

DOI: 10.7652/xjtuxb201608001

一种改进的局部倒频谱分析方法

张西宁, 李兵, 雷威

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对倒频谱分析难以实现从低信噪比信号中检测故障的问题, 在对局部倒频谱分析的基础上, 提出了一种改进的局部倒频谱分析方法, 并给出了改进局部倒频谱分析的原理和算法。该方法通过在时域引入相关消噪处理, 降低时域原始信号中的非周期性分量的干扰, 在频域引入相关消噪处理, 降低频谱上非周期性谱峰影响, 实现了频谱上周期性故障特征向零频率附近的聚集。改进的局部倒频谱分析方法解决了局部倒频谱方法存在的计算频带难以选择的问题, 同时消除了对故障频域内周期性特征局部化分布的限制, 扩展了应用范围。将该方法用于仿真信号以及故障齿轮实验测试信号的分析, 结果表明, 与传统倒频谱和局部倒频谱方法相比, 提出的改进局部倒频谱分析方法具有强的抗噪能力, 实验中较传统倒频谱和局部倒频谱方法分别多提供了 8.05 bit 和 1.11 bit 的诊断信息。该方法可用于实现从低信噪比信号中检测故障。

关键词: 倒频谱; 振动信号处理; 早期故障识别; 齿轮; 轴承

中图分类号: TH17 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)08-0001-05

An Improved Local Cepstrum Analysis Method

ZHANG Xining, LI Bing, LEI Wei

(State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The traditional cepstrum analysis is difficult to realize fault detection from low SNR signal. An enhanced local cepstrum analysis method is proposed on the basis of analysis of local cepstrum analysis method, the corresponding principles and algorithm are given. The theory of interference reduction of aperiodic components in original signal of time domain is expounded emphatically by introducing the related de-noising processing in time domain. The rules of interference reduction of aperiodic components of spectral peaks in frequency domain and the realization of convergence of periodic fault features near the zero frequency by adopting the related de-noising processing in frequency domain are also explained. The frequency band selection difficulty in the calculation of local cepstrum analysis method is solved, and the limitation of highly localized distribution of periodic fault features in spectrum is eliminated by frequency domain related de-noising processing. The proposed method is employed to analyze both simulated signal and vibration signal of a fault gear. Compared with the traditional cepstrum and local cepstrum methods, the proposed method has strong ability to resist noise and is able to provide 8.05 bit and 1.11 bit more information respectively for fault diagnosis in experiment.

Keywords: cepstrum; vibration signal processing; early fault detection; gear; bearing

收稿日期: 2016-03-23。 作者简介: 张西宁(1965—),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275379);国家自然科学基金创新研究群体资助项目(51421004);陕西省科学技术研究发展计划资助项目(K11-16)。

网络出版时间: 2016-05-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160517.1934.024.html>

齿轮、轴承是机械中应用最为广泛的基础零部件,其工作状态直接影响到整台设备的正常运行。倒频谱^[1]分析作为齿轮、轴承振动信号监测诊断中常用和有效的分析方法,能简化和提取振动信号频谱上的周期性特征,在齿轮、轴承等的监测诊断领域有广泛的应用。倒频谱的研究一直受到人们的关注,对其研究提高了倒频谱分析的效果,同时也使倒频谱的应用扩展到了纺织纱条条干不均匀分析、航空发动机监测、风力发电机监测、结构健康监测以及目标运动参数估计等领域^[2-13]。

齿轮、轴承等的早期故障所引起的振动信号调制现象非常微弱,在频谱上所形成的周期性边频带分量幅值很小,往往被噪声淹没,因此倒频谱分析很难检测早期故障。文献[14]提出了一种局部倒频谱分析方法,提高了倒频谱的检测效果,然而该方法存在计算频带搜索困难,仅适用于频域内周期性特征局部化分布的情况。

本文在对局部倒频谱分析的基础上,提出了一种改进的局部倒频谱分析方法,通过对仿真信号和实验测试振动信号的分析,验证了其有效性。

1 局部倒频谱原理

局部倒频谱分析的思路是选用部分故障特征明显的频段进行倒谱分析,以此来提高倒频谱分析的效果。设故障信号的频谱为 $F(\omega)$, $-\omega_N \leq \omega \leq \omega_N$, 频谱上故障特征所在的频段为 (ω_L, ω_H) , 如图 1 所示。对频谱进行带通滤波和移频处理,形成以故障特征所在区域内频谱对称构成的局部频谱 $F'(\omega)$, $-(\omega_H - \omega_L) \leq \omega \leq (\omega_H - \omega_L)$, 如图 2 所示。

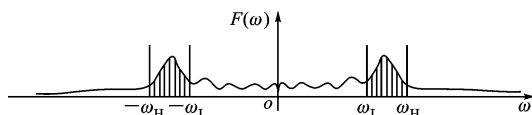


图 1 原始信号的频谱图

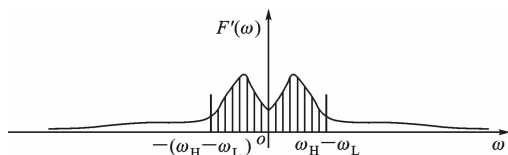


图 2 构造的局部频谱图

在该重构频谱上定义的倒频谱就是局部倒频谱,其定义为

$$C_L(\tau) = F^{-1}[\log F'(\omega)] \quad (1)$$

当频谱上故障特征仅仅分布在局部频段上时,在全部频谱上计算倒频谱受到平均效应的影响,倒

频谱上的倒频分量幅值将很小,难以观察。设在原频谱上故障特征的分布区间为整体频谱范围的 $1/D$, 局部倒频谱上倒频谱分量的幅值与按原始频谱计算的倒频谱分量幅值相比将增加 D 倍。由于通过移频重构的局部频谱 $F'(\omega)$ 上各个频谱线之间的间隔频率仍然与原始频谱的谱线间隔频率相同,所以定义的局部倒频谱在倒频域内倒频率取值范围仍与传统倒频谱一致。

局部倒频谱采用特征明显的频段进行倒频谱计算,提高了倒频谱检测效果。但是,局部倒频谱分析仍然存在以下几个问题:一是在计算过程中需要确定频谱上与故障相关的周期性特征所在的区域,在信噪比低的情况下区域往往难以确定;二是对于频谱特征大范围均匀分布型的早期故障难以确定特征明显的频谱区域,更没有对频域大范围均匀分布故障特征进行有效集成或聚焦的功能;三是采用移频重构的局部频谱与原始频谱一样,依然存在噪声。

针对上述问题,本文从消噪和有效特征集成、聚焦两方面入手,对局部倒频谱分析方法进行了改进,提出了改进的局部倒频谱。

2 改进的局部倒频谱原理

通常振动信号的频谱上除了与故障相关的周期性频域特征,往往还存在大量非周期性频谱分量和噪声。早期故障所产生的周期性频谱分量幅值很小,信噪比低,人工或采用在频率轴上扫描的方法难以实现对频谱上具有周期性频段的检测和定位。

相关分析是一种在强噪声情况下提取信号中周期性分量的方法。改进的局部倒频谱分析对频谱进行了频域相关处理,得到谱相关函数 $F'_R(\omega)$ 。由于原始频谱上的噪声仅对谱相关函数上中心处少量数据有影响,因此很容易消除。谱相关函数消除了原始频谱上的非周期分量,降低了原始频谱上噪声的幅值,使得频谱上与早期故障相关的周期特征得到了提纯和聚焦,因此谱相关函数上周期性特征更加明显和突出。此外,经过相关处理后周期性频谱特征均会在谱相关函数中间部分的低频率区域对称出现,如图 3 所示。在谱相关函数的低频率区域上对称地截取一定带宽区域内的谱相关函数,例如区域 $[-\omega_H, \omega_H]$ 内的谱相关函数,然后进行倒频谱计算,得到改进的局部倒频谱。频谱相关处理避免了在原始信号频谱上进行区域确定和选择,同时也降低了噪声。综上,改进局部倒频谱的定义如下

$$C'_L(\tau) = F^{-1}[\log F'_R(\omega)], \quad -\omega_H \leq \omega \leq \omega_H \quad (2)$$

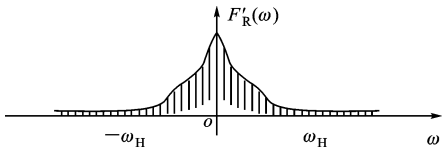


图 3 频域相关处理后的谱相关函数

为了尽可能消除信号中噪声的影响,改进的局部倒频谱方法对原始信号在时域内进行了相关处理:在时域消除了非周期性干扰和噪声;在谱相关函数低频率区域选择区间时,要考虑使选择区间包括全部周期性特征明显的区域,同时尽可能使选择的区间短一些,以降低傅里叶变换平均效应对倒频谱幅值的影响。改进的局部倒频谱方法采用信噪比高、特征明显的谱相关函数计算倒频谱,计算量小,检测精度高。与局部倒频谱一样,改进的局部倒频谱也存在倒频域倒频率分辨率低、倒频谱分量位置定位精度低的问题。为了提高倒频谱分量位置的定位精度,改进局部倒频谱在傅里叶逆变换时采用细化的傅里叶变换算法。

改进的局部倒频谱方法计算步骤可总结如下:
①在时域对信号进行自相关处理,消除信号中的非周期性分量;②利用傅里叶变换计算信号的功率频谱;③对功率谱进行自相关处理,得到功率谱的频谱自相关函数,并消除频谱上噪声对频谱自相关函数的影响;④根据频谱自相关函数上周期性频谱分量幅值的变化情况,在频谱自相关函数上选择用于局部倒频谱计算的区间;⑤对选取区间内的频谱自相关函数进行对数运算和细化傅里叶变换,得到改进的局部倒频谱。

3 仿真信号分析

为了验证改进局部倒频谱分析理论的正确性和效果,先采用仿真信号进行计算验证。仿真信号按照下式产生

$$x(t) = \sum_{n=1}^{13} a_n [\cos(b_n 2\pi t + \varphi_n)] + n(t) \tag{3}$$

$$a_n = \begin{cases} \frac{n(n-1)}{20} + 0.1, & 0 < n \leq 7 \\ a_{14-n}, & 7 < n \leq 13 \end{cases} \tag{4}$$

$$b_n = 37 + 9n; \varphi_n = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{12}(n-1), 0 < n \leq 13 \tag{5}$$

仿真信号的中心频率设定为 100 Hz,用于模拟齿轮的啮合频率。不同相位和幅值的周期性边频分量用来模拟齿轮故障产生的周期性频谱,周期性频谱的

间隔设定为齿轮的转频 9 Hz。仿真信号的采样频率为 1 kHz,信号长度为 5 s。采用均值为 0 mV、方差为 15 mV 的白噪声模拟实际信号中的噪声。图 4 和图 5 分别给出了仿真信号的波形图和频谱图。从图 5 可看出,齿轮周期性的特征频率分量主要集中在以 100Hz 为中心的局域区域。

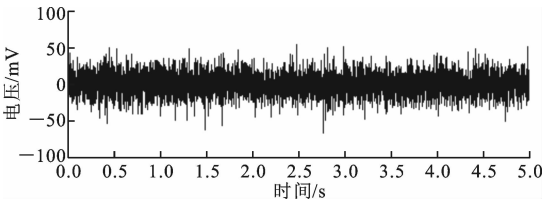


图 4 仿真信号的波形

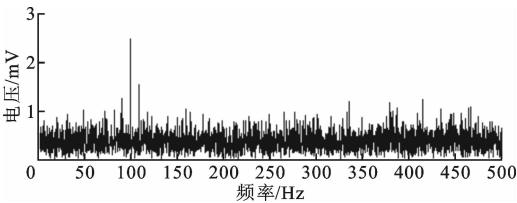


图 5 仿真信号的频谱

对以上仿真信号进行倒频谱、局部倒频谱和改进局部倒频谱分析。图 6 给出了仿真信号的倒频谱,但从图上看不出有倒频谱分量存在,基本上被噪声淹没了。图 7 是仿真信号的局部倒频谱,可以看到存在 0.111 s 的倒频率分量,但不十分清楚。频谱自相关函数如图 8 所示,周期性的频谱特征明显地集中到了频谱自相关的中间部分,中间部分浅色区域表示的是选取的计算区间。图 9 显示的是改进倒频谱,与图 7 相比,两种算法得到的改进局部倒频谱上 0.111 s 处的倒频谱峰及其 2~7 倍处的倒频谱峰更加明显,改进的局部倒频谱上的噪声也更低。

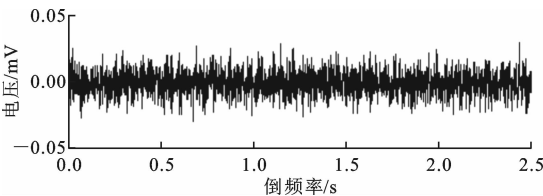


图 6 仿真信号的倒频谱

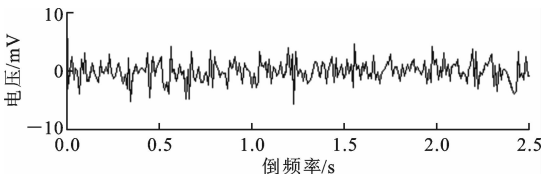


图 7 仿真信号的局部倒频谱

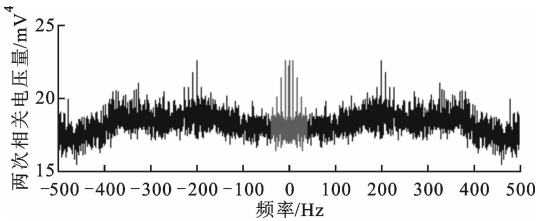
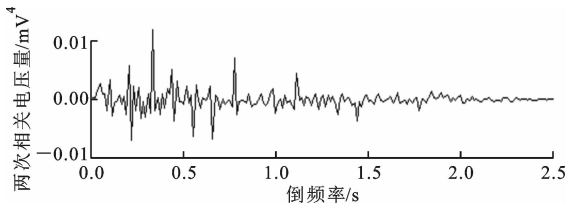
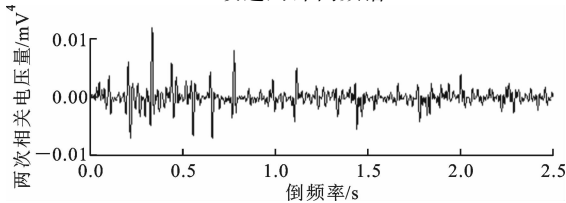


图 8 频谱自相关函数和选择的区间



(a)改进局部倒频谱



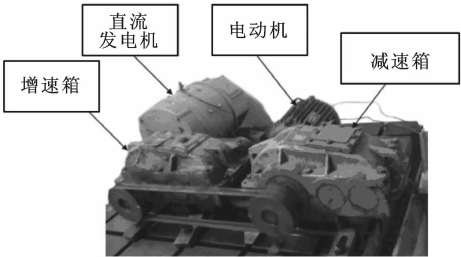
(b)细化的改进局部倒频谱

图 9 改进的局部倒频谱

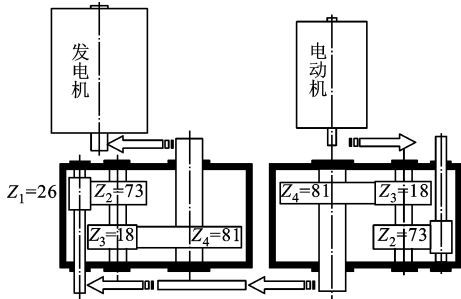
4 齿轮实验和分析验证

采用如图 10 所示的齿轮实验台对改进的局部倒频谱方法的进行实验验证。实验台由驱动电机、两个圆柱齿轮减速箱、直流发电机组成。实验台采用交流电动机拖动,两个结构完全相同的圆柱齿轮减速器分别进行降速和升速,最后通过驱动直流发电机发电进行实验加载。电动机与减速器、减速齿轮箱与升速齿轮箱、升速齿轮箱与直流发电机之间均采用三角皮带联接。降速齿轮输出轴上的大齿轮存在加工几何偏心,偏心量约为 1 mm。三相异步电动机型号为 J0241,额定功率为 4 kW,额定转速为 1 440 r/min。圆柱齿轮箱型号为 ZQ250,降速比为 12.634 6。实验采用 PCB 公司型号为 601A11 的加速度传感器测量输入轴左侧轴承盖上的振动加速度信号。传感器的灵敏度为 10.2 mV/(m/s²),测量频率范围为 0.27 Hz 到 10 kHz。实验中设定的采样频率为 10 kHz,振动数据采样长度为 50 000 点。

由于降速齿轮箱输出轴大齿轮存在加工几何误差,理论上该几何误差的周期是 0.423 s。在如图 11 所示的振动测试信号上隐约地存在幅值调制现象。对实验测试的振动信号,分别用倒频谱分析方法、局部倒频谱和改进局部倒频谱分析方法进行分



(a)齿轮实验台



(b)传动结构

图 10 齿轮实验台及传动结构

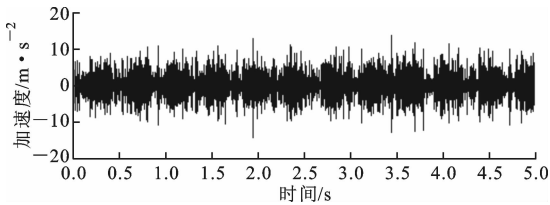


图 11 测试的振动信号

析。图 12 所示的传统倒频谱上基本全部为噪声,观察不到有倒频谱分量的存在。在振动信号频谱上选择输出轴 2 倍啮合频率附近的一段频谱进行重构,并计算局部倒频谱,结果如图 13 所示。大约在 0.424 s 的整数倍处倒频谱幅值较大,但倒频谱峰周围及其他区域仍存在较多的小峰及干扰。图 14 是改进局部倒频谱。在图 14 上倒频率为 0.424、0.848 及 1.272 s 处均有明显的倒频谱峰,这些倒频谱峰所在的倒频率正好是输出轴齿轮的转动周期及其整数倍。因此,齿轮实验数据分析进一步验证了改进局部倒频谱在提取周期性频谱分量、故障检测方面的效果。

为了定量描述以上各方法的效果,这里计算了图 12、图 13 及图 14a 中倒频谱、局部倒频谱和改进的局部倒频谱的信息熵,结果分别为 14.98、8.04 和 6.93 bit。信息熵表明了相应倒频谱提供的信息基础上,进一步解除状态不确定性所需要的信息量。换句话说,改进的局部倒频谱所提供的信息量,分别比传统倒频谱和局部倒频谱多了 8.05 bit 和 1.11

bit。显然,计算的信息熵与对倒频谱效果的定性观察结果是一致的。

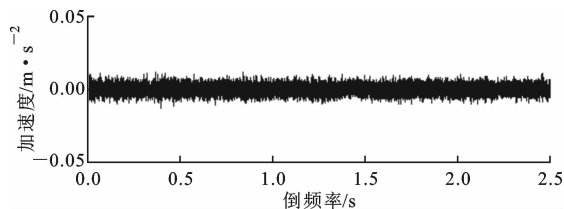


图 12 齿轮箱输入轴振动信号的倒频谱

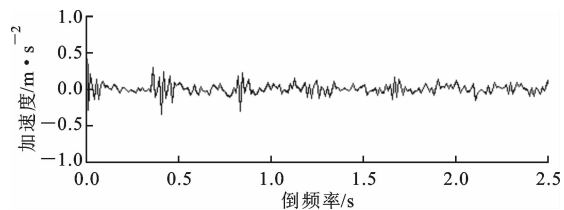
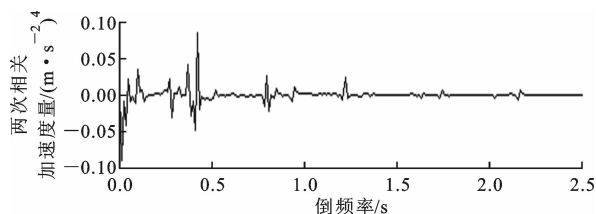
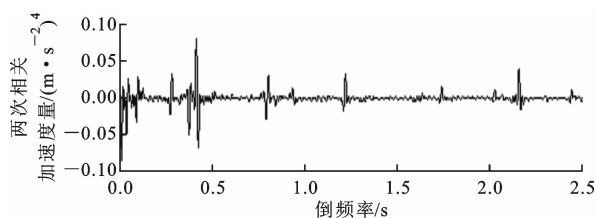


图 13 齿轮箱输入轴振动信号的局部倒频谱



(a)改进局部倒频谱



(b)细化的改进局部倒频谱

图 14 齿轮箱输入轴振动信号的改进局部倒频谱

5 结 论

本文分析了倒频谱和局部倒频谱的原理,给出了倒频谱和局部倒频谱在故障检测方面存在的问题,提出了改进的局部倒频谱分析方法,并给出了其原理和算法。将提出的方法用于仿真信号和故障齿轮实验振动信号分析,结果表明,该方法抗噪声能力强,能有效地检测出存在的早期故障。本文的研究结论如下:倒频谱分析难以实现从低信噪比信号中检测故障;局部倒频谱采用故障特征明显的部分频段进行计算,提高了检测效果,但在计算频段选择、特征聚集、噪声消除以及应用方面仍存在问题;改进的局部倒频谱在时域和频域内进行了两次相关消

噪,提高了信号的信噪比,较传统倒频谱和局部倒频谱分别多提供了 8.05 bit 和 1.11 bit 的诊断信息,可实现从低信噪比信号中检测故障。

参考文献:

- [1] BOGERT B P, HEALY M J R, TUKEY J W. The quefrency analysis of time series for echoes: cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-cepstrum and saphe cracking [C]//Proceedings of the Symposium on Time Series Analysis. New York, USA: Wiley, 1963: 209-243.
- [2] CHILDERS D G, SKINNER D P, KEMERAIT R C. The cepstrum: a guide to processing [J]. Proceedings of the IEEE, 1977, 65(10): 1428-1443.
- [3] 黄华国. 倒频谱分析研究 [J]. 强度与环境, 1982(1): 21-31.
HUANG Huaguo. Research on cepstrum analysis [J]. Structure & Environment Engineering, 1982(1): 21-31.
- [4] 黄华国. 倒频谱分析研究(续) [J]. 强度与环境, 1984(3): 30-35, 54.
HUANG Huaguo. Research on cepstrum analysis (continued) [J]. Structure & Environment Engineering, 1984(3): 30-35, 54.
- [5] 温继圆, 邵汝椿, 林颖. 倒频谱分析及其在齿轮故障诊断中的应用 [J]. 机械开发, 1987(2): 36-40.
WEN Jiyuan, SHAO Ruchun, LIN Ying. Cepstrum analysis and its application in diagnosis of gear fault [J]. Machine Development, 1987(2): 36-40.
- [6] 陈跃华, 李汝勤, 吴军广. 用倒频谱分析纱条条干不匀 [J]. 中国纺织大学学报, 1991, 17(2): 97-107.
CHEN Yuehua, LI Ruqin, WU Janguang. The application of cepstrum technique in yarn irregularity analysis [J]. Journal of China Textile University, 1991, 17(2): 97-107.
- [7] 陈果, 于明月, 刘永泉, 等. 基于倒频谱分析的航空发动机转静碰摩部位识别 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(7): 32-38.
CHEN Guo, YU Mingyue, LIU Yongquan, et al. Identifying rotor-stator rubbing positions using the cepstrum analysis technique [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(7): 32-38.
- [8] BORGHESANI P, PENNACCHI P, RANDALL R B, et al. Application of cepstrum pre-whitening for the diagnosis of bearing faults under variable speed conditions [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 36(2): 370-384.

(下转第 14 页)