

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.01.006

自适应时间尺度分解方法及其应用

解志杰, 宋宝玉, 郝明晖, 张 锋

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 150001 哈尔滨)

摘要: 针对齿轮故障振动信号的非线性、非平稳和多分量的特征,在定义了瞬时频率具有物理意义的本征时间尺度函数(intrinsic time-scale function, ITF)的基础上,结合固有时间尺度分解中基线信号的构造方法,提出自适应时间尺度分解(adaptive time-scale decomposition, ATD)的时频分析方法,该方法可以自适应地将一个复杂信号分解为若干个瞬时频率具有物理意义的本征时间尺度分量之和.仿真分析验证了ATD方法的有效性以及定义本征时间尺度函数方法的合理性.分别将ATD、经验模态分解(EMD)、局部均值分解(LMD)和固有时间尺度分解(ITD)与包络解调分析相结合应用于斜齿轮故障诊断中,实验结果表明:自适应时间尺度分解方法在保证分解结果正确性的前提下,计算效率方面具有明显优势,将该方法与包络解调相结合能够有效提取到齿轮的故障特征.

关键词: 本征时间尺度函数;时频分析;自适应时间尺度分解;故障诊断

中图分类号: TH132.41

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)01-0033-07

Adaptive time-scale decomposition and its application to gear fault diagnosis

XIE Zhijie, SONG Baoyu, HAO Minghui, ZHANG Feng

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: Aiming at the problem of nonlinear, non-stationary and multi-components of fault gear vibration signal, and with defining the intrinsic time-scale function (ITF) whose instantaneous frequency has real physical significance, a new time-frequency analysis method named adaptive time-scale decomposition (ATD) is proposed based on the construction method of baseline signal of the intrinsic time scale decomposition (ITD). By the ATD method, a complex multi-components signal can be adaptively decomposed into the summation of a number of ITFs whose instantaneous frequencies own physical sense. The simulation results verify the effectiveness of the ATD method and the feasibility of the definition of ITF. Combined with envelop demodulation analysis, the ATD, the empirical mode decomposition (EMD), the local mean decomposition (LMD) and the intrinsic time scale decomposition (ITD) are respectively applied to the gear fault diagnosis. The experimental results show that the ATD method has obvious advantage in computational efficiency with the guarantee of decomposition correctness, and the method can effectively extract gear fault features combining with the envelope demodulation analysis.

Keywords: intrinsic time-scale function; time-frequency analysis; adaptive time-scale decomposition; gear fault diagnosis

齿轮传动系统是由电机、齿轮箱和负载等多个设备组成的复杂系统,且在齿轮箱有限的空间

内存在多级齿轮、轴和轴承等诸多旋转部件,所有运动部件的振动信号均被传感器接收.由振动源到传感器和传感器到信号采集设备之间的信号传输过程也会带来随机干扰和其他运动部件的影响.而且,当齿轮存在裂纹、点蚀和断齿等故障时,其振动信号往往表现出非线性、非平稳特征.因此由加速度传感器采集到的故障齿轮的振动信号,具有明显的非线性、非平稳和多分量的特征.由于

收稿日期: 2014-03-04.

基金项目: 欧盟玛丽居里计划 FP7-PEOPLE-2009-IF 项目 (253403).

作者简介: 解志杰(1985—),男,博士研究生;

宋宝玉(1958—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 宋宝玉, sby@hit.edu.cn.

时频分析方法能同时提供振动信号在时域和频域的局部化信息,因而在齿轮、轴承等旋转机械故障诊断中得到了广泛应用.典型的时频分析方法有短时傅里叶变换(STFT)、Winger-Vill 分布、小波和小波包分析等^[1],但是这些方法都存在各自的局限性,而且在严格意义上,这些方法都不是自适应信号处理方法.

自适应时频分析是一种新型的基于信号本身特性的信号分析方法.最具代表性的是 1998 年 Huang 等^[2]提出的经验模式分解(empirical mode decomposition, EMD),该方法在定义了瞬时频率具有物理意义的本征模式函数(intrinsic mode function, IMF)及其合理解法的基础上,通过上下极值点包络线的平均来构造基线信号,从而可以将任意复杂信号分解为若干个本征模式分量之和.EMD 方法自提出后受到了相关领域内学者的广泛关注,在机械故障诊断中也得到了应用^[3-4].英国学者 Smith^[5]于 2005 年提出了另外一种自适应时频分析方法——局域均值分解方法(local mean decomposition, LMD).该方法首先定义了瞬时频率具有物理意义的乘积函数(production function, PF),其中每一个 PF 分量由一个包络信号和一个纯调频信号相乘得到,包络信号就是该 PF 分量的瞬时幅值,而 PF 的瞬时频率可以由纯调频信号求出.通过对相邻极值点的平均构造基线信号,再利用滑动平均的方法进行平滑处理,该方法能够自适应地将一个复杂的多分量信号分解为若干个瞬时频率有物理意义的乘积函数,即 PF 分量.程军圣等^[6-7]将 LMD 方法引入到机械故障领域,并且进行了深入研究.2007 年,Frei 等^[8]提出了一种新的自适应时频分析方法——本征时间尺度分解方法(intrinsic time-scale decomposition, ITD),该方法在定义了瞬时频率具有物理意义的合理旋转分量(proper rotation, PR)的前提下,通过信号本身的线性变换获得基线信号.ITD 方法可以自适应地将复杂信号分解为相互独立的若干个瞬时频率具有物理意义的 PR 分量之和.Frei 等^[8]对 ITD 方法和 EMD 方法进行了对比研究,结果表明在计算时间、抑制端点效应等方面,ITD 要优于 EMD 方法.在旋转机械故障诊断领域,ITD 方法也得到了深入研究和探索性应用^[9-11].

上述自适应时频分析方法的核心思想是:在定义了具有物理意义的单一模态分量的基础上,根据被分析信号的自身形态特征或信息分解获取基线信号,从而使复杂的多分量信号被分解为若干个瞬时频率具有物理意义的单一模式分量.而

且在分解过程中不需要对信号的形态、结构等特征进行预测和限制.

本文基于经验模态分解中本征模式函数的定义和提出的基本思想,定义了一种新的瞬时频率具有物理意义的本征时间尺度分量(intrinsic time-scale component, ITC).同时利用固有时间尺度分解快速、有效地构造基线信号的方法,提出一种新的时频分析方法——自适应时间尺度分解方法(adaptive time-scale decomposition, ATD),该方法可以自适应地将一个复杂信号分解为若干个瞬时频率具有物理意义的本征时间尺度分量和一个单调残差项之和.仿真和实验结果验证了该方法的有效性和实用性.

1 自适应时间尺度分解方法

1.1 ITD 方法构造基线信号的基本原理

固有时间尺度分解(ITD)是最近提出的一种时频分析算法,可以将多分量的信号自适应地分解为一列表征信号特征的旋转分量与一个单调趋势分量之和^[8].ITD 方法首先在信号任意相邻的两个极值点之间定义基线提取算子,再对各数据段进行线性变换而获得基线信号.

假设 x_t 为一维信号(t 为时间序列, $t \geq 0$),定义 L 为基线提取算子,将 L 作用于原始信号,得

$$x_t = L \cdot x_t + (1 - L) \cdot x_t = L_t + H_t. \quad (1)$$

式中: $L_t = L \cdot x_t$ 为原始信号的低频分量,称为基线信号; H_t 为原始信号的高频分量,称为固有旋转分量.

设 x_t 的极值点为 $X_k (k = 1, 2, \dots, M)$, 其相对应的时刻为 $\tau_k (k = 1, 2, \dots, M)$, 定义 $\tau_0 = 0$. 当 x_t 在某一时间间隔内为常数时, τ_k 选择为时间间隔的右端点,为简化符号,记 $L_k = LX_k$. 假设 L_t 和 H_t 的定义域为 $[0, \tau_k]$, x_t 的定义域为 $[0, \tau_{k+2}]$, 则在连续的极值点 (τ_k, τ_{k+1}) 范围内有

$$Lx_t = L_t = L_k + \left(\frac{L_{k+1} - L_k}{X_{k+1} - X_k} \right) (x_t - X_k). \quad (2)$$

其中

$$L_{k+1} = \alpha \left[X_k + \left(\frac{\tau_{k+1} - \tau_k}{\tau_{k+2} - \tau_k} \right) (X_{k+2} - X_k) \right] + (1 - \alpha) X_{k+1}, \quad (3)$$

α 为一常量,取值范围为 $\alpha \in (0, 1)$, 一般取 0.5.

按照式(2)和式(3)求解得到原始信号 x_t 的基线信号 L_t , 则固有旋转分量 H_t 为

$$H_t = x_t - L_t.$$

上面的计算过程表明,固有时间尺度方法采用分段的形式对信号中任意相邻的两个极值点进

行线性变换得到基线信号, 计算效率较高. 由式(2)可知, 该方法极大地保留了待分解信号在时间尺度上的特征信息, 可以提高计算精度, 减少迭代次数.

1.2 自适应时间尺度分解方法及其分解过程

固有时间尺度分解方法中基线信号是通过信号本身的两次线性变换得到的, 与 EMD 中使用三次样条插值的方法相比, 极大地缩短了计算时间, 提高了拟合精度. 但是, 由于 ITD 方法中固有旋转分量的构造是仅通过单次分解完成的, 对于复杂的机械振动信号而言, 难以保证其瞬时频率具有物理意义^[2], 这就导致了 ITD 方法分解得到的固有旋转分量信号会出现明显的失真. 本文基于经验模式分解方法对 IMF 定义的基本思想, 结合 ITD 构造基线信号的方法, 提出了自适应时间尺度分解方法. 该方法能够将一个复杂的非线性、非平稳、多分量信号分解为若干个瞬时频率具有物理意义且相互独立的本征时间尺度分量和一个单调的残余趋势项之和.

本征时间尺度分量 (intrinsic time-scale function, ITF) 的概念是为了得到瞬时频率具有物理意义的单一模式分量而提出的, ITF 分量需要满足以下两个条件:

1) 在整个数据序列中, 局部极值点的数量 N_e 与过零点的数量 N_z 必须相等, 或者最多只相差 1 个, 即满足

$$|N_e - N_z| \leq 1. \quad (4)$$

2) 对单一模式分量 $x(t)$, 首先确定其 $X_k (k = 1, 2, \dots, M)$, 以及极值点对应的时刻 $\tau_k (k = 1, 2, \dots, M)$, 在相邻两个局部极值点所确定的时间段内, 由式(2)和式(3)求解原始基线信号 L_t , 基线信号 L_t 是原始信号 $x(t)$ 的均值曲线, 所以有

$$L_t = 0, t \in (t_k, t_{k+1}). \quad (5)$$

在实际应用过程中, 可以设定一个极小的变动量 Δ , 当 L_t 满足 $\frac{1}{n} \sum_{t=t_k}^{t_{k+1}} L_t \leq \Delta$ 时, 即认定已经满足该条件.

本征时间尺度分量的定义思想来源于经验模式分解方法中对单一模式分量 IMF 的定义. 第一个限定条件: 为了使信号满足类似于传统平稳高斯过程的分布, 可以去掉骑行波. 第二个限定条件要求信号的局部均值为零. 但是, 对于非平稳信号而言, 很难保证其每一时刻局部均值都为零, 所以采用信号中相邻局部极值点限定的一小段时间范围内基线信号为零强迫信号局部对称, 平滑不对称的振幅. 文献[2, 12]对本征模式函数 IMF 进

行了深入研究, 详细论证了单一模式分量局部对称性的必要性与合理性.

根据上面所定义的本征时间尺度分量 ITF, 对一维信号 $x(t)$ 进行自适应时间尺度分解, 可以将其分解为若干个 ITF 分量与一个单调趋势项之和, 具体分解过程如下:

1) 把原始信号 $x(t)$ 作为待处理信号, 确定该信号的所有局部极值点 (τ_k, X_k) , 利用式(1)和(2)构造基线信号

$$m(t) = L_t.$$

2) 从待处理信号 $x(t)$ 中减去基线信号 $m(t)$, 得到剩余信号

$$h_1(t) = x(t) - m(t).$$

检测 $h_1(t)$ 是否满足本征时间尺度分量定义的两个基本条件, 即式(4)和式(5). 如果不满足, 则把 $h_1(t)$ 作为待处理信号, 重复上述两个步骤迭代 k 次, 直至 $h_{1k}(t)$ 是一个本征时间尺度分量, 记为

$$I_{ITF_1} = h_{1k}(t).$$

3) 从原始信号 $x(t)$ 中分解出第一个本征时间尺度分量 I_{ITF_1} 之后, 从 $x(t)$ 中减去 I_{ITF_1} , 得到剩余序列 $r_1(t)$:

$$r_1(t) = x(t) - I_{ITF_1}.$$

4) 将 $r_1(t)$ 作为新的“原始信号”重复上述步骤, 依次可以得到第 2 个、第 3 个, 直至第 n 个本征时间尺度分量, 记为 $I_{ITF_1}, I_{ITF_2}, \dots, I_{ITF_n}$, 直至 $r_n(t)$ 为一个单调函数或者小于预设的极小阈值. 这样就可以将原始信号 $x(t)$ 分解为若干个本征时间尺度分量和一个单调残余趋势项的和, 即

$$x(t) = \sum_{i=1}^n I_{ITF_i}(t) + r_n(t).$$

通过上述 4 个步骤, 自适应时间尺度分解方法能够将一个多分量信号自适应地分解为 n 个本征时间尺度分量 I_{ITF} 之和, 而且每一个本征时间尺度分量都是通过反复迭代达到单一模式分量判据的要求. 由式(2)和(3)可知, 自适应时间尺度分解中基线信号上与待分解信号极值点对应时刻的值 L_k 是从 $2 \sim M - 1$, 不能够直接计算得到 L_1 和 L_M 的值, 即存在端点效应.

2 仿真信号验证

为了验证所定义的本征时间尺度分量的合理性, 利用 ATD 和 ITD 方法对文献[13]中构造的仿真信号进行分解, 并对两种方法的分解结果进行对比分析. 仿真信号 $x(t)$ 由调幅 - 调频信号 $x_1(t)$ 和调幅信号 $x_2(t)$ 叠加而成, 其表达式如下:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) = [1 + 0.5\sin(5\pi t)]\cos[300\pi t + 2\cos(10\pi t)] + 2e^{-2t}\sin(60\pi t), \quad t \in [0, 1].$$

仿真信号 $x(t)$ 的采样频率为 2 048 Hz, 其时域波形如图 1 所示, 对该信号分别进行 ITD、ATD 分解, 分解结果如图 2、3 所示。

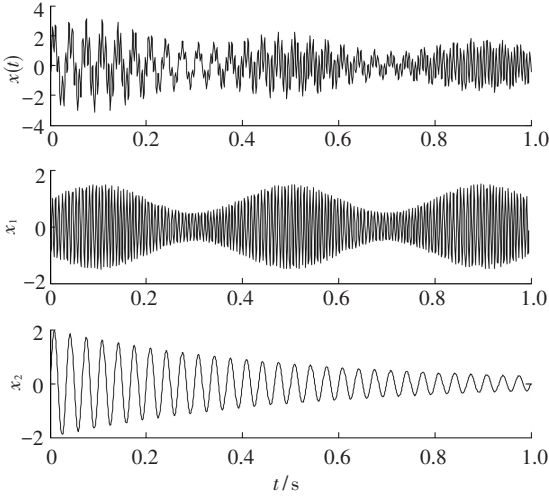


图 1 仿真信号及其自拟分量时域波形

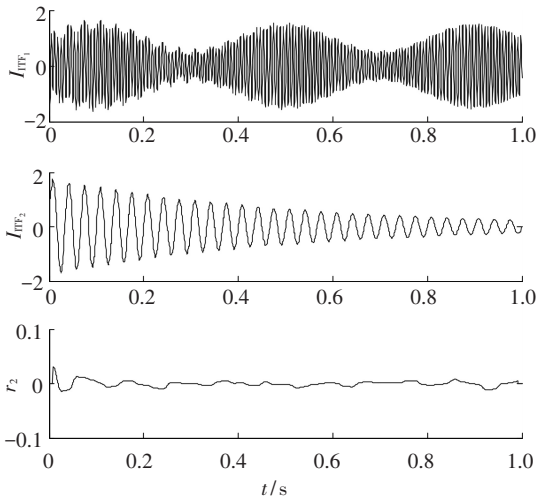


图 2 仿真信号 ITD 方法的分解结果

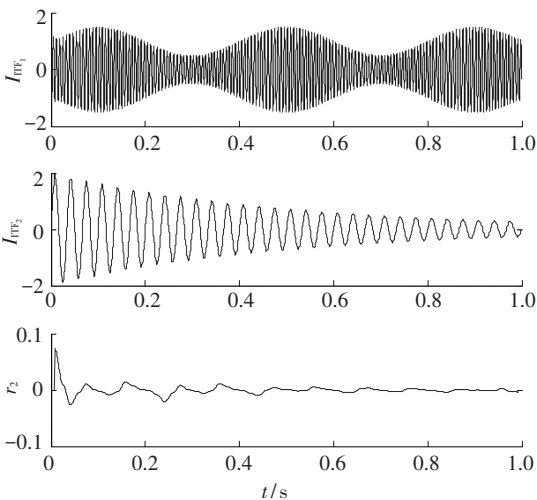


图 3 仿真信号 ATD 方法的分解结果

对比图 1、2 可知, 由 ITD 方法分解得到的第

一个固有旋转分量 P_{R1} 在 $t \in [0, 0.1]$ 的范围内, 信号具有明显的不对称性, 分解结果失真, 不能够准确反映原始信号中调幅调频分量 $x_1(t)$ 的真实成分。这是由于 ITD 方法中没有对固有旋转分量给出明确的定义, 仅通过单步分解得到的固有旋转分量很难保证其瞬时频率具有物理意义。由图 3 可以看出, ATD 方法分解得到的两个本征时间尺度分量与原始信号中的对应分量信号的时域波形基本一致, 能够准确反映原始信号的组成成分。

上述仿真结果验证了 ATD 方法的有效性, 采用本文方法定义的本征时间尺度函数满足单一模式分量的条件, 该定义方法具有一定的可行性和合理性。

3 自适应时间尺度分解方法在齿轮故障诊断中的应用

将 ATD、EMD、LMD 和 ITD 方法应用于齿轮故障诊断试验中, 并进行对比分析。实验装置为英国诺丁汉特伦特大学先进设计制造工程中心提供的化学搅拌器用齿轮箱故障诊断测试系统, 齿轮箱示意图如图 4 所示。实验齿轮箱由两级传动组成, 斜齿轮 1 (齿数 23) 和斜齿轮 2 (齿数 82) 构成一级传动, 弧齿锥齿轮 3 和 4 组成齿轮箱的二级传动, 其中斜齿轮 2 为故障齿轮。试验中, 在斜齿轮 2 的单个齿面上设置面积比率为 25% 的断齿故障。轴 1 为输入轴, 转速 $n_1 = 750 \text{ r/min}$, 斜齿轮 2 所在轴 2 的转速 $n_2 \approx 210 \text{ r/min}$, 转频 $f \approx 3.51 \text{ Hz}$, 斜齿轮 1 与斜齿轮 2 的啮合频率为 287.5 Hz。振动信号由安装在斜齿轮 2 的轴承座上方齿轮箱体处, 采样频率为 20 kHz, 采样点为 16 384 个。

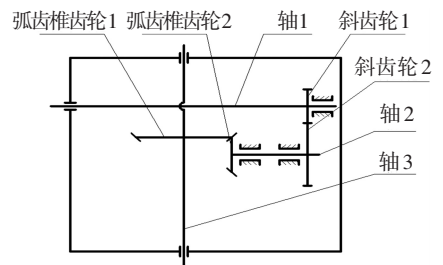


图 4 实验齿轮箱示意图

首先确定 4 种自适应时频分析方法对比的前提条件:

1) 为防止由于对单一模式分量的局部对称性的限定条件过于苛刻而导致过度筛选, 对 ATD 和 EMD 增加一个筛选停止准则, 即通过限制两个连续的处理结果之间的标准差 S_d 作为判据^[2]。 S_d 的定义如下:

$$S_d = \sum_{t=0}^T \frac{|h_{ik}(t) - h_{i(k-1)}(t)|^2}{h_{i(k-1)}^2(t)}$$

一般 $S_d < 0.5$ 即可, 这里取 $S_d = 0.3$. 而对于 LMD 方法的筛选停止准则没有统一的标准, 这里参考原作者的取值原则, 即 $1 - \Delta \leq a_{in}(t) \leq 1 + \Delta$, 其中 $\Delta = 10e - 7$.

2) 从实际应用的角度出发, 对各方法的分解层数不加限制, 分解效率的对比以最终彻底分解完成时间为依据, 而且不考虑单次分解的迭代次数, 所有方法对齿轮故障振动信号的处理均在同一台电脑上完成.

3) 上述 4 种方法均存在端点效应, 采用端点镜像延拓的方法抑制端点效应^[14].

图 5 为斜齿轮 2 单个齿面断齿面积为 25% 时齿轮箱振动信号的时域波形和频谱. 如图 5(a) 所示, 时域波形具有明显的周期性特征, 其频率成分如图 5(b) 所示, 存在 94、288、453 和 576 Hz 的峰值, 频谱成分较为复杂, 出现了未知频率的成份和噪声, 齿轮故障特征频率不突出.

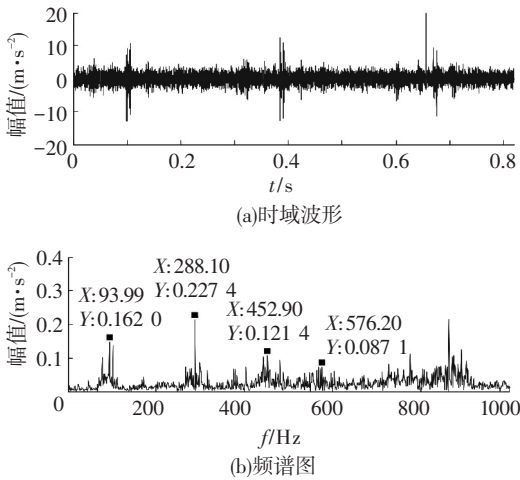


图 5 25%断齿故障振动信号时域波形和频谱

对齿轮故障振动信号进行 ATD 分解, 可以获得 7 个本征时间尺度分量, 其中前 3 个 I_{ITF} 分量和趋势项的时域波形如图 6 所示. 由于齿轮的故障振动信号通常在高频段, 而且由图 6 可以发现 I_{ITF_3} 中周期性脉冲信号幅值较小, 故障特征不明显, 所以采用 Hilbert 解调的方法求解 I_{ITF_1} 和 I_{ITF_2} 分量的包络谱如图 7 所示. 由图 7 可知, 分量 I_{ITF_1} 和 I_{ITF_2} 的包络谱在转频 f 及其高倍频处存在幅值较大的谱线, 说明该轴上的齿轮存在局部故障, 与实际情况吻合, 验证了 ATD 方法的有效性.

对齿轮故障振动信号进行 EMD 分解, 可以获得 9 个本征模式分量, 其中前两个 I_{IMF} 分量的包络解调谱如图 8 所示. 由图 8 可知, 分量 I_{IMF_1} 和 I_{IMF_2} 的包络谱在频率 f 及其高倍频存在幅值较大

的谱线.

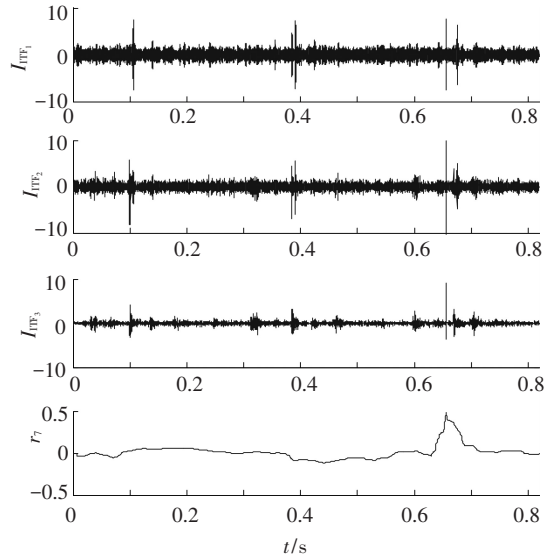


图 6 ATD 分解的前 3 个分量及趋势项时域波形

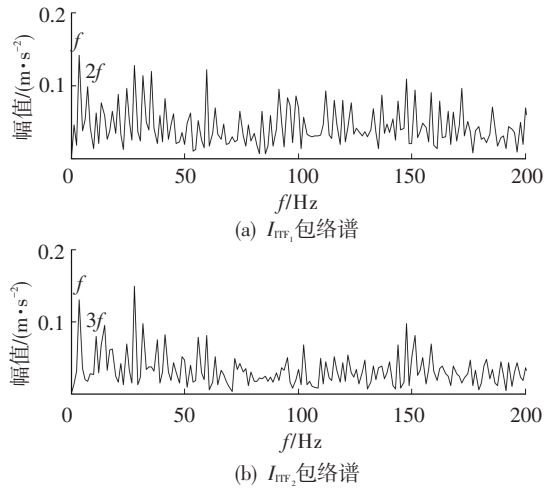


图 7 ATD 分解的前两个分量的包络解调谱

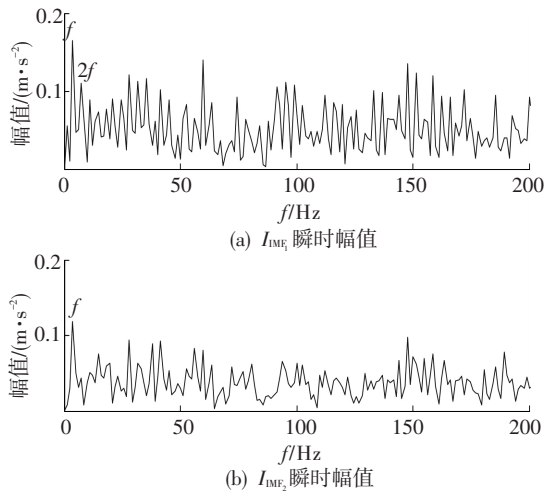


图 8 EMD 分解的前两个分量的包络解调谱

对齿轮故障振动信号进行 LMD 分解, 可以获得 7 个乘积分量, 其中前两个 P_F 分量的包络解调

谱如图 9 所示.由图 9 可知,分量 P_{F_1} 和 P_{F_2} 的包络谱在转频 f 及其高倍频都有明显的谱线.

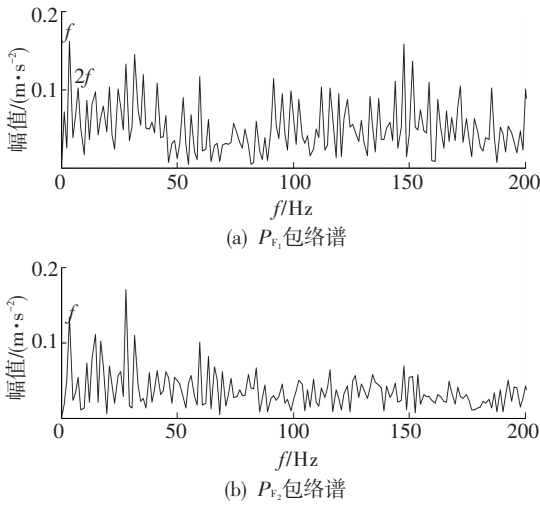


图 9 LMD 分解的前两个分量的包络解调谱

对齿轮故障振动信号进行 ITD 分解,可以获得 6 个固有旋转分量,其中前两个 P_R 分量的包络解调谱如图 10 所示.图 10(a)显示,分量 P_{R_1} 包络解调谱中在故障特征轴频率 f 及其高倍频处存在幅值较大的谱线.对比图 7~10 可以发现,分量 P_{R_2} 包络谱中在齿轮故障特征频率 f 处存在幅值较小的谱线,出现了转频调制的现象,但是特征频率的高倍频处的谱线不明显,说明齿轮的故障特征不突出,存在一定程度的失真.

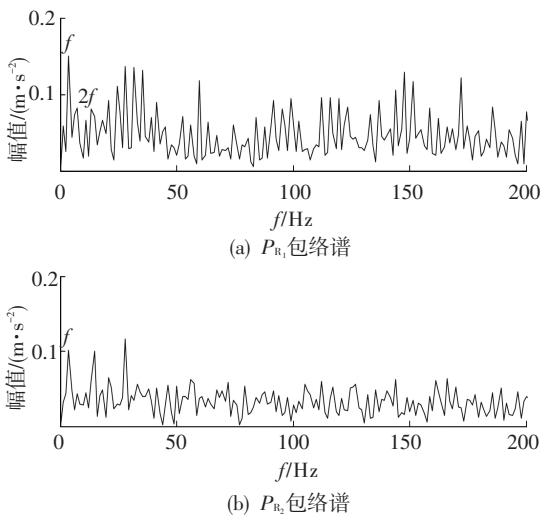


图 10 ITD 分解的前两个分量的包络解调谱

对上述 4 种时频分析方法在处理实测信号中的运算时间和分解层数进行了统计,其结果如表 1 所示.由表 1 中数据不难发现,ATD 方法在保证了对信号分解准确性的前提下,计算效率高,明显优于其他 3 种方法.ATD 方法采用分段的形式对原始信号中任意相邻的两个局部极值点之间的数据进行线性变换获得基线信号,充分利用了信号本身的特征信息,因此迭代次数少,计算效率

高;而且定义了瞬时频率具有物理意义的本征时间尺度分量,并以此为依据对原始信号进行不断筛分,保证了分解结果的准确性.而 EMD 方法是通过对信号上下极值点包络线的平均获取基线信号,没用充分考虑信号的内在特征,而且每次筛分过程都要对信号整体进行三次样条插值,所以计算量大,迭代次数多,在分解精度方面较 LTD 方法低.LMD 方法基线信号是通过相邻极值点的平均值进行平滑处理来获取的,而且每次筛分过程都要对局部均值函数和局部包络函数进行滑动平均运算,因此计算效率最低.LTD 方法和 ITD 方法基线信号的求解方法相同,因此在计算效率方面差别不大.但是 ITD 方法仅通过单次迭代获取 P_R 分量,很难保证各分量瞬时频率具有物理意义,其对齿轮故障振动信号的分解结果出现了一定程度的失真.

表 1 4 种方法分解效率对比

方法	运算时间/s	分解层数目
LTD	2.699	7
EMD	18.297	9
LMD	86.116	7
ITD	0.813	6

4 ATD 方法的自适应性分析

自适应时间尺度分解方法首先依据信号的局部极值点信息在时间尺度上对原始信号进行分段,再通过信号自身的线性变换求解基线信号,进而通过反复迭代将信号分解为若干个瞬时频率具有物理意义的本征时间尺度分量.该方法把信号中任意相邻的两局部极值点对应的的时间跨度作为特征时间尺度参数,先把信号中特征时间尺度小的波动成分分离出来,随着分解次数的增多,剩余信号的特征时间尺度参数不断增大,直至特征时间尺度参数大于信号自身的长度,即无局部极值点时分解结束.因此,ATD 方法的分解过程就是将原始信号中各成分按特征时间尺度参数由小到大排序,也是频率由高到低的排序过程.ATD 方法对信号的分解完全根据信号自身的特征信息进行,不需要对被分析信号的形态、结构等特征进行预测和限制.而且对于非线性、非平稳的信号,ATD 方法采用的特征时间尺度参数直接反应了信号波形的波动,所以 ATD 分解得到的 I_{ITF} 分量能够自动地对应信号中不同频率段的波形成分.因此,自适应时间尺度分解方法是真正意义上的自适应时频分析方法.

5 结 论

1) 仿真信号分析结果表明,采用相邻局部极值点限定时间尺度内基线信号为零的方式可以使信号局部对称,由该方法定义的本征时间尺度函数满足单一模式分量的条件.

2) 将 ATD 方法与包络解调分析相结合应用于齿轮断齿故障诊断中,结果表明 ATD 方法适用于非线性、非平稳、多分量复杂信号的分解,可以有效地应用于齿轮故障诊断.

3) ATD 方法与 EMD、LMD 和 ITD 方法的对比分析结果表明,在保证分解结果正确性的前提下,ATD 方法的运算效率要明显优于 EMD 和 LMD 方法.

参考文献

- [1] 何正嘉,陈进,王太勇,等.机械故障诊断理论及应用[M].北京:高等教育出版社,2010:68-82.
- [2] HUANG N E, SHEN Zheng, 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 A, 1998, 454: 903-993.
- [3] 杨江天,周培钰.经验模态分解和 Laplace 小波在机车柴油机齿轮系故障诊断中的应用[J].机械工程学报,2011,47(7):109-115.
- [4] LEI Yaguo, HE Zhengjia, ZI Yanyang. Application of the EEMD method to rotor fault diagnosis of rotating machinery [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(4): 1327-1338.
- [5] SMITH J 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] CHENG Junsheng, YANG Yi, YANG Yu. A rotating machinery fault diagnosis method based on local mean decomposition [J]. Digital Signal Processing: A Review Journal, 2012, 22(2): 356-366.
- [7] 程军圣,杨宇,于德介.局部均值分解方法及其在齿轮故障诊断中的应用[J].振动工程学报,2009,22(1):76-82.
- [8] FREI MARK G, OSORIO I. Intrinsic time-scale decomposition: time-frequency-energy analysis and real-time filtering of non-stationary signals [J]. Proceedings of the Royal Society A, 2007, 463:321-342.
- [9] 钟先友,曾良才,赵春华,等.基于 B 样条本征时间尺度分解和对角切片谱的轴承故障诊断[J].振动与冲击,2013,32(23):201-206.
- [10] 杨宇,李杰,潘海洋,等. VPMCD 和改进 ITD 的联合智能诊断方法研究[J].振动工程学报,2013,26(4):608-616.
- [11] 程军圣,郑近德,杨宇.基于局部特征尺度分解的经验包络解调方法及其在机械故障诊断中的应用[J].机械工程学报,2012,48(19):87-94.
- [12] 钟佑明,秦树人,汤宝平. Hilbert-Huang 变换中的理论研究[J].振动与冲击,2002,21(4):13-17.
- [13] 杨宇,曾鸣,程军圣.局部特征尺度分解方法及其分解能力研究[J].振动工程学报,2012,25(5):602-609.
- [14] 许宝杰,张建民,徐小力,等.抑制 EMD 端点效应方法的研究[J].北京理工大学学报,2006,26(3):196-200.

(编辑 杨波)