

S 变换用于滚动轴承故障信号冲击特征提取*

郭远晶, 魏燕定, 周晓军, 傅雷

(浙江大学现代制造工程研究所 杭州, 310027)

摘要 为从低信噪比的滚动轴承故障信号中提取出冲击特征, 以便于进行轴承故障诊断, 引入 S 变换的信号处理方法。以短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, 简称 STFT)以及连续小波变换(continuous wavelet transform, 简称 CWT)为理论基础, 分别推导得出了连续 S 变换的定义式, 并利用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, 简称 FFT)实现 S 变换离散化计算。S 变换克服了 STFT 时频分辨率固定的缺点, 弥补了 CWT 缺乏相位信息的不足。仿真信号研究表明, S 变换在信号整个频带上具有良好的时频分辨率和时频聚集性, 能够提取低信噪比信号中的冲击特征, 且性能优于 STFT 和 CWT。最后对一组实际的滚动球轴承故障振动信号进行 S 变换处理, 结果表明, S 变换能够方便有效地从中提取出周期性的冲击特征, 从而指导滚动轴承相关故障的诊断。

关键词 故障诊断; 滚动轴承; 信号处理; S 变换; 冲击特征

中图分类号 TN911.7; TH133.3; TH165.3

引 言

滚动轴承是各类旋转机械中应用最广泛的零部件之一, 也是旋转机械最主要的故障来源之一。滚动轴承元件工作表面发生局部损伤时, 工作过程中会产生突变的冲击脉冲力, 该冲击信号的频率即为损伤点撞击轴承元件的频率, 亦可称为轴承故障特征频率^[1-2]。但由于旋转机械传动系统的复杂性以及工作条件的多样性, 各种激励源产生的信号相互耦合, 导致滚动轴承故障源信号的冲击特征通常淹没在强背景信号与噪声中, 比较难以识别, 尤其是轴承早期损伤的微弱冲击特征, 更是不易提取^[3]。而若能成功提取该冲击特征, 即可方便有效地对滚动轴承相关故障进行诊断。因此, 针对滚动轴承故障信号中冲击特征的提取, 笔者引入一种有效实用的信号处理方法——S 变换。

S 变换由 Stockwell^[4] 在研究地球物理数据时提出。S 变换不仅保持了信号的绝对相位信息, 而且具有多分辨率特性以使其时频表示获得良好的时频分辨率, 弥补了 CWT 缺乏信号相位信息的不足以及 STFT 时频分辨率固定的缺陷, 因此, S 变换非常适合于非平稳信号的处理与分析。目前, S 变换已广泛应用于地震信号处理^[5-6]、电能质量扰动分

析^[7]、心电图^[8]与脑电图^[9]分析、柴油机故障诊断^[10]以及齿轮振动信号分解^[11]等领域。

1 S 变换

1.1 连续 S 变换

连续 S 变换可由 STFT 或者 CWT 推导得出^[4,12]。

对于给定信号 $x(t)$, 其 STFT 定义为

$$\text{STFT}_x(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(\tau - t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

将其中的窗函数 $g(t)$ 用一个标准的高斯窗函数代替, 即

$$g(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

令控制窗宽的参数 σ 为

$$\sigma(f) = \frac{1}{|f|} \quad (3)$$

得到 $x(t)$ 的 S 变换定义式, 即

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi ft} dt \quad (4)$$

由式(4)可以看出, S 变换是一种加高斯窗且窗宽与信号频率 f 成反比的特殊 STFT。因此, 相比于 STFT, S 变换能够在分析信号低频段实现更高

* 国家自然科学基金资助项目(51275453, 51375433); 浙江省自然科学基金资助项目(LY13E050008)
收稿日期: 2012-12-21; 修回日期: 2013-03-14

的频率分辨率,而在高频段获取更高的时间分辨率,即具有类似于CWT的多分辨率特性。

S变换亦可由CWT经过“相位修正”得到。信号 $x(t)$ 的CWT定义为

$$W(\tau, d) = \frac{1}{\sqrt{d}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{d}\right) dt \quad (5)$$

将式(5)乘以一个相位修正因子 $\sqrt{|f|} e^{-i2\pi f\tau}$,并令尺度系数 $d=1/|f|$,便可得到 $x(t)$ 的S变换

$$S(\tau, f) = \sqrt{|f|} e^{-i2\pi f\tau} W(\tau, f) \quad (6)$$

其中:基本母小波定义为

$$\psi\left(\frac{t-\tau}{d}\right) = \psi((t-\tau)f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f(t-\tau)} \quad (7)$$

得到S变换定义式(4),但由于S变换中所用的小波并不满足CWT中的小波零均值容许条件,所以S变换不是严格意义上的小波变换。

1.2 离散S变换

为了在计算机上实现S变换的计算,需将S变换离散化。而进一步为了使S变换能够快速实现,有必要利用FFT来获取S变换的离散化计算公式^[4]。

由S变换定义式(4),得到

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t, f) g(\tau - t, f) dt = p(\tau, f) * g(\tau, f) \quad (8)$$

其中:“*”表示卷积,且

$$p(\tau, f) = x(\tau) e^{-i2\pi f\tau} \quad (9)$$

$$g(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\tau^2 f^2}{2}} \quad (10)$$

对式(8)两边关于 τ 进行FFT变换,得到

$$B(\alpha, f) = X(\alpha + f) e^{-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}} \quad (11)$$

其中

$$\text{FFT}[S(\tau, f)] = B(\alpha, f) \quad (12)$$

$$\text{FFT}[p(\tau, f)] = X(\alpha + f) \quad (13)$$

$$\text{FFT}[g(\tau, f)] = e^{-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}} \quad (14)$$

对 $B(\alpha, f)$ 关于 α 进行FFT逆变换,得到

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\alpha + f) e^{-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}} e^{i2\pi \alpha \tau} d\alpha \quad f \neq 0 \quad (15)$$

根据式(15),令 $\tau \rightarrow jT, f \rightarrow n/NT$,可以得到离散时间序列 $x(kT)$ 的离散S变换,即

$$\begin{cases} S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} X\left[\frac{m+n}{NT}\right] e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{\frac{i2\pi mn}{N}} & (n \neq 0) \\ S[jT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x\left(\frac{m}{NT}\right) & (n = 0) \end{cases} \quad (16)$$

其中: T 为分析信号 $x(t)$ 的时间采样间隔,且 $n, j=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

2 信号冲击特征提取仿真试验

为验证S变换从信号中提取冲击特征的有效性,分别对纯冲击信号和噪声混合信号进行了冲击特征提取仿真试验。

2.1 纯冲击信号冲击特征提取

纯冲击信号 $x(t)$ 中的冲击成分由下面指数衰减信号模型 $p(t)$ 生成。

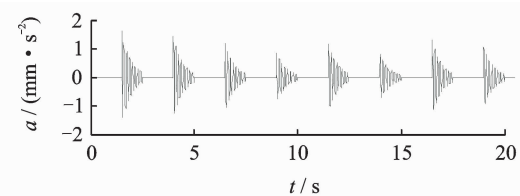
$$p(t) = \sum_{i=1}^8 A(i) \exp\left(-\frac{2}{3}\pi t\right) \cos(15\pi t) \quad (17)$$

其中:信号幅值序列 $A(i) (i=1, 2, \dots, 8)$ 为均值 $\mu=1$,方差 $\sigma^2=0.09$ 的高斯随机序列。

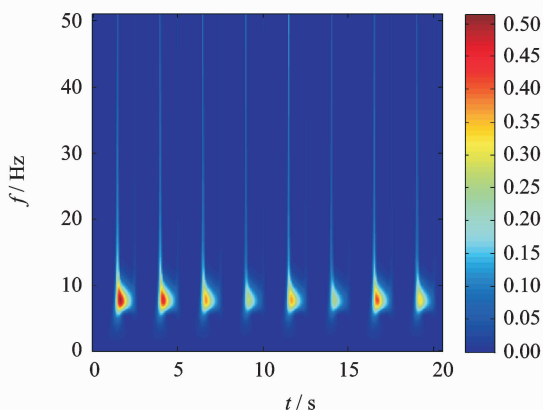
图1(a)为纯冲击信号 $x(t)$ 的时域波形图,从时域图可以明显看出信号周期性的冲击特征,其周期为2.5 s。分别对仿真信号 $x(t)$ 进行S变换、STFT以及CWT,其中CWT所用小波为Morlet小波,得到S变换时频谱图1(b)、STFT时频谱图1(c)以及CWT时间尺度谱图1(d)。通过对比看出,S变换和CWT均提取出了信号的冲击特征,但S变换对于冲击特征时频表示的时频聚集性要优于CWT,而STFT并不能有效提取信号中的冲击特征。

2.2 噪声混合信号冲击特征提取

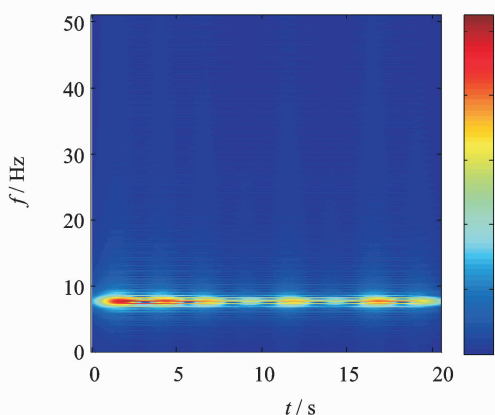
在纯冲击信号 $x(t)$ 中叠加噪声信号,获得信噪比为0的噪声混合信号。从时域波形图2(a)中可以大致看出信号中的周期性冲击特征,但并不十分明显。对混合信号进行S变换,得到S变换时频谱图,如图2(b)所示,可见S变换成功地从该低信噪比的混合信号中提取出了周期性的冲击特征。图2(c)与2(d)分别为混合信号的STFT时频图、连续Morlet小波变换时间尺度谱图。显然,从STFT时频图中并不能识别混合信号中的冲击特征。虽然CWT亦能提取混合信号中的冲击成分,但其结果在各个冲击时间点处呈散状分布,由此可见CWT的时频聚集性不如S变换。



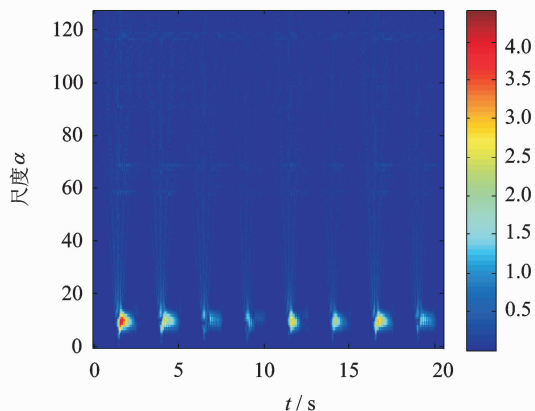
(a) 时域波形图
(a) Time-domain waveform



(b) S变换时频谱
(b) Time-frequency spectrum by S transform



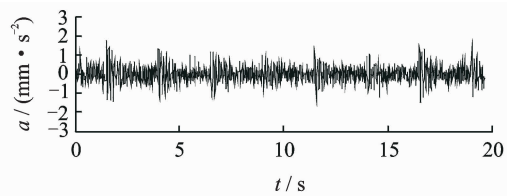
(c) STFT时频谱
(c) Time-frequency spectrum by STFT



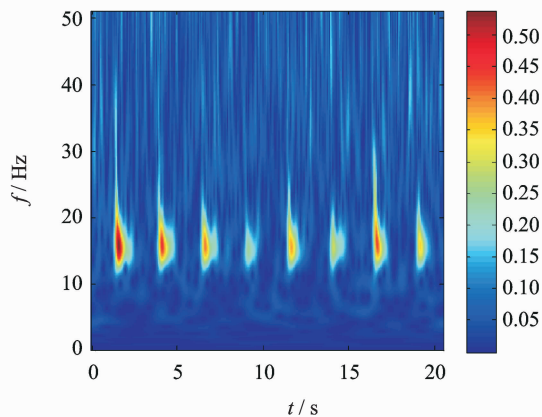
(d) CWT时间尺度谱
(d) Time-scale spectrum by CWT

图1 纯冲击信号的冲击特征提取

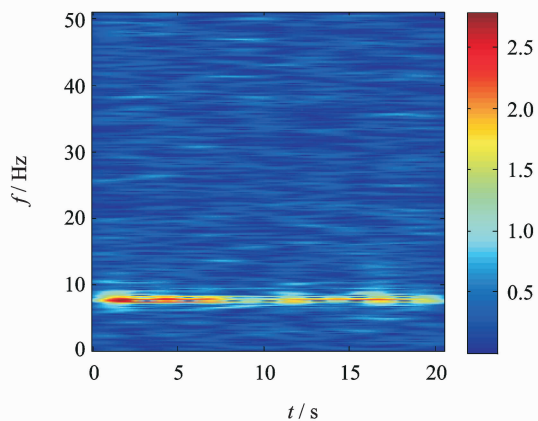
Fig. 1 Impact feature extraction from the signal with pure impact



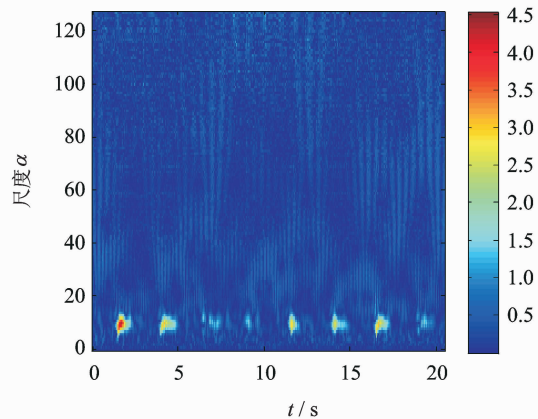
(a) 时域波形图
(a) Time-domain waveform



(b) S变换时频谱
(b) Time-frequency spectrum by S transform



(c) STFT时频谱
(c) Time-frequency spectrum by STFT



(d) CWT时间尺度谱
(d) Time-scale spectrum by CWT

图2 噪声混合信号的冲击特征提取

Fig. 2 Impact feature extraction from the signal mixed with noise

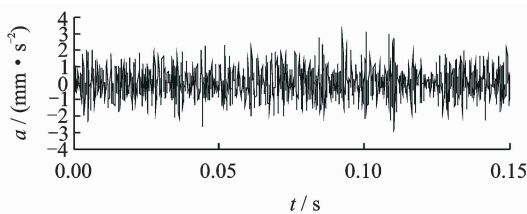
3 滚动轴承故障信号冲击特征提取

为了进一步验证 S 变换对于滚动轴承故障信号冲击特征提取的有效性,下面采用美国 Case Western Reserve University 电气工程实验室中的相关轴承数据对其进行试验^[13]。试验轴承为试验台驱动端的 NTN 滚动球轴承。在试验轴承内滚道上用电火花加工出直径为 0.711 2 mm,深为 1.27 mm 的凹坑,以模拟轴承内圈单点故障。驱动电机功率 2.2 kW,试验转速 $1\ 730\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。采样频率为 12 kHz,采样数据点数为 2 048。

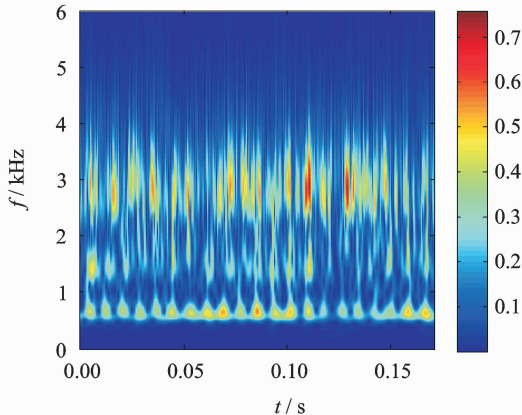
图 3(a)为轴承故障振动信号的时域波形图。由于该信号中包含有较强的背景信号和噪声,显然,仅从时域图很难看出其中的冲击特征。

图 3(b)为轴承故障振动信号的 S 变换时频谱图。在整个时间轴上,频率轴约 700 Hz 处出现明显的周期性冲击特征,其周期约为 0.008 1 s,对应的频率为 123 Hz。

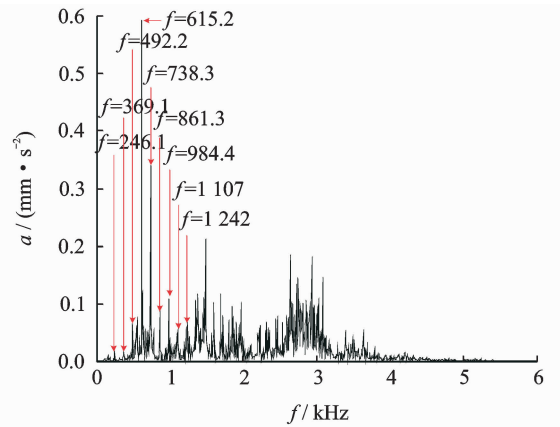
图 3(c)为轴承故障振动信号的 FFT 频谱图,可以看出,在 123 Hz 的 2 倍频 246.1 Hz、3 倍频 369.1 Hz、4 倍频 492.2 Hz、5 倍频 615.2 Hz、6 倍频 738.3 Hz、7 倍频 861.3 Hz、8 倍频 984.4 Hz、9 倍频 1 107 Hz 以及 10 倍频 1 242 Hz 处均出现了峰值。这表明此滚动轴承内圈故障特征频率为 123 Hz,所对应的故障振动信号中冲击特征出现频率为



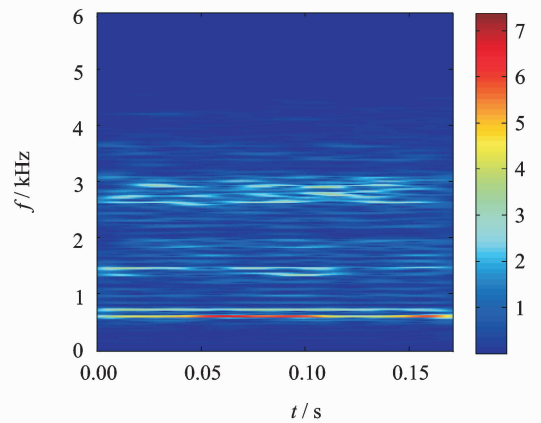
(a) 时域波形图
(a) Time-domain waveform



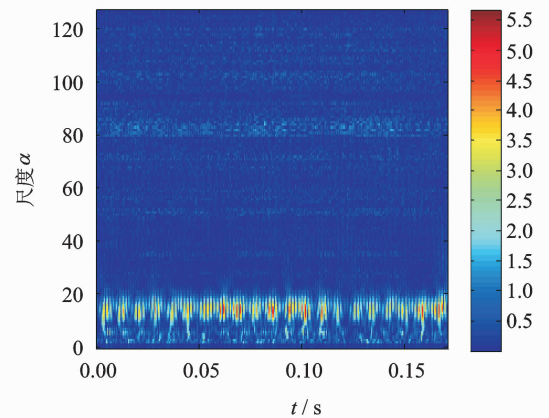
(b) S变换时频谱
(b) Time-frequency spectrum by S transform



(c) FFT时频谱
(c) FFT spectrum



(d) STFT时频谱
(d) Time-frequency spectrum by STFT



(e) CWT时间尺度谱
(e) Time-scale spectrum by CWT

图 3 滚动球轴承内圈故障振动信号的冲击特征提取
Fig. 3 Impact feature extraction from vibration signal of the ball bearing with inner-race fault

123 Hz,验证了 S 变换时频谱对于冲击特征提取与分析的有效性。但 S 变换时频谱图对于冲击特征表示要比 FFT 谱图更为清晰明了,易于识别。

图 3(d)和 3(e)分别为轴承故障信号的 STFT 时频谱图和 CWT 时间尺度谱图,其中 CWT 所用

小波为 Morlet 小波。显然,从 STFT 时频图中无法看出其中的冲击特征。CWT 也可以提取信号中的冲击特征,但其分辨率及时频聚集性不如 S 变换。

4 结束语

S 变换实际上是 STFT 和 CWT 的综合体。相对于 STFT, S 变换可以看作是一种加高斯窗且窗宽与频率成反比的特殊 STFT,这使得 S 变换在分析信号整个频带上能够实现更好的时频分辨率。S 变换亦可认为是一种经过相位修正的 CWT,因此, S 变换保留了信号的绝对相位信息,而这正是 CWT 的不足之处。基于 S 变换的以上特点, S 变换非常适合于非平稳信号的处理与分析。此外,关于 S 变换对于信号绝对相位保持性的优点,其应用更有待进一步研究与挖掘。

冲击信号是一种典型的非平稳信号。仿真试验结果表明, S 变换对于信号冲击特征提取具有独特的优势,尤其适合于提取低信噪比信号中的冲击特征。滚动轴承故障振动信号作为一种常见的非平稳信号,其中的冲击特征成分往往淹没在各种背景信号与噪声中。在未对轴承故障振动信号去噪的情况下, S 变换可以方便有效地提取出其中的周期性冲击特征,且具有良好的时频分辨率和时频聚集性,其最终结果可用于指导滚动轴承相关故障的诊断。

参 考 文 献

- [1] 钟秉林,黄仁. 机械故障诊断学[M]. 北京:机械工业出版社,2006:298-301.
- [2] 唐贵基,蔡伟. 应用小波包和包络分析的滚动轴承故障诊断[J]. 振动、测试与诊断,2009,29(2):201-204.
Tang Guiji, Cai Wei. Rolling bearing fault diagnosis by using wavelet packet and envelope analysis [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009,29(2):201-204. (in Chinese)
- [3] 袁幸,朱永生,洪军,等. 用盲反卷积和改进谱减法提取轴承微弱特征[J]. 振动、测试与诊断,2012,32(2):202-207.
Yuan Xing, Zhu Yongsheng, Hong Jun, et al. Bearing weak feature extraction by using blind deconvolution and improved spectral subtraction [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012,32(2):202-207. (in Chinese)
- [4] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: the S transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996,44(4):998-1001.
- [5] 樊剑,吕越,张辉. 基于 S 变换的地震波时频分析及人工调整[J]. 振动工程学报,2008,21(4):381-386.
Fan Jian, Lv Yue, Zhang Hui. Time-frequency analysis and artificial simulation of earthquake ground motions via S-transform [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008,21(4):381-386. (in Chinese)
- [6] 高怀静,满蔚仕,陈树民. 广义 S 变换域有色噪声与信号识别方法[J]. 地球物理学报,2004,47(5):869-875.
Gao Huaijing, Man Weishi, Chen Shumin. Recognition of signals from noise background in generalized S-transformation domain [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004,47(5):869-875. (in Chinese)
- [7] Dash P K, Panigrahi B K. Power quality analysis using S-transform [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003,18(2):406-411.
- [8] Huang Chienchun, Liang Shengfu, Young Mingshing, et al. A novel application of the S-transform in removing powerline interference from biomedical signals [J]. Physiological Measurement, 2009,30(1):13-27.
- [9] Pinnegar C R, Khosravani H, Federico P. Time-frequency phase analysis of ictal EEG recordings with the S-transform [J]. IEEE Transactions on Bio-medical Engineering, 2009,56(11):2583-2593.
- [10] 王成栋,张优云,夏勇. 基于 S 变换的柴油机气阀机构故障诊断研究[J]. 内燃机学报,2003,21(4):271-275.
Wang Chengdong, Zhang Youyun, Xia Yong. Fault diagnosis for diesel valve train based on S transform [J]. Transactions of CSICE, 2003,21(4):271-275. (in Chinese)
- [11] McFadden P D, Cook J G, Forster L M. Decomposition of gear vibration signals by the generalized S transform [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999,13(5):691-707.
- [12] Stockwell R G. Why use the S-transform? [J]. Fields Institute Communications, 2007,52:279-309.
- [13] Case Western Reserve University Bearing Data Center [EB/OL]. (2012-11-07) [2012-12-07]. <http://cse-groups.case.edu/bearingdatacenter/home>.



第一作者简介:郭远晶,男,1987年10月生,博士研究生。主要研究方向为机械动力学、机械信号处理与故障诊断。
E-mail:gyjyn@126.com