

双树复小波包和谱峭度在齿轮故障诊断中的应用

胥永刚, 孟志鹏, 赵国亮, 陆明

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院 先进制造技术北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 针对故障齿轮振动信号的非平稳和调制特性,提出了基于双树复小波包变换和谱峭度的齿轮故障诊断方法. 首先,利用双树复小波包变换将原始振动信号分解为若干个不同频带的信号分量,选择与原始信号相关系数大的分量进行阈值降噪并重构;然后,对降噪后的信号利用谱峭度所得的峭度图选择最佳的带宽和频带中心进行相应的带通滤波处理;最后,将带通滤波后的信号作平方包络和傅里叶变换,即可得到信号的包络解调谱,从而提取故障特征信息. 通过对试验和工程实际的齿轮故障信号分析表明:双树复小波包变换和谱峭度结合的方法可有效地提取齿轮故障特征信息,进而实现故障识别,验证了方法的可行性和有效性.

关键词: 双树复小波包变换; 阈值; 谱峭度; 齿轮; 故障诊断

中图分类号: TH 133.3; TH 165

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2014)04-0488-07

Application of Gear Fault Diagnosis Based on Dual-tree Complex Wavelet Packet Transform and Spectral Kurtosis

XU Yong-gang, MENG Zhi-peng, ZHAO Guo-liang, LU Ming

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Aiming at non-stationary and modulation characteristics of gear fault vibration signals, a fault diagnosis method was proposed based on dual-tree complex wavelet packet transform and spectral kurtosis. First, the original vibration signal was decomposed into several different frequency band components by dual-tree complex wavelet packet transform, some components that have bigger correlation coefficient were de-noised by the threshold. Second, the best bandwidth and band center of band-pass filter were determined through fast kurtosis diagram of spectral kurtosis. Finally, the envelope demodulation spectrum of filter signal could be obtained by square envelope and Fourier transforms, then the fault information was effectively extracted. The analysis of the gear fault signals shows that the fault feature information of the gear can be effectively extracted to identify the fault, and the proposed method is effective and feasible.

Key words: dual-tree complex wavelet packet transform; threshold; spectral kurtosis; gear; fault diagnosis

在旋转机械设备中,齿轮是最常用和最关键的零部件之一,如果齿轮出现故障,将影响整个设备的运行状况. 齿轮箱的工作环境通常情况下都比较恶劣,传感器所采集的振动信号大多是非平稳的,信号

中也存在较大的干扰成分,故障信息十分微弱,这给齿轮的故障诊断增加了难度. 在非平稳的振动信号中如何提取出有效的故障特征信息是齿轮故障诊断技术的关键^[1].

收稿日期: 2013-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075009);北京市教育委员会科研计划资助项目(KM20131005013)

作者简介: 胥永刚(1975—),男,副教授,主要从事机械故障诊断学方面的研究,E-mail:xyg@bjut.edu.cn

在齿轮故障诊断技术中,共振解调和包络解调是最常用的方法,但往往都要求先对信号进行带通滤波处理,而带通滤波的关键是滤波参数的设置.谱峭度最早是基于短时傅里叶变换提出的, Antoni^[2-3]对谱峭度进行了规范化,并提出谱峭度快速算法——峭度图,根据不同频段的峭度值可确定最佳的带宽和频带中心.

双树复小波包变换 (dual-tree complex wavelet packet transform, DT-CWPT) 作为一种新型的信号处理方法^[4],在保留双树复小波变换^[5-6]的近似平移不变性等优良性质的同时,对没有细分的高频部分进一步分解,故整个频段的频率分辨率将提高,也减少了有效信息的丢失.目前,DT-CWPT在某些领域已有相关应用,如图像处理^[7]、语音处理^[8]、心电信

号处理^[9]和故障诊断^[10-13]等.

本文提出了将双树复小波包变换和谐峭度结合的故障诊断方法,通过对齿轮故障试验信号和某冶金企业高速线材轧机齿轮故障信号的分析表明,该方法可以有效地提取齿轮故障的特征频率,进而实现故障识别.

1 双树复小波包变换

双树复小波包变换包含了2个并行且使用不同的低通和高通滤波器的离散小波包变换,可分别看作实部树与虚部树,这样可实现信号分解过程中信息互补的作用.图1为双树复小波包两层分解和重构过程示意图.对信号进行DT-CWPT分解与重构过程的详细过程见文献[14].

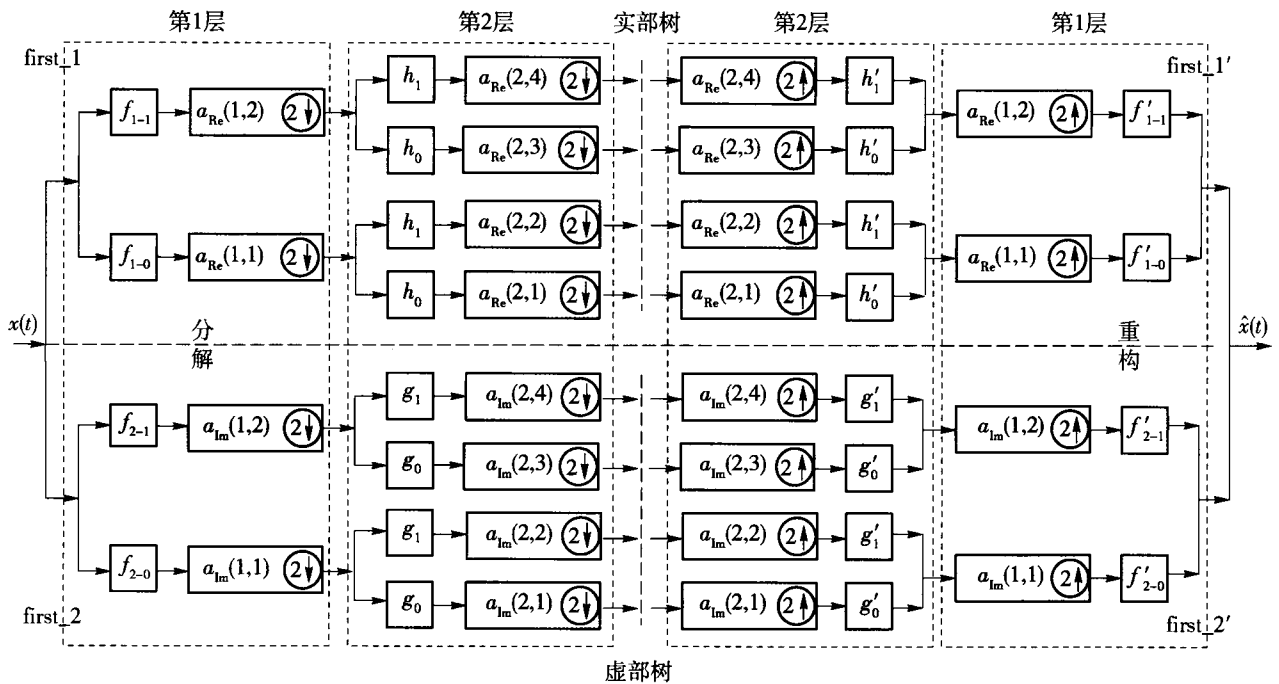


图1 DT-CWPT分解和重构过程

Fig. 1 Decomposition and reconstruction process of DT-CWPT

同传统的离散小波包变换一样,由于在分解过程中隔点采样导致采样频率减半,而高频部分不满足采样定理而发生频率混叠,对高频部分继续分解就会产生频带交错,双树复小波包变换利用两树的信息互补,在一定程度上抑制了频率混叠的现象,但仍存在频带交错的问题.

2 谱峭度

由于功率谱存在无法检测和提取信号中瞬态现象的不足,故 Dwyer 提出了谱峭度 (spectral kurtosis,

SK). 谱峭度的主要思想是通过计算每根谱线的峭度值,发现隐藏在信号中的非平稳信息,同时确定在哪个频段. Antoni 将谱峭度规范化,并提出基于滤波频带的谱峭度快速算法. 谱峭度定义为能量归一化的四阶谱累积量,用来度量一个过程在某一频率上的概率密度函数的峰值大小. 谱峭度从信号处理角度可以解释为理想的滤波器组的输出在频率上计算得到的谱峭度值. 所以谱峭度对信号中的瞬态成分敏感性更高,而且可精确地找到所对应的频率,因此,谱峭度在检测瞬态信号成分有一定的优势.

非平稳情况下,定义信号 $X(t)$ 的激励响应 $Y(t)$ 表达式为

$$Y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi ft} H(t,f) dX(f) \quad (1)$$

式中: $H(t,f)$ 为系统的时变脉冲响应函数的傅里叶变换,表示 $Y(t)$ 在 f 处的复包络.

过程 $Y(t)$ 四阶谱累积量定义为

$$C_{4Y}(f) = S_{4Y}(f) - 2S_{2Y}^2(f), f \neq 0 \quad (2)$$

式中: $S_{4Y}(f)$ 为复包络的 4 阶矩; $S_{2Y}^2(f)$ 为复包络的 2 阶矩的平方.

定义复包络的 $2n$ 阶矩为

$$S_{2nY}(f) = E \{ |H(t,f) dX(f)|^{2n} \} / df \quad (3)$$

即可得到谱峭度的定义为

$$K_Y(f) = \frac{C_{4Y}(f)}{S_{2Y}^2(f)} = \frac{S_{4Y}(f)}{S_{2Y}^2(f)} - 2, f \neq 0 \quad (4)$$

3 基于 DT-CWPT 和谱峭度的诊断方法

基于 DT-CWPT 和谱峭度的诊断方法首先将非平稳的复杂信号进行 DT-CWPT 分解,得到几个不同频带的信号分量,将每个分量分别与原始信号求互相关系数,对相关系数较大的分量,利用阈值对小波系数进行降噪,同时将相关系数较小的分量舍掉,利用 DT-CWPT 将降噪后的小波系数进行重构;然后对重构后的信号利用谱峭度选择最佳的带宽和频带中心进行带通滤波;最后对滤波后的信号进行包络解调处理,得到有效的故障特征信息.综上所述,该方法的流程如图 2 所示.

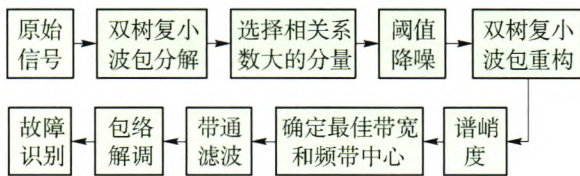


图 2 基于 DT-CWPT 和谱峭度的诊断方法

Fig. 2 Method based on DT-CWPT and spectral kurtosis

4 试验分析

该试验系统主要由齿轮故障模拟试验台、数据采集仪、压电式加速度传感器、笔记本电脑组成,齿轮故障试验台如图 3 所示.将有故障的齿轮安装在齿轮箱内采集振动信号,数据采集仪将信号传到电脑中,即完成了振动信号的采集.

该试验中齿轮箱是一对齿轮,模数为 2,材质是 S45C,小齿轮为主动轮,齿数为 55;大齿轮为从动轮,齿数为 75.该故障试验模拟了大齿轮一个齿的

齿根裂纹故障,即在该位置加工了一个深度为 3.4 mm 的微小裂纹.电机转速为 1 000 r/min,采样频率为 12.8 kHz,经计算大齿轮的转频为 12.22 Hz.

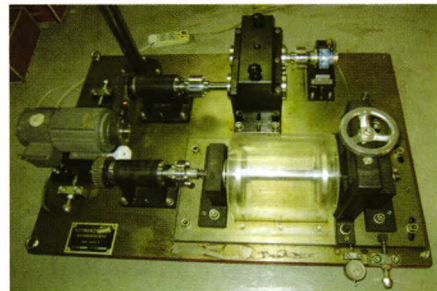


图 3 齿轮故障试验台
Fig. 3 Gear fault test rig

图 4 为齿轮裂纹故障信号的原始时域波形及频谱,从波形和频谱中基本看不出故障特征信息,信号中存在明显的干扰成分.按照本文方法,对原始信号进行 3 层 DT-CWPT 分解,结果如图 5 所示.分解后的 8 个分量与原始信号的相关系数如表 1 所示, a31 分量和 a35 分量的相关系数较小,故舍去,利用软阈值(阈值为 3)对其余分量进行阈值处理,再利用双树复小波包进行重构,得到降噪后的信号波形如图 6 所示,可以看出噪声得到一定程度上的消除.

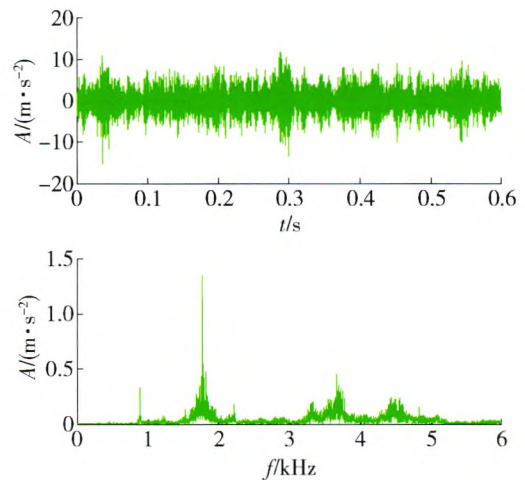


图 4 齿轮故障信号波形及频谱

Fig. 4 Waveform and spectrum of gear fault signal

表 1 相关系数

Table 1 Cross-correlation coefficients

分量	a31	a32	a33	a34
相关系数	0.128 7	0.598 6	0.428 5	0.647 3
分量	a35	a36	a37	a38
相关系数	0.080 5	0.328 5	0.568 5	0.448 5

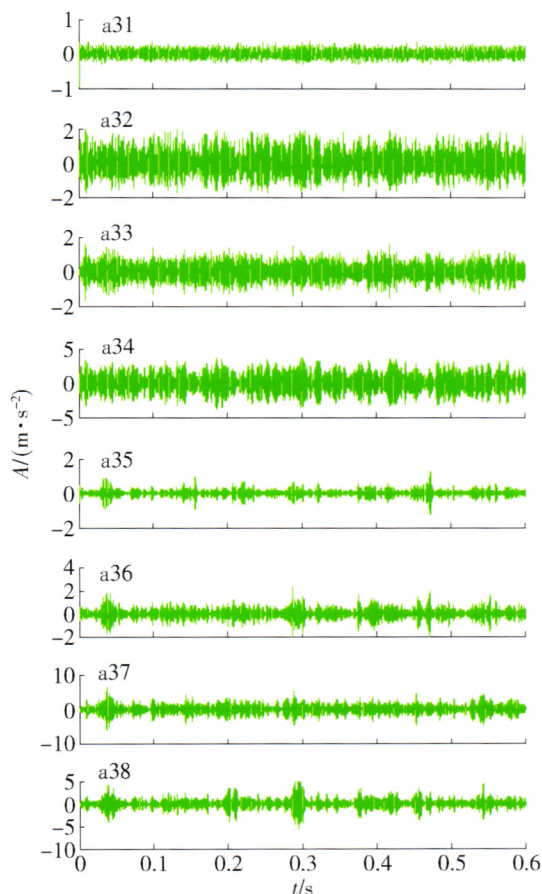


图 5 试验信号 DT-CWPT 分解后分量波形

Fig. 5 Experiment signal waveforms of components decomposed by DT-CWPT

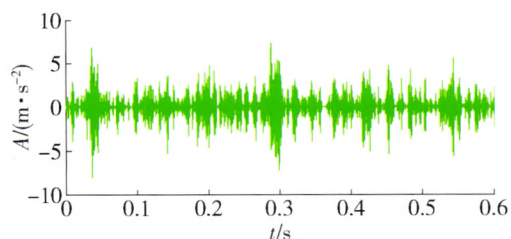


图 6 试验信号双树复小波包降噪后波形

Fig. 6 Experiment signal waveform of DT-CWPT de-noising

利用谱峭度对降噪后的信号求得快速峭度图, 如图 7 所示, 峭度最大值为 10.4, 出现在第 4 层, 其带通滤波器的中心频率为 4.6 kHz, 带宽为 400 Hz, 按此参数带通滤波后包络解调谱如图 8 所示. 在图中可以明显找到 11.98、23.53、35.51 Hz 的频率成分, 与大齿轮转频 12.22 Hz 的 1 倍、2 倍以及 3 倍频非常接近, 即可判断大齿轮可能出现故障, 这与试验模拟大齿轮裂纹故障相符.

图 9 为直接对原始信号利用谱峭度滤波后的包络解调谱. 图 10 为双树复小波包阈值降噪后直接

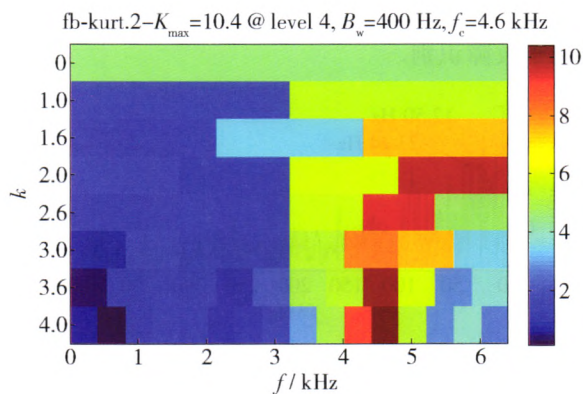


图 7 降噪试验信号的快速峭度图

Fig. 7 Kurtogram of de-noising experiment signal

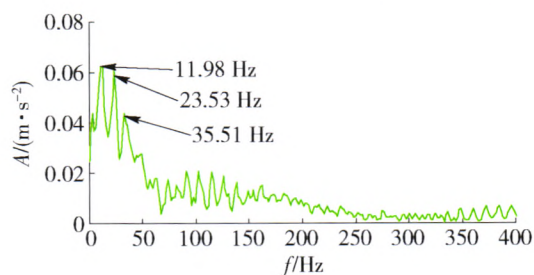


图 8 最大峭度值滤波试验信号包络解调谱

Fig. 8 Envelope spectrum of filtered experiment signal by maximizing the kurtosis

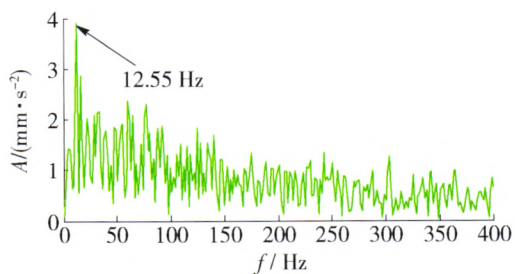


图 9 直接对原始试验信号最大峭度值滤波后包络解调谱

Fig. 9 Envelope spectrum of filtered original experiment signal directly by maximizing the kurtosis

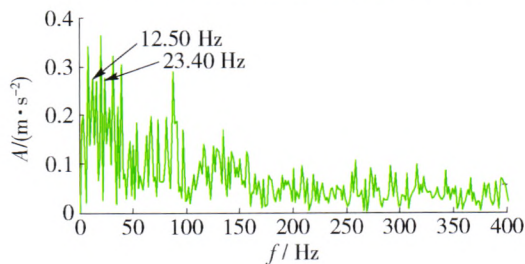


图 10 试验信号双树复小波包降噪后包络解调谱

Fig. 10 Experiment signal envelope spectrum of de-noised signal by DT-CWPT

包络解调所得. 图 11 为原始信号的包络解调谱, 对比分析, 本文方法处理结果更为理想, 频率成分基本

只有特征频率及其倍频成分,包含的干扰成分较少,有利于故障识别.

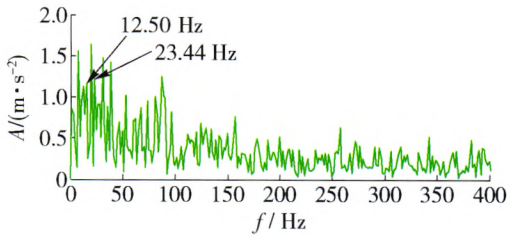


图 11 原始试验信号的包络解调谱

Fig. 11 Envelope spectrum of original experiment signal

5 工程案例

2007年8月,某棒材钢厂14#轧机组振动强烈,振动幅值超出了报警阈值,说明14#轧机存在故障.14#轧机组的结构简图如图12所示.图13为27日伞齿轮箱的输入端测点的振动信号的时域波形和频谱,其中信号的采样频率为4.0 kHz,采样点数为2 048,伞齿轮箱的输入和输出轴的转频都为15.63 Hz.

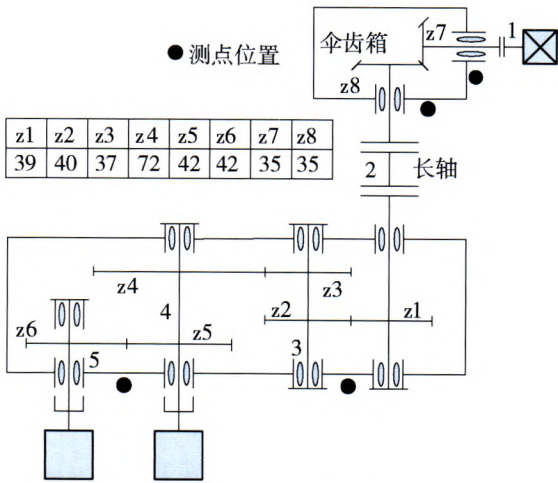


图 12 14#轧机结构简图

Fig. 12 Structure diagram of 14# rolling mill

对原始信号采用双树复小波包进行3层分解,结果如图14所示,对于相关系数较大的分量利用阈值处理实现信号的降噪,降噪后的信号如图15所示,可看出信号中冲击成分更明显.

利用谱峭度对降噪后的信号求快速峭度图,如图16所示,峭度最大值为6.5,出现在第2层,其带通滤波器的中心频率为1.75 kHz,带宽为500 Hz,按此参数带通滤波后包络解调谱如图17所示.在图中可明显找到15.69、31.37、47.06 Hz等的频率成分,这与伞齿轮箱输入和输出轴的转频(15.63 Hz)及其倍频非常接近,可判断伞齿轮箱出现故障,但由于输

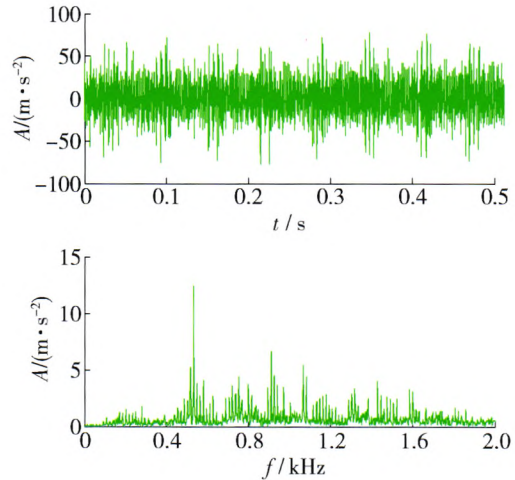


图 13 原始故障信号波形及频谱

Fig. 13 Waveform and spectrum of original fault signal

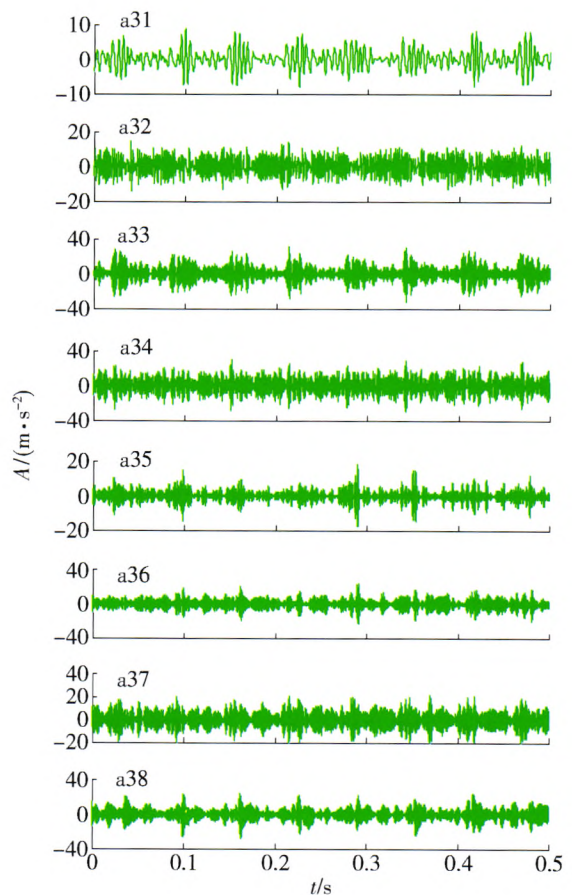


图 14 DT-CWPT 分解后分量波形

Fig. 14 Waveforms of components decomposed by DT-CWPT

入轴和输出轴的转频一样,故无法识别故障的位置.经开箱检查,输出轴的伞齿轮出现打齿故障,故障伞齿如图18所示.

图19为直接对原始信号利用谱峭度滤波后的

包络解调谱, 由于最大峭度值出现在第 3 层, 其带宽为 250 Hz, 故只能画出 0 ~ 250 Hz 的频率成分. 图 20 为双树复小波包阈值降噪后直接包络解调所得. 图 21 为原始信号的包络解调谱, 对比分析, 本文方法的效果更加理想.

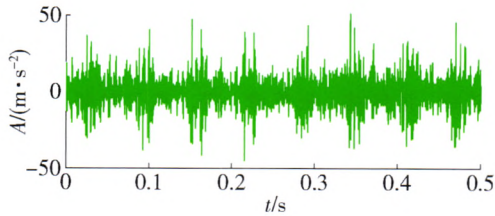


图 15 双树复小波包降噪后波形

Fig. 15 Waveform of DT-CWPT de-noising

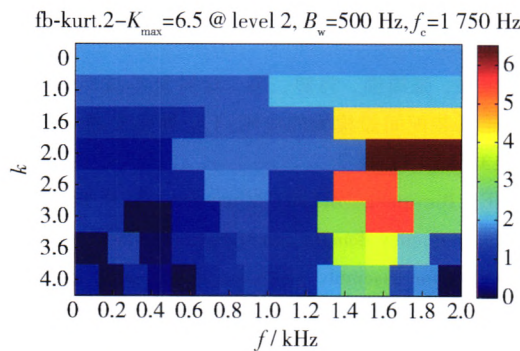


图 16 降噪信号的快速峭度图

Fig. 16 Kurtogram of de-noising signal

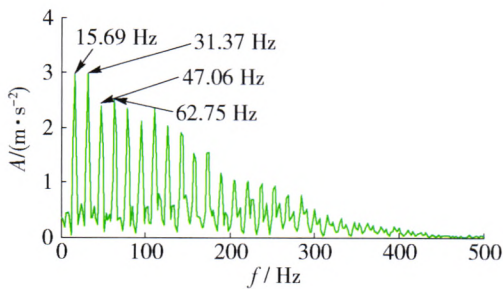


图 17 最大峭度值滤波信号包络解调谱

Fig. 17 Envelope spectrum of filtered signal by maximizing the kurtosis



图 18 故障齿轮

Fig. 18 Fault gear

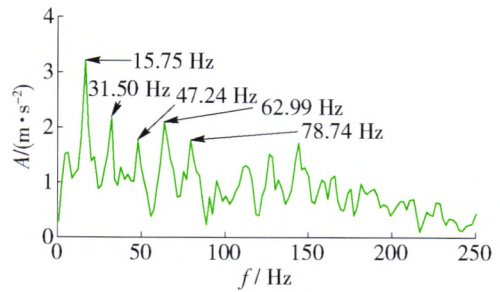


图 19 直接对原始信号最大峭度值滤波后包络解调谱

Fig. 19 Envelope spectrum of filtered original signal directly by maximizing the kurtosis

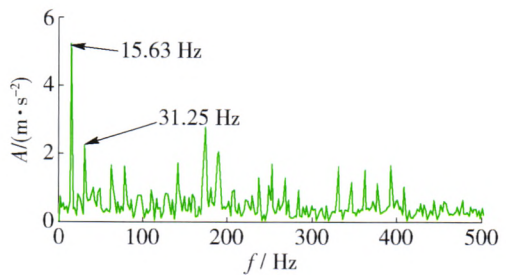


图 20 双树复小波包降噪后包络解调谱

Fig. 20 Envelope spectrum of de-noised signal by DT-CWPT

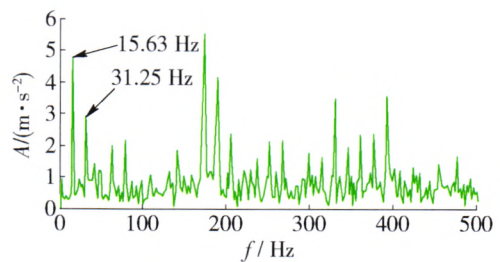


图 21 原始信号的包络解调谱

Fig. 21 Envelope spectrum of original signal

6 结论

1) 利用双树复小波包变换进行阈值降噪, 可有效地消除振动信号的噪声干扰.

2) 根据谱峭度的快速峭度图可自动确定带通滤波器的最佳带宽和频带中心.

3) 将双树复小波包变换与谱峭度结合的方法应用于故障诊断中, 可有效和准确地提取故障特征, 实现故障识别.

参考文献:

[1] 何田, 林意洲, 郜普刚, 等. 局部均值分解在齿轮故障诊断中的应用研究 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(6):

- 196-201.
- HE Tian, LIN Yi-zhou, GAO Pu-gang, et al. Application of local-mean decomposition in gear fault diagnosis [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(6): 196-201. (in Chinese)
- [2] ANTONI J. The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(2): 282-307.
- [3] ANTONI J. Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(1): 108-124.
- [4] BAYRAM I, SELESNICK I W. On the dual-tree complex wavelet packet and M-band transforms [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(6): 2298-2310.
- [5] KINGSBURY N G. The dual-tree complex wavelet transform: a new technique for shift invariance and directional filters [J]. *IEEE Digital Signal Processing Workshop*, 1998, 98(1): 2-5.
- [6] SELESNICK I W, BARANIUK R G, KINGSBURY N G. The dual-tree complex wavelet transform [J]. *IEEE Digital Signal Processing Magazine*, 2005, 22(6): 123-151.
- [7] EDWARD H S L, PICKERING M R, FRATER M R, et al. Image segmentation from scale and rotation invariant texture features from the double dyadic dual-tree complex wavelet transform [J]. *Image and Vision Computing*, 2011, 29(1): 15-28.
- [8] 王娜, 郑德忠, 刘永红. 双树复小波包变换语音增强新算法 [J]. *传感技术学报*, 2009, 22(7): 983-987.
- WANG Na, ZHENG De-zhong, LIU Yong-hong. New method for speech enhancement based on dual-tree complex wavelet packet transform [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(7): 983-987. (in Chinese)
- [9] 王芳, 季忠, 彭承琳. 基于双树复小波变换的心电信号去噪研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(5): 1160-1166.
- WANG Fang, JI Zhong, PENG Cheng-lin. Research on ECG signal denoising based on dual-tree complex wavelet transform [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(5): 1160-1166. (in Chinese)
- [10] 吴定海, 张培林, 任国全, 等. 基于双树复小波包的发动机振动信号特征提取研究 [J]. *振动与冲击*, 2010, 29(4): 160-164.
- WU Ding-hai, ZHANG Pei-lin, REN Guo-quan, et al. Feature extraction of an engine vibration signal based on dual-tree wavelet package transformation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(4): 160-164. (in Chinese)
- [11] 吴定海, 张培林, 张英堂, 等. 基于时频奇异谱和RVM的柴油机故障诊断研究 [J]. *机械强度*, 2011, 33(3): 317-323.
- WU Ding-hai, ZHANG Pei-lin, ZHANG Ying-tang, et al. Study on diesel engine faults diagnosis based on time frequency singular value spectrum and RVM [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2011, 33(3): 317-323. (in Chinese)
- [12] 陈彬强, 张周锁, 郭婷, 等. 双树复小波时频构造在齿轮系装配间隙检测的应用 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(3): 1-7.
- CHEN Bin-qiang, ZHANG Zhou-suo, GUO Ting, et al. Time-frequency domain construction of dual tree complex wavelets for assembly clearance detection of gear chains [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(3): 1-7. (in Chinese)
- [13] 李辉, 郑海起, 唐力伟. 基于改进双树复小波变换的轴承多故障诊断 [J]. *振动、测试与诊断*, 2013, 33(1): 53-59.
- LI Hui, ZHENG Hai-qi, TANG Li-wei. Bearing multi-faults diagnosis based on improved dual-tree complex wavelet transform [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2013, 33(1): 53-59. (in Chinese)
- [14] 胥永刚, 孟志鹏, 陆明. 基于双树复小波包变换的滚动轴承故障诊断 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(10): 49-56.
- XU Yong-gang, MENG Zhi-peng, LU Ming. Fault diagnosis of rolling bearing based on dual-tree complex wavelet packet transform [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(10): 49-56. (in Chinese)

(责任编辑 杨开英)