

基于延拓和窗函数的 HHT 端点效应改进方法

时培明^{1,2}, 李 庚^{1,2}, 韩东颖³, 刘 彬²

(1. 燕山大学测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 3. 燕山大学车辆与能源学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为了克服 Hilbert-Huang 变换中的端点效应问题,提出了一种基于延拓和窗函数综合应用的端点效应改进方法。通过先对信号进行相似极值延拓再进行加余弦窗函数的处理,解决了延拓部分不精确和加窗函数后使原信号发生改变的问题,在一定程度上克服了 EMD 方法的端点效应问题,得到更准确 IMF 的同时也可以通过 Hilbert 变换得到更准确的边界谱和 Hilbert 谱。通过用于仿真信号和裂纹转子故障信号的分析证明该方法有良好效果。

关键词: 计量学; Hilbert-Huang 变换; 端点效应; 相似极值延拓; 余弦窗函数

中图分类号: TB973

文献标识码: A

文章编号: 1000-1158(2013)05-0491-06

Extension and Window Function Based Improve Method for End Effects of Hilbert-Huang Transform

SHI Pei-ming^{1,2}, LI Geng^{1,2}, HAN Dong-ying³, LIU Bin²

(1. Key Lab. of Meas Tech and Instrum of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

3. Institute of of Vehicles and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: To overcome the end effects of Hilbert-Huang transform, on the basis of existing method to solve the problem, an extension and window function improve method for end effects was proposed. Through the first to signal with similar extreme a extension and then processing by cosine window function, the inaccuracy of extension and original signal changed because of window function are solved. In a certain degree, the end effects of EMD is overcome, getting more the IMF, meanwhile, through the Hilbert transformation get more accurate boundary spectrum and Hilbert spectrum. It is used in the simulation signal and the cracked rotor fault signal analysis proves that the method has a good effect.

Key words: Metrology; Hilbert-Huang transform; End effects; Similar extreme a extension; Cosine window function

1 引 言

转子不对中、转轴裂纹、动静碰摩、旋转失速等均是旋转机械常见故障。这些故障信号大部分是非线性、非平稳的,并且包含着丰富的故障信息。如何从非线性、非平稳信号中提取有用信息一直是国内外学者研究的重点课题。HHT (Hilbert-Huang Transformation)^[1]是近年来发展起来的处理非平稳信号的时频分析方法。该方法克服了传统时频分析方法中的不足,并在机械故障诊断领域得到了广泛应用^[2~4]。但是,此方法在实际应用中还存在一些

问题,其中端点效应问题最为突出^[5,6]。

针对这一问题,许多研究人员提出了一系列抑制端点效应的方法。文献[7]提出镜像闭合延拓法,虽然简单、直观,但是如果信号有较强的不对称性,则会与实际信号有较大出入,引起误差。文献[8]提出时变参数 ARMA 模型法,虽然新颖且有不错效果,但是该方法参数估计比较麻烦且对复杂的非平稳信号有一定局限性。文献[9]提出一种自回归模型法,虽然处理简单、计算效率高,但是该方法属于线性运算,只能对一些简单的非平稳数据序列进行处理,无法适用于复杂的非平稳信号。文献[10]提出一种神经网络法,虽然取得了相对较好的

效果,但该方法需要训练的样本足够多,计算速度慢,耗时多,不易于实时信号处理。另外还有最大 Lyapunov 指数预测延拓法^[11]、相似极值延拓法^[12]、支持矢量回归机法^[13]、指数正弦型延拓法^[14]等,这些方法均各有利弊。

本文提出了一种相似极值延拓和余弦窗函数相结合的 HHT 端点效应处理方法。该方法在保留了延拓方法和窗函数方法优势的基础上,优化了延拓方法有误差和窗函数方法改变原信号的不足,并通过仿真信号和实际的裂纹故障信号进行了验证,获得了良好的试验效果。

2 Hilbert-Huang 变换

Hilbert-Huang 变换是先通过经验模态分解 (EMD, Empirical Mode Decomposition) 将待分析的信号分解为一系列不同尺度的本征模式函数 (Intrinsic Mode Function, 简称 IMF) 信号,使得各个 IMF 分量信号都是平稳的窄带信号,再针对这些 IMF 分量信号进行 Hilbert 变换得到 Hilbert 谱,并将所有的 IMF 分量信号的 Hilbert 谱进行叠加,得到整个待分析信号的 Hilbert 谱。它能准确地反映出该物理过程中能量在空间和时间各种尺度上的分布规律。IMF 信号一般满足两个条件:

① 从全局特性上看,极值点数必须和过零点数一致或者至多相差一个;

② 在某个局部点,极大值包络和极小值包络在该点的算术平均值是零,即两条包络线关于时间轴对称。

和简单的单调函数相比,一个 IMF 代表了一个简单的振动模态,运用 IMF 可以把任何信号 $x(t)$ 按如下步骤进行分解:

(1) 确定信号所有的局部极值点,然后用三次样条线将所有的局部极大值点连接起来形成上包络线。

(2) 用三次样条线将所有的局部极小值点连接起来形成下包络线。上下包络线应该包络所有的数据点。

(3) 上下包络线的平均值记为 m_1 , 求出

$$x(1) - m_1 = h_1 \quad (1)$$

理想地,如果 h_1 是一个 IMF, 那么 h_1 就是 $x(t)$ 的第一个分量。

(4) 如果 h_1 不满足 IMF 的条件,把 h_1 作为原始数据,重复(1)、(2)、(3),得到上下包络线的平均值

m_{11} , 再判断 $h_{11} = h_1 - m_{11}$ 是否满足 IMF 的条件,如不满足,则重复循环 k 次,得到 $h_{1k} = h_{1(k-1)} - m_{1k}$, 使得 h_{1k} 满足 IMF 的条件。记 $c_1 = h_{1k}$, 则 c_1 为信号 $x(t)$ 的第一个满足 IMF 条件的分量。

(5) 将 c_1 从 $x(t)$ 中分离出来,得到

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (2)$$

将 r_1 作为原始数据重复以上过程,得到 $x(t)$ 的第二个满足 IMF 条件的分量 c_2 , 重复循环 n 次,得到信号 $x(t)$ 的 n 个满足 IMF 条件的分量。这样就有

$$\begin{aligned} r_2 &= r_1 - c_2 \\ &\dots\dots \end{aligned} \quad (3)$$

$$r_n = r_{n-1} - c_n$$

当 r_n 成为一个单调函数不能再从中提取满足 IMF 条件的分量时,循环结束。这样由式(2)和式(3)得到

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (4)$$

因此,可以把任何一个信号 $x(t)$ 分解为 n 个内禀模态函数和一个残量 r_n 之和,其中,分量 c_1, c_2, \dots, c_n 分别包含了信号从高到低不同频率段的成分,而 r_n 则表示了信号 $x(t)$ 的中心趋势。

对式(4)中的每个内禀模态函数 $c_i(t)$ 作 Hilbert 变换得到

$$H[c_i(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (5)$$

构造解析信号

$$z_i(t) = c_i(t) + jH[c_i(t)] = a_i(t)e^{j\phi_i(t)} \quad (6)$$

于是得到幅值函数

$$a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + H^2[c_i(t)]} \quad (7)$$

和相位函数

$$\Phi_i(t) = \arctan \frac{H[c_i(t)]}{c_i(t)} \quad (8)$$

进一步可以求出瞬时频率

$$\omega_i(t) = \frac{d\Phi_i(t)}{dt} \quad (9)$$

这样,原始信号就可以表示为:

$$\begin{aligned} x(t) &= \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\phi_i(t)} \\ &= \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \end{aligned} \quad (10)$$

3 HHT 中的端点效应

在 EMD 分解的过程中,由于端点处极值点的不

确定性,每一次样条插值都有拟合误差,随着分解的进行,误差就会由端点处向内逐渐传播,最后在严重的情况下会使分解的数据失去意义。

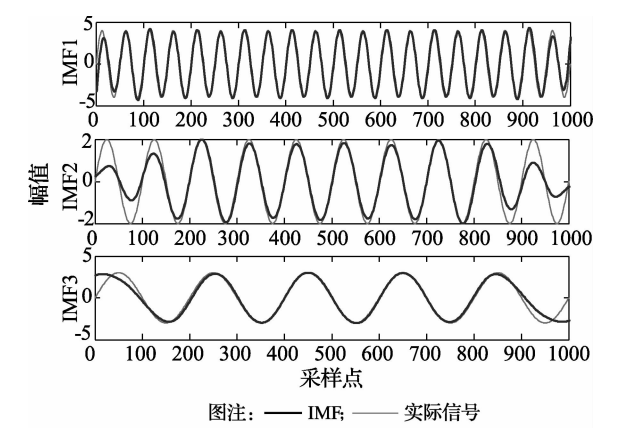


图1 无处理时 $x(t)$ 分解结果

图1为仿真信号 $x(t)$ 的 EMD 分解结果,分解时没有对端点效应进行任何处理。信号 $x(t)$ 的表达式为

$$x(t) = 3 \sin(10\pi t) + 2 \sin(20\pi t) + 4 \sin(40\pi t)$$

由图1所示,信号 $x(t)$ 分解出来的3阶 IMF 都有严重的端点效应。

4 HHT 端点效应的改进方法

相似极值延拓方法是最近被提出来的一种具有很强自适应性的延拓方法。它利用原始数据序列端点处极值点的形状特征和原极值点序列的平均值对端点外的极值点进行延拓。这种方法充分利用了已知极值点的信息,克服了以前方法只依据数据端点处极值点信息进行延拓的缺点。相似极值延拓方法的原理如下:

设离散信号:

$$t = [t_1, t_2, \dots, t_n]$$
$$t_i = t(i) = i \times \Delta t$$
$$i = 1, 2, \dots, n$$
$$X(t) = [x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_n)]$$

共有 n 个离散数据点,其采样步长为 Δt 。 $X(t)$ 有 M 个极大值和 N 个极小值,它们对应的时间为:

$$t_{\max} = [t_{\max(1)}, t_{\max(2)}, \dots, t_{\max(M)}],$$
$$t_{\min} = [t_{\min(1)}, t_{\min(2)}, \dots, t_{\min(N)}]。$$

函数值为:

$$x_{\max} = [x_{\max(1)}, x_{\max(2)}, \dots, x_{\max(M)}],$$
$$x_{\min} = [x_{\min(1)}, x_{\min(2)}, \dots, x_{\min(N)}]。$$

限于篇幅且由于左、右延拓的算法类似,如下只表述左延拓算法:

$$\text{当 } t_{\max(1)} < t_{\min(1)}: \begin{cases} t_{\min(0)} = t_{\max(1)} - [t_{\max(2)} - t_{\min(1)}]; \\ t_{\max(0)} = t_{\min(0)} - [t_{\min(1)} - t_{\max(1)}]; \end{cases}$$

$$\text{当 } t_{\max(1)} > t_{\min(1)}: \begin{cases} t_{\max(0)} = t_{\min(1)} - [t_{\min(2)} - t_{\max(1)}]; \\ t_{\min(0)} = t_{\max(0)} - [t_{\max(1)} - t_{\min(1)}]; \end{cases}$$

$$x_{\min(0)} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{\min(i)}}{N}, \quad x_{\max(0)} = \frac{\sum_{i=1}^M x_{\max(i)}}{M}$$

若在延拓时遇到 $t_{\min(0)} > 0$ 或 $t_{\max(0)} > 0$ 的情况需要继续延拓出 $t_{\min(-1)}$ 或 $t_{\max(-1)}$,方法如下:

$$t_{\min(-1)} = t_{\max(0)} - [t_{\max(1)} - t_{\min(0)}]$$

$$t_{\max(-1)} = t_{\min(0)} - [t_{\min(1)} - t_{\max(0)}]$$

然后在拟合时只用 $t_{\min(-1)}, t_{\max(0), t_1$ 或 $t_{\max(-1), t_{\min(0), t_1}$ 三个点,不再用 $t_{\min(0)}$ 点或 $t_{\max(0)}$ 点。

在给延拓出的点赋值时,若遇到 $x_{\min(0)} > x(t_1)$ 可令 $x_{\min(0)} = x_{\min(1)}$,若 $x_{\max(0)} < x(t_1)$ 可令 $x_{\max(0)} = x_{\max(1)}$ 。

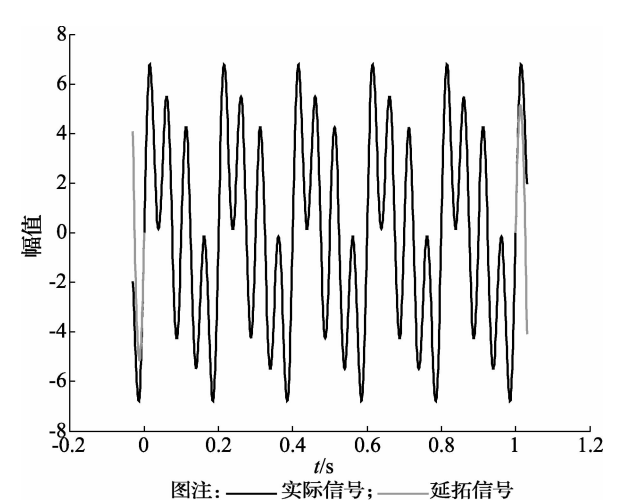


图2 信号 $x(t)$ 的相似极值延拓结果

图2为采用相似极值延拓对信号左右两端点进行延拓处理的结果。由图可以看出延拓部分虽然与实际信号比较接近,但还是存在误差,尤其是越远离两端点的延拓部分误差越大,所以在延拓后要再用窗函数处理。这样可以有效减少误差,控制端点效应向内“污染”,得到更准确的 IMF。

定义余弦窗函数:

$$w(t) = \begin{cases} \sin\left[\frac{\pi t}{2A}\right] & 0 \leq t \leq A \\ 1 & A < t < L - A \\ \cos\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{t - L + A}{A}\right)\right] & L - A \leq t \leq L \end{cases}$$

式中, L 为信号延拓后的长度, A 为信号两端延拓中较长的延拓长度。

余弦窗的形状如图 3 所示。

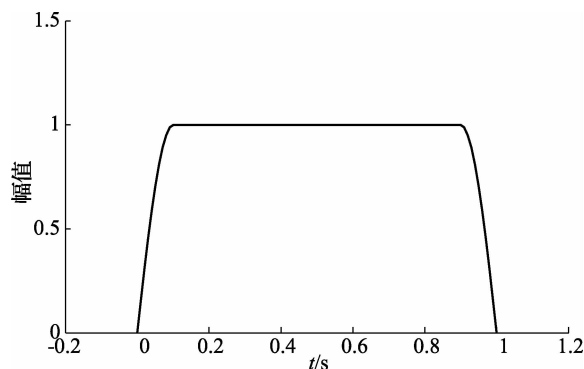


图 3 余弦窗函数

余弦窗函数端点效应处理方法是将其延拓误差“控制”在信号两端,使其无法或以较慢速度向数据内部发展,保证信号中部数据的正确分解。首先,用余弦窗函数 $w(t)$ 对信号 $x(t)$ 进行处理,即将信号与窗函数进行内积运算,得到信号 $y(t) = \langle x(t), w(t) \rangle$ 。

$$y(t) = \begin{cases} x(t) * \sin \left[\frac{\pi t}{2A} \right] & 0 \leq t \leq A \\ x(t) & A < t < L - A \\ x(t) * \cos \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{t - L + A}{A} \right) \right] & L - A \leq t \leq L \end{cases}$$

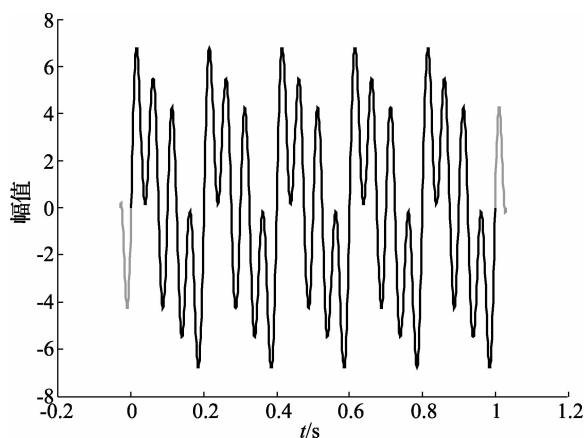
然后,对处理后的信号 $y(t)$ 进行 EMD 分解,再将分解得出的 IMF 的两端去掉相应的延拓部分 A 。最后对减去延拓部分后的 IMF 进行边界谱分析。这种先延拓再用余弦窗函数处理的方法既考虑到了延拓误差的存在又考虑到了信号的完整性,是一种有效的处理 EMD 端点效应的方法。

图 4 为信号 $x(t)$ 延拓后再用余弦窗处理的结果。从图中可以看出延拓的部分逐渐减小直到归零,从而使延拓部分误差减小,为得到更准确的 IMF 提供了可靠条件。

5 仿真实验

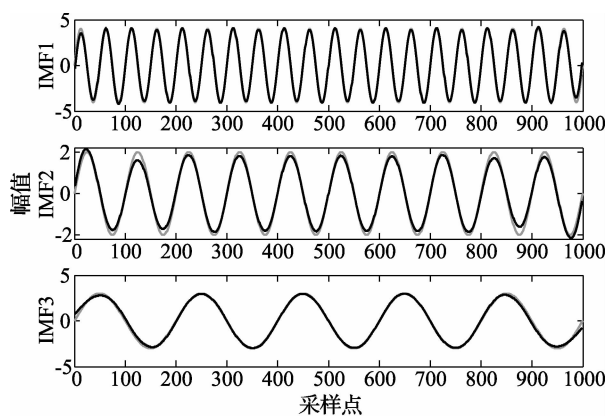
对经过处理的信号 $x(t)$ 进行 EMD 分解得到 3 阶 IMF,并与实际信号作比较如图 5。通过与图 1 对比发现经过延拓加窗处理得到的 IMF 明显更符合实际值,说明该方法对抑制端点效应有良好的效果。

图 6、图 7、图 8 分别是信号 $x(t)$ 不经过处理和用延拓加窗处理得到的 Hilbert 谱、边界谱和



图注:——实际信号;——延拓加窗信号

图 4 信号 $x(t)$ 延拓加窗处理结果



图注:——IMF;——实际信号

图 5 经过处理时 $x(t)$ 分解结果

三维联合时频图。由图 6 可以看出,不经过处理的 Hilbert 谱在信号两端有比较大的失真,这正是由于在此之前的 EMD 过程中端点效应没有处理所造成的。而通过本文方法处理后的 Hilbert 谱效果有明显改善。图 7 中 (a) 的幅值显示,明显有很多微弱振荡,在高频部分尤为明显。通过端点效应处理后得到的边界谱 (b) 中,幅值振荡基本消除,得到了更好的处理效果。从图 8 中也能清楚地看到,未经处理的图像两端有很多离散的能量,而处理后的图像两端能量就相对集中得多,信号失真情况有明显改善。

6 在旋转机械故障诊断中的应用

对于工程实际中的非平稳随机信号,采用延拓加窗的方法来抑制端点效应同样具有良好效果。图 9 是一个含裂纹故障转子的振动信号,转速为 900 r/min,采样频率为 768 Hz。图 10 是信号经过延拓加窗处理后进行 EMD 分解的结果。通过图 10 可以

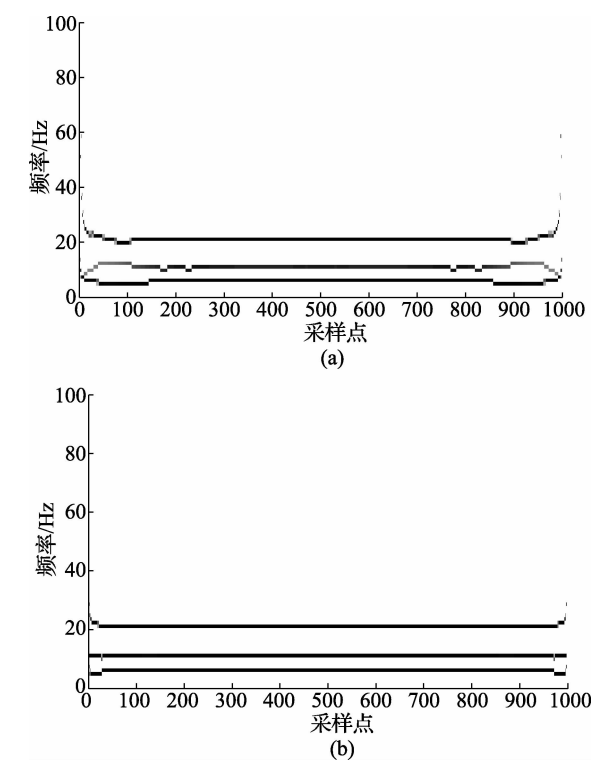


图6 未经处理和经过处理的 Hilbert 谱

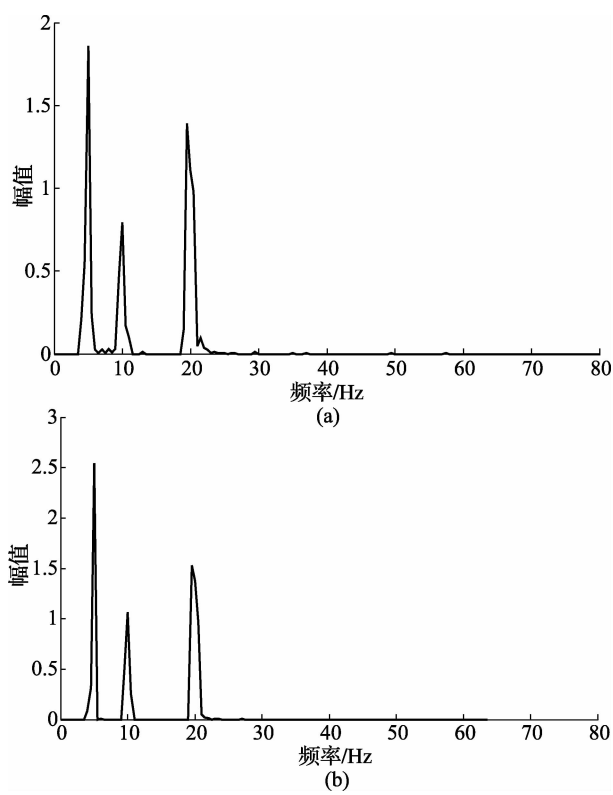


图7 未经处理和经过处理的边界谱

看出,原始信号可得到 5 个 IMF。其中,IMF1 是噪声信号,IMF2、IMF3 是含有裂纹故障特征的转子振动信号,而分量 IMF4、IMF5 则可以认为是由

于自身算法不足而产生的多余分量。

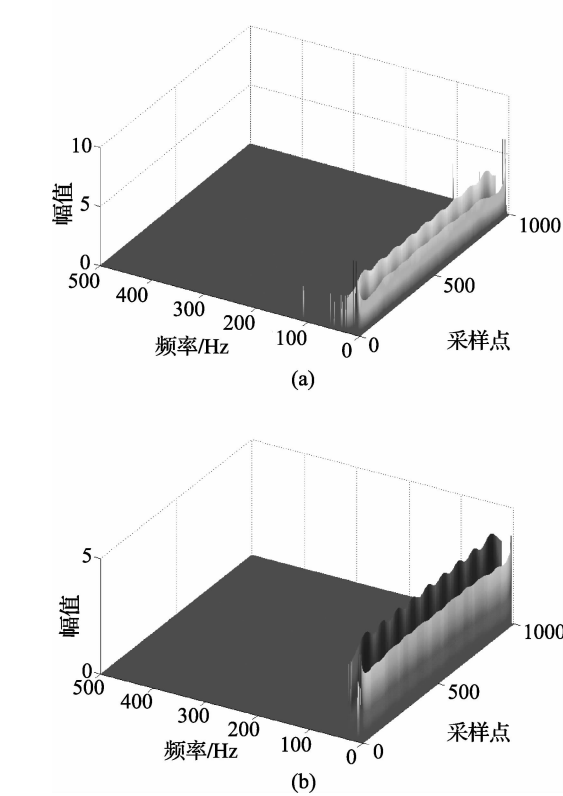


图8 未经处理和经过处理的三维 Hilbert 谱

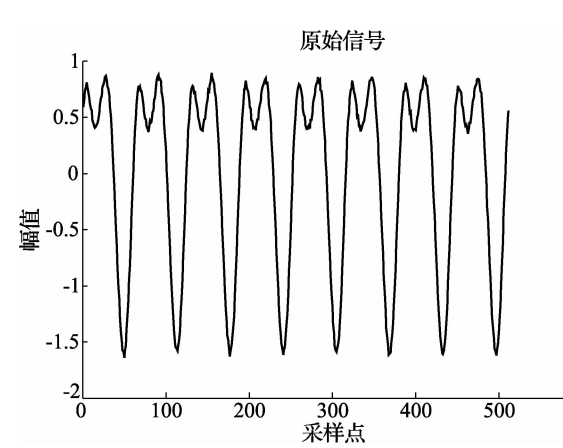


图9 故障信号

由图 11 可以看出,在二倍频处有明显的调频现象,说明该故障可能是不对中或裂纹。由图 12 看出,二倍频处振值很不稳定,所以诊断该转子的故障为裂纹。

7 结 论

(1) 提出了一种克服 Hilbert-Huang 变换中端点效应的新方法。先利用相似极值延拓方法对信号两端进行延拓,再根据延拓情况对信号用余弦窗函数

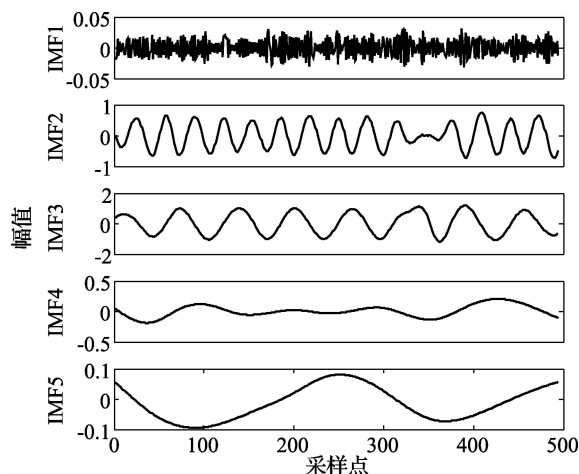


图 10 延拓加窗处理后 EMD 分解的结果

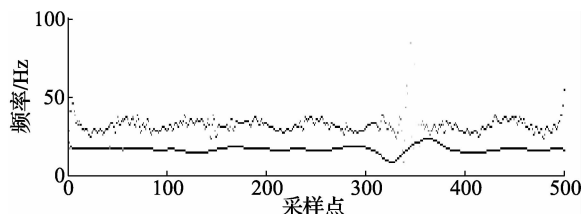


图 11 IMF2 和 IMF3 的 Hilbert 谱

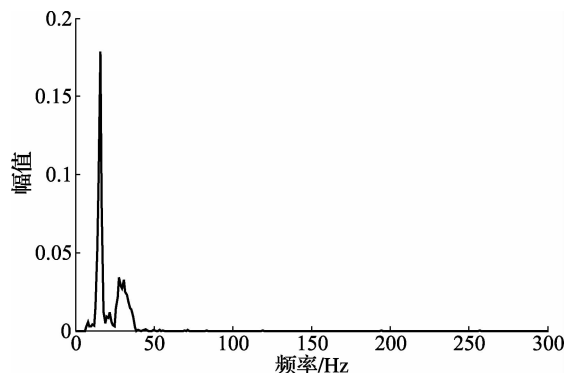


图 12 IMF2 和 IMF3 的边界谱

加以处理,把延拓误差控制在两边。最后在 EMD 分解后去掉两边延拓部分,得到更准确的 IMF。

(2) 通过仿真信号的分析证明该方法能有效地抑制 Hilbert-Huang 变换中的端点效应,为得到准确的边界谱和 Hilbert 谱提供了保障。

(3) 该方法可以应用到旋转机械故障诊断中。通过对含裂纹故障的信号进行分析,证明了该方法能从非线性故障信号中得到真实有用的故障信息,在工程实际上有一定的应用价值。

[参 考 文 献]

[1] Huang N E, Shen Z, Long S R, *et al.* The empirical

mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society London A*, 1998, 454 (1971): 903–995.

[2] 刘彬, 蒋金水, 于伟凯. EMD 相关度去噪及其在轧机信号处理中的应用 [J]. *计量学报*, 2009, 30 (1): 73–77.

[3] 谢平, 王欢, 杜义浩. 基于 EMD 和 Wigner-Ville 分布的机械故障诊断方法研究 [J]. *计量学报*, 2010, 31 (5): 390–394.

[4] Yujun Li, Peter W T, Xin Yang, *et al.* EMD-based fault diagnosis for abnormal clearance between contacting components in a diesel engine [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, 24 (1): 193–201.

[5] 杜陈艳, 张榆锋, 杨平, 等. 经验模态分解边缘效应抑制方法综述 [J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30 (1): 55–60.

[6] Wu F J, Qu L S. An improved method for restraining the end effect in empirical mode decomposition and its applications to the fault diagnosis of large rotating machinery [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 314 (3–5): 586–602.

[7] 韩建平, 钱炯, 董小军. 采用镜像延拓和 RBF 神经网络处理 EMD 中端点效应 [J]. *振动、测试与诊断*, 2010, 30 (4): 414–417.

[8] 程军圣, 于德介, 杨宇. Hilbert-Huang 变换端点效应问题的探讨 [J]. *振动与冲击*, 2005, 24 (6): 40–42.

[9] 王秋生, 段丹辉, 袁梅. 基于 AR 模型包络延拓的经验模态分解 [J]. *数据采集与处理*, 2008, 23 (2): 205–210.

[10] 胡劲松, 杨世锡. EMD 方法基于径向基神经网络预测的数据延拓与应用 [J]. *机械强度*, 2007, 29 (6): 894–899.

[11] 杨永峰, 吴亚峰, 任兴民, 等. 基于最大 Lyapunov 指数预测的 EMD 端点延拓 [J]. *物理学报*, 2009, 58 (6): 3742–3746.

[12] 沈路, 周晓军, 张志刚, 等. Hilbert-Huang 变换中的一种端点延拓方法 [J]. *振动与冲击*, 2009, 28 (8): 168–174.

[13] Cheng J S, Yu D J, Yang Y. Application of support vector regression machines to the recessing of end effects of Hilbert-Huang transform [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21 (3): 1197–1211.

[14] 黄先祥, 李胜朝, 谢建. 新型经验模式分解端点效应消除方法 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44 (9): 1–5.