

基于 Gabor 变换的信号降噪方法

张光明, 申永军, 吴彦彦

(石家庄铁道学院 机械工程分院, 河北 石家庄 050043)

摘要:介绍了 Gabor 变换的基本理论,提出了一种基于 Gabor 变换的降噪方法。该方法首先对信号进行 Gabor 变换,并选择合适的阈值对 Gabor 展开系数进行处理,然后对处理后的 Gabor 展开系数进行 Gabor 逆变换,从而实现降噪。仿真结果表明,该方法具有很好的降噪效果,为机械故障诊断提供了一种新的思路。

关键词:Gabor 变换;故障诊断;降噪

中图分类号:TN911 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-0300(2009)03-0086-05

1 引言

利用振动信号对设备进行监测诊断,是设备故障诊断中最有效、最常用的方法之一。噪声是影响机械设备早期故障诊断的主要因素,必须通过降噪,去除被分析信号中的噪声和冗余信息,凸现故障的特征信息。由于设备所处的环境复杂,噪声干扰比较多,经常使有用信号淹没在较强的噪声中,难以进行准确的故障诊断。目前,机械故障诊断中常用的降噪方法主要有小波变换^[1,2]、奇异值分解^[3,4]等,这些方法均属于通用的信号分析方法,在具体用于某种机械振动信号时一般都需要作一些特殊处理。文献[2]中关于降噪过程中信号重采样的新思想设定了齿轮箱的降噪阈值和分解层数;文献[4]中提出的基于重构吸引子轨迹矩阵的奇异值分解技术,并引入自相关函数对现有奇异值分解技术改进来实现降噪。

根据上述情况,提出了基于 Gabor 变换理论^[5,6]的降噪方法。该方法首先对信号进行 Gabor 变换,并选择合适的阈值对 Gabor 展开系数进行处理,然后对处理后的 Gabor 展开系数进行 Gabor 逆变换,从而实现降噪。仿真结果表明,该方法具有较好的降噪效果,能够有效地识别机械设备的运行状态和故障特征。

2 Gabor 变换

时频分析的基本思想是设计时间和频率的联合函数,利用它可以同时描述信号在不同时间和频率的能量密度和强度。比较著名的时频分析工具有短时 Fourier 变换、Gabor 变换等。由于短时 Fourier 变换的窗口必须是窄窗,而 Gabor 变换的窗函数不受此限制的优点,就以 Gabor 变换为例进行分析^[5,6]。

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

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

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

收稿日期:2009-05-08

作者简介:张光明 男 1983 年出生 硕士研究生

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

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

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

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 展开表示为

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

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。过采样率定义为 $\alpha = \text{Gabor 展开系数的个数 } MN / \text{信号样本个数 } L$, 若 $\alpha = 1$ 时, 离散 Gabor 变换是临界采样, 若 $\alpha > 1$ 时, 离散 Gabor 变换是过采样。为了保证计算的稳定性, 一般采用过采样形式。

3 基于 Gabor 变换的信号降噪方法

首先观察周期信号在 Gabor 时频平面的特征。若信号 $s(t) = e^{jw_1 t} + e^{jw_2 t}$ 为两个复谐波信号叠加而成, 令辅助函数 $\gamma_{mn}(t) = (a/T)^2 e^{jn\Omega t}$, 可根据公式(3)得 $a_{mn} = 2\pi(a/T)^2 [\delta(w - w_1) + \delta(w - w_2)]$ 。结果表明, Gabor 展开系数是沿着复谐波信号两个频率直线上的带状冲激函数, 幅值为 $2\pi(a/T)^2$, 因此可以正确地检测出复谐波信号的两个频率。可见, 周期信号在 Gabor 时频平面呈窄带状分布, 且能量集中在该窄带区域内, 其它如调频、调幅等信号也有类似特征。而噪声信号在 Gabor 时频平面呈杂乱分布, 且布满整个 Gabor 时频平面。

基于上述情况可知, 根据信号能量的不同, 可以选择合适的阈值对含噪信号的 Gabor 展开系数进行处理。当 Gabor 展开系数 a_{mn} 的绝对值大于 b ($|a_{mn}| > b$) 时, 保留该系数, 否则将其置零。其公式如下

$$a_{mn}' = \begin{cases} a_{mn} & |a_{mn}| > b \\ 0 & |a_{mn}| < b \end{cases} \quad m = 1, 2, \dots, M \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

因此, 式中的系数 a_{mn}' 是该观测信号中所含信号能量较大的 Gabor 展开系数, 再根据公式(5)进行重构, 便得到一组新的信号 $s'(k)$, 即公式

$$s'(k) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} a_{mn}' g(k - mT) e^{jn\Omega k} \quad (7)$$

一般情况下, $s'(k)$ 相比于原信号 $s(k)$ 具有更高的信噪比。显然, 该方法降噪效果取决于阈值 b 的选取。根据小波变换降噪^[7]选取阈值的方法, 以 Gabor 时频平面中最大峰值 $a_{\max}$ 的百分比来选取阈值, 即

$$b = ca_{\max} \quad (8)$$

式中, c 为选定的百分比。

4 数值仿真

对机械系统进行故障诊断时常见的信号类型主要包括: 规则周期信号(如正弦信号)、故障振动信号(如调制信号, 调频信号)、噪声信号等。下面以一组包含上述常见信号的混合信号为例进行仿真分析, 并以信噪比评价该方法的降噪效果。令振动信号建模为 $x(t) = 20\sin 30\pi t + (20\sin 100\pi t + 10)\sin 40\pi t + 30\sin(180\pi t + 10\sin 20\pi t) + kN(t)$, 其中, $N(t)$ 为 $[-1, 1]$ 之间正态分布的随机噪声, 系数 k 反映噪声强度。以采样频率 $f_s = 200$ Hz, 采样点数为 2 048, 对仿真信号进行分析。图 1 所示为无噪声情况下信号的波形与频谱; 图 2、图 5 分别为噪声强度在 $k = 5$ 、 $k = 20$ 时的信号波形与频谱; 图 3、图 6 是通过软 SURE 阈值进行降噪后的信号波形与频谱; 本方法分别选取为 $b = 0.4$ 、 $b = 1.5$ 对信号的 Gabor 展开系数进行处理重构, 得到降噪后的信号波形与频谱如图 4、图 7 所示。

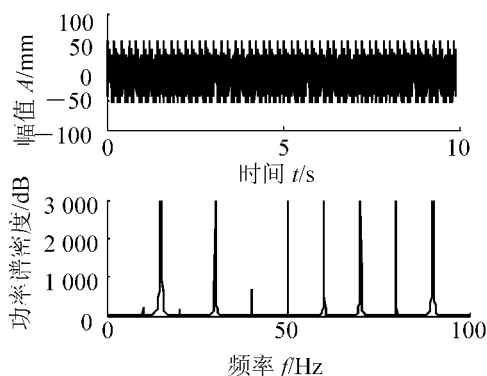
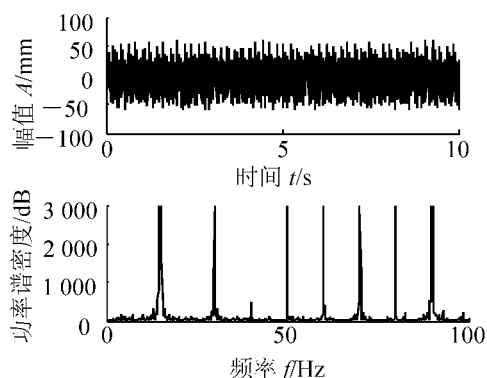
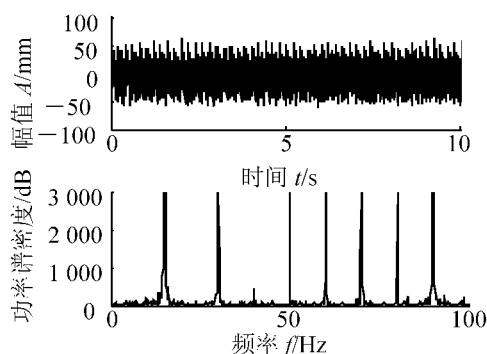
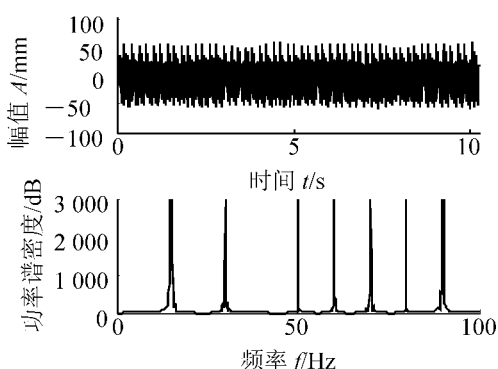
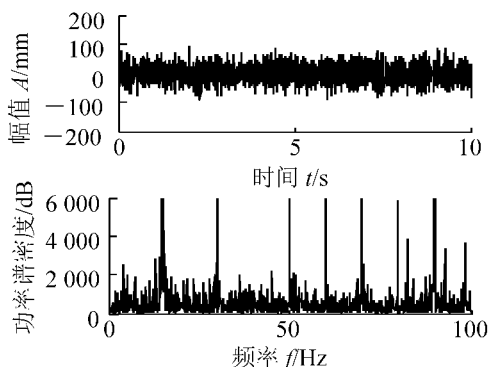
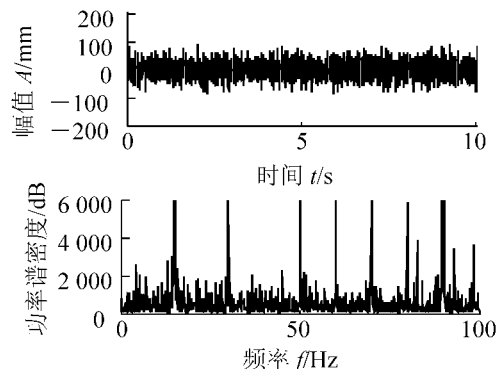
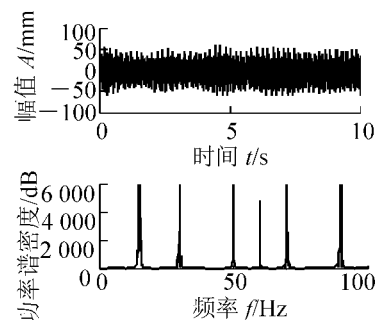


图 1 无噪声时信号波形与频谱

图 2 噪声强度 $k=5$ 时信号波形与频谱图 3 噪声强度 $k=5$ 时小波降噪后信号波形与频谱图 4 噪声强度 $k=5$ 时本方法降噪后信号波形与频谱图 5 噪声强度 $k=20$ 时信号波形与频谱图 6 噪声强度 $k=20$ 时小波降噪后信号波形与频谱

从图中可以看出,当噪声比较弱时($k=5$),小波降噪与本方法都可以得到更加光滑的时域信号;由于噪声的能量相比于有用信号并不明显,小波降噪虽然也取得了很好的降噪效果,但还没有本文方法降噪效果明显。本方法能同时大量地去除高、低频上的噪声,保证了大量的有用信号,得到的波形与频谱几乎与无噪声信号的完全相同。当噪声强度的较大时($k=20$),从时域图中无法看到有用信号的任何结构,此时本方法得到的时域图仍然可以观察到明显的有用信息;而比较频谱图可以看出,小波降噪的降噪效果并不理想,而本方法降噪后仍能清晰观察到有用信号分量的谱峰,虽然此时会有一些能量较低谱峰减小或消失。另外,本文还引用信噪比评价指标来比较小波降噪与此方法的降噪的降噪效果。当噪声

图 7 噪声强度 $k=20$ 时本方法降噪后信号波形与频谱

比较弱时($k = 5$),小波降噪方法与此方法的信噪比分别为 31.7 dB 和 45 dB;当噪声比较强时($k = 20$),小波降噪方法与此方法的信噪比分别为 3.9 dB 和 24.5 dB。可以看出,该方法相比小波降噪方法效果更加明显,尤其是在强噪声的情况下,也能取得良好的分离效果。

5 基于 Gabor 变换降噪方法在轴承故障诊断中的应用

为进一步验证本方法的实用性,对实测轴承故障信号进行分析。实验使用设备是江苏千鹏诊断工程有限公司研制的旋转机械振动分析及故障诊断试验平台,轴承型号为 N205EM,采样频率为 10 kHz,采样点数为 65 536,转速为 1 172 r/min。轴承故障设置为轴承外圈故障。在这种情况下,轴承故障特征频率为外圈通过频率及其倍频,理论计算得到通过频率为 102.5 Hz。

为了有效的提取轴承外圈故障特征频率,首先对分析信号做 Hilbert 再进行谱分析。采集的外圈故障振动信号时域波形与包络谱如图 8 所示,小波降噪与本方法降噪后的时域波形与包络谱如图 9、图 10 所示(本方法采用的阈值 $b = 0.05$)。从包络谱的分析可以发现在 1、2、3 倍频的存在较大峰值,通过对照轴承故障频率可知,轴承的外圈发生了故障。从降噪效果不难发现,小波降噪后的时域波形与包络谱和采集信号时域波形与包络谱相比较可以看出,小波降噪效果不明显,而本方法降噪后的时域波形与包络谱与采集信号和小波降噪后时域波形与包络谱比较可见,本方法降噪效果相当明显,不仅能去除高、低频上的噪声,还能清晰地找出故障信号的特征频率,准确确定故障的位置。

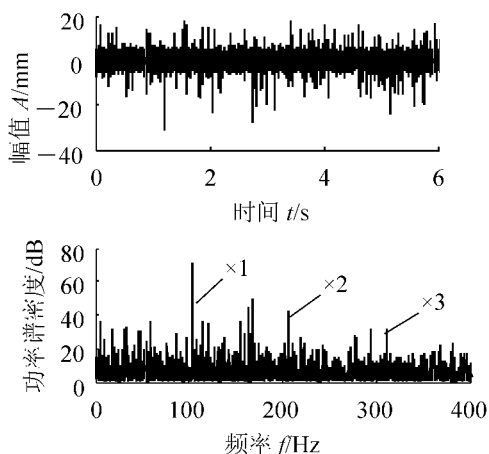


图8 轴承故障信号波形及包络谱

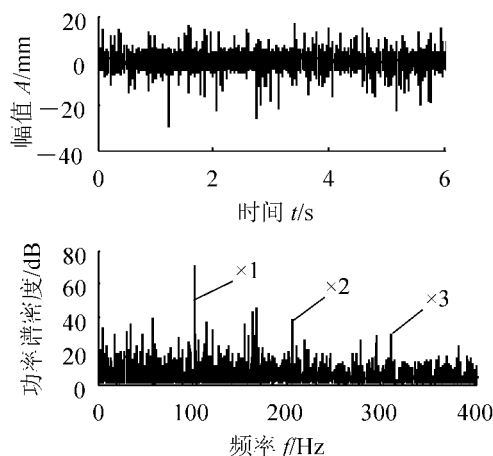


图9 小波降噪后信号波形及包络谱

6 结论

结合了时频信号分析技术,提出了一种基于 Gabor 变换的降噪方法。该方法通过在 Gabor 时频平面内对变换后信号加以阈值处理并进行 Gabor 逆变换,从而得到降噪后信号。通过数值仿真信号与实测轴承故障信号的降噪处理,并且与小波变换降噪方法进行比较,表明本方法在较强的噪声背景下,能够很好的提取出故障信号中所含的特征信息,为进一步的故障诊断提供了保证。

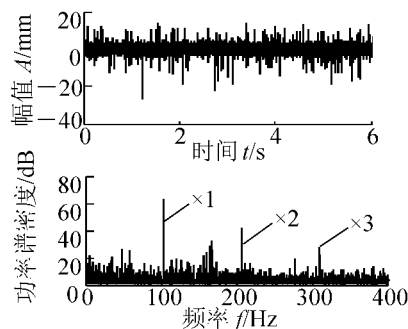


图10 本文方法降噪后信号波形及包络谱

参 考 文 献

- [1] 马辉, 宋雪萍, 赵鑫, 等. 小波包分析在转子裂纹故障检测中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2006, 26(4):300-305.
- [2] 陈果. 一种转子故障信号的小波降噪新方法[J]. 振动工程学报, 2007, 20(3):285-290.
- [3] 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.

- [4]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.
- [5]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.
- [6]张贤达.现代信号处理[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [7]杨福生.小波变换的工程分析与应用[M].北京:科技出版社,1999.

A De-noising Method Based on Gabor Transform

Zhang Guangming, Shen Yongjun, Wu Yanyan

(Department of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The theory of the Gabor transform is introduced and a de-noising method based on the Gabor transform is proposed. At first, the Gabor transform is applied to the signal and the Gabor expansion coefficients are processed by the appropriate threshold valve. Then the de-noised signal is obtained by the Gabor inverse transform. The simulated results indicate that this method has good de-noising effect, and can provide a new means for mechanical diagnosis.

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

(上接第 81 页)

参 考 文 献

- [1]柳本民,张丽君.不良天气环境下高速公路运营安全与管理[J].交通工程,2006(1):55-59.
- [2]刘利花,张金喜.高速公路不良天气交通事故分析[J].道路与安全,2006,6(8):26-29.
- [3]Alexandros G K. Fractal evaluation of pavement skid resistance variations I: surface wetting[J]. Chaos Solitons Fractals,1998,9(11):1875-1890.
- [4]刘清泉.路面表面特性研究方向探讨[J].公路交通科技,1994(4):1-5.
- [5]王艳丽,王秉纲.高等级公路沥青路面养护标准研究[J].重庆交通学院学报,2000,19(4):26-29.
- [6]潘娅英,陈武.引发公路交通事故的气象条件分析[J].气象科技,2006,34(6):778-782.
- [7]贺芳芳,房国良,吴建平,等.上海地区不良天气条件与交通事故之关系研究[J].应用气象学报,2004,15(1):126-128.
- [8]骆勇,魏朗.雾天与高速公路交通安全[J].人类工效学,1995,5(1):33-35.
- [9]陈伟立.雾对高速公路交通安全的影响分析与研究[D].西安:长安大学公路学院,2005.
- [10]裴玉龙.道路交通安全[M].北京:人民交通出版社,2004.

Reasonable Value of Freeway Speed Limit Under Adverse Weather Condition

Li Hongqiang¹, Cheng Guozhu², Xia Zhenghao³

(1. Daqing Development District Institute of Planning and Architecture Design, Daqing 163000, China;

2. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

3. The First Highway Survey and Design Institute Ltd. of China, Xi'an 710068, China)

Abstract: In order to increase safety level of driving on freeway, the paper analyzes the affecting mechanism of adverse weather conditions on road traffic safety such as rain, snow and fog. Using the method of mathematics formulas derivation, it is considered as a condition that the sum of running distance and braking distance is less than the visible distance, so that calculation formula of maximum speed limit value is presented based on the safe distance. Values of corresponding speed limits are suggested according to different visible distance, road friction coefficient and grade.

Key words: freeway; maximum speed limit; adverse weather; safety speed