

基于局部均值分解的阶次跟踪分析及其在齿轮故障诊断中的应用

张 亢 程军圣 杨 宇

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室,长沙,410082

摘要:针对齿轮升降速过程中故障振动信号为多分量的调制信号以及故障特征频率随转速变化的特点,将局部均值分解(LMD)与阶次跟踪分析相结合,提出了一种新的齿轮故障诊断方法。首先采用阶次重采样将齿轮的时域振动信号转换为角域平稳信号,然后对角域信号进行 LMD 分解,得到若干个乘积函数(PF)分量,最后对各个 PF 分量的瞬时幅值进行频谱分析来提取齿轮的故障特征。通过对齿轮齿根裂纹故障试验振动信号的分析可知,该方法能有效地提取齿轮故障特征。

关键词:阶次跟踪分析;局部均值分解;齿轮;调制;故障诊断

中图分类号:TN911.7;TH165.3 **文章编号:**1004—132X(2011)14—1732—05

Order Tracting Analysis Based on Local Mean Decomposition and Its Applications to Gear Fault Diagnosis

Zhang Kang Cheng Junsheng Yang Yu

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for
Vehicle Body, Hunan University, Changsha, 410082

Abstract: Gear fault vibration signals in speed up or speed down processes were of multi-component modulated signals and the fault characteristic frequency varied with rotating speed. A new gear fault diagnosis method combined LMD with order tracking analysis was proposed. Firstly, the vibration signals in time domain were transformed into angle domain stationary signals by order resampling. Then, a set of product functions(PF) were obtained by decomposed the signals in angle domain with LMD. At last, each PF's instantaneous amplitude was analyzed by frequency spectrum to extracting the fault characteristics. The analysis results from the experimental fault vibration signals of gear crack demonstrate this method can extracted the gear fault characteristics effectively.

Key words: order tracting analysis; local mean decomposition(LMD); gear; modulation; fault diagnosis

0 引言

齿轮传动是机械设备中常见的传动方式,故对齿轮进行故障诊断具有重要意义。齿轮故障诊断的关键是从齿轮振动信号中提取故障特征,而齿轮作为一种旋转部件,其升降速过程的振动信号往往包含了丰富的状态信息,一些在平稳运行时不易反映的故障特征在升降速过程中可能会充分地表现出来^[1],因此对齿轮升降速过程的振动信号进行分析对于齿轮的故障诊断是非常有意义的。但齿轮升降速过程的振动信号是非平稳的,并且往往与轴的转速有着密切的关系,表现为特征频率成分与转速大多有确定的比值关系^[2],因

此直接进行频谱分析,往往会发生频率混叠,不能提取出故障特征信息。阶次跟踪分析通过跟踪参考轴的转速来实现恒角度增量采样,将时域非平稳信号转换为角域平稳信号,阶次跟踪分析能够提取振动信号中与转速有关的信息,同时对与转速无关的信号进行抑制^[3],因此阶次跟踪分析非常适合于用来提取齿轮升降速过程中的故障特征信息。另外,当齿轮发生故障时,其振动信号通常是多分量的调幅—调频信号,对调制的故障振动信号解调是一种有效的分析方法,然而传统的 Hilbert 变换解调法和检波解调法都有各自的局限性^[4]。局部均值分解(local mean decomposition, LMD)^[5]是一种新的调制信号分析方法,能够将一个多分量的调制信号自适应地分解为若干个乘积函数(product function, PF)分量之和。每一个 PF 分量由一个包络信号和一个纯调频信号

收稿日期:2010—09—10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50775068);国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA04Z414);长江学者和创新团队发展计划资助项目(531105050037)

相乘而得到,理论上是一个单分量的调制信号。包络信号就是该 PF 分量的瞬时幅值,PF 分量的瞬时频率则可由纯调频信号直接求出,因此整个 LMD 的分解过程实际上就是一个完整的解调过程,非常适合于处理齿轮故障振动信号。

本文将阶次跟踪分析与 LMD 方法相结合,提出一种新的齿轮故障诊断方法,并将其应用于变转速过程的齿轮故障诊断当中。首先采用阶次跟踪分析将齿轮振动信号从时域转换到角域,然后对角域的信号采用 LMD 方法进行分解,得到一系列 PF 分量以及它们的瞬时幅值和瞬时频率,最后对含有故障信息的 PF 分量的瞬时幅值进行频谱分析。实验结果表明,本方法能够准确地识别齿轮的工作状态,并且能有效地提取齿轮故障振动信号的特征。

1 LMD 方法

LMD 方法的本质是通过迭代从原始信号中分离出纯调频信号和包络信号,然后将纯调频信号和包络信号相乘便可以得到一个瞬时频率具有物理意义的 PF 分量,循环处理直至所有的 PF 分量分离出来。对于任意信号 $x(t)$,其分解过程如下^[5]:

(1) 确定原始信号第 i 个局部极值 n_i 及其对应的时刻 t_{n_i} ,计算相邻两个局部极值 n_i 和 n_{i+1} 的平均值 m_i

$$m_i = (n_i + n_{i+1})/2 \quad (1)$$

将所有平均值点 m_i 在其对应的时间段 $[t_{n_i}, t_{n_{i+1}}]$ 内延伸成一条线段,然后用滑动平均法进行平滑处理,得到局部均值函数 $m_{11}(t)$ 。

(2) 采用局部极值点 n_i 计算局部幅值 α_i :

$$\alpha_i = |n_i - n_{i+1}|/2 \quad (2)$$

将所有局部幅值点 α_i 在其对应的时间段 $[t_{n_i}, t_{n_{i+1}}]$ 内延伸成一条线段,然后采用滑动平均法进行平滑处理,得到包络估计函数 $\alpha_{11}(t)$ 。

(3) 将局部均值函数 $m_{11}(t)$ 从原始信号 $x(t)$ 中分离出来,即去掉一个低频成分,得到

$$h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t) \quad (3)$$

(4) 用 $h_{11}(t)$ 除以包络估计函数 $\alpha_{11}(t)$ 以对 $h_{11}(t)$ 进行解调,得到

$$s_{11}(t) = h_{11}(t)/\alpha_{11}(t) \quad (4)$$

对 $s_{11}(t)$ 重复上述步骤便能得到 $s_{11}(t)$ 的包络估计函数 $\alpha_{12}(t)$,若 $\alpha_{12}(t)$ 不等于 1,则 $s_{11}(t)$ 不是一个纯调频信号,需要重复上述迭代过程 n 次,直至 $s_{1n}(t)$ 为一个纯调频信号,即 $s_{1n}(t)$ 的包络估计函数 $\alpha_{1(n+1)}(t) = 1$,所以,有

$$\left. \begin{aligned} h_{11}(t) &= x(t) - m_{11}(t) \\ h_{12}(t) &= s_{11}(t) - m_{12}(t) \\ &\vdots \\ h_{1n}(t) &= s_{1(n-1)}(t) - m_{1n}(t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} s_{11}(t) &= h_{11}(t)/\alpha_{11}(t) \\ s_{12}(t) &= h_{12}(t)/\alpha_{12}(t) \\ &\vdots \\ s_{1n}(t) &= h_{1n}(t)/\alpha_{1n}(t) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

理论上,迭代终止的条件为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_{1n}(t) = 1 \quad (7)$$

(5) 把迭代过程中产生的所有包络估计函数相乘便可以得到包络信号(瞬时幅值函数):

$$\alpha_1(t) = \alpha_{11}(t)\alpha_{12}(t)\cdots\alpha_{1n}(t) = \prod_{q=1}^n \alpha_{1q}(t) \quad (8)$$

(6) 将包络信号 $\alpha_1(t)$ 和纯调频信号 $s_{1n}(t)$ 相乘便可以得到原始信号的第一个 PF 分量:

$$PF_1(t) = \alpha_1(t)s_{1n}(t) \quad (9)$$

$PF_1(t)$ 包含了原始信号中频率值最高的成分,是一个单分量的调幅-调频信号, $PF_1(t)$ 的瞬时幅值就是包络信号 $\alpha_1(t)$, $PF_1(t)$ 的瞬时频率 $f_1(t)$ 则可由纯调频信号 $s_{1n}(t)$ 求出,即

$$f_1(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\arccos(s_{1n}(t)))}{dt} \quad (10)$$

(7) 将第一个 PF 分量 $PF_1(t)$ 从原始信号 $x(t)$ 中分离出来,得到一个新的信号 $u_1(t)$,将 $u_1(t)$ 作为原始数据重复以上步骤,循环 k 次,直到 u_k 为一个单调函数为止,即

$$\left. \begin{aligned} u_1(t) &= x(t) - PF_1(t) \\ u_2(t) &= u_1(t) - PF_2(t) \\ &\vdots \\ u_k(t) &= u_{k-1}(t) - PF_k(t) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

原始信号 $x(t)$ 能够被所有的 PF 分量和 u_k 重构,即

$$x(t) = \sum_{p=1}^k PF_p(t) + u_k(t) \quad (12)$$

2 基于阶次跟踪分析与 LMD 的齿轮故障诊断

2.1 阶次跟踪分析

阶次跟踪分析首先根据参考轴的转速信息对时域信号进行等角度重采样,将时域非平稳信号转换为角域平稳信号,再对角域平稳信号进行谱分析得到阶次谱。阶次跟踪分析能够提取信号中与参考轴转速有关的信息,同时抑制与转速无关的信号,因此非常适合分析旋转机械在变转速过程下的振动信号。实现阶次跟踪分析技术的关键在于,如何实现被分析信号相对于参考轴的等角度重采样,即阶次重采样。常用的阶次重采样方

法有硬件阶次跟踪法^[6]、计算阶次跟踪(computed order tracking, COT)法^[7]和基于瞬时频率估计的阶次跟踪法^[8]等。硬件阶次跟踪法直接通过专用的模拟设备实现信号的等角度重采样,实时性好,但只适用于轴转速较稳定的情况,且成本很高;基于瞬时频率估计的阶次跟踪法不需要专门的硬件设备,无需考虑硬件安装问题,且成本较低,但是不适用于分析多分量信号,而实际工程信号大多为多分量信号,因此其实际应用意义不大;COT 法通过软件的形式实现等角度重采样,分析精度高,对被分析的信号没有特别的要求,并且无需特定的硬件,因此是一种应用广泛的阶次跟踪分析方法。根据试验条件采用 COT 法实现信号的阶次重采样,其具体步骤如下:①对振动信号和转速信号分两路同时进行等时间间隔(间隔为 Δt)采样,得到异步采样信号;②通过转速信号计算等角度增量 $\Delta\theta$ 所对应的时间序列 t_i ;③根据时间序列 t_i 的值,对振动信号进行插值,求出其对应的幅值,得到振动信号的同步采样信号,即角域平稳信号。

2.2 齿轮故障诊断实例

升降速过程中的齿轮故障振动信号通常是分量的调幅—调频信号,并且故障特征频率会随着转速的变化而改变。针对升降速过程齿轮故障振动信号的这些特点,提出了基于阶次跟踪分析和 LMD 的齿轮故障诊断方法。首先采用阶次跟踪分析将齿轮升降速过程的时域振动信号转换成角域平稳信号;然后对角域信号进行 LMD 分解,得到一系列 PF 分量,以及各个 PF 分量的瞬时幅值和瞬时频率;最后对各个 PF 分量的瞬时幅值进行频谱分析,便可以有效地提取出齿轮故障特征。

为了验证方法的正确性,在旋转机械试验台上进行了齿轮正常和齿根裂纹两种工况的试验。该系统中,电机输入轴齿轮齿数 $z_1=55$,输出轴齿轮齿数 $z_2=75$ 。在输入轴齿轮齿根上加工出小槽,以模拟齿根裂纹故障,因此齿轮啮合阶次 $x_m=55$,故障特征阶次 $x_c=1$ 。图 1 和图 2 所示分别为由转速传感器测得的输入轴瞬时转速 $n(t)$,以及由振动传感器测得的齿轮故障振动加速度 $a(t)$,其中采样频率为 8192 Hz,采样时间为 20 s。

从图 1 可以看出,输入轴转速首先从 150 r/min 逐渐加速至 1410 r/min,然后再减速到 820 r/min,而加速度信号的幅值也随着作出了相应的变化。不失一般性,截取图 2 中 5~7 s 升速过程的信号 $a_1(t)$ 进行分析。

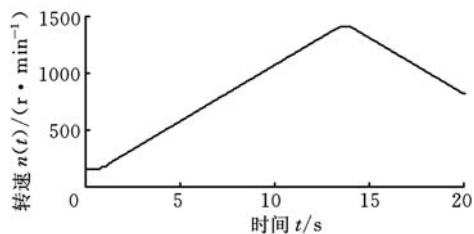


图 1 输入轴的瞬时转速 $n(t)$

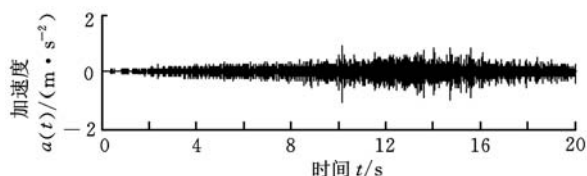


图 2 齿轮故障振动加速度信号 $a(t)$

图 3 所示为直接对 $a_1(t)$ 进行频谱分析的结果,由于转速是变化的,频谱图发生了频率混叠,从中找不到啮合频率以及齿轮故障特征频率,因此无法判断系统的真实状态。采用本文方法首先对 $a_1(t)$ 进行阶次重采样,设定每转采样点数为 400,即最大分析阶数为 200,得到的角域信号 $j_1(\theta)$ 如图 4 所示,其中横坐标已由时间变为了弧度。图 5 为 $j_1(\theta)$ 的阶次谱图,可以看出在阶次 $O=55$ 和 $O=110$ 处有清晰的峰值,分别对应着 1 倍和 2 倍的啮合阶次,说明阶次分析从很大程度上消除了频率混叠,但是由于 $j_1(\theta)$ 仍然为一个多分量的调幅—调频信号,因此反映故障特征的边频带还不清晰。

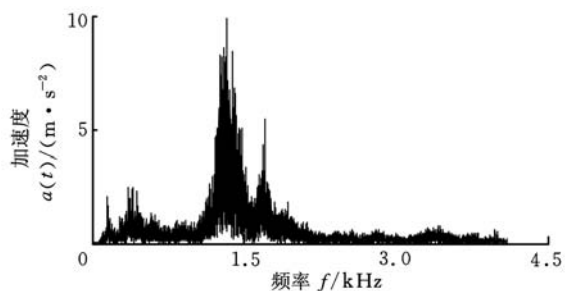


图 3 齿轮故障振动加速度信号的频谱

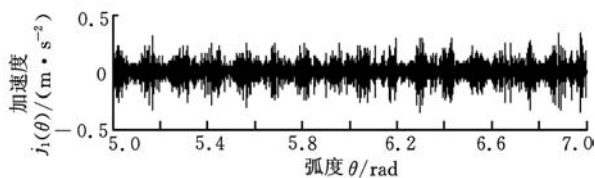


图 4 阶次重采样后的齿轮故障振动加速度信号 $j_1(\theta)$

进一步对 $j_1(\theta)$ 作 LMD 分解,得到 7 个 PF 分量与 1 个余量,结果如图 6 所示。由 LMD 方法的理论可以知道,每一个 PF 分量都是一个单分量的调幅—调频信号,并且在得到 PF 分量的同时可以得到其瞬时幅值,即 $j_1(\theta)$ 的调制信息,而齿轮的

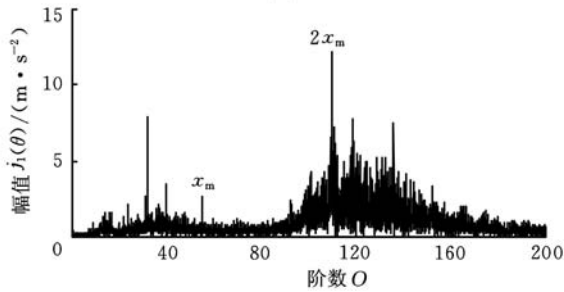


图 5 $j_1(\theta)$ 的阶次谱

故障特征往往包含在调制信息中,因此再对含有故障特征信息的 PF 分量的瞬时幅值进行频谱分析便能提取出齿轮的故障特征。图 7 所示为第一个 PF 分量 $PF_1(\theta)$ 的瞬时幅值 $\alpha_1(\theta)$,图 8 所示为对 $\alpha_1(\theta)$ 的频谱分析结果,可以看出在阶次 $O=1$ 处有清晰的谱线,对应着齿轮的故障特征阶次 x_c ,从而说明本文方法是有效的。

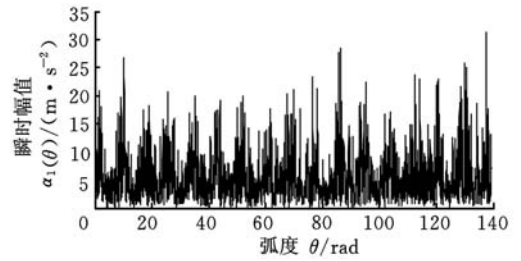


图 7 $PF_1(\theta)$ 的瞬时幅值 $\alpha_1(\theta)$

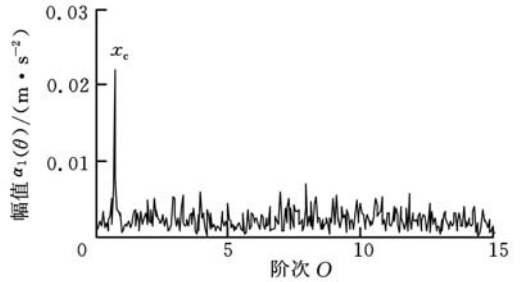


图 8 第 1 个 PF 分量的幅值谱

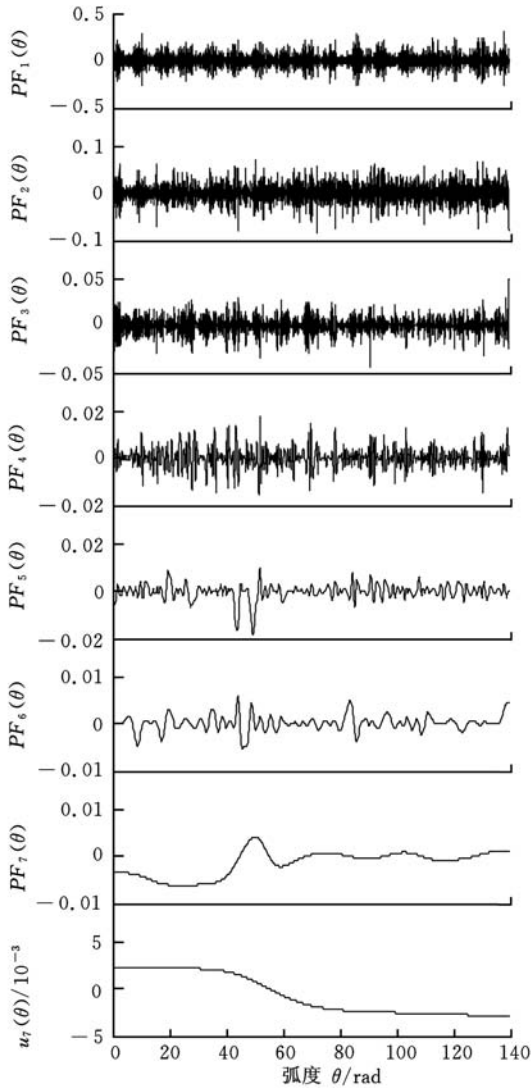


图 6 角域信号 $j_1(\theta)$ 的 LMD 分解结果

对同型号的正常齿轮采用本文方法也进行了分析。图 9 和图 10 所示分别为其瞬时转速 $n(t)$

和振动加速度 $a(t)$ 的时域波形,其中采样频率为 8192Hz,采样时间为 20s。同样截取 5~7s 升速过程的信号 $a_1(t)$ 进行分析,图 11 所示为 $a_1(t)$ 阶次重采样后的信号 $j_1(\theta)$,其中每转采样点数为 400,最大分析阶数为 200。对 $j_1(\theta)$ 进行 LMD 分解,其中 $PF_1(t)$ 分量的瞬时幅值 $\alpha_1(\theta)$ 的频谱如图 12 所示,从中找不到齿轮故障的特征阶次,与实际情况相符。进一步说明了本文方法的正确性。

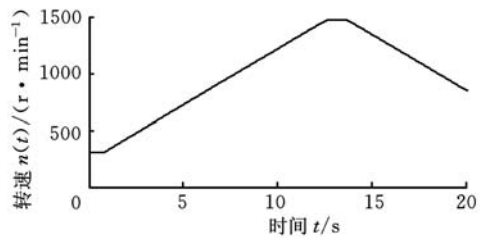


图 9 输入轴的瞬时转速 $n(t)$

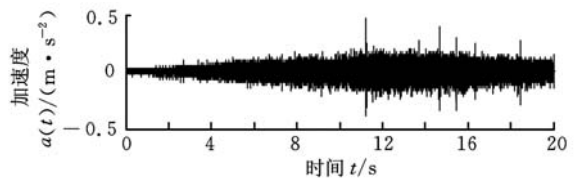


图 10 正常齿轮的振动
加速度信号 $a(t)$

经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)^[9]是一种多分量调制信号分析方法,并且已经得到了广泛的应用。为了对比,采用 EMD 方法同样对图 4 和图 11 所示的阶次重采样后的信号进行分解,得到一系列本征模函数(IMF)分量,然后通过 Hilbert 变换计算各个

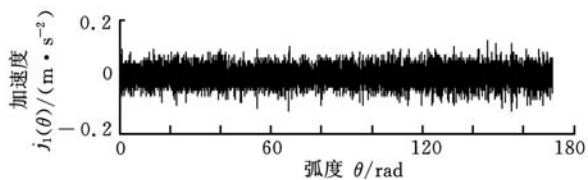


图 11 阶次重采样后的正常
齿轮振动加速度信号 $j_1(\theta)$

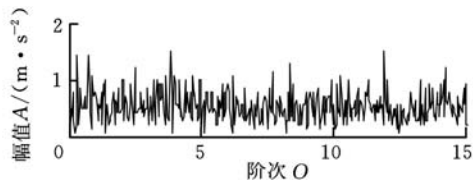


图 12 第一个 PF 分量的幅值谱

IMF 分量的瞬时幅值和瞬时频率,两个信号的第一个 IMF 分量的瞬时幅值的频谱分别如图 13 和图 14 所示。可以看出,基于 EMD 方法的阶次跟踪分析同样能提取出齿轮故障特征并且正确地识别出齿轮的状态。但是,与 EMD 方法相比,LMD 方法具有迭代次数少、端点效应不明显、得到的瞬时频率虚假成分少等优点^[10]。

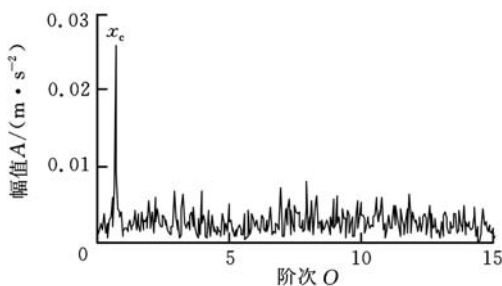


图 13 第一个 IMF 分量的幅值谱

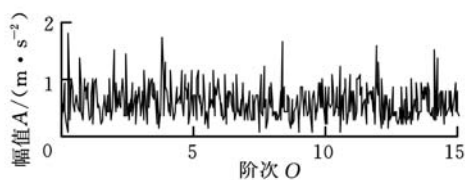


图 14 第一个 IMF 分量的幅值谱

3 结论

(1)在分析齿轮变转速状态下的振动信号时,转速波动会引起频谱图出现频率混叠,而阶次跟踪分析通过对信号进行阶次重采样能够在很大程度上消除频率混叠,使频谱图的谱线清晰可读。

(2)齿轮故障时的振动信号为一多分量的调幅—调频信号,采用 LMD 方法能将其分解为若

干个 PF 分量之和,同时得到各个 PF 分量的瞬时幅值和瞬时频率,实现了原信号的解调。对含有齿轮故障特征的 PF 分量的瞬时幅值进行频谱分析,能够准确地提取出齿轮故障特征信息。

(3)对齿轮正常和齿根裂纹两种工况的振动信号进行了分析,分析结果表明,本文方法能够准确地反映出齿轮的实际工况。

参考文献:

- [1] 李志农,丁启全,吴昭同,等. 旋转机械升降速过程的双谱—FHMM 识别方法[J]. 振动工程学报, 2003,16(2):171-174.
- [2] 李辉,郑海起,杨绍普. 齿轮箱起动过程阶次倒双谱故障诊断方法[J]. 北京交通大学学报,2008,32(4):1-5.
- [3] 康海英,栾军英,郑海起,等. 基于阶次跟踪和经验模态分解的滚动轴承包络解调分析[J]. 机械工程学报,2007,43(8):119-122.
- [4] 程军圣,张亢,杨宇. 局部均值分解方法及其在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 中国机械工程,2009,20(22):2711-2717.
- [5] Jonathan S S. The Local Mean Decomposition and Its Application to EEG Perception Data[J]. Journal of the Royal Society Interface,2005,2(5):443-454.
- [6] 郭瑜,秦树人,梁玉前. 时频分析阶比跟踪技术[J]. 重庆大学学报,2002,25(5):17-21.
- [7] Fyfe K R, Munck E D S. Analysis of Computed Order Tracking [J]. Mechanical Systems and Signal Processing,1997,11(2):187-205.
- [8] 郭瑜,秦树人,汤宝平,等. 基于瞬时频率估计的旋转机械阶比跟踪[J]. 机械工程学报,2003,39(3):32-36.
- [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]. Proc. R. Soc. Lond. A,1998,454:903-995.
- [10] 程军圣,张亢,杨宇,等. 局部均值分解与经验模式分解的对比研究[J]. 振动与冲击,2009,28(5):13-16.

(编辑 张 洋)

作者简介:张 亢,男,1983 年生。湖南大学机械与运载工程学院博士研究生。主要研究方向为信号分析与处理、机械故障诊断。发表论文 10 篇。程军圣,男,1968 年生。湖南大学机械与运载工程学院教授、博士研究生导师。杨 宇,女,1971 年生。湖南大学机械与运载工程学院教授、博士。