

文章编号:1006-1355(2015)05-0159-05+175

基于三次 Hermite 插值的局部特征尺度分解方法

李 军^{1,2}, 潘孟春¹

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410082;

2. 空军驻长沙地区军事代表室, 长沙 410111)

摘 要:内禀时间尺度分解(Intrinsic time-scale decomposition, 简称 ITD)方法采用线性变换获得基线信号, 使得分解结果出现毛刺和瞬时频率失真现象。因此, 在定义瞬时频率具有物理意义的内禀尺度分量(Intrinsic scale component, 简称 ISC)基础上, 提出基于三次 Hermite 插值的局部特征尺度分解方法(Cubic Hermite interpolation-Local characteristic-scale decomposition, 简称 CHLCD), 该方法能够自适应地将一个复杂信号分解为若干个瞬时频率具有物理意义的内禀尺度分量之和。首先对 CHLCD 方法的原理进行分析, 然后给出采用 CHLCD 对信号进行分解的详细步骤, 最后采用仿真信号和滚动轴承信号对 CHLCD 进行验证, 结果表明了 CHLCD 方法的有效性。

关键词:振动与波; 局部特征尺度分解; 三次 Hermite 插值; 信号处理; 故障诊断

中图分类号: TH113

文献标识码: A

DOI 编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2015.05.033

Local Characteristic-scale Decomposition Method Based on Cubic Hermite Interpolation

LI Jun^{1,2}, PAN Meng-chun¹

(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410082, China;

2. Air Force Military Representative Office in Changsha, Changsha 410082, China)

Abstract : Since linear transformation is used to obtain baseline signal in intrinsic time scale decomposition (ITD) method, burr and instantaneous frequency distortion will appear in the decomposition results. Therefore, a rational Cubic Hermite interpolation—Local characteristic- scale decomposition (CHLCD) method is presented. In this method, any complex signal can be adaptively decomposed into a sum of several independent rational intrinsic scale components (ISCs), whose instantaneous frequencies have obvious physical meanings. Firstly, the principle of the CHLCD method was analyzed. Then, the detailed steps of CHLCD of signal were given. Finally, a simulation signal was adopted to verify the CHLCD method. Experimental results show that the CHLCD method can effectively decompose signals.

Key words : vibration and wave ; local characteristic- scale decomposition ; cubic Hermite interpolation ; signal processing ; fault diagnosis

傅里叶(Fourier)变换方法作为一种经典的信号处理方法, 得到了大量的应用, 但 Fourier 变换仅仅可以处理线性或者平稳信号, 而实际中的大多数信号是非线性及非平稳的。针对 Fourier 变换方法的不足, 时频分析得到了关注, 由于其可以同时提供出非平稳信号在频域和时域的局部化信息, 因此时频分析常被用来处理非线性信号问题。传统的时频分

析有窗口 Fourier 变换、Wigner-Wille 分布和小波变换, 但上述方法都存在一定的缺陷, 如窗口 Fourier 变换具有一定的时频窗口, Wigner-Wille 分布有交叉项的干扰, 而小波变换也需要小波基的选择, 缺乏自适应^[1]。因此, 传统的信号分析方法在应用方面具有很大的局限性。

针对傅里叶变换和传统时频分析的不足, Mark G. Frei 提出一种自适应的时频分析方法——内禀时间尺度分解(Intrinsic time-scale decomposition, 简称 ITD)方法^[2], 该方法自适应地将非平稳的信号分解为若干固有旋转分量(Proper rotation component, 简称 PRC), 且该分量的瞬时频率具有一定的物理意

收稿日期: 2015-03-30

作者简介: 李军(1984—), 男, 硕士研究生。

E-mail: pansea1989@163.com

通讯作者: 潘孟春(1963—), 男, 教授。

义。在文献[2]中将ITD方法和EMD方法进行对比,分析ITD方法在端点效应及计算速度上的优势,并且该方法克服了EMD方法的欠包络、过包络和LMD方法的信号突变等问题^[3,4]。另外,由于ITD方法具有良好的非线性、非平稳信号分析能力,已在机械故障诊断领域得到了应用^[5,6]。但是该方法还是存在一定的缺陷,没有对ITD方法及固有旋转分量的物理意义进行阐述,而且ITD方法中的基线是通过基于信号自身的一种线性变换得到,因此第二个单分量开始,得到的单分量和一般意义上的单分量不同,其信号具有明显的失真现象,从而得到的瞬时频率及瞬时幅值有较大的失真^[7]。

由于ITD方法存在一些固有的缺陷,因此一些改进的ITD方法被提出。文献[8]采用三次样条代替线性变换来包络信号,文献[9]利用三次B样条插值代替线性变换包络信号,均解决了毛刺和频率失真问题。三次样条插值法具有收敛性好、光滑度高等特点,但三次样条插值会在包络过程中产生过包络或欠包络现象,尤其在具有冲击信息的强非平稳信号中更加明显。借鉴文献[8,9]的思想,本文拟将三次Hermite插值应用于ITD方法中,该方法具有保形特性,尤其适合于具有强非平稳特性信号的分析。因此结合标准三次Hermite插值和ITD方法的优点,提出一种基于三次Hermite插值的局部特征尺度分解方法(Cubic Hermite interpolation- Local characteristic-scale decomposition,简称CHLCD)。

1 基于Hermite插值的内禀时间尺度分解方法

标准三次Hermite插值法是一种工程中广泛应用的插值曲线构造方法,不仅具有三次样条插值法收敛性好,光滑度高的特点,相比于三次样条插值算法效率更高,且构造的曲线仅要求节点处一阶导数连续,在保证各点的连续性和平滑性的同时又具有优良的保形特性,不存在三次样条插值产生的过包络和欠包络现象,更适用于具有强非平稳特性的振动信号的包络拟合。

在ITD分解过程中,其均值曲线的定义是基于信号本身的线性变换,这导致从第二个分量开始,PRC分量信号就出现比较明显的失真(即能量有泄露),这也必然会影响到分量间的正交性。在均值曲线的计算中,拟用标准三次Hermite插值代替线性变换,这样结合标准三次Hermite插值和TID的优势,不仅分解得到的分量没出现能量泄露现象,而且所得的分量有很好的光滑性。除此之外,借鉴文献[8]的思想,由于三次Hermite插值和三次样条插值在

ITD方法中的应用具有一定的相似性,因此可以把文献[8]中定义瞬时频率具有物理意义的单分量信号所需条件引入到本文中。

1.1 ITD方法

ITD方法能将待分解的非线性信号分解为若干PRC及一个趋势项分量。设 X_t 为待分解的信号,分解之前先定义基线的提取算子 L ,从而使得从原信号中去除该基线信号后的余量成为第一个PRC。一次分解的表达式为^[8]

$$X_t = Lx_t + (1 - L)x_t = L_t + H_t \quad (1)$$

式中假设在 $[0, \tau_k]$ 上定义了 L_t 和 H_t ,而 X_t 在 $[0, \tau_{k+2}]$ 上有定义。在连续极值点 $[\tau_k, \tau_{k+2}]$ 区间上定义 X_t 的基线信号提取算子 L ,即

$$Lx_t = L_t = L_k + \left(\frac{L_{k+1} - L_k}{x_{k+1} - x_k} \right) (x_t - x_k) \quad (2)$$

$$L_{k+1} = a \left[x_k + \left(\frac{\tau_{k+1} - \tau_k}{\tau_{k+2} - \tau_k} \right) (x_{k+2} - x_k) \right] + (1 - a)x_{k+1} \quad (3)$$

式中 a 是分解时的增益控制参数, $0 < a < 1$; L_t 保留信号在每个极值点处的单调性, H_t 提取每个极值点间叠加的局部高频单分量信号—固有旋转分量。因此,重复上述分解过程就可以得到若干PRC及单调趋势项信号。

1.2 CHLCD算法

虽然ITD克服了EMD和LMD中的一些缺陷,但是文献[2]中并没有对ITD方法及PRC的物理意义做出阐述;另外,由式(2)可知,ITD算法本身是通过线性变换的方法获取基线信号,得到的信号波形显示毛刺现象而失真。因此,论文借鉴文献[8]中局部特征尺度分解方法的思想,在阐述ITD分解方法的物理意义基础之上对ITD方法进行一定的改进。

在ITD分解时,对于较为理想的PRC,其如式(2)所表示的基线分量在所有区间 $[\tau_k, \tau_{k+2}]$ 中都应该为零,式(3)所示的 L_{k+1} 也应该为零。因此,ITD方法对原信号分解获得的PRC应满足基线分量控制点 L_{k+1} 为零。在此基础之上定义具有物理含义的分量—内禀尺度分量(Intrinsic scale component,简称ISC)。所示的ISC分量满足以下条件:

(1) 在所有数据段之内,任意相邻两个极值点的符号互异。

(2) 在所有数据段之内,数据波形的极值点是 X_k , ($k=1, 2, \dots, M$), 每个极值点所对应时刻是 τ_k , ($k=1, 2, \dots, M$), 由两个任意极大或者极小值点 (τ_k, X_k) 、 (τ_{k+2}, X_{k+2}) 连接而成的数据段在中间位置极大或者极小值点 (τ_{k+1}, X_{k+1}) 所对应的时刻 τ_{k+1} 函

数值 $A_{k+1} = X_k + \frac{\tau_{k+1} - \tau_k}{\tau_{k+2} - \tau_k}(X_{k+2} - X_k)$ 和该极大(小)值 X_{k+1} 之间的比值保持不变,即可以满足 $\frac{A_2}{X_2} = \dots = \frac{A_{k+1}}{X_{k+1}} = \dots = \mu$ 。

上述的两个条件能保证 ISC 分量两个任意相邻的极值点间有单一模态,且在极值点和相邻零交叉点间近似符合标准的正弦曲线图形,因此其瞬时频率有一定的物理意义。

CHLCD 算法是假设任意复杂的信号是不同 ISC 分量组合而成,任何两个 ISC 分量间是相互独立的,这样就能将该复杂的信号分解成若干个 ISC 分量,其具体的步骤方法如下:

① 确定 $X(t)$ 所有的极值点 $X_k, (k=1,2,\dots,M)$ 和其所对应时刻 $\tau_k, (k=1,2,\dots,M)$, 并且设置好参数 a , 接着计算每个基线信号控制点 L_k , 即式(3); 然后对所有 L_k 进行三次 Hermite 插值, 能获得基线信号 L_1 。

② 将 L_1 从原信号中进行分离, 即一次插值获得的信号另保存为 P_1 。可以认为 P_1 是一个 ISC 分量, 则 P_1 为信号 $x(t)$ 的第 1 个单分量。另外, 理想的 ISC 分量必须满足 L_{k+1} 为零, 实际上可以设置变动量 Δ , 当 $|L_{k+1}| \leq \Delta$ 时迭代终止。

③ 如获得的信号 P_1 不满足上述 ISC 条件, 就会将 P_1 作为原信号重复上述步骤①和②, 再循环 k 次, 直到获得单分量 P_k , 并且分量 P_k 满足 ISC 的条件, 即为信号 $x(t)$ 的第 1 个分量 ISC_1 。

④ 将 ISC_1 从 $x(t)$ 中进行分离, 剩下的则成为一个全新的信号 r_1 , 将 r_1 视为原信号重复上述步骤①、②和③, 获得 $x(t)$ 的第二个满足 ISC 条件的单分量 ISC_2 。重复步骤循环 n 次, 可以得到信号 $x(t)$ 的 n 个满足 ISC 条件的单分量, 直至 r_n 是一单调性函数结束。这样就可以将 $x(t)$ 分解为 n 个 ISC 和一个单调性函数 r_n 之和, 即

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

2 仿真信号分析

考察如式(5)所示的仿真信号

$$x(t) = \cos(70\pi t + 0.5 \sin(30\pi t)) \\ (1 + 0.4 \sin(20\pi t)) + \sin(210\pi t) \quad (5)$$

$x(t)$ 由一个调幅调频分量和一个正弦分量组成。如图 1 所示。

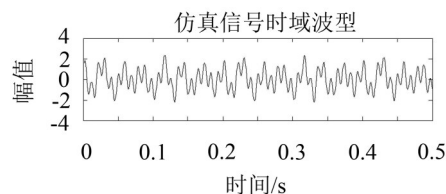


图 1 仿真信号时域波形图

图 2 为待分析信号的 FFT 频谱和信号功率谱。为比较分解效果, 在端点效应处理后采用 ITD 和 CHLCD 方法对其进行分解。其中端点效应处理方法都采用 G Rilling 提出的镜像对称延拓方法^[10]。首先将信号通过端点延拓处理, 接着采用 ITD 和 CHLCD 方法分别对延拓后的信号进行分解, 得到单分量信号, 如图 3 和图 4 所示。两种方法都可以将各单分量成分分解出来, 但是 ITD 分解的结果呈现出明显的毛刺现象, 使得信号失真; CHLCD 分解的结果较为光滑, 避免了出现毛刺现象。

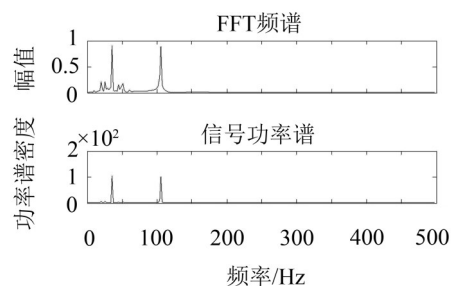


图 2 仿真信号 FFT 频谱和信号功率谱

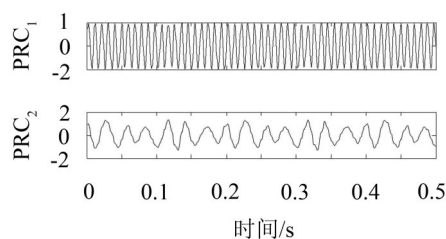


图 3 ITD 分解结果

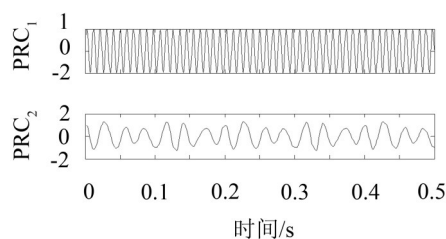


图 4 CHLCD 分解结果

从以上分解结果可知, 两种方法都可以把各单分量分解出来, 下面再从两个分量的瞬时频率和瞬时幅值加以分析, 结果分别如图 5 和图 6 所示。图 5 和图 6 所求得的瞬时特征信息中, 比较第 1 个分量的瞬时包络幅值和瞬时频率, ITD 和 CHLCD 方法的结果很接近, 效果都比较好, 但是 ISC_1 的效果也明显优

于 PRC_1 ;比较第2个分量可以发现,无论是瞬时频率还是瞬时包络幅值, ISC_2 的效果都比 PRC_2 的更准确,波动性更小,而且差别更加明显。因此,说明CHLCD是一种有效可行的分解方法。

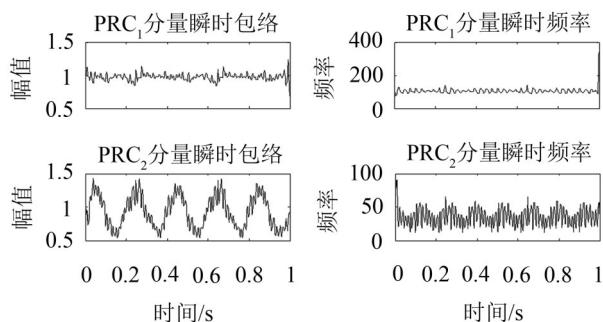


图5 ITD分解单分量的瞬时包络幅值和瞬时频率

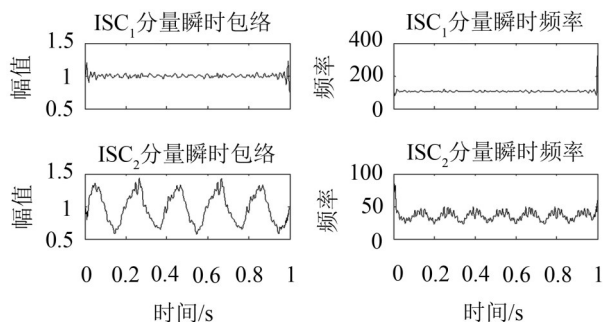


图6 CHLCD分解单分量的瞬时包络幅值和瞬时频率

分析单分量信号的瞬时包络幅值和瞬时频率后,然后再通过Hilbert谱和边际谱来比较分析,经过上述几种分解方法分解后进行Hilbert变换,得到的Hilbert-Huang时频图如图7—图8所示。由于ITD分解采用线性变换,得到的Hilbert谱出现较大失真,使相应的时频谱图失去了原有的物理意义,无法准确地反映出原信号的瞬时幅值和随时间变化的频率规律;CHLCD得到的Hilbert时频图很好地反映了原信号的基本信息,没有出现较大偏差。图9—图10为两种方法的边际谱,ITD中心频率处出现较多虚假成分,而CHLCD方法得到的边际谱明显改善不少。因此,CHLCD分解方法和其它分解方法相比具有明显的优越性。

综上所述,从各方面比较两种方法的效果,在时域图方面,CHLCD没有出现毛刺,解决了ITD毛刺

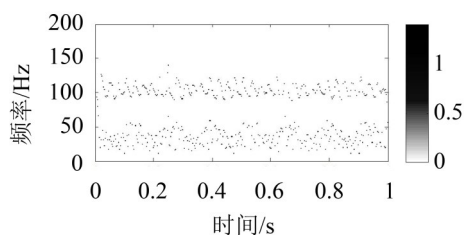


图7 ITD分解得到的Hilbert-Huang时频图

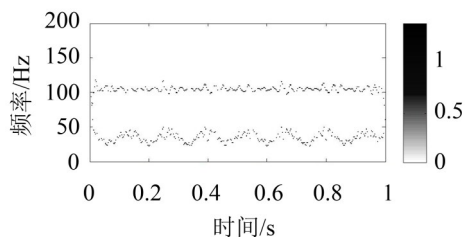


图8 CHLCD分解得到的Hilbert-Huang时频图

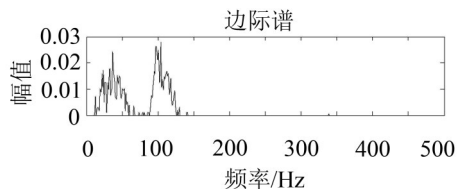


图9 ITD分解得到的边际谱

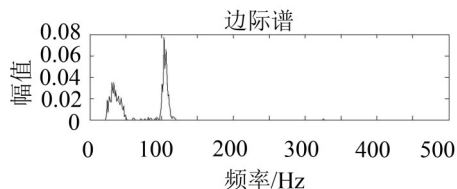


图10 CHLCD分解得到的边际谱

问题;分量瞬时幅值和频率方面,CHLCD改善了ITD方法的瞬时频率和瞬时幅值失真问题,具有较好的效果;从Hilbert-Huang时频图和边际谱方面,CHLCD分解分量的频率更加集中,能准确地反映出原信号的瞬时幅值和随时间变化的频率规律。因此,从各方面都证明了CHLCD方法比ITD方法更具优越性。

3 实例应用

为验证CHLCD方法的有效性,将该方法应用到滚动轴承的故障诊断中。在滚动轴承发生机构损伤时,其运行的过程中会出现周期性的冲击,同时激发轴承中元件的固有频率,从而导致高频衰减振动,其中高频衰减的振动幅值会被周期冲击振动所调制。因此,为了更好的提取滚动轴承相应的故障特征,需要对轴承的故障振动信号进行解调分析。包络解调方法是一种基于Hilbert变换的解调分析方法,可以对轴承的故障振动信号进行解调分析,得到相应的故障特征信息,因此将CHLCD方法与包络解调相结合应用到滚动轴承的故障诊断中。

为验证上述方法的有效性,选用美国凯撒西储大学电气工程实验室公开的轴承数据。采样频率为12 kHz,转速为1 797 r/min,负载为0 HP,故障点的直径为0.177 8 mm,故障深度为0.279 4 mm。计算的转频 $f_r \approx 29.95$ Hz,外圈故障特征频率 $f_o \approx 107.3$ Hz,内圈故障特征频率 $f_i \approx 166.4$ Hz。

首先任意选择一个具有外圈故障的振动加速度信号,其时域图如图 11 所示,用 CHLCD 方法对原始振动信号分解,得到的分量图如图 12 所示。

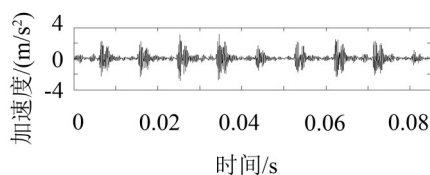


图 11 外圈故障状态信号时域图

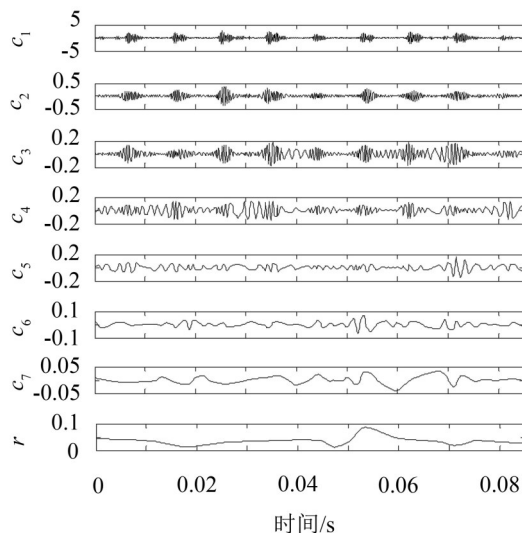


图 12 外圈故障信号 CHLCD 分解后的分量

滚动轴承在发生故障时,其故障特征往往集中在高频部分,因此选取 CHLCD 分解的前两个分量作 Hilbert 解调分析,得到其包络信号,然后对包络信号进行谱分析得到其包络谱。图 13 和图 14 分别为前两个分量的包络谱。

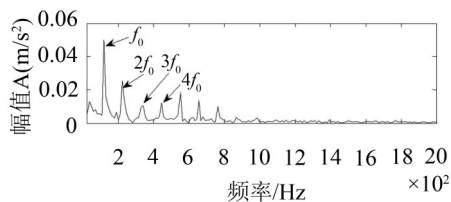


图 13 外圈故障第一个分量包络谱

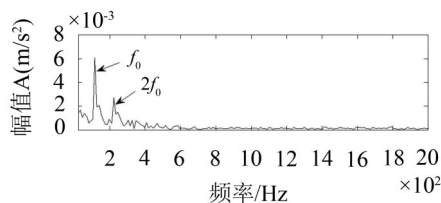


图 14 外圈故障第二个分量包络谱

从图 13 和图 14 分量的包络谱中可以看出,在故障频率 f_0 及其倍频处出现明显峰值,验证了此时轴承的外圈出现故障。

为进一步验证该方法的有效性,再任意选取一

个具有内圈故障的振动加速度信号,其时域图如图 15 所示,经过 CHLCD 分解后得到的分量时域图如图 16 所示。

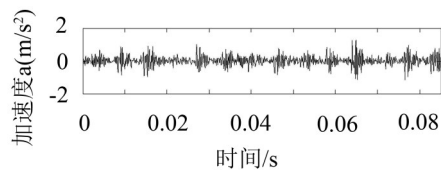


图 15 内圈故障状态信号时域图

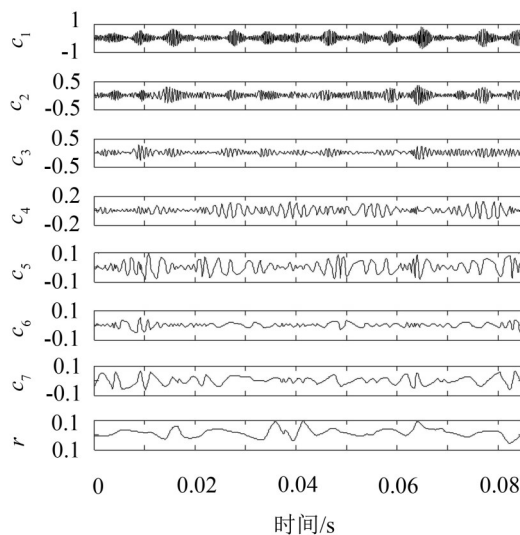


图 16 内圈故障信号 CHLCD 分解后的分量

同样选择其分解得到的前两个分量作 Hilbert 变换,然后得到相应的包络谱如图 17 和图 18 所示。

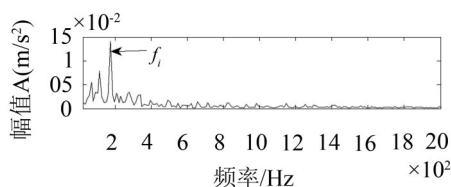


图 17 内圈故障第一个分量包络谱

从图 17 和图 18 分量的包络谱中可以看出,在故障频率 f_i 及其倍频处出现明显峰值,验证了此时轴承的内圈出现故障。

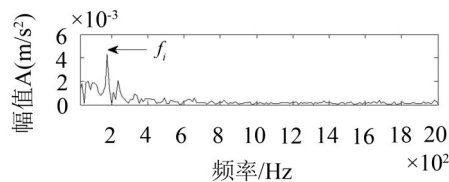


图 18 内圈故障第二个分量包络谱

4 结 语

本文在 ITD 的基础上,结合标准三次 Hermite 插值的优点,提出一种基于三次 Hermite 插值的特征
(下转第 175 页)