

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*

程军圣 于德介 杨宇

(湖南大学机械与汽车工程学院 长沙 410082)

摘要: 为了提取多分量的 AM-FM 信号的频率和幅值信息, 提出了基于 EMD (Empirical mode decomposition) 的能量算子解调法, 并将它应用于机械故障诊断中。该方法首先采用 EMD 将多分量的 AM-FM 信号分解成若干个 IMF (Intrinsic mode function) 分量之和, 然后对每一个 IMF 分量进行能量算子解调, 从而提取多分量的 AM-FM 信号的幅值和频率信息。对机械故障振动信号的分析结果表明, 基于 EMD 的能量算子解调法能有效地提取机械故障振动信号的特征。

关键词: AM-FM 信号 EMD 能量算子解调 机械故障诊断

中图分类号: TH165

0 前言

当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^[1,2], 因此解调分析成为机械故障诊断, 特别是准确诊断故障部位的一种常用的信号处理方法, 在实践中解决了很多故障诊断方面的问题^[3~5]。目前, 在机械故障诊断中, 由于可以采用 Hilbert 变换提取机械故障信号包络的方法获得特征信息, 同时 Hilbert 变换又具有快速算法, 因此 Hilbert 变换在机械故障振动信号的解调分析中得到了广泛的应用^[6]。但是由于 Hilbert 变换算法不可避免的加窗效应, 使得解调结果出现非瞬时响应特性, 即在解调出的调制信号两端及有突变的中间部位将产生调制, 表现为幅值按指数规律衰减的波动, 从而使解调误差增大。

采用能量算子解调方法也可以提取调制信号的幅值和频率信息, 其解调效果明显优于 Hilbert 解调, 同时计算量也大大降低^[7~10]。然而, 由 Teager 提出的能量算子解调方法^[11]只适用于单分量的调幅和调频信号(AM-FM 信号) $s(t) = a(t) \cos[\phi(t)]$, 而对于大多数的机械故障振动信号都是多分量的 AM-FM 信号 $s(t) = \sum_{m=1}^M a_m(t) \cos[\phi_m(t)]$, 对于这类信号, 传统的方法是通过带通滤波把它分解成单分量的 AM-FM 信号, 然后进行解调以提取频率和幅值信息。但是, 在实际的机械故障振动信号中, 载波

频率成分的多少和载波频率的大小很难确定, 因此对信号进行带通滤波时中心频率的选择就带有很大的主观性, 带来解调误差, 不能有效地提取机械故障振动信号的特征。针对这个问题, 提出了基于 EMD 的能量算子解调方法并将它应用于机械故障诊断中。EMD (Empirical mode decomposition) 方法是由 Huang 提出的一种新的信号分解方法^[12], 它可以把一个复杂的信号分解成若干个基本模式分量 IMF (Intrinsic mode function) 之和, 每一个 IMF 分量都可以是幅度或频率调制的, 也就是一个单分量的 AM-FM 信号 $s(t) = a(t) \cos[\phi(t)]$ ^[12]。这样, 对每一个 IMF 分量进行能量算子解调后就能得到原始复杂信号的幅值和频率信息。通过对仿真和实际信号的分析, 验证了基于 EMD 的能量算子解调法能有效地提取机械故障振动信号的特征。

1 基于 EMD 的能量算子解调法

AM-FM 信号具有时变幅度 $a(t)$ 和时变相位 $\phi(t)$, 信号的一般表达式为

$$s(t) = a(t) \cos[\phi(t)] \quad (1)$$

其瞬时频率为

$$\omega(t) = \dot{\phi}(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (2)$$

对式(1)的信号定义非线性信号算子 ψ

$$\psi(s) = (\dot{s})^2 - s\ddot{s} \quad (3)$$

因此, 可以得到

$$\psi(s) = [a(t)\dot{\phi}(t)]^2 + a^2(t)\ddot{\phi}(t) \times \sin[2\phi(t)]/2 + \cos^2[\phi(t)]\psi(a) \quad (4)$$

* 国家自然科学基金(50275050)和高等学校博士点专项科研基金(20020532024)资助项目。20030827 收到初稿, 20040310 收到修改稿

一般说来, 调制信号的变化要比载波变化慢得多, 此时的 $a(t)$ 和 $\omega(t)$ 相对于载波的变化而言是缓变的, 因此可以近似地把它视为常数, 这样就有:

$\psi(a) \approx 0$, $\ddot{\phi}(t) \approx 0$, 于是得到

$$\psi(s) \approx [a(t)\dot{\phi}(t)]^2 = a^2(t)\omega^2(t) \quad (5)$$

同样, 可以得到

$$\psi(\dot{s}) \approx a^2(t)\omega^4(t) \quad (6)$$

由式(5)和式(6)就可以得到 AM-FM 信号的幅值和频率信息^[11]

$$|a(t)| \approx \frac{\psi(s)}{\sqrt{\psi(\dot{s})}} \quad (7)$$

$$\omega(t) \approx \sqrt{\frac{\psi(\dot{s})}{\psi(s)}} \quad (8)$$

以上的方法只适用于单分量的 AM-FM 信号,

对于多分量的 AM-FM 信号 $s(t) = \sum_{m=1}^M a_m(t) \cos[\phi_m(t)]$,

必须要将其分解成单分量的 AM-FM 信号才能提取幅值和频率信息, 这个过程由 EMD 方法来完成。

EMD 把一个复杂的非平稳信号分解为有限个基本模式分量之和, 其中任何一个基本模式分量 (IMF) 都满足以下条件。

在整个数据段内, 极值点的个数和零交叉点的个数必须相等或相差最多不能超过一个。在任何一点, 由局部极大值点形成的包络线和由局部极小值点形成的包络线的平均值为零。

运用 IMF 可以把任何信号 $x(t)$ 按如下步骤进行分解^[12]。

(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, 再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。上下包络线的平均值记为 m_1 , 求出

$$h_1 = x(t) - m_1 \quad (9)$$

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

(2) 如果 h_1 不满足 IMF 的条件, 把 h_1 作为原始数据, 重复步骤(1), 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, 则重循环 k 次, 得到 $h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k}$, 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。

(3) 将 c_1 从 $x(t)$ 中分离出来, 得到

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (10)$$

将 r_1 作为原始数据重复步骤(1)、(2), 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 的分量。这样就有

$$\begin{cases} r_2 = r_1 - c_2 \\ \vdots \\ r_n = r_{n-1} - c_n \end{cases} \quad (11)$$

当 r_n 成为一个单调函数不能再从中提取满足 IMF 的分量时, 循环结束。这样由式(10)和式(11)得到

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n \quad (12)$$

因此, 可以把任何一个信号 $x(t)$ 分解为 n 个基本模式分量和一个残量 r_n 之和, 得到的每一个 IMF 分量都可以是幅度或频率调制的, 也就是一个单分量的 AM-FM 信号^[12]。在此基础上, 根据式(7)和式(8)提取每一个 IMF 分量的幅值和频率信息, 从而提取原始信号的特征。考察如式(13)的仿真信号

$$x(t) = 4 \sin(\pi t/50) \sin(6\pi t) + \cos(\pi t^2/4) \quad (13)$$

$t \in [0 \quad 511/50]$

将其进行 EMD 分解, 得到分量 c_1 、 c_2 , 结果如图 1 所示。对分量 c_1 、 c_2 分别采用能量算子解调法提取幅值和频率信息, 结果如图 2a、b 所示。图 3 是采用 Hilbert 变换提取的幅值和频率信息, 从图 3 中可以看出, 采用 Hilbert 解调法得到的结果存在明显的边端效应, 因此, 能量算子解调法明显优于 Hilbert 解调法。

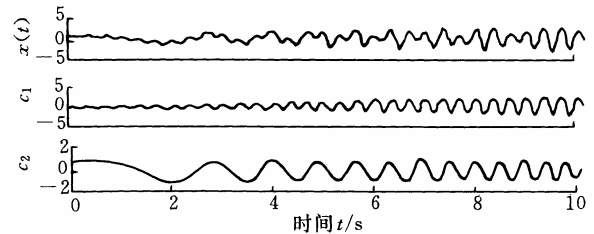
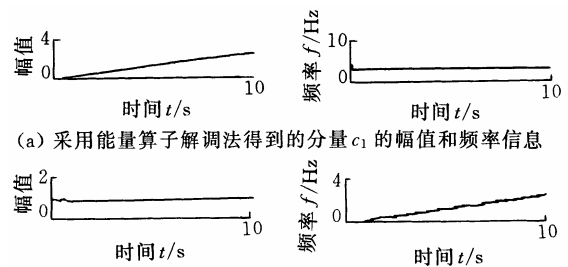


图 1 仿真信号 $x(t)$ 及其 EMD 分解结果



(a) 采用能量算子解调法得到的分量 c_1 的幅值和频率信息

(b) 采用能量算子解调法得到的分量 c_2 的幅值和频率信息

2 基于 EMD 的能量算子解调方法在机械故障诊断中的应用

当滚动轴承发生故障, 在运行过程中产生脉动时, 不但引起高频冲击振动, 而且此高频振动的幅

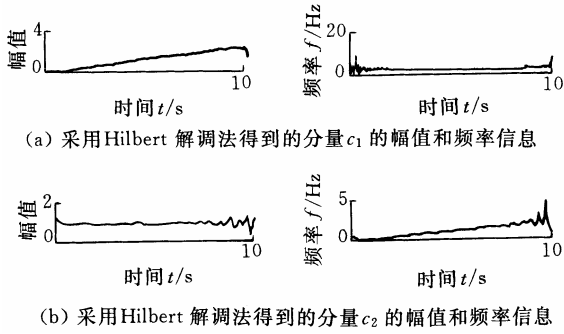


图 3 采用 Hilbert 解调法提取的仿真信号 $x(t)$ 的幅值和频率信息

值还受到脉动激发力的调制。为了提取滚动轴承故障振动信号的特征，需要对振动信号进行解调。图 4 是一外圈有凹槽的 6311 型的球滚动轴承的振动加速度时域波形，采样频率为 4 096 Hz，转频为 25 Hz，经计算故障特征频率为 $f_{oc}=76$ Hz。对振动加速度信号进行 EMD 分解，共得到 17 个 IMF 分量，图 5 列出了前 3 个 IMF 分量 c_1 、 c_2 、 c_3 。由于滚动轴承故障信息在高频段，因此前 3 个 IMF 分量包含了滚动轴承外圈故障振动信号的主要信息。对这 3 个 IMF 分量 c_1 、 c_2 、 c_3 分别采用能量算子解调法提取幅值 $a_1(t)$ 、 $a_2(t)$ 、 $a_3(t)$ ，然后进一步对 $a_1(t)$ 、 $a_2(t)$ 、 $a_3(t)$ 进行频谱分析，得到包络谱分别如图 6a、b、c 所示。从图 6 中可以看出，采用能量算子解调法得到的分量 c_1 、 c_2 、 c_3 的包络谱中在外圈故障特征频率 f_{oc} (76 Hz) 处都存在明显谱线，与实际相符。

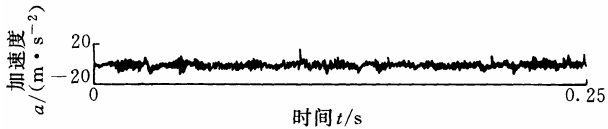


图 4 具有外圈故障的滚动轴承振动加速度时域波形

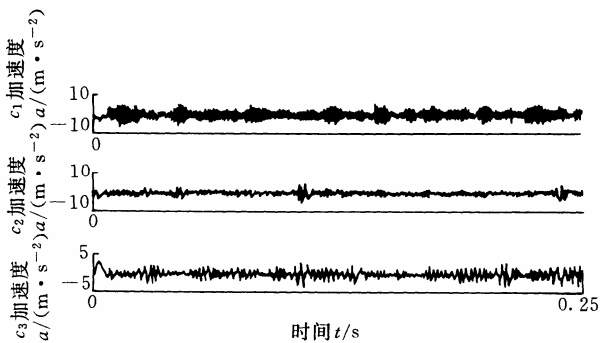


图 5 图 4 所示的外圈故障振动加速度信号的前 3 个 IMF 分量 c_1 、 c_2 、 c_3

图 7 是一内圈有凹槽的 6311 型的球滚动轴承的振动加速度时域波形，采样频率为 4 096 Hz，转频为 20 Hz，经计算故障特征频率为 $f_{ic}=99.2$ Hz。对振动加速度信号进行 EMD 分解，得到第一个 IMF 分

量 c_1 如图 8 所示。采用能量算子解调法提取分量 c_1 的幅值 $a(t)$ ，对 $a(t)$ 进行频谱分析得到包络谱如图 9 所示，从图 9 中可以看出，在故障特征频率 f_{ic} (99.2 Hz) 处存在明显谱线，说明滚动轴承存在内圈故障，与实际相符。

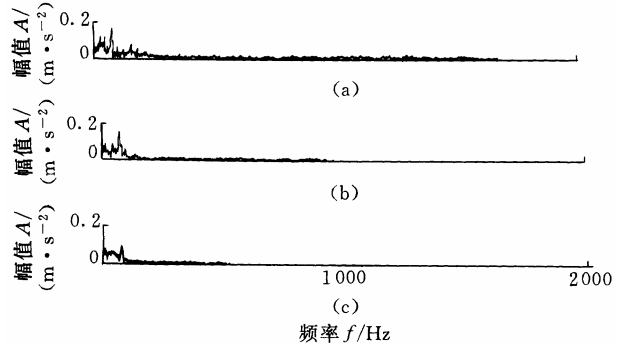


图 6 采用能量算子解调法得到的图 5 所示的 IMF 分量 c_1 、 c_2 、 c_3 的包络谱

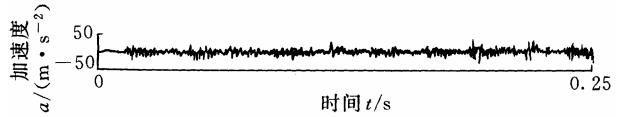


图 7 具有内圈故障的滚动轴承振动加速度时域波形



图 8 图 7 所示的内圈故障振动加速度信号的第一个 IMF 分量 c_1

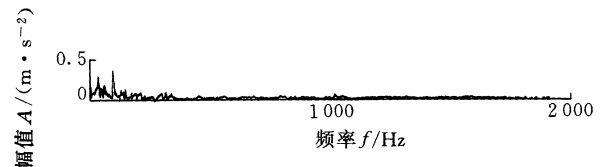


图 9 采用能量算子解调法得到的图 8 所示的 IMF 分量 c_1 的包络谱

图 10 是一断齿齿轮的振动加速度时域波形，采样频率为 1 024 Hz，转频为 7 Hz，采用 EMD 对加速度振动信号进行分解，得到第一个 IMF 分量 c_1 如图 11 所示，可以清楚地看到分量 c_1 是一个调制信号。采用能量算子解调法提取分量 c_1 的幅值 $a(t)$ ，对 $a(t)$ 进行频谱分析得到包络谱如图 12 所示，从图 12 中可以看出在转频 7 Hz 处存在明显谱线，这说明齿轮存在局部故障，与实际吻合。

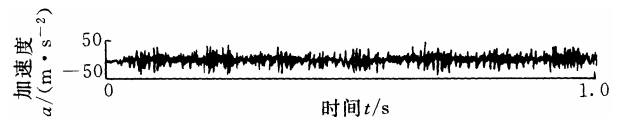


图 10 断齿齿轮的振动加速度时域波形

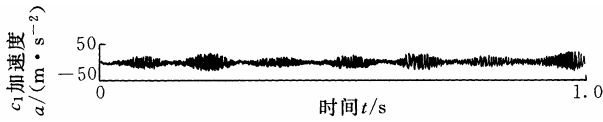


图 11 图 10 所示的断齿齿轮振动加速度信号的第一个 IMF 分量 c_1

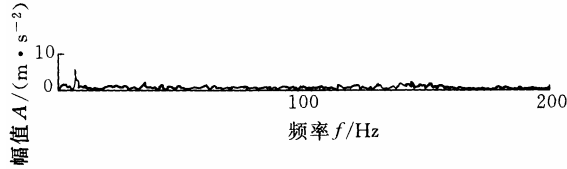


图 12 采用能量算子解调法得到的图 11 所示的 IMF 分量 c_1 的包络谱

3 结论

Hilbert 变换在机械故障的解调分析中得到了广泛的应用,但是 Hilbert 变换存在边端效应,使得解调误差增大。能量算子解调法与 Hilbert 变换解调法相比,具有解调精度高、运算量小等优点。然而,由 Teager 提出的能量算子解调方法只适用于单分量的 AM-FM 信号,对于多分量的 AM-FM 信号,提出了基于 EMD 的能量算子解调法,并将它应用于机械故障诊断中。该方法首先采用 EMD 将多分量的 AM-FM 信号分解成若干个 IMF 分量之和,然后对每一个 IMF 分量进行能量算子解调,从而提取原始信号的幅值和频率信息。通过对滚动轴承和齿轮的故障振动信号的分析,结果表明,基于 EMD 的能量算子解调法能有效地应用于机械故障诊断中。

参 考 文 献

- 1 Randall R B. A new method of modeling gear faults. ASME Journal of Mechanical Design, 1982, 104: 259~267
- 2 Radcliff G A. Condition monitoring of rolling element bearings using the enveloping technique. Machine Condition Monitoring, Mechanical Engineering Publication Ltd., London: 1990: 55~67
- 3 鲍明, 赵淳生. 齿轮故障诊断技术的研究. 南京航空学院学报, 1992, 24(5): 567~571
- 4 王延春, 谢明, 丁康. 包络分析方法及其在齿轮故障振动诊断中的应用. 重庆大学学报, 1995 (1): 87~91
- 5 唐德绕. 共振解调技术在机械故障诊断中的应用和发展. 设备管理与维修, 1991 (11): 22~24
- 6 Randall R B. Hilbert transform techniques in machine diagnostics. In: IFToMM International Conference on Rotor dynamics, Tokyo, 1986: 409~420
- 7 Petros M, James F K, Thomas F Q. On amplitude and

frequency demodulation using energy operator. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(4): 1 532~1 550

- 8 Alexandros P, Petros M. A comparison of the energy operator and the Hilbert transform approach to signal and speech demodulation. Signal Processing, 1994, 37(1): 95~120
- 9 Petros M, James F K, Thomas F Q. Energy separation in signal modulations with application to speech analysis. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(10): 3 024~3 051
- 10 刘红星, 陈涛, 屈梁生, 等. 能量算子解调方法及其在机械信号解调中的应用. 机械工程学报, 1998, 34(5): 85~90
- 11 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理. 北京: 国防工业出版社, 1998
- 12 Huang N E, Shen Z, Long S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proc. R. Soc. Lond. A, 1998, 454: 903~995

ENERGY OPERATOR DEMODULATING APPROACH BASED ON EMD AND ITS APPLICATION IN MECHANICAL FAULT DIAGNOSIS

Cheng Junsheng Yu Dejie Yang Yu
(College of Mechanical and Automotive Engineering,
Hunan University, Changsha 410082)

Abstract: An energy operator demodulating approach based on EMD (Empirical mode decomposition) is proposed to extract the frequencies and amplitudes of the multi-component AM-FM signals. Furthermore, the proposed approach is applied to mechanical diagnosis. In this approach, EMD method is used to decompose a multi-component AM-FM signal into a number of intrinsic mode functions (IMF) firstly; then, the energy operator demodulating is applied to each IMF and the amplitudes and frequencies of a multi-component AM-FM signal are extracted. The proposed approach is applied to mechanical fault diagnosis. The analysis results show that the energy operator demodulating approach based on EMD can extract the characteristics of mechanical fault vibration signals efficiently.

Key words: AM-FM signals EMD
Energy operator demodulating
Mechanical fault diagnosis

作者简介: 程军圣, 男, 1968 年出生, 副教授, 博士研究生。主要研究方向为信号处理和机械故障诊断。

Email: cjssignal@163.net