

文章编号: 1000-8055(2005)02-0236-04

基于Wigner分布和经验模态分解的 减速器故障诊断

沈国际, 陶利民, 徐永成, 陈仲生

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了降低全寿命费用和增强飞行安全性, 对减速器故障进行检测和故障诊断是非常必要的。减速器振动信号的冲击性振动信号往往可以与故障引起的冲击联系在一起, 因此冲击性信号可以作为一个故障的表征形式。为了刻画故障信号, 许多研究探索在时频域内寻找微弱的故障特征信号。Wigner分布是最为常用的一种时频分布。然而, 故障特征信号经常被其他部件的振动信号和Wigner分布双线性运算固有的交叉项所污染。为了减少这些干扰, 本文将Wigner分布与经验模态分解结合起来。不同于传统的直接计算Wigner分布, 将经验模态分解作为一个预处理环节。振动信号被分解为一系列固有模态函数。仅仅计算与啮合振动相关的固有模态函数的Wigner分布。这种方法应用于减速器试验台数据, 结果表明诊断效果得到了明显提高。

关键词: 航空、航天推进系统; Wigner分布; 经验模态分解; 减速器诊断

中图分类号: TH113

文献标识码: A

Geabox Fault Diagnosis Based On Wigner Distribution and Empirical Mode Decomposition

SHEN Guo-ji, TAO Li-min, XU Yong-cheng, CHEN Zhong-sheng

(College of Mechatronics Engineering and Automation,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To reduce life cycle cost and to improve flight safety, the detection and diagnosis of gearbox faults is of vital importance. Impulsive vibration signals in gearbox are often associated with impulse resulted from faults, and thus, impulsive signals can be used as the symptoms of faults. In order to characterize fault signals, many approaches were used to seek salient characteristic signals in time-frequency domain. Wigner distribution is a common time-frequency representation. However, the fault characteristic signals are always baffled by signals from other vibration sources and the inherent cross-terms in bilinear operation of the Wigner distribution. To minimize the effect of these disturbances, Wigner distribution was combined with empirical mode decomposition. Rather than calculating Wigner distribution directly, we present a method using empirical mode decomposition as a preprocessor. The vibration signal is decomposed into a sum of intrinsic mode functions. Only the Wigner distributions of the intrinsic mode functions which relate to the gear meshing vibration are calculated. This approach was applied to the diagnosis of a gearbox test data, the results show that effectiveness of diagnosing is significantly improved.

Key words: aerospace propulsion system; Wigner distribution;

收稿日期: 2004-05-18; **修订日期:** 2004-09-20

作者简介: 沈国际(1975-), 男, 河南沁阳人, 国防科技大学机电工程与自动化学院博士生, 主要从事机械故障诊断与振动信号处理研究

为了降低维护费用和保障飞行安全,对减速器进行状态监控和故障诊断具有重要意义^[1]。振动信号分析在诊断减速器故障诊断方面一直占有重要地位^[2,3]。减速器内部零件的故障部位运行过程中的冲击,在振动信号中表现为振动信号中非平稳的冲击性信号。因此,这些冲击性信号可以作为故障部位和严重程度的表征。

对于早期故障,这些冲击性信号经常非常微弱。为了捕获这些微弱的非平稳性故障特征信号,将振动信号在时频域平面内展开,观察其时间-频率变化特性,是减速器故障诊断技术的重要研究方向。W igner 分布是最为常用的一种时频表示方法^[4~6]。对于振动信号分析而言,传感器接收的振动信号经常是多个振动源相互叠加的结果,是典型的多分量信号,这些振动源的特性都会在时频谱上表现出来,很难分辨特定的故障特征信号。更为严重的是,由于W igner 分布是一种双线性分布,其运算过程中的双线性分布会引起这些不同分量之间的交叉项干扰,这些交叉项与不同振动分量的自项在时频谱上相互重叠,造成W igner 时频谱难以解释和识别。

Cohen 将W igner 分布扩展为更为通用的Cohen 类。为了降低交叉项干扰,许多研究试图通过设计Cohen 类分布核函数,实现降低交叉项干扰的分布^[7,8]。遗憾的是,这些降低干扰的分布在降低交叉项干扰的同时,也降低了时频联合分辨率,牺牲了W igner 分布优良的时频分辨能力。同时,这些方法对于来自其它分量的干扰是无能为力的。

为了降低其它振动源的自项和交叉项的干扰,本文提供了一种将W igner 分布与经验模态分解结合在一起的解决思路,应用于减速器振动信号的分析。

1 方法原理

经验模态分解是Huang 提出的一种新的非线性信号处理技术,经验模态分解可以将任意复杂信号分解为一系列(一般数目很小)的固有模态函数^[9]。每个固有模态函数都必需满足2 个条件:(1)极点数与零点数相等或者相差为一;(2)在任意点,极大值构成的包络和极小值构成的包络平均值为零。

根据这种定义,经验模态分解过程可以表示

为以下步骤^[9]:(1)识别所有极点,将所有极大值点用3 次样条函数连接起来,构成极大值包络。同样可以构造极小值包络。信号将被包含在极大值包络和极小值包络之间。(2)定义极大值包络和极小值包络的均值为 m_1 。将原始数据和 m_1 的差值为固有模态函数原型 h_1 。这就是一次筛选过程。(3)理想情况下, h_1 应该是一个固有模态函数,因为 h_1 的构造过程保证了它满足固有模态函数的两个必要条件。然而,即使样条拟合非常接近,信号下降(上升)沿上的微小起伏由于零点在直角坐标到曲线坐标的转换也可能变为局部极点。因此,(1)(2)筛选过程应该重复进行,直到满足固有模态函数的条件为止,得到第一个固有模态函数。(4)对筛选出的残余信号根据(1)(2)(3)进行第二轮筛选,得到第二个固有模态函数。(5)重复(1)(2)(3)(4),直到残余信号为零或为单调信号为止。经验模态分解的结果是一系列固有模态函数和一个残余信号。

对于一个多分量信号:

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t)$$

信号 $s(t)$ 的W igner 分布定义为:

$$W_s(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i\omega\tau} d\tau = W_{11}(t, \omega) + W_{12}(t, \omega) + W_{21}(t, \omega) + W_{22}(t, \omega) \tag{1}$$

其中: $W_{11}(t, \omega)$ 是分量 $s_1(t)$ 的W igner 分布, $W_{22}(t, \omega)$ 是分量 $s_2(t)$ 的W igner 分布。 $W_{12}(t, \omega)$ 和 $W_{21}(t, \omega)$ 是由于双线性运算引起的交叉项干扰。

对于多分量信号 $s(t)$,应用经验模态分解可以将多分量信号 $s(t)$ 分解为一组固有模态函数和一个残余信号。理想情况下, $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 满足固有模态函数的要求, $s(t)$ 被分解为两部分:

$$s(t) = h_1(t) + h_2(t)$$

其中: $h_1(t) = s_1(t)$, $h_2(t) = s_2(t)$

或者: $h_1(t) = s_2(t)$, $h_2(t) = s_1(t)$

取决于两个分量尺度的对比。

因此,得到两个分量的W igner 分布:

$$W_1(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h_1\left(t + \frac{\tau}{2}\right) h_1^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

$$W_2(t, \omega) =$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h_2\left(t + \frac{\tau}{2}\right) h_2^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

由于不同的分量被分离开来分别计算Wigner分布, 因此同时降低了不同分量的干扰和交叉项干扰。

这种方法的主要问题是如何确定哪个固有模态函数是需要分析的特征信号。对于减速器故障诊断, 由于不同振动源的信号往往具有不同的振动频率, 例如轴承的故障特征频率和齿轮的啮合频率, 因此可以根据固有模态函数的频率确定需要分析的特征信号。

2 试验结果

为了验证这种方法的有效性, 我们将其应用于一组减速器振动数据, 该数据来自一个减速器试验台。减速器为一个单级螺旋锥齿轮减速器, 故障部位为输入齿轮, 输入齿数为29, 轴旋转频率为3 494 r/min, 计算得到啮合频率为1 689 Hz。加速度传感器安装在减速器表面, 采样频率为10 kHz, 前置滤波器上限截止频率为3 kHz。

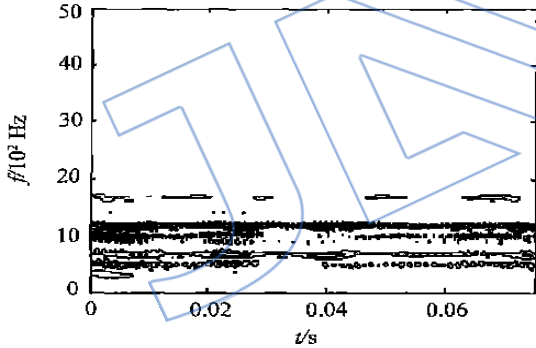


图1 正常状况原始信号的Wigner分布

Fig 1 Wigner distribution of original signal under normal condition

正常齿轮啮合时, 由于齿面比较完整, 啮合比较平稳, 啮合过程中没有明显的冲击振动。图1是原始信号的Wigner分布, 图中除了啮合频率成分, 在[500 Hz 1 200 Hz]可以看到明显的能量分布, 主要原因即是其它振动源的干扰和互相作用引起的交叉项干扰; 同时, 由于其它振动源引起的交叉项干扰, 导致啮合频率上的能量分布沿时间也不均匀。减速器表面振动信号经经验模态分解后, 根据功率谱可以确定第一个固有模态函数对应啮合振动, 图2画出了第一个固有模态函数的Wigner分布。由图2可以看出, 信号能量主要分布在啮合频

率附近, 沿时间轴分布比较均匀, 表明啮合振动比较平稳。

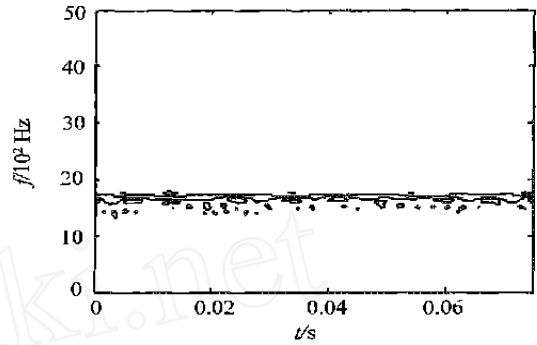


图2 正常状况第一个固有模态函数的Wigner分布

Fig 2 Wigner distribution of first Intrinsic Mode Function under normal condition

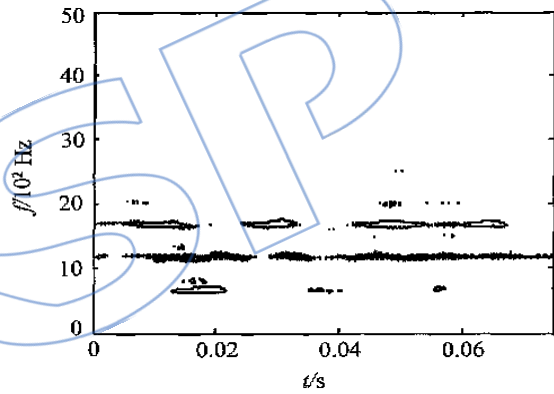


图3 点蚀状况原始信号的Wigner分布

Fig 3 Wigner distribution of original signal under pitting condition

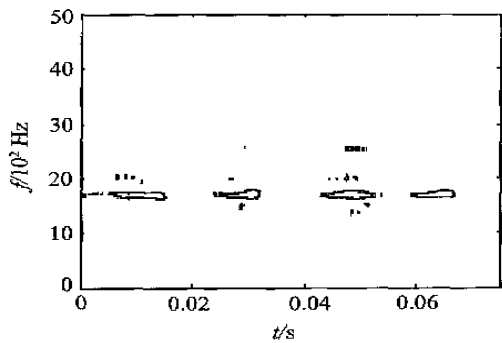


图4 点蚀状况第一个固有模态函数的Wigner分布

Fig 4 Wigner distribution of first Intrinsic Mode Function under pitting condition

当输入齿轮表面出现点蚀时, 齿面的周期性冲击会引起振动信号发生周期性的变化。表面振动信号的Wigner分布如图3所示。由图3可以看出, 此时啮合振动沿时间分布出现了一定的周期性, 表明

齿轮可能出现了故障;但是图中在 1 100 Hz 和 500 Hz 左右频率也有明显的能量分布,同时不易分辨出振动信号变化的周期,难以直接得到更为明确的故障信息。用经验模态分解处理减速器表面振动信号,得到的第一个固有模态函数同样对应啮合振动。其Wigner分布如图4所示,与图3相比,1 100 Hz 和 500 Hz 附近的能量分布消失了,啮合频率附近的能量分布也呈现出明显的周期性,其周期近似等于输入齿轮的旋转周期 17.2 ms,表明输入齿轮发生了故障。

对不同状况下的Wigner分布,图1和图3与图2和图4相比较,图2和图4具有更为明显的区别,更容易提取故障特征信息,有利于减速器故障的准确诊断。

3 结 论

随着现代齿轮制造技术的发展,齿轮的承载能力不断提高,而振动量级趋向减小,减速器齿轮的故障诊断难度更大。与传统的谱分析技术相比,Wigner分布等时频分析技术在提取微弱的故障信息技术方面具有先天的优势。本文提出的将经验模态分解与Wigner分布结合起来的方法,克服了Wigner分布技术的固有缺陷,提高了其用于减速器齿轮故障诊断的适应性。但同时,经验模态分解作为一项新出现的非平稳信号处理技术,算法本身还存在一定问题,诸如终止条件的选择、分辨率的要求等方面,还缺乏严密的理论指导,有待进一步的发展。

参考文献

- [1] Decker H J. Crack Detection for Aerospace Quality Spur Gears[R]. NASA/TM - 2002- 211492, 2002
- [2] 孟涛,廖明夫,李辉. 齿轮故障的时延相关解调法[J]. 航空动力学报, 2003, 18(1): 109~ 113
MENG Tao, LIAO Ming-fu, LI Hui. Detection and Diagnosis of the Gear Fault by the Delayed Correlation-Envelope Technique[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 18(1): 109 ~ 113
- [3] 孟涛,廖明夫. 齿轮故障诊断中的单齿分析技术[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 444~ 449
MENG Tao, LIAO Ming-fu. Single Gear Analysis Technique for the Detection of Gear Faults[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 18(3): 444~ 449
- [4] Staszewski W J, Worden K, Tomlinson G R. Time-Frequency Analysis in Gearbox Fault Detection Using the Wigner-Ville Distribution and Pattern Recognition[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1997, 11(5): 673~ 692
- [5] Dalpiaz G, Rivola A, Rubini R. Effectiveness and Sensitivity of Vibration Processing Techniques for Local Fault Detection in Gear [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2000, 14(3): 387~ 412
- [6] Baydar N, Andrew B. A Comparative Study of Acoustic and Vibration Signals in Detection of Gear Failures Using Wigner-Ville Distribution [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2001, 15(6): 1091~ 1107.
- [7] Zhao Y, Atlas L E, Marks R J. The Use of Cone-Shaped Kernels for Generalized Time-Frequency Representations of Non-Stationary Signals[J]. *IEEE Transactions on Acoustic, Speech and Signal processing*, 1990, 38: 1084~ 1091.
- [8] Gillespie B W, Atlas L E. Optimizing Time-Frequency Kernels for Classification[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, 49(3): 485~ 4961.
- [9] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1998, A 454(1971): 903~ 995

[1] Decker H J. Crack Detection for Aerospace Quality Spur