

# 基于经验模式分解的旋转机械振动信号降噪处理

杨建文, 贾民平, 许飞云, 胡建中

(东南大学设备监控与故障诊断研究所, 南京 210096)

**[摘要]** 分析了经验模式分解的滤波性能; 针对旋转机械振动信号信噪比低及非平稳特性, 应用经验模式分解对振动信号进行降噪处理, 突出了有用振动信号, 为旋转机械在线监测和故障诊断提供了有效的依据; 仿真实验及真实数据分析表明, 经验模式分解在振动信号降噪处理中是有效的, 为振动信号分析提供了新的方法。

**[关键词]** 故障诊断; 经验模式分解; 旋转机械; 滤波

**[中图分类号]** TH165; TN911.7 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)08-0066-04

## 1 前言

通过旋转机械振动信号分析, 可以有效地识别机器的运转状况, 判别机器的故障类型及损坏程度<sup>[1]</sup>。然而, 由于旋转机械结构复杂, 并且发生故障以后振动信号呈现非平稳特性<sup>[2]</sup>, 给通过信号处理精确地识别机器故障带来了困难。

常用的提高信噪比的方法有滤波、同步平均等。由于非平稳信号在频域表现为包含高阶谐波成分, 因此使用传统的频域滤波方法将造成严重的信号失真<sup>[3]</sup>。同时因为振动信号的复杂性, 使用同步平均方法也难以奏效<sup>[4]</sup>。文献[5]提出了使用小波分解的方法剔除信号中的干扰成分。但是, 小波分解是非自适应的, 重组后的信号将扭曲振动系统真实的物理意义。

经验模式分解(empirical mode decomposition, EMD)是一种较新的信号变换理论, 具有自适应的特性, 分解出的信号能够很好地反映系统的特征。笔者将经验模式分解引入机械振动信号的滤波处理中, 试图提高信号的信噪比, 突出有效信号, 以达到增强诊断可靠性的目的。

## 2 基本理论及滤波性能分析

### 2.1 经验模式分解(EMD)基本理论

经验模式分解认为信号是由不同的波动成分和一个趋势组成的, 仿照 Fourier 级数分解的形式, 可以表示如下:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i \int w_j(t) dt} + r \quad (1)$$

式中  $x(t)$  为原信号,  $r$  为趋势项,  $a_j(t)$ ,  $w_j(t)$  分别为时变幅值和时变频率。从式(1)可以看出, 经验模式分解延伸了 Fourier 级数的概念, 基函数不再是正弦或余弦信号, 而被调幅、调频信号所取代。从这个意义上讲, Fourier 级数可以视为经验模式分解的一个特例。

基于以上原因, 经验模式分解后的每一项(除了趋势)都被规定为一个本征模式函数(intrinsic mode function, IMF), IMF 应满足以下条件:

- 1) 在整个数据序列内, 过零点和极值点的数目最多相差 1;
- 2) 在该分量的任意点, 局部均值为零。

由以上两点可以看出, IMF 是一个与时间轴对称的波动信号。经验模式分解的过程如下:

- 1) 确定原信号  $x(t)$  的所有局部极值点, 利

用三次样条函数求出信号的上、下包络线；

2) 记两条包络线的均值为  $\mu_1$ ，求出余项

$$y_1(t) = x(t) - \mu_1 \quad (2)$$

3) 判断  $y_1(t)$  是否满足 IMF 定义的条件，若不满足，视  $y_1(t)$  为  $x(t)$ ，重复以上步骤，直到  $y_1(t)$  满足 IMF 的条件， $y_1(t)$  即为分解出的第一个分量。

4) 继续按上述步骤对  $x(t) - y_1(t)$  进行分解，直到剩余量为单调函数为止。

### 2.2 经验模式分解的滤波性能分析

2.2.1 EMD 对加性噪声的滤除作用 设模拟信号为

$$x = \sin(2\pi/30)r \quad t \in [0, 1023] \quad (3)$$

式中  $r$  是均值为零、正态分布的噪声，单位为 mm， $r$  及式 (3) 的时域波形见图 1。

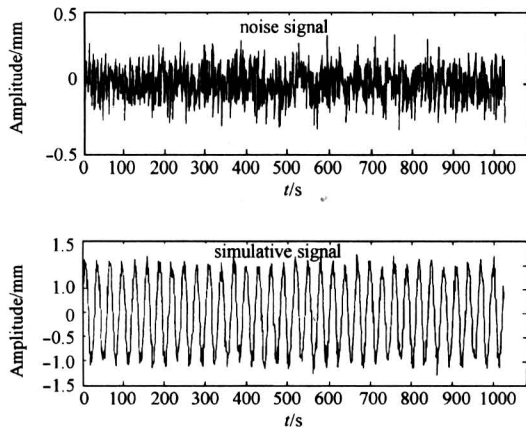


图 1 噪声与模拟信号的时域波形

Fig.1 The time domain waveform of noise and simulative signal

下面应用 EMD 对式 (3) 进行分解，其波形如图 2 所示。由图 2 看到，模拟信号的正弦波基本上被正确分解出来 (IMF3)，并且幅值接近 1，表明能量损失很小；白噪声也被逐级分解出来，分别为分量 IMF1，IMF2，IMF4，IMF5，可以证明它们都是窄带高斯噪声<sup>[6]</sup>。由此可见，EMD 能够有效地滤除加性噪声信号。

2.2.2 利用 EMD 构造滤波器 EMD 可以将信号分解为一系列的本征模式函数，这些函数依次分布在从高到低的不同频段。同时，由于自适应的性质，每个分量都代表了系统的不同物理特性，各模式分量重新组合后的信号不会对原始信号所包含的信息造成扭曲。

假设信号  $x(t)$  分解为 IMF 后表示为

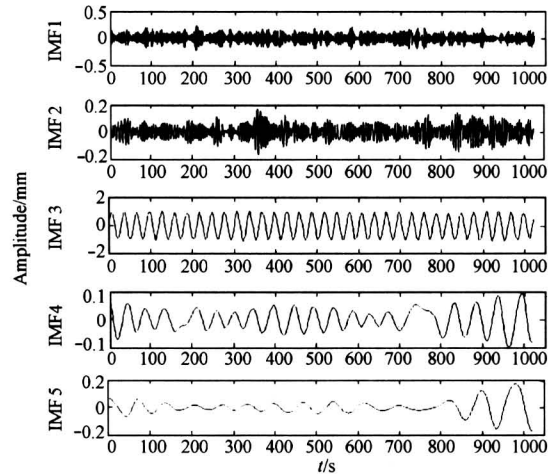


图 2 加性噪声滤除的 EMD

Fig.2 EMD of filtering additive noise

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r \quad (4)$$

其中  $i = 1, 2, \dots, n$ ，表示原始信号被分解为  $n$  个本征模式函数，则

高通滤波可表示为

$$x_h(t) = \sum_{i=1}^k c_i(t) \quad (5)$$

其中  $i = 1, 2, \dots, k$ ，表示抽取信号的前  $k$  个本征模式函数，信号的高频成分被有效提取出来；

低通滤波可表示为

$$x_l(t) = \sum_{i=m+1}^n c_i(t) \quad (6)$$

其中  $i = m + 1, m + 2, \dots, n$ ，表示抽取信号的后  $(n - m)$  个本征模式函数，信号的低频成分被有效提取出来；

带通滤波可表示为

$$x(t) = \sum_{i=k+1}^m c_i(t) \quad (7)$$

其中  $i = k + 1, k + 2, \dots, m$ ，表示抽取信号的中间  $(m - k)$  个本征模式函数，这样信号的中间频率成分被有效提取出来。

由上述过程可以看到，使用 EMD 进行滤波是在时域进行的，同时，由于分解过程的自适应性以及局部性，利用 EMD 进行滤波最大限度地保证了信号的真实性和原始特性。对于不同的信号，为了抽取合适的本征模式函数，应根据系统的特性来选择；对于旋转机械而言，分解出的每层 IMF 都代表了特定的振动模式，因此，可以选择包含重要信息的本征模式函数，而剔除无用的模式<sup>[7]</sup>。

### 3 经验模式分解的滤波仿真

由于旋转机械物理结构的特殊性，其振动信号往往包含正弦信号、调制信号、谐波信号和噪声等，假设振动信号为

$$x = \sin(26\pi t) + [1 + \sin(14\pi t)]\sin(300\pi t + \pi/6) + \sin(60\pi t) + \sin[150\pi t + \sin(26\pi t)] + r \quad (8)$$

式中  $r$  为均匀分布的随机噪声，有 2 个正弦信号、1 个调幅信号和 1 个调相信号。时域波形见图 3。

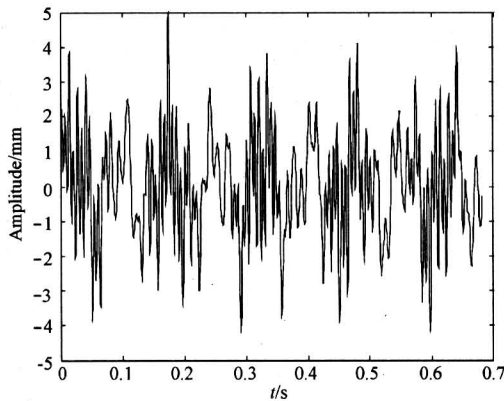


图 3 仿真信号的时域波形

Fig.3 The time domain waveform of simulative signal

图 4 绘出了图 3 所示信号进行 EMD 的结果及各分量的幅值谱。可以看到，2 个正弦信号和 2 个调制信号都被分解出来，但有少许误差。由幅值谱能够看到信号的频率成分按照由大到小的顺序被逐级排列；同时，较好地保持了信号的原始特性。

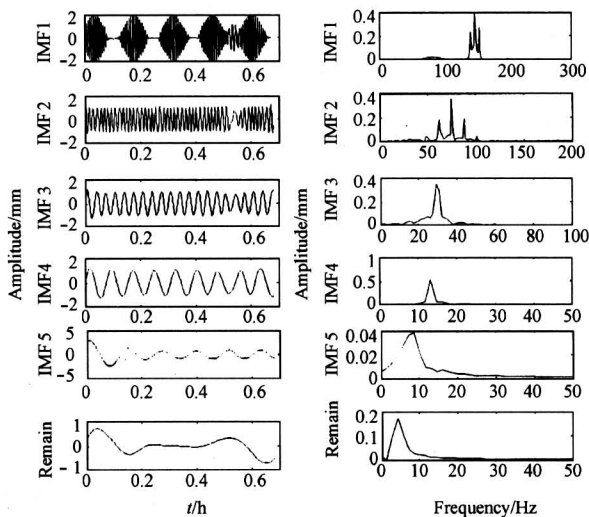


图 4 仿真信号的 EMD 与对应的幅值谱

Fig.4 EMD of simulative signal and relevant amplitude spectrum

在旋转机械振动信号分析中，系统的不同部分将产生不同的信号成分。若感兴趣的频率成分是正弦和调相信号，则可以使用 EMD 构造一个带通滤波器，将 IMF 中的 1, 5, 6 去掉，重构其他信号。图 5 是经过 EMD 滤波后信号的时域波形和幅值谱。对比滤波前后的频谱发现，有用信号被正确分离出来，且对信号的频谱几乎没有造成任何失真。在旋转机械故障诊断中，也可以直接利用分解出的时域信号分量，判断振动的严重程度，进行决策。

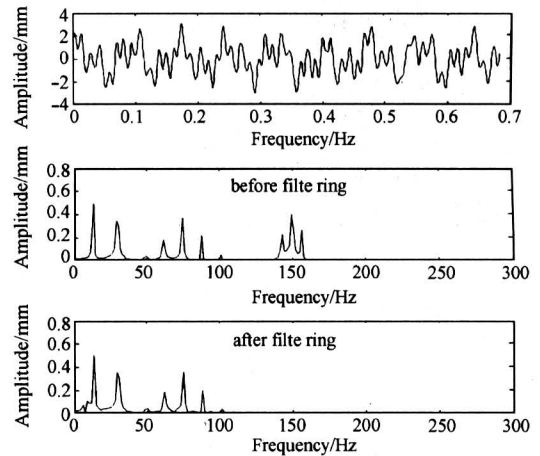


图 5 仿真信号滤波后的时域波形与滤波前/后的频谱

Fig.5 The simulative signal after filtering and amplitude spectrum of before/after filtering

### 4 工业现场数据应用实例

以某企业氧压机轴向振动数据为例，其时域波形及频谱如图 6 所示。由时域波形可以看到存在周

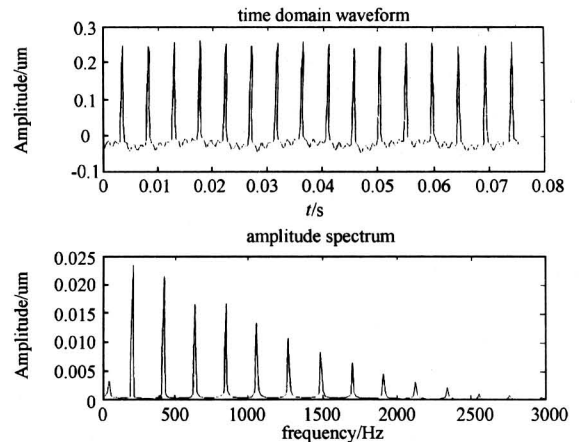


图 6 轴向位移传感器的时域波形与幅值谱

Fig.6 The time domain waveform of axial displacement sensor and amplitude spectrum

期性的冲击, 造成信号频谱中出现高频谐波, 用传统的频域滤波法不能正确处理此信号。图 7 为应用 EMD 滤除高频谐波后得到的信号。可以看到, 信号中存在载波频率为 850 Hz, 调制频率为 212 Hz 的调制成分。

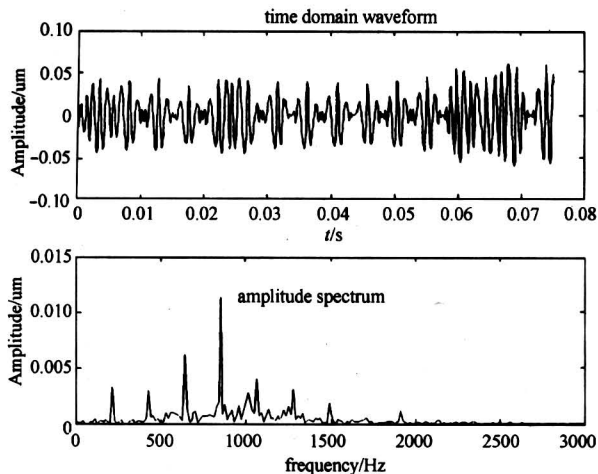


图 7 滤除高频谐波以后的信号与频谱

Fig.7 The signal and its amplitude spectrum after filtering the high frequency harmonic

## 5 结论

笔者分析了经验模式分解方法的去噪与滤波性能, 并将其应用于旋转机械振动信号分析中。仿真实验及真实数据验证表明, 使用经验模式分解进行降噪、滤波是可行的。

经验模式分解方法作为一种自适应的时域分解方法, 其滤波性质有别于传统频域滤波方法, 这表现在无法事先规定滤波的截止频率。事实上, 自适应性和自行定义的截止频率是一对矛盾, 如何有效地解决这个问题, 有待进一步研究。

### 参考文献

- [1] 钟秉林, 黄仁. 机械故障诊断学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997. 36~48
- [2] 贾民平, 许飞云. 基于小波分析的进化谱及在故障诊断中的应用 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2002, 32 (6): 925~928
- [3] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 93~97
- [4] McCormick A C, Nandi. Cyclostationarity in rotating machine vibration [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1998, 12 (2): 225~242
- [5] Chow T W S, Shi Hai. Induction machine fault diagnostic analysis with wavelet technique [J]. IEEE, Transactions on Industrial Electronics, 2003, 51 (3): 558~565
- [6] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proc R Soc Lond A, 1998, 454: 899~955
- [7] 贾民平, 凌娟, 许飞云, 等. 基于时间序列分析的经验模式分解法及其应用 [J]. 机械工程学报, 2004, 40 (9): 54~57

## Noise Reduction of Vibration Signal of Cyclic Machine Based on the EMD

Yang Jianwen, Jia Minping, Xu Feiyun, Hu Jianzhong

(Research Center of Condition Monitoring and Fault Diagnosis, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[Abstract] The filtering property of empirical mode decomposition is analyzed in the paper. Aimed at the low signal/noise ratio and non stationary feature of vibration signal of cyclic machine, EMD is introduced to the noise reduction of vibration signal and the useful signal is given prominence efficiently, which offers the more efficient foundation to monitor on line and fault diagnosis of cyclic machine. By the simulation and application, it shows that EMD is very useful in reducing noise and provides new means of vibration signal analyzing.

[Key words] fault diagnosis; empirical mode decomposition; cyclic machine; filter