DOI: 10.3901/JME.2014.10.001

基于小波脊线的多分量信号瞬时参数估计及应用*

张 焱 汤宝平 邓 蕾

(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400030)

摘要: 通过分析小波脊线与信号瞬时幅值和瞬时频率的关系, 提出一种基于能量重心脊点定位策略的脊线跟踪提取算法实现多分量信号瞬时参数估计。针对小波脊线提取中定中心频率参数优化方法优化复 Morlet 小波参数存在的局限性问题, 提出中心频率自适应参数优化方法优化复 Morlet 小波参数并计算归一化小波尺度谱, 根据能量重心脊点定位策略定位小波脊点, 配合局部方向估计算法实现小波脊线迭代跟踪提取, 进而估计信号瞬时参数。仿真分析表明该算法具有良好的抗噪特性, 齿轮箱和滚动轴承的故障诊断工程实例结果表明该方法可有效提取旋转机械故障振动信号的特征。

关键词: 参数优化; 脊点定位; 脊线跟踪; 瞬时参数

中图分类号: TH115

Instantaneous Parameter Estimation of Multi-component Signals Using Wavelet Ridges and Its Application

ZHANG Yan TANG Baoping DENG Lei

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030)

Abstract: After analyzing the relationship between the wavelet ridge and the instantaneous amplitude and frequency of the signal, a new ridge tracking algorithm which based on energy centrobaric ridge point detection method is proposed to estimate the instantaneous parameters of multi-component signal. A new parameter optimization method which changes the centre frequency of complex Morlet wavelet adaptively is brought forward to overcome the limitations that exist in the parameter optimization method with fixed center frequency, then the factors of complex Morlet wavelet are optimized through the new parameter optimization method and normalized wavelet scalogram is obtained. Combining with local direction computation algorithm, energy centrobaric ridge point detection method is employed to track ridges and compute instantaneous parameters of signal. Simulation results show that the algorithm is insensitive to noise, the result of fault diagnosis in gearbox and rolling bearing show that the features of fault vibration signals of rotating machinery can be extracted effectively by using the proposed method.

Key words: parameter optimization; ridge point detection; ridge tracking; instantaneous parameter

0 前言

当旋转机械元件出现局部故障时, 故障振动信号常表现为多分量的调幅调频信号, 该类信号具有的时变特征与系统物理结构及其状态紧密相关, 准确获取信号分量瞬时特征具有重要意义^[1-3]。瞬时幅值、瞬时频率常用于描述信号瞬时特征^[4], 常用的信号瞬时幅值和瞬时频率估计方法有以下几种: ① Hilbert 变换, 该方法适用于单分量信号瞬时参数估计; ② Hilbert-Huang 变换, 适用于多分量信号瞬时参数估计, 但缺乏有效的理论支撑, 对某些多分

量信号不能完全分离^[2]; ③ 小波脊线, 该方法通过小波变换获得时间尺度谱, 再利用时间尺度谱上提取得到的的小波脊线估计信号分量瞬时幅值和瞬时频率^[3-4, 6]。相比于前两种方法, 基于小波脊线的瞬时参数估计具有更高的估计精度, 而且具有更好的抗噪性能。

为精确获取信号瞬时参数, 需要从构建合适的分析小波及小波脊线提取两方面入手。为了获得时频聚集性良好的时间尺度谱, 文献[7]给出小波脊线应用框架下分析小波的构建原则。蒋永华等^[8]利用最小 Shannon 熵方法优化分析小波参数, 但忽略了小波脊线应用框架下复 Morlet 小波中心频率与带宽之间的制约关系。为实现脊线提取, CARMONA 等^[9]研究了基于马尔科夫链蒙特卡罗算法的多脊线提取算法, 该方法通过权重密度函数和特定的链接

* 国家自然科学基金(51275546)、重庆市自然科学杰出青年基金计划(CQ cstc2011jjq70001)和高等学校博士点专项科研基金(20130191150001)资助项目。20130508 收到初稿, 20131120 收到修改稿

程序逐个提取脊线,效果较好,但作者指出该算法计算量大。ÖZTÜRK 等^[10]提出一种基于惩罚函数极小化的脊线提取算法,其提取精度随着原信号信噪比的降低急剧下降。MAIO 等^[11]提出一种直接灰度提取算法用于指纹提取,取得了较好效果,但其轮廓规范化操作计算量大,而且以局部极大值点作为指纹纹理容易受到噪声干扰。

因此,上述处理方法不适于基于小波脊线的信号瞬时参数估计。本文在对比分析常用小波性能后,选取复 Morlet 小波作为分析小波,并在小波脊线应用框架下分析复 Morlet 小波中心频率与带宽之间存在的制约关系,指出定中心频率参数优化的局限性,给出中心频率自适应参数优化规则;提出一种基于能量重心原理的脊点定位策略,并配合脊点局部方向估计算法实现小波脊线的迭代跟踪提取。仿真分析表明,本文方法能较精确地估计信号分量瞬时参数且抗噪性能良好。最后,将本文方法用于齿轮箱和滚动轴承故障诊断,结果表明该方法能有效提取振动信号中的故障特征。

1 小波脊线理论

单分量实信号 $f(t)$ 表示为

$$f(t) = A(t) \cos(\phi(t)) \quad (1)$$

式中 $A(t)$ ——瞬时幅值, $A(t) \geq 0$;

$\phi(t)$ ——瞬时相位, $\phi(t) \in [0, 2\pi)$ 。

其解析信号定义为

$$Z_f(t) = (1 + iH)f(t) = A_f(t) \exp(i\phi_f(t)) \quad (2)$$

式中, H 为信号的 Hilbert 变换。特别地,若 $f(t)$ 为渐进信号,有 $A(t) \approx A_f(t)$, $\phi(t) \approx \phi_f(t)$ 。

若 $Z_\varphi(t)$ 为近似解析小波,即

$$Z_\varphi(t) = \varphi(t) \exp(i\omega_0 t) \quad (3)$$

式中 $\varphi(t)$ ——实对称窗函数;

ω_0 —— $Z_\varphi(t)$ 的中心频率。

$f(t)$ 关于解析小波 $Z_\varphi(t)$ 的连续小波变换为 $W_f(b, a)$, 即^[12]

$$\begin{aligned} W_f(b, a) &= \langle f, Z_{\varphi(b, a)} \rangle = \frac{\sqrt{a}}{2} A_f(b) \times \exp(i\phi_f(b)) \times \\ &\quad [\hat{\varphi}(a[\xi - \phi'_f(b)]) + \varepsilon(b, \xi)] \quad (4) \\ Z_{\varphi(b, a)}(t) &= \frac{1}{\sqrt{a}} Z_\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \\ \phi'_f(b) &= \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_f}{dt} \end{aligned}$$

式中 a ——尺度参数;

b ——平移参数;

$$\xi = \frac{\omega_0}{a};$$

$\hat{\varphi}(\omega)$ —— $\varphi(t)$ 的傅里叶变换, $\varepsilon(b, \xi)$ 为校正项。

信号 $f(t)$ 归一化小波尺度谱定义为^[12]

$$PW_f(b, a) = \frac{|W_f(b, a)|^2}{a} = \frac{1}{4} A_f^2(b) |\hat{\varphi}(a[\xi - \phi'_f(b)]) + \varepsilon(b, \xi)|^2 \quad (5)$$

当 $Z_\varphi(t)$ 具有良好的时频局部化性能,且满足 $\phi'_f(b) \geq \Delta\omega/a$ 时,校正项可以被忽略^[12],其中 $\Delta\omega$ 为式(6)确定的带宽

$$|\hat{\varphi}(\omega)| \ll |\hat{\varphi}(0)| \quad |\omega| \geq \Delta\omega \quad (6)$$

此时, $PW_f(b, a)$ 在任意点 b 于

$$\xi(b) = \omega_0/a(b) = \phi'_f(b) \quad (7)$$

处取得一极大值,定义该极大值对应时频点 $(b, a(b))$ 为小波脊点,由点 $(b, a(b))$ 构成的集合称为小波脊线。小波脊点位置归一化尺度谱表示为

$$PW_f(b, a) = \frac{1}{4} A_f^2(b) |\hat{\varphi}(0)|^2 \quad (8)$$

当提取得到小波脊线后,根据式(7)和式(8)可计算渐进信号 $f(t)$ 在时刻 t 的瞬时幅值(包络幅值) $A_f(t)$ 和瞬时频率 $\phi'_f(t)$

$$A_f(t) = 2\sqrt{PW_f(t, a(t))}/|\hat{\varphi}(0)| \quad (9)$$

$$\phi'_f(t) = \omega_0/a(t) \quad (10)$$

由于小波变换是线性变换,信号各主分量将分别对应一显著脊线,因此,信号各分量的瞬时幅值和瞬时频率可通过提取相应的小波脊线获得。

2 分析小波及其参数优化

复小波变换使得信号能量集中于瞬时频率点局部邻域内,更利于基于小波脊线的信号瞬时参数估计。选择工程中常用且在时域与旋转机械故障振动信号通常的冲击衰减波形具有良好匹配的复 Gaussian 小波、复 Morlet 小波及复 Shannon 小波进行分析。图 1 给出了这三类复小波在相同支撑区间 $[-8, 8]$ 、相同带宽 $\Delta\omega=2\text{ Hz}$ 和相同中心频率 $\omega_0=2\text{ Hz}$ 下的归一化幅频特性,从图 1 可知,复 Morlet 小波在频域中单峰且高斯窗函数的外形更符合小波脊线分析中小波构建原则^[7]。

复 Morlet 小波定义为

$$Z_\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} \exp\left(-\frac{t^2}{f_b}\right) \exp(j\omega_0 t) \quad (11)$$

式中 ω_0 ——小波中心频率;
 f_b ——带宽参数。

图 1 三类复小波幅频特性

在信号检测及故障诊断中, 往往希望能够突出特征成分而抑制无关成分, 这就要求选择的参数对 (f_b, ω_0) 能使复 Morlet 小波与特征成分具有最大相似性。

2.1 定中心频率参数优化的局限性

文献[8]提出一种定中心频率参数优化方法。该方法以 Shannon 小波熵作为评价标准, 通过将小波中心频率 ω_0 设为常数, 在一定范围内改变 f_b , 求取每一带宽参数 f_b 对应的 Shannon 小波熵, 使得小波熵最小的 f_b 即为优化小波形状参数。

由于小波脊线应用框架下复 Morlet 小波中心频率与带宽之间存在制约关系, 导致定中心频率参数优化存在一定局限性。具体说明如下。

令式(6)中 $|\hat{\phi}(\omega)|/|\hat{\phi}(0)| \leq K$ (K 为常数, $K \ll 1$), 对于某一脊线, K 越小其提取过程受邻近脊线的影响越小。将式(11)进行傅里叶变换后代入式(6), 得带宽

$$\Delta\omega \geq \sqrt{-16 \ln K / f_b} \quad (12)$$

在小波脊点邻域内, 由式(7)和校正项 $\varepsilon(b, \xi)$ 可忽略条件 $\phi'_f(b) \geq \Delta\omega/a$ 得 $\omega_0 \geq \Delta\omega$, 从而有

$$\omega_0 \geq \sqrt{-16 \ln K / f_b} \quad (13)$$

由式(13)知, 对于定常数 K , 中心频率 ω_0 固定时, 只有一定范围内的 f_b 能满足上述关系。因此, 复 Morlet 小波参数优化时, 设定复 Morlet 小波中心频率 ω_0 为常数存在一定局限性。

2.2 中心频率自适应参数优化

复 Morlet 小波中心频率与带宽参数不仅应满足式(13)的约束关系, 而且小波函数 $Z_\varphi(t) \in L^2(R)$ 应满足或近似满足“容许性条件” $\int_{-\infty}^{+\infty} Z_\varphi(t) dt = 0$, 即 $\omega_0 \geq 5$ 。

基于上述分析, 提出一种中心频率自适应参数优化方法对复 Morlet 小波进行参数优化: 在一定范围内改变分析小波形状参数 f_b , 同时根据中心频率设定规则

$$\omega_0 \geq \max(5, \sqrt{-16 \ln K / f_b}) \quad (14)$$

设定复 Morlet 小波中心频率, 寻找合适参数对 (f_b, ω_0) 使复 Morlet 基小波与信号特征成分具有最大相似性。

当小波基与信号特征成分相似时, 特征成分在时间尺度平面表现为良好时频聚集性的能量块, 反之, 信号特征成分能量发散到时间尺度平面^[8], 而根据熵理论, 熵值的大小表示了概率分布的均匀性, 最不确定的概率分布具有最大的熵值, 从而由小波变换系数处理所得概率分布序列的熵值可反映小波基与信号特征成分的相似性程度。故选择 Shannon 小波熵作为中心频率自适应参数优化方法评价标准, 当 Shannon 小波熵最小时对应的基小波就是与特征成分最匹配的自适应小波, 该基小波参数对 (f_b, ω_0) 即为最优小波参数。

3 脊线跟踪提取

在时频聚集性良好的归一化小波尺度谱上, 信号各主要分量表现为突出且以时间为走向的时频山脉脊线^[13]。在归一化小波尺度谱中某时间点的脊线位置作“切片”处理能够获得信号能量在瞬时频率附近的分布, 理想情况下, 脊点为与脊线方向垂直的“切片”截面上的局部极大值点, 称该“切片”截面为脊线截面。因此, 获取以时间为走向的时频山脉脊线各脊线截面内的脊点, 然后进行连接即可形成脊线。

3.1 基于能量重心的脊点定位

假设信号归一化小波尺度谱为 $M \times N$ 矩阵, $(i, j) (i \in [1, M], j \in [1, N])$ 为矩阵元素, 其幅值为 $I(i, j)$ 。脊线跟踪提取示意图如图 2 所示, 脊线截面可通过垂直于脊线方向的平面对脊线作“切片”处理得到。脊点 $P_c(i_c, j_c)$ 位置的脊线截面 $\gamma((i_c, j_c), \vartheta)$ 与水平方向夹角为 ϑ , $\gamma((i_c, j_c), \vartheta)$ 包含的时频点集定义为

$$\begin{cases} \Omega = \{(i, j) | (i, j) \in \text{seg}((i_s, j_s), (i_e, j_e))\} \\ (i_s, j_s) = (\text{round}(i_c - L_1 \cos \vartheta), \text{round}(j_c - L_1 \sin \vartheta)) \\ (i_e, j_e) = (\text{round}(i_c + L_2 \cos \vartheta), \text{round}(j_c + L_2 \sin \vartheta)) \end{cases} \quad (15)$$

式中, seg 为依次取时频面上点 (i_s, j_s) 到点 (i_e, j_e) 连线上的所有点; (i_s, j_s) 与 (i_e, j_e) 分别为脊线截面在时频面投影的两端点; round 表示四舍五入取整运算。 L_1 是满足 $I(i_s, j_s) \geq c \times I(i_c, j_c)$ 的最大正整数, L_2 是满足 $I(i_e, j_e) \geq c \times I(i_c, j_c)$ 的最大正整数, $c \in (0, 1)$ 为常数。

根据式(5)易知, 理想情况下, 脊线截面关于中

(a) 脊线提取示意图

(b) 脊线截面示意图

图2 脊线跟踪提取示意图

心线对称, 局部极大值点恰好对应脊点所在时频位置, 如图2b虚线所示, 但由于噪声等的影响, 实际脊线截面局部极大值点常常偏离中心位置, 故直接以局部极大值点作为小波脊点将出现误差。同时, 脊线截面能量重心的位置矢量由其所含时频点集加权平均各点幅值后得到, 故脊线截面内少量奇异点对能量重心的精确估计影响甚微。

自点 (i_s, j_s) 到点 (i_e, j_e) 按序排列 Ω 中各点分别记为 $(i_1, j_1), (i_2, j_2), \dots, (i_n, j_n)$, 设 m 为脊线截面能量重心在点集 Ω 中的位置索引, 有

$$\sum_{k=1}^n I(i_k, j_k) \times (k-m) \approx 0 \quad (16)$$

求解 m 得

$$m = \frac{\sum_{k=1}^n k \times I(i_k, j_k)}{\sum_{k=1}^n I(i_k, j_k)} \quad (17)$$

从而, 脊线截面内脊点所在时频位置为 (i_m, j_m) 。实际脊线提取过程中, 并不能预先确定 P_c , 而只能以其估计值 P'_c 作为脊点位置求取脊线截面, 进而在脊线截面内计算脊点 P_c 。

3.2 脊线提取

图2a中, P_b 为提取到的前一脊点, θ_b 为 P_b 点脊线方向, P'_c 为由 θ_b 确定的中间点, P_c 为脊线截面 $\gamma((i_c, j_c), \theta)$ 处真实脊点, P'_c 和 P_c 位于同一截面 $\gamma((i_c, j_c), \theta)$ 上。基于能量重心的脊点定位可精确定位每一截面上的小波脊点, 下面采用脊线跟踪提取算法实现时频面内所有脊点的迭代提取, 具体步骤如下。

(1) 将归一化小波尺度谱 PW 所有矩阵元素设置为未处理状态。

(2) 按列优先原则扫描矩阵元素 $(i, j) (i \in [1, M], j \in [1, N])$ 。若 (i, j) 已处理或 (i, j) 不

为极大值点, 则扫描下一矩阵元素, 否则步骤如下。

1) 记录当前扫描点 Q 为 (i, j) , 以直接梯度计算法^[11]估计起始脊线方向 θ_b , 令 P_b 为 (i, j) 。

2) 从 P_b 点沿 θ_b 方向前进单位步长 μ 至点 P'_c , 按式(15)确定脊线截面 $\gamma((i_c, j_c), \theta)$, 依据式(17)定位脊点 P_c 。

3) 将脊线截面 $\gamma((i_c, j_c), \theta)$ 及其步长 μ 邻域内所有点标记为已处理; 以最小方差准则与梯度计算法^[14]估计 P_c 点脊线方向 θ_c 。

4) 若 $I(i_c, j_c)/I(i_b, j_b) < C_m$ (C_m 为预先设定的阈值), 结束当前脊线的脊点迭代操作, 转步骤(2), 扫描点 Q 下一元素; 否则, 令 $P_b = (i_c, j_c)$, $\theta_b = \theta_c$, 转步骤(2)。

选取合适阈值 C_m , 用上述算法可有效提取归一化小波尺度谱中的小波脊线。然而实际提取得到的脊线中存在能量微弱脊线, 这极有可能是由于噪声所引起, 需要予以剔除, 仅保留能量占优脊线。

4 仿真信号分析

本节通过以下几组仿真试验验证本文方法的有效性: ① 复Morlet小波参数优化方法性能比较; ② 脊线提取算法性能比较; ③ 基于能量重心脊点定位策略的脊线跟踪提取算法抗噪性能分析。

4.1 复Morlet小波参数优化方法性能比较

利用仿真信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 验证中心频率自适应参数优化方法的有效性, 并和定中心频率参数优化方法进行比较。信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 表达式为

$$x(t) = x_a(t) + x_b(t) + x_c(t) + x_d(t) + n(t)$$

$$x_a(t) = \sin[2\pi(240t + 25t^2) + 5\sin 5\pi t]$$

$$x_b(t) = 1.2 \times \sin[2\pi(200t + 25t^2)]$$

$$x_c(t) = (1 + 0.5\sin 10\pi t) \times \sin(300\pi t + \sin 20\pi t)$$

$$x_d(t) = (1.2 + 0.6\sin 10\pi t) \times \sin(240\pi t + \sin 20\pi t)$$

式中, $n(t)$ 为方差为1的白噪声, 信号信噪比SNR为10 dB。

$$y(t) = \exp[-20 \times (t - 0.2)^2] \times \cos[300\pi(t - 0.2)] +$$

$$\exp[-20 \times (t - 0.5)^2] \times \cos[400\pi(t - 0.5)] +$$

$$\exp[-20 \times (t - 0.8)^2] \times \cos[300\pi(t - 0.8)]$$

仿真信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的采样频率为1 000 Hz, 采样点数同为1 000点。选用复Morlet小波作为母小波, 对 $x(t)$ 、 $y(t)$ 进行连续小波变换, 分析频率范围设为[100, 300] Hz。分别用定中心频率参数优化方法($\omega_0=5$)、中心频率自适应参数优化方法

($K=0.01$)优化复 Morlet 小波参数, 两种参数优化方法得到的优化参数对(f_b, ω_0)如表 1 所示。

表 1 不同参数优化方法得到的优化参数对

参数优化方法	优化参数对(f_b, ω_0)	
	信号 $x(t)$	信号 $y(t)$
中心频率自适应参数优化方法	(4.2, 5.0)	(2.6, 5.3)
定中心频率参数优化方法	(4.2, 5.0)	(2.2, 5.0)

对于信号 $x(t)$, 两种参数优化方法的结果相同, 这是因为最优形状参数 f_b 满足 $\sqrt{-16\ln K/f_b} < 5$, 即满足式(14)中中心频率取定值的条件。对于信号 $y(t)$, 最优形状参数 f_b 不再满足中心频率取定值条件, 故两种方法所得优化参数对(f_b, ω_0)不同。两种参数优化方法得到的归一化小波尺度谱如图 3 所示, 从图 3 可以看出, 中心频率自适应参数优化方法所得时频谱相比定中心频率参数优化方法所得时频谱具有更高时频聚集性, 信号冲击性特征成分更为明显。

图 3 两种参数优化方法所得时频谱

4.2 脊线提取算法性能比较

为分析验证脊线提取算法的性能, 采用三种脊线提取算法: ① 基于能量重心脊点定位策略的脊线跟踪提取算法(以下简称脊线跟踪提取算法); ② 基于马尔科夫链蒙特卡洛算法的多脊线提取算法(以下简称 Carmona 算法); ③ 基于惩罚函数极小化的脊线提取算法(以下简称 Öztürk 算法); 对第 4.1 节中 $x(t)$ 优化参数对下归一化小波尺度谱进行脊线提取, 并依据式(9)、(10)计算信号各分量的瞬时幅值及瞬时频率分别如图 4~6 所示。对比图 4~6 可知, 脊线跟踪提取算法比较准确地提取到了信号中的瞬时幅值、瞬时频率信息, 而且曲线更加光滑, 运算效率也较高(在同一计算机上, 脊线跟踪提取算法、Carmona 算法(系统温度低于初始温度的 15%时迭代终止)及 Öztürk 算法的运行时间分别为 1.76 s, 15.32 s 和 1.49 s)。

(a) 脊线跟踪提取算法所得瞬时幅值

(b) 脊线跟踪提取算法所得瞬时频率

图 4 脊线跟踪算法结果

1. $x_a(t)$ 分量 2. $x_b(t)$ 分量 3. $x_c(t)$ 分量 4. $x_d(t)$ 分量

(a) Carmona 算法所得瞬时幅值

(b) Carmona 算法所得瞬时频率

图 5 Carmona 算法结果

1. $x_a(t)$ 分量 2. $x_b(t)$ 分量 3. $x_c(t)$ 分量 4. $x_d(t)$ 分量

(a) Öztürk 算法所得瞬时幅值

(b) Öztürk 算法所得瞬时频率

图 6 Öztürk 算法结果

1. $x_a(t)$ 分量 2. $x_b(t)$ 分量 3. $x_c(t)$ 分量 4. $x_d(t)$ 分量

4.3 脊线跟踪提取算法抗噪性能分析

为分析本文方法在不同信噪比下的性能, 改变第 4.1 节中信号 $x(t)$ 的信噪比, 利用中心频率自适应参数优化方法优化复 Morlet 小波参数, 得到优化参数状态下的归一化小波尺度谱, 利用脊线跟踪提取算法提取信号各分量对应脊线并获得其瞬时幅值及瞬时频率。采用文献[1]中关于抗噪性能分析的评价方法, 对每一信噪比下的瞬时幅值与瞬时频率计算其相对误差和标准差, 结果如图 7 所示。从图 7 可知, 在信噪比为 -10 dB 时, 幅值相对误差和频率相对误差仍分别低于 0.18 和 0.14 , 而且信号信噪比从 20 dB 降至 0 dB 这一过程中, 瞬时幅值及瞬时频率估计精度基本不受影响; 同时, 调频信号成分 $x_a(t)$ 、 $x_b(t)$ 的瞬时幅值、瞬时频率估计精度明显高于调幅调频分量 $x_c(t)$ 、 $x_d(t)$ 的参数估计精度。比较图 7a 与图 7c, 图 7b 与图 7d 可知, 瞬时频率估计精度相比于瞬时幅值估计精度更高, 这是因为瞬时频率计算仅依赖于脊点位置信息, 而瞬时幅值依赖于脊点位置信息和脊点处归一化小波尺度谱幅值。

图 7 不同信噪比下相对误差和标准差

1. $x_a(t)$ 分量 2. $x_b(t)$ 分量 3. $x_c(t)$ 分量 4. $x_d(t)$ 分量

5 应用

5.1 齿轮箱故障诊断

齿轮箱中齿轮发生故障时, 会出现以啮合频率及其谐波为载波频率的幅值调制和频率调制现象, 实测振动信号是典型的多分量信号, 且各信号分量包含故障特征信息。因此, 可以利用小波脊线提取某一分量瞬时幅值和瞬时频率, 进一步对其进行频谱分析便能实现故障诊断。

在两级变速齿轮箱故障试验台上进行试验。一

级传动齿轮齿数分别为 32、96, 二级传动齿轮齿数为 48、80, 总传动比为 5, 齿数为 48 的中间轴齿轮的一个齿存在断齿缺陷。在齿轮箱外壳输入轴端获取振动加速度信号, 拾取的振动加速度信号时域波形如图 8 所示, 信号采样频率为 $(200/3)$ kHz, 输入轴转频 $f_i = 35$ Hz。图 9 为该振动加速度信号的幅值谱, 从图 9 中可见, 一级和二级传动齿轮啮合频率及其倍频位置具有明显的边频族, 采用脊线跟踪提取算法提取一级传动齿轮啮合频率簇位置能量最大的脊线的瞬时幅值和瞬时频率分别如图 10a 和图 10b 所示, 瞬时频率在一级传动齿轮啮合频率 ($1\ 120$ Hz) 局部邻域内波动说明提取得到的瞬时参数与预期提取结果相吻合。对图 10a 所示瞬时幅值进行频谱分析得到瞬时幅值的频谱如图 11 所示, 图 9 中一级传动齿轮啮合频率簇具有最大幅值, 且图 11 中中间轴转频 f_n 及其 2 倍频、3 倍频处存在明显的谱线, 因此, 可初步判定齿轮箱中间轴上某一齿轮出现故障, 与实际情况相符。

图 8 齿轮箱振动信号时域波形

图 9 齿轮箱振动信号幅值谱

(a) 齿轮箱信号分量瞬时幅值

(b) 齿轮箱信号分量瞬时频率

图 10 脊线跟踪算法结果

图 11 齿轮箱信号分量瞬时幅值的频谱

5.2 滚动轴承故障诊断

滚动轴承损伤引起的脉冲冲击力将激起轴承系统高频固有振动, 该高频振动幅值受到脉冲冲击力的调制。此外, 故障振动信号的能量也主要集中于这一包含故障信息的调幅信号分量中。故可利用小波脊线提取滚动轴承故障振动信号的特征。

在滚动轴承故障试验台上使用具有内圈故障的 SKF6205-2RS 型深沟球轴承进行试验。图 12 是拾取到的振动加速度信号的时域波形, 信号采样频率为 12 kHz, 轴承转频 $f_r=29.95$ Hz, 计算得到该型号轴承内圈故障特征频率 $f_c=162.18$ Hz。采用脊线跟踪提取算法获取固有振动频率簇位置能量最大的脊线, 得到的信号分量瞬时幅值如图 13 所示, 图 14 为信号分量瞬时幅值的频谱, 在图 14 中内圈故障特征频率 f_c 及其 2 倍频、3 倍频处存在明显谱线, 由此可判定滚动轴承出现了内圈故障, 与实际情况相符。

图 12 内圈故障滚动轴承振动信号时域波形

图 13 轴承信号分量瞬时幅值

图 14 轴承信号分量瞬时幅值的频谱

6 结论

(1) 提出一种基于能量重心脊点定位策略的脊线跟踪提取算法实现多分量信号的瞬时幅值和瞬时频率估计。脊线截面能量重心脊点定位策略的引入极大地抑制了噪声干扰, 同时避免了单一依靠脊线方向估计进行脊线提取时方向估计偏差的累积效应和后向传播。

(2) 在小波脊线应用框架下, 根据复 Morlet 小波中心频率与形状参数间的制约关系, 以最小 Shannon 熵作为评价标准, 分析给出复 Morlet 小波中心频率自适应参数优化方法, 实现了分析小波与信号特征成分的最佳匹配。

(3) 仿真试验表明了本文方法对信号分量瞬时参数估计的有效性及其良好的抗噪性能。在齿轮箱和滚动轴承故障诊断中的应用结果表明, 该方法可有效提取旋转机械故障振动信号中的故障特征。

参 考 文 献

- [1] ROUX S G, CENIER T, GARCIA S, et al. A wavelet-based method for local phase extraction from a multi-frequency oscillatory signal[J]. Journal of Neuroscience Methods, 2006, 160(2007): 135-143.
- [2] BELTRÁN J R, LEÓN J P. Estimation of the instantaneous amplitude and the instantaneous frequency of audio signals using complex wavelets[J]. Signal Processing, 2010, 90(12): 3093-3109.
- [3] 秦毅, 秦树人, 毛永芳. 基于小波脊线的解调方法及其在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 231-242.
- [4] QIN Yi, QIN Shuren, MAO Yongfang. Demodulation approach based on wavelet ridge and its application in fault diagnosis of rotating machinery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 231-242.
- [5] 刘小峰, 柏林, 彭春阳. 基于瞬时参数估计的信号分量提取[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(1): 32-35.
- [6] LIU Xiaofeng, BO Lin, PENG Chunyang. Extraction of signal component using instantaneous parameter estimation[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(1): 32-35.
- [7] TANG Baoping, LIU Wenyi, SONG Tao. Wind turbine fault diagnosis based on Morlet wavelet transformation and Wigner-Ville distribution[J]. Renewable Energy, 2010, 35(2): 2862-2866.
- [8] RIHACZEK A W. Signal energy distribution in time and

- frequency[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1968, 3: 369-374.
- [7] HO K C, PROKOPIW W, CHAN Y T. Modulation identification of digital signals by the wavelet transform[J]. IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2000, 147(4): 169-176.
- [8] 蒋永华, 汤宝平, 刘文艺, 等. 基于参数优化 Morlet 小波变换的故障特征提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1): 56-60.
- JIANG Yonghua, TANG Baoping, LIU Wenyi, et al. Feature extraction method based on parameter optimized Morlet wavelet transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(1): 56-60.
- [9] CARMONA R A, HWANG W L, TORRÉSANI B. Characterization of signals by the ridges of their wavelet transforms[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(10): 2586-2590.
- [10] ÖZTÜRK M, AKAN A. Local instantaneous frequency estimation of multi-component signals[J]. Computers and Electrical Engineering, 2008, 34(4): 281-289.
- [11] MAIO D, MALTONI D. Direct gray-scale minutiae detection in fingerprints[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(1): 27-40.
- [12] MALLAT S. A wavelet tour of signal processing[M]. 2nd ed. New York: Academic Press, 1998.
- [13] 柏林, 刘小峰, 秦树人. 基于时频脊线的瞬时频率特征提取[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 222-227.
- BO Lin, LIU Xiaofeng, QIN Shuren. Extraction of instantaneous frequency characteristic using time-frequency ridges[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(10): 222-227.
- [14] DONAHUE M J, ROKHLIN S I. On the use of level curves in image analysis[J]. Image Understanding, 1993, 57(2): 185-203.

作者简介: 张焱, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为信号分析与处理、故障诊断等。

E-mail: zhang_y@aliyun.com

汤宝平(通信作者), 男, 1971 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为设备状态监测与故障诊断、虚拟仪器、无线传感器网络等。

E-mail: bptang@cqu.edu.cn