

基于 Gabor 变换的自适应降噪方法

申永军, 张光明, 祁玉玲, 王琳

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:简要介绍了 Gabor 变换的基本思想,提出了一种新的基于 Gabor 变换的自适应信号降噪方法。分析了该方法的降噪特性,同时比较了小波降噪和该方法的降噪效果。将该方法用于齿轮箱的故障诊断,结果表明,该方法能够有效识别齿轮箱中的齿轮典型故障。

关键词:Gabor 变换;故障诊断;降噪

中图分类号:TH17;TN911 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2010)02-0069-05

0 引言

在实际环境中,机械设备的振动信号极易受到干扰,当这种干扰较大时可能会造成诊断误差,如何消除附加噪声干扰或者减小某类噪声的影响在很大程度上决定了齿轮箱故障诊断的成败。目前常用的信号降噪技术主要有:奇异值分解,盲信号分离,经验模式分解等^[1-4]。这些方法均存在一些缺陷,如奇异值分解需要奇异值分布空间选取部分信号分量进行重构,实质是对变换后的信号进行滤波处理,而滤波器的形式带有一定的主观性;盲信号分离则需要预知源信号的数目并且难以处理卷积混合、非线性混合等问题,而经验模式分解的边际效应则尚未彻底解决。

文献[5]提出了一种利用含噪信号的小波域相关性构造小波滤波器的方法,可以得到比传统小波变换更好的降噪效果。本文借鉴这种思想,设计了一种基于 Gabor 变换的新型滤波器,该方法由信号自身产生滤波器。为了揭示本文方法的优越性,通过仿真信号与实测信号验证了本文方法的有效性。

1 Gabor 变换原理^[6]

Gabor 变换是 Gabor 在 1946 年提出,它是通过信号的时间平移和频率调制形式建立非平稳信号的联合时间-频率函数,然后对时间-频率平面进行采样划分,将时频平面 (t, f) 转换成另外两个离散采样网格参数 m 和 n 的平面,在二维平面 (m, n) 上表征非平稳信号。

信号 $s(t)$ 的连续 Gabor 变换定义为

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{mn} g_{mn}(t) \quad (1)$$

式中, a_{mn} 称为 Gabor 展开系数,而

$$g_{mn}(t) = g(t - mT) e^{jn\Omega}, m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

称为 Gabor 基函数,需要满足 $\int |g_{mn}(t)|^2 dt = 1, \Omega = 2\pi/T, T$ 为时宽。Gabor 展开系数可以表示为

$$a_{mn} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \gamma_{mn}^*(t) dt \quad (3)$$

式中, $\gamma_{mn}^*(t)$ 是 $\gamma_{mn}(t)$ 的共轭,且 $\gamma_{mn}(t)$ 是 Gabor 基函数 $g_{mn}(t)$ 的对偶函数,满足双正交条件:

$$\int g_{mn}(t) \gamma_{mn}^*(t - mT) e^{-jn\Omega} dt = \delta(m) \delta(n)。$$

收稿日期:2010-04-22

作者简介:申永军,男,1973 年出生,博士,教授。研究方向为车辆动力学与控制。获国家科技进步二等奖 1 项,河北省科技进步一等奖 2 项,河北省青年科技奖 1 项。发表论文 50 多篇,其中 20 多篇被 SCI、EI、ISTP 收录。

基金项目:国家自然科学基金项目(10602038);教育部科学技术研究重点项目(209013)

令离散时间的周期信号 $s(k)$ 的周期为 L , 即 $s(k) = s(k + L)$, 则其离散 Gabor 变换表示为

$$s(k) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} a_{mn} g(k - mT) e^{jn\Omega k} \quad (4)$$

其中 Gabor 展开系数由下式确定

$$a_{mn} = \sum_{k=0}^{L-1} s(k) \gamma^*(k - mT) e^{-jn\Omega k} \quad (5)$$

式中, T 和 Ω 分别表示时间和频率采样间隔, 而 M 和 N 分别是时间和频率采样的样本个数, 其中时间和频率采样间隔应该满足 $MT = N\Omega = L$ 。

2 基于 Gabor 变换的滤波器

借鉴文献[5]的思想, 构造一种基于 Gabor 变换的新型滤波器。假设存在 L 组等长度信号 $z_j(t)$, 它由以下两部分构成

$$z_j(t) = y(t) + w_j(t), j = 1, 2, \dots, L \quad (6)$$

式中, $y(t)$ 是待检测的有用信号; $w_j(t)$ 为噪声, 采集 $z_j(t)$ 时应保证每一组信号中 $y(t)$ 相位相同。该滤波器的建立过程如下:

(1) 首先对 $z_j(t)$ 进行 Gabor 变换, 并令 Z_{rj}, Z_{ij} 表示展开系数 a_{mn}^j 的实部与虚部

$$Z_{rj} = \text{real}(\text{dgt}(z_j(t))), Z_{ij} = \text{imag}(\text{dgt}(z_j(t))) \quad (7)$$

(2) 构造滤波器如下

$$H_1 = \frac{\sum_{j=1}^L \sum_{k \neq j}^L (Z_{rj} \cdot Z_{rk})}{(L-1) \sum_{j=1}^L (Z_{rj} \cdot Z_{rj})}, H_2 = \frac{\sum_{j=1}^L \sum_{k \neq j}^L (Z_{ij} \cdot Z_{ik})}{(L-1) \sum_{j=1}^L (Z_{ij} \cdot Z_{ij})} \quad (8)$$

将上式中分子展开后得到

$$\sum_{j=1}^L \sum_{k \neq j}^L (Z_{rj} \cdot Z_{rk}) = \sum_{j=1}^L \sum_{k \neq j}^L \{Y_r \cdot Y_r + Y_r \cdot W_{rj} + W_{rj} \cdot Y_r + W_{rj} \cdot W_{rj}\} \quad (9a)$$

$$\sum_{j=1}^L \sum_{k \neq j}^L (Z_{ij} \cdot Z_{ik}) = \sum_{j=1}^L \sum_{k \neq j}^L \{Y_i \cdot Y_i + Y_i \cdot W_{ij} + W_{ij} \cdot Y_i + W_{ij} \cdot W_{ij}\} \quad (9b)$$

式中, dgt 为 Gabor 变换算子; $Y_r = \text{real}(\text{dgt}(y(t)))$; $W_{rj} = \text{real}(\text{dgt}(w_j(t)))$; $Y_i = \text{imag}(\text{dgt}(y(t)))$; $W_{ij} = \text{imag}(\text{dgt}(w_j(t)))$ 。

式(9)中的后面三部分当 L 趋近于无穷大时将会趋近于 0, 而只保留下与 $y(t)$ 有关的部分。这样就得到了两个在 Gabor 变换域能够略去绝大部分噪声而保留下有用信号的新的滤波器。最后, 从 $z_j(t)$ 中任选一个信号进行 Gabor 变换, 展开系数 a_{mn} 的实部、虚部分别与滤波器 H_1, H_2 相乘, 对所得结果按式(4)进行逆变换, 便得到去处掉绝大部分噪声的有用信号。一般情况下, L 越大则滤波效果越好, 后面的算例表明 L 达到 100 左右即可得到满意的滤波效果。

从以上过程中可以看出, 其中存在着一个问题需要解决, 就是如何得到 L 组等长度信号 $z_j(t)$ 且保证 $y(t)$ 同相。对于实测信号而言, 可以通过对信号采集过程的了解解决, 例如在旋转机械的平稳转动过程中采集足够长的信号, 然后进行按照周期进行等长度分割; 对于非平稳信号可以通过多次重复测量得到所需信号 $z_j(t)$ 。

3 数值算例

下面通过数值算例来验证本文方法的有效性, 同时对所用信号进行小波滤波以进行比较, 采用的小波函数为 haar。选取信号 $z(t) = 1.5 \sum_{n=1}^4 \sin(2\pi 100nt) + \sin(2\pi 500t) + kN(t)$, 其中的周期信号为前述的有用信号 $y(t)$, $N(t)$ 为零均值和单位方差的白噪声, k 为表征噪声强度的常数, 采样长度为 10 s, 采样频率为 10 kHz。

将 $z(t)$ 等分为 100 段这样得到 $z_j(t)$, 然后对 $z_j(t)$ 进行 Gabor 变换, 根据式(9)构造滤波器 H_1 、 H_2 。应用本文提出的新的降噪方法对不同 k 值下的采集信号进行降噪, 同时和原信号、小波降噪信号进行对比, 得到结果如图 1 ~ 图 7 所示。其中图 1 为原信号(符号“◇”)、小波降噪信号(符号“□”)和本文方法降噪(符号“○”)信号在不同噪声强度下的信噪比, 图 3、图 4 和图 5 为 $k = 2$ 时含噪信号、小波降噪结果和本文降噪结果的对比图, 图 6、图 7 和图 8 为 $k = 10$ 时小波降噪结果和本文降噪结果的对比图。

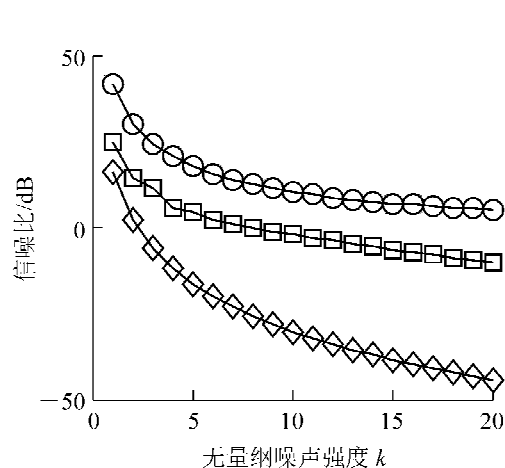


图1 三种信号的信噪比

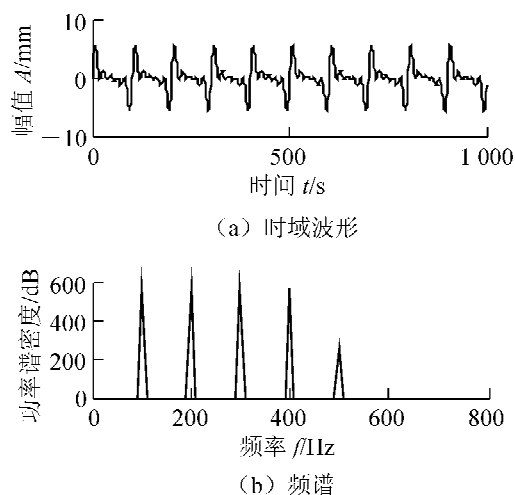
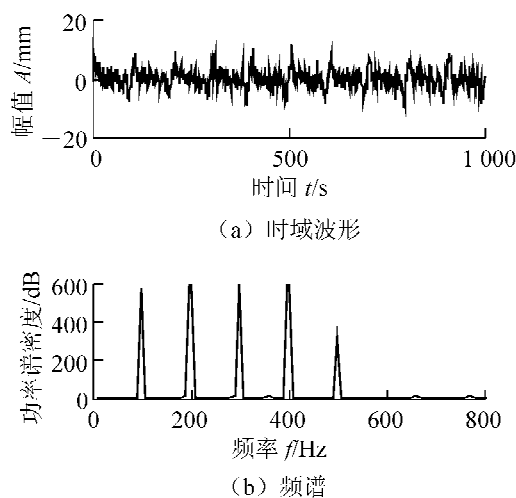
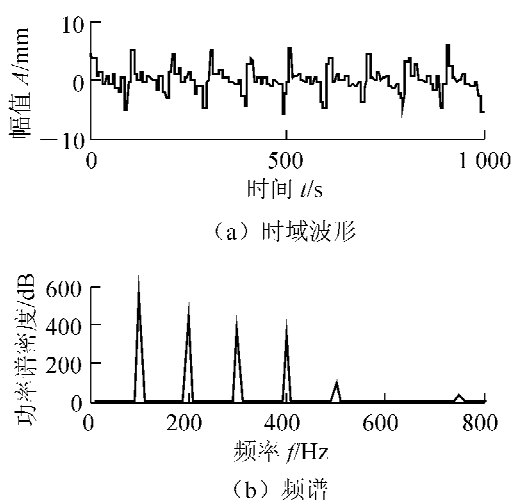


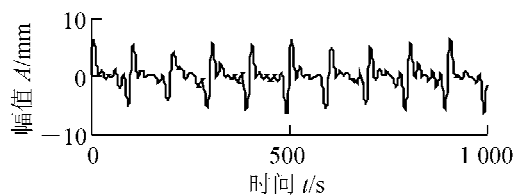
图2 无噪声情况下信号的时域波形与频谱

图3 $k=2$ 时含噪信号的时域波形与频谱图4 $k=2$ 时小波降噪后信号的时域波形与频谱

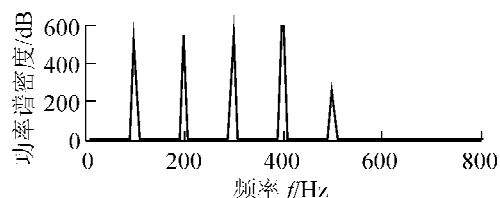
由此例子可见, 当噪声比较弱时, 利用本文方法降噪可以得到光滑的时域信号图, 与无噪声信号的波形几乎完全一样。而小波降噪虽然可以清楚地看出信号的全部频率信息, 但是在时域波形上存在着较多毛刺。当噪声非常强时, 利用本文方法仍然能够较为清晰地观测到仿真信号的频域信息, 而小波降噪后信号与原含噪信号的时域波形、频域信息几乎没有相同部分。因此, 本文方法相比于传统的小波降噪具有明显的优越性, 降噪效果更好。

4 实验信号分析

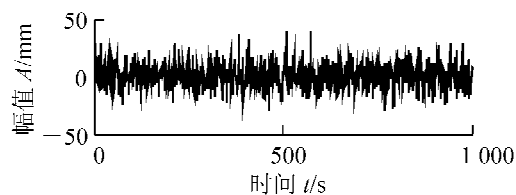
为进一步说明本文方法的实用性, 利用该方法对实测齿轮故障信号进行分析。本实验应用江苏千鹏诊断工程有限公司的 QPZZ-II 旋转机械振动及故障模拟试验平台。本试验数据的主要参数为: 电机转速 842 r/min, 齿数 $Z = 55$, 采样频率为 10 kHz, 采样点数为 65 536。计算可得轴转频 14 Hz, 啮合频率 771.8 Hz。将数据分为 32 段, 所得结果如图 9 ~ 图 11 所示。



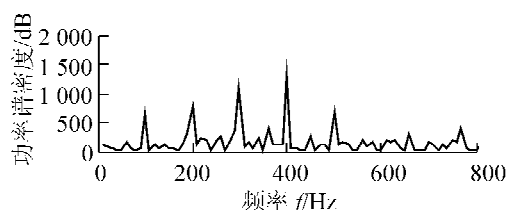
(a) 时域波形



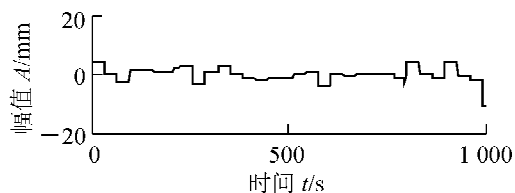
(b) 频谱

图 5 $k=2$ 时本文方法降噪后信号的时域波形与频谱

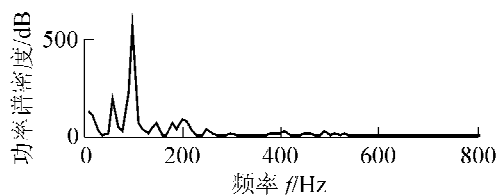
(a) 时域波形



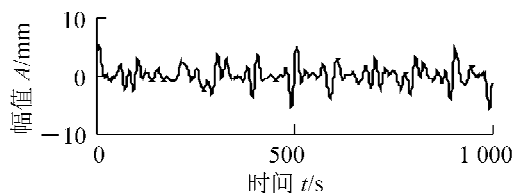
(b) 频谱

图 6 $k=10$ 时含噪信号的时域波形与频谱

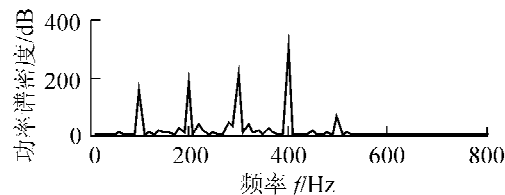
(a) 时域波形



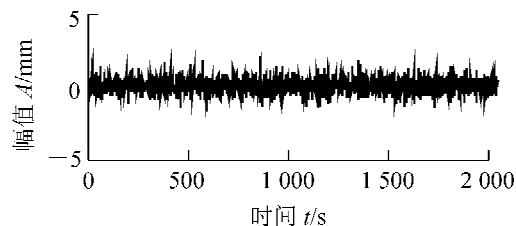
(b) 频谱

图 7 $k=10$ 时小波降噪后信号的时域波形与频谱

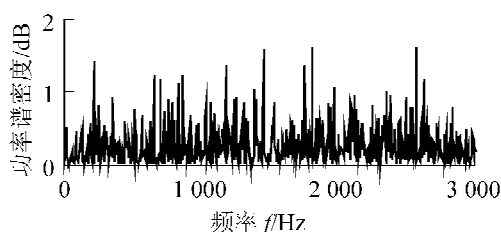
(a) 时域波形



(b) 频谱

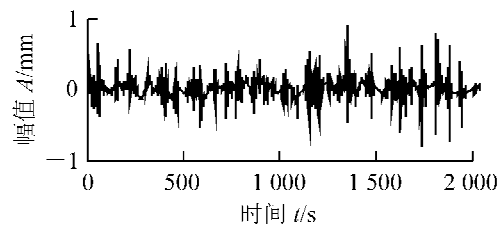
图 8 $k=10$ 时本文方法降噪后信号的时域波形与频谱

(a) 时域波形

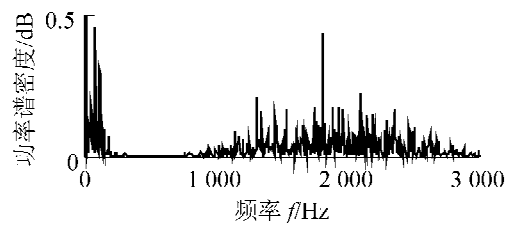


(b) 频谱

图 9 信号的时域波形与频谱



(a) 时域波形



(b) 频谱

图 10 小波降噪后信号的时域波形与频谱

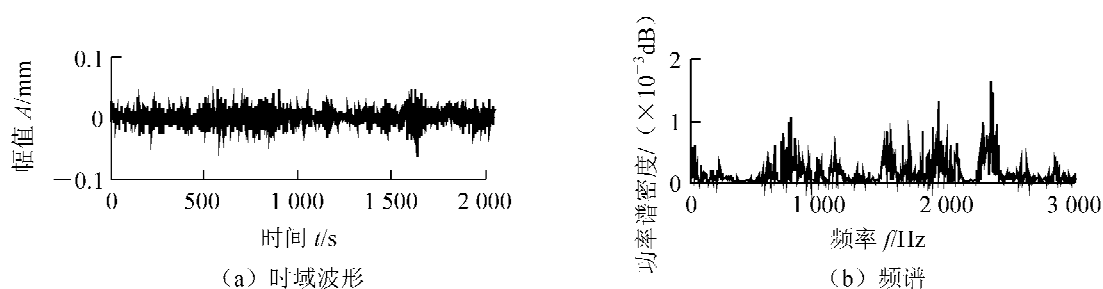


图 11 本文方法降噪后信号的时域波形与频谱

由实测信号分析结果可见,实测信号的时域波形与频谱图不能确定为何种故障。利用小波降噪后发现齿轮啮合频率(771.8 Hz)及其 2 倍频、3 倍频处有峰值,但效果并不明显。而利用本文方法降噪后频谱中不仅能够明显观测到齿轮啮合频率及其 2 倍频、3 倍频处的峰值,而且能够观测到这些频率处的调制谱线,确认齿轮磨损故障的存在。

5 结语

在简要介绍 Gabor 变换的基础上,提出了一种基于 Gabor 变换的自适应信号降噪方法,该方法完全由信号自身确定滤波器的参数,而且相比于小波降噪具有更好的降噪效果,有望用于相关研究领域。

参 考 文 献

- [1] 刘献栋,杨绍普,申永军,等. 基于奇异值分解的突变信息检测新方法及其应用[J]. 机械工程学报,2002,38(6):102-105.
- [2] 彭培英,申永军,李黎阳. 基于奇异值分解技术的离心机故障诊断[J]. 动力学与控制,2008,6(2):165-168.
- [3] 杨世锡,焦卫东,吴昭同. 应用 JADE 盲分离算法分离统计相关源[J]. 振动工程学报,2003,16(4):498-501.
- [4] 康海英,栾军英. 基于阶次跟踪和经验模式分解的齿轮故障诊断[J]. 上海交通大学学报,2007,41(9):1529-1532.
- [5] 彭志科,卢文秀,褚福磊. 新的基于小波变换的振动信号消噪方法[J]. 机械工程学报,2006,42(4):18-22.
- [6] 张贤达,保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京:国防工业出版社,1998.

Adaptive Noise Reduction Method Based on Gabor Transform

Shen Yongjun, Zhang Guangming, Qi Yuling, Wang Lin

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

Abstract: The basic theory of Gabor transform is first introduced, and an adaptive noise reduction method based on Gabor transform is presented. Then the de-noising results are researched by simulated signals, and the result of wavelet de-noising is compared with the adaptive de-noising method. At last, this new method is applied to analyze the measured signal from gear-box and the result shows this method can diagnose the fault information under strong noise.

Key words: Gabor transform; fault diagnosis; de-noising