文章编号：1006-1355(2015)06-0159-04

自适应MED结合EMD诊断滚动轴承早期故障

刘尚坤，唐贵基

（华北电力大学 能源动力与机械工程学院，河北 保定，071003）

摘 要：针对最小熵解卷积（MED）降噪效果受滤波器长度影响问题，提出一种利用步长迭代算法和包络谱熵检验准则的自适应MED降噪方法，并结合经验模态分解（EMD）提取滚动轴承微弱故障特征。首先利用自适应MED降噪方法对原信号进行最优降噪处理，然后通过EMD将降噪信号分解为若干个本征模函数（IMF）分量，再选取峭度值最大的IMF进行包络谱分析，根据包络谱中故障特征频率实现故障诊断。仿真信号和实测信号分析结果表明其优于基于EMD的包络解调方法。

关键词：振动与波；最小熵解卷积；经验模态分解；包络谱熵；滚动轴承；故障诊断

中图分类号：TH133.3 **文献标识码**：A DOI编码：10.3969/j.issn.1006-1335.2015.06.034

Incipient Fault Diagnosis of Rolling Bearings Based on Adaptive MED and EMD

LIU Shang-kun , TANG Gui-ji

(School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei China)

Abstract : Since the de-noised result of the minimum entropy deconvolution (MED) was affected by the filter length, an adaptive MED de-noising method using step iterative algorithm and envelope spectrum entropy criterion was proposed. This method was combined with the empirical mode decomposition (EMD) to extract the fault frequency of rolling bearing's weak faults. First of all, the fault signal of the rolling bearing was de-noised by the adaptive MED method. Then, the de-noised signal was decomposed into several intrinsic modal function (IMF) components by EMD. Finally, the bearing's fault characteristic frequency was extracted by the envelope spectrum analysis of the selected IMF with the maximum kurtosis value. The analysis results of the simulation signal and test signal indicate that this method is better than the envelope demodulation method based on EMD.

Key words : vibration and wave ; minimum entropy deconvolution ; EMD ; envelope spectrum entropy ; rolling bearing ; fault diagnosis

滚动轴承作为旋转机械设备的重要组成部件，在早期故障时，故障特征信号容易淹没在噪声等背景环境中，如何提取故障轴承的微弱冲击特征及其重复频率是滚动轴承故障诊断的关键[1]。

经验模态分解（EMD）是一种信号时频分析方法，能将复杂的多分量信号分解为有限个本征模函数（IMF）[2]，在滚动轴承故障诊断中得到应用[3]。但强背景噪声下EMD的分解效果不佳，需要对信号进行预处理降噪，而最小熵解卷积（MED）非常适用于滚动轴承冲击性故障的降噪处理从而突出冲击脉冲[4]，文献[4]将MED与稀疏分解相结合用于滚动轴承的微弱故障特征提取，但其降噪结果易受主观选择滤波器长度的影响。如果MED中滤波器长度选择不当可能会造成解卷积的结果失去意义，为此本文提出自适应的MED降噪方法，并将其与EMD相结合进行滚动轴承早期故障诊断。

1 MED原理与自适应降噪方法

1.1 MED原理

MED核心思想是通过解卷积过程突出尖脉冲，恢复冲击信号的“确定性”，常用最大峭度值作为计算停止条件。实际采集到的滚动轴承故障振动信号

收稿日期：2015－05－31

基金项目：河北省自然科学基金(E2014502052)；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014MS156)

作者简介：刘尚坤（1979－）男，河北阜城人，讲师，主要研究方向:机械设备状态监测与故障诊断。

E-mail: lsk1213@163.com

可表示为

$$y(n)=h(n)*x(n)+s(n) \tag{1}$$

式中$x(n)$为故障冲击信号，$h(n)$为传递函数，$s(n)$为噪声成分。

解卷积的目的是寻找一个最优逆传递函数$w(n)$，由输出$y(n)$恢复冲击信号$x(n)$，即

$$x(n)=w(n)*y(n) \tag{2}$$

设$\hat{w}(n)$为$w(n)$的一个估计值。利用其解卷积后得到序列$\hat{x}(n)$，$\hat{x}(n)$熵值越小，表明冲击性越强、越接近于滚动轴承故障冲击信号$x(n)$，而同时噪声干扰得到最大程度抑制，此时，$\hat{w}(n)$趋于最优，Wiggins采用序列$\hat{x}(n)$的范数衡量其熵的大小，并将其作为目标函数以求解最优结果[5]。

$$O_2^4(w(n))=\sum_{i=1}^{N}x^4(i)/[\sum_{i=1}^{N}x^2(i)]^2 \tag{3}$$

为设计最优逆滤波器$w(n)$使得滤波后信号的熵值最小，需要使目标函数$O_2^4(\cdot)$最大，即使其1阶导数为0。

$$\partial O_2^4(w(n))/\partial(w(n))=0 \tag{4}$$

又由式(2)知

$$x(n)=w(n)*y(n)=\sum_{l=1}^{L}w(n)*y(n-l) \tag{5}$$

式中L为逆滤波器$w(n)$的长度，对上式两边取导数有

$$\partial w(n)/\partial w(l)=y(n-l) \tag{6}$$

将式(6)代入式(3)，则有

$$\begin{aligned}&\left[\sum_{n=1}^{N}x^2(n)/\sum_{n=1}^{N}x^4(n)\right]\\&\sum_{n=1}^{N}x^3(n)y(n-l)=\sum_{p=1}^{L}w(p)\sum_{n=1}^{N}y(n-l)y(n-p)\end{aligned} \tag{7}$$

式(7)可写成如下矩阵的形式

$$\boldsymbol{b}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{w} \tag{8}$$

式中$\boldsymbol{A}$为$y(n)$的$L\times L$阶自相关矩阵，$\boldsymbol{b}=(b(l))^{\mathrm{T}}$，其中$\boldsymbol{b}(l)$表达式为

$$\boldsymbol{b}(l)=[\sum_{n=1}^{N}x^2(n)/\sum_{n=1}^{N}x^4(n)]\sum_{n=1}^{N}x^3(n)y(n-l) \tag{9}$$

利用式(8)可迭代计算出逆滤波器矩阵

$$\boldsymbol{w}=\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{b} \tag{10}$$

最小熵解卷积优化算法的递归迭代步骤如下：

(1) 初始化$w^{(0)}$中元素全为1；

(2) 迭代计算$x(n)=w(n)^{i-1}*y(n)$；

(3) 计算$b(l)=[\sum_{n=1}^{N}x^2(n)/\sum_{n=1}^{N}x^4(n)]\sum_{n=1}^{N}x^3(n)y(n-l)$；

(4) 计算$\boldsymbol{w}^{(i)}=\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{b}^{(i)}$；

(5) 若$\left\|w^{(i)}-w^{(i-1)}\right\|_2^2$小于给定阈值，则停止递归，否则$i=i+1$，返回步骤(2)。

1.2 MED自适应降噪方法

MED降噪的关键是如何选取滤波器长度L，L值不同降噪结果不同，同时还应注意到L值越大所需计算时间越长。本文采用包络谱熵来衡量信号的降噪效果，即对不同L降噪后的信号进行希尔伯特变换得到包络信号，再求其包络谱和包络谱熵[6]，取熵值最小时对应的滤波器长度为最优值，并对原信号进行降噪处理。具体步骤如下：

(1) 设置滤波器长度L的合理搜索范围(搜索范围越大，则计算时间越长，本文取2～500)；

(2) 设置L初值为2、合适的搜索步长(本文取2)，开始第i次循环；

(3) 以当前L进行MED降噪，对第i次降噪后的信号$x_i(t)$进行Hilbert变换

$$H_i(t)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{x_i(\tau)}{t-\tau}\mathrm{d}\tau \tag{11}$$

求解析信号$x_i(t)+iH_i(t)$的包络信号$Z_i(t)$

$$Z_i(t)=\sqrt{x_i^2(t)+H_i^2(t)} \tag{12}$$

求包络信号的的包络谱$Q(i)$

$$Q(i)=\left|FFT(Z_i(t))\right| \tag{13}$$

求包络谱熵E_i

$$\begin{cases}E_i=-\sum_{i=1}^{N}p_i\lg p_i\\p_i=Q(i)/\sum_{i=1}^{N}Q(i)\end{cases} \tag{14}$$

式中p_i为$Q(i)$的归一化形式。

(4) 至循环结束，取包络谱熵值最小时所对应的L为最优值，并对原信号进行降噪处理。

2 EMD方法

Huang N E等人[7]提出了EMD方法，可以自适应地将一个多分量时间序列分解为有限个表征信号特征的IMF分量C_i和一个残差余项r_n，式(15)为其表达式。具体分解步骤参见文献[7]。

$$x(t)=\sum_{i=1}^{n}c_i+r_n \tag{15}$$

以下为本文方法实现故障诊断的主要步骤：

(1) 将原信号经自适应MED进行降噪处理。

(2) 将降噪后的信号利用EMD分解为若干IMF。

(3) 选取峭度值最大的IMF分量进行包络谱分析以提取轴承故障特征频率，进行故障诊断。

3　仿真信号分析

$$\left.\begin{aligned} &x_1(t)=\exp(-500t_1)\sin(2\pi f_1 t),\ \ t_1=\mathrm{mod}(t,1/f_o)\\ &x_2(t)=[1+0.5\cos(10\pi t)]\cdot\sin[300\pi t+\cos(30\pi t)]\\ &x_3(t)=2\sin(800\pi t)\\ &x_4(t)=0.6\mathrm{ran\,dn}(1,n),\ \ n=\mathrm{leng\,th}(t)\\ &x(t)=x_1(t)+x_2(t)+x_3(t)+x_4(t)\end{aligned}\right\}\quad(16)$$

仿真信号$x(t)$由滚动轴承外圈故障模拟信号$x_1(t)$、调幅调频信号$x_2(t)$和正弦信号$x_3(t)$组成，同时加入噪声$x_4(t)$。式中f_i=4000 Hz，外圈故障特征频率f_o=30Hz，$x(t)$的时域波形如图1所示。由于存在较强的噪声成分，难以识别冲击特征，图2包络谱中也无法识别故障特征频率。采用本文方法先进行自适应MED降噪，当L=34时，降噪信号的包络谱熵最小，其时域波形如图3所示。图中体现了一定的周期性冲击，但仍存在干扰成分，此时峭度值为3.156 2，再对其进行EMD分解，得10个IMF分量，其各分量峭度值见表1，限于篇幅图4画出了峭度值最大的IMF分量的时域波形，图中体现出较明显的规律性冲击，其包络谱如图5所示，在外圈故障特征频率的基频、2倍频、3倍频、4倍频处存在明显峰值，从而判断为外圈故障。

为了对比，将$x(t)$直接进行EMD分析，其中峭度值最大分量的包络谱分析如图6所示，图中虽存在故障冲击特征频率，但受到的干扰频率较多，相比本文方法分析效果较差。

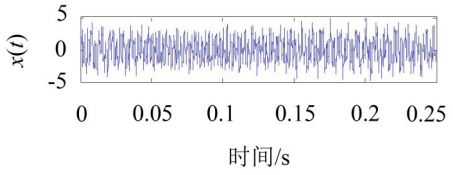


图1　仿真信号的时域波形

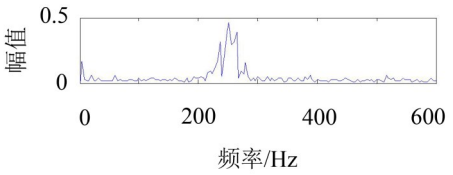


图2　仿真信号的包络谱

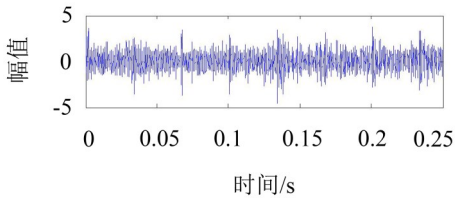


图3　仿真信号MED降噪效果

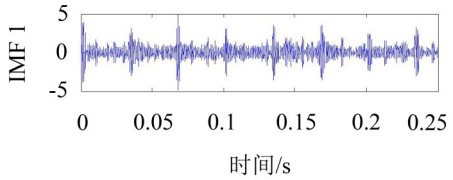


图4　仿真信号MED降噪后EMD中峭度最大的IMF分量

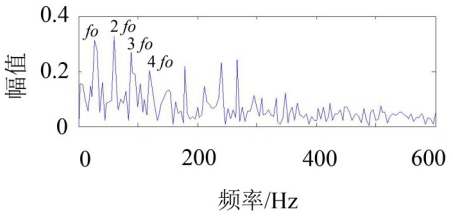


图5　峭度值最大IMF分量的包络谱

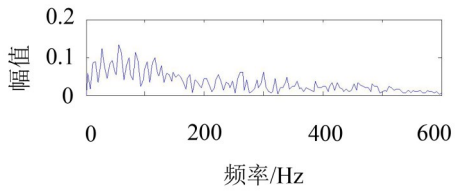


图6　直接EMD中峭度值最大分量的包络谱

4　故障诊断实例

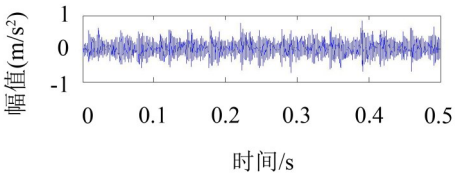
选用美国凯斯西储大学轴承数据中心的数据进行分析。实验测试所用的轴承型号为6205-2RS JEM SKF。轴承节圆直径为D=39.04 mm，钢球直径d=7.94 mm，滚动体个数n=9，压力角α=0°，内圈损伤为电火花加工的单点损伤，故障点直径为0.3556 mm，深度为0.279 4 mm，转轴转频f_r=29.57 Hz，采样频率为12 kHz，计算内圈故障特征频率f_i=160.11 Hz。

图7为内圈故障信号的时域波形和包络谱，时域波形存在一定的冲击成分，同时噪声成分也较为明显。包络谱中转频峰值最为突出，仅在159.7 Hz处存在内圈故障频率峰值，说明轴承处于故障早期阶段。应用本文方法先对故障信号进行自适应MED降噪，当L=164时，降噪信号的包络谱熵最小，时域波形如图8所示，可见噪声得到较好的抑制，信号表现出周期性冲击成分，其峭度值为5.090 8，再对

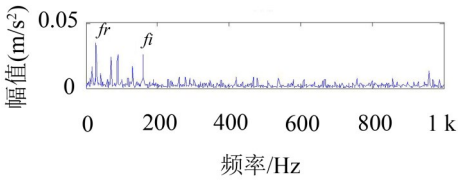
表1　降噪仿真信号的不同IMF峭度值

IMF 1	IMF 2	IMF 3	IMF 4	IMF 5	IMF6	IMF7	IMF8	IMF9	IMF10
5.223 1	3.1066	2.6323	3.3694	2.6771	3.0094	2.0329	1.9108	1.6304	2.2050

其进行EMD分解得到12个IMF分量，对应的峭度值如表2所示，限于篇幅图9画出了峭度值最大的IMF分量的时域波形，其包络谱如图10所示，图中的轴承内圈故障特征频率及其倍频成分明显，阶数高达5阶，较图7中的包络谱更能准确分析轴承的早期故障频率，同时图中表现的内圈故障特征频率被转频调制的边频带特征也明显。说明本文方法在诊断滚动轴承早期故障中的有效性。



（a）内圈故障信号的时域波形



（b）内圈故障信号的包络谱

图7 内圈故障信号的时域波形和包络谱

表2 降噪内圈故障信号的不同IMF峭度值

IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF 7	IMF 8	IMF 9	IMF 10	IMF 11	IMF 12
9.506 3	7.875 0	5.987 8	8.429 9	7.513 9	3.255 1	3.804 7	2.952 3	2.500 8	2.963 6	3.996 7	1.798 1

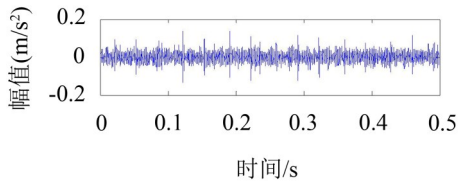


图8 内圈故障信号MED降噪效果

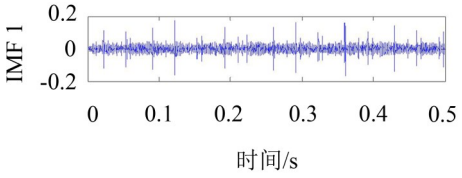


图9 MED降噪后EMD中峭度最大的IMF分量

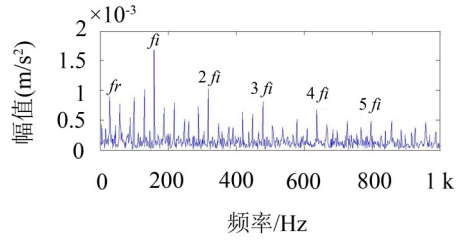


图10 峭度值最大IMF分量的包络谱

为验证本文方法的有效性，同基于EMD的包络谱分析进行对比，图11为将滚动轴承内圈故障振动信号进行EMD分解后，对峭度值最大的分量做包络谱分析的效果，图中明显的峰值频率为内圈故障特征频率，其它倍频无法识别。

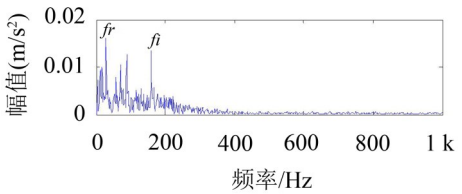


图11 内圈故障信号直接EMD中峭度值最大分量的包络谱

5 结 语

MED的降噪效果关键受滤波器长度的影响，本文以包络谱熵最小为目标，利用步长迭代算法寻找最优值，以达到较好的降噪效果。将其与EMD结合实现了滚动轴承早期故障诊断。仿真及实测信号分析结果表明，该方法优于基于EMD的包络解调方法，为滚动轴承早期故障诊断提供一种有效手段。

参考文献：

[1] 雷亚国，韩冬，林京，等. 自适应随机共振新方法及其在故障诊断中的应用[J]. **机械工程学报**，2012，48(7)：62-67.

[2] 王磊，纪国宜. 基于EMD模糊熵和SVM的转子系统故障诊断[J]. **噪声与振动控制**，2012，32(3)：171-176.

[3] 夏均忠，苏涛，马宗坡，等. 基于EMD的滚动轴承故障特征提取方法[J]. **噪声与振动控制**，2013，33(2)：123-127.

[4] 王宏超，陈进，董广明. 基于最小熵解卷积与稀疏分解的滚动轴承微弱故障特征提取[J]. **机械工程学报**，2013，49(1)：88-94.

[5] Wiggins R A. Minimum entropy deconvolution[J]. **Geoexploration**, 1978, 16(1-2): 21-35.

[6] 孙洁娣，肖启阳，温江涛，等. 基于LMD包络谱熵及SVM的天然气管道微小泄漏孔径识别[J]. **机械工程学报**，2014，50(20)：18-25.

[7] N E Huang, Z SHEN, S R Long. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. **Proc. R. Soc. Lond. A,** 1998, 454: 903-995.