

基于 EMD 的齿轮故障识别研究¹

程军圣 于德介 杨 宇 邓乾旺 陈 源

(湖南大学机械与汽车工程学院 长沙 410082)

摘 要: EMD(Empirical Mode Decomposition) 方法是一种自适应的信号分解方法, 该文根据齿轮故障振动信号的特点, 将 EMD 方法应用于齿轮故障诊断中. 研究结果表明, EMD 方法可以有效地提取齿轮故障振动信号的特征.

关键词: EMD, 自适应的信号分解, 齿轮故障

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)05-0825-05

Research on Gear Fault Diagnosis Based on EMD

Cheng Jun-sheng Yu De-jie Yang Yu Deng Qian-wang Chen Yuan

(College of Mechanical and Automotive Eng., Hunan Univ., Changsha 410082, China)

Abstract EMD (Empirical Mode Decomposition) method is a self-adaptive signal decomposition approach. On the basis of the characteristics of the gear fault vibration signals, EMD is applied to gear fault diagnosis. The result of the application indicates that the characteristics of gear fault vibration signals can be extracted by EMD method efficiently.

Key words EMD, Self-adaptive signal decomposition, Gear fault

1 引言

齿轮故障诊断的关键是从齿轮故障振动信号中提取故障特征, 但齿轮故障振动信号往往表现为非平稳特征, 对这类信号傅里叶变换只能分别给出信号在时域或频域的统计平均结果, 无法同时兼顾信号在时域和频域中的全貌和局部化特征, 而这些局部化特征恰是齿轮故障的表现. 小波分析能同时提供振动信号的时域和频域的局部化信息, 具有多尺度特性和“数学显微”特性, 这些特性使得小波分析能识别振动信号中的突变成份, 因此近几年来小波分析越来越广泛地应用于齿轮故障诊断中. 但是, 小波分析本质上是可调的窗口傅里叶变换, 由于小波基函数的长度有限, 在对信号作小波变换时会产生能量泄漏, 从而要对信号在时域和频域作精确分析会有较大的困难; 另一方面, 一旦选择了小波基和分解尺度, 所得到的结果是某一固定频段的信号, 这一频段只与信号的采样频率有关而与信号本身无关, 从这一方面来讲小波分析不具有自适应性. 然而, 一种被称为 EMD(Empirical Mode Decomposition) 的信号处理方法^[1]提出后, 经验证在很多方面的应用效果都优于其它的信号处理方法^[2,3]. 在信号分析中, 时间尺度和随时间尺度分布的能量是信号的最重要的两个参数, EMD 方法是基于信号的局部特征的信号分解方法, 能把复杂的信号分解为有限的基本模式分量 (Intrinsic Mode Function, IMF) 之和, 每一 IMF 所包含的频率成分不仅与采样频率有关而且最重要的是随信号本身变化而变化, 因此 EMD 方法是自适应的信号处理方法, 非常适合处理非线性和非平稳过程. 本文在介绍 EMD 方法的基础上, 根据齿轮故障振动信号的特点, 将 EMD 方法应用于齿轮故障诊断中, 结果表明 EMD 方法能有效地提取齿轮故障信号的特征.

¹ 2003-02-12 收到, 2003-06-09 改回
国家自然科学基金资助项目 (50275050)

2 EMD 方法

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 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 我们可以把任何信号 $x(t)$ 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, 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

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

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。

(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

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

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

$$\left. \begin{array}{l} r_1 - c_2 = r_2 \\ \vdots \\ r_{n-1} - c_n = r_n \end{array} \right\} \quad (3)$$

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

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

因此, 我们可以把任何一个信号 $x(t)$ 分解为 n 个 IMF 和一个残量 r_n 之和, 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, 而且不是等带宽的。因此 EMD 方法是一个自适应的信号分解方法。

3 基于 EMD 的齿轮故障识别

Norden E.Huang 等人分析认为, 只有当对信号进行 EMD 分解后, 对得到的 IMF 求瞬时频率才有物理意义^[1]。对式 (4) 中的每个基本模式分量 $c_i(t)$ 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

$$\Phi_i(t) = \arctan H[c_i(t)]/c_i(t) \quad (8)$$

进一步可以求出瞬时频率

$$f_i(t) = (1/2\pi)d\Phi_i(t)/dt \quad (9)$$

由式 (6)–(8) 容易得到, EMD 分解得到的每一个 IMF 可以表示为

$$c_i(t) = a_i(t) \cos \Phi_i(t) \quad (10)$$

由式 (7) 得到的 Hilbert 包络幅值函数 $a_i(t)$ 相对于相位函数 $\Phi_i(t)$ 是一个缓变信号, 因此由 EMD 分解得到的每一个 IMF 可以是幅度或频率调制的, 可变的幅度和瞬时频率不但很大地改进了信号分解的效率, 而且使 EMD 方法可以有效地处理非平稳信号。

当齿轮存在磨损、疲劳裂纹等故障时, 则当该齿轮啮合时, 振动信号的幅值和相位发生变化, 产生幅值和相位调制, 忽略传递函数对齿轮振动信号的影响, 齿轮箱上的传感器拾取的齿轮故障振动信号为

$$y(t) = \sum_{m=1}^M X_m [1 + d_m(t)] \cos[2\pi m z f_s t + \phi_m + b_m(t)] \quad (11)$$

式中, X_m 为第 m 阶啮合频率谐波分量的幅值, ϕ_m 为第 m 阶啮合频率谐波分量的初相位, f_s 为轴的转频, z 为齿轮的齿数; $d_m(t)$ 和 $b_m(t)$ 分别是第 m 阶啮合频率谐波分量的幅值和相位调制函数。当齿轮出现局部故障时故障齿随轴每周啮合一次, 因此 $d_m(t)$ 和 $b_m(t)$ 是以轴转频 f_s 为重复频率的周期函数。为了提取 $d_m(t)$ 和 $b_m(t)$ 的信息, 解调分析是一种很有效的方法^[4]。传统的解调分析方法有 Hilbert 变换法和检波解调法^[5–7]。它们在形成包络信号时都需要带通滤波将式 (11) 中的 M 个频率族分开, 这样就需要依靠经验来确定带通滤波器的中心频率和带宽, 这在主观上会给分析结果带来很大影响^[8]。另一方面, 当相位调制较大时, 带通滤波不能很好地将 M 个频率族分开。式 (11) 可以写成

$$y(t) = \sum_{m=1}^M a_m(t) \cos \Phi_m(t) \quad (12)$$

式中 $a_m(t) = X_m [1 + d_m(t)]$, $\Phi_m(t) = 2\pi m z f_s t + \phi_m + b_m(t)$ 。

忽略残量 r_n , 根据式 (10), 式 (4) 可以写成

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos \Phi_i(t) \quad (13)$$

比较式 (12) 和 (13), 它们具有相同的形式, 齿轮振动信号包含的频率成分是不变的, 因此可以尝试用 EMD 对齿轮故障振动信号进行分解, 得到若干个 IMF, 其中高频段的 IMF 对应着 M 个频率族, 而其它的低频段的 IMF 为噪声, 这样在分开 M 个频率族的同时达到去除噪声的目的。

图 1 是一测得的断齿齿轮振动加速度信号的时域波形, 齿轮的齿数为 37, 转频为 7Hz, 采样频率为 1024Hz, 从图中可以看出调幅信号的一些特征, 但是要判断齿轮的缺陷还需作进

一步的分析。采用 EMD 对齿轮振动信号进行分解, 得到第一个 IMF c_1 如图 2 所示。由于采样频率为 1024 Hz, 所以齿轮故障振动信号中只包含 1 个以啮合频率 (259Hz) 为中心的频率族, 因此第一个 IMF c_1 就是齿轮振动信号中的 1 个频率族, 其它的 IMF 均为噪声。

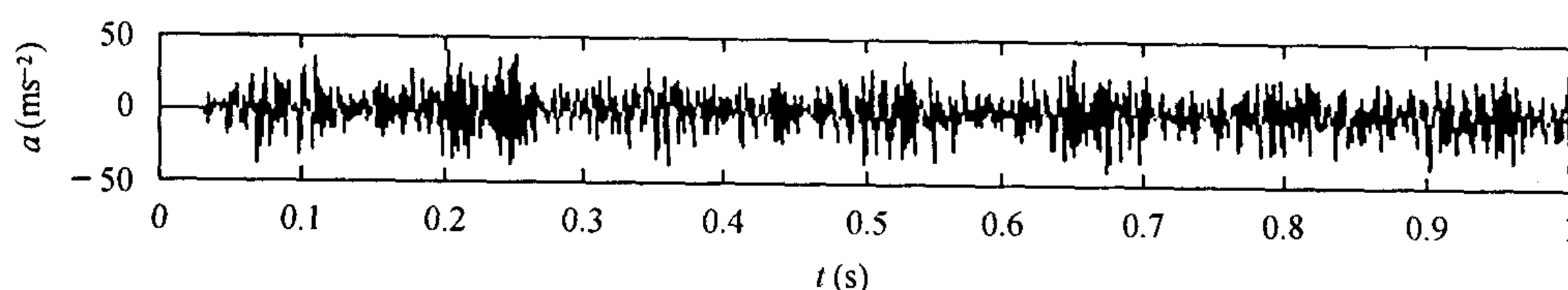


图 1 断齿齿轮振动信号的时域波形

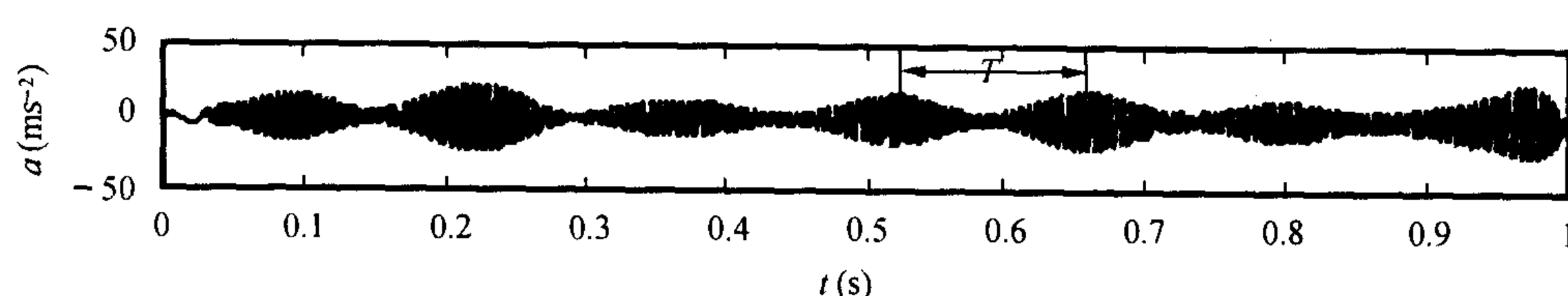


图 2 断齿齿轮振动信号的第一个 IMF c_1

从断齿齿轮振动信号的第一个 IMF c_1 的波形可以看出明显的冲击特征, 冲击周期 $T = 0.1426\text{s}$, 因此脉冲产生的频率为 7Hz, 正好与齿轮的转频相等, 任取齿轮一个旋转周期 T 中分量 c_1 的波形局部放大来观察, 如图 3 所示, 在这一周期内正好有 37 个冲击, 产生冲击的数量正好与齿轮的齿数相等。这些特征正是断齿齿轮振动信号所具备的特征, 与实际情况相符。

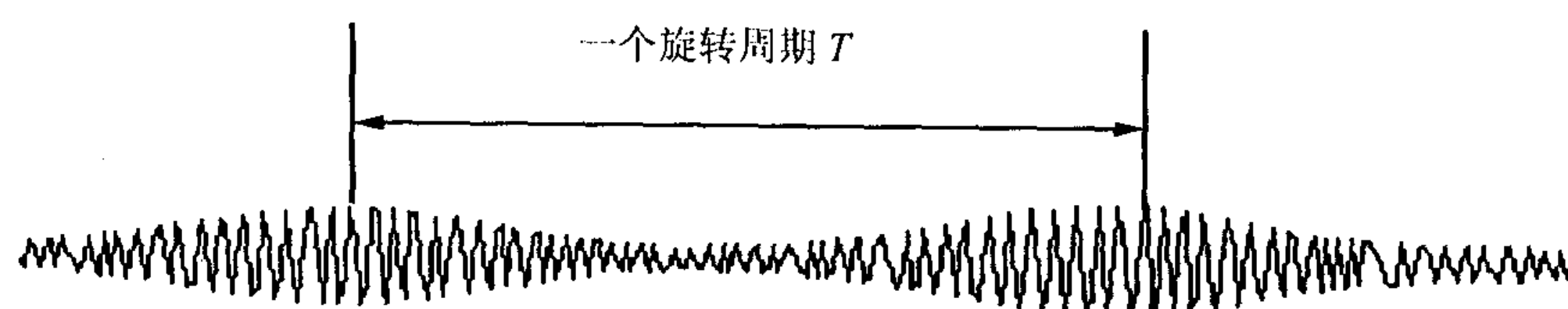


图 3 一个旋转周期 T 中分量 c_1 的波形局部放大

4 结论

EMD 方法能按频率由高到低把复杂的非平稳信号分解为有限的基本模式分量之和, 具有自适应的特点。由 EMD 分解得到的每一个 IMF 可以是幅度或频率调制的, 可变的幅度与瞬时频率不但很大地改进了信号分解的效率, 而且使 EMD 方法可以有效地处理非平稳信号。本文根据齿轮故障振动信号的特点, 采用 EMD 方法来提取齿轮故障振动信号的特征, 对实际的信号分析结果说明了 EMD 方法能有效地提取齿轮振动信号的故障特征。然而 EMD 方法还在发展阶段, 在理论的完善和应用上还有许多问题需要作进一步的研究。如 EMD 分解的快速算法、包络线是否唯一、包络时的端点效应等问题, 都会影响 EMD 方法的进一步应用。本文就 EMD 方法在提取信号特征方面的应用作了一些探索性的工作, 这对推动 EMD 方法的进一步应用是有益的。

参 考 文 献

- [1] Huang N E, *et al.*. 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.
- [2] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1999, 31: 417–457.
- [3] Vincent H T, Hu S -L J, Hou Z. Damage detection using empirical mode decomposition method and a comparison with wavelet analysis. *Proceedings of the Second International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, 1999: 891–900.
- [4] Randall R B. A new method of modeling gear faults. *J. of Mechanical Design, Trans. of ASME*, 1982, 104(2): 259–267.
- [5] 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, 18(1): 87–91.
- [6] 朱利民, 严峻, 朱向阳等. 振动调幅信号广义检波解调法及其在齿轮故障诊断中的应用. *东南大学学报*, 1998, 28(2): 45–50.
- [7] Ma J, Li C J. Gear defect detection through model-based wideband demodulation of vibrations. *Mechanical System and Signal Process*, 1996, 10(5): 653–665.
- [8] 何岭松, 李巍华. 用 Morlet 小波进行包络检波分析. *振动工程学报*, 2002, 15(1): 119–121.

程军圣: 男, 1968 年生, 副教授, 博士生, 从事信号处理、机械故障诊断研究.

于德介: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 从事信号处理、机械故障诊断等研究.

杨 宇: 女, 1971 年生, 讲师, 博士生, 从事信号处理和机械故障诊断研究.

邓乾旺: 男, 1972 年生, 讲师, 博士生, 从事机械制造、自动控制研究.

陈 源: 男, 1970 年生, 讲师, 从事机电一体化、自动控制研究.