

管道裂纹漏磁检测信号 WPES 特征提取方法

宋志强¹ 张莹² 张清民³ 王仕军⁴

1. 后勤工程学院军事油料应用与管理工程系, 重庆 401131;

2. 重庆海联职业技术学院民航运输系, 重庆 401120;

3. 中国人民解放军 72283 部队, 山东 烟台 264000;

4. 中国人民解放军 72353 部队, 山东 淄博 255200

摘要:利用小波包能量谱(WPES)对漏磁检测信号进行特征提取是一种有效的信号处理方式,得到广泛应用。但对于管道裂纹缺陷漏磁检测信号而言,其在高频段的信号特征不明显,频谱变化非常分散,特征提取困难。改进后的小波包能量谱及 Wigner-Ville 变换算法即是以连续小波变换和离散小波变换为基本的数学工具,匹配 Wigner-Ville 变换的信号分析算法,在信号处理过程中,将要提取信号的特征值以能量谱的形式进行界定,将特征值的识别与提取转换为对相应信号特征能量识别与提取上,从而提高漏磁检测信号高频段信号特征准确性。

关键词:管道裂纹缺陷;漏磁检测;特征提取;小波包能量谱;Wigner-Ville 变换

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2015.03.005

0 前言

漏磁检测信号为离散的磁信号,其信号的分布为离散分布。而小波变换被誉为“数学上的显微镜”,它可对离散信号进行局部“显微化”,同时,要对漏磁检测得到的磁信号进行特征提取,就要求对信号的局部信息进行充分辨识,只有将其有用的特征信号从少量的信号数据库中提取出来,才能对信号的特征进行处理分析。

1 漏磁检测信号 WPES 特征提取方法

在管道缺陷漏磁检测过程中,对裂纹缺陷磁信号特征值的提取可以将其视之为信号所带能量特征的提取。信号特征值不同,其信号本身携带的能量值也不尽相同,信号频段不同,其携带的信号能量值也不一样,能量值随着信号的变换而发生变化。

在小波分析中,小波包分解是在小波变换多分辨率思想的基础上形成的一种更精细的正交分解方法,它很

好地克服了小波分析过程中对高频部分频率分辨率差的缺点^[1],可以对信号在全频带范围内进行正交分解,在对信号特征分析方面具有较强的自适应性。由小波变换方法可知^[1],如果定义的小波基函数 $\psi(x)$ 是一个允许小波,那么就存在:

$$\int_R da \int_R db |W_\psi f(a,b)/a|^2 = \|f\|_2^2 \quad \forall f \in L^2(R) \quad (1)$$

式中: $f(a,b)$ 为待处理信号函数; a,b 和 t 均是连续变量,且 $a>0$; $W_\psi f(a,b)$ 为小波变换式; $\psi(x)$ 为小波基函数。

式(1)表示信号经过小波变换后,信号的能量与变换前的信号能量具有等价关系^[2]。因而可以利用小波包变换方法对原始信号进行小波包分析,提取信号在不同频段的信号能量分布来表征原始信号的能量分布。

设信号 $x(t)$ 经过小波包变换后,得到一系列子频段信号 $\{x(t)_{i,j,k} | k=1,2,3,\dots,L\}$, 其中 i 为小波包分解层数, j 为信号分解后的频段, $j=0,1,\dots,2^i-1$, L 为各频段

收稿日期:2014-11-12

基金项目:重庆博士后基金资助(XM 2014099)

作者简介:宋志强(1978-),男,山东诸城人,工程师,博士,主要从事油气储运工程、控制技术及系统、化学工程与技术等方面的研究工作。

信号长度。

在第 j 分解尺度下, k 时刻的高频分量系数为 $cD_j(k)$, 低频分量系数为 $cA_j(k)$, c 为数学常数。进行重构后得到信号分量为 $D_j(k)$ 、 $A_j(k)$, 其所包含的信号频带范围为:

$$\begin{cases} A_j(k): [0, 2^{-(j+1)}f_s] \\ D_j(k): [2^{-(j+1)}f_s, 2^{-j}f_s] \end{cases} \quad j = 1, 2, 3, \dots, 2^i - 1 \quad (2)$$

原始信号序列 $x(t)$ 表示为各分量的和, 即:

$$\begin{aligned} x(t) &= D_1(t) + A_1(t) = D_1(t) + D_2(t) + A_2(t) \\ &= \sum_{j=1}^m D_j(t) + A_m(t) \end{aligned} \quad (3)$$

式(2)~(3)中: $x(t)$ 为原始信号; $D_j(k)$, $A_j(k)$ 分别为信号第 j 级频段的高频分量和低频分量; t 为时间变量; f_s 为采样频率。

为统一计算, 将 $A_m(t)$ 表示为 $D_{j+1}(t)$, 则有 $x(t) = \sum_{j=1}^m D_j(t)$, 不同频带能量 $E_j = \sum_{k=1}^N |D_j(k)|^2$ 。

由于不同瞬态下的信号在各频段内的能量分布不同, 进一步求解各子频带信号能量, 并进行归一化处理:

$$E_{i,j} = \sum_{k=1}^L |x(t)_{i,j,k}|^2 / \sum_{j=0}^{2^i-1} \sum_{k=0}^L |S_{i,j,k}|^2 \quad (4)$$

以小波包分解得到的各个子频带的能量元素为分量, 构造出信号 $x(t)$ 的特征向量:

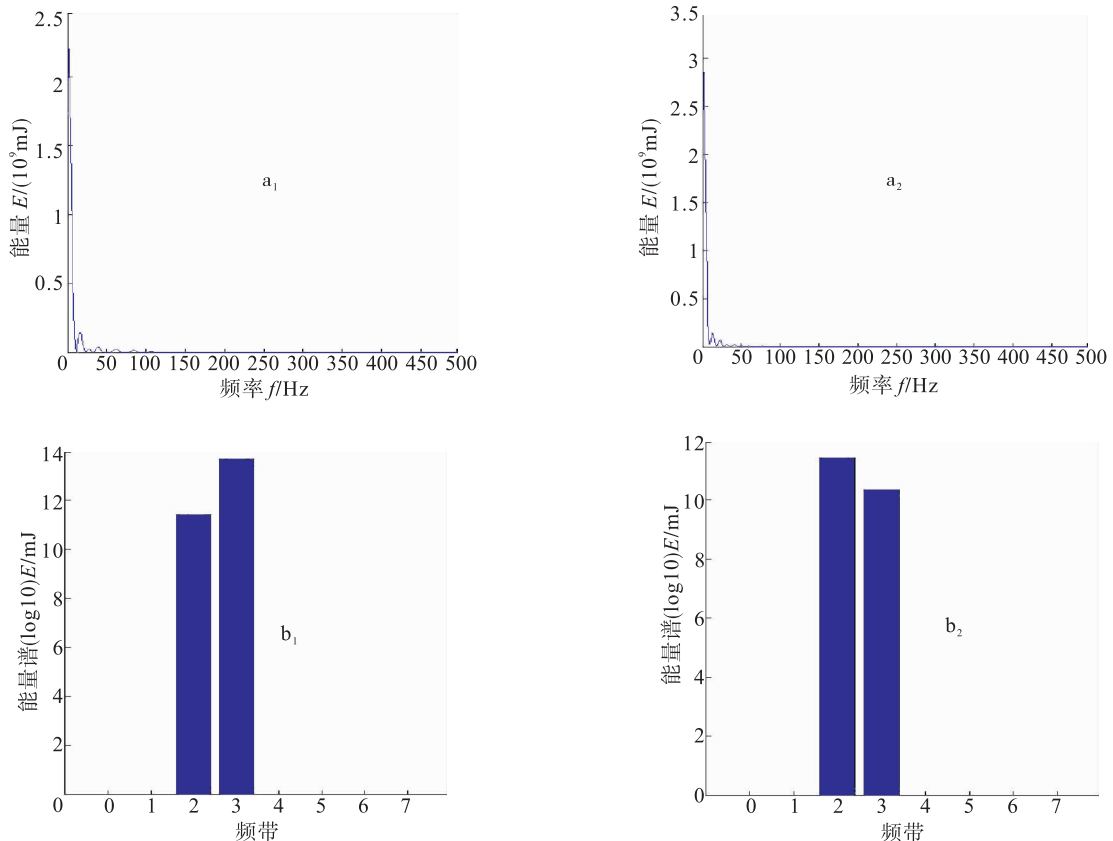
$$T = (E_{i,0}, E_{i,1}, E_{i,2}, \dots, E_{i,2^i-1}) \quad (5)$$

式(4)~(5)中: $E_{i,j}$ 为信号小波包分解第 i 层, 第 j 级频段能量值; T 为信号 $x(t)$ 的小波包能量谱特征向量; $S_{i,j,k}$ 为信号 $x(t)$ 离散化频域式。

以能量方式表示小波包分解结果被称为小波包能量谱^[2-3](WPES)。利用 WPES 可以提取漏磁检测信号归一化的 WPES 作为信号特征来表征缺陷信号的特征参量, 根据 WPES 显示的频段在整个信号能量谱中所占的权重大小, 以及信号不同频段的 WPES, 分析信号在不同频段的信号变化动态, 从而根据信号的变化动态, 通过相应的算法, 对信号做更进一步处理分析。

图 1 为裂纹缺陷 Y01 漏磁检测得到的信号经过小波包变换得到的信号 WPES 图。

WPES 特征提取方法是将漏磁信号特征的提取转化为通过对信号能量谱图分析的方式, 来完成对信号特征的分析。但是在信号处理过程中, 信号经过小波包变换后被分解到各个频段中, 尤其是在对高频段信号进行分解时, 由于缺陷信号在高频段的信号特征不明显, 且其频谱变化非常分散^[4]。因而仅依靠 WPES 提取信号特征, 其信号会出现失真, 造成直接使用小波包分解来解析出检测信号的特征值比较困难^[4], 特别是对于信号的高频带部分。



a₁ Y01 小波包能量谱图; a₂ Y02 小波包能量谱图; b₁ Y01 能量谱直方图; b₂ Y02 能量谱直方图。

图 1 Y01、Y02 缺陷小波包能量谱

2 基于 WVT 的 WPES 特征提取法

2.1 Wigner-Ville 变换算法 (WVT)

Wigner-Ville 变换是时-频分析方法中的一种实用信号处理方法^[5],它属于 *Cohen* 类分布,是一种二次型的时-频分析方法。它将一维的信号映射到二维的时间-频率域上,从而更好地反映信号能量在时间-频率域上的分布。

对于接收信号 $x(t)$,它的 Wigner-Ville 变换可定义为^[5-6]:

$$\text{WVT}_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x_a\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x_a^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{-j2\pi f\tau} \cdot d\tau \quad (6)$$

式中: * 代表取复共轭; τ 为时间变量; s ; $x_a(t)$ 为实信号 $x(t)$ 的解析信号,若式(6)中直接使用实信号 $x(t)$,则上式给出的时-频分布就是 Wigner 分布。

WVT 首先对实信号 $x(t)$ 进行离散化处理。取 $t = nt_s, n=0, 1, 2, \dots, N-1$, 可得到离散化的信号 $x(n)$, 对得到的离散化信号 $x(n)$ 进行快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT), 得到其频域形式 $x(\omega)$, 根据信号的频域形式 $x(\omega)$, 重新构造函数:

$$s(\omega) = \begin{cases} x(\omega), & \omega = 0 \\ 2x(\omega), & \omega = 1 \sim N/2 - 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $x(\omega)$ 为信号频域形式; $s(\omega)$ 为离散化后的信号 $x(n)$ 的频域式。

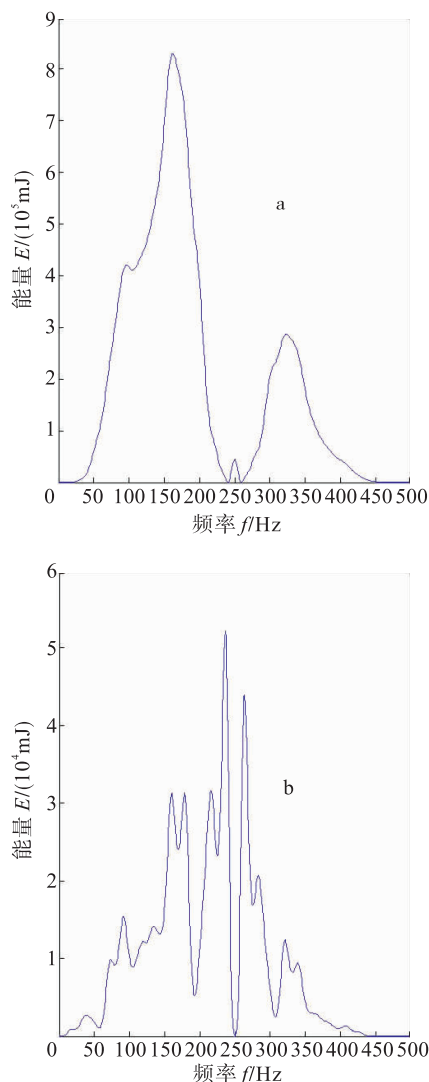
对式(7)取 FFT 就可得到所需的解析信号,将所求得的解析信号 $x_a(t)$ 代入到上式即为 Wigner-Ville 变换。为更好地对算法进行优化,在磁信号处理过程中,本文选用加窗 Wigner-Ville 分布,也被称为伪 Wigner-Ville 分布,以适于对漏磁信号进行解析处理。

WVT 是将信号离散化后,采用解析信号取代实信号,在解析与处理过程中,可以不经过对连续信号采样,避免了信号畸变^[5]。在采样过程中,只保留实信号的两倍正频部分,因而避免了在实信号中由于正负频段之间存在的交叉项的干扰。利用 WVT 将信号中存有的交叉项或者可视之为交叉项的频段信号进行剔除^[6],然后根据得到 Wigner-Ville 变换后的信号能量谱来对信号进行分析处理,从而可以更好地对信号特征进行提取。

2.2 漏磁检测信号 WPES 特征提取算法

采用改进的 WPES 方法提取漏磁检测信号特征值,其基本思想^[5-6]:通过小波包变换转换成 WPES,在 WPES 基础上,将信号运用 Wigner-Ville 变换算法 (WVT),剔除 WPES 中的交叉项、杂项,然后根据最终的信号能量谱与信号特征值的对应关系提取信号特征^[6]。

利用改进的 WPES 算法对裂纹缺陷试样 Y01、Y02 得到的信号进行小波包变换,得到 WPES 图(图2)。



a Y01 能量谱图; b Y02 能量谱图。

图2 改进算法后的裂纹缺陷小波包能量谱

从图1~2的比较中可以看出,通过 WVT 对信号的高频部分进行处理,消除信号高频部分所包含的交叉项,然后再利用小波包变换进行 WPES 信号特征提取,其效果优于单纯小波包变换得到的能量谱图。在信号的高频部分也得到较好的分解,从而能更好地反应出信号的特征,避免信号识别过程中出现的信号失真和能量特征丢失现象。改进的 WPES 特征提取流程^[5-6]见图3。

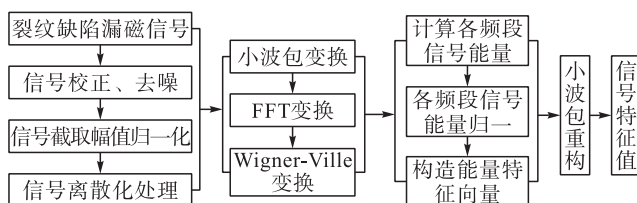


图3 改进的 WPES 特征提取流程

3 缺陷 WPES 特征改进提取法实验

使用后勤工程学院研制的 32 通道 MFL-4032 A 型漏磁检测仪,对试样 Y03 进行漏磁检测,得到一系列漏磁检测信号,为方便计算,选取了信号强度最大、缺陷信号明显的第 8 通道(其波形图见图 4)进行模拟仿真分析^[7-8]。

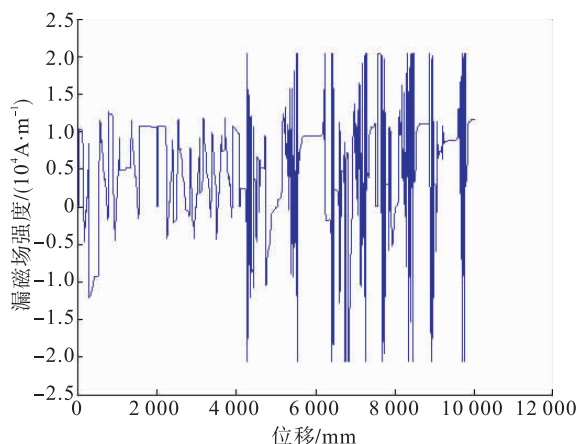


图 4 裂纹缺陷漏磁检测信号波形

对试样 Y03 得到的漏磁检测信号进行降噪滤波,利用建立的改进 WPES 提取算法,进行信号分析。

1) 信号的小波包分解。首先对去噪后的磁信号进行截取和幅值归一化处理,选择一个小波并确定一个小波分解的层次 N , 然后对信号进行 N 层小波包分解。选取了 db 4 小波,分解层数 $N=3$ 。

2) 对第 3 层 8 个节点的小波包分解系数进行重构,对于一个给定的熵标准计算最佳树。选取了 Shannon 熵标准。

3) 小波包分解系数的阈值量化。对于软阈值去噪,计算机将根据信号 Shannon 熵标准计算得到一个阈值,根据阈值提取各频带范围内的信号。

4) Wigner-Ville 变换,利用 WVT,将信号中存有的交叉项或者可视之为交叉项的频段信号进行剔除,然后根据得到 Wigner-Ville 变换后的信号能量谱来对信号进行分析处理。

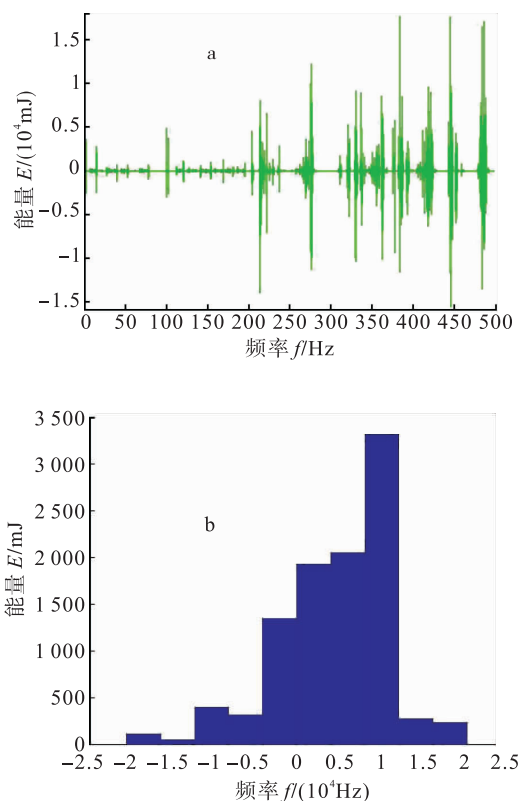
5) 计算各频带的总能量。设各频带信号 S_{3j} ($j=0, 1, 2, \dots, 7$) 对应的能量为 E_{3j} ($j=0, 1, 2, \dots, 7$), 则有:

$$E_{3j} = \int |S_{3j}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n |x_{j,k}|^2 \quad (8)$$

式中: $x_{j,k}$ ($j=0, 1, 2, \dots, 7; k=1, 2, 3, \dots, n$) 为重构信号 S_{3j} 的离散点的幅值, A/m; E_{3j} 为信号第 3 层小波包能量; t 为时间变量。

在信号分析过程中,通过 Matlab 7.0 集成小波包分析模块,进行算法编程,得到改进后的试样 Y03 漏磁检

测信号 WPES 频段分布图(图 5)。



a Y03 小波包能量谱图; b Y03 能量谱直方图。

图 5 信号小波包能量频段分布图

6) 构造能量特征向量。由于不同信号经小波分解后,其能量在各频带的能量分布是不同的,而且在所选频带上的分布差别比较明显,因此能量为元素可以构造一个特征向量。特征向量 T 构造如下:

$$T = [E_{3,0}, E_{3,1}, E_{3,2}, \dots, E_{3,7}] \quad (9)$$

当各能量较大时, E_{3j} ($j=0, 1, 2, \dots, 7$) 通常是一个比较大的数值,而各能量之间差距很大,在数据分析上会有一些不便。因此对特征向量 T 进行归一化处理,即采用各特征频带的能量比作为特征向量,令:

$$E' = \left[\sum_{j=0}^7 |E_{3j}|^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$T' = \frac{T}{E'} \left[\frac{E_{3,0}}{E'}, \frac{E_{3,1}}{E'}, \dots, \frac{E_{3,7}}{E'} \right] \quad (11)$$

式(9)~(11)中: E_{3j} 为信号小波包频带能量; E' 为归一化的信号小波包频带能量; T 为信号小波包能量特征向量; T' 为归一化处理后的信号小波包能量特征向量,可作为缺陷辨识分类器的输入元素。

在训练样本集上,最佳小波包基上各子空间中 3 类信号能量均值显示在表 1。从表 1 数据分析可知,WPES 分布上得到明显改善,其主要能量谱特征在前 3 级小波包信号分析中得到了集中体现,规律性较好,易于缺陷信号的辨识分析。

表 1 信号小波包变换能量谱列表(部分) mJ

序号	1	2	3	4	5	6	7
1	2 447	3 865	4 160	3 448	2 385	1 120	1 320
2	1 699	1 110	998	1 046	1 156	1 487	386
3	1 145	425	643	547	345	483	86
4	245	254	468	465	81	90	70
5	76	143	214	276	39	30	20
6	26	49	80	105	34	25	18
7	34	24	45	32	20	10	13
8	19	17	9	4	6	7	10
9	7	23	8	5	4	9	5

研究分析可知,通过使用改进的 WPES 提取算法,可以较好地漏磁信号的能量谱特征向量进行分析,能快捷方便地对信号进行处理,特别是对海量信号数据来说,把对信号特征向量的直接求解转换成对信号能量特征向量的求解,易于计算机控制和智能化处理。

4 结论

WPES 及 WVT 融合方法应用于信号的特征提取,在对信号先进行若干级小波包分解后,在最后一级分解小波包的子空间上求其能量,以最大的几个能量值作为特征值。此种分析方法,对于信噪比较高的情况证实是有效的,但对信噪比较低的信号则效果不佳。

参考文献:

[1] 宋志强,李著信,张 镇,等. 基于连续小波变换的输油管道裂纹缺陷漏磁检测研究[J]. 化工自动化及仪表,2010,37(7):35-39.
Song Zhiqiang, Li Zhuxin, Zhang Zhen, et al. Research on MFL Testing of Oil Pipeline Crack Flaw Detection Based on Continuous Wavelet Transform [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2010, 37(7): 35-39.

[2] 张 兢,路彦和. 基于小波包频带能量检测技术的故障诊断[J]. 微计算机信息,2006,22(2):202-205.

Zhang Jing, Lu Yanhe. On the Fault Diagnosis Based on the Detecting Technology of Wavelet Packet Frequency Band Energy [J]. Microcomputer Information, 2006, 22 (2): 202-205.

[3] 王冬云,张文志,张建刚. 小波包能量谱在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 轴承,2010,(11):32-36.
Wang Dongyun, Zhang Wenzhi, Zhang Jiangang. Application of Wavelet Packet Energy Spectrum in Rolling Bearing Fault Diagnosis [J]. Bearing, 2010, (11): 32-36.

[4] Haueisen J, Unger R, Beuker T, et al. Evaluation of Inverse Algorithms in the Analysis of Magnetic Flux Leakage Data [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2002, 38 (3): 1481-1488.

[5] 何存富,李 颖,王秀彦,等. 基于小波变换及 Wigner-Ville 变换方法的超声导波信号分析[J]. 实验力学,2005,20(4):584-588.
He Cunfu, Li Ying, Wang Xiuyan, et al. Ultrasonic Guided Wave Signal Analysis Based on Wavelet and Wigner-Ville Transform Processing [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(4): 584-588.

[6] 孟小芬,杜文超,高学强,等. Wigner-Ville 分布交叉项识别方法研究[J]. 海军航空工程学院学报,2006,21(1):187-191.
Meng Xiaofen, Du Wenchao, Gao Xueqiang, et al. Research on Identifying Method of the Wigner-Ville Distribution to Crossing Item [J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2006, 21(1): 187-191.

[7] Cheng J, Yu D, Tang J, et al. Application of Frequency Family Separation Method Based upon EMD and Local Hilbert Energy Spectrum Method to Gear Fault Diagnosis [J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43 (6): 712-723.

[8] Li Y D, Zheng X D. Spectral Decomposition Using Wigner-Ville Distribution with Applications to Carbonate Reservoir Characterization [J]. The Leading Edge, 2008, 27 (8): 1050-1057.