文章编号：1006-1355(2018)03-0152-05

基于MS-EEMD的滚动轴承微弱故障提取研究

王志坚，吴文轩，张纪平，王日俊，寇彦飞

（中北大学 机械工程学院，太原 030051）

摘 要：在实际工况下，轴承的早期故障信号与强噪声信号相比属于微弱信号，而轴承的早期故障特征从强噪声环境中提取出来一直是故障诊断课题的一大难点。基于上述问题，提出一种基于MS（Mask Signal）和EEMD（Ensemble Empirical Mode Decomposition）方法的滚动轴承微弱故障提取方法。由于EEMD方法在噪声背景下分解出的IMF分量存在模态混叠现象，很难辨别故障频率的真伪，所以引入掩膜信号法对分解出的IMF分量进行处理，抑制虚假频率，将故障频率提取出来。通过将掩膜信号法与EEMD方法相结合的方式，对存在噪声的故障信号进行处理，提取出故障特征。

关键词：振动与波；强噪声；掩膜法；总体平均经验模态分解；故障诊断

中图分类号：TP17；TP206 **文献标志码**：A **DOI编码**：10.3969/j.issn.1006-1355.2018.03.029

Weak Fault Signal Extraction of Rolling Bearings based on MS-EEMD

WANG Zhijian, *WU Wenxuan*, *ZAHNG Jiping*,
WANG Rijun, *KOU Yanfei*

(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In the practical case, early fault signals of bearings belong to weak signals compared with strong noise signals. It is a difficult problem to extract the early fault signals from the strong noise environment. In this paper, a method for extracting weak faults of rolling bearings based on mask signal (MS) method and ensemble empirical mode decomposition (EEMD) method is proposed. Because there exists the modal mixing in the IMF components decomposed from the noise background by using the EEMD method, it is difficult to distinguish whether the failure frequency is true or false. So, the MS method is introduced to deal with the decomposed IMF components, suppress spurious frequency and extract the real fault frequency. By combining the MS method with EEMD method, the fault signal with noise is processed and the fault signal is extracted.

Keywords: vibration and wave; strong noise; mask signal (MS) method; ensemble empirical mode decomposition (EEMD); fault diagnosis

在旋转类机械中，轴承作为重要的动力传递零件，一直备受关注。在机器的运行过程中，轴承的磨损不可避免，轴承出现磨损故障后，其初期信号较微弱，在强背景噪声下很难被诊断，若不采取相应的措施就会导致轴承故障，轻则使机器出现故障，严重时甚至会导致重大的事故，造成经济损失和人员伤亡，因此对轴承早期故障信号的提取一直深受重视[1–5]。

总体平均经验模态分解（Ensemble Empirical Mode Decomposition，简称EEMD）是Huang基于辅助白噪声的分析方法提出的一种自适应方法，其具体思路来自于Flandrin用EMD处理白噪声。将EEMD方法运用于实验时发现，用EMD处理白噪声后可将含有噪声信号中含有不同的频率成分依次分开，这样成功避开了EMD的模态混叠现象，通过加入白噪声平滑异常现象的出现，有一举两得的功效，首先白噪声的频谱是均匀分布的，可以将不同的时间尺度信号自适应的分解到合适的本征模态函数上，此外根据白噪声的均值为零的特性，经过多次平均可将所加白噪声抵消[6–8]。

收稿日期：2017-08-28

基金项目：山西省自然科学基金资助项目（2015011063）

作者简介：王志坚（1985–），男，郑州市人，博士，讲师，研究方向为旋转机械复合故障诊断。

E-mail: wangzhijian1013@163.com

但是EEMD的缺陷也较明显，白噪声的幅值选取多大合适、整合次数多大最优，至今仍没有一个公式让它适用于任何信号。因此模态混叠现象依然十分严重，无法从中提取所需的时频信息[9-11]。

基于以上原因，本文将掩膜信号法引入到EEMD方法中，在消除EEMD方法出现的模态混叠现象后，提取故障信息。

1　理论推导

1.1　EEMD方法

(1) 收集到的振动信号为$x(t)$，加入白噪声$nj(t), j=1,2,3,...,M$

$$xj(t)=x(t)+nj(t) \tag{1}$$

(2) 用EMD分解$x_j(t)$得到I个$(\mathrm{IMF}s)C_i,j$，$(i=1,2,3\cdots I)$，其中C_i,j表示第j次加入白噪声幅值后，分解得到的第i个IMF；

(3) 如果$j<M$令$j=j+1$重复步骤2；

(4) 经过M次的总体平均消除噪声对本征模态函数的干扰。得到IMFs为

$$C_i=\left(\sum_{j=1}^{M}C_i,j\right)/M \tag{2}$$

(5) $C_i(i=1,2,3,\cdots I)$为EEMD分解得到的第i个IMF。

1.2　MS方法

掩膜法（MS mask signal）可以简单概括为以下几个步骤。

1）$x(t)$为原信号，对原始信号$x(t)$进行希尔伯特变换，得到$y(t)$，即

$$y(t)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{x(t)}{\tau-t}\mathrm{d}\tau \tag{3}$$

根据其构造可以解得

$$z(t)=x(t)+jy(t)=a_i(t)e^{j\varphi_i(t)} \tag{4}$$

2）可以得到幅值函数$a_i(t)$与相位函数$\varphi_i(t)$，分别为

$$a_i(t)=\sqrt{x_i^2(t)+y_i^2(t)} \tag{5}$$

$$\varphi_i(t)=\arctan\frac{y_i(t)}{x_i(t)} \tag{6}$$

3）然后可以根据瞬时相位求得瞬时频率

$$f_i(t)=\frac{1}{2\pi}\omega_i(t)=\frac{1}{2\pi}\cdot\frac{\mathrm{d}\varphi_i(t)}{\mathrm{d}t} \tag{7}$$

根据能量均值法可以计算出[12]

$$\bar{f}=\frac{\sum_{i}^{k}a_1(i)f_1^2(i)}{\sum_{i}^{k}a_1(i)f_1(i)} \tag{8}$$

其中：$a_1(t)$是PF_1的希尔伯特包络幅值，$f_1(t)$是由希尔伯特瞬时频率估计法算出来的PF_1的瞬时频率，处于混叠模态的最高频与最低频之间，所以确定的掩膜信号为

$$s(t)=a_0\sin\left(2\pi\bar{f}t\right) \tag{9}$$

根据经验法则，a_0通常取信号分量平均幅值的1.6倍最合适[13]。

4）创建一个掩膜信号$s(t)$，分别使得

$$x_+(t)=x(t)-s(t) \tag{10}$$

$$x_-(t)=x(t)-s(t) \tag{11}$$

5）将$x_+(t)$和$x_-(t)$结合后就可以得到原始信号

$$x(t)=\frac{x_+(t)+x_-(t)}{2} \tag{12}$$

1.3　基于MS-EEMD的轴承故障提取方法

由于EEMD采用了基于极值点的包络求解的方式，其包络估计值误差经多次分解后会被放大，会出现模态混叠现象。所以掩膜法去除模态混叠的原理为：以EEMD方法分解出的单个IMF分量为例，单个IMF分量都有自己的频带，根据单个IMF分量的平均幅值与平均瞬时频率求取的掩膜信号可以定义为在该频带中与该IMF分量高度相关的平均信号，利用加减后取平均的方式可以减小由于多次平滑处理所积累的误差值，以此来消除模态混叠现象。MS-EEMD的具体过程如下

以EEMD分解出的第一个IMF为例，将分解出的IMF_1作为原始信号，确定其掩膜信号后，分解为IMF_1^+和IMF_1^-并且重新定义IMF_1

$$\mathrm{IMF}_1=\frac{\mathrm{IMF}_1^+ + \mathrm{IMF}_1^-}{2} \tag{13}$$

这样就消除了第一个IMF分量中的模态混叠现象，对后续的IMF分量使用相同的方法然后在将所有的IMF分量整合就可以得到原始信号的时频分布。

在MS-EEMD方法处理单故障的轴承信号中时，可以选择与原信号相关度最高的IMF分量作为掩膜法处理的对象。

若轴承故障信号为单故障信号，故障诊断流程图1。

2　基于掩膜信号法与EEMD的仿真调制信号分析

为了验证EEMD在噪声情况下的模态混叠现象，采用了的仿真信号如图2所示，3个信号的频率分别40 Hz，80 Hz和130 Hz，信号组成为

$$x(t)=\left[1+0.8\cos(160\pi t)+\cos(260\pi t)\right]\cdot \sin(80\pi t)+1.5\,\mathrm{noise}(t) \tag{14}$$

图2中从上到下依次为正弦信号，噪声信号、两

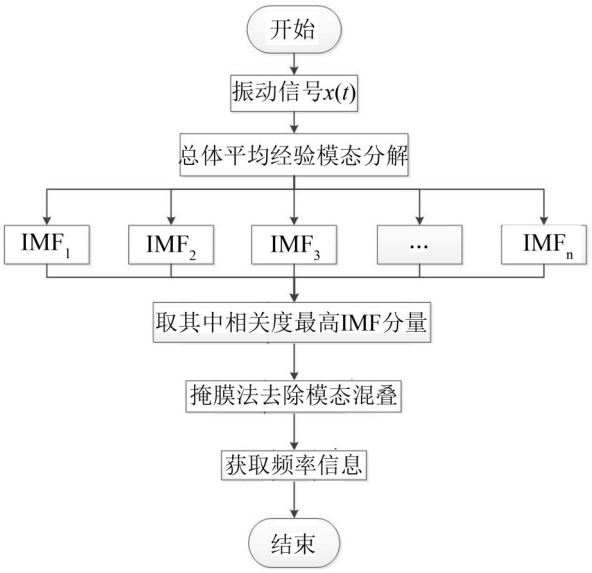


图1 单故障的MS-EEMD故障诊断流程图

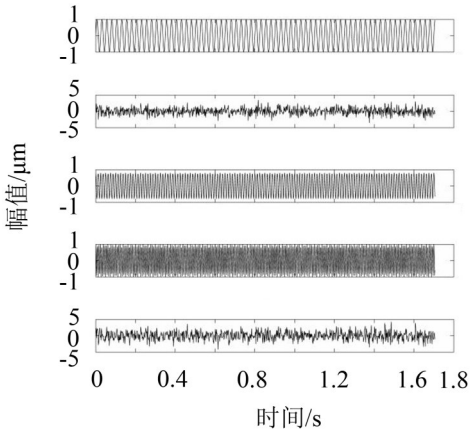


图2 仿真信号组成

个余弦信号以及合成的仿真信号的时域图以及频域图，其中两个余弦函数都经过正弦函数调制。

在未用掩膜信号法对其进行处理直接进行EEMD分解的IMF分量时频域图如图3所示。

其中第1层为IMF_1的时频域图，从频域图中可以明显的看出在80 Hz与130 Hz处有较高峰值，在40 Hz处有较低峰值。第2层为PF_2的时频域图，可以看出在40 Hz处有明显峰值。第3层属于残余分量，可以舍去。

由前两层PF分量对比可以得到80 Hz与130 Hz属于高频分量，40 Hz属于低频分量，但是130 Hz与80 Hz同时出现在了PF_1的频谱中，证明发生了模态混叠现象。

经过掩膜信号法处理后的EEMD分解的时频域分析如图4。

每1层IMF分量的频域图只有1个频率信息，由此可以确定掩膜法有效的消除了仿真信号的模态混叠现象。

3 振动信号分析

文章采用的是Case Western Reserve University（美国凯斯西储大学）故障轴承数据进行分析[14]，其中转速为1 750 r/min，采样频率为12 000 Hz，转动轴基频为29.1 Hz，计算后的内圈故障频率约为157.9 Hz，本文从采集到的数据中选取10 240个点进行分析研究。

图5为原始轴承故障信号EEMD分解前3层时域分解图，显然前3层都包含了内圈故障信息，且前两层IMFs包含两个故障特征信息，存在模态混叠现象。

图6为信号经过EEMD分解后用掩膜信号法处理了与原信号相关性最强的第1层IMF及包络分析结果，显然只包含1个故障特征信息，消除了模态混叠现象，证明了所提方法可行性。

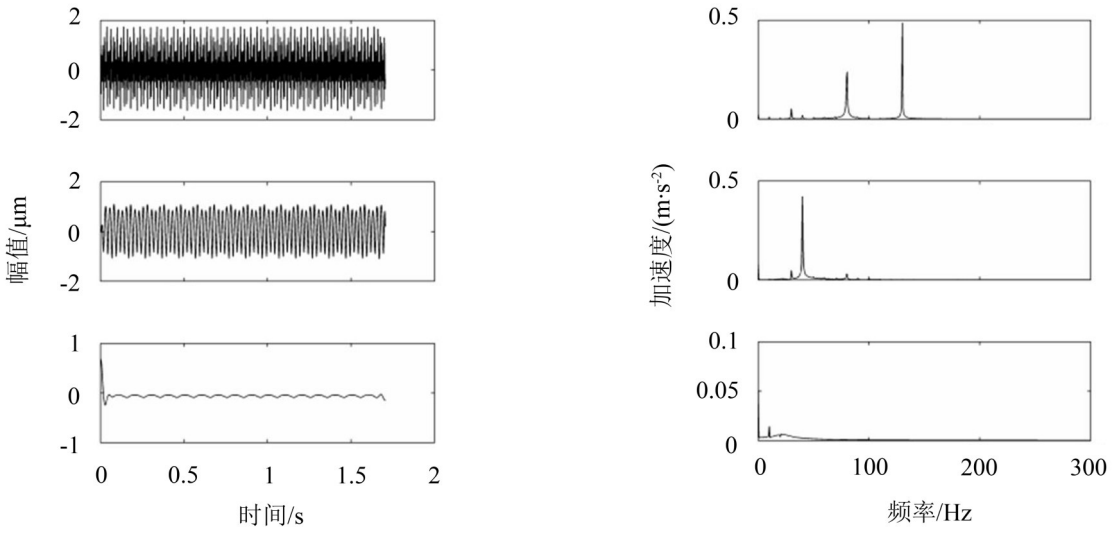


图3 仿真信号EEMD分解时频域图

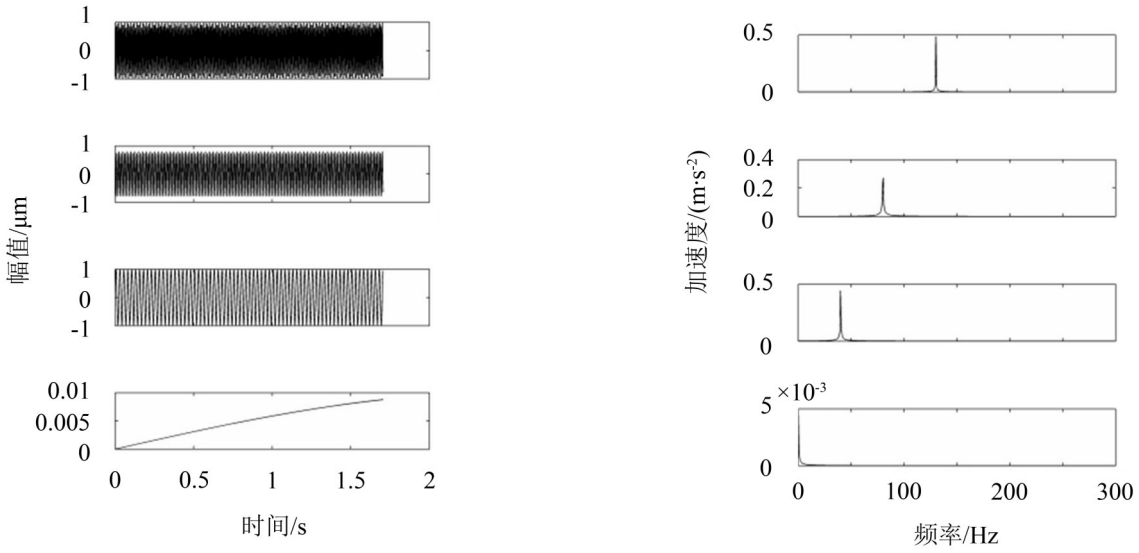


图 4 经过掩膜法处理后的EEMD分解时频域图

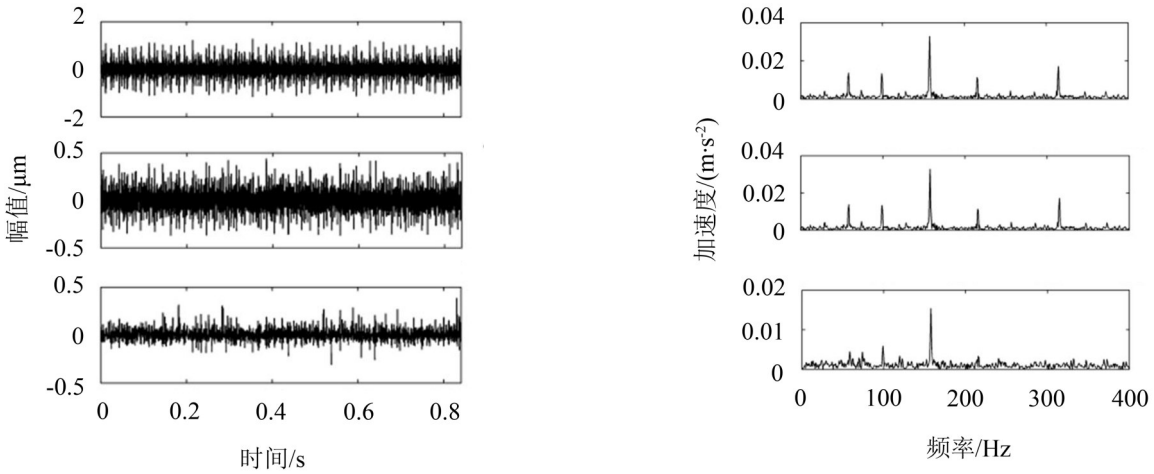


图 5 原始数据的EEMD分解及包络谱分析结果

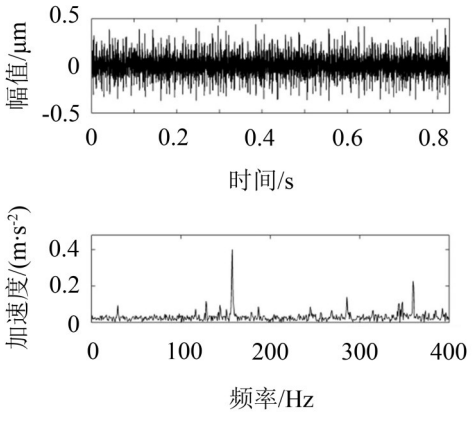


图 6 掩膜法处理后的IMF_1时域图和包络分析结果

4 结 语

(1) 掩膜信号法对于强噪声背景下发生的模态混叠现象有较强的抑制作用。

(2) 总体平均经验模态分解（Ensemble Empirical Mode Decomposition）对故障信号有自适应分析能力，但是在强噪声背景下会失真，并出现模态混叠等现象，因此难以提取有效的故障信息。

(3) 本文提出的掩膜信号法与EEMD相结合的方法，使用EEMD对信号进行分解，然后用掩膜信号法对IMFs分量进行处理，消除其模态混叠现象。利用仿真信号验证了方法的可行性后，成功提取了轴承的微弱故障特征。为微弱故障特征的提取提供了一种新的研究思路。

参考文献：

[1] HUO L. Introduce the quantitative identification method of rolling bearing in the application of fault detection[J]. **Applied Mechanics & Materials**, 2015, 742: 147-149.

[2] 王志坚，韩振南. 基于MED和循环域解调的多故障特征提取[J]. **噪声与振动控制**，2014，34(4)：129-132.

[3] CHEN G, HAO T F, WANG H F, et al. Sensitivity analysis and experimental research on ball bearing early fault diagnosis based on testing signal from casing[J]. **Journal of Dynamic Systems Measurement & Control**, 2014,

136(6): 061009.

[4] 王志坚，韩振南，刘邱祖，等. 基于MED-EEMD的滚动轴承微弱故障特征提取[J]. **农业工程学报**，2014，30(23)：70-78.

[5] WANG Z, HAN Z, GU F, et al. A novel procedure for diagnosing multiple faults in rotating machinery[J]. **Isa Transactions**, 2014, 55: 208-218.

[6] SMITH J S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data[J]. **Journal of the Royal Society Interfac**e, 2005, 2(5): 443.

[7] 孙伟，熊邦书，黄建萍，等. 小波包降噪与LMD相结合的滚动轴承故障诊断方法[J]. **振动与冲击**，2012，31(18)：153-156.

[8] 程军圣，杨怡，杨宇. 基于LMD的谱峭度方法在齿轮故障诊断中的应用[J]. **振动与冲击**，2012，31(18)：20-23.

[9] 武英杰，甄成刚，刘长良. 变分模态分解在风电机组故障诊断中的应用[J]. **机械传动**，2015(10)：129-132.

[10] 何志坚，周志雄. 基于ELMD的样本熵及Boosting-SVM的滚动轴承故障诊断[J]. **振动与冲击**，2016，35(18)：190-195.

[11] 王志坚. 齿轮箱复合故障诊断特征提取的若干方法研究[D]. 太原：太原理工大学，2015.

[12] RILLING G, FLANDRIN P, GONCALVES P. Empirical mode decomposition, fractional Gaussian noise and Hurst exponent estimation[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2005. Proceedings, IEEE, 2005: iv/489-iv/492 Vol. 4.

[13] 赵玲. 旋转机械系统故障特征提取中的分形方法研究[D]. 重庆：重庆大学，2010.

[14] Case Western Reserve University. Case western reserve university bear-ing data center website [EB/OL]. [2011-05-03]. http: //www. eecs. case. edu/ laboratory/ bearing.

（上接第145页）

[4] MOLINER E, MUSEROS P, MARTNEZ-RODRIGO M D. Retrofit of existing railway bridges of short to medium spans for high-speed traffic using viscoelastic dampers[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2012, 40: 519-528.

[5] 侯德军，雷晓燕，刘庆杰. 浮置板轨道系统动力响应分析[J]. **铁道工程学报**，2006，8(98)：18-25.

[6] 韦红亮，练松良，周宇. 高架钢弹簧浮置板轨道减振特性分析[J]. **同济大学学报**，2012，40(9)：1342-1348.

[7] 于鹏，蔡向辉，蔡小培，等. 不同减振垫刚度下板式轨道减振特性研究[J]. **铁道标准设计**，2017，61(4)：1-5.

[8] 王志强，王安斌，徐宁，等. 地铁轨道道床减振势减振性能研究[J]. **城市轨道交通研究**，2015，34(2)：250-255.

[9] 金浩，刘维宁. 枕下减振垫铺设方式对梯式轨道减振性能影响试验研究[J]. **土木工程学报**，2015，48(2)：73-78.

[10] 辛涛，张琦，高亮，等. 高速铁路CRTSⅢ型板式无昨轨道减振垫层动力影响及结构优化[J]. **中国铁道科学**，2017，37(5)：1-7.

[11] THOMPSON D. Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control[M]. Oxford: Elsevier. 2009.

[12] 赵才友，王平. 桥上无砟轨道橡胶减振垫减振性能试验研究[J]. **中国铁道科学**，2013，34(4)：8-13.

[13] 易强，王平，赵才友，等. 高架铁路环境噪声空间分布特性及控制措施效果研究[J]. **铁道学报**，2017，39(3)：120-127.

[14] XUN ZHANG, XIAOZHEN LI, HONG HAO, et al. A case study of interior low-frequency noise from box-shaped bridge girders induced by running trains: Its mechanism, prediction and countermeasures[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2016, 40: 519-528.

[15] 李增光，吴天行. 铁道车辆-轨道-高架桥耦合系统振动功率流分析[J]. **振动与冲击**，2013，32(11)：78-93.

[16] WU T X, THOMPSON D J. Vibration analysis of railway track with multiple wheels on the rail[J]. **Journal of Sound and Vibration,** 2001, 239(1): 69-91.

[17] 石广田，杨建近，杨新文，等. 基于动柔度法的车-线-桥垂向藕合振动分析[J]. **中南大学学报**，2017，48(4)：1119-1127.