

基于谱插值和奇异值差分谱的滚动轴承 静电监测信号去噪方法

张 营¹, 左洪福¹, 佟佩声¹, 陈志雄^{1,2}, 白 芳¹

(1. 南京航空航天大学 民航/飞行学院, 南京 210016;

2. 南昌航空大学 飞行器工程学院, 南昌 330063)

摘 要: 采用静电传感器进行滚动轴承故障监测实验研究. 针对滚动轴承静电监测中各种强噪声、故障特征难以提取的问题, 提出了基于谱插值和奇异值差分谱的联合去噪方法. 首先采用谱插值抑制工频干扰, 然后将所得信号构造 Hankel 矩阵, 求取奇异值差分谱并自动确定有用分量个数, 最后重构信号. 仿真和实验结果表明: 仅采用奇异值差分谱或者小波去噪方法, 无法从含有强工频干扰的信号中提取有用成分; 所提出的方法相比较谱插值和小波去噪方法能够凸显早期故障特征频率.

关 键 词: 滚动轴承; 静电监测; 谱插值; 工频干扰; 奇异值差分谱

中图分类号: V23; TH133.3

文献标志码: A

Denoising method for electrostatic monitoring signal of roller bearing based on spectrum interpolation and difference spectrum of singular value

ZHANG Ying¹, ZUO Hong-fu¹, TONG Pei-sheng¹,
CHEN Zhi-xiong^{1,2}, BAI Fang¹

(1. College of Civil Aviation,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Aircraft Engineering,

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Electrostatic sensor was implemented in roller bearing experiment investigation to monitor defects. In consideration of various strong noises involved in the electrostatic monitoring of roller bearings and the difficulty to obtain defect characteristics, a united denoising method was put forward based on spectrum interpolation and difference spectrum of singular value. Firstly, the spectrum interpolation was used to eliminate the power line interference; then the resultant signal was used to construct Hankel matrix; the number of useful components was automatically selected based on the difference spectrum of singular value, and finally the signal was reconstructed. Simulation and practical experiments show that the useful components of the signals involving high power line interference cannot be extracted by performing difference spectrum of singular value method or the wavelet denoising method; the presented denoising method can highlight the defect characteristic frequency in early stage more effectively than the spectrum interpolation and wavelet denoising method.

收稿日期: 2013-05-19

基金项目: 国家自然科学基金与中国民航联合基金重点项目(60939003); 国家自然科学基金与中国民航联合基金(61179058)

作者简介: 张营(1985—), 男, 江苏泰兴人, 博士生, 主要从事机械设备状态监测及寿命预测研究.

Key words: roller bearing; electrostatic monitoring; spectrum interpolation; power line interference; difference spectrum of singular value

滚动轴承作为旋转机械关键部件,其运行状态往往直接影响到整台设备的精度、可靠性及寿命^[1].由于滚动轴承的寿命离散性很大,定时维修会造成“过度维修”或者“维修不足”,因此,对滚动轴承进行状态监测具有重要意义.

随着科技发展,大量行之有效的技术被应用于滚动轴承的状态监测,主要有振动监测、声发射技术、温度测量、磨损颗粒分析等,其中振动监测应用最为广泛,多种时频域信号分析方法有效提高了振动监测的故障识别能力^[2-4].目前,一种基于静电感应的监测技术以其高灵敏性为滚动轴承的状态监测提供了一种新的方法,文献[5-8]的研究结果表明静电监测能够早于振动监测发现故障征兆.

噪声干扰的存在影响了静电监测技术的早期故障识别能力,静电感应信号的噪声干扰来源于多个方面,主要包括工频干扰、白噪声和随机脉冲.抑制工频干扰的研究集中在肌电信号测量领域,最常用的是数字陷波器^[9],但是其在去除工频干扰成分的同时也极大削弱了附近频段的有用成分.较为复杂的自适应滤波^[10]、小波变换^[11]和独立分量方法^[12-13]也被用于工频干扰的消除,但是以上复杂算法均大幅增加了计算量.谱插值计算简单,能够较好地实现工频及其谐波分量抑制^[14].奇异值分解(singular value decomposition, SVD)方法简单,与小波分析相比具有更小的相移,近年来被广泛应用于振动信号降噪^[15]、飞行数据降噪^[16]、电磁信号降噪^[17]等领域,其对白噪声以及随机脉冲均有良好的抑制作用,但是有效奇异值个数的选取往往不能自动完成,需借助研究人员的经验,文献[18]提出了奇异值差分谱理论以实现奇异值个数的自动选取,并成功应用于车床主轴箱故障诊断中.

静电感应信号的噪声干扰类型多样,很难采取单一方法抑制噪声,为此本文提出一种基于谱插值和奇异值差分谱的联合去噪方法用于滚动轴承(以下简称轴承)故障诊断,通过仿真和实验验证了本文所提方法的有效性和实用性.

1 谱插值

插值法是函数逼近的一种重要方法,利用函数在某区间若干点的函数值拟合出适当的给定函

数,进而近似估算出其他点的函数值.常用插值方法有线性插值、Lagrange插值、Newton插值和样条插值等.谱插值则是信号进行离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)后,对其频谱进行插值以消除工频及其相关谐波成分.为获得最佳工频干扰去除效果,其幅值和相位均需完成插值工作,最后运用逆变换得到时域信号.

考虑计算复杂度和工频干扰去除效果,本文采用线性插值法进行工频及其谐波成分处的插值工作.如下所示:

$$f(x) = \frac{b-x}{b-a}f(a) + \frac{x-a}{b-a}f(b) \quad (1)$$

其中 $a < x < b$, $f(a)$ 和 $f(b)$ 是 $x=a$ 和 $x=b$ 时的已知数据点, $f(x)$ 是插值函数.为使谱插值算法具有鲁棒性,本文选取 48~52 Hz 区间内用插值替换,其原因是工频的准确频率近似在 50 Hz.

2 奇异值差分谱

首先对离散数字信号 $\mathbf{Y} = [y(1), y(2), y(3), \dots, y(N)]$ 构造 Hankel 矩阵如下:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \cdots & y(n) \\ y(2) & y(3) & \cdots & y(n+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-n+1) & y(N-n+2) & \cdots & y(N) \end{bmatrix}$$

式中 $1 < n < N$, 令 $m = N - n + 1$, 则 $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^{m \times n}$.

然后将此矩阵进行奇异值分解,对于含噪信号来说,其有用分量的奇异值明显大于噪声的奇异值,因此可以选取前几个最大的奇异值进行重构即可获得降噪后信号.为完成有效奇异值个数的自动选取,文献[18]定义了奇异值差分谱

$$b_i = \sigma_i - \sigma_{i+1} \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, q-1$$

其中 $q = \min(m, n)$, $\sigma_i (i = 1, 2, \dots, q)$ 为 Hankel 矩阵的奇异值.奇异值差分谱的最大值 $b_k = \max(b_i)$ 描述了奇异值的最大突变信息, k 代表了有用分量与噪声分界点,选取前 k 个奇异值重构信号即可完成去噪.矩阵的行列数的确定对去噪结果也有影响,一般当信号长度 N 为奇数时, Hankel 矩阵行列数 $m = n = (1 + N)/2$, 当 N 为偶数时, Hankel 矩阵行数 $m = N/2 + 1$, 列数 $n = N/2$, 即可实现最大噪声去除^[18].

3 基于谱插值和奇异值差分谱的联合去噪方法

本文所提基于谱插值和奇异值差分谱的联合去噪方法流程如图1所示,其具体步骤如下:

- 1) 对原始静电信号进行谱插值以消除 50 Hz 工频干扰影响.
- 2) 构造 Hankel 矩阵.
- 3) 对 Hankel 矩阵进行奇异值分解.
- 4) 求取奇异值差分谱,根据差分谱最大值位置确定重构信号的奇异值个数.
- 5) 重构信号.

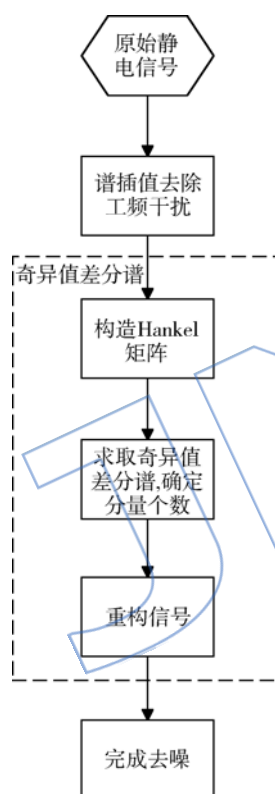


图1 联合去噪方法流程

Fig. 1 Flowchart of united denoising method

4 仿真

下面通过含噪信号来验证. 含噪信号如下:

$$x_1(t) = \frac{1}{2} \sin(20\pi t) + \frac{1}{2} \sin(40\pi t)$$

$$x_2(t) = \sin(100\pi t)$$

$$f(t) = x_1(t) + 3x_2(t) + n(t) + i(t)$$

式中 $x_1(t)$ 为原始信号波形, $x_2(t)$ 为频率为 50 Hz 正弦波, $n(t)$ 为白噪声, $i(t)$ 为幅值为 10 的随机脉冲, 分别发生在 0.1, 0.4, 0.8 s, 采样频率为

1024 Hz. 原始信号和含噪信号如图2所示(A为电压信号幅值).

若直接对含噪信号进行奇异值差分谱去噪, Hankel 矩阵行数和列数分别为 513 和 512, 从图3(a)中可以看到奇异值差分谱最大峰值出现在第2个位置, 取前2个奇异值进行信号重构, 结果如图3(b)所示, 由于 50 Hz 信号分量能量所占比例大, 去噪后信号只保留了 50 Hz 频率成分, 而有用信号 $x_1(t)$ 被错误滤除.

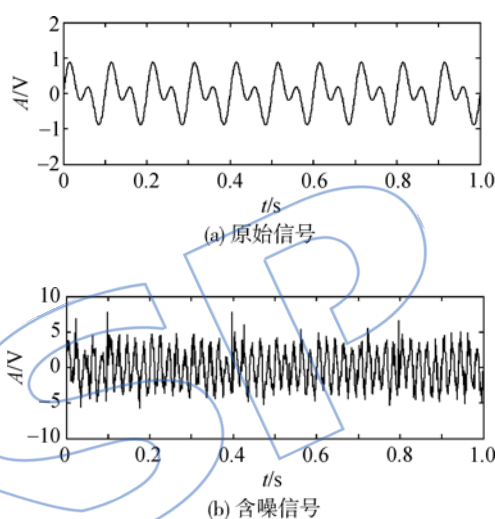


图2 原始信号和含噪信号波形图

Fig. 2 Waveform of original signal and noisy signal

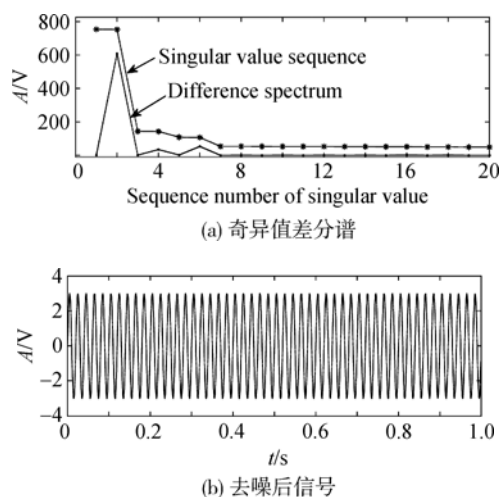


图3 奇异值差分谱信号去噪

Fig. 3 Signal denoising using difference spectrum of singular value

采用本文所提方法进行去噪, 首先运用谱插值削弱 50 Hz 工频干扰成分, 结果如图4(a)所示, 然后构造 Hankel 矩阵(行数和列数分别为 513 和 512), 进行奇异值分解并求取差分谱, 从图4

(b)中可以看到差分谱最大的峰值出现在第4个位置,取前4个奇异值进行信号重构,结果如图4(c)所示,其中虚线是原始信号,去噪结果良好且基本没有发生相移。为说明根据奇异值差分谱选取重构奇异值个数的有效性,分别取前2个和前6个奇异值进行重构,结果如图5所示,当所选奇异值个数偏少时,部分有用信息被错误滤除,当所选奇异值个数偏多时,信号中仍含有部分噪声。

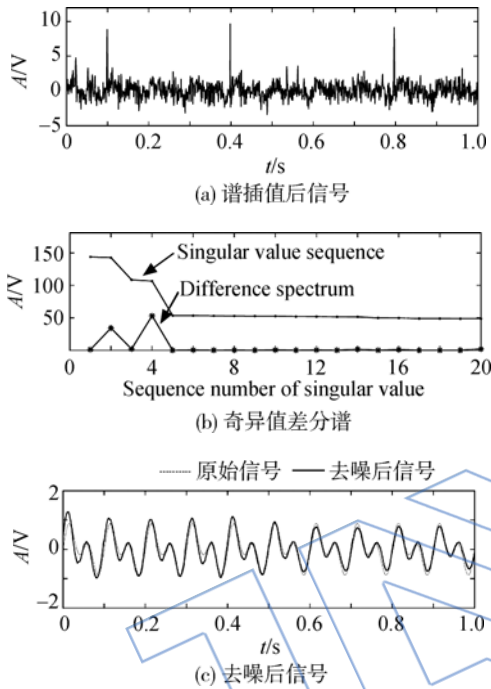


图4 谱插值和奇异值差分谱信号去噪

Fig. 4 Signal denoising using spectrum interpolation and difference spectrum of singular value

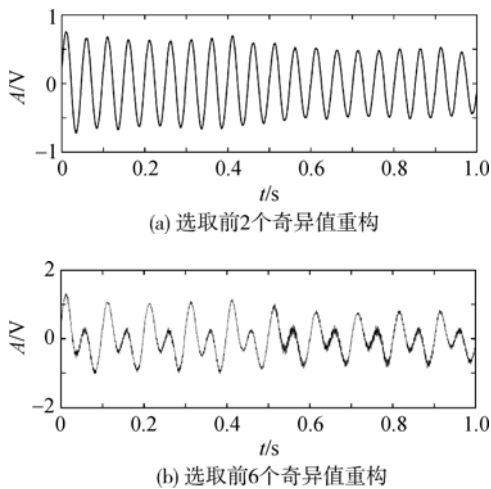


图5 选用不同奇异值个数重构信号波形图

Fig. 5 Signal waveform reconstructed by different number of singular value

5 实验

5.1 实验装置和方法

为验证本文所提去噪方法的工程适用性,在ABLT-1A实验机进行了轴承加速疲劳寿命实验,静电传感器结构如图6所示,静电传感器主要包括感应面、绝缘体、接地外壳、微型接触器几个部分,实验装置、静电传感器安装位置和信号采集系统如图7和图8所示。实验轴承型号为6207,实验径向载荷为20 kN,转速为3000 r/min,采样频率为10 kHz,每隔1 min存储一段长4096点的数据。

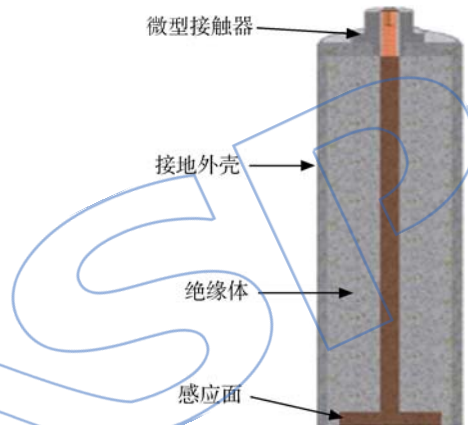


图6 静电传感器结构

Fig. 6 Structure of electrostatic sensor



图7 实验装置

Fig. 7 Test rig

轴承外圈、内圈、滚动体等故障特征频率计算与振动监测方法类似文献[7-8],公式如下:

外圈

$$f_o = \frac{1}{2} z f_n \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (3)$$

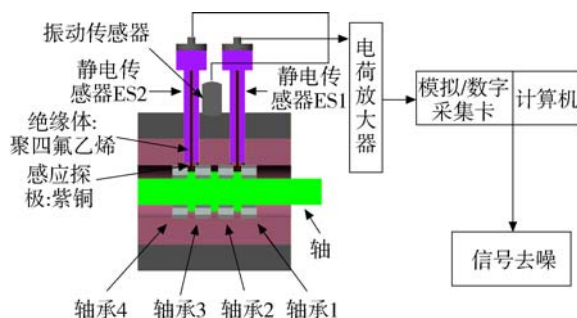


图 8 静电传感器安装位置和信号采集系统示意图

Fig. 8 Schematic of mounting position of electrostatic sensors and signal acquisition systems

内圈

$$f_i = \frac{1}{2} z f_n \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (4)$$

滚动体

$$f_b = \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2 \alpha \right) \frac{D}{d} f_n \quad (5)$$

式中 d 为滚动体直径, D 为轴承滚道(保持架)的直径, α 为接触角, z 为滚动体个数, f_n 为轴旋转频率。

轴承参数如表 1 所示, 根据式(3)~式(5)计算得到轴承各个元件故障特征频率如表 2 所示。

表 1 轴承参数

Table 1 Bearing parameters

D/mm	d/mm	z	$\alpha/(\circ)$
53.5	11.1125	9	0

表 2 轴承故障特征频率(单位:Hz)

Table 2 Bearing fault characteristic frequencies (unit:Hz)

f_i	f_o	f_b
271.8	178.2	230.4

5.2 实验结果分析

从采集开始到出现报警停机, 共采集了 4100 组数据, 轴承 1 外圈出现明显损伤, 如图 9 所示。图 10(a) 中是轴承最后失效时刻的波形图, 对其进行频谱分析, 从图 10(b) 可以很明显地看到外圈故障频率成分, 与实验结果一致。但是, 从轴承失效前 8 h 左右的波形及频谱来看, 如图 11(a) 和图 11(b), 50 Hz 工频干扰明显, 故障特征频率几乎淹没在噪声中, 据此难以做出正确的诊断。采用本文的联合去噪方法, 从图 12 可以明显看到轴承外圈故障特征频率为 178.2 Hz, 验证了本文所提



图 9 失效轴承

Fig. 9 Failure bearing

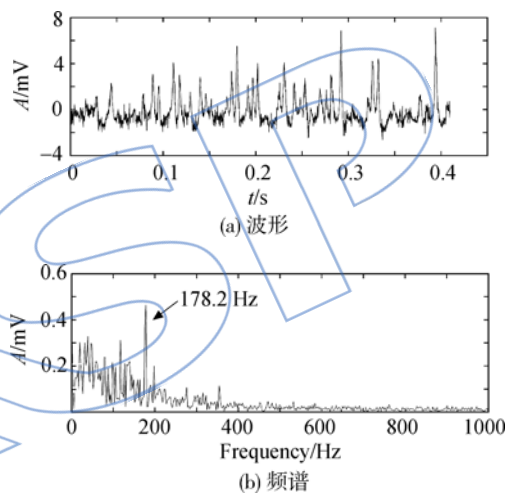


图 10 轴承最后失效时刻的原始信号

Fig. 10 Original signal of bearing with complete failure

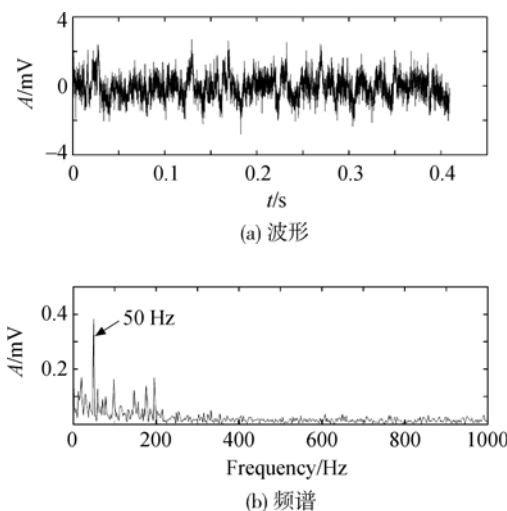


图 11 轴承早期故障的原始信号

Fig. 11 Original signal of bearing with early stage defect

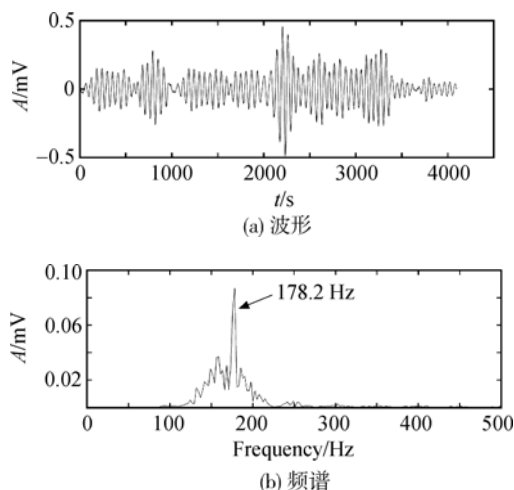


图12 轴承早期故障的去噪信号
Fig. 12 Denoising signal of bearing with early stage defect

方法的正确性和有效性。

为说明本文所提方法的优势,以早期故障的轴承原始信号为例,若直接进行奇异值差分谱去噪,其结果如图13所示,仅保留了50 Hz工频干扰,说明了采用奇异值差分谱去噪前进行工频干扰去除步骤尤其重要,将本文方法与小波去噪进行对比,采用MATLAB工具箱“wden”函数实现小波去噪,小波基为“sym8”,软阈值函数为“sure”,分解层数为5。若直接采用小波去噪,其结果如图14所示,同样仅保留50 Hz工频干扰,采用谱插值和小波去噪,其结果如图15所示,能够发现178.2 Hz的外圈故障频率,但是与本文方法去噪结果(图12)相比,可以发现本文方法能够更好地凸显故障特征频率,去噪效果更优。

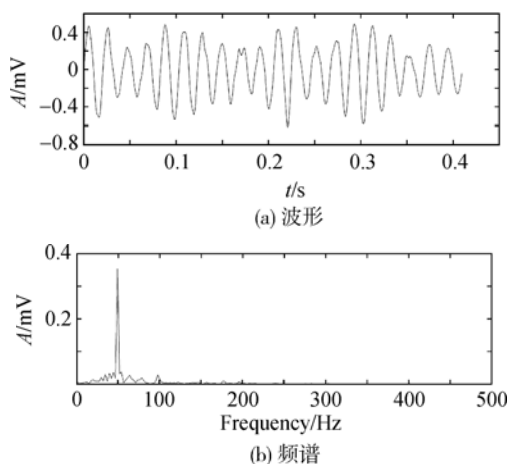


图13 轴承早期故障的奇异值差分谱去噪信号
Fig. 13 Denoising signal of bearing with early stage defect by difference spectrum of singular value

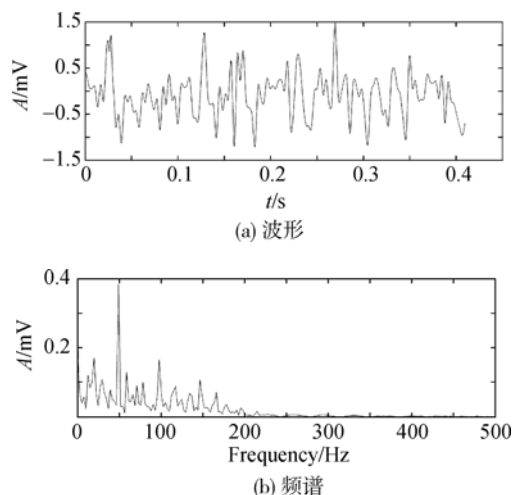


图14 轴承早期故障的小波去噪信号
Fig. 14 Denoising signal of bearing with early stage defect by wavelet denoising method

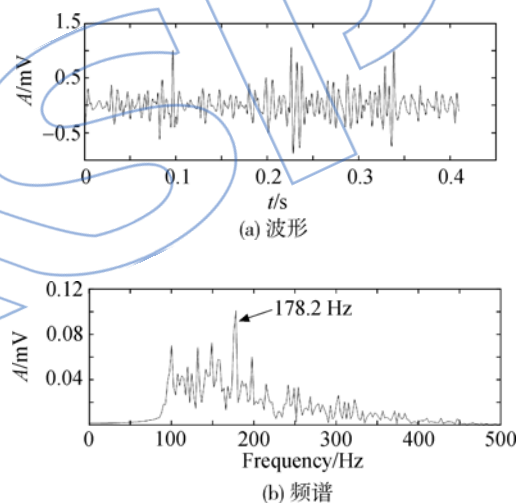


图15 轴承早期故障的谱插值和小波去噪信号
Fig. 15 Denoising signal of bearing with early stage defect by spectrum interpolation and wavelet denoising method

6 结 论

将静电监测技术应用于轴承状态监测,为消除噪声干扰影响,提高静电监测技术早期故障识别能力,本文根据静电信号特点提出了基于谱插值和奇异值差分谱的联合去噪方法,通过仿真和实验验证了所提方法的有效性和实用性。本文研究工作对于促进轴承静电监测技术的发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 梅宏斌. 滚动轴承振动监测与诊断[M]. 北京:机械工业出

- 版社,1996.
- [2] Choy F K, Zhou J, Braun M J, et al. Vibration monitoring and damage quantification of faulty ball bearings[J]. *Journal of Tribology*, 2005, 127(4): 776-783.
- [3] Orhan S, Akturk N, Celik V. Vibration monitoring for defect diagnosis of rolling element bearings as a predictive maintenance tool: comprehensive case studies[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation International*, 2006, 39(4): 293-298.
- [4] 杨宇, 王欢欢, 程军圣, 等. 基于 LMD 的包络谱特征值在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(5): 1153-1158.
- YANG Yu, WANG Huanhuan, CHENG Junsheng, et al. Application of envelope spectrum characteristics based on LMD to roller bearing fault diagnosis[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(5): 1153-1158. (in Chinese)
- [5] Craig M, Harvey T J, Wood R J K, et al. Advanced condition monitoring of tapered roller bearings: Part 1[J]. *Tribology International*, 2009, 42(11): 1846-1856.
- [6] Harvey T J, Wood R J K, Powrie H G. Electrostatic wear monitoring of rolling element bearings[J]. *Wear*, 2007, 263(7): 1492-1501.
- [7] Chen S L, Craig M, Callan R, et al. Use of artificial intelligence methods for advanced bearing health diagnostics and prognostics[R]. *Big Sky: the IEEE Aerospace Conference*, 2008.
- [8] Chen S L, Wood R J K, Wang L, et al. Wear detection of rolling element bearings using multiple-sensing technologies and mixture model-based clustering method[J]. *Journal of Risk and Reliability*, 2008, 222(2): 207-218.
- [9] Kephart J O, Sorkin G B. Fighting computer viruses[J]. *Scientific American*, 1997, 277(5): 56-61.
- [10] 王淑艳, 董健, 关欣. 基于自适应陷波技术的心电图工频干扰抑制研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2008, 15(3): 1044-1047.
- WANG Shuyan, DONG Jian, GUAN Xin. Research of adaptive notch filter based on QRD-LS algorithm for power line interference in ECG[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2008, 15(3): 1044-1047. (in Chinese)
- [11] Sahambi J S, Tandon S N, Bhatt R K P. Quantitative analysis of errors due to power-line interference and base-line drift in detection of onsets and offsets in ECG using wavelets[J]. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 1997, 35(6): 747-751.
- [12] Vigário R, Särelä J, Jousmäki V, et al. Independent component approach to the analysis of EEG and MEG recordings[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2000, 47(5): 589-593.
- [13] 文振华, 左洪福. 基于独立分量分析的航空发动机气路静电信号处理方法[J]. *机械科学与技术*, 2011, 30(11): 1872-1876.
- WEN Zhenhua, ZUO Hongfu. Electrostatic monitoring signal processing method for aero-engines gas path based on ICA[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2011, 30(11): 1872-1876. (in Chinese)
- [14] Mewett D T, Reynolds K J, Nazeran H. Reducing power line interference in digitised electromyogram recordings by spectrum interpolation[J]. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 2004, 42(4): 524-531.
- [15] Shin K, Feraday S A, Harris C J, et al. Optimal autoregressive modelling of a measured noisy deterministic signal using singular value decomposition[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2003, 17(2): 423-432.
- [16] 雷达, 钟诗胜. 基于奇异值分解和经验模态分解的航空发动机健康信号降噪方法[J]. *吉林大学学报*, 2012, 43(8): 764-770.
- LEI Da, ZHONG Shisheng. Aircraft engine health signal denoising based on SVD and EMD[J]. *Journal of Jilin University*, 2012, 43(8): 764-770. (in Chinese)
- [17] Jha S K, Yadava R D S. Denoising by singular value decomposition and its application to electronic nose data processing[J]. *Sensors Journal*, 2011, 11(1): 35-44.
- [18] 赵学智, 叶邦彦, 陈统坚. 奇异值差分谱理论及其在车床主轴箱故障诊断中的应用[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(1): 100-108.
- ZHAO Xuezhi, YE Bangyan, CHEN Tongjian. Difference spectrum theory of singular value and its application to the fault diagnosis of headstock of lathe[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(1): 100-108. (in Chinese)