

基于高阶统计量的滚动轴承故障诊断方法*

蔡剑华, 胡惟文, 王先春

(湖南文理学院信息研究所 常德, 415000)

摘要 针对滚动轴承故障振动信号易受高斯噪声影响的问题,从高阶统计量的理论入手,提出了由信号的高阶谱恢复功率谱。由恢复的功率谱提取故障特征信息的高阶统计量方法,建立了通过高阶谱恢复功率谱的数学模型,并对仿真数据和实测故障数据进行了分析。结果表明,利用高阶累积量对高斯噪声不敏感的特点,可实现高斯噪声下瞬态信号频率与功率谱的正确估计。与传统方法相比,本研究方法可以有效地提取滚动轴承故障特征,同时具有更高的分辨率。

关键词 高阶统计量; 滚动轴承; 故障诊断; 高斯噪声

中图分类号 TH133.33; TH911.6

引言

在机器状态监测和故障诊断中,常用的机械故障特征兆提取方法多是假设振动信号具有平稳和高斯分布的特性^[1-2],而实际测得的信号大量是非平稳和非高斯分布的信号,尤其是在发生故障时更是如此,且易受高斯噪声影响。对于非线性现象,仅用传统功率谱处理方法分析很难从根本上解决问题^[3]。高阶统计量从更高阶概率结构表征随机信号,弥补了2阶统计量(功率谱)不包含相位信息的缺陷,能定量描述非线性相位耦合。高阶谱有很强的消噪能力,理论上能完全抑制高斯噪声。它与传统功率谱法相比具有显著的优点^[4-6]:a. 高阶累积量具有对高斯有色噪声恒为零的特点;b. 高阶累积量含有系统的相位信息;c. 可以提取随机过程偏离高斯分布的程度和辨识系统的非线性程度。一般而言,轴承故障信号中的噪声可以近似当作高斯噪声处理,因而用高阶谱分析轴承信号更容易提取故障信息。笔者提出了一种由信号的高阶谱重构功率谱,再由重构的功率谱提取故障信息的故障诊断方法。

1 高阶统计量与高阶谱

高阶统计量是描述随机过程高阶(2阶以上)统计特性的一种数学工具,包括高阶累积量和高阶矩。与自相关函数的傅里叶变换定义为函数的功率谱类

似,高阶累积量的多维傅里叶变换定义为高阶谱(或称多谱)^[7-9]。

定义1 设 $\{x(n)\}$ 为零均值的 k 阶平稳随机过程,则该过程的 k 阶矩 $m_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1})$ 定义为

$$m_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) = \text{Mon}\{x(n), x(n + \tau), \dots, x(n + \tau_{k-1})\} \quad (1)$$

k 阶累积量 $c_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1})$ 定义为

$$c_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) = \text{Cum}\{x(n), x(n + \tau), \dots, x(n + \tau_{k-1})\} \quad (2)$$

其中: $\text{Mon}()$, $\text{Cum}()$ 为求 k 元实变向量的矩和累积量。

对于一个零均值的平稳随机过程 $\{x(n)\}$,其高阶阶统计量也可定义为

$$c_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) = E\{x(n), x(n + \tau), \dots, x(n + \tau_{k-1})\} - E\{g(n), g(n + \tau), \dots, g(n + \tau_{k-1})\} \quad (3)$$

其中: $k \geq 3$; $\{g(n)\}$ 为一个与 $\{x(n)\}$ 具有相同功率谱的高斯过程。

定义2 设高阶累积量 $c_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1})$ 绝对可和

$$\sum_{\tau_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{+\infty} |c_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1})| < \infty \quad (4)$$

则 k 阶累积谱为 k 阶累积量的 $k-1$ 维傅里叶变换

$$S_{kx}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{k-1}) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{+\infty} c_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) \exp\left\{-j \sum_{i=1}^{k-1} \omega_i \tau_i\right\} \quad (5)$$

习惯上,高阶累积谱简称作高阶谱或多谱,最常

* 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(2006AA06Z105);湖南省“十一五”重点建设学科——光学基金资助项目;湖南文理学院博士启动资助项目;湖南省自然科学基金资助项目(12JJ4034)

收稿日期:2011-07-30;修改稿收到日期:2011-10-06

用的高阶谱是3阶谱(也称双谱)及4阶谱(也称三谱)

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{+\infty} c_{3x}(\tau_1, \tau_2) e^{-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)} \quad (6)$$

$$T_x(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{+\infty} \sum_{\tau_3=-\infty}^{+\infty} c_{4x}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) e^{-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2 + \omega_3\tau_3)} \quad (7)$$

2 数值模型及估计算法

一个线性的非高斯信号的高阶谱可以写成^[7]

$$S_{kx}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{k-1}) = \gamma_{ku} H(\omega_1) \gamma_{ku} H(\omega_2) \dots H(\omega_{k-1}) H^*(\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_{k-1}) \quad (8)$$

其中: γ_{ku} 为一个与输入信号 u 对应的标量常数; $H(\omega)$ 为线性时不变系统的频率传递函数。

如果非高斯信号 $x(n)$ 是由非高斯白噪声 $u(n)$ 激励一个线性时不变系统所产生, 则式(8)对所有阶数均成立, 并且有

$$P_x(\omega_1) = \gamma_{2u} |H(\omega_1)|^2 \quad (9)$$

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = \gamma_{3u} H(\omega_1) H(\omega_2) H^*(\omega_1 + \omega_2) \quad (10)$$

$$T_x(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = \gamma_{4u} H(\omega_1) H(\omega_2) H(\omega_3) \times H^*(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) \quad (11)$$

其中: P_x , B_x , T_x 分别为信号的功率谱、双谱和三谱。

综合考虑式(9~11), 一个线性过程的功率谱可以从它的双谱和三谱重构出来, 其结果最多相差一个常数(假定 $H(0) \neq 0$), 即有

$$B_x(\omega, 0) = (\gamma_{3u}/\gamma_{2u}) P_x(\omega) H(0) \quad (12)$$

$$T_x(\omega, 0, 0) = (\gamma_{4u}/\gamma_{3u}) P_x(\omega) H^2(0) \quad (13)$$

其中: P_x 为功率谱。

当加性噪声为高斯有色噪声时, 利用双谱或三谱重构功率谱比直接估计功率谱具有更好的性能。因为双谱和三谱对高斯有色噪声有抑制作用, 而功率谱对任何有色噪声都是敏感的, 其中常数 γ_{2u} , γ_{3u} , γ_{4u} 可由信号的累积量和系统的冲激响应确定^[7,10]。

如果信号是对称分布的, 则其双谱很小或近似等于0, 所以笔者采用三谱的一维切片重构功率谱

$$P_x(\omega, 0) = (\gamma_{2u}/\gamma_{4u}) T_x(\omega, 0, 0) H_2(0) \quad (14)$$

其中: $\gamma_{2u} = \text{Cum}(0)$, $\gamma_{4u} = \text{Cum}(0, 0, 0)$, 分别为0延迟的2阶累积量和4阶累积量; $H_2(0)$ 为一个常量。

三谱 $T_x(\omega, 0, 0)$ 由4阶累积量的一维切片 $C_{4x}(\tau, 0, 0)$ 的傅里叶变换得到。至此, 可以利用信号的高阶谱重构其功率谱, 再由重构的功率谱提取故障信息, 该算法的流程如图1所示。

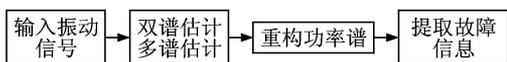
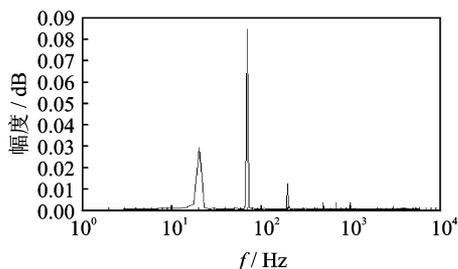


图1 高阶统计量法流程图

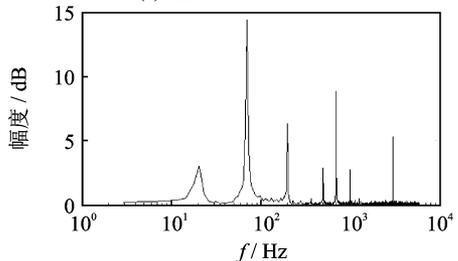
3 仿真与分析

为突出本研究方法的应用效果, 仿真结果都与传统功率谱的方法进行比较, 传统方法采用周期图谱估算方法。首先用合成数据作试验, 检验本研究由高阶谱重构其功率谱模型的有效性。合成数据实验信号包含频率分别为20, 70, 200, 500, 700, 1 000, 3 000 Hz的正弦信号, 加有独立同分布噪声、非线性漂移和直流分量^[10]。

对比图2(a, b)可以看出, 用高阶统计量法估计出了淹没在独立同分布噪声中的所有频率成分, 而在基于传统周期图法的频谱图中相应频率的幅值较小, 尤其在1 000和3 000 Hz处的频率点。显然, 高阶统计量能够有效地识别出在高斯强干扰下的非高斯微弱信号, 提高信噪比。在对信号分析中不但可以反映信号的整体与局部变化, 而且对信号有更高的分辨率。可见, 高阶统计量可用在强噪声背景下提取故障数据的有用信号。



(a) 基于传统方法的功率谱



(b) 基于高阶统计量的功率谱

图2 合成数据的功率谱

4 实验结果

用上述原理和方法对实际轴承故障诊断中常见的外圈故障、内圈故障、滚动体故障信号进行分析, 数据来自美国凯斯西储大学电气工程实验室。实验采用6205-2RS JEM SKF型轴承, 轴承内径直径为25.001 2 mm, 外径直径为51.998 9 mm, 厚为14.590 6 mm, 节径为39.039 8 mm, 滚动体直径为7.001 2 mm, 其由电火花机加工制作的外圈损伤直径为0.177 8 mm, 滚动体数目为9个, 接触角为0, 采

样频率为 12 kHz, 采样点数为 2 048。计算得到其轴承内、外圈故障频率分别为 $f_i \approx 158$ Hz, $f_o \approx 104$ Hz, 滚动体故障频率 $f_b \approx 137$ Hz。时域信号见图 3。

从图 3 的信号时域波形可以看出, 故障信号受到高斯噪声的影响, 很难辨别出有用的信息。图 4~图 6 是根据高阶统计量方法计算得到的 3 种情况下故障信号功率谱与传统基于周期图法的功率谱的对比图。高阶统计量估计采用笔者提出的由信号的高

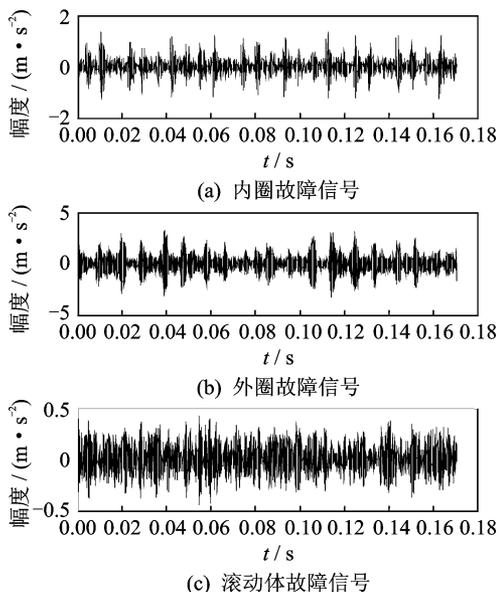


图 3 故障振动信号的时域图

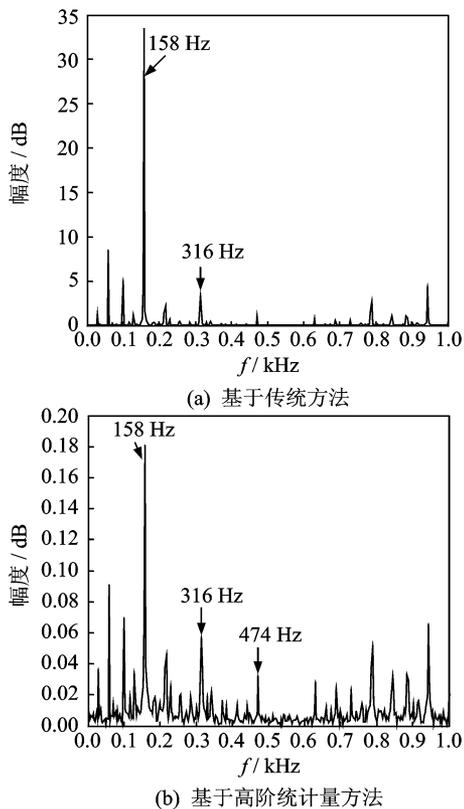


图 4 轴承内圈故障信号的功率频谱

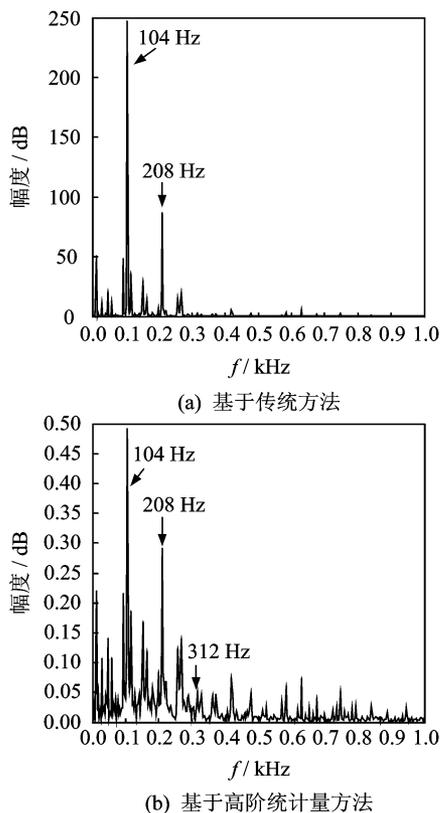


图 5 轴承外圈故障信号的功率频谱

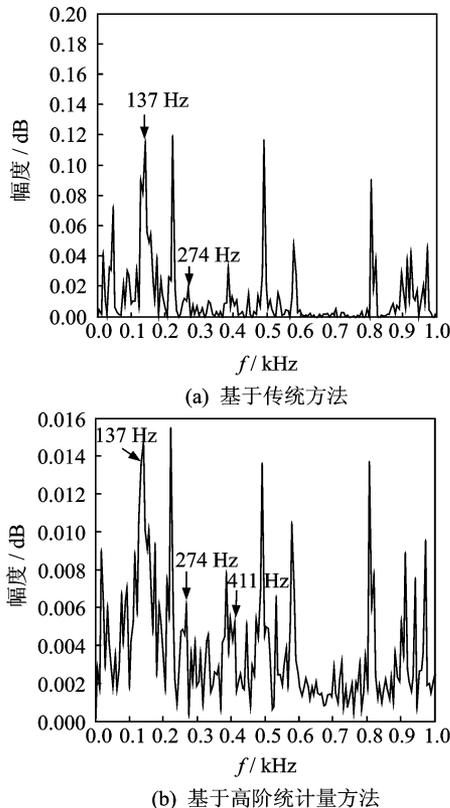


图 6 轴承滚动体故障信号的功率频谱

阶谱重构其功率谱的模型, 由三谱的一维切片重构功率谱。首先分析内圈故障信号的情况。由图 4(b) 可以

看出,由高阶统计量得到的功率谱在 158,316 及 474 Hz 附近都有明显峰值存在,这与计算所得的内圈故障特征频率及其二倍频、三倍频一致,说明外圈存在故障。相比图 4(a)中传统方法计算得到的功率谱,高阶统计量能更有效地识别出在高斯强干扰下的非高斯微弱信号,提高了信噪比,而且对信号有更高的分辨率。由图 5(b)可以看出,在 104 Hz 附近,产生一个明显的峰值,这和外圈的故障特征频率相一致,且其二倍频、三倍频和边频信息都比图 5(a)中的更明显、更丰富。分析图 6 能得到同样的结论。显然,通过高阶谱重构的功率谱充分利用了高阶谱分析的优点,消除了高斯噪声信号的干扰,提取了有用的信号特征。对比分析可以看出,轴承故障信号存在非平稳成分,采用高阶统计量分析可以有效地分析非平稳成分信号,且有更高的分辨率,能明显区别出轴承的状态及其故障的类型,提高了轴承的故障诊断效率。

4 结束语

高阶统计量具有对高斯有色噪声恒为零的特点,且含有系统的相位信息,克服了传统功率谱估计方法的不足,适应于易受高斯噪声影响的轴承故障信号的分析。数值仿真结果显示,笔者提出的由信号的高阶谱恢复功率谱的模型是正确的。由恢复的功率谱进行轴承故障的识别,在抑制高斯有色噪声、提取信号中有效信息方面优于传统功率谱方法,同时具有很高的分辨率。实验结果表明,所提出的基于高阶统计量的滚动轴承故障诊断方法可以有效识别滚动轴承的状态和故障类型。

参 考 文 献

- [1] 刘文艺,汤宝平,陈仁祥.一种基于对角切片高阶谱的故障识别方法[J].机械科学与技术,2010,29(3):281-285.
Liu Wenyi, Tang Baoping, Chen Renxiang. A fault identification method based on high-order spectral analysis of diagonal slices[J]. Mechanical Science and Technology, 2010,29(3):281-285. (in Chinese)
- [2] 李辉,郑海起,唐力伟. Teager-Huang 变换在齿轮裂纹故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(1):1-6.
Li Hui, Zheng Haiqi, Tang Liwei. Application of Teager-Huang transform to crack fault diagnosis of gear[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010,30(1):1-6. (in Chinese)
- [3] Randall R B. Detection and diagnosis of incipient bearing failure in helicopter gearboxes[J]. Engineering Failure Analysis, 2004,11:177-190.
- [4] 李志农,吴昭同,丁启全,等.基于高阶谱分析的转子裂纹的诊断[J].机械科学与技术,2002,21(6):981-982.
Li Zhinong, Wu Zhaotong, Ding Qiquan, et al. Fault diagnosis of the cracked rotor based on high-order spectral analysis[J]. Mechanical Science and Technology, 2002,21(6):981-982. (in Chinese)
- [5] Serhat S, Emine A. Feature extraction related to bearing damage in electric motors by wavelet analysis[J]. Journal of the Franklin Institute, 2003,340:125-134.
- [6] Li Zhinong, He Yongyong, Chu Fulei. Application of the blind source separation in machine fault diagnosis a review and prospect[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005,19(1):1-24.
- [7] 崔江,王友仁,刘权.基于高阶谱与支持向量机的电力电子电路故障诊断技[J].中国电机工程学报,2007,27(10):62-66.
Cui Jiang, Wang Youren, Liu Quan. The technique of power electronic circuit fault diagnosis based on higher-order spectrum analysis and support vector machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2007,27(10):62-66. (in Chinese)
- [8] 王春,刘成俊. Gabor 小波变换册在齿轮故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断,2008,28(1):18-24.
Wang Chun, Liu Chengjun. Application of gabor wavelet transform to fault diagnosis of gears [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008,28(1):18-24. (in Chinese)
- [9] 于德介,程军圣,杨宇. Hilbert-Huang 变换在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 中国机械工程,2003,12(24):2140-2142.
Yu Dejie, Chen Junshen, Yang Yu. Application of the Hilbert-Huang transform method to roller bearing fault diagnosis [J]. China Mechanical Engineering, 2003,12(24):2140-2142. (in Chinese)
- [10] 蔡剑华,胡惟文.基于高阶统计量的大地电磁数据处理与仿真[J].中南大学学报:自然科学版,2010,41(4):1556-1560.
Cai Jianhua, Hu Weiwen. Magnetotelluric data processing and simulation based on higher-order statistics [J]. Journal of Central South University :Edition of Science and Technology, 2010,41(4):1556-1560. (in Chinese)



第一作者简介:蔡剑华,男,1979年9月生,博士、讲师。主要研究方向为信号测量和信号处理。曾发表《基于经验模态分解的大地电磁资料人文噪声处理》《中南大学学报:自然科学版》2011年第42卷第6期)等论文。

E-mail:cjh1021cjh@163.com