

# 机械故障诊断中经验模态分解的模态混淆问题

李 宁, 曹有荣, 程 礼

(空军工程大学,陕西西安,710051)

**摘要** 经验模态分解广泛应用于机械故障诊断,但其模态混淆问题影响了方法的有效性。从机械故障诊断的角度提出了 EMD 模态混淆的基本概念,根据表现形式将模态混淆定义为“向下”、“交叉”和“向上”3 种基本类型,通过深入研究经验模态分解的模态混淆问题,发现产生模态混淆的原因主要有 2 类:一类是由方法基本原理所导致,有模态向下混淆和模态交叉混淆 2 种表现形式,称为 I 类模态混淆问题;一类是由筛分算法缺陷所导致,有模态向上混淆 1 种表现形式,称为 II 类模态混淆问题。根据模态混淆产生的机理,提出了针对性的解决方案:对于 I 类模态混淆问题需要引进辅助手段加以解决,例如异常排除法、信号滤波法和辅助信号加入法;对于 II 类模态混淆问题,完善了本征模态函数的定义,改进了筛分算法最后进行了仿真,结果表明所提解决方案有效。

**关键词** 经验模态分解;本征模态函数;筛分过程;模态混淆;机械故障诊断

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.02.018

**中图分类号** TN911 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)02-0076-05

## The Mode Mixing of Empirical Mode Decomposition in Mechanical Fault Diagnosis

LI Ning, CAO You-rong, CHENG Li

(Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Empirical mode decomposition (EMD) is widely used in mechanical fault diagnosis, but its inevitable mode mixing in EMD exerts an influence on effectiveness. Mode mixing in EMD is studied, and two kinds of causes leading to mode mixing are found. One caused by the basic principle of EMD is called type -I mode mixing, such as mode down mixing and mode cross mixing, the other caused by faults of the sifting process is called type-II mode mixing, such as mode upward mixing. The improvement schemes are proposed according to the different mode mixings. For type-I mode mixing, some supplemental measures such as abnormal event elimination, signal filter and supplemental signal added method are necessarily introduced in problem solving. For type -II mode mixing, the definition of intrinsic mode function is perfected, and the sifting process is improved. The simulating results show that the proposed schemes are effective.

**Key words:** empirical mode decomposition; mode mixing; intrinsic mode function; sifting process; mechanical fault diagnosis

**收稿日期:** 2013-09-26

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51175509, 51275374)

**作者简介:** 李 宁(1964—),女,广西北海人,副教授,主要从事智能结构与振动控制研究.E-mail: lining\_cheng@aliyun.com

**引用格式:** 李宁,曹有荣,程礼. 机械故障诊断中经验模态分解的模态混淆问题[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(2):76-80. LI Ning, CHENG Li. The Mode Mixing of Empirical Mode Decomposition in Mechanical Fault Diagnosis[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(2): 76-80.

随着现代机械变得越来越复杂、精密和昂贵,机械故障诊断技术越来越受到人们的重视,其核心工作就是运用数学分析方法对状态信息进行加工或变换,滤除混杂在状态信息中的噪声和干扰,得到表征故障特征的模态,及时发现故障。经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)是一种新的自适应时间-频率信号分析方法<sup>[1-2]</sup>,可以将复杂时域信号分解成一系列基于局部时间尺度的本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)。实践表明 EMD 在非线性和非平稳信号分析方面十分有效,已经广泛应用于机械故障诊断<sup>[3-7]</sup>。从 EMD 提出至今 10 年来,国内外学者对 EMD 存在的 IMF 判据、端点效应以及欠包络和过包络等问题进行了比较深入的研究<sup>[8]</sup>。但对模态混淆问题的研究却相对较少, Huang<sup>[8]</sup>、赵进平<sup>[9]</sup>研究了短时间扰动产生的混淆问题, Peng<sup>[11]</sup>认为 EMD 存在 3 个主要缺陷,胡爱军<sup>[11]</sup>对模态混淆问题进行了梳理,提出了消除模态混淆的高频谐波加入法。本文通过分析模态混淆的产生机理提出了改进方案,进一步完善了 EMD 算法。

## 1 EMD 的基本概念及其模态混淆

### 1.1 EMD 的基本概念

#### 1.1.1 本征模态函数

Huang<sup>[1-2]</sup>定义 IMF 为包含在信号中的最基本的振荡模态。

#### 1.1.2 筛分过程

EMD 的基本思想是:假设任何时域信号  $x(t)$  都可以经过筛分过程分解为有限个 IMF 之和。筛分过程见:

1) 确定被分解信号  $h_{ij}(t)$  的所有局部极大值和极小值点,其中  $i$  为 IMF 个数,  $j$  为筛分次数,  $h_{11} = x(t)$ ;

2) 用三次样条线将局部极大值点连接起来形成上包络线  $u_{ij}(t)$ , 将局部极小值点连接起来形成下包络线  $v_{ij}(t)$ ;

3) 计算上下包络线的平均值  $m_{ij} = (u_{ij} + v_{ij}) / 2$ , 求出  $h_{i(j+1)}(t) = h_{ij}(t) - m_{ij}(t)$ ;

4) 如果  $h_{i(j+1)}(t)$  不满足筛分终止条件, 重复步骤 1)~3);

5) 如果  $h_{i(j+1)}(t)$  满足筛分终止条件, 记  $c_i(t) = h_{i(j+1)}(t)$ ,  $c_i(t)$  就是  $x(t)$  的第  $i$  个 IMF 分量;

6) 将  $c_i(t)$  从  $h_{i1}(t)$  中分离出去, 得到新的被

分解数据  $h_{(i+1)1}(t) = h_{i1}(t) - c_i(t)$ , 如果  $h_{(i+1)1}(t)$  不满足残余终止条件, 重复步骤 1)~5);

7) 如果  $h_{(i+1)1}(t)$  满足残余终止条件, 记  $r(t) = h_{(i+1)1}(t)$ ,  $r(t)$  就是  $x(t)$  分解结束后的残差, 代表信号的趋势。

经过筛分过程, 信号可以表述成下式:

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

#### 1.1.3 筛分终止条件

1) 对于连续的 2 个筛分结果  $h_{i(k+1)}(t)$  与  $h_{ik}(t)$ , 计算标准差:

$$D_s = \sum_{t=0}^T \frac{|h_{i(k+1)}(t) - h_{ik}(t)|^2}{h_{ik}^2(t)} \quad (2)$$

当  $D_s$  小于某个事先给定的值就停止筛分, 通常  $D_s$  可取 0.2~0.3。

2) 事先给定 1 个正整数  $N$ , 规定如下: 在筛分过程中, 如果从第  $k$  次筛分后的连续  $N$  次的筛分结果  $h_{1(k+1)}(t), h_{1(k+2)}(t), \dots, h_{1(k+N)}(t)$  都能保持零交点的个数与极值点的个数相同或相差 1, 则将  $h_{1k}(t)$  作为本征模态函数, 即经过  $k$  次筛分后停止, 一般  $N$  取 3~5。

3) 事先给定 1 个最大允许筛分的次数  $M$ , 当筛分次数等于  $M$  即筛分过程终止, 其目的是为了避免过度筛分。

### 1.2 模态混淆的定义和表现形式

#### 1.2.1 模态混淆的定义

在机械故障诊断中, 使用 EMD 方法处理信号的目的是为了还原信号中混合在一起的各种机械状态, 滤除各种噪声和干扰。也就是期望 1 个 IMF 表述 1 个机械状态, 表达一个特定的物理意义。本文将在 1 个 IMF 中混杂有 1 个以上的机械状态, 或者 1 个 IMF 中 1 个机械状态部分被噪声所占据的现象定义为“模态混淆”。由于 1 个机械状态可能涵盖相当宽的时间尺度范围, 因此这个定义与 Huang<sup>[1]</sup>的定义不完全相同。

#### 1.2.2 模态混淆的表现形式

根据发生模态混淆时 IMF 的频率表现形式, 模态混淆可以分为 3 种基本模式: ① 模态向下混淆 (Mode Down Mixing), 即以高频部分影响低频部分为特征的混淆; ② 模态交叉混淆 (Mode Cross Mixing), 即以高低频发生交叉影响为特征的混淆; ③ 模态向上混淆 (Mode Upward Mixing), 即以低频部分影响高频部分为特征的混淆。

目前, 对模态向下混淆的研究较多, 也比较充

分。但是对模态交叉混淆和模态向上混淆还未见有研究。

## 2 源于方法基本原理的模态混淆

如果某一机械状态不能在整个被分析的时间窗口内始终占据最高频段,那么在 EMD 筛分过程中,必然会有其他信号对其产生“污染”,从而造成模态混淆问题。模态向下混淆和模态交叉混淆都属于这种情况。

### 2.1 模态向下混淆

#### 2.1.1 基本概念

在机械故障诊断的信号中,经常会存在高频噪声干扰。如果高频干扰只在局部出现,那么在分解结果中,第 1 个 IMF 就会包括机械状态和那段高频干扰。在出现高频干扰的地方,机械状态被推移到下一个 IMF。使得第 1 个 IMF 出现机械状态和高频干扰的模态混淆现象,不能表现正确的机械状态;而第 2 个 IMF 出现与第 1 个机械状态相对应的信号,与第 2 个机械状态又发生了模态混淆。这种混淆将会一直延续到最后 1 个 IMF,无法达到预期的信号处理目标。本文将这种模式定义为模态向下混淆,Huang<sup>[1]</sup>和胡爱军<sup>[11]</sup>所谓的模态混淆就是指这种情况。

#### 2.1.2 举例

$$x(t) = \sin(2\pi 4.5t) +$$

$$0.2\sin(2\pi 100t) \{ \forall 0.465T < t < 0.475T \} \quad (3)$$

式(3)的主体是 1 个正弦信号,但是在分析的时间窗口内叠加了 1 个 1% 长度的高频干扰信号。图 1 是采用 EMD 对该信号分解的结果,可以看出虽然干扰信号很短很小(长度仅为主信号的 1 个周期的 9%,幅值为 20%),但对整个分析的影响相当大,在第 1 个 IMF 影响了 3 个周期的主信号,并向下混淆到了第 3 个 IMF。

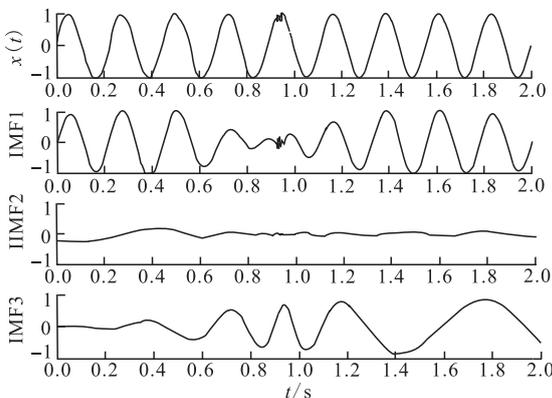


图 1 模态向下混淆现象

Fig.1 Mode down mixing

#### 2.1.3 解决方案

模态向下混淆的机理清楚,解决方案较多<sup>[1,5-6,11]</sup>,但在具体实施中都存在一定的困难。

Huang<sup>[1]</sup>采用设置时间尺度阈值的方法解决这个问题。如果发现出现模态混淆,在 EMD 分解过程中,设置 1 个阈值,保证只有周期小于(频率高于)阈值的波动可以被筛选到 IMF 中,这样可以有效地解决高频干扰问题,见图 2。这种解决方案虽然效果十分明显,但无形中弱化了 EMD 自适应分解的优点。而且在实践中最大的困难是如何判断已经出现模态混淆,以及如何选取合适的阈值。需要进一步研究自适应的阈值确定方法。

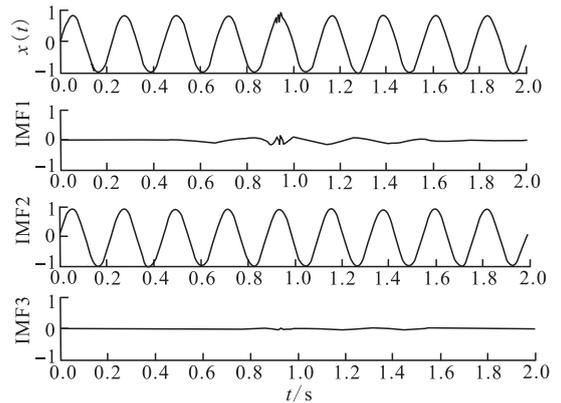


图 2 利用阈值解决模态向下混淆问题

Fig.2 Mode down mixing solved with the threshold

### 2.2 模态交叉混淆

#### 2.2.1 基本概念

在机械状态中,经常出现频率变化的现象。假设某个机械状态的频率增加十分缓慢,甚至下降,而相邻的机械状态的频率增加十分迅速,那么就有可能在某个时间点之后,两者的频率对比关系发生颠倒。当 2 个机械状态的瞬态频率在分析时间窗口内存在交叉,那么必然导致模态混淆,本文将这种模式定义为模态交叉混淆。发生模态交叉混淆的原因与模态向下混淆相同,但混淆的结果不同。

#### 2.2.2 举例

随着转速的上升,旋转叶片的某些扭转模态和弯曲模态的固有频率在离心力的作用下都将增加,但是扭转模态的上升十分有限,而弯曲模态的则迅速上升,很快会发生频率转向。此类信号可以用下式来表述:

$$x(t) = 2\sin(2\pi 15t) + \sin(2\pi(5 + 15t/T)t) \quad (4)$$

式(4)是 1 个固定频率的高频正弦信号,叠加了 1 个频率增加的正弦信号。图 3 所示 EMD 的分解结果,可以看出 IMF1 和 IMF2 都由 3 部分组成。IMF1 在 0~0.4 s 时间段是信号 1,0.4~1.2 s 时间段是混频信号(这时 2 个正弦频率相近),而 1.2~2

秒时间段为信号 2。IMF2 正好颠倒过来,只是混频段的幅值较小(已经分解到 IMF1 中了)。

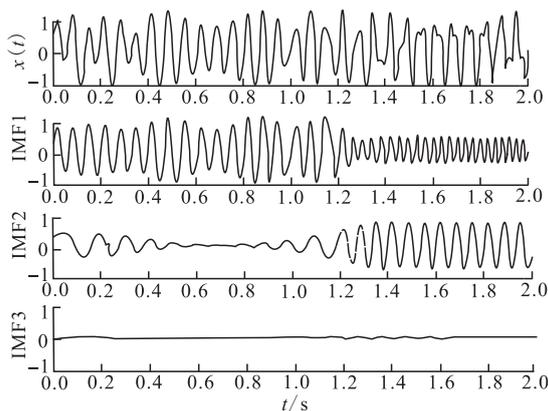


图 3 模态交叉混淆现象

Fig.3 Mode cross mixing

由于 EMD 基本原理的限制,要解决模态交叉混淆比较困难。限于篇幅限制,本文不深入讨论这个问题。

### 3 源于筛分过程缺陷的模态混淆

#### 3.1 基本概念

2 个机械状态部分混淆在 1 个 IMF 中,导致低频的机械状态向上混淆在高频的机械状态中,本文将这种模式定义为模态向上混淆。由于 EMD 方法自适应的高通滤波特性,通常认为信号的低频分量是不可能影响高频分量的,因此模态向上混淆问题未见有文献讨论过。但模态向上混淆现象确实存在,说明简单地将 EMD 方法看成高通滤波器并不总是正确的,必须对其特性进行重新认识。

#### 3.2 举例

$$x(t) = 2\sin(2\pi 15t) +$$

$$4\sin(2\pi 10t)\sin(2\pi 0.1t) + \sin(2\pi 5t) \quad (5)$$

式(5)是文献[3]中的 1 个算例,它是由 2 个正弦信号和 1 个调幅信号组成。文献[3]的图 2.6 给出了 EMD 方法对其 0~1 s 时间窗口的数据进行分解,可得到 3 个 IMF 分量和 1 个残余函数。

但是当时间窗口移动到 1.2~2.2 s 时,将发现相同的信号组成、相同尺度的时间窗口,使用同一筛分程序会产生不同的结果,见图 4。从图 4 中可以看到出现了模态混淆现象。在大约 1.6 s 之后,信号的前 2 个模态成分混淆在一起,形成了第 1 个 IMF,相应地第 2 个 IMF 则由后 2 个频率成分分段组成。对比图 1 和图 4,可以发现两者是完全不同的:在图 1 中,是高频状态占据了低频状态的位置,造成了模态混淆;而在图 4 中,是低频状态混淆到了高频状态中。

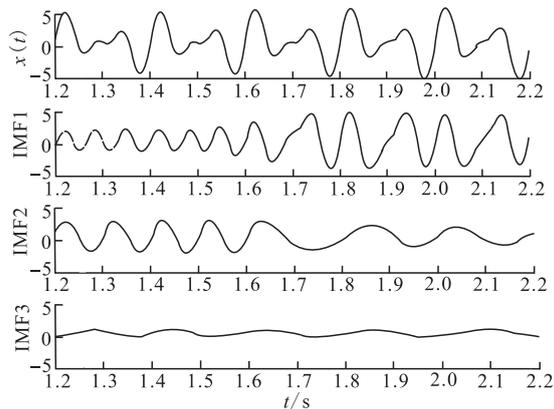


图 4 模态向上混淆现象

Fig.4 Mode upward mixing

#### 3.3 解决方案

##### 3.3.1 本征模态函数的完善

EMD 是基于时间尺度将信号中具有不同特征时间尺度的 IMF 分解开的。可以采用度量 2 个相继极值点之间的时间来确定特征时间尺度。

对比图 4 中信号的前后 2 个部分可以发现,前 2 个周期出现 3 组极大极小值,而后 3 个周期仅有 2 组。显然,出现模态向上混淆现象的原因与前一种模式不同,是由于忽略了中间的时间尺度使筛分过程无法将 2 个状态分解开。

如果信号  $x(t)$  可导,则满足  $\dot{x}(t) = 0$  的时间  $t_i$  ( $i = 1 \cdots n$ ) 处为信号  $x(t)$  的驻点。如果  $\ddot{x}(t_i) < 0$ , 对应的驻点为极大值;如果  $\ddot{x}(t_i) > 0$ , 对应的驻点为极小值;如果  $\ddot{x}(t_i) = 0$ , 对应的驻点可能为极大值、极小值和拐点。拐点是信号  $x(t)$  向上凹与向下凹的分界点,显然应该成为信号时间尺度的 1 个特征点。一种简单的处理办法是将拐点既当作极大值又当作极小值,则 IMF 必须满足 2 个条件:①在整个数据段内,极值点的个数和过零点的个数必须相等或相差最多不能超过 1 个;②在任意时刻,由局部极大值点和拐点形成的上包络线和由局部极小值点和拐点形成的下包络线的平均值为 0。

##### 3.3.2 筛分过程的改进

只要将 1.1.2 所列筛分过程的第 1)、2)步骤进行修改,而其他步骤都不变:

1) 确定被分解信号  $h_{ij}(t)$  的所有驻点,局部极大值和拐点定义为上驻点,极小值点和拐点为下驻点,其中  $i$  为 IMF 个数,  $j$  为筛分次数,  $h_{11} = x(t)$ ;

2) 用三次样条线将上驻点连接起来形成上包络线,将下驻点连接起来形成下包络线。

修改后的 EMD 程序变化量很小,但成功地解决了模态向上混淆问题。图 5 是处理后的结果。

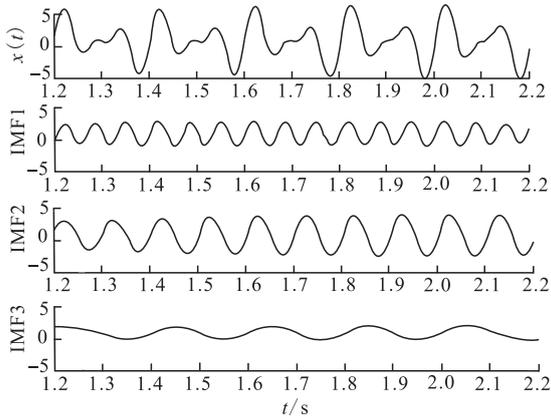


图5 利用修改程序解决模态向上混淆问题

Fig.5 Mode upward mixing solved with the improved program

## 4 结论

综上所述,产生模态混淆的原因主要有2类:一类是由方法基本原理所导致,有模态向下混淆和模态交叉混淆2种表现形式,称为I类模态混淆问题;一类是由筛分算法缺陷所导致,有模态向上混淆一种表现形式,称为II类模态混淆问题。根据模态混淆产生的机理,对于I类模态混淆问题需要引进辅助手段加以解决,例如异常排除法、信号滤波法和辅助信号加入法。对于II类模态混淆问题,则需要完善本征模态函数的定义,改进筛分算法。

随着EMD方法的不断完善,其在机械故障诊断中必然将发挥更大的作用。

### 参考文献(References):

- [1] 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 [C]// Proceedings of the Royal society. London:royal society, 1998, 454: 903-995.
- [2] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum [J]. Annu rev fluid mech, 1999, 31: 417-457.
- [3] 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  
YU Dejie, CHENG Junsheng, YANG Yu. Mechanical fault diagnostics based on Hilbert-Huang transform [M]. Beijing:Science press, 2006.(in Chinese)
- [4] Pines D, Salvinob L. Structural health monitoring using empirical mode decomposition and the Hilbert phase[J].Journal of sound and vibration, 2006, 294: 97-124.
- [5] Liu B, Riemenschneider S, Xu Y.Gearbox fault diag-

nosis using empirical mode decomposition and Hilbert spectrum[J].Mechanical systems and signal processing, 2006, 20: 718-734.

- [6] Yu D, Chen J, Yang Y. Application of EMD method and Hilbert spectrum to the fault diagnosis of roller bearings[J]. Mechanical systems and signal processing, 2005, 19: 259-270.
- [7] Guo D, Peng Z K. Vibration analysis of a cracked rotor using Hilbert-Huang transform [J]. Mechanical systems and signal processing, 2007, 21: 3030-3041.
- [8] Huang N E, Wu M C, Long S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectra analysis[C]//Proceedings of the Royal society. London:royal society, 2003, 459: 2317-2345.
- [9] 赵进平.异常事件对EMD方法的影响及其解决方法研究[J].青岛海洋大学学报,2001,31(6):805-814.  
ZHAO Jinping. Study of the effects of abnormal events to empirical mode decomposition method and the removal method for abnormal signal[J].Journal of ocean university of qingdao, 2001, 31(6): 805-814. (in Chinese)
- [10] Peng Z, Tse P W, Chu F. An improved Hilbert-Huang transform and its application in vibration signal analysis [J]. Journal of sound and vibration, 2005, 286: 187-205.
- [11] 胡爱军,孙敬敬,向玲.经验模态分解中的模态混叠问题 [J].振动、测试与诊断,2011,31(4):429-434.  
HU Aijun, SUN Jingjing, XIANG Ling. Mode mixing in empirical mode decomposition [J]. Vibration, measurement and diagnosis, 2011,31(4):429-434.(in Chinese)

(编辑:徐敏)