

基于改进的局部特征尺度分解和归一化 正交的时频分析方法

郑近德,程军圣,曾 鸣

(湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室,湖南长沙 410082)

摘 要: 针对希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)中经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)和希尔伯特变换(Hilbert Transform, HT)的不足,提出了一种基于改进的局部特征尺度分解(Improved Local Characteristic-scale Decomposition, ILCD)和归一化正交(Normalized Quadrature, NQ)的时频分析方法. ILCD克服了LCD的固有缺陷,在精确性和正交性等方面要优于EMD和LCD方法.同时为了克服HT的不足,提出了一种基于经验调幅调频分解标准化估计瞬时频率的归一化正交(Normalized Quadrature, NQ)方法.通过仿真信号将EMD, LCD与ILCD进行对比,同时将标准希尔伯特变换,直接正交法与NQ进行对比,结果表明了论文方法的有效性.转子碰摩故障数据分析结果进一步验证了论文方法的有效性和优越性.

关键词: Hilbert-Huang变换; 经验模态分解; 局部特征尺度分解; 时频分析; 转子碰摩

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2015)07-1418-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.07.026

A New Time-Frequency Analysis Method Based on Improved Local Characteristic-Scale Decomposition and Normalized Quadrature

ZHENG Jin-de, CHENG Jun-sheng, ZENG Ming

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

Abstract: Aiming to resolve the problems of Hilbert-Huang transform(HHT), which contains empirical mode decomposition (EMD) and Hilbert transform(HT), a new time-frequency analysis method based on improved local characteristic-scale decomposition(ILCD) and normalized quadrature(NQ) was proposed in this paper. ILCD solved the intrinsic problem of LCD and outperformed the EMD and LCD in accuracy and orthogonality. In addition, the NQ method for estimating instantaneous frequency was proposed based on the empirical AM-FM decomposition. By comparing ILCD with EMD and LCD, and comparing NQ with normalized HT and direct quadrature(DQ), the analysis results indicate that the proposed method is predominant. Finally, the proposed method was applied to fault diagnosis of rotor local rubbing and the conclusions verified its effectiveness and excellence.

Key words: Hilbert-Huang transform(HHT); empirical mode decomposition(EMD); local characteristic-scale decomposition (LCD); time-frequency analysis; rotor rubbing

1 引言

传统的傅里叶分析方法只能处理线性和平稳信号,而现实生活中的大部分信号是非线性和非平稳的,傅里叶分析不适合处理这类信号.时频分析方法由于能够同时提供信号时域和频域局部信息而在处理非线性和非平稳信号方面得到了广泛应用^[1].常用的时频分析方法主要包括:加窗傅里叶变换^[2], Wigner-Ville分布^[3],小波

分析^[4]以及 Hilbert-Huang变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)^[5,6]等.但这些方法又有各自的局限.加窗傅里叶变换具有固定的时频窗口,时频分辨率是固定的;Wigner-Ville分布存在无法消除的交叉项干扰;小波分析则需要事先选择小波基和分解层数,缺乏自适应性. HHT是美籍华人HUANG等提出的一种自适应的时频分析方法,包括两部分:经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)和 Hilbert变换(Hilbert Transform, HT).首先

采用 EMD 自适应地将一个复杂信号分解为若干个内禀模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)之和,再对得到的每一个 IMF 分量通过 HT 估计其瞬时幅值和瞬时频率,从而得到原始信号的完整时频分布.尽管 HHT 在图像和语音信号处理,地震信号分析,机械故障诊断等很多领域都得到了应用^[7~11],但 EMD 会产生过包络和欠包络,易出现频率混淆,端点效应等问题,HT 易产生负频率等,这些问题仍在研究中.

最近文献[12]通过定义一种新的均值曲线提出了一种改进的 EMD 方法,称之为局部特征尺度分解(Local Characteristic-Scale Decomposition, LCD).LCD 自适应地将一个复杂信号分解为若干个相互独立的内禀尺度分量(Intrinsic Scale Component, ISC)之和.LCD 在迭代速度和分解能力,抑制模态混淆等方面有一定的优势,已经被用于机械故障诊断领域,取得了很好的效果^[13].但是 LCD 通过直线连接相邻的同类极值,会与数据点相交,不符合包络线的定义,仍需要改进.本文通过采用分段多项式取代原来的直线连接,从而提出了改进的局部特征尺度分解(Improved LCD, ILCD).

HHT 方法中通过对每一个 IMF 分量做 HT 估计其瞬时频率和瞬时幅值,从而得到信号的时频分布,边际谱和 Hilbert-Huang 谱等^[5,6].但是 HT 容易产生无法解释的负频率以及严重的端点效应.能量算子解调^[14]虽然克服了 HT 的端点效应,但只适合分析幅值和频率为常函数的信号,而对频率和幅值变化较大的信号则会有较大误差.HUANG 在文献[15]中提出了一种标准化的希尔伯特变换(Normalized HT, NHT),即首先采用经验调幅调频分解(Empirical AM-FM Decomposition, EAD)对信号进行归一化,再对得到调频信号做 HT,该方法抑制了负频率的产生,与 HT 和能量算子方法相比有一定的提高,但端点效应仍然存在;在同一文献中 HUANG 还提出了采用直接正交法(Direct Quadrature, DQ)估计纯调频信号的瞬时频率,DQ 方法虽然克服了 NHT 的端点效应缺陷,但其估计的瞬时频率有一定的波动,尤其是在信号的极值点处误差较大.论文针对 DQ 存在的问题和基于信号的正交分量,提出了一种新的瞬时频率估计方法——归一化正交法(Normalized Quadrature, NQ).NQ 方法克服了 DQ 存在的不足,精确性更高.

综上所述,论文提出的时频分析方法主要包括两个步骤:(1)首先采用 ILCD 将信号分解为若干个 ISC 分量之和;(2)再采用经验调幅调频分解将 ISC 分量进行归一化处理,写成瞬时包络(即瞬时幅值)与纯调频信号的乘积形式;采用 NQ 方法估计纯调频信号的瞬时频率,最后即可得到原始信号完整的时频分布.论文通过仿真信号和实测信号将提出的方法与现有方法进行了对比,结果表明了论文方法的有效性和优越性.

2 LCD 与 ILCD 方法

2.1 LCD 方法简述

LCD 假设任意一个非平稳信号可被分解为若干个相互独立的 ISC 之和,其中 ISC 满足条件^[12,13]:

(1)整个数据段内,极大值为正,极小值为负,极值点与过零点个数相差不超过一个;

(2)设信号 $s(t)$ 所有极值点为 (τ_k, S_k) ($k = 1, 2, \dots, M$).任意两个相邻的极大(或极小)值 (τ_{k-1}, S_{k-1}) 与 (τ_{k+1}, S_{k+1}) 的连线 l_k 在 τ_k 处的函数值 A_k 满足:

$$A_k + S_k = 0 \quad (1)$$

其中 $A_k = \left[S_{k-1} + \left(\frac{\tau_k - \tau_{k-1}}{\tau_{k+1} - \tau_{k-1}} \right) (S_{k+1} - S_{k-1}) \right]$ (2)

$k = 2, \dots, M - 1$.

对信号 $s(t)$, LCD 分解步骤如下:

(1)令 $r_i(t) = s(t)$, $i = 0$;

(2)确定 $r_i(t)$ 的所有极值点 (τ_k, S_k) ($k = 1, 2, \dots, K$), 并计算

$$L_k = 0.5A_k + 0.5S_k \quad (3)$$

其中 A_k 如式(2)所定义.采用三次样条函数拟合所有 (τ_k, L_k) , 得到均值曲线 $m_{i1}(t)$, 将 $m_{i1}(t)$ 从 $r_i(t)$ 中分离, 即

$$r_i(t) = r_i(t) - m_{i1}(t) \quad (4)$$

(3)若 $r_i(t)$ 满足 ISC 判据条件, 输出 $r_i(t)$, 并令 $I_{i+1}(t) = r_i(t)$; 否则, 执行步骤(2) j 次, 直到 $r_i(t) = r_i(t) - m_{ij}(t)$ 是一个 ISC 分量, 记 $I_{i+1}(t) = r_i(t)$;

(4) $i = i + 1$; 重复上述步骤(2) ~ (3), 直至剩余信号 $r_i(t)$ 为单调或极值点个数不超过三个或能量与原始信号相比可以忽略的函数, 于是

$$s(t) = \sum_{i=1}^{n-1} I_i(t) + r_n(t) \quad (5)$$

LCD 方法中 L_k 的定义实际上是基于相邻极大(或极小)值的连线在中间极小(或极大)值处的函数值与该极值的均值.但是此种方式定义的均值曲线对于幅值变化缓慢的信号能够较准确地反映信号的均值, 而对于幅值变化较大或相邻极大(或小)值差异较大的信号, 二者的连线会与数据相交, 因此连线失去了包络线的意义; 基于此, 论文采用分段三次多项式连接相邻极大(或极小)值, 由此提出了改进的 LCD(ILCD)方法.

2.2 ILCD

设信号 $s(t)$ 的极值点为 (τ_i, S_i) ($i = 1, 2, \dots, K$), (τ_{k-1}, S_{k-1}) 、 (τ_{k+1}, S_{k+1}) 为相邻的极大值点, (τ_k, S_k) 、 (τ_{k+2}, S_{k+2}) 为相邻极小值点, ($k = 2, \dots, K - 2$). 为方便, 函数 $u(t)$ 在区间 $[\tau_{k-1}, \tau_{k+1}]$ 上的部分记为 $u_k(t)$, 即: $u_k(t) = u(t)|_{t \in [\tau_{k-1}, \tau_{k+1}]}$. 若 $u_k(t)$ 满足:

- (1) $u_k(\tau_{k-1}) = S_{k-1}, u_k(\tau_{k+1}) = S_{k+1}$;
- (2) $u'_k(\tau_{k-1}) = s'(\tau_{k-1}), u'_k(\tau_{k+1}) = s'(\tau_{k+1})$;
- (3) $u_k(t) \geq s(t), t \in [\tau_{k-1}, \tau_{k+1}]$.

则称 $u_k(t)$ 为信号 $s(t)$ 的局部上包络线. 通过改变 k 的值即可得到信号 $s(t)$ 的上包络线. 同理可以定义局部下包络线和下包络线. 将上、下包络线的均值作为均值曲线采用 EMD 过程进行迭代. 这种方法已有学者进行了研究, 与 EMD 相比优越性不是很明显, 本文不采用此种方式定义均值曲线, 而采用如下的方式.

设: $u_k(t) = a_k t^3 + b_k t^2 + c_k t + d_k, t \in [\tau_{k-1}, \tau_{k+1}]$.

由于条件(2)中 $s'(\tau_{k-1})$ 和 $s'(\tau_{k+1})$ 表示信号 $s(t)$ 在极值点 τ_{k-1}, τ_{k+1} 处的微分, 因此, $s'(\tau_{k-1}) = s'(\tau_{k+1}) = 0$. 由条件(1)和(2), 解关于 a_k, b_k, c_k, d_k 的四元一次方程组

$$\begin{cases} a_k \tau_{k-1}^3 + b_k \tau_{k-1}^2 + c_k \tau_{k-1} + d_k = S_{k-1} \\ a_k \tau_{k+1}^3 + b_k \tau_{k+1}^2 + c_k \tau_{k+1} + d_k = S_{k+1} \\ 3a_k \tau_{k-1}^2 + 2b_k \tau_{k-1} + c_k = 0 \\ 3a_k \tau_{k+1}^2 + 2b_k \tau_{k+1} + c_k = 0 \end{cases} \quad (6)$$

得到唯一 $u_k(t)$, 于是定义 L_k :

$$L_k = (S_k + u_k(\tau_k))/2 \quad (7)$$

对于下包络线依据同样的方式定义 L_k ; 两种方式定义的 L_k 具有统一的形式:

$$L_k = l_{k-1} S_{k-1} + l_k S_k + l_{k+1} S_{k+1} \quad (8)$$

其中, $l_k = 0.5$,

$$l_{k-1} = [-2\tau_k^3 + 3\tau_{k-1}\tau_{k+1}^2 - 6\tau_{k-1}\tau_k\tau_{k+1} + 3\tau_k^2(\tau_{k-1} + \tau_{k+1}) - \tau_{k+1}^3]/2(\tau_{k-1} - \tau_{k+1})^3,$$

$$l_{k+1} = [2\tau_k^3 - 3\tau_{k-1}\tau_{k+1}^2 + 6\tau_{k-1}\tau_k\tau_{k+1} - 3\tau_k^2(\tau_{k-1} + \tau_{k+1}) + \tau_{k-1}^3]/2(\tau_{k-1} - \tau_{k+1})^3.$$

对所有 (τ_k, L_k) 采用三次样条进行插值即得到新的均值曲线. L_k 实际上是基于相邻三个极值点的加权平均, 因此能够很好地反映信号的局部特征尺度信息.

将 LCD 中步骤(2)中 L_k 的定义按照式(8)定义, 其余步骤不变, 即为 ILCD. 实际上, 原 LCD 方法中的 L_k 也是相邻的三个极值点按照一定比例的加权, 区别在于加权系数的不同.

3 归一化过程与归一化正交

ILCD 将一个复杂信号分解为若干个 ISC 分量和一个趋势项之和. 为了得到原始信号的时频信息, 需要估计每一个 ISC 分量的瞬时频率和瞬时幅值. DQ 方法避开了希尔伯特变换, 根据函数三角变换关系, 定义信号的正交分量, 从而可直接估计信号的瞬时频率. DQ 方法提高了瞬时频率估计值的精确性, 能够有效地抑制端点效应的产生, 但瞬时频率在纯调频信号的极值点

处没有定义, 而是依据其他已知部分通过三次样条函数插值而得, 这导致瞬时频率在极值点处易出现较大的波动和误差. 基于此, 论文提出了一种新的基于 EAD 和 NQ 的解调方法.

3.1 经验调幅调频分解(EAD)

EAD 归一化过程简述如下^[15]:

(1) 对于单分量信号 $s(t)$, 确定 $|s(t)|$ 的所有极大值点, 记为 $(t_k, s_k), k = 1, 2, \dots, M$. 并在两端延拓出新的极值点:

$$\begin{cases} t_0 = 0 \\ s_0 = s_3 - \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}(t_3 - t_0) \end{cases} \quad (9a)$$

$$\text{和} \quad \begin{cases} t_{M+1} = T \\ s_{M+1} = \frac{s_M - s_{M-1}}{t_M - t_{M-1}}(t_{M+1} - t_{M-2}) + s_{M-2} \end{cases} \quad (9b)$$

其中 T 是信号的时间长度.

(2) 采用三次样条对所有极大值点插值, 得到的包络函数记为 $a_{11}(t)$. 则 $s(t)$ 可通过 $a_{11}(t)$ 实现标准化, 即: $s_1(t) = s(t)/a_{11}(t)$;

(3) 如果 $s_1(t)$ 不是 FM 信号, 重复上述过程 n 次,

$$s_2(t) = \frac{s_1(t)}{a_{12}(t)}, \dots, s_n(t) = \frac{s_{n-1}(t)}{a_{1n}(t)} \quad (10)$$

直到 $s_n(t)$ 是一个 FM 信号, 记为 $F(t)$. 则存在 $\theta(t)$, 使得 $F(t) = \cos\theta(t), \theta'(t) > 0$.

(4) 信号的瞬时幅值定义为

$$A(t) = \frac{s(t)}{F(t)} = a_{11}(t)a_{12}(t)\cdots a_{1n}(t) \quad (11)$$

$s(t)$ 被分为瞬时包络和纯调频信号的乘积, 即:

$$x(t) = A(t) \cdot F(t) = A(t) \cdot \cos\theta(t) \quad (12)$$

EAD 经验地实现了单分量信号的归一化, 将调幅部分与调频部分分离, 由于调频部分幅值为 1, HT 便不再受 Bedrosian 定理的限制, 于是由 HT 便可得到信号的瞬时相位和瞬时频率, 这个过程称之为 NHT. NHT 虽然避免了负频率的产生, 提高了 HT 的性能, 但仍存在严重的端点效应.

3.2 NQ 方法

3.2.1 DQ 方法

HUANG 提出的另一种瞬时频率估计方法称之为 DQ 法^[15]. 由 EAD, $x(t)$ 可被分解为包络信号 $A(t)$ 与纯调频信号 $F(t)$. $A(t)$ 即为 $x(t)$ 的瞬时幅值. 定义 $F(t)$ 的正交分量为 $Q(t)$, 则

$$\begin{aligned} Q(t) &= \sin\varphi(t) \\ &= \begin{cases} \sqrt{1 - F^2(t)}, & F'(t) \geq 0 \\ -\sqrt{1 - F^2(t)}, & F'(t) < 0 \end{cases} \\ &= -\text{sgn}[F'(t)]\sqrt{1 - F^2(t)} \end{aligned} \quad (13)$$

由此, $x(t)$ 瞬时相位可定义为

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \arctan \left[\frac{\sin \varphi(t)}{\cos \varphi(t)} \right] \\ &= \arctan \left[\frac{\operatorname{sgn}[F'(t)] \sqrt{1-F^2(t)}}{F(t)} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

将 $\varphi(t)$ 展开后求导, 于是得到瞬时频率

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{|F'(t)|}{\sqrt{1-F^2(t)}} \quad (15)$$

其中 $|F(t)| < 1$.

DQ 方法估计的瞬时频率在 $F(t)$ 的极值点处 ($|F(t)| = 1$) 没有定义. HUANG 采取的措施是通过采用三次样条对已知部分 ($|F(t)| < 0.9$) 插值来估计该段的瞬时频率^[15], 但这也导致瞬时频率在极值点处会出现波动和偏差, 而且瞬时频率变化越大其波动和误差也越大.

3.2.2 NQ 方法

为了避免 DQ 方法中求瞬时频率出现分母为零的情况, 论文提出了 NQ 方法.

对单分量信号 $x(t)$, 记其 FM 部分 $F(t)$ 及对应的正交分量 $Q(t)$ 分别为:

$$\begin{cases} F(t) = \cos \varphi(t) \\ Q(t) = \sin \varphi(t) \end{cases} \quad (16)$$

分别对式(16)中两边求导, 得

$$\begin{cases} F'(t) = -\varphi'(t) \sin \varphi(t) \\ Q'(t) = \varphi'(t) \cos \varphi(t) \end{cases} \quad (17)$$

方程两边平方再求和, 得

$$F'^2(t) + Q'^2(t) = \varphi'^2(t) \quad (18)$$

由于瞬时频率非负, 于是可定义为

$$\varphi'(t) = \sqrt{F'^2(t) + Q'^2(t)} \quad (19)$$

NQ 与 DQ 方法都是基于信号本身及其正交分量而定义, 二者的数学原理相同, 但与 DQ 相比: (1) NQ 计算过程中避免了分母为零的情况, 而且不需要对信号极值点处的频率进行特殊处理; (2) NQ 中 $F(t)$ 与其正交分量 $Q(t)$ 的位置是对称的, 说明二者的瞬时频率相同, 与事实相符, 而从 DQ 方法中无法得出这一结论.

论文提出的时频分析方法主要包含两部分: (1) 采用 ILCD 对信号进行分解, 得到若干 ISC 分量和一个趋势项之和; (2) 对每个 ISC 用 EAD 估计到瞬时幅值, 再采用 NQ 估计瞬时频率. 进而可定义信号的 Hilbert-Huang 谱, 边际谱等.

4 比较分析

为了说明提出的 ILCD 和 NQ 方法的优越性, 不失一般地, 考虑式(20)所示的混合信号

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t), t \in [0, 1] \quad (20)$$

其中

$$x_1(t) = (1 + 0.6 \sin 2\pi 3t) \cos(2\pi 50t + 2\pi 5t^2),$$

$$x_2(t) = 2 \cos 2\pi 25t.$$

$x_1(t), x_2(t)$ 与 $x(t)$ 的时域波形如图 1 所示.

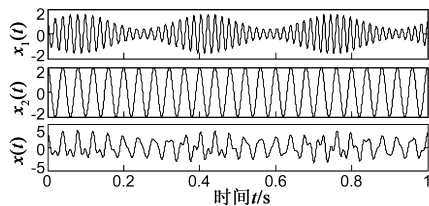


图1 式(20)所示混合信号和其各成分的时域波形

分别采用 EMD, LCD 和 ILCD 对 $x(t)$ 进行分解, 结果分别如图 2~4 所示. 为了方便比较, 图 5 给出了三种分解方法的分解绝对误差, 分解绝对误差定义为分解得到的分量与真实分量之差的绝对值.

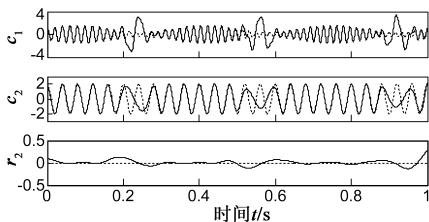


图2 式(20)所示混合信号的 EMD 分解结果
 c_1, c_2 和 r_2 分别表示第一、第二个 IMF 及余项

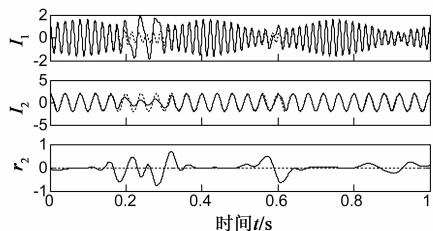


图3 式(20)所示混合信号的 LCD 分解结果
 I_1, I_2 和 r_2 分别表示第一、第二个 ISC 及余项

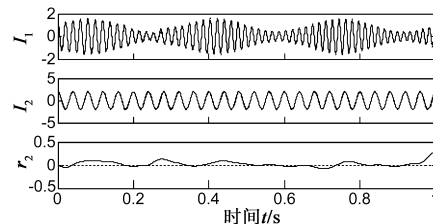


图4 式(20)所示混合信号的 ILCD 分解结果
 I_1, I_2 和 r_2 分别表示第一、第二个 ISC 及余项

由图 2~5 可以看出, EMD 的分解结果中 IMF 分量 c_1 与 c_2 局部波形严重失真, 与真实分量误差较大; LCD 的分解结果中 ISC 分量 I_1 与 I_2 虽然波形局部失真不如 EMD 分解中 IMF 分量失真严重, 但与真实分量误差幅值也比较大(从图 5 中可以明显看出); 与前两者相比, ILCD 分解则比较理想, 分解分量与真实分量非常接近,

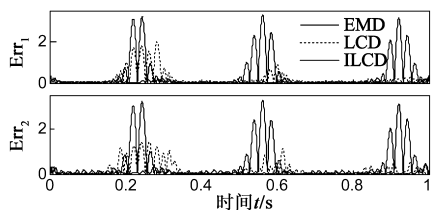


图5 式(20)所示混合信号三种分解方法分解结果绝对误差 E_1 和 E_2 分别表示三种方法第一和第二个分量与真实分量 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 的绝对误差

绝对误差幅值非常小。

为了进一步比较三种方法分解效果,论文还考察了三种分解方法的分解正交性指标(10),前两个分量的正交性指标(两种正交性指标的定义参见文献[5])以及三种分解方法前两个分量与真实分量绝对误差的能量。正交性指标越小说明分解正交性越好,绝对误差的能量越小,说明误差越小。三种指标分别如表1所示。由表中可以看出,与EMD和LCD方法相比,ILCD方法正交性指标和误差能量指标都最小,说明ILCD在正交性和精确性等方面都表现出一定的优越性。

表1 三种分解方法的评价指标

	IO	IO_{12}	E_1 能量	E_2 能量
EMD	0.0857	0.0719	1.5352×10^3	1.5300×10^3
LCD	0.0601	0.0247	344.2668	289.4231
ILCD	0.0131	0.0120	8.5867	15.5897

IO 表示整个分解结果正交性, IO_{12} 表示分解的第一个和第二个分量的正交性, E_i 能量表示第 i 个分量与其对应真实分量的绝对误差的能量, $i = 1, 2$ 。

同时为了说明NQ方法的优越性,论文将NQ方法与NHT和DQ方法进行了对比。如果将它们应用于上述三种分解方法的分解结果,无法确定估计误差是由估计方法引起还是由分解方法引起,而且真实分量也无法估计,没有一个精确的参考标准。基于此考虑,论文将NQ、DQ和NHT分别应用于上述真实分量 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 瞬时频率的估计。由于三种方法瞬时幅值的估计都是基于经验调幅调频分解,且估计要优于能量算子和HT方法,文献[15]对此进行了详细验证,这里不再赘述,论文重点比较三种方法瞬时频率的估计效果。

分别采用NQ、DQ和NHT估计 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的瞬时频率,估计结果和绝对误差如图6所示。由图中可以看出,在对 $x_1(t)$ 的瞬时频率的估计中,NHT方法估计结果端点效应非常严重,而且已经向信号内部传播。DQ方法估计的瞬时频率值虽然端点效应较小,但是从绝对误差图中可以看出,其估计值误差较大,幅值大小波动为0.5~1;而NQ的估计结果不仅端点效应较小,而且估计值与真实值的绝对误差也很小,非常接近真实

值。在对 $x_2(t)$ 瞬时频率的估计中,由于其瞬时幅值和瞬时频率均为常数,三种方法的估计都较为精确,没有端点效应,NHT方法的估计最为精确,绝对误差几乎为零,NQ的绝对误差幅值约为0.008,DQ的绝对误差约为0.028。因此,从 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 瞬时频率的三种估计结果可以看出,论文提出的NQ方法有非常好的估计效果。最后,图7(a)(b)分别给出了混合信号 $x(t)$ 的HHT方法和论文方法的时频谱,从中也能看出论文提出的时频分析方法的优越性。

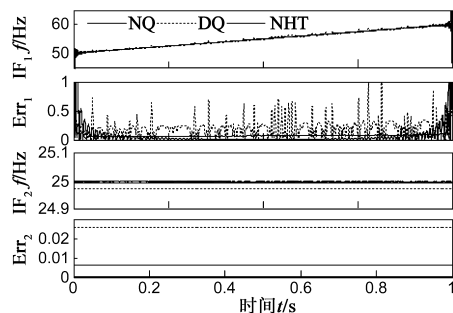
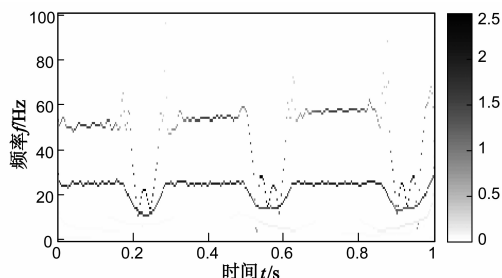
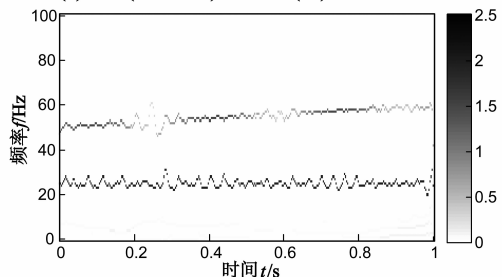


图6 三种方法估计的 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的瞬时频率和估计绝对误差。其中 IF_1 、 IF_2 和 Err_1 、 Err_2 分别对应为 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的瞬时频率和绝对误差



(a) HHT(EMD-HT)得到的式(20)信号的时频谱



(b) 论文方法(ILCD-NQ)得到的式(20)信号的时频谱

图7

5 应用分析

为了进一步说明新提出的时频分析方法(ILCD和NQ)的实用性,论文将其应用于转子系统具有单点局部碰摩故障的诊断。试验从局部碰摩故障转子实验装置中采得其径向位移振动信号,转速为3000r/min,即工频 $f_r = X = 50\text{Hz}$ 。采样频率为2048Hz,采样时长为0.5s。典型信号时域波形如图8所示。

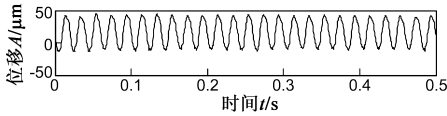


图8 局部碰摩故障转子的径向位移振动信号

采用 ILCD 方法对具有碰摩故障的转子径向位移振动信号进行分解,结果如图 9 所示.由图 9 可以看出,信号的第一个 ISC 分量具有明显的调幅调频特征,包含了主要的高频碰摩故障信息,对其进行包络谱分析(EAD 方法),得到分量 I_1 的包络谱如图 10 所示.从图 10 可以看到,在工频 50Hz 处有明显的谱线,说明调幅信号 I_1 中调制波的频率刚好为工频,这是由转子每旋转一周,动、静件就摩擦一次造成的,因此, I_1 包含了重要的碰摩信息,这与文献[1, 16]诊断结果是一致的.对分量 I_2 和 I_3 进行频谱分析发现(图 11), I_2 是 X 分量, I_3 是 $X/2$ 分量,根据文献[16, 17],当转子系统出现中度或重度碰摩时,会出现 $X/2$, $X/3$ 等分频及其倍频.因此,低频分量 I_2 也验证了转子发生了碰摩故障.这说明论文提出的方法能够有效地诊断转子局部碰摩故障.

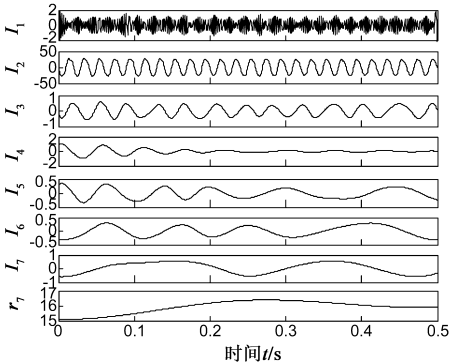
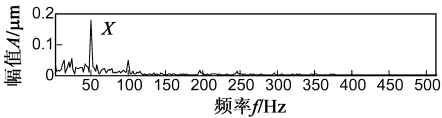


图9 转子径向位移振动信号的ILCD分解结果

图10 ILCD第一个分量 I_1 的包络谱

为了对比,采用 EMD 对具有碰摩故障的转子径向位移振动信号进行分解,结果如图 11 所示.由图 11, EMD 分量个数比 ILCD 少两个,第一个 IMF 分量 C_1 也具有调幅调频特征,对其进行包络谱分析(HT 方法,如图 12)发现,工频 50Hz 谱线被其高频二倍频 100Hz 和低频 25Hz 干扰,说明 EMD 得到的 C_1 分量包含的故障信息不如 ILCD 得到的 I_1 明确,诊断效果也不如 ILCD 明显.对分量 C_2 和 C_3 进行频谱分析发现(图 13), C_2 是 X 分量, C_3 是所表示的信息同样也不如 I_3 明显.综上,此例表明,论文方法不仅能够有效地用于转子碰摩故障

诊断,而且效果要优于 HHT 方法.

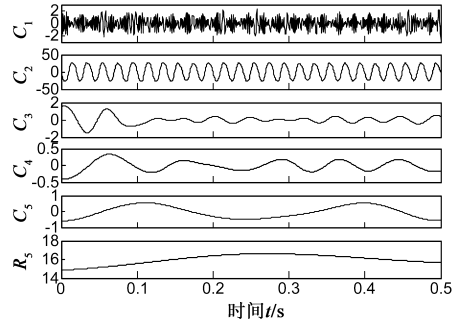
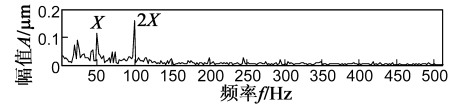
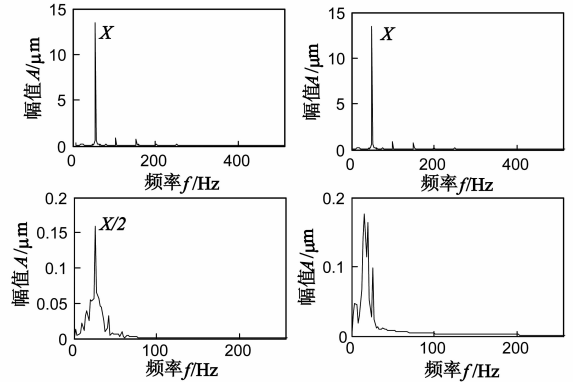


图11 转子径向位移振动信号的EMD分解结果

图12 EMD第一个分量 I_1 的包络谱图13 左侧:上、下分别为ILCD分量 I_2 和 I_3 的频谱;右侧:上、下分别为EMD分量 C_2 和 C_3 的频谱

6 结论

提出了一种基于改进的局部特征尺度分解(ILCD)和归一化正交(NQ)的时频分析方法.与 HHT(EMD 和 HT)相比该方法有如下优点:(1)ILCD 分量比 EMD 分量更精确,误差更小,分解正交性更好;(2)NQ 比 HT 和 HHT 的端点效应更小,估计结果更精确,时频分布也更合理;(3)成功地应用于转子局部碰摩故障的诊断,且诊断效果优于 HHT 方法.

论文提出了一种有效的时频分析方法,尽管如此,该方法仍有其不足之处,如 ILCD 也存在模态混淆问题等,笔者将进一步完善该方法的理论以期其能够得到广泛的应用.

参考文献

- [1] 于德介,程军圣,杨宇.机械故障诊断的 Hilbert-Huang 变换方法[M].北京:科学出版社,2006.

- Yu De-jie, Cheng Jun-sheng, Yang Yu. Mechanical Fault Diagnosis Method of Hilbert-Huang Transform [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 向强, 秦开宇. 基于线性正则变换与短时傅里叶变换联合的时频分析方法[J]. 电子学报, 2011, 39(7): 1508 - 1513.
Xiang Qiang, Qin Kai-yu. A time frequency analysis method based on linear canonical transform and short time Fourier transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(7): 1508 - 1513. (in Chinese)
- [3] 王忠仁, 林君, 李文伟. 基于 Wigner-Ville 分布的复杂时变信号的时频分析[J]. 电子学报, 2005, 33(13): 2239 - 2241.
Wang Zhong-ren, Lin Jun, Li Wen-wei. Time-frequency analysis for complex time-varying signals based on Wigner-Ville distribution [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(13): 2239 - 2241. (in Chinese)
- [4] Cheng J S, Yu D J, Yang Y. Time-energy density analysis based on wavelet transform [J]. NDT&E International, 2005, 38(7): 569 - 572
- [5] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. 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, 454(1): 903 - 995.
- [6] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31: 417 - 457.
- [7] 徐晓刚, 徐冠雷, 王孝通, 等. 经验模式分解(EMD)及其应用[J]. 电子学报, 2009, 37(3): 581 - 585.
Xu Xiao-gang, Xu Guan-lei, Wang Xiao-tong, et al. Empirical mode decomposition and its application [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(3): 581 - 585. (in Chinese)
- [8] N V Davis. Feature extraction using empirical mode decomposition of speech signal [J]. International Journal of Engineering Trends and Technology, 2012, 3(2): 77 - 80.
- [9] 杨培杰, 等. 希尔伯特-黄变换地震信号时频分析与属性提取[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1585 - 1590.
Yang Pei-jie, et al. Seismic signal time-frequency analysis and attribute extraction based on HHT [J]. Process in Geophysics, 2007, 22(5): 1585 - 1590. (in Chinese)
- [10] Lei Y G, Lin J, et al. A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 35(1 - 2): 108 - 126.
- [11] 雷亚国. 基于改进 Hilbert-Huang 变换的机械故障诊断[J]. 机械工程学报, 2011, 47(5): 71-77.
Lei Ya-guo. Machinery fault diagnosis based on improved Hilbert-Huang transform [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(5): 71 - 77. (in Chinese)
- [12] 程军圣, 郑近德, 杨宇. 一种新的非平稳信号分析方法—局部特征尺度分解法[J]. 振动工程学报, 2012, 25(2): 215 - 220.
Cheng Jun-sheng, Zheng Jin-de, Yang Yu. A new nonstationary signal analysis approach—the local characteristic-scale decomposition method [J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(2): 215 - 220. (in Chinese)
- [13] 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 - 99.
Cheng Jun-sheng, Zheng Jin-de, Yang Yu. Empirical envelope demodulation approach based on local characteristic-scale decomposition and its applications to mechanical fault diagnosis [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(19): 87 - 99. (in Chinese)
- [14] J F Kaiser. Some useful properties of Teager's energy operators [A]. Proceedings of IEEE International Conference Acoustics Speech Signal Processing [C]. USA: IEEE, 1993, Vol 3. 140 - 158.
- [15] Huang N E, Wu Z H, Long S R, et al. On the frequency [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(2): 177 - 229.
- [16] 胡芑庆. 转子碰摩非线性行为与故障辨识的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2001.
Hu Niao-qing. Research on Identification of Nonlinear Behavior and Fault of Rub-impact in Rotors[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001. (in Chinese)
- [17] 卢文秀, 褚福磊. 转子系统碰摩故障的实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(5): 614 - 617.
Lu Wen-xiu, Chu Fu-lei. Experimental investigation of rotor rubbing faults [J]. Journal of Tsinghua University (Sci&Tech), 2005, 45(5): 614 - 617. (in Chinese)

作者简介



郑近德(通信作者) 男, 1986年3月生, 安徽临泉人. 2009年毕业于安徽师范大学数学系, 现为湖南大学博士研究生, 研究方向为动态信号处理及机械设备故障诊断等. 已发表相关论文10余篇.

Email: lqdlzheng@126.com;
jdzheng1986@gmail.com



程军圣 男, 1968年出生, 博士, 湖南大学教授, 博士生导师. 从事机械故障诊断、动态信号分析与处理等方面的研究.

Email: chengjunsheng@hnu.edu.cn