

基于 EEMD 和单通道盲源分离的 齿轮箱复合故障诊断研究

史云林, 郝如江, 安雪君

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:针对齿轮箱复合故障诊断中,多级传动相互干扰,微弱的轴承故障会被强烈的齿轮故障和噪声湮没而难以提取的问题,提出了基于 EEMD 和单通道盲源分离的齿轮箱复合故障诊断方法。首先利用单个加速度传感器采集齿轮箱振动信号,对采集的信号进行 EEMD 分解,根据峭度准则和相关系数重构 IMF 分量;然后应用盲源分离方法对重构的 IMF 分量进行求解,对分离的信号进行包络解调分析,确定出齿轮故障通道,轴承故障通道和噪声通道;最后对齿轮故障通道进行傅里叶变换,轴承故障通道进行基于谱峭度的共振解调分析,提取出信号的特征频率,完成齿轮箱的复合故障诊断。通过实验验证了该方法的有效性和可行性。

关键词: 齿轮箱复合故障; EEMD 分解; 盲源分离; 单通道

中图分类号: TP277; TH17 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2019)01-0031-06

0 引言

齿轮箱的状态监测和故障诊断,对防止突发事件的发生和维持机械设备正常运行具有重大的意义^[1]。在齿轮箱故障诊断研究中,大多是对齿轮箱的单一故障进行分析与诊断,目前对齿轮箱复合故障的研究较薄弱^[2]。盲源分离(BSS)方法在机械设备故障诊断及状态监测中已获得成功应用。但是该方法大多局限于观测信号数目(传感器个数)需多于或等于源信号数目。实际情况中,由于成本问题,以及受监测环境所限,会出现仅能对其进行单通道监测的状况^[3-4]。毋文峰等^[5]将经验模态分解(EMD)与盲源分离结合用于机械故障诊断,实现单观测通道下机械振动信号盲分离。但是 EMD 分解存在模态混叠现象,而且在含有噪声的情况下效果不太好。李晓辉等^[6]将总体经验模式分解(EEMD)和单通道盲源分离算法应用于轴承的单故障特征提取,但是对齿轮箱复合故障的提取还有待研究。针对以上问题,提出一种基于 EEMD 和单通道盲源分离的齿轮箱复合故障诊断算法,能有效提取齿轮箱的复合故障特征。

1 EEMD 原理及 IMF 分量选择标准

1.1 EEMD 原理

EEMD 算法全称总体经验模式分解,为改进的 EMD 算法,不仅能有效抑制模态混叠现象,得到更有意义的 IMF 分量,而且能将原一维观测信号分解成多维,为实现信号的盲源分离创造条件^[7]。EEMD 算法步骤如下:

(1) 将采集的信号 $x(t)$ 中添加均值为零,标准差为常数的随机白噪声,得到含噪信号 $x_i(t)$,随机白噪声的标准差一般为采集信号标准差的 0.1~0.2 倍。

(2) 对 $x_i(t)$ 进行 EMD 分解,得到 K 个 IMF 分量。

(3) 重复进行步骤(1)和(2)各 N 次,每次添加的白噪声序列不相同。

收稿日期:2017-08-12 网络出版日期:2018-11-07 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20170168

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1402.N.20181107.0941.002.html>

基金项目:国家自然科学基金(51375319);河北省引进留学人员资助项目(CL201721);校级研究生创新资助项目(YC201714)

作者简介:史云林(1991—),男,硕士研究生,研究方向为机电系统故障诊断。E-mail:2511407487@qq.com

史云林,郝如江,安雪君.基于 EEMD 和单通道盲源分离的齿轮箱复合故障诊断研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2019,32(1):31-36.

(4) 由于不相关随机白噪声序列的统计均值为零,对相应的 IMF 分量相加取均值,消除各个 IMF 分量的噪声成分,得到 EEMD 分解后的 IMF 分量。

$$c_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_{ij} \quad (1)$$

式中, $i=1,2,\dots,N; j=1,2,\dots,K$ 。 $c_j(t)$ 为经 EEMD 分解得到的第 j 个 IMF 分量, N 为添加白噪声的次数,一般情况下取 50 或 100。

1.2 峭度标准

峭度 K 是归一化的四阶中心矩,作为一个无量纲参数,反映了振动信号的分布特性^[8],其定义为

$$K = \frac{E(x-\mu)^4}{\sigma^4} \quad (2)$$

式中, μ 和 σ 分别为信号 x 的均值和方差, $E(x-\mu)^4$ 表示四阶数学期望值。

峭度特征与系统转速、尺寸、载荷无关,对冲击信号特别敏感。当齿轮箱的齿轮或轴承发生故障,引起机械冲击时,峭度值随之增大。峭度值的大小也从一个侧面反映了故障的严重程度^[9-10]。

1.3 相关系数标准

相关系数用来测定变量之间的相关程度。假设两个变量 X 和 Y ,相关系数可以表示为

$$\text{Corr}(X,Y) = \frac{\text{Cov}(X,Y)}{\sqrt{D(X)} \sqrt{D(Y)}} \quad (3)$$

式中, $\text{Cov}(X,Y)$ 是两个变量 X 和 Y 的协方差; $D(X)$ 、 $D(Y)$ 分别为变量 X 和 Y 的方差,相关系数的取值范围是 $[-1,1]$ 。相关系数越大说明两个变量的线性相关程度越高。

2 盲源分离算法

盲源分离算法有很多,采用基于特征矩阵联合对角化(JADE)的盲源分离算法^[11]。由多通道信号 $x(t)=[x_1, x_2, \dots, x_N]$ 构建的一系列四阶累积量矩阵近似对角化,以确定分离矩阵 W ,从而实现对独立信源 $s(t)=[s_1, s_2, \dots, s_N]$ 的合理估计 $y(t)=Wx(t)$ 。在计算四阶累积量之前,必须先对混合信号进行预白化,即经过一个线性变换 Q ,使得混合信号的各分量互不相关,得到白化后的信号 $z(t)=Qx(t)$ 。白化 $\Lambda(M)$ 信号的四阶累积量矩阵为

$$C_z(M) = V^T \Lambda(M) V \quad (4)$$

此式说明,用 V 阵对矩阵 $C_z(M)$ 作二次型处理可以得到对角矩阵。任意选择 p 个不同的 $N \times N$ 维矩阵 M_p ,计算各 $N \times N$ 维矩阵下的四阶累积量矩阵。最后将这些累积量矩阵组合成一个大的矩阵 $C_z(M_p)$,然后采用联合近似对角化方法对 $C_z(M_p)$ 进行对角化,得到正交分离矩阵 U 。综上所述可以得到分离矩阵, $W=U^T Q$ 。JADE 算法步骤简要归纳如下^[12]:

(1) 对多通道信号 $x(t)$ 中心化,并作白化处理,得到 $z(t)=Qx(t)$ 。

(2) 联合近似对角化 $z(t)$ 的四阶累积量矩阵 $C_z(M_p)$,得到酉矩阵 U 。

(3) 计算分离矩阵 $W=U^T Q$ 。

(4) 求得源信号 $s(t)$ 的估计 $y(t)$ 。

3 齿轮箱复合故障诊断流程

齿轮箱的复合故障为齿轮故障和轴承故障的复合,其中还有噪声干扰。基于本文算法,齿轮箱复合故障诊断的流程如图 1 所示。

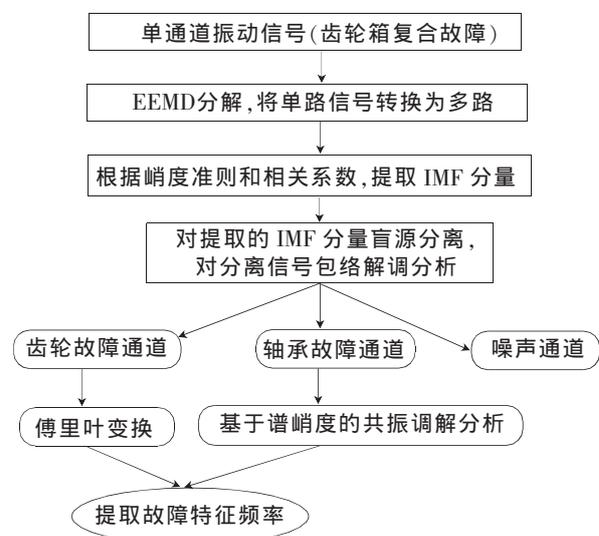


图 1 齿轮箱复合故障诊断流程图

4 实验验证

为验证所提方法的可行性及有效性,在齿轮箱实验台上进行了实验验证。实验台为美国 DDS 实验台,如图 2 所示,实验台从左至右依次为电动机,行星齿轮箱,定轴齿轮箱,磁粉制动器。其中齿轮传动简图如图 3 所示。

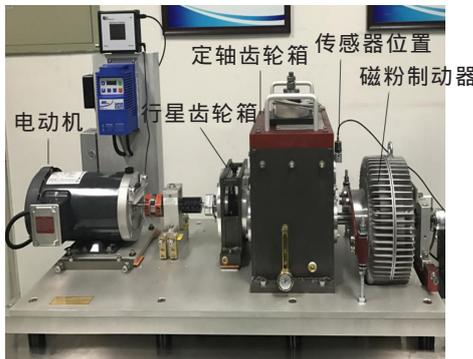


图 2 齿轮箱实验台

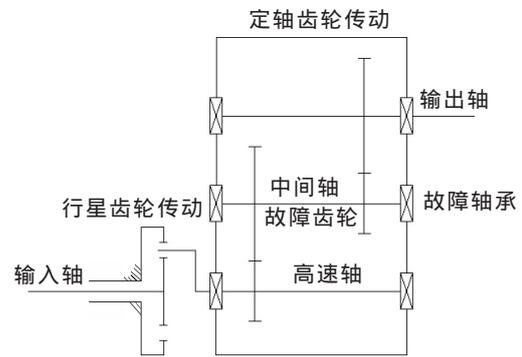


图 3 齿轮传动简图

齿轮传动为三级传动,各级传动齿轮齿数及传动比如表 1 所示。

表 1 各级传动齿轮齿数及传动比

传动系统	齿轮	齿数	传动比
第一级行星齿轮传动	太阳轮	28	4.571 4
	齿圈	100	
第二级定轴齿轮传动	高速轴齿轮	29	3.448 3
	中间轴大齿轮	100	
第三级定轴齿轮传动	中间轴小齿轮	36	2.5
	输出轴齿轮	90	

齿轮箱故障采用齿轮缺齿和轴承内圈故障的复合,故障设置在中间轴上,可参见图 3。其中轴承型号为 ER16K,轴承的几何参数如表 2 所示。在轴承内圈加工点蚀故障,点蚀的直径为 1 mm,深 0.5 mm。

表 2 轴承的几何参数

节圆直 D/mm	滚动体直径 d/mm	滚动体数目 z	接触角 $\alpha/(^\circ)$
38.506 4	7.937 5	9	0

用单个加速度传感器采集齿轮箱振动信号,传感器布置在故障轴承轴承座的上方。

设定实验台电动机转速为 2 400 r/min,负载调节磁粉制动器显示为 1.8 A,计算传动系统中的轴的转频、齿轮啮合频率、轴承内圈故障频率如表 3 所示。

表 3 传动系统中相关频率

输入轴转频	高速轴转频	中间轴转频	输出轴转频
40	8.750 1	2.537 5	1.015
第一级啮合频率	第二级啮合频率	第三级啮合频率	轴承内圈故障频率
1 120	253.75	91.35	13.779

用 DASP 振动信号采集仪采集振动信号,采样频率为 25 600 Hz,采样时间为 10 s,取前 2 s 数据进行分析。得到的故障齿轮箱时域波形如图 4 所示,对信号进行包络后的频谱如图 5 所示。在相同条件下,测得正常齿轮箱信号时域图如图 6 所示,对信号进行包络后的频谱如图 7 所示。

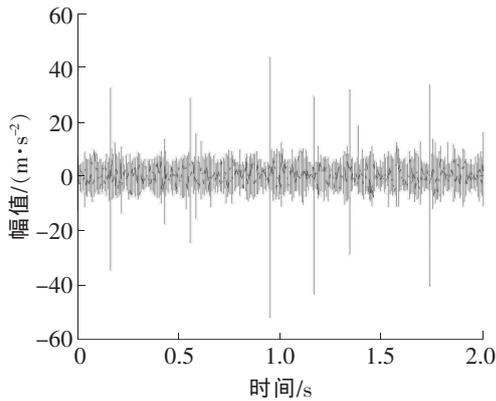


图 4 故障信号时域图

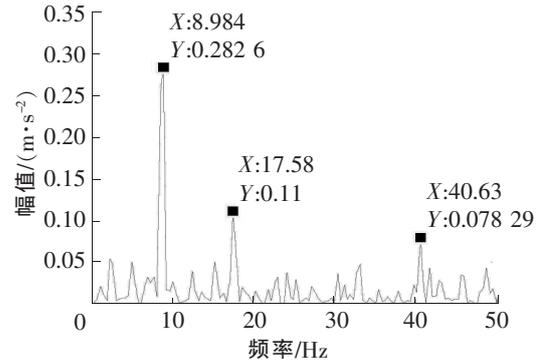


图 5 故障信号包络频谱图

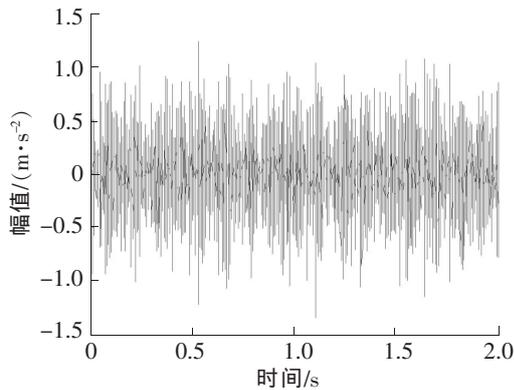


图 6 正常信号时域图

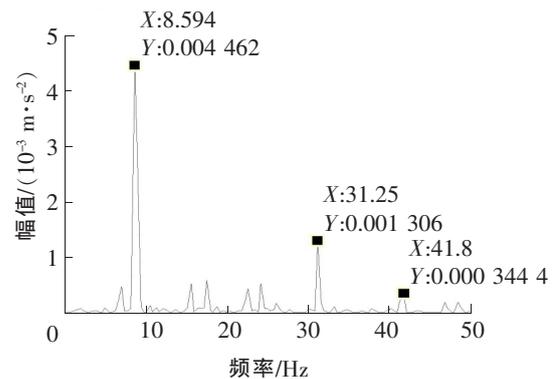


图 7 正常信号包络频谱图

通过图 4 和图 6 的对比,可知从图 4 中可以看到信号有明显的冲击成分,初步分析传动系统中某一齿轮存在断齿故障。图 5 中含有高速轴转频 8.984 Hz(理论值 8.75 Hz),输入轴的转频 40.63 Hz(理论值 40 Hz),其中 17.58 Hz 为高速轴的二倍频。图 7 中也含有高速轴转频 8.594 Hz(理论值 8.75 Hz),输入轴的转频 41.8 Hz(理论值 40 Hz),两者的差为 31.25 Hz。通过图 5 和图 7 的对比可知,在故障信号和正常信号中,高速轴转频和输入轴转频的幅值都很高,它们为故障信号中的主要噪声干扰。故障特征被噪声湮没,难以辨别。对故障信号进行 EEMD 分解得到 8 个 IMF 分量,如图 8 所示。

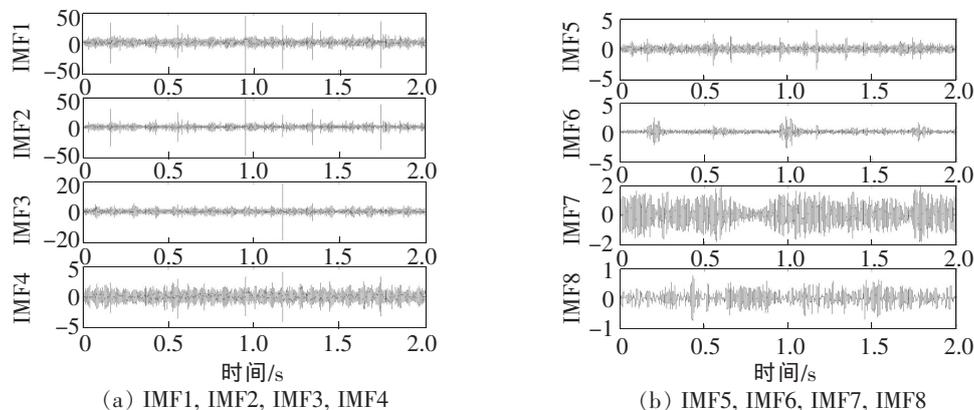


图 8 EEMD 分解 IMF 时域图

计算各 IMF 分量的峭度值,各分量和故障信号的相关系数如表 4 所示。

从表 4 中可得前 3 个 IMF 分量和第 6 个 IMF 分量的峭度值较大,前 3 个 IMF 分量和故障信号的相关系数较大,综合峭度和相关系数计算结果,选择 IMF1、IMF2、IMF3 这 3 个信号进行盲源分离。对盲源分离后重构的信号进行包络谱分析,得到包络后的频谱如图 9 所示。

表 4 各 IMF 分量选择标准计算结果

IMF	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8
峭度	23.972 6	53.255 4	19.544 9	4.512 7	7.579 4	14.471	2.304 0	3.174 2
相关系数	0.988 6	0.832 4	0.502 1	0.275 9	0.205 9	0.223 7	0.319 5	0.190 9

图 9 中第一通道主要频率为高速轴转频 8.984 Hz(理论值 8.75 Hz),为噪声通道。第二通道中可以看到轴承内圈故障频率 13.67 Hz(理论值 13.779 Hz),为轴承故障通道。同时也有高速轴转频 8.594 Hz 及其二倍频 17.58 Hz 的干扰。第三通道中,可以看到中间轴转频 2.344 Hz(理论值 2.537 5 Hz)及其二倍频 5.078 Hz,为齿轮故障通道,可以判断中间轴上某一齿轮存在断齿故障。同时可以看到 40.63 Hz 约为输入轴转频(理论值 40 Hz),为噪声干扰。为了进一步确定中间轴上哪一个齿轮存在故障,对第三通道做频谱分析,如图 10 所示。

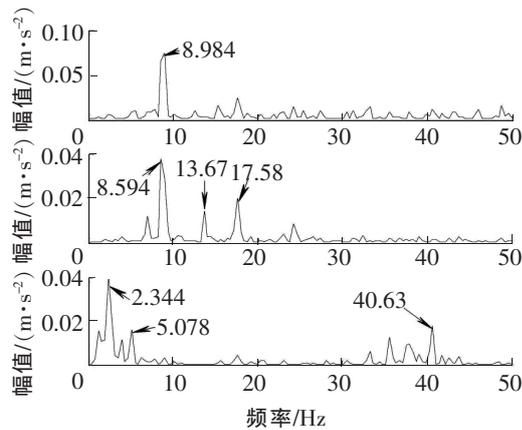


图 9 盲源分离后的包络频谱图

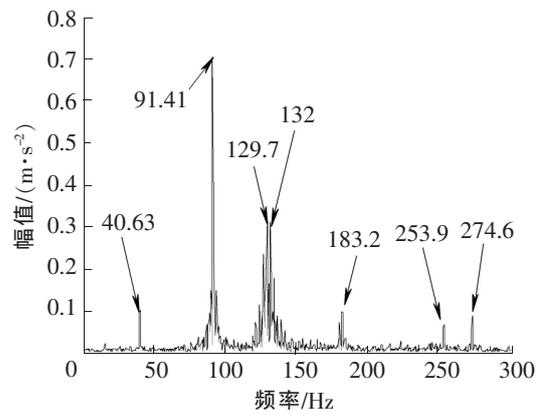


图 10 第三通道频域图

从图 10 中可以看到,第三级定轴齿轮传动的啮合频率 91.41 Hz(91.35 Hz),并且可以找到它的二倍频 183.2 Hz、三倍频 274.6 Hz。由此可以判断中间轴上的小齿轮发生断齿故障。从频域图中还可以看到 40.63 Hz 为输入轴转频,129.7 Hz 和 132 Hz 为第三级啮合频率 91.41 Hz 和输入轴转频 40.63 Hz 的累加频率,被中间轴转频 2.344 Hz 调制而成,253.9 Hz 为第二级啮合频率(253.75 Hz),这些为干扰噪声。

为了进一步确定轴承故障,对第二通道做基于谱峭度的共振解调分析。第二通道的谱峭度图如图 11 所示,谱峭度值最大时所对应的中心频率 $f_c=8\ 000$ Hz,带宽 $B_w=1\ 066.67$ Hz。用该共振带参数设置切比雪夫带通滤波器,滤波以后结合 Hilbert 变换对该通道振动信号包络频谱分析。包络之后的频谱如图 12 所示。从图 12 中可以看到轴承内圈的故障频率 13.67 Hz(理论值 13.779 Hz),及其二倍频 27.34 Hz,三倍频 41.02 Hz。还可以看到围绕内圈通过频率及其谐波,间距为中间轴转频 2.74 Hz(理论值 2.537 5 Hz)的调制边带。由此可以判断中间轴上轴承内圈发生故障。

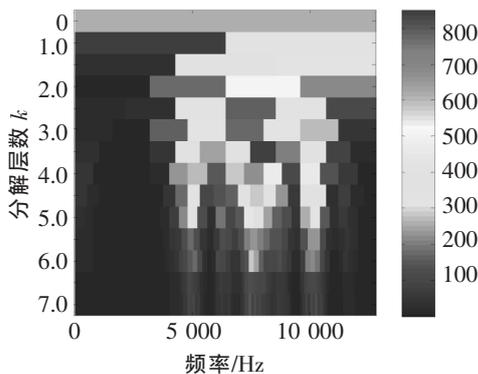


图 11 第二通道谱峭度图

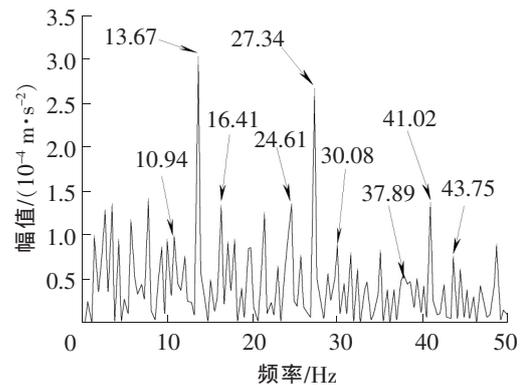


图 12 带通滤波后的包络频谱图

5 结论

研究表明,基于 EEMD 和单通道盲源分离的齿轮箱复合故障诊断方法,在使用单个加速度传感器和含有噪声干扰的条件下,可以实现对齿轮和轴承复合故障特征的分离以及提取。其中 EEMD 分解后,通过峭度和相关系数能有效地提取 IMF 分量,盲源分离将不同故障类型和噪声分离开,结合谱峭度图和共振解调技术提取轴承微弱故障,通过实验验证了该方法的有效性。

参 考 文 献

- [1]张玉周. 基于盲源分离的齿轮箱故障诊断[D]. 郑州:华北水利水电大学,2015.
- [2]杨宇,李永国,何知义,等. 基于 LCD 的齿轮箱混合故障盲源分离研究[J]. 中国机械工程,2015,26(8):1062-1066.
- [3]任彬,杨绍普,郝如江. 机车齿轮传动系统多元信号时变盲分离研究[J]. 机械工程学报,2016,52(20):8-14.
- [4]高鹏. 基于单通道盲源分离理论的故障特征提取技术[D]. 西安:长安大学,2015.
- [5]毋文峰,陈小虎,苏勋家. 基于经验模式分解的单通道机械信号盲分离[J]. 机械工程学报,2011,47(4):12-16.
- [6]李晓晖,傅攀. 基于 EEMD 的单通道盲源分离在轴承故障诊断中的应用[J]. 中国机械工程,2014,25(7):924-930.
- [7]孟宗,蔡龙. 基于 EEMD 子带提取相关机械振动信号单通道盲源分离[J]. 振动与冲击,2014,33(20):40-46.
- [8]李翠省,刘永强,廖英英. EEMD 降噪和谱峭度法在铁路货车轴承故障诊断中的应用[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(1):70-75.
- [9]Antoni J, Randall R B. The spectral kurtosis; a useful tool for characterizing non-stationary signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(2): 282-307.
- [10]Antoni J, Randall R B. The spectral kurtosis; application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(2): 308-331.
- [11]Wang Jinjiang, Gao Robert X, Yan Ruqiang. Integration of EEMD and ICA for wind turbine gearbox diagnosis[J]. Wind Energy, 2014, 17:757-773.
- [12]陈恩利,张玺,申永军,等. 基于 SVD 降噪和盲信号分离的滚动轴承故障诊断[J]. 振动与冲击,2012,31(23): 185-190.

Combination Fault Diagnosis of Gear Box Based on EEMD and Single Channel Blind Source Separation

Shi Yunlin, Hao Rujiang, An Xuejun

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In the complex fault diagnosis of gearbox, multi-stage transmission interferes with each other. The weak bearing fault is difficult to be extracted because it is annihilated by strong gear fault and noise. A fault diagnosis method of gearbox based on EEMD and single channel blind source separation is proposed. Firstly, the vibration signal of the gearbox is collected by a single acceleration sensor, and then decomposed by using EEMD method. The IMF components are reconstructed according to the kurtosis criterion and the correlation coefficient. Secondly, the reconstructed IMF components are solved by blind source separation method. The isolated signal is analyzed by the envelope demodulation to determine gear fault channel, bearing fault channel and noise channel. Finally, the Fourier transform of the gear fault channel is carried out. The bearing fault channel is analyzed based on the spectral kurtosis resonance demodulation analysis. The characteristic frequency of the signal is extracted and the complex fault diagnosis of gear box is completed. The validity and feasibility of the method are verified by experimental study.

Key words: gearbox compound fault; EEMD decomposition; blind source separation; single channel