

文章编号:1000-8055(2012)01-0069-06

基于 IHT 的共振解调技术的滚动轴承故障诊断方法

邓四二, 王 勇, 王恒迪

(河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 针对传统解调方法在滚动轴承振动信号故障特征提取中的局限性, 在迭代 Hilbert 变换和共振解调技术基础上, 提出了一种新的基于迭代希尔伯特变换(iterated Hilbert transform, 简称 IHT)的共振解调技术的滚动轴承故障诊断方法. 采用 IHT 将原始振动信号分解为若干个含有故障特征信息的包络幅值分量, 然后用共振解调法去除残余的高频干扰噪声并求得各个包络分量的倍频谱, 利用轴承理论故障频率与共振解调得到的各倍频进行对比分析, 诊断出滚动轴承相应的故障类型. 轴承故障实例诊断分析结果表明该方法能有效地提取轴承故障特征.

关 键 词: 迭代希尔伯特变换(IHT); 共振解调技术; 滚动轴承; 振动信号; 故障诊断

中图分类号: TH165

文献标志码: A

Resonance demodulation technique based on IHT for rolling bearings fault diagnosis

DENG Si-er, WANG Yong, WANG Heng-di

(School of Mechatronics Engineering,

Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: Aiming at the limitations of traditional demodulation methods for extracting the fault feature of rolling bearing vibration signal, combining iterated Hilbert transform (IHT) with resonance demodulation technique, a new method about rolling bearing fault diagnosis was proposed. Firstly, the original vibration signal was decomposed into some component signals of envelope amplitude by iterated Hilbert transform, which contain fault characteristics; then, the high frequency interference noise was eliminated and frequency multiplication spectrum was obtained by resonance demodulation technique; finally, fault type was determined by contrast with theoretical fault frequency. The experimental results show that the approach can be applied to the roller bearings fault diagnosis effectively.

Key words: iterated Hilbert transform (IHT); resonance demodulation technique; rolling bearing; vibration signal; fault diagnosis

当滚动轴承出现故障时,其振动信号大都是非平稳的多分量调制信号,这种调制信号中包含着丰富的故障信息.为了提取振动信号的故障特

征,需要先分离出振动信号的各个分量,再对其进行解调分析^[1].共振解调法^[2-3]在目前的滚动轴承故障诊断中得到了广泛应用,它利用带通滤波器

收稿日期:2011-01-28; 修订日期:2011-06-10

基金项目:国家“十一五”科技攻关项目(JPPT-115-189)

作者简介:邓四二(1963—),男,江苏丹阳人,教授、博士生导师,博士,研究方向为滚动轴承设计及理论、滚动轴承测试技术和滚动轴承试验技术. E-mail: dse@mail. haust. edu. cn

将故障冲击引起的高频固有振动分离出来,再通过低通滤波降低高频噪声的干扰,然后对解调后的信号进行频谱分析即可诊断出故障部位。但共振解调法采用的包络检波方法(例如, Hilbert 变换^[4]和能量算子解调法^[5-7])不能将多分量的振动信号分解成单分量的调制信号,尽管通过合适的带通滤波器组可以分离出振动信号的各个分量,但是带通滤波器的中心频率和带宽往往很难确定,滤波后信号的幅值和相位都发生了变化,会造成很大的解调误差,从而无法准确地提取故障特征。Hilbert-Huang 变换^[8-11]能够自适应地将非平稳信号分解为若干个调幅或调频的内禀模态函数(intrinsic mode function, 简称 IMF)分量之和,再通过对 IMF 分量进行 Hilbert 变换来诊断故障类型,然而边界效应和 IMF 分量的判据等问题大大限制了 Hilbert-Huang 变换的应用。

IHT (iterated Hilbert transform) 是由秦毅^[12], Gianfelici F 等^[13]提出的一种新的多分量信号解调方法,它能够弥补传统共振解调法在多分量信号解调分析中的不足,而且与 Hilbert-Huang 变换相比, IHT 计算量较小且具有更高的解调精度。鉴于此,本文提出了一种基于 IHT 的共振解调方法,用 IHT 将滚动轴承振动信号分解为若干幅值包络分量,然后通过低通滤波消除高频干扰噪声,再进行频谱分析求得包络幅值分量的各倍频,并与理论故障特征频率对比诊断出故障部位。理论分析及试验结果分析表明:本方法能够精确地将多分量调制信号解调为各个幅值包络分量,比共振解调法、Hilbert-Huang 变换法等传统解调方法更能有效地提取出轴承故障特征。

1 基于 IHT 的共振解调技术的 轴承故障诊断法

1.1 IHT

IHT 通过循环迭代进行 Hilbert 变换的方式从原始信号中分离出若干个包络幅值分量。另外, IHT 也能求出包络分量的瞬时频率,但本文方法是利用 IHT 求得的包络分量的幅值进行故障诊断的,瞬时频率的求解方法见文献^[8-9],本文不再赘述。

设多分量调制信号 $x(t)$ 可以表示为如下形式:

$$x(t) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i(t) \cos[\varphi_i(t)] \quad (1)$$

其 IHT 的实现过程如下:

1) 通过 Hilbert 变换求出多分量调制信号

$x(t)$ 的原始包络幅值 $a_0(t)$ 。若 $x(t)$ 的 Hilbert 变换定义为

$$H[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (2)$$

则原始信号的幅值包络为

$$a_0(t) = \sqrt{x^2(t) + H^2[x(t)]} \quad (3)$$

2) 通过对包络幅值 $a_0(t)$ 进行高通滤波得到迭代分量 $a_1(t)$, 为了保证下次迭代的收敛性, $a_1(t)$ 应为一零均值振荡信号, 且 $a_1(t)$ 的能量小于 $a_0(t)$ 能量的一半, 即

$$k = \frac{P_1}{P_0} \leq \frac{1}{2} \quad (4)$$

式中 k 表示高通滤波前后的能量变化, P_0 和 P_1 分别为 $a_0(t)$ 和 $a_1(t)$ 的能量。

3) 求得第 1 个包络幅值分量 $b_0(t)$ 为

$$b_0(t) = a_0(t) - a_1(t) \quad (5)$$

4) 对迭代分量 $a_1(t)$ 重复步骤 1)~3), 得到第 2 个包络幅值分量 $b_1(t)$, 循环迭代 n 次, 则可求得多分量调制信号 $x(t)$ 的第 i 个迭代分量 $a_i(t)$ 和第 j 个包络幅值分量 $b_j(t)$, 即

$$a_0(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) + \sum_{j=0}^{n-1} b_j(t) \quad (6)$$

当 n 趋向无穷大时, $a_i(t)$ 趋向于 0, 迭代过程结束。

为了实现 IHT 的循环迭代, 必须设计合适的截止频率, 使高通滤波后得到的迭代分量收敛。本文设计的高通滤波器为一个参数固定的有限长单位冲击响应滤波器(finite impulse response, 简称 FIR), 其截止频率是根据步骤 2) 中迭代分量 $a_1(t)$ 收敛性的两个条件确定的, 为了使迭代分量 $a_i(t)$ 为一零均值振荡信号, 需要使 $a_i(t)$ 的平均值趋近于 0, 即

$$\overline{a_i(t)} \approx 0 \quad (7)$$

为了使 $a_{i+1}(t)$ 的能量小于 $a_i(t)$ 能量的一半, 即满足式(4), 设 FIR 高通滤波器的传递函数为 $G(f)$, 则 $a_{i+1}(t)$ 的傅里叶变换可表示为

$$A_{i+1}(f) = A_i(f)G(f) \quad (8)$$

式中 $A_{i+1}(f)$ 和 $A_i(f)$ 分别为 $a_{i+1}(t)$ 和 $a_i(t)$ 的傅里叶变换。

设 $a_i(t)$ 和 $a_{i+1}(t)$ 的能量 P_i 和 P_{i+1} 分别定义如下:

$$P_i = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |A_i(f)|^2 df \quad (9)$$

$$P_{i+1} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |A_{i+1}(f)|^2 df = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |A_i(f)G(f)|^2 df \quad (10)$$

则式(4)可以表示为如下形式:

$$k = \frac{P_{i+1}}{P_i} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |A_i(f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} |A_{i+1}(f)|^2 df} \leq \frac{1}{2} \quad (11)$$

FIR 高通滤波器截止频率 f_k 的确定方法是: 给定一个初始截止频率 f_0 , 若迭代分量 $a_i(t)$ 满足式(7)和式(11)时, 则 FIR 高通滤波器的截止频率为 f_0 ; 若不满足, 则通过不断地增大或者减小 f_0 , 直到循环 k 次, 使 f_k 满足式(7)和式(11)时为止, 此时截止频率为 f_k . 当 FIR 高通滤波器的截止频率确定之后, 就可以通过 IHT 从多分量信号中按能量从大到小的顺序分解出若干个幅值包络分量.

1.2 基于 IHT 的共振解调技术的轴承故障诊断方法

尽管 IHT 能够把非平稳的振动信号分解为若干幅值包络分量, 但是由于残余高频噪声的干扰, 很难直接从 IHT 求得的单分量幅值包络信号中提取出故障特征. 共振解调法利用传感器的谐振将故障冲击振动放大, 能够滤除噪声的干扰, 但不足之处是对多分量的振动信号解调误差较大.

因此, 本文将共振解调法和 IHT 相结合, 提出了一种新的基于 IHT 的共振解调法的滚动轴承故障诊断算法, 首先不再进行带通滤波和 Hilbert 变换, 而是用 IHT 将轴承原始振动信号分解为若干单分量的包络幅值分量, 然后用低通滤波器消除残余高频噪声对各个包络幅值分量的干扰, 再进行频谱分析以求得包络幅值分量的各倍频, 并与轴承理论故障特征频率对比诊断出轴承产生故障部位, 具体诊断流程如图 1 所示.

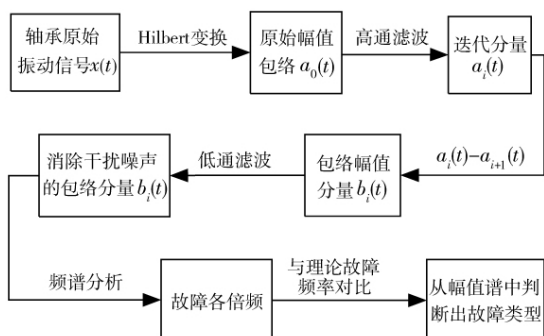


图 1 基于 IHT 的共振解调技术

Fig. 1 Resonance demodulation technique based on IHT

2 基于 IHT 的共振解调技术的仿真分析

下面以一个仿真信号来分析图 1 所示方法的有效性. 仿真信号 $x(t)$ 如下:

$$x(t) = [1 + 0.5\cos(2\pi 5t)] \times \cos[2\pi 300t + 1.5\cos(2\pi 8t)] + 0.35\sin(2\pi 850t)$$

$x(t)$ 的时域波形如图 2(a) 所示, 它由一个调制信号和一个正弦信号组成. 调制信号由频率为 300 Hz 的高频载波信号与频率为 5 Hz 的余弦信号相乘得到的, 正弦信号的幅值为 0.35, 频率为

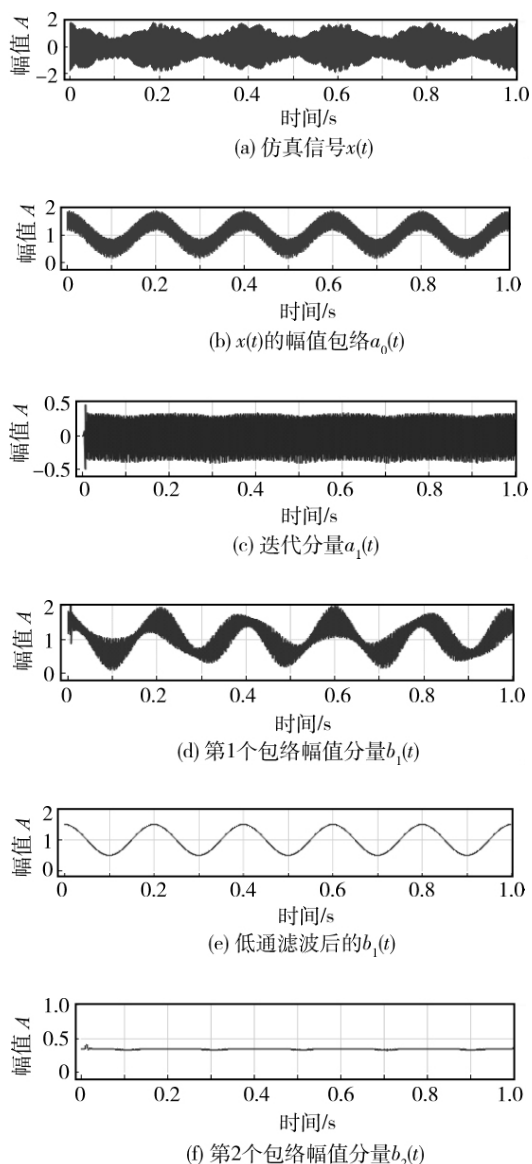


图 2 仿真信号及其幅值包络分量

Fig. 2 Simulation signal and its envelope amplitude component

850 Hz. 信号的采样频率为 2 000 Hz, 采样点数为 2 000. 仿真分析的目的是应用基于 IHT 的共振解调法从 $x(t)$ 中解调出幅值为 1.5, 频率为 5 Hz 的余弦信号成份, 并且求出频率为 850 Hz 的正弦信号的幅值包络.

图 2(b)所示的时域波形是对 $x(t)$ 直接进行 Hilbert 变换求得的幅值包络信号, 从图中可以看出, 频率为 5 Hz 的余弦信号受到了高频信号的干扰很难被识别出来, 说明 Hilbert 变换对多分量调制信号的解调误差较大. 图 2(c)是高通滤波的截止频率为 200 Hz 时, 第 1 次 IHT 求得的迭代分量, 从图中可以看出该迭代分量为一个零均值的振荡信号. 图 2(d)是用 IHT 求得的第 1 个幅值包络分量, 该包络分量仍旧受到残余高频信号的干扰. 图 2(e)是采用低通滤波器(截止频率为 100 Hz)去除残余高频干扰信号后得到的幅值包络分量, 从图中可以清晰地看到两个波峰的时间间隔为 0.2 s, 即频率 5 Hz 的余弦信号成份已经完全被提取出来. 对图 2(e)继续进行 IHT, 并低通滤波后得到第 2 个幅值包络分量, 如图 2(f)所示, 从图中可以看到幅值为 0.35, 因此, 第 2 个包络分量即为 850 Hz 正弦信号的幅值包络.

仿真分析的结果表明基于 IHT 的共振解调法不仅和 Hilbert-Huang 变换一样能够将多分量信号分解成若干个幅值包络分量, 而且能够有效地消除噪声干扰, 提高了解调精度.

3 实验验证

实验轴承型号为 6203 和 6011, 其中 6203 的内径为 17 mm, 外径为 40 mm, 钢球直径为 6.747 mm, 钢球个数为 8; 6011 的内径为 60 mm, 外径为 110 mm, 钢球直径为 15.08 mm, 钢球个数为 10. 根据 6203 和 6011 的基本参数求得的理论故障频率如表 1 所示.

表 1 6203 和 6011 的理论故障频率

Table 1 Theoretical fault frequency of 6203 and 6011

轴承 型号	内圈故障频率 f_i /Hz	外圈故障频率 f_o /Hz	钢球故障频率 f_b /Hz
6203	147.92	92.08	60.98
6011	176.61	123.39	81.88

按照国标 JB/T 5313-2001 规定的滚动轴承振动速度测量方法, 在 BVT-1A 型测振仪上对这两种型号的轴承进行了振动测量, 测振仪主轴转

速为 1 800 r/min, 然后通过数据采集卡将振动速度信号转换为数字信号传送至计算机上作进一步的信号分析, 振动信号采样频率为 40 000 Hz, 采样点数为 5 000. 下面是测振仪上输出的 6203 和 6011 的 4 种典型振动信号的分析结果.

图 3 是一个外圈有轻微损伤的 6203 型轴承的振动速度信号 $x_1(t)$. 图 4 是应用共振解调法求得 $x_1(t)$ 的包络频谱, 该频谱图中没有明显的谱线, 因而无法判断轴承是否存在故障.

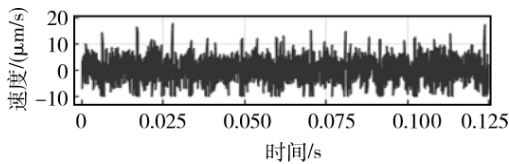


图 3 外圈轻微损伤的 6203 轴承时域振动信号 $x_1(t)$

Fig. 3 Time domain signal of the outer ring of 6203 bearing with slight fault

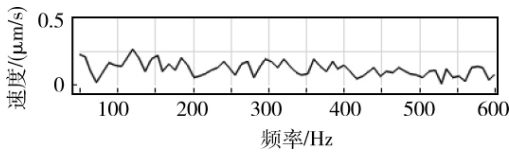
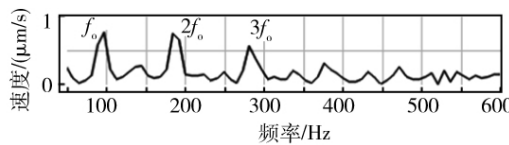


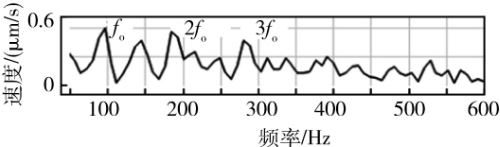
图 4 采用共振解调法求出的 $x_1(t)$ 包络谱

Fig. 4 Amplitude spectrum of $x_1(t)$ using resonance demodulation technique

图 5 是用 Hilbert-Huang 变换求出 $x_1(t)$ 的前两个 IMF(intrinsic mode function)分量的幅值谱, 图 5(a)是第 1 个 IMF 分量的幅值谱, 图中出现了 3 个明显的谱峰, 通过计算的 6203 理论外圈故障频率可知, 这 3 个谱峰分别对应外圈故障频率的 1 倍频(92.08 Hz)至 3 倍频的谐波谱峰, 而



(a) 第 1 个 IMF 分量的幅值谱



(b) 第 2 个 IMF 分量的幅值谱

图 5 采用 Hilbert-Huang 变换求出的 $x_1(t)$ 幅值谱

Fig. 5 Amplitude spectrum of $x_1(t)$ using Hilbert-Huang transform

图 5(b) 所示的第 2 个 IMF 分量的幅值谱却很难分辨出谐波谱峰,可见 Hilbert-Huang 变换用于滚动轴承故障诊断有一定的局限性。

图 6 是采用基于 IHT 的共振解调技术求得 $x_1(t)$ 的前两个幅值包络分量的倍频图,其中高通滤波的截止频率为 500 Hz。从图 6(a)和图 6(b)这两个倍频图上都可以看到出现了外圈故障频率的 1 倍频(92.08 Hz)至 6 倍频的谐波谱峰,因此可以断定轴承外圈有故障。

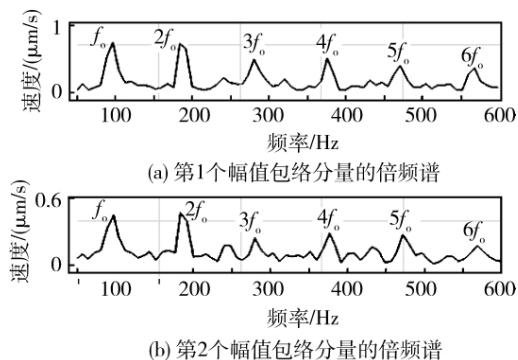


图 6 基于 IHT 的共振解调法求出的 $x_1(t)$ 倍频图

Fig. 6 Frequency multiplication of $x_1(t)$ using resonance demodulation technique based on IHT

从图 4~图 6 的分析结果看出,与共振解调法和 Hilbert-Huang 变换的解调分析结果相比,基于 IHT 的共振解调法具有更高的解调精度,能够更准确地诊断出轴承故障。

图 7(a)是内圈故障的 6203 型轴承的时域振动信号,图 7(b)和图 7(c)是采用基于 IHT 的共振解调法求出的两个幅值包络分量的倍频图,其中高通滤波的截止频率为 500 Hz。与 6203 的理论内圈故障频率对比可知,图 7(b)和图 7(c)中出现的 3 个谱峰分别对应内圈故障频率的 1 倍频(147.92 Hz)至 3 倍频的谐波频率,因此可以判断轴承内圈有故障。

图 8(a)是钢球故障的 6011 型轴承的时域振动信号,图 8(b)和图 8(c)是采用基于 IHT 的共振解调法求出的两个幅值包络分量的倍频图,其中高通滤波的截止频率为 470 Hz。与 6011 的理论钢球故障频率对比可知,图 8(b)和图 8(c)中出现的 7 个谱峰分别对应内圈故障频率的 1 倍频(81.88 Hz)至 7 倍频的谐波频率,因此可以判断轴承钢球有故障。

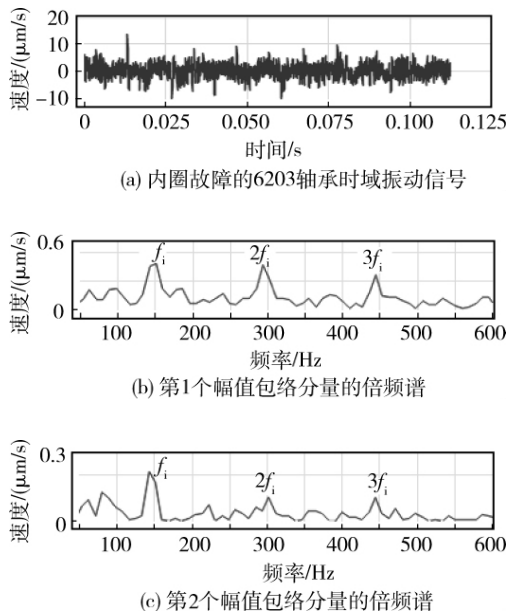


图 7 内圈故障的 6203 轴承时域信号及倍频图

Fig. 7 Time domain signal of the fault inner ring of 6203 rolling bearing

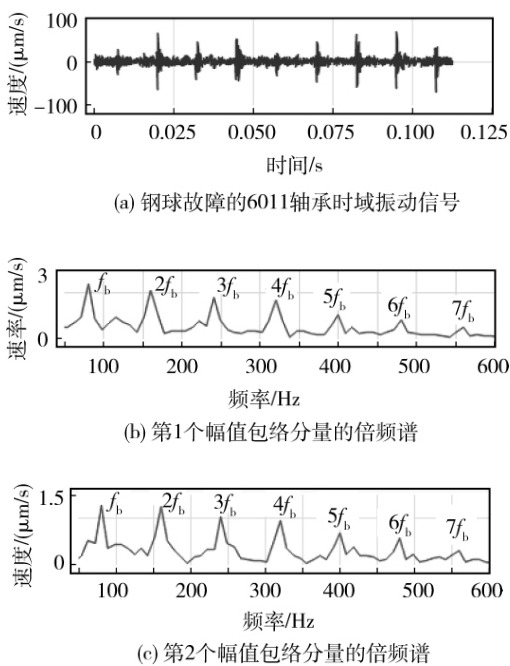


图 8 钢球故障的 6011 轴承时域信号及倍频图

Fig. 8 Time domain signal of the fault ball of 6011 rolling bearing

图 9(a)是无故障的 6011 时域振动信号,图 9(b)是基于 IHT 的共振解调法求出的第 1 个幅值包络分量的倍频图,其中高通滤波的截止频率为 470 Hz。图 9(b)中没有明显的谱峰出现,因此可以确定轴承无故障。

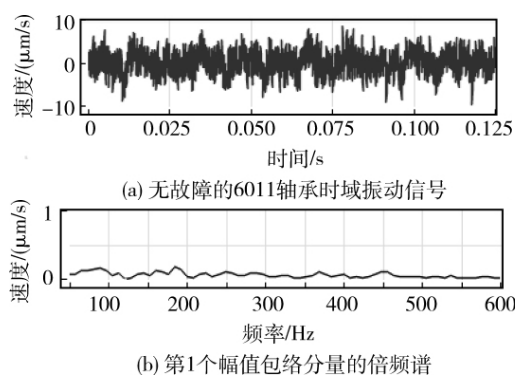


图 9 无故障的 6011 轴承时域信号及倍频图

Fig. 9 Time domain signal of no fault inner ring of 6011 rolling bearing

4 结 论

本文提出了一种新的基于 IHT 的共振解调技术的滚动轴承故障诊断方法, 本方法能够将多分量信号分解为若干个单分量的幅值包络分量, 并抑制了高频噪声对振动信号的影响, 提高了解调精度。由共振解调法、Hilbert-Huang 变换和本文所提出的基于 IHT 的共振解调法进行对比分析可知: 基于 IHT 的共振解调方法能够比传统解调方法更准确地提取出滚动轴承故障特征, 可有效地提高滚动轴承故障诊断的准确性。

参考文献:

- [1] 干敏梁, 刘红星. 关于振动加速度信号幅值解调的五种方法[J]. 振动与冲击, 2000, 19(1): 32-33.
GAN Minliang, LIU Hongxing. The five amplitude demodulation ways about vibration acceleration signal[J]. Journal of Vibration and Shock, 2000, 19(1): 32-33. (in Chinese)
- [2] 刘亚娟, 乔亚敏. 基于软件共振解调分析的滚动轴承故障诊断系统开发[J]. 仪器仪表与检测技术, 2004, 23(11): 64-66.
LIU Yajuan, QIAO Yamin. The software system for the rolling bearing fault diagnosis based on resonance-demodulation[J]. Instrumentation and Measurement, 2004, 23(11): 64-66. (in Chinese)
- [3] 王平, 廖明夫. 滚动轴承故障诊断的自适应共振解调技术[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 606-612.
WANG Ping, LIAO Mingfu. Adaptive demodulated resonance technique for the rolling bearing fault diagnosis[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 606-612. (in Chinese)
- [4] 周向, 陈锋, 吴庆华, 等. Hilbert 变换在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 湖北工业大学学报, 2008, 23(5): 40-43.

- ZHOU Xiang, CHEN Feng, WU Qinghua, et al. Application of Hilbert-Huang transform to faults diagnosis of rolling bearing[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2008, 23(5): 40-43. (in Chinese)
- [5] Teager H M. Some observations on oral air flow during phonation[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1980, 28(5): 599-601.
- [6] Maragos P, Kaiser J F, Quatieri T F. Energy separation in signal modulations with application to speech analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(10): 3024-3051.
- [7] 武和雷, 朱善安, 林瑞仲, 等. 基于能量算子解调的滚动轴承故障诊断方法[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 118-120.
WU Helei, ZHU Shan'an, LIN Ruizhong, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on the energy operator demodulation approach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(1): 118-120. (in Chinese)
- [8] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1998, 454: 903-995.
- [9] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of non-linear water waves; the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31(3): 417-457.
- [10] 程军圣, 于德介, 杨宇. 基于 EMD 和 SVM 的滚动轴承故障诊断方法[J]. 航空动力学报, 2006, 21(3): 575-580.
CHENG Junsheng, YU Dejie, YANG Yu. Fault diagnosis of roller bearings based on EMD and SVM[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(3): 575-580. (in Chinese)
- [11] 于德介, 程军圣, 杨宇. 基于 Hilbert 边际谱的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2005, 24(1): 70-72.
YU Dejie, CHENG Junsheng, YANG Yu. Roller bearing fault diagnosis based on hilbert marginal spectrum[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(1): 70-72. (in Chinese)
- [12] 秦毅, 王家序, 汤宝平. 基于迭代 Hilbert 变换的多分量信号解调方法研究及应用[J]. 机械工程学, 2009, 45(8): 37-44.
QIN Yi, WANG Jiaxu, TANG Baoping. Multicomponent demodulation based on iterated Hilbert transform and its application[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 37-44. (in Chinese)
- [13] Gianfelici F, Biagetti G, Crippa P, et al. Multicomponent AM-FM representations; an asymptotically exact approach[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2007, 15(3): 823-837.