

基于 LMD 的能量算子解调机械故障诊断方法*

程军圣, 杨 怡, 杨 宇

(湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室 长沙, 410082)

摘要 为了提取多分量调幅调频信号的幅值和频率信息,提出了基于局部均值分解(local mean decomposition,简称 LMD)的能量算子解调机械故障诊断方法。该方法先利用 LMD 将机械调制信号分解成若干个乘积函数(product function,简称 PF)分量,然后对每一个 PF 分量进行能量算子解调,获得信号的幅值和频率信息进行故障诊断。利用该方法对仿真信号以及轴承和齿轮故障振动信号进行实验研究的结果表明,基于 LMD 的能量算子解调方法能够有效地提取机械故障振动信号特征。

关键词 局部均值分解; PF 分量; 能量算子解调; 故障诊断

中图分类号 TH165; TN911.3; TN911.7

引 言

当旋转机械系统出现故障时,机械故障振动信号往往表现为调制形式^[1-3]。实际存在的齿轮与轴承故障振动信号就常常为若干调幅调频(amplitude modulating-frequency modulating,简称 AM-FM)信号之和,通过信号解调可以很好地提取出故障特征,因此信号解调方法在机械故障诊断中具有广泛的应用。常用的信号解调方法有 Hilbert 变换方法,但是由于 Hilbert 变换方法不可避免的加窗效应,使得解调效果出现非瞬时响应特性,从而增大解调误差^[4],同时还可能会出现难以解释的负频率等缺陷。Smith^[5]提出了局部均值分解(local mean decomposition,简称 LMD)方法,该方法将多分量的调幅调频信号分解为若干个乘积函数(product function,简称 PF)之和,每个 PF 分量均由一个包络信号和一个纯调频信号相乘得到,其中包络信号为 PF 分量的瞬时幅值,且 PF 分量的瞬时频率可由纯调频信号得到^[6]。因此,LMD 方法不仅是一种新的时频分析方法,也相当于一种新的信号解调方法,被称为“LMD 直接法”。该方法克服了 Hilbert 变换方法中会出现难以解释的负频率的缺陷,但其在求取瞬时频率时具有一定的条件限制,且 LMD 方法本身

在实际环境中会因为噪声影响到瞬时幅值与瞬时频率的提取。

能量算子是 Teager 在研究非线性语音建模时引入的一个数学算法^[7]。在机械故障诊断中,能量算子解调方法也经常用于处理振动信号来提取故障信息,它的结果明显优于 Hilbert 解调^[8-9]。比起 LMD 直接法,其计算量也大大降低。但是能量算子解调方法只适用于单分量的调幅调频信号,而大多数的机械故障振动信号为多分量的 AM-FM 信号。笔者提出了基于 LMD 的能量算子解调方法,先将机械故障振动信号分解为若干个 PF 分量,然后对每一个 PF 分量进行能量算子解调,得到各分量的瞬时幅值,再对各瞬时幅值进行包络谱分析。较之传统的通过带通滤波把故障振动信号分解为多个单分量的 AM-FM 信号的方法,LMD 法作为一种自适应的分解方法,克服了滤波时中心频率和带宽难以选择的缺点,较之常用的 EMD 方法,它更好地解决了模态混淆、端点效应等问题^[10]。

1 基于 LMD 的能量算子解调方法

LMD 方法的实质就是将非平稳调制信号分解为若干个由包络信号和纯调频信号乘积而得的 PF 分量,对于任意原始信号 $x(t)$,其具体分解算法

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50775068);国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(编号:2009AA04Z414);中国博士后科学基金资助项目(编号:20080430154)

收稿日期:2011-03-05;修改稿收到日期:2011-04-25

如下^[9]。

1) 确定信号 $x(t)$ 的所有局部极值点 n_i , 通过各极值点 n_i , 计算两相邻极值点 n_i, n_{i+1} 的平均值 m_i 和包络估计值 a_i

$$m_i = \frac{n_i + n_{i+1}}{2} \quad (1)$$

$$a_i = \frac{|n_i - n_{i+1}|}{2} \quad (2)$$

2) 将各相邻的局部均值 m_i 和包络估计值 a_i 用直线相连, 用滑动平均法进行平滑处理得局部均值函数 $m_{11}(t)$ 和包络估计函数 $a_{11}(t)$, 将局部均值函数 $m_{11}(t)$ 从原始信号中分离出来后, 再通过包络估计函数 $a_{11}(t)$ 对所得结果进行解调, 得到调频信号 $s_{11}(t)$ 为

$$h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t) \quad (3)$$

$$s_{11}(t) = \frac{h_{11}(t)}{a_{11}(t)} \quad (4)$$

3) 通过判断包络估计函数 $a_{12}(t)$ 是否满足 $a_{12}(t) = 1$ 来识别 $s_{11}(t)$ 是否为一个纯调频信号。如果 $s_{11}(t)$ 还不是一个纯调频信号, 则将其作为原始数据重复迭代过程, 具体如下

$$\begin{cases} h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t) \\ h_{12}(t) = s_{11}(t) - m_{12}(t) \\ \vdots \\ h_{1n}(t) = s_{1(n-1)}(t) - m_{1n}(t) \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} s_{11}(t) = \frac{h_{11}(t)}{a_{11}(t)} \\ s_{12}(t) = \frac{h_{12}(t)}{a_{12}(t)} \\ \vdots \\ s_{1n}(t) = \frac{h_{1n}(t)}{a_{1n}(t)} \end{cases} \quad (6)$$

迭代终止条件为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_{1n}(t) = 1 \quad (7)$$

在实际应用中, 为了减少迭代次数, 降低运算时间, 可设置变量 Δ , 使得当满足条件 $1 - \Delta \leq a_{1n}(t) \leq 1 + \Delta$ 时, 迭代终止。

4) 迭代结束。将迭代过程中所得的全部包络估计函数相乘得到瞬时幅值函数 $a_1(t)$, 再将 $a_1(t)$ 和纯调频信号 $s_{1n}(t)$ 相乘得到第 1 个 PF 分量

$$a_1(t) = a_{11}(t)a_{12}(t)\cdots a_{1n}(t) = \prod_{q=1}^n a_{1q}(t) \quad (8)$$

$$PF_1(t) = a_1(t)s_{1n}(t) \quad (9)$$

进一步根据纯调频信号 $s_{1n}(t)$ 可求得第 1 个 PF 分量的瞬时频率 $f_1(t)$

$$f_1(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d[\arccos(s_{1n}(t))]}{dt} \quad (10)$$

5) 从原始信号中分离出第 1 个 PF 分量后, 一般剩余信号 $u_1(t)$ 中还含有较多有用的频率成分, 因此继续将 $u_1(t)$ 作为原始数据重复以上步骤得到第 2 个 PF 分量。重复这个过程直到 u_k 为一个单调函数为止, 如此便可分离出所有的 PF 分量

$$\begin{cases} u_1(t) = x(t) - PF_1(t) \\ u_2(t) = u_1(t) - PF_2(t) \\ \vdots \\ u_k(t) = u_{k-1}(t) - PF_k(t) \end{cases} \quad (11)$$

最终的信号可表示为

$$x(t) = \sum_{p=1}^k PF_p(t) + u_k(t) \quad (12)$$

其中: 残余函数 $u_k(t)$ 代表了信号的平均趋势。

每个 PF 分量都是一个单分量的调幅调频信号, 为了进一步获得幅值信息和频率信息, 必须进行 PF 分量的解调处理; 因此, 将原始信号分解为多个 PF 分量以后再进行能量算子解调处理, 具体步骤如下^[11]。

1) 由于每个 PF 分量均是由一个包络信号和一个纯调频信号相乘得到, 所以可以写成如下形式

$$x(t) = a(t)\cos[\varphi(t)] \quad (13)$$

2) 定义非线性信号能量算子 ψ

$$\psi(x) = [\dot{x}(t)]^2 - x(t)\ddot{x}(t) \quad (14)$$

将 $x(t)$ 代入, 即

$$\psi(x) = [a(t)\dot{\varphi}(t)]^2 + a^2(t)\ddot{\varphi}(t)\sin[2\varphi(t)]/2 + \cos^2[\varphi(t)]\psi(a) \quad (15)$$

其中

$$\psi(a) = [\dot{a}(t)]^2 - a(t)\ddot{a}(t) \quad (16)$$

3) 一般来说, 调制信号的变化要比载波信号变化慢得多, 此时的瞬时幅值和瞬时频率相对于载波的变化是缓变的, 因此可以近似地把它视为常数, 这样就有 $\psi(a) \approx 0, \ddot{\varphi}(t) \approx 0$, 于是有

$$\psi(x) \approx [a(t)\dot{\varphi}(t)]^2 = a^2(t)\omega^2(t) \quad (17)$$

同理有

$$\psi(\dot{x}) \approx a^2(t)\omega^4(t) \quad (18)$$

4) 由式(17)和式(18)就可以得到 PF 分量的瞬时幅值 $|a(t)|$ 和瞬时频率 $\omega(t)$

$$|a(t)| \approx \frac{\psi(x)}{\sqrt{\psi(\dot{x})}} \quad (19)$$

$$\omega(t) \approx \sqrt{\frac{\psi(\dot{x})}{\psi(x)}} \quad (20)$$

5) 在机械故障诊断中,将得到的瞬时幅值 $|a(t)|$ 进行频谱分析后,即得到采用能量算子解调方法所得的 PF 分量的包络谱

$$p = \text{FFT}(|a(t)|) \quad (21)$$

通过对包络谱进行分析,即可有效地获取故障信息。

基于 LMD 的能量算子解调方法利用 LMD 将多分量的 AM-FM 信号分解为多个 PF 分量,再根据能量算子解调方法得到幅值信息和频率信息,从而提取原始信号特征来进行故障诊断。

2 仿真信号分析

为了验证该方法的可行性,考察如式(22)所示的仿真信号 $x(t)$

$$x(t) = (1 + 0.5\cos(60\pi t))\cos(600\pi t + 2\cos(40\pi t)) + (1 + 0.5\sin(20\pi t))\sin(200\pi t) \quad (22)$$

该信号由两个调制分量组成,添加均值为 0、方差为 1 的白噪声序列,同时与 LMD 直接法的运用进行对比分析。图 1(a)为信号的时域图,图 1(b)为信号经过 LMD 分解所得的前两个 PF 分量,由图 1 可知,两 PF 分量受噪声影响严重。图 2 是 PF₁ 和 PF₂ 采用能量算子解调所得的包络谱,从图中可以明显观察到两分量的幅值调制特征频率 30 Hz 和 10 Hz。

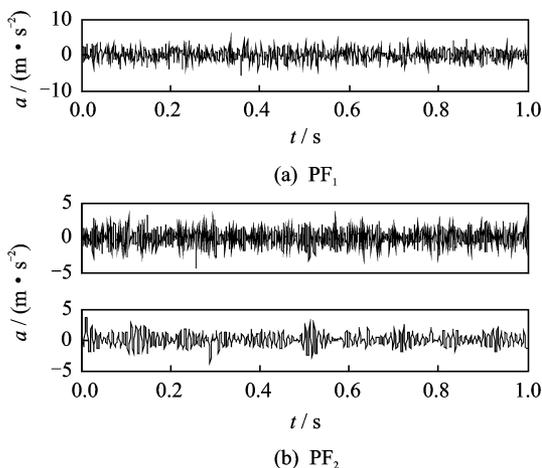


图 1 仿真信号时域波形及其前两个 PF 分量

为了证明基于 LMD 的能量算子解调方法在提取幅值信息方面的有效性,将其与 LMD 直接法作

对比,图 3 为利用 LMD 直接法所求的图 1(b)所示 PF₁ 和 PF₂ 的包络谱,由图 3 可知,直接法也得到了两分量的瞬时幅值包络,但效果不如图 2 明显。通过图 2 和图 3 的对比,基于 LMD 的能量算子解调方法效果明显优于 LMD 直接法。

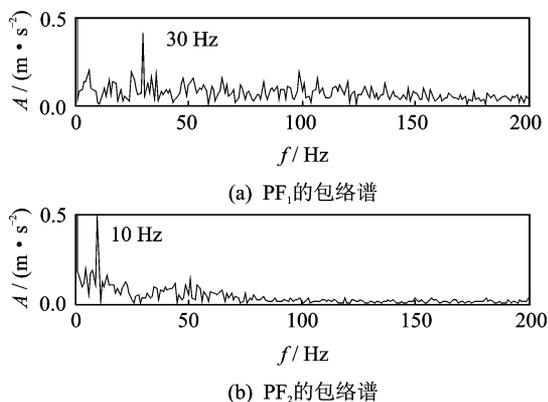


图 2 采用能量算子解调得到的包络谱

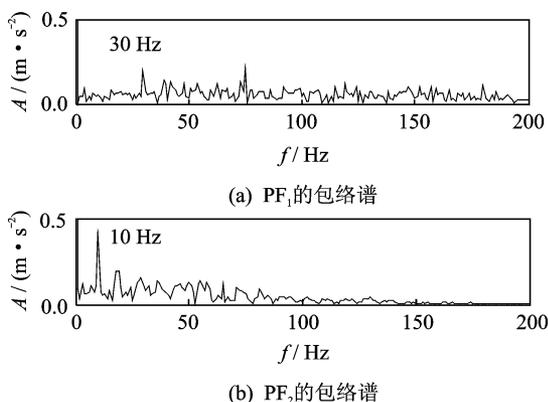
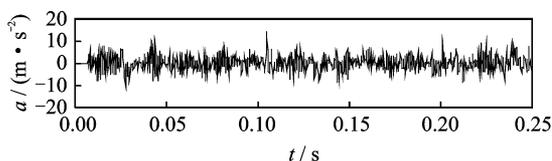


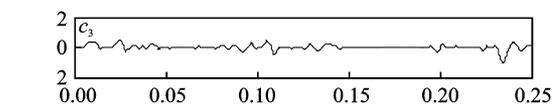
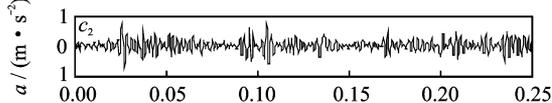
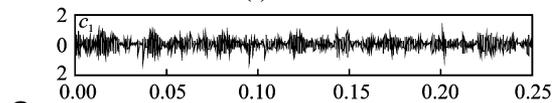
图 3 采用 LMD 直接法得到的包络谱

3 基于 LMD 的能量算子解调方法在旋转机械故障诊断中的应用

当滚动轴承内圈或外圈表面存在故障时,在轴承的旋转过程中,由于冲击脉冲对高频固有振动的调制特性,要提取轴承的故障特征必须对轴承振动信号进行解调。图 4(a)是某 6311 型外圈有凹槽故障的球滚动轴承的振动信号时域波形,采样频率为 4 096 Hz,转频为 1 500 r/min,经过理论计算该轴承的外圈故障频率为 76 Hz。图 4(b)是该振动信号经过 LMD 分解所得的前 3 个 PF 分量 c_1, c_2 和 c_3 。由图 4(b)可知,振动信号的第 3 个 PF 分量只含有很少的频率成分,故只对前两个 PF 分量采用能量算子解调得到瞬时幅值进行包络谱分析,其包络谱如图 5 所示,在图上可清晰地观察到故障信号在 76 Hz

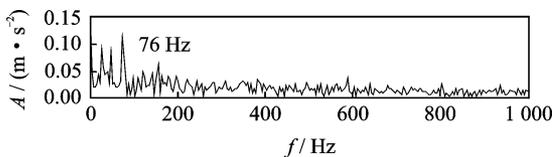
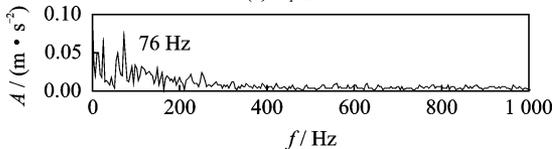


(a) 时域波形



(b) 前3个PF分量

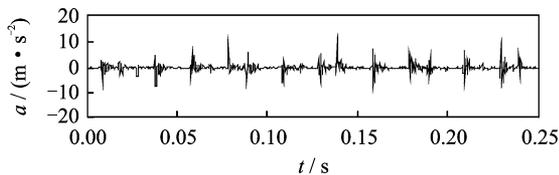
图4 外圈故障轴承振动信号时域波形图及其前3个PF分量

(a) c_1 包络谱(b) c_2 包络谱图5 采用能量算子解调所得的图4中 c_1 和 c_2 的包络谱

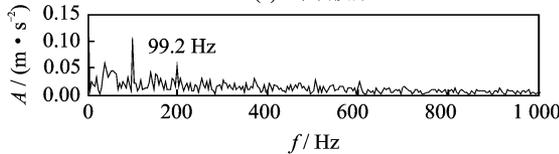
处存在明显谱线,与轴承的计算故障频率相符合。

图6(a)为某采样频率为4 096 Hz,转频为1 200 r/min的6311型球滚动轴承的振动信号时域波形,滚动轴承内圈有凹槽。图6(b)为该信号的第1个PF分量经过能量算子解调所得的包络谱。图6(b)可在99.2 Hz处发现明显谱线,与该实验条件下计算得到的轴承内圈故障频率99.2 Hz相符合。

同时,在正常滚动轴承采用能量算子解调方法所得的PF分量的包络谱中,均不能发现轴承的故障特征频率。图7(a)为某裂纹故障齿轮的振动信号时域波形,采样频率为1 024 Hz,转频为6 Hz,该信号经过LMD分解所得的第1个PF分量如图7(b)所示。图8为该分量经过能量算子解调后所得的包络谱,由图8可以清晰地观察到在1倍转频和3倍转频处有明显谱线,证明该齿轮确有局部故障,与实际情况符合。

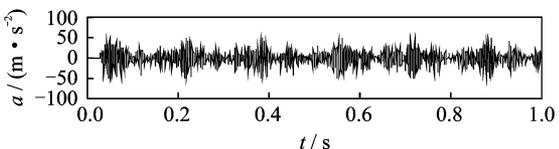


(a) 时域波形

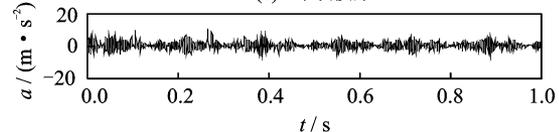


(b) 第1个PF分量的包络谱

图6 内圈故障轴承振动信号的时域波形及其采用能量算子解调所得的第1个PF分量的包络谱



(a) 时域波形



(b) 第1个PF分量

图7 齿轮裂纹故障振动信号时域波形及其第1个PF分量

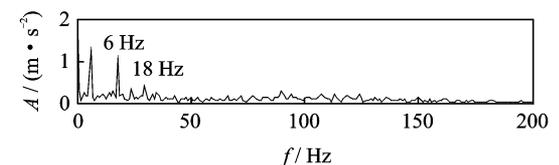


图8 采用能量算子解调所得图7(b)中PF分量的包络谱

4 结束语

笔者提出基于LMD的能量算子解调方法,并将其应用于旋转机械故障诊断中。LMD方法能够根据信号自身的时间尺度特征自适应地将工程实际中的非平稳多分量信号分解为若干个PF分量,每个PF分量由一个包络信号和一个纯调频信号组成。通过LMD方法,可将多分量的AM-FM信号分解为单分量的AM-FM信号,再结合能量算子解调方法,分别对每个PF分量进行能量算子解调包络谱分析,获得了机械故障振动信号的幅值调制信息,提取出故障特征。实验结果表明,基于LMD的能量算子解调方法能够有效地运用于旋转机械故障诊断中。

参 考 文 献

- [1] Randall R B. A new method of modeling gear faults [J]. American Society of Mechanical Engineers Journal of Mechanical Design, 1982,104:259-267.
- [2] Radcliff G A. Condition monitoring of rolling element bearings using the enveloping technique[C]//Machine Condition Monitoring. London: Mechanical Engineering Publication Ltd, 1990:55-67.
- [3] 唐贵基,蔡伟.应用小波包和包络分析的滚动轴承故障诊断[J].振动、测试与诊断,2009,29(2):201-204.
Tang Guiji, Cai Wei. Roller bearings fault diagnosis by using wavelet packet and envelope analysis [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009,29(2):201-204. (in Chinese)
- [4] 程军圣,于德介,杨宇.基于EMD的能量算子解调方法及其在机械故障诊断中的应用[J].机械工程学报,2004,40(8):115-118.
Cheng Junsheng, Yu Dejie, Yang Yu. Energy operator demodulating approach based on EMD and its application in mechanical fault diagnosis [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004,40(8):115-118. (in Chinese)
- [5] Smith J S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2005,2(5):443-454.
- [6] 任达千,杨世锡,吴昭同,等.基于LMD的信号瞬时频率求取方法及实验[J].浙江大学学报,2009,43(3):523-528.
Ren Daqian, Yang Shixi, Wu Zhaotong, et al. Instantaneous frequency extraction method and experiment based on LMD [J]. Journal of Zhejiang University, 2009,43(3):523-528. (in Chinese)
- [7] Teager H M. Some observations on oral air flow during phonation [J]. IEEE Transaction on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1980,28(5):599-601.
- [8] Petros M, James F K, Thomas F Q. On amplitude and frequency demodulation using energy operator [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993,41(4):1532-1550.
- [9] Alexandros P, Petros M. A comparison of the energy operator and the Hilbert transform approach to signal and speech demodulation [J]. Signal Processing, 1994,37(1):95-120.
- [10] 程军圣,张亢,杨宇.局部均值分解方法在调制信号处理中的应用[J].振动、测试与诊断,2010,30(4):362-366.
Cheng Junsheng, Zhang Kang, Yang Yu. Application of local mean decomposition method to the processing of modulated signals [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010,30(4):362-366. (in Chinese)
- [11] 于德介,程军圣,杨宇.机械故障诊断的Hilbert-Huang变换方法[M].北京:科学出版社,2006:103-116.



第一作者简介:程军圣,男,1968年10月生,教授、博士生导师。主要研究方向为机械故障诊断、振动与噪声控制研究。曾发表《局部均值分解方法及其在齿轮故障诊断中的应用》(《振动工程学报》2009年第22卷第1期)等论文。
E-mail:signalp@tom.com