

文章编号: 1000-8055(2005) 04-0606-07

滚动轴承故障诊断的自适应 共振解调技术

王 平¹, 廖明夫²

(1. 中国航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412002;
2. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 针对共振解调技术在实际使用中存在必须事先通过冲击试验确定高频共振频率和带通滤波器的中心频率固定不变的缺点, 提出了自适应共振解调技术。自适应共振解调技术可以在共振解调处理之前依靠对振动信号的频谱分析自动识别高频共振频率, 然后根据被测对象的高频共振频率自适应地改变带通滤波器的中心频率。并研究了自适应共振解调技术的实现方法, 并对实际轴承振动信号进行了自适应共振解调分析。研究表明, 该技术可方便地在工程中应用。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 滚动轴承; 故障诊断; 共振解调技术; 自适应共振解调技术
中图分类号: V 229. 2 文献标识码: A

Adaptive Demodulated Resonance Technique for the Rolling Bearing Fault Diagnosis

WANG Ping¹, LIAO Ming-fu²

(1. China Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China;
2. School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: There are two drawbacks of the Demodulated Resonance Technique (DRT), which are: impact test is needed to determine the excitation frequency of a bearing system; the central frequency of the band-pass filter is unchangeable. Adaptive Demodulated Resonance Technique (ADRT) was used to overcome the drawbacks. ADRT can auto-identify the high-frequency resonance frequency by analyzing the vibration signal measured on the bearing housing, and can adaptively change the central frequency of the band-pass filter based on the high-frequency resonance frequency of the bearing system. Experimental results of the 6307 bearings show that the ADRT is more convenient and effective in extracting the symptoms of the rolling bearing faults than DRT.

Key words: aerospace propulsion system; rolling bearing; fault diagnosis;
Demodulated Resonance Technique (DRT);
Adaptive Demodulated Resonance Technique (ADRT)

收稿日期: 2004- 06- 13; 修订日期: 2004- 12- 10

基金项目: 航空支撑科学基金资助(02B53004)

作者简介: 王平(1968-), 男, 湖南临澧人, 中国航空动力机械研究所高级工程师, 博士, 主要从事机械振动、工程信息处理、设备状态监测与故障诊断方面的研究。

在滚动轴承故障诊断中, 由于早期轻微的轴承故障产生的信息往往淹没在背景噪声中, 很难被发现和提取出来, 因此必须采用有效的信号处理技术提高信噪比, 凸显故障特征。共振解调技术是在滚动轴承故障诊断中广泛使用的一种信号处理方法, 它极大地提高了信噪比, 特别适用于轴承故障的早期诊断^[1, 2]。

但共振解调技术在使用中存在如下缺点:
(1) 必须事先通过冲击试验确定高频共振频率, 以确定带通滤波器的中心频率。

在共振解调技术的实现过程中, 带通滤波的选择对分析结果起决定性影响。带通滤波的中心频率必须等于轴承系统的共振频率, 否则将很容易导致诊断失败。

为了确定所监测轴承系统的高频共振频率, 一般需要做冲击试验。做冲击试验一般需要冲击锤、振动激励器和其控制器等一些设备, 还需要熟练的试验操作人员^[3]。对于多数用户来说, 由于资金限制和人力资源的不足, 这些条件难于满足, 不能做冲击试验。

(2) 带通滤波器的中心频率和带宽固定不变。

在共振解调技术的实现过程中, 带通滤波器的中心频率和带宽是根据某一类被测轴承系统的高频共振频率而设计的, 是固定不变的。如果另一类被测轴承系统的高频共振频率与该高频共振频率不相同, 那么所设计的共振解调应用系统就不适用了。

共振解调技术在使用中存在的上述两个缺点使所设计的共振解调应用系统的应用范围狭窄、缺乏灵活性, 这不仅造成了资源的浪费, 而且妨碍了共振解调技术的推广应用。为此, 本文提出了自适应共振解调技术。

1 自适应共振解调技术

自适应共振解调技术的基本特征, 就是在共

振解调技术的实现过程中带通滤波器的中心频率不是固定不变, 而是能够根据被测对象的高频共振频率自适应地变化。

自适应共振解调技术的处理过程如下:
压电加速度传感器测量的轴承振动信号经过前置信号调理器预处理后进行 A/D 转换送入计算机。计算机对 A/D 采样信号进行 FFT, 通过对振动信号的频谱分析自动识别轴承系统的高频共振频率。计算机根据确定的高频共振频率, 再对 A/D 采样信号进行带通滤波、包络检波等处理, 或者计算机对可编程带通滤波器进行适当的控制使带通滤波器按照确定的高频共振频率对振动信号进行带通滤波, 然后进行包络解调等处理。

图 1 是用数字方法实现自适应共振解调的流程图。而图 2 则是用模拟电路实现自适应共振解调的流程图。

对于某一具体的轴承系统来说, 其共振频率可能不止一个, 但共振频率都是固定的。高频共振频率一般都在 10 kHz 以上, 而在 10 kHz 以上包含的低频振动已很少。所以对采样信号进行频谱分析, 通过计算机软件自动识别轴承系统的高频共振频率, 从而确定带通滤波器的中心频率, 是可以实现的。

选择高频共振频率的原则: 一是优先选择 10 kHz 以上的共振频率; 二是尽量选择最大共振峰所对应的共振频率。另外, 选择的高频共振频率越大, 包含的低频振动将越少, 这样, 经过包络检测处理后所得到的包络信号的信噪比将越高。

带宽的确定要综合考虑两个方面的问题。
第一, 带宽至少应超过轴承最高故障特征频率的 3 倍, 以保证在共振解调包络频谱中至少能看到最高故障特征频率的 3 阶谐波^[4]。一般来说, 在滚动轴承的故障特征频率中, 内环故障特征频率最大。所以, 通常以内环故障特征频率的 3 倍作为选择带宽的最小值。

第二, 注意自适应共振解调实现的方式。用模

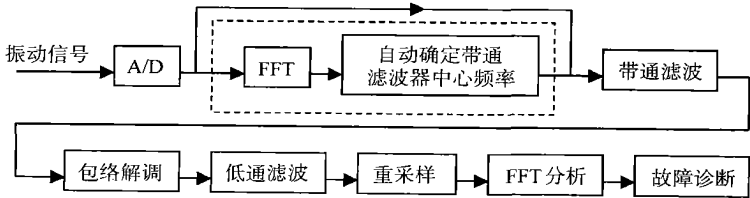


图 1 用数字方法实现自适应共振解调的流程图

Fig. 1 The flow chart of ADRT using digital method to realize

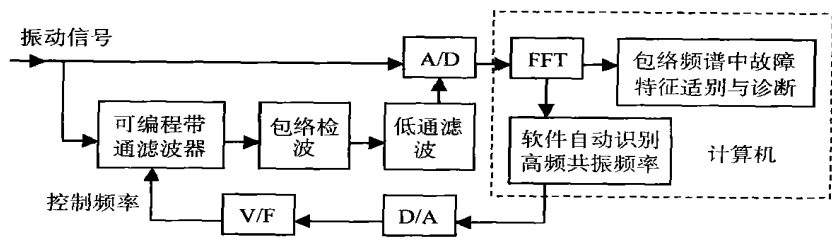


图 2 用模拟电路实现自适应共振解调的流程图
Fig.2 The flow chart of ADRT using analog circuit to realize

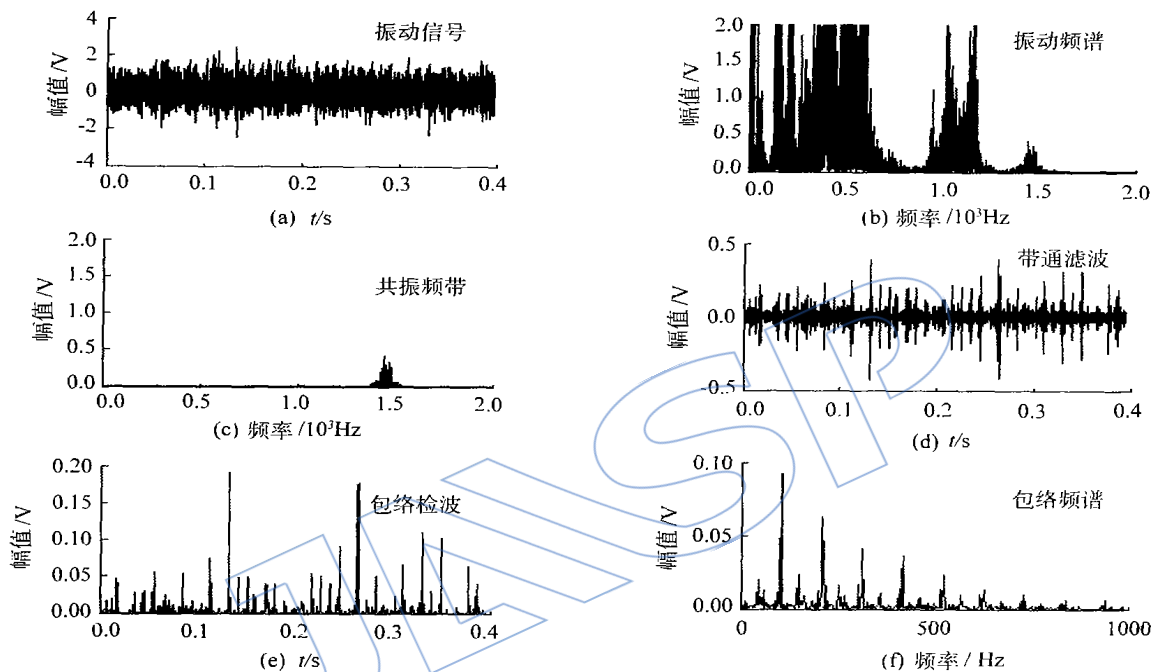


图 3 自适应共振解调分析的数字实现过程及应用实例
Fig. 3 The flow chart of ADRT and its application example

拟电路实现自适应共振解调时, 带宽 $\Delta\omega$ 的确定可根据中心频率 f_0 和品质因子 Q 进行计算:

$$\Delta\omega = f_0 / Q$$

品质因子 Q 越大, 滤波器选择性越好, 但一般在模拟电路中品质因子 Q 不能大于 10。用数字方法实现自适应共振解调时, 带宽在数字滤波器设计时进行选择, 使用时不再考虑, 但可以设计多种不同带宽的带通滤波器以供选择。数字滤波器的设计可参见文献[5], 此处不再赘述。本文所使用的数字带通滤波器是用切比雪夫最佳一致逼近法设计的 FIR 带通滤波器。带宽不是一个固定数值, 在满足上述两个方面条件的前提下, 可以灵活选择带宽。

图 3 是自适应共振解调分析的数字实现过程及其应用实例。信号获取可参见下一节的介绍, 该

6307 型轴承编号为 2。在图 3 中, (a) 是 6307 型轴承有外环故障的原始振动信号。(b) 是振动信号的频谱图, 可以看到在 20 kHz 以内包含了多个频谱峰。(c) 是自动识别出来高频共振峰, 其中心频率约 14.7 kHz。(d) 是对 (a) 中振动信号进行数字带通滤波(带通滤波器的中心频率等于 14.7 kHz, 带宽等于 1.2 kHz)后的信号。(e) 是对 (d) 中的信号进行包络检波后得到的包络信号。(f) 是包络频谱。可以发现在 (e) 和 (f) 中有非常明显的外环故障特征信息。

2 轴承实验及其振动信号的自适应共振解调分析

2.1 6307 型轴承实验

本文建立了一个轴承实验器, 并在该实验器

上对人工设置了各种故障和没有故障的 6307 型轴承进行了实验。滚动轴承故障诊断实验装置如图 4 所示。转子两支点均选用 6307 型滚动轴承,其几何参数如下:轴径为 35 mm,中径为 57.5 mm,滚子直径为 14.5 mm,接触角为 0°;滚子数为 7。模拟故障轴承置于转子左支承端。轴承座可以拆卸,以便更换不同故障类型的轴承。联轴器上贴有反光纸作为相位起始标志,光电传感器提供转速和键相信号。安装转子的目的是给实验轴承施加一定的载荷,驱动电机的运行转速可以通过控制器手动控制。

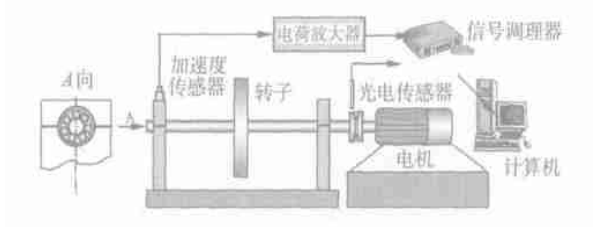


图 4 滚动轴承故障诊断实验装置示意图
Fig. 4 The test rig for the rolling element bearing

如表 1 所示是部分 6307 型实验轴承及其故障设置情况。

表 1 部分 6307 型实验轴承及其故障设置情况
Table 2 Different types of simulated faults on the bearing test rig

编号	故障类型	故障大小(长×宽)
1	内环单点故障	0.25 mm×4 mm
2	外环单点故障	0.25 mm×4 mm
3	滚珠单点故障	0.5 mm×4 mm
4	好轴承	

2.2 轴承故障特征频率

根据轴承的参数及其运行转速可以计算轴承中各个元件的故障特征频率。对于外环固定的轴承,各元件的故障特征频率为^[6]:

保持架:

$$f_h = \frac{f_n}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \tag{2}$$

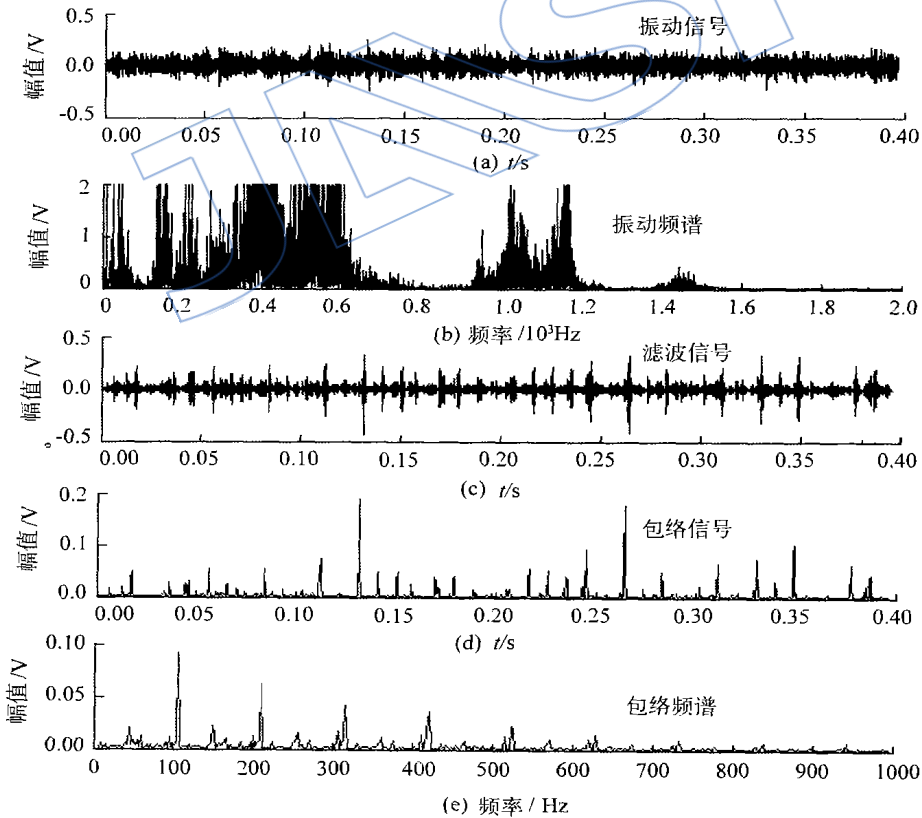


图 5 6307 轴承有外环故障时振动信号的自适应共振解调分析
Fig. 5 The ADRA of the vibration of the 6307 bearing with a scratches in the outer ring

滚子:

$$f_b = D \frac{f_n}{2d} \left[1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2 \alpha \right]$$

(3)

外环:

$$f_o = Z \cdot f_h = Z \cdot \frac{f_n}{2} \left[1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right]$$

(4)

内环:

$$f_i = Z \cdot (f_n - f_h) = Z \cdot \frac{f_n}{2} \left[1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right]$$

(5)

其中, f_n 是轴转动频率(Hz), d 是滚动体直径, D 是轴承中径, Z 是滚子数, α 是接触角。

滚动轴承的共振解调包络频谱具有“没有故障就没有谱线”、“有故障则出现多阶谐波谱线”的规律^[3]。这一规律是从共振解调包络频谱中识别轴承故障的理论依据。

2.3 6307 型轴承振动信号的自适应共振解调分析

对 6307 型轴承设置有外环、内环和滚动体故障的振动信号以及无故障轴承的振动信号进行了

自适应共振解调分析。振动信号采样频率为 40960Hz, 轴承运行转速为 2 400 r/min。分析结果如图 5~图 8 所示。其中, 图 5~图 7 分别是 6307 型轴承有外环故障、内环故障和滚子故障时的分析情况, 根据它们各自的原始振动信号和振动频谱很难判断轴承故障, 但从它们各自的带通滤波后信号、包络信号和包络频谱中则容易发现轴承故障。

根据图 5(b) 的振动频谱, 自动确定的带通滤波器中心频率为 14.6 kHz。在图 5(e) 中, 外环故障特征频率 1 阶(= 106.8 Hz)及其 2, 3, 4 阶谐波谱峰非常明显。

根据图 6(b) 的振动频谱, 自动确定的带通滤波器中心频率为 11.8 kHz。在图 6(e) 的包络频谱中, 内环故障特征频率的 1 阶(= 175.2 Hz)和 2 阶谱峰十分明显, 3、4 阶谱峰也可看见。

根据图 7(b) 的振动频谱, 自动确定的带通滤波器中心频率为 18.8 kHz。在图 7(e) 的包络频谱中, 可清晰地看见滚子故障特征频率的 1 阶(= 74.28 Hz)至 4 阶以上的高阶谐波谱峰。

图 8 是对无故障 6307 型轴承的振动信号进

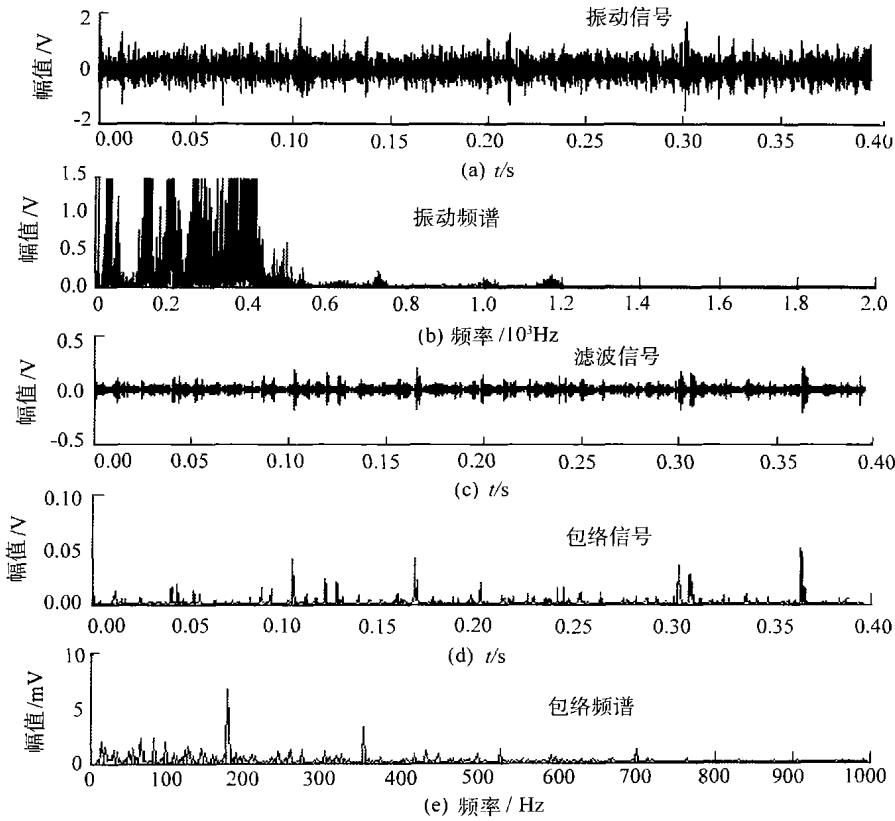


图 6 6307 轴承有内环故障时振动信号的自适应共振解调分析

Fig. 6 The ADRA of the vibration of the 6307 bearing with a scratches in the inner ring

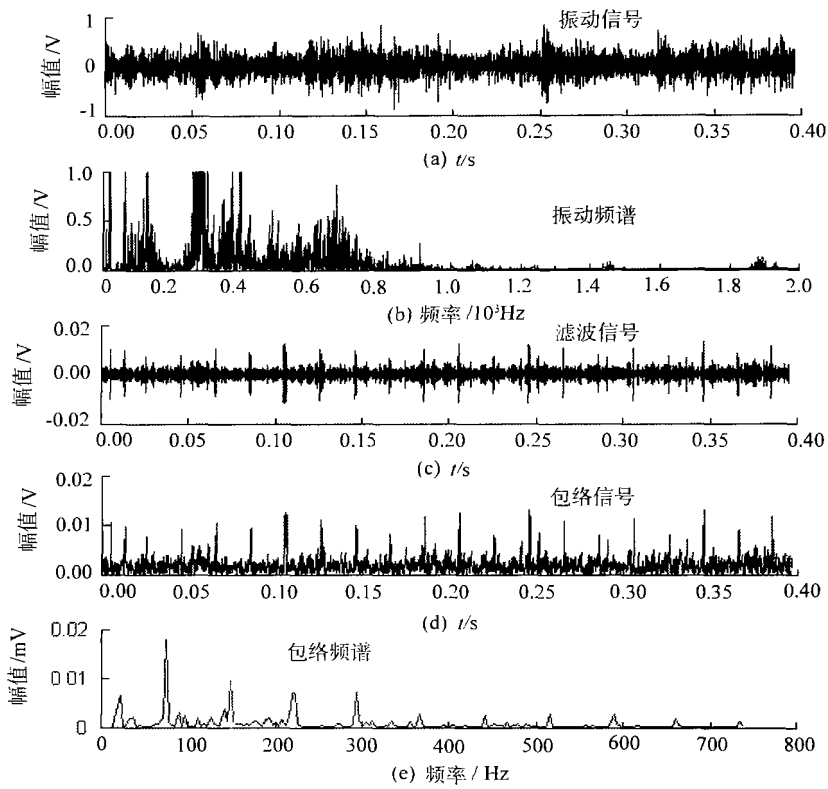


图 7 6307 轴承有滚子故障时振动信号的自适应共振解调分析

Fig. 7 The ADRA of the vibration of the 6307 bearing with a scratches in a ball

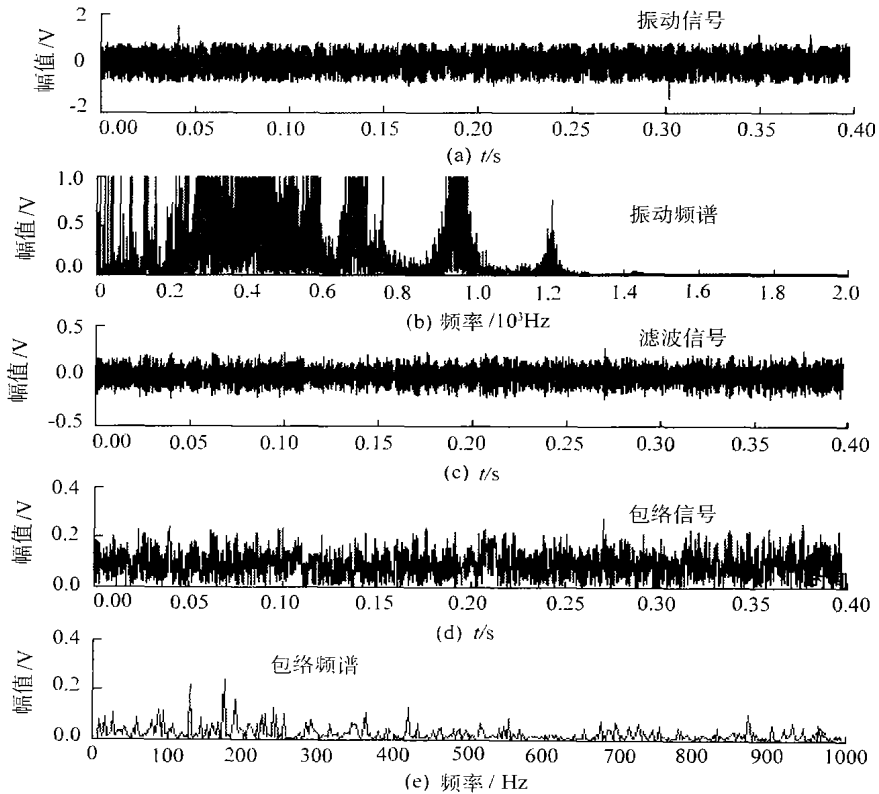


图 8 6307 轴承无故障时振动信号的自适应共振解调分析

Fig. 8 The ADRA of the vibration of the 6307 bearing without failure

行分析的结果。在图 8(b) 振动频谱中, 随机冲击在 20 kHz 以内激起了多个共振谱峰, 自动选择的带通滤波器中心频率为 12 kHz。但在图 8(e) 的包络频谱中, 没有发现故障特征频率及其多阶谐波谱峰。

从图 5~图 8 的分析结果可以看出, 6307 型实验轴承振动信号的自适应共振解调分析是成功的。

3 结束语

本文对传统的共振解调技术进行了改进, 提出了自适应共振解调技术。

自适应共振解调技术克服了共振解调技术在滚动轴承故障诊断应用中存在的 2 个主要问题: 必须事先通过冲击试验确定高频共振频率; 带通滤波器的中心频率和带宽固定不变。

自适应共振解调技术能够根据被测轴承系统的高频共振频率自适应地变化。在共振解调处理之前, 依靠对振动信号的频谱分析可以自动识别高频共振频率。

6307 型实验轴承振动信号的自适应共振解

调分析表明: 自适应共振解调技术比共振解调技术更灵活、方便、有效, 可在工程中应用。

参考文献:

[1] McFadden P D, Smith J D. Vibration Monitoring of Rolling Element Bearing by the High-Frequency Resonance Technique- a Review[J] . *Int. J. Tribology*, 1984, 17: 3~10.

[2] 梅宏斌. 滚动轴承振动监测与诊断 —— 理论、方法、系统[M] . 北京: 机械工业出版社, 1996.

[3] Deter W T, Peng Y H, Yam R. Wavelet Analysis and Envelope Detection for Rolling Element Bearing Fault Diagnosis- Their Effectiveness and Flexibilities[J] . *ASME J. Vib. Acoust.* 2001, 123: 303~310.

[4] 唐德尧. 共振解调技术在我国设备诊断中的应用和发展[R] . 黄山: 第二次全国设备诊断技术应用推广交流会, 1992.

[5] 宗孔德、胡广书, 数字信号处理[M] , 北京: 清华大学出版社, 1990.

[6] Igarashi T, Hamada H. Studies on the Vibration and Sound of Defective Rolling Bearings (First Report: Vibration of Ball Bearing with One Defect)[J] . *JSME*, 1982, 25 (204) : 994~1001.