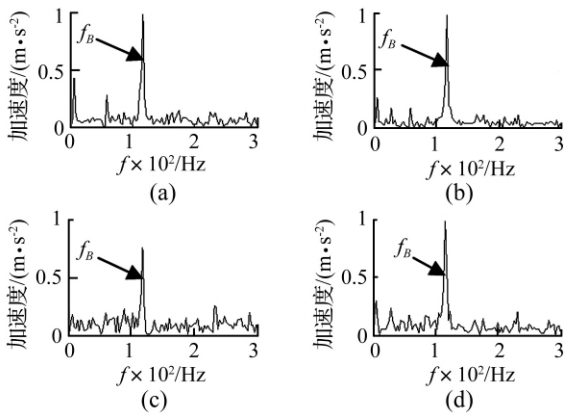


图 9 双自适应小波极大模信号

Fig. 9 Double adaptive wavelet envelope spectrum of partial maximum modulus signal

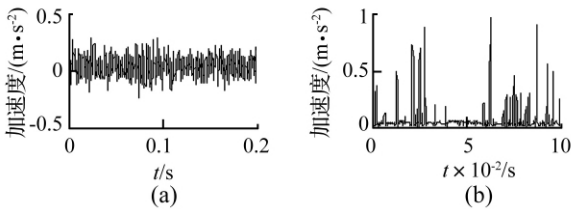


图 10 轴承信号(正常状态)

Fig. 10 Bearing signal(Normal)

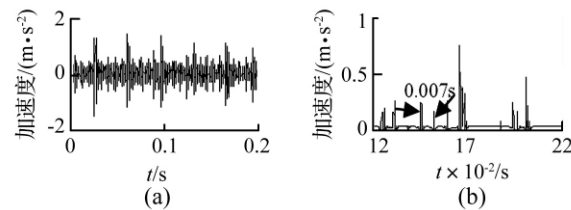


图 11 轴承信号(内圈故障)

Fig. 11 Bearing signal(Inner fault)

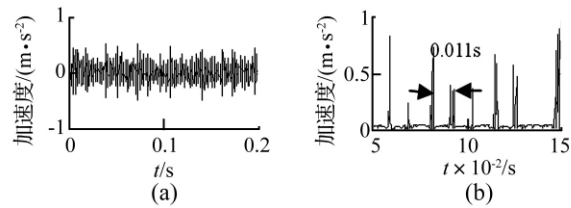


图 12 轴承信号(外圈故障)

Fig. 12 Bearing signal(Outer fault)

3.2.1 美国 Case Western Reserve University 电气工程的滚动轴承实验数据

图 10 表示正常轴承信号,选用数据的转速为 1 725 r/min。理论计算的内圈故障频率为 142.2 Hz,外圈故障频率为 87.8 Hz,滚动体故障频率为 114.6 Hz。

图 11 表示轴承内圈故障信号,选用数据的转速为 1 737 r/min,理论计算的内圈故障频率为 143.2 Hz,外圈故障频率为 88.4 Hz,滚动体故障频率为 115.4 Hz。

图 12 表示轴承外圈故障信号,选用数据的转速为 1 751 r/min,理论计算的内圈故障频率为 144.4 Hz,外

圈故障频率为 89.1 Hz,滚动体故障频率为 116.4 Hz。

图 13 表示轴承滚动体故障信号,选用数据的转速为 1 730 r/min,理论计算的内圈故障频率为 142.8 Hz,外圈故障频率为 88.1 Hz,滚动体故障频率为 115.1 Hz。

从图 10 ~ 图 13 可以看出,在轴承正常状态下,没有明显的冲击成分,且冲击的间隔变化较大,也不与任何特征频率相对应,没有一定的规律性。在轴承内圈故障时冲击信号的间隔为 0.007 s,对应频率为 142.9 Hz,与轴承内圈特征频率 143.2 Hz 相对应,轴承外圈故障时冲击信号的间隔为 0.011 s,对应频率为 90.9 Hz,与轴承外圈特征频率 88.4 Hz 相对应,滚动体故障时冲击信号的间隔为 0.008 9 s,对应频率为 117.6 Hz,与滚动体特征频率 115.1 Hz 相对应。故由提取的冲击信号的间隔可以判断轴承的状态。

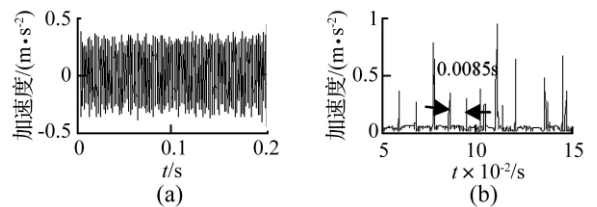


图 13 轴承信号(滚动体故障)

Fig. 13 Bearing signal(Rolling fault)

3.2.2 实验室转子-滚动轴承试验台滚动轴承数据

图 14 表示轴承正常状态信号,选用数据的转速为 1 813 r/min。理论计算的内圈故障频率为 134.1 Hz,外圈故障频率为 77.6 Hz,滚动体故障频率为 105.4 Hz。

图 15 表示轴承内圈故障信号,选用数据的转速为 1 829 r/min,理论计算的内圈故障频率为 135.4 Hz,外圈故障频率为 78.4 Hz,滚动体故障频率为 106.4 Hz。

图 16 表示轴承外圈故障信号,选用数据的转速为 2 055 r/min,理论计算的内圈故障频率为 152.1 Hz,外圈故障频率为 88.0 Hz,滚动体故障频率为 119.5 Hz。

图 17 表示轴承滚动体故障信号,选用数据的转速为 2 013 r/min,理论计算的内圈故障频率为 149.0 Hz,外圈故障频率为 86.2 Hz,滚动体故障频率为 117.1 Hz。

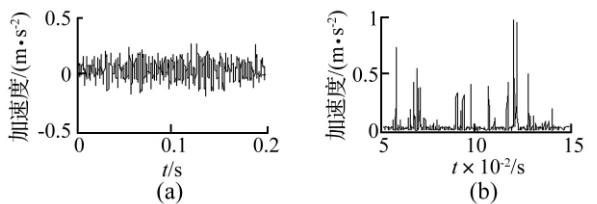


图 14 轴承信号(正常状态)

Fig. 14 Bearing signal(Normal)

从图 14 ~ 图 17 可以看出,在轴承正常状态下,没有明显的冲击成分,冲击间隔多变,不与轴承的任何特征频率相对应。在轴承内圈故障时冲击信号的间隔为

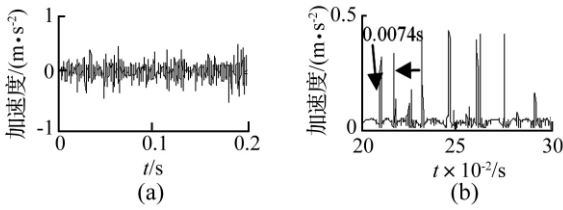


图 15 轴承信号(内圈故障)

Fig. 15 Bearing signal(Inner fault)

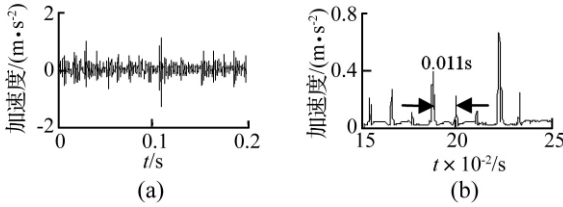


图 16 轴承信号(外圈故障)

Fig. 16 Bearing signal(Outer fault)

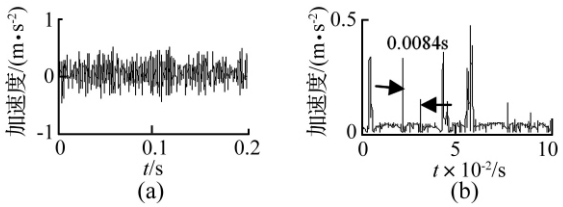


图 17 轴承信号(滚动体故障)

Fig. 17 Bearing signal(Rolling fault)

0.007 4 s ,对应频率为 135.1 Hz ,与轴承内圈特征频率 135.3 Hz 相对应 ,轴承外圈故障时冲击信号的间隔为 0.011 s ,对应频率为 90.9 Hz ,与轴承外圈特征频率 88.0 Hz 相对应 ,滚动体故障时冲击信号的间隔为 0.008 4 s ,对应频率为 119.0 Hz ,与滚动体特征频率 117.1 Hz 相对应。

由图 10 ~ 图 17 的对比分析可以发现 ,本文方法实现了滚动轴承中冲击信号的提取 ,且冲击的时间间隔表明了轴承的运行状态。

3.3 滚动轴承频域冲击特征的提取

图 18 ~ 图 25 中的 (a) ~ (d) 分别表示本文方法提取的 1 ~ 4 层极大模的包络谱 ,选用数据与 3.2 节数据相对应。

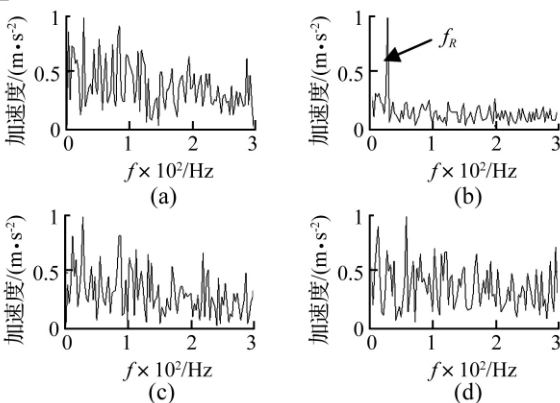


图 18 双自适应小波极大模 1 ~ 4 层包络谱(正常状态)

Fig. 18 Double adaptive wavelet 1 ~ 4 level envelope spectrum of partial maximum modulus signal (Normal)

3.3.1 美国 Case Western Reserve University 电气工程的滚动轴承实验数据

从图 18 ~ 图 21 ,可以看出 ,本文双自适应小波局部极大模方法可以有效提取出滚动轴承的频域冲击特征 ,提取出的冲击频率与轴承状态类型一致 ,且该方法对小波的分解层数不敏感。

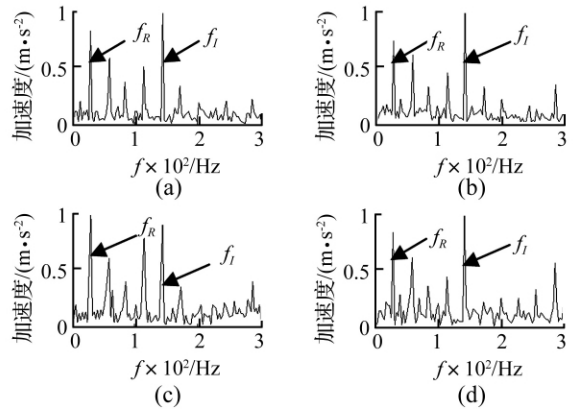


图 19 双自适应小波极大模 1 ~ 4 层包络谱(内圈故障)

Fig. 19 Double adaptive wavelet 1 ~ 4 level envelope spectrum of partial maximum modulus signal (Inner fault)

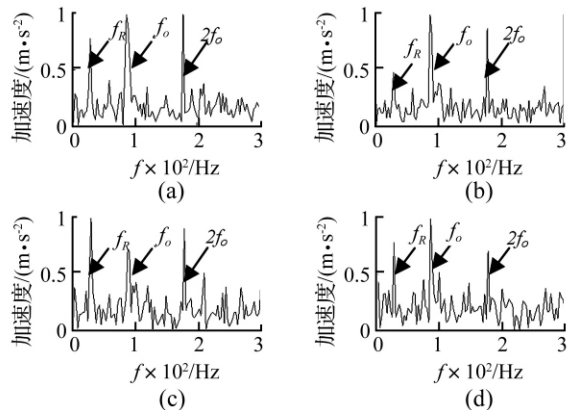


图 20 双自适应小波极大模 1 ~ 4 层包络谱(外圈故障)

Fig. 20 Double adaptive wavelet 1 ~ 4 level envelope spectrum of partial maximum modulus signal (Outer fault)

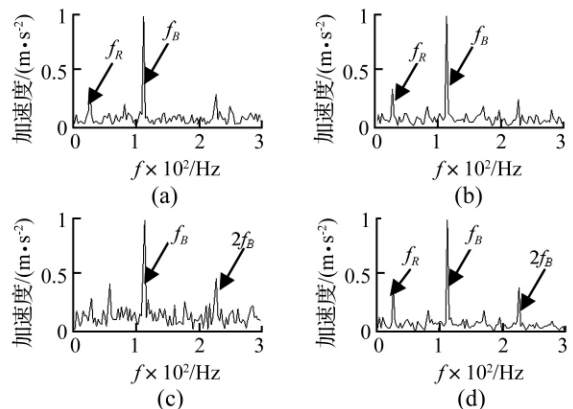


图 21 双自适应小波极大模 1 ~ 4 层包络谱(滚动体故障)

Fig. 21 Double adaptive wavelet 1 ~ 4 level envelope spectrum of partial maximum modulus signal (Rolling fault)

3.3.2 实验室转子-滚动轴承试验台滚动轴承数据:

从图 22 ~ 图 25 可以看出,本文方法可以有效的判断轴承的运行状态,且当轴承有故障时极大模信号的 1~4 层包络谱均可以有效提取出轴承的特征频率,即基于双自适应算法的小波局部极大模方法对滚动轴承特征频率的提取对分解层数极不敏感。

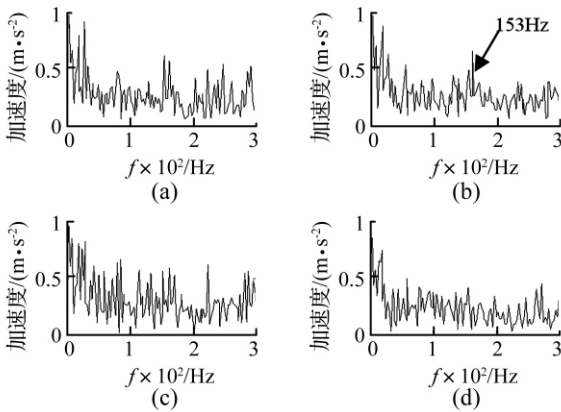


图 22 双自适应小波极大模 1~4 层包络谱(正常状态)
Fig. 22 Double adaptive wavelet 1~4 level envelope spectrum of partial maximum modulus signal (Normal)

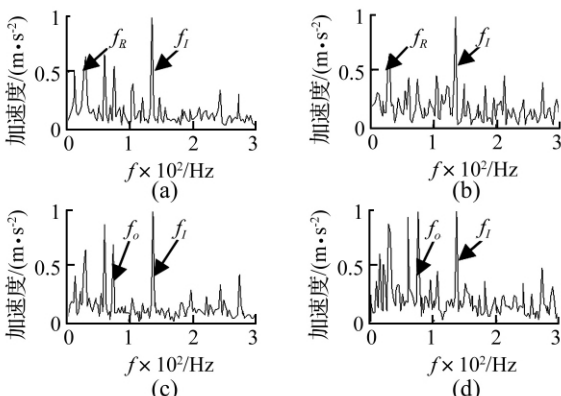


图 23 双自适应小波极大模 1~4 层包络谱(内圈故障)
Fig. 23 Double adaptive wavelet 1~4 level envelope spectrum of partial maximum modulus signal (Inner fault)

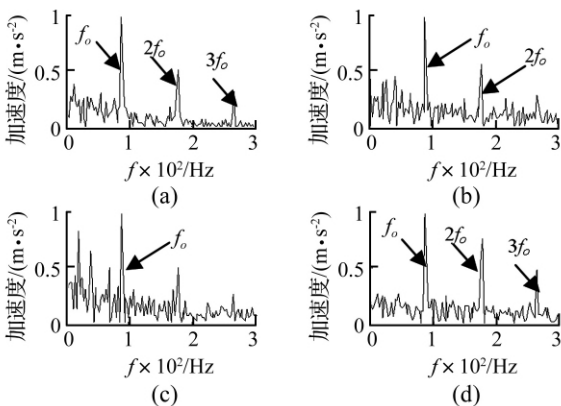


图 24 双自适应小波极大模 1~4 层包络谱(外圈故障)
Fig. 24 Double adaptive wavelet 1~4 level envelope spectrum of partial maximum modulus signal (Outer fault)

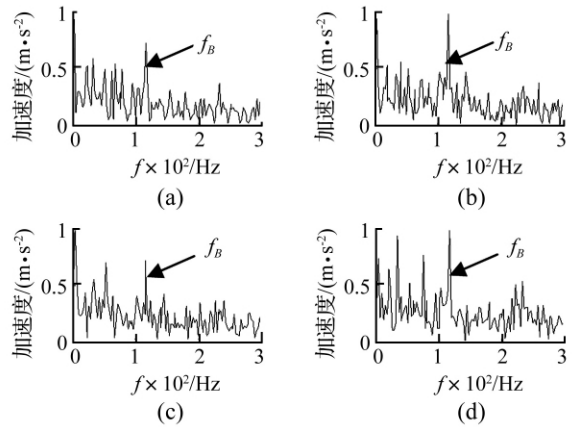


图 25 双自适应小波极大模 1~4 层包络谱(滚动体故障)
Fig. 25 Double adaptive wavelet 1~4 level envelope spectrum of partial maximum modulus signal (Rolling fault)

4 结 论

(1) 本文将经典小波的局部极大模方法用提升算法进行了改进,首先设计出了匹配信号瞬态特征的双自适应小波函数,并用设计的小波函数提取信号的局部极大模信号,将得到的极大模信号进行 Hilbert 包络分析,从而提取信号的时域及频域冲击特征。

(2) 为了验证本文方法的有效性,采用了两种设备上的两种型号的滚动轴承不同损伤方式的实测数据进行了验证。结果表明,本文方法可以准确的从时域及频域冲击特性角度判断轴承的状态,以及轴承的故障类型。且在小波分解层数上极不敏感,表现了较强的鲁棒性。

参 考 文 献

[1] Wang X D, Zi Y Y, He Z J. Multiwavelet construction via an adaptive symmetric lifting scheme and its applications for rotating machinery fault diagnosis [J]. Measurement Science and Technology 2009 20(4): 1-17.

[2] Shao Y M, Mechefske C K, Ou J F, et al. Gearbox deterioration detection under steady state, variable load, and variable speed conditions [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering 2009 22(2): 256-264.

[3] 谭继勇, 陈雪峰, 何正嘉. 冲击信号的随机共振自适应检测方法 [J]. 机械工程学报 2010 46(23): 61-67. TAN Ji-yong, CHEN Xue-feng, HE Zheng-jia. Impact signal detection method with adaptive stochastic resonance [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010 46(23): 61-67.

[4] Claypoole R L Jr, Baraniuk R G, Nowak R D. Adaptive wavelet transforms via lifting [J]. Submitted to IEEE Transactions on Signal Processing, 1999 3: 1531-1516.

[5] Piella G, Heijmans H J A M. Adaptive lifting schemes with perfect reconstruction [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002 50(7): 1620-1630.

[6] Piella G, Heijmans H J A M. An adaptive update lifting scheme with perfect reconstruction [J]. Center for Mathematics and Computer Science 2001 3: 190-193.

(下转第 82 页)

将表2数值计算结果与风洞试验结果进行对比看出,直接计算结果与风洞试验结果比较接近。说明本文计算方法进行桥梁断面颤振稳定性数值模拟的可行性。

4 结 论

本文基于 CFD 软件 Fluent ,发展了桥梁断面颤振稳定性的直接计算方法。利用直接计算方法对典型矩形断面和典型流线形断面的颤振稳定性进行了数值计算,并将计算结果与试验结果进行了对比。对比结果表明了本文计算方法的正确性。在今后的研究中,将尝试利用该方法对更为复杂的桥梁断面,如开口 II 形断面、分体箱梁断面的颤振稳定性进行计算,进一步检验该方法的计算精度。

参 考 文 献

[1] Walther J H , Larsen A. Two dimensional discrete vortex method for application to bluff body aerodynamics [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics , 1997 , 67 - 68: 183 - 193.

[2] Larsen A , Walther J H. Aeroelastic analysis of bridge girder sections based on discrete vortex simulations [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics , 1997 , 67 - 68: 253 - 265.

[3] Fujiwara A , Kataoka H , Ito M. Numerical simulation of flow field around an oscillating bridge using finite difference method [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics , 1993 , 46 - 47: 567 - 575.

[4] Vairo G. A numerical model for wind loads simulation on long-span bridges [J]. Simulation Modelling Practice and

Theory , 2003 , 11(5 - 6) : 315 - 351.

[5] 曹丰产,项海帆,陈艾荣. 薄平板气动导数的数值计算 [J]. 同济大学学报, 1999 , 27(2) : 131 - 135.
CAO Feng-chan , XIANG Hai-fan , CHEN Ai-rong. Numerical assessment of aerodynamic derivatives of thin flate plate [J]. Journal of Tongji University , 1999 , 27(2) : 131 - 135.

[6] 祝志文,陈政清,陈伟芳. 用动网格计算理想平板的颤振导数 [J]. 国防科技大学学报, 2002 , 24(3) : 13 - 17.
ZHU Zhi-wen , CHEN Zheng-qing , CHEN Wei-fang. Assessment of aerodynamic derivatives of the ideal flat plate based on the moving grid method [J]. Journal of National University of Defense Technology , 2002 , 24(3) : 13 - 17.

[7] 周志勇,陈艾荣,项海帆. 涡方法用于桥梁断面气动导数和颤振临界风速的数值计算 [J]. 振动工程学报, 2002 , 15(3) : 327 - 331.
ZHOU Zhi-yong , CHEN Ai-rong , XIANG Hai-fan. Numerical assessment of aerodynamic derivatives and critical wind speed of flutter of bridge decks by discrete vortex method [J]. Journal of Vibration Engineering. 2002 , 15(3) : 327 - 331.

[8] Selvam R P , Govindaswamy S , Bosch H. Aeroelastic analysis of bridges using FEM and moving grids [J]. Wind and Structures , 2002 , 5(2 - 4) : 257 - 266.

[9] Frandsen J B. Numerical bridge deck studies using finite elements. Part I: flutter [J]. Journal of Fluids and Structures , 2004 , 19: 171 - 191.

[10] Braun A L , Awruch A M. Finite element simulation of the wind action over bridge sectional models: application to the guama river bridge [J]. Finite Elements in Analysis and Design , 2008 , 44: 105 - 122.

(上接第 59 页)

[7] 丁文鹏. 自适应方向提升小波变换及应用 [D]. 合肥: 中国科技大学 2009.

[8] Wei H U , Hu J T. A new adaptive lifting scheme and its applying to fault current denoising [J]. World Congress on Intelligent Control and Automation , 2008 , 25 (27) : 3572 - 3575.

[9] 褚福磊,彭志科,冯志鹏,等. 机械故障诊断中的现代信号处理方法 [M]. 北京: 科学出版社 2009.

[10] 何斌,戚佳杰,黎明和. 小波分析在滚动轴承故障诊断中的应用研究 [J]. 浙江大学学报, 2009 , 43 (7) : 1218 - 1221.
HE Bin , QI Jia-jie , LI Ming-he. Application and research of wavelet analysis in fault diagnosis of rolling bearings [J]. Journal of Zhejiang University (Eng ineering Science) , 2009 , 43(7) : 1218 - 1221.

[11] 王凤利,赵德友. 基于提升小波和局域波的故障特征提取 [J]. 仪器仪表学报 2010 , 31(4) : 789 - 793.
WANG Feng-li , ZHAO De-you. Fault feature extraction based on lifting wavelet and local wave [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument , 2010 , 31(4) : 789 - 793.

[12] 段晨东,何正嘉. 一种基于提升小波变换的故障特征提取

方法及其应用 [J]. 振动与冲击 2007 , 26(2) : 10 - 14.
DUAN Chen-dong , HE Zheng-jia. Fault feature extraction method using the lifting wavelet transform and its applications [J]. Journal of Vibration and Shock , 2007 , 26(2) : 10 - 14.

[13] 陈果. 滚动轴承早期故障的特征提取与智能诊断 [J]. 航空学报 2009 , 30(2) : 362 - 367.
CHEN Guo. Feature extraction and intelligent diagnosis for ball bearing early faults [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica , 2009 , 30(2) : 362 - 367.

[14] 高立新,殷海晨,张建宁,等. 第二代小波分析在滚动轴承故障诊断中的应用 [J]. 北京工业大学学报 2009 , 35(5) : 577 - 581.
GAO Li-xin , YIN Hai-chen , ZHANG Jian-ning. An application of the second generation of wavelet transform in the fault diagnosis of rolling bearings [J]. Journal of BeiJing University of Technology , 2009 , 35(5) : 577 - 581.

[15] The case western reserve university bearing data center website. Bearing data center seeded fault test data [EB/OL]. [http : // www/ eecs/ cwru/ edu/ labora2tory/ bearing/ 2007211227](http://www/eecs/cwru/edu/labora2tory/bearing/2007211227).