

文章编号: 1000-8055(2005)06-0944-07

齿轮箱中滚动轴承的故障诊断

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: 提出了一种基于自适应降噪技术(ANC)和共振解调技术(DRT)的齿轮箱中滚动轴承的故障诊断方法。该方法先后用同一传感器和测量系统,在同一位置采集被诊断轴承在无故障时的振动信号和在状态监测过程中的振动信号,然后把这两次拾取的信号分别作为自适应降噪系统的参考输入和主输入进行降噪处理,最后用共振解调技术对降噪后的振动信号进行包络解调,实现齿轮箱中滚动轴承的故障诊断。实际应用表明,该方法能够从齿轮箱振动信号中剔除齿轮啮合振动等背景噪声,提高滚动轴承振动信号的信噪比,可以有效地诊断齿轮箱中滚动轴承的故障。

关键词: 航空、航天推进系统; 齿轮箱; 滚动轴承; 故障诊断; 自适应降噪技术; 共振解调技术

中图分类号: V 229.2

文献标识码: A

Fault Diagnosis of Rolling Bearings in a Gearbox

WANG Ping¹, LIAO Ming-fu²

(1. China Aviation Powerplant Research Institute,
Zhuzhou, Hunan 412002, China;

2. College of Propulsion and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A method for diagnosing the rolling bearing faults in a gearbox based on Adaptive Noise Canceling (ANC) and Demodulated Resonance Technique (DRT) was presented. The signals under normal condition were detected first, and then the continuously monitored signals of the rolling bearing were collected using the same sensor and measurement system at the same location of the gearbox. ANC processing was carried out using the signals under normal condition as the reference input and the monitored signals as the main input. Finally, DRT was applied to the noise-cancelled signals in order to realize feature extraction and fault diagnosis of the rolling bearing. The experimental results show that this method not only improves the signal-to-noise ratio of the measurements, but can also effectively diagnose the incipient faults of the rolling bearing in the gearbox.

Key words: aerospace propulsion system; gearbox; rolling bearing; fault diagnosis;

Adaptive Noise Cancelling (ANC);

Demodulated Resonance Technique (DRT)

收稿日期: 2004-10-18; **修订日期:** 2005-01-07

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

齿轮箱一般包含有齿轮、滚动轴承和轴等部件。从齿轮箱轴承座上测得的振动信号, 不仅包含了滚动轴承产生的振动响应, 而且还包含了每个齿轮的啮合振动以及齿轮箱中其它振源的响应。如何将待诊断的滚动轴承故障引起的振动信号从很强的齿轮啮合振动和背景噪声中分离出来, 是齿轮箱中滚动轴承故障诊断的关键所在。

共振解调技术是诊断滚动轴承早期故障的一种方法^[1, 2]。但用共振解调技术对齿轮箱振动信号进行处理时, 由于所选择的带通滤波频带中有可能含有齿轮啮合频率的高频分量, 使得包络频谱中含有离散的轴频调制的谐波谱线, 掩盖了滚动轴承故障特征谱线, 从而引起轴承故障的误诊或漏诊。

为此, 本文提出了一种基于自适应除噪技术和共振解调技术的齿轮箱滚动轴承的故障诊断方法。该方法先用自适应除噪技术对齿轮箱振动信号进行降噪处理以剔除齿轮啮合振动等背景噪声, 再用共振解调技术对除噪后的振动信号进行包络解调, 实现齿轮箱中滚动轴承的故障诊断。

在该方法中, 自适应除噪技术的使用与文献[3]中不一样。在文献[3]中, 同时用两个传感器分别拾取两个信息, 其中一个传感器安装在被诊断轴承的轴承座上, 感受被诊断轴承的信号; 另一个传感器安装在一个离被诊断轴承较远的适当位置, 以感受背景噪声, 把这两个传感器拾取的信号分别作为自适应除噪系统的主输入和参考输入进行自适应除噪。在本文介绍的诊断方法中, 首先在轴承无故障时用一传感器拾取被诊断轴承的正常振动信号, 然后在轴承状态监测与故障诊断过程中, 用同一个传感器和测量系统, 在相同的测量位置上拾取被诊断轴承在工作过程中的振动信号, 最后把这两次拾取的信号分别作为自适应除噪系统的参考输入和主输入进行除噪。实际应用表明, 这种除噪方法效果更好。

1 振动信号及其处理

假设在齿轮箱中滚动轴承存在局部损伤故障, 啮合齿轮不存在局部损伤故障。于是, 在齿轮箱轴承座上测得的振动信号可以表示为:

$$y(t) = y_{\text{mesh}}(t) + y_{\text{bearing}}(t) + y_a(t) \quad (1)$$

其中, 信号 $y_{\text{mesh}}(t)$ 是齿轮无局部损伤故障时的啮合振动响应; $y_{\text{bearing}}(t)$ 是轴承故障冲击序列的振动响应; 而 $y_a(t)$ 则表示所有随机激励的振动响应。

在一定转速和载荷下, 齿轮啮合振动响应可表示为齿轮啮合频率 f_{mesh} 及其谐频的级数形式, 即^[4]:

$$y_{\text{mesh}}(t) = \sum_{m=0}^M X_m \{1 + a_m(t)\} \cdot \cos\{2\pi m f_{\text{mesh}} t + \Phi_m + b_m(t)\} \quad (2)$$

其中, X_m 为第 m 阶啮合频率分量幅值; Φ_m 为第 m 阶啮合频率分量的相位; f_{mesh} 为齿轮啮合频率; $a_m(t)$ 和 $b_m(t)$ 为齿轮存在一定的制造和装配误差时在运行中产生的附加幅值调制和相位调制。

根据文献[5], 轴承故障冲击序列的结构响应 $y_{\text{bearing}}(t)$ 可以表示为:

$$y_{\text{bearing}}(t) = h_b(t) * \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(t - mT) \quad (3)$$

其中, $h_b(t)$ 是滚动轴承的脉冲响应函数, $\delta(t)$ 是狄拉克函数, T 是脉冲冲击序列的周期, $*$ 表示卷积。

把所有随机干扰激励的结构响应 $y_a(t)$ 视为白噪声。

由公式(1)~(3), 得出齿轮箱振动信号的理论模型为:

$$y(t) = \sum_{m=0}^M X_m \{1 + a_m(t)\} \cdot \cos\{2\pi m f_{\text{mesh}} t + \Phi_m + b_m(t)\} + h_b(t) * \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(t - mT) + y_a(t) \quad (4)$$

如果能从式(4)所表示的齿轮箱振动信号中分离出轴承故障产生的冲击振动, 那么可以很容易对齿轮箱中的滚动轴承进行故障诊断。

自适应除噪技术(简称ANC)能够提取淹没在噪声中的有用信息, 提高信噪比^[6]。该技术已经在轴承故障诊断中得到了应用^[3]。

本文用同一传感器和测量系统, 在同一的测量位置, 采集被监测滚动轴承在无故障时的正常振动信号和状态监测过程中的振动信号, 作为ANC系统的参考输入和主输入。于是, 主输入信号即为公式(4)表示的信号, 而参考输入信号则为:

$$n(t) = \sum_{m=0}^M X_m \{1 + a_m(t)\} \cdot \cos\{2\pi m f_{\text{mesh}} t + \Phi_m + b_m(t)\} + y_a(t) \quad (5)$$

可见在参考输入信号中不含轴承故障信号。

对于式(4)表示的主输入信号和式(5)表示的参考输入信号, 经过自适应除噪处理后得到:

$$y_r = h_b(t) * \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(t - mT) + e(t) \quad (6)$$

其中, $e(t)$ 为残余噪声信号。

从公式(6)可见,在理想情况下,经过自适应除噪后得到的信号将主要是轴承故障冲击序列激起的结构响应。对于公式(6)表示的信号,可以用文献[1,2]中介绍的共振解调技术进行轴承故障的诊断。

2 诊断方法的流程

图 1 是本文提出的轴承故障诊断方法的流程图。主要步骤如下:

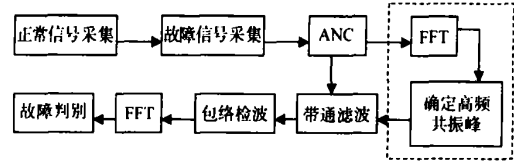


图 1 基于 ANC 和 DRT 的轴承故障诊断方法的流程图

Fig 1 The flow chart of the diagnosis method based on ANC and DRT

- (1) 采集轴承在无局部损伤故障时的正常振动信号;
- (2) 采集轴承在状态监测过程中的工作振动信号;
- (3) 把轴承工作时的振动信号作为 ANC 的主输入,无故障时的正常振动信号作为 ANC 的参考输入,进行自适应除噪处理;
- (4) 对自适应除噪后的振动信号进行 FFT 计算,根据振动信号的频谱确定高频共振峰;
- (5) 根据确定的高频共振峰,对自适应除噪后的振动信号进行带通滤波;
- (6) 对带通滤波后的信号进行包络检波,得到包络信号;
- (7) 计算包络信号的 FFT,根据包络频谱,进行故障诊断。

3 应用实例

某航空轴承需要在轴承试验器上进行持久寿命试验考核。由于试验时间很长,被试轴承转速高,在试验过程中对试验器的变速箱进行了全程的振动监测,并用上述方法对变速箱中的滚动轴承进行了故障诊断。

图 2 是对试验器的变速箱进行振动监测的简图。在变速箱的轴承座上拾取的振动加速度信号经过信号调理器处理后送入计算机进行数据采集。振动信号采样频率为 51 200 Hz,采样触发方

式为转速脉冲触发开始采集,振动加速度传感器为 YD-3,转速测量采用光电反射式测量方式。变

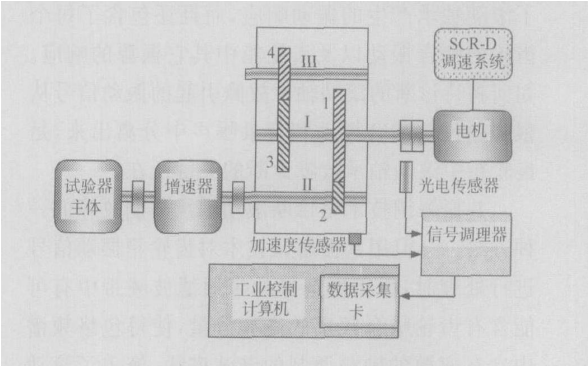


图 2 航空发动机试验器中变速箱的振动监测与诊断试验简图

Fig 2 Monitoring and diagnosis sketch of the gearbox in an aero-engine test rig

速箱中 1, 2, 3, 4 齿轮的齿数分别是 52, 26, 48, 30,滚动轴承型号为 FB8184。轴承参数如表 1 所示。

表 1 轴承参数

Table 1 The geometrical parameter of the FB8184 bearing

轴承型号	FB8184
轴径/mm	40
中径/mm	62.53
滚子直径/mm	14.28
接触角/(°)	0
滚子数	8

试验器的电机为 Z2-82 型直流电机,其功率为 40 kW,额定电流为 208 A,额定转速为 1 500 r/min,电动机的调速采用 SCR-D 可控硅调速系统。

由于试验时间很长,被试轴承转速高,在试验前对变速箱进行了拆箱检查,变速箱各个部件无故障,状态良好。

图 3 是在试验刚刚开始不久,变速箱无故障时在变速箱输出轴 II 中靠近增速器端的轴承座上测得的振动信号及其频谱。测试时,驱动电机的转速为 600 r/min,可以算出变速箱输出轴 II 的转速为 1 200 r/min。在图 3 的频谱中,可以看见变速箱的几个共振峰,以及 520 Hz 的齿轮啮合频率。

图 4 是在试验进行了 201 小时时,在变速箱输出轴 II 中靠近增速器端的滚动轴承座上测得的

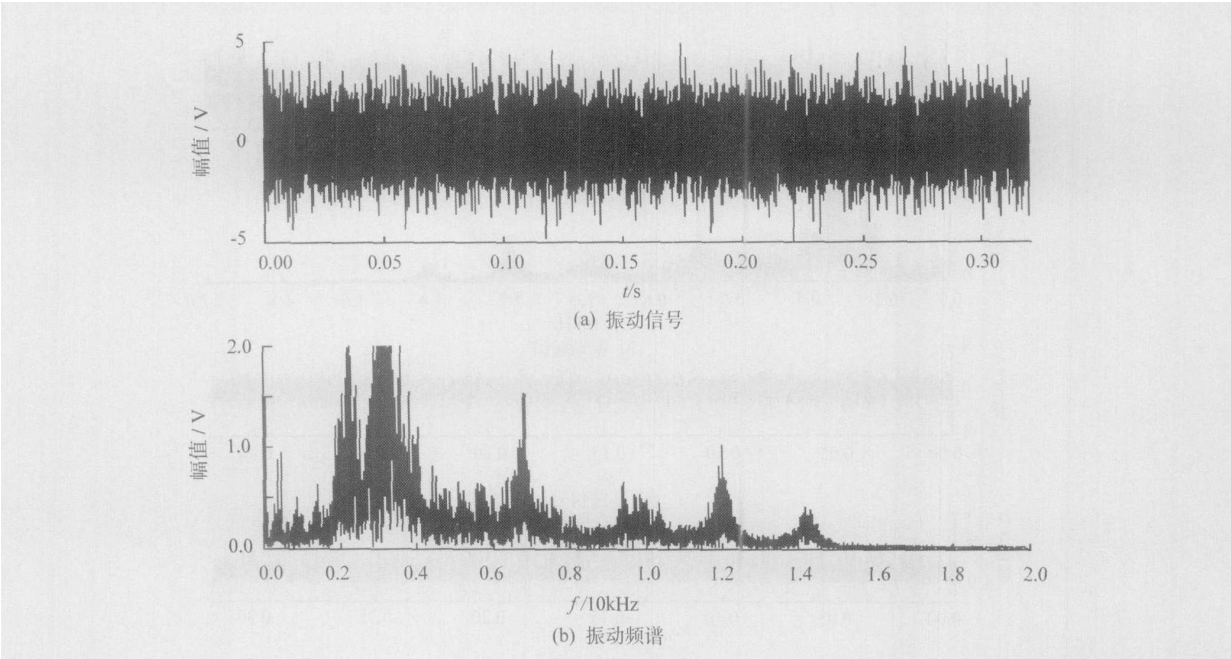


图 3 变速箱无故障时的振动信号及其频谱

Fig 3 Vibration and spectra of the gearbox without failure

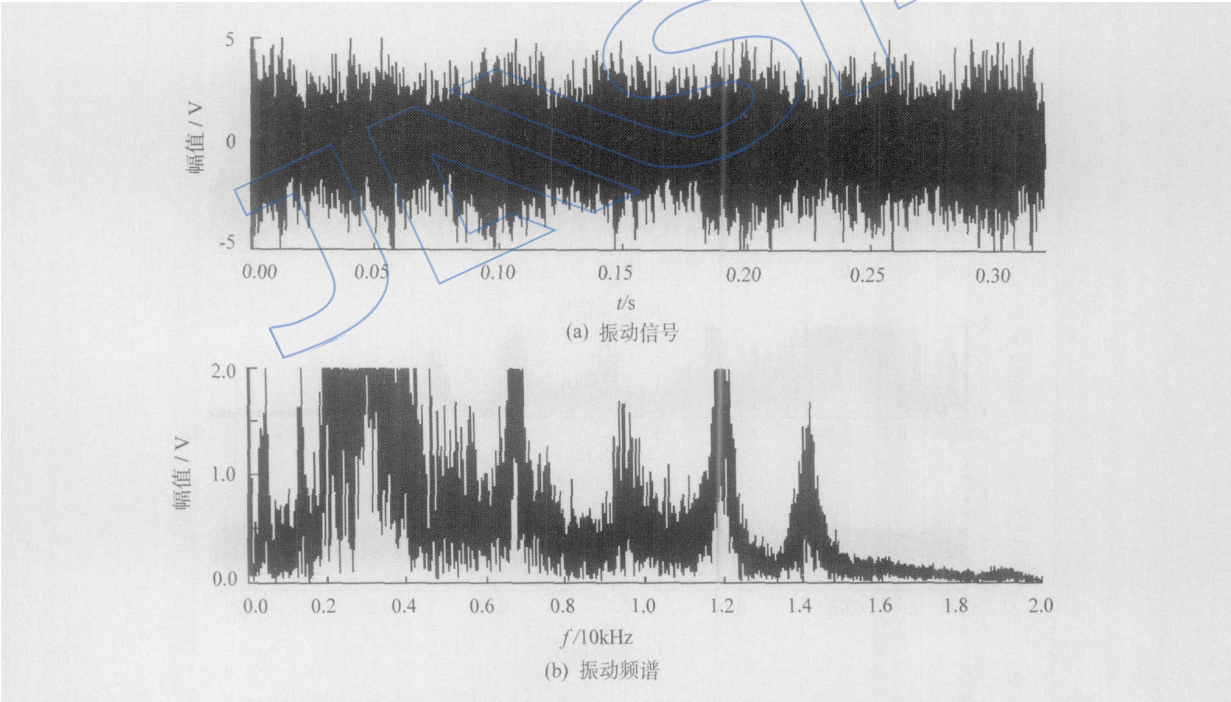


图 4 试验进行 201 小时后变速箱的振动信号及其频谱

Fig 4 Vibration and spectra of the gearbox after 201-hour-test

振动信号及其频谱。在测试时,变速箱输出轴 II 的转速亦为 1 200 r/min。图 4 中的频谱明显比图 3 中频谱的幅值大,变速箱的几个共振峰以及 520 Hz 齿轮啮合频率的幅值都增大了。但从图 4 中的频谱不能发现齿轮箱轴承故障的信息。

值得说明的是,图 3 与图 4 中的振动信号,是

同一测试系统用同一传感器在同一测量位置和同一转速下测量得到的,这对下面进行的自适应降噪将会更有利。

图 5 是对试验刚刚开始不久、变速箱无故障时的振动信号直接进行共振解调分析的结果。从图 5(e)的包络频谱中,没有发现明显的滚动轴承

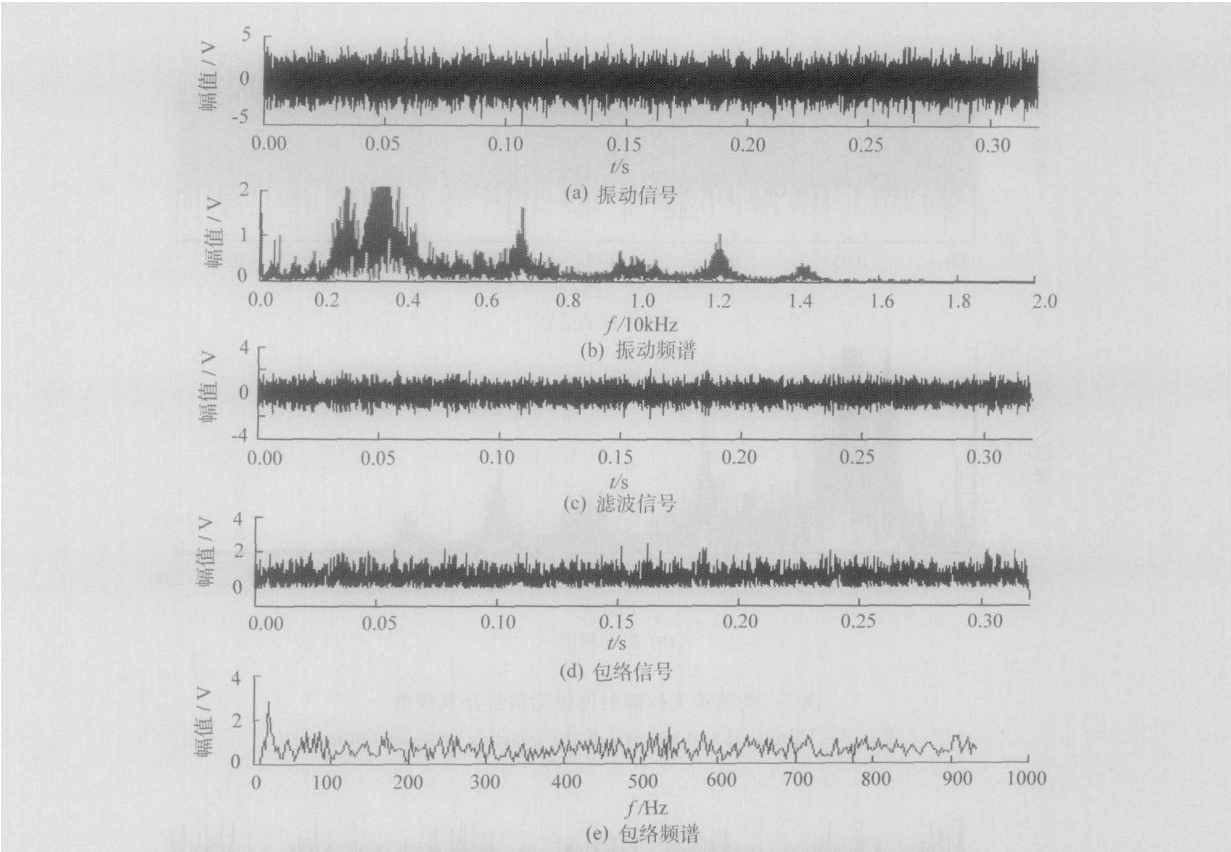


图 5 对变速箱无故障时的振动信号直接进行共振解调分析的结果

Fig 5 The results only using the DRT to analyze the vibration without failure

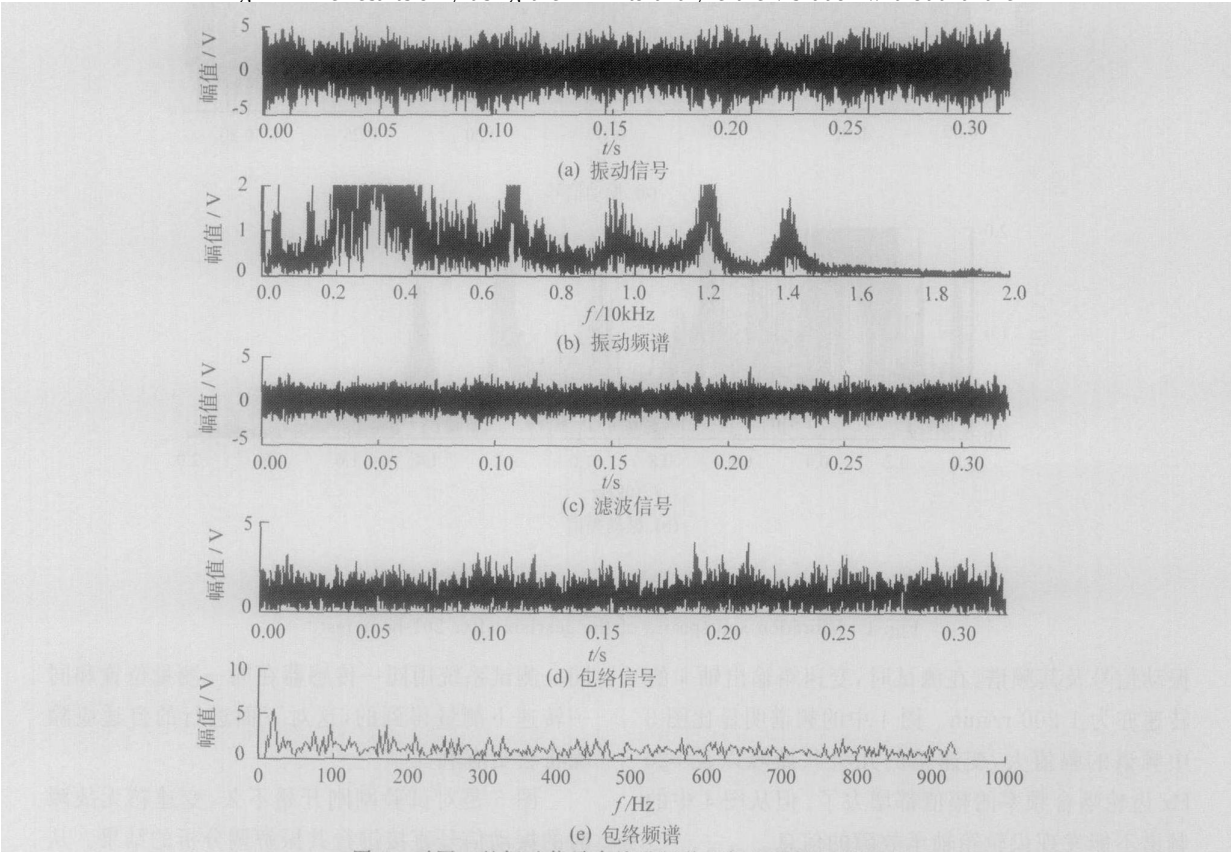


图 6 对图 4 的振动信号直接进行共振解调分析的结果

Fig 6 The results only using the DRT to analyze the vibration in Fig 4

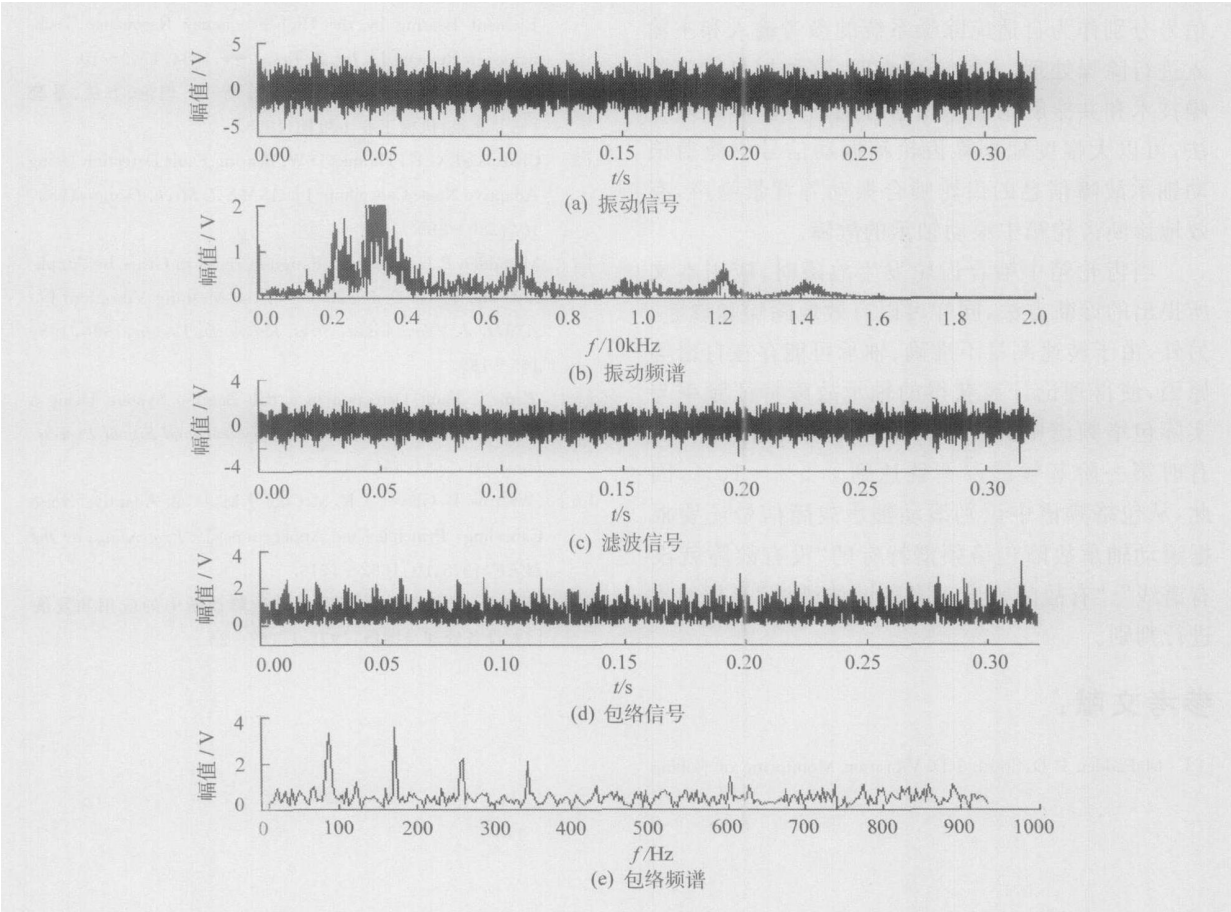


图 7 对图 4 的振动信号先进行自适应除噪再进行共振解调分析的结果

Fig 7 The results using the method based on ANC and DRT to analyze the vibration in Fig 4

故障特征谱线。

图 6 是对图 4 中的振动信号直接进行共振解调分析以诊断变速箱输出轴 II 中靠近增速器端滚动轴承故障的分析结果。根据图 6(b) 的振动频谱, 确定的带通滤波器的中心频率为 12 200 Hz。图 6(c) 为带通滤波后的信号, 图 6(d) 为包络信号。在图 6(e) 的包络频谱中, 可以发现约等于 86.47 Hz 的轴承滚动体故障频率(根据表 1 的轴承参数、轴承转速和文献[2]中的计算公式, 可以计算轴承元件故障特征频率)谱线, 但不明显且存在严重的边频调制, 调制频率为输出轴 II 的转频(= 20 Hz); 输出轴 II 的轴转频谱线十分突出。从图 6(e) 的包络频谱看出, 离散的轴频调制谐波谱线, 掩盖了轴承故障特征谱线, 对故障诊断有不良影响。

图 7 是对图 4 中的振动信号先进行自适应除噪后再进行共振解调分析的结果。图 7(a) 是图 4 中的振动信号经过自适应除噪后的振动信号。自适应除噪时, 图 4(a) 中的振动信号为 ANC 的主输入, 图 3(a) 中的振动信号为参考输入。图 7(b)

是除噪后振动信号的频谱。从图 7(b) 可以看出, 齿轮的啮合频率谱线已不存在。图 7(c) 为带通滤波后的信号, 仍然取带通滤波器的中心频率为 12 200 Hz。图 7(d)、图 7(e) 为包络信号及其频谱。在图 6(e) 的包络频谱中, 约等于 86.47 Hz 的滚动体故障特征频率及其二、三、四阶谐波频率的谱峰非常明显。

比较图 6 和图 7 的分析结果, 发现本文提出的轴承故障诊断方法提高了齿轮箱中滚动轴承振动信号的信噪比, 可以成功地对齿轮箱中滚动轴承进行故障诊断。

4 结论和讨论

提出了一种基于自适应除噪技术和共振解调技术的齿轮箱滚动轴承的故障诊断方法。该方法对传统的自适应除噪技术的使用方式进行了革新, 只用一个传感器拾取信号, 即先用传感器拾取轴承无故障时的正常振动信号, 然后用同一传感器和测量系统, 在同一位置上拾取轴承在状态监测过程中的工作振动信号, 最后把这两次拾取的

信号分别作为自适应除噪系统的参考输入和主输入进行除噪处理。实际应用表明,这种把自适应除噪技术和共振解调技术相结合的轴承故障诊断方法,可以大幅度地剔除齿轮箱振动信号中掩盖滚动轴承故障信息的齿轮啮合振动等背景噪声,有效地诊断齿轮箱中滚动轴承的故障。

当齿轮箱中啮合齿轮发生故障时,应用本文所提出的诊断方法,同样可以有效地除噪和诊断。另外,由于转速测量不准确,轴承可能存在打滑等原因,使得理论计算获得的轴承故障特征频率与实际包络频谱中的故障特征频率之间存在差异,有时第一阶基频的误差就达到了 5%~10%,因此,从包络频谱中识别滚动轴承故障信号还要根据滚动轴承故障包络频谱特有的“没有故障就没有谱线”、“有故障则出现多阶谐波谱线”等规律^[7]进行判别。

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] Chaturvedi G K, Thomas D W. Bearing Fault Detection Using Adaptive Noise Cancelling [J]. *ASME J. Mech. Design*, 1982, 104: 280~ 289

[4] McFadden P D. Detecting Fatigue Cracks in Gears by Amplitude and Phase Demodulation of the Meshing Vibration [J]. *ASME J. Vib. Acoust. Stress Reliab. In Design*, 1986, 108: 165~ 169

[5] Kim Y. Fault Detection in a Ball Bearing System Using a Moving Window [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1991, 5(6): 461~ 473

[6] Widrow B, Glover J R, McCool J M, et al Adaptive Noise Canceling: Principles and Applications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1975, 63: 1692~ 1716

[7] 唐德尧 共振解调技术在机械故障诊断中的应用和发展 [J]. *设备管理与维修*, 1991, 11: 22~ 24