DOI: 10.3901/JME.2015.01.138

改进的希尔伯特-黄变换及其在滚动轴承故障诊断中的应用*

郑近德 程军圣

(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: 希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)是一种优秀的时频分析方法, 包含经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)和希尔伯特变换(Hilbert transform, HT)两部分, 通过 EMD 对信号进行分解, 再对得到的内禀模态函数(Intrinsic mode function, IMF)进行 HT 解调。针对 EMD 存在的包络误差, 模态混淆, 端点效应以及 HT 易产生负频率等缺陷, 提出一种改进的 HHT 方法(Improved HHT, IHHT), IHHT 包括广义经验模态分解(Generalized EMD, GEMD)和改进的直接正交(Improved direct quadrature, IDQ)解调, GEMD 通过定义多种均值曲线, 从得到的多个 IMF 中选择最优分量, 从而保证了每阶分量的优越性; 再采用改进的经验调幅调频分解和 IDQ 方法对信号进行解调, 提高了分解和解调的精确性、抑制了端点效应的产生。将提出的方法应用于滚动轴承故障诊断, 分析结果表明 IHHT 是一种有效的信号处理方法。

关键词: 广义经验模态分解; 希尔伯特黄变换; 瞬时频率; 滚动轴承; 故障诊断

中图分类号: TH165; TN911

Improved Hilbert-Huang Transform and Its Applications to Rolling Bearing Fault Diagnosis

ZHENG Jinde CHENG Junsheng

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

Abstract: Hilbert-Huang transform (HHT) is an excellent time-frequency analysis method, which contains empirical mode decomposition (EMD) and Hilbert transform (HT). A given signal is decomposed by EMD and then each of the obtained intrinsic mode functions (IMFs) is demodulated by HT. Aim to solve the problems of envelope errors, mode mixing and end effort of EMD method and negative frequency of HT, an improved HHT method (IHHT) is proposed, which contains generalized EMD (GEMD) and improved direct quadrature (IDQ) demodulation. By GEMD several different IMFs are obtained by defining different mean curves and in each rank the best IMF is selected. The improved empirical AM-FM decomposition and IDQ are used to demodulate the component. The proposed method improved the accuracy of decomposition and demodulation and restrained the end effort. IHHT is applied to rolling bearing experiment data and the analysis results indicate that IHHT is an effective signal processing method.

Key words: generalized empirical mode decomposition (GEMD); Hilbert-Huang transform; instantaneous frequency; rolling bearing; fault diagnosis

0 前言

由于机械设备振动信号大部分是非线性、非平稳信号, 传统的适合处理线性和平稳信号的傅里叶分析不免有一定的局限。时频分析方法如小波分析^[1]和最近提出的希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)等^[2-3], 由于能够同时提供信号时

域和频域局部信息, 而在机械故障诊断领域得到了广泛应用。如林京等^[4]提出了一种基于连续小波的信号检测和故障诊断方法, 瞿艳阳等^[5]提出了一种基于小波分形的故障诊断技术。但小波分析要事先选择小波基和分解层数, 不具有自适应性, 应用受到一定的限制。HUANG 等^[2-3]提出的 HHT 是一种自适应数据分析方法, 主要包含经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)和希尔伯特变换(Hilbert transform, HT)两部分, 即对一个复杂信号, 首先采用 EMD 对其进行分解, 得到若干个内禀模态函数(Intrinsic mode function, IMF), 再采用

* 重庆市科委自然科学基金计划(CSTC2012JJA40024)和国家高技术研究发展计划(863 计划, 2012AA040107)资助项目。20140124 收到初稿, 20130916 收到修改稿

HT 对每一个 IMF 分量进行解调, 得到原始信号的全部时频信息。由于 HHT 特别适合处理非平稳信号, 程军圣等^[6-7]对 HHT 在旋转机械故障诊断领域的应用进行了深入研究, 雷亚国^[8]提出了一种基于改进 Hilbert-Huang 变换的机械故障诊断方法, 都取得了不错的诊断效果。

然而, HHT 还存在执行过程中严重的端点效应, 由三次样条拟合包络而产生的拟合误差, HT 解调出现无法解释的负频率以及由端点效应引起的能量泄漏等问题, 这些问题的研究虽然取得了一定的进展, 但还未得到完整解决^[9]。

改进的 EMD 方法如内禀时间尺度分解^[10], 局部特征尺度分解等^[11], 通过定义新的均值曲线对 EMD 进行改进, 虽然对部分信号而言, 在某一方面有一定的提高, 但对大部分信号 EMD 仍具有其独特的优势。而且对一个实际信号, 不易判断哪一种分解结果是最优的。基于此, 笔者提出了一种广义经验模态分解(Generalized EMD, GEMD)方法^[12], GEMD 通过定义不同的均值曲线, 从得到的分量中选择最优分量作为最终的 IMF, 再重复筛分过程。论文对 GEMD 中最优 IMF 判据进行了详细研究, 提出了一种瞬时频率波动能量差准则。

当滚动轴承发生故障时, 振动信号大多数是多分量调幅调频信号^[13-14], 对振动信号解调是一种有效的故障分析方法。但 HT 解调易产生端点效应和负频率, 对此, 相关学者提出了能量算子解调^[15], 迭代 Hilbert 变换解调^[16]以及经验包络解调等^[11], 取得了很好的解调效果。

最近, HUANG 等^[17]提出了标准希尔伯特变换(Normalized HT, NHT)和直接正交法(Direct quadrature, DQ)解调, 这两种方法都基于经验调幅调频分解(Empirical AM-FM decomposition, EAD)。针对 EAD 和 DQ 存在的不足, 分别提出了改进的 EAD(Improved EAD, IEAD)和改进的 DQ(Improved DQ, IDQ)方法。

论文通过仿真信号将 IHHT(GEMD 和 IEAD-IDQ)与 HHT 进行了对比, 并应用于试验数据分析, 结果都表明 IHHT 是一种更优秀的、具有应用前景的信号处理方法。

1 广义经验模态分解

1.1 均值曲线的选择

EMD 这类基于“筛分”的分解方法, 关键是定义信号合理的均值曲线, 然而目前大部分均值曲线的定义都是经验性的, 还没有文献给出均值曲线确

切的数学定义, 因此, 本文采用以下五种比较有代表性的均值曲线的定义方法。

(1) EMD 方法中基于信号的上、下包络线定义的包络均值(Envelop mean, EM)^[2]。

(2) 固有时间尺度均值(Intrinsic time-scale mean, ITM), 定义参见 FREI 等^[10]提出的内禀时间尺度分解。

(3) 局部特征尺度均值(Local characteristic-scale mean, LCM), 定义参见程军圣等提出的局部特征尺度分解^[11]。

(4) 极值点中值均值(Extremum-midpoint mean, EMM)。

假设待分析信号为 $Y_t (t \geq 0)$, 极值点为 $(\tau_k, Y_k) (k=1, 2, \dots, M)$, 相邻两个极大(或极小)值的中点可表示为

$$(t_{k+1}, A_{k+1}) = \left(\frac{\tau_k + \tau_{k+2}}{2}, \frac{Y_k + Y_{k+2}}{2} \right) \quad (1)$$

定义

$$(T_{k+1}, B_{k+1}) = \left(\frac{t_{k+1} + \tau_{k+1}}{2}, \frac{A_{k+1} + Y_{k+1}}{2} \right) = \left(\frac{t_k + 2t_{k+1} + t_{k+2}}{4}, \frac{Y_k + 2Y_{k+1} + Y_{k+2}}{4} \right) \quad (2)$$

采用三次样条函数对所有 (t_{k+1}, B_{k+1}) 进行插值即得到信号的均值曲线。

(5) 极值域均值(Extrema field mean, EFM), 定义详见文献[18]。

五种不同提取信号均值曲线的方法, 对应了五种信号分解方法, 不同的分解方法都有各自的优势和不足。EMD 的包络均值曲线能够有效地保证分解信号的对称性, 但是对极值点变化较大、极值点分布不均匀的信号, 会产生包络过冲和不足, 产生新极值点导致分解误差。ITM 和 LCM 基于数据的特征尺度, 每一个极值点处的均值采用相邻的三个极值点而定义, 能很好地反映信号的局部特征, 提高分解频率分辨能力, 但 ITM 易引起波形的失真, LCM 易导致分量幅值一致化。EMM 为克服 LCM 对相邻极值幅值变化较大造成均值点偏移而提出, 但幅值一致化仍未得到解决。EFM 和 LIM 基于相邻的两极值点间一段数据定义均值点, 更能反映数据局部特征, 提高频率分辨能力, 但对于大幅的调幅信号均值不为零, 易出现误差。

1.2 GEMD 方法

GEMD 则综合上述方法的优势而提出, 假设待分析信号为 $x(t)$, GEMD 分解步骤如下。

(1) 令 $u_0(t) = x(t)$, $j=1$ 。

(2) 用上述五种方法提取 $u_{j-1}(t)$ 均值曲线, 分别记为 $m_1(t), m_2(t), \dots, m_5(t)$ 。

(3) 将 $m_i(t)$ 从 $u_{j-1}(t)$ 中分离, 得到剩余信号 $r^i(t)$, 即

$$r^i(t) = u_{j-1}(t) - m_i(t) \quad i=1, 2, \dots, 5 \quad (3)$$

重复上述过程 $k_1, k_2, \dots, k_5$ 次, 直到所有均值曲线为零, 记 $r_k^i(t)$ 为 $I_j^i(t)$ 。

(4) 从 $I_j^i(t) (i=1, 2, \dots, 5)$ 中选择最优分量作为最终 IMF, 称为 GIMF (Generalized IMF), 记为 $I_j(t)$, 并将 $I_j(t)$ 从原始信号中分离

$$u_j(t) = u_{j-1}(t) - I_j(t) \quad (4)$$

(5) $j=j+1$, 重复步骤(2)~(4), 直到剩余分量 $u_n(t)$ 为单调函数, 或与 $u_0(t)$ 比能量非常小的函数。

(6) 原始信号 $x(t)$ 可重写为

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

步骤(3)中, 均值曲线为零的判据采用 RILLING 的三阈值准则^[19]。步骤(4)中需要定义最优 IMF 即 GIMF 判据。由于 GEMD 是从高频率到低频筛分, 因此, 考虑依据瞬时频率特征来选择 GIMF。由于 GIMF 近似为窄带信号, 带宽远远小于中心频率, 带宽越小说明频率的调制越小^[20]。原文献采用频率带宽作为最优选择标准, 对于瞬时频率非常数的信号会出现错误选择, 本文提出了如下改进的 GIMF 选择方案。

(1) 在步骤(4)中, 采用下文的 IEAD-IDQ 方法估计每个 $I_j^i(t)$ 的瞬时频率 F_i , 并提取 F_i 的线性趋势项 $T_i (i=1, 2, \dots, 5)$, 计算 $\bar{T} = 1/5 \sum_{i=1}^5 T_i$ 。

(2) 计算频率波动 $D_i = F_i - \bar{T} (i=1, 2, \dots, 5)$, 并计算 D_i 的标准差, 将标准差最小的 D_k 的下标 k 返回, 将 $I_j^k(t)$ 作为第 j 阶的最终 GIMF。

改进的评优准则依据瞬时频率选取 GIMF, 瞬时频率是常函数时与频率带宽最小准则是一致的, 当瞬时频率非常函数时则将瞬时频率波动最小的分量作为 GIMF。

2 基于 IEAD-IDQ 的解调方法

由于受 Bedrosian 定理的限制, HT 在解调时会出现负频率以及由频域能量泄露引起的端点效应, HUANG 等^[17]提出了一种单分量信号的标准化方案

——经验调幅调频分解(EAD), 通过 EAD, 一个单分量信号被分解为瞬时幅值与纯调频信号的乘积, 而原始信号的瞬时相位和瞬时频率可由纯调频信号求得。由于纯调频信号自动满足 Bedrosian 定理, 对其做 HT 即可得到信号的瞬时频率, 这种基于 EAD 的 HT 称为标准希尔伯特变换(Normalized HT, NHT)。HUANG 等^[17]还提出了另一种瞬时估计方法: 直接正交法(Direct quadrature, DQ)。DQ 避开了希尔伯特变换, 通过定义信号的正交分量, 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。然而 DQ 方法在纯调频信号的极值点处(瞬时频率分母为零)没有定义, 通过三次样条函数依据其他已知部分插值而得, 这导致瞬时频率在信号极值点处易有较大波动和误差。基于此, 本文提出了基于 IEAD 的 IDQ 方法来估计信号的瞬时幅值和瞬时频率。

2.1 改进的经验调幅调频分解

EAD 的精确性直接影响到瞬时幅值的估计, 同时也是 NHT 和 DQ 等进一步估计瞬时频率的关键。研究发现, EAD 主要存在如下问题: ① 由于 EAD 采用三次样条拟合信号绝对值的极大值, 且需要经过多次迭代来实现标准化, 因此, 如果端点处理不当或不作处理, 则迭代次数会增加, 增大拟合误差, 甚至无法实现标准化; ② 对于某些信号尤其是实际信号, EAD 得到的纯调频信号可能存在骑波, 且在后续迭代中难以消除。基于此, 提出了 IEAD 方法, 步骤如下。

(1) 对于单分量信号 $s(t)$, 确定 $|s(t)|$ 的所有极大值点 (t_k, s_k) , $k=1, 2, \dots, M$, 并在数据两端延拓出新的极值点

$$\begin{cases} t_0 = 0 \\ s_0 = s_3 - \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}(t_3 - t_0) \end{cases} \quad (6a)$$

$$\begin{cases} t_{M+1} = T \\ s_{M+1} = \frac{s_M - s_{M-1}}{t_M - t_{M-1}}(t_{M+1} - t_{M-2}) + s_{M-2} \end{cases} \quad (6b)$$

式中, T 是信号的时间长度。

(2) 采用三次样条拟合所有极值点, 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) 检查 $s_1(t)$ 是否存在骑波, 如果存在骑波 C_i (由极值点 (t_i, s_i) 与 (t_{i+1}, s_{i+1}) 和它们之间的信号构成), 则关于极值点的连线将 C_i 翻折, 得到数据仍

记为 $s_1(t)$, 如果 $s_1(t)$ 不是纯调频信号, 重复上述过程 n 次

$$s_2(t) = \frac{s_1(t)}{a_{12}(t)}, \dots, s_n(t) = \frac{s_{n-1}(t)}{a_{1n}(t)} \quad (7)$$

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

$$A(t) = \frac{s(t)}{F(t)} = a_{11}(t)a_{12}(t)\cdots a_{1n}(t) \quad (8)$$

因此, $s(t)$ 被分解为调幅和纯调频部分的乘积, 即

$$s(t) = A(t) \cdot F(t) = A(t) \cdot \cos \theta(t) \quad (9)$$

IEAD 经验地实现了单分量信号调幅与调频部分的分离, 调幅部分即为信号的瞬时幅值, 而信号的瞬时相位和瞬时频率则可从调频部分求出。

2.2 改进的直接正交法

由 IEAD, 单分量信号 $x(t)$ 可被分解为包络信号 $A(t)$ 与纯调频信号 $F(t) = \cos \theta(t)$ 的乘积, $A(t)$ 即为 $x(t)$ 的瞬时幅值。定义 $F(t)$ 的正交分量 $G(t)$, 则

$$G(t) = \sin \varphi(t) =$$

$$-\operatorname{sgn}[F'(t)]\sqrt{1-F^2(t)} \quad (10)$$

由此, 瞬时相位定义为

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \arctan \left[\frac{\sin \varphi(t)}{\cos \varphi(t)} \right] = \\ &= \arctan \left[\frac{-\operatorname{sgn}[F'(t)]\sqrt{1-F^2(t)}}{F(t)} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

将 $\varphi(t)$ 展开后求导, 得瞬时频率为

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{|F'(t)|}{\sqrt{1-F^2(t)}} \\ |F(t)| &< 1 \end{aligned} \quad (12)$$

由式(12), DQ 方法对瞬时频率的估计是基于数据本身和微分而求得, 避开了希尔伯特变换和三角反余弦和反正切的计算; 然而瞬时频率 $f(t)$ 在 $F(t)$ 的极值点处 ($|F(t)|=1$ 时刻) 没有定义, HUANG 等^[17]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, 不可避免地会在极值点处出现波动和偏差。为此, 提出了 IDQ 方法。

对单分量信号 $x(t)$, 其瞬时幅值仍有 IEAD 的定义, 记 FM 部分 $F(t)$ 和其正交分量 $G(t)$ 分别为

$$\begin{cases} F(t) = \cos \varphi(t) \\ G(t) = \sin \varphi(t) \end{cases} \quad (13)$$

分别对两式两边求导, 得

$$\begin{cases} F'(t) = -\varphi'(t) \sin \varphi(t) \\ G'(t) = \varphi'(t) \cos \varphi(t) \end{cases} \quad (14)$$

方程两边分别平方再求和, 得

$$\varphi'^2(t) = F'^2(t) + G'^2(t) \quad (15)$$

由于瞬时频率是非负的, 于是

$$\varphi'(t) = \sqrt{F'^2(t) + G'^2(t)} \quad (16)$$

IDQ 与 DQ 方法都避开了 HT, 二者的基本原理相同。但与 DQ 相比: ① IDQ 避免了分母为零的情况, 而且不需要对信号极值点处的值进行特殊处理; ② IDQ 中 $F(t)$ 与其正交分量 $G(t)$ 的位置是对称的, 说明二者的瞬时频率是相同的, 与事实相符, 而从 DQ 方法中无法得出这一结论。

基于上述理论, 与 HHT 平行地, IHHT 主要包含两部分: ① GEMD 对信号进行分解, 得到若干 GIMF 分量和一个趋势项之和; ② 对每个 GIMF 分量进行 IEAD-IDQ 解调, 即首先采用 IEAD 得到瞬时幅值, 再采用 IDQ 估计瞬时频率。

在 IHHT 的基础上可参照文献[2, 20]平行地定义信号的时频谱和边际谱等, 不再赘述。

3 仿真与试验分析

3.1 仿真分析

为了说明 IHHT 的优越性, 首先考察式(17)所示仿真信号

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) \quad (17)$$

式中, $x_1(t) = 3(t+1)\cos(2\pi 50t + 2\pi 5t^2)$, $x_2(t) = \exp(-t)\cos(2\pi 28t)$, $x_3(t) = 2t^2$ 。 $t \in [0, 1]$ 。

$x(t)$ 由调幅调频信号、调幅信号和一个多项式趋势项叠加而成, 它们的时域波形如图 1 所示。

图 1 仿真信号 $x(t)$ 及其各成分时域波形

分别采用 EMD 和 GEMD 对 $x(t)$ 进行分解, 结

果分别如图 2 和 3 所示。从中可以看出, EMD 和 GEMD 都能够有效地将三个分量成分分离。

图 2 仿真信号 $x(t)$ 的 EMD 分解结果

图 3 仿真信号 $x(t)$ 的 GEMD 分解结果

为了比较分解效果, 图 4 给出了两种分解结果与真实分量的绝对误差, 即分解得到的分量与对应真实成分之差的绝对值。由图 4 可明显看出, EMD 分解得到的 IMF 分量 c_1 和 c_2 与对应真实分量 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的绝对误差较大, 远大于 GEMD 分解得到的 G_1 和 G_2 与对应真实分量的绝对误差。且 EMD 得到的趋势项 r_2 与真实趋势项 $x_3(t)$ 的绝对误差也较大, 大于 GEMD 得到的趋势项与 $x_3(t)$ 的绝对误差, 且有较严重的端点效应。此例表明, 与 EMD 相比, GEMD 精确性更高。

图 4 EMD 与 GEMD 分解的绝对误差

为了说明基于 IEAD-IDQ 方法解调的优越性, 分别采用 IEAD 与 HT 方法估计 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 瞬时幅值, 采用 NHT, DQ 和 IDQ 方法估计它们的瞬时频率, 估计结果和绝对误差分别如图 5 和图 6 所示。

(a) $x_1(t)$ 的瞬时幅值和绝对误差

(b) $x_2(t)$ 的瞬时幅值和绝对误差

图 5 HT 和 IEAD 估计 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的瞬时幅值和绝对误差

(a) $x_1(t)$ 瞬时频率和绝对误差

(b) $x_2(t)$ 瞬时频率和绝对误差

图 6 NHT, DQ 和 IDQ 估计的 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 瞬时频率和绝对误差

由图 5 和图 6 可以看出, HT 和 IEAD 估计瞬时幅值大部分区域无明显差别, 但 HT 有明显的端点效应; NHT 估计得到的瞬时频率有严重的端点效应, DQ 和 IDQ 相对端点效应较小; 但 DQ 估计的瞬时频率在信号极值处有轻微的突变, 波动较大, 而 IDQ 方法估计的瞬时频率则较为平滑, 与真实值绝对误差最小。

综上, IHHT(GEMD 和 IEAD-IDQ) 与原 HHT(EMD 和 HT) 相比, 在分解的精确性和解调的精确性两方面都有明显的改进和提高。

3.2 实测信号分析

为了进一步说明 IHHT 方法的优越性, 将其应用于具有故障的轴承振动信号分析。试验数据采用美国凯撒西储大学公开的轴承数据^[21], 试验轴承为 6205-2RS JEM SKF 型深沟球轴承, 采用电火花技术对不同轴承设置大小为 0.177 8 mm, 深度 0.279 4 mm 的单点故障。在转速 1 797 r/min, 负载 0 Pa, 采样频率 12 kHz 的条件下采集到滚动轴承的振动加速度信号。考虑具有外圈和内圈故障的滚动轴承振动信号。经计算, 转频 $f_r \approx 30$ Hz, 外圈故障特征频率 $f_o \approx 107.4$ Hz, 内圈故障特征频率 $f_i \approx 162.2$ Hz。具有外圈和内圈故障的滚动轴承振动信号时域波形分别如图 7a 和 7b 所示。

图 7 故障轴承振动加速度信号时域波形

从二者时域波形上很难区分故障类型。首先采用 GEMD 对图 7a 所示具有外圈故障轴承信号进行分解, 结果如图 8 所示。再对得到的 GIMF 分量进行基于 IEAD 的包络谱分析, 前五个 GIMF 的包络谱如图 9 所示。从包络谱中可以明显地看出, 前几个高频 GIMF 被外圈故障特征频率 f_o 所调制, 因此可以诊断为外圈故障。

为了与 HHT 比较, 采用 EMD 对上述同一信号进行分解, 再采用 HT 对其前五个 IMF 进行包络谱分析, 结果如图 10 所示。由图 10 可以看出, 虽然从包络谱中也能识别故障类型, 但仔细观察图 9 和图 10 易发现, 两种方法前三个分量的包络谱二者无明显差别, 第四个和第五个 GIMF 分量包络谱中仍包含有故障特征频率和转频信息, 而第四个和第五个 IMF 分量包络谱则包含的信息比较混乱。因此, 相较而言, 本文方法具有一定的优越性。

再采用 GEMD 对图 7b 所示具有内圈故障轴承信号进行分解, 分解结果如图 11 所示。对得到的 GIMF 进行基于 IEAD 的包络谱分析, 前两个 GIMF 分量的包络谱如图 12 所示。从中可以看出, 两个 GIMF 分量皆被内圈故障特征频率 f_i 所调制, 可诊断为内圈故障。

上述分析表明, IHHT 方法不仅能够有效地诊断滚动轴承故障, 而且比原 HHT 精确性更高, 是一种有效的信号处理和故障诊断方法。

图 8 具有外圈故障轴承振动加速度信号的 GEMD 分解结果

图 9 GEMD 前五个 GIMF 分量的包络谱

图 10 EMD 前五个 IMF 的包络谱

图 11 具有内圈故障滚动轴承振动加速度信号的 GEMD 分解结果

图 12 图 11 中前两个 GIMF 分量的包络谱

4 结论

提出了一种新的时频分析方法——改进的希尔伯特黄变换(IHHT), 主要包括 GEMD 和 IEAD-IDQ 两部分。

(1) GEMD 是一种优秀的自适应信号分解方法, 与 EMD 相比, GEMD 分解的精确性更高, 更接近理论值。

(2) 与 HT 解调相比, 基于 IEAD-IDQ 的解调方法能够提取信号更精确的瞬时特征, 而且端点效应也得到有效抑制。

(3) 与 HHT 相比, IHHT 有更好的滚动轴承故障诊断效果。

总之, 与 HHT 相比, IHHT 在信号的分解与解调方面都有了很大的提高, 是一种有效的信号处理方法。当然, IHHT 也有其不足之处, 如 GEMD 比 EMD 较耗时, 最优分量的判据还需要进一步严格化。

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.
HE Zhengjia, CHEN Jin, WANG Taiyong, et al. Theories and applications of machinery fault diagnostics [M].

Beijing: Higher Education Press, 2010.

- [2] 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, Series A, 1998, 454: 903-995.
- [3] HUANG N E, WU Z. A review on Hilbert - Huang transform: Method and its applications to geophysical studies[J]. Reviews of Geophysics, 2008, 46 (RG2006): 2007RG000228(1-23).
- [4] 林京, 屈梁生. 基于连续小波变换的信号检测技术与故障诊断[J]. 机械工程学报, 2000, 36(12): 95-100.
LIN Jing, QU Liangsheng. Feature detection and fault diagnosis based on continuous wavelet transform[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(12): 95-100.
- [5] 瞿艳阳, 何正嘉, 张周锁. 小波分形技术及其在机械设备非平稳故障诊断中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(9): 82-87.
ZI Yanyang, HE Zhengjia, ZHANG Zhousuo. Wavelet fractal technology and its applications to nonstationary fault diagnosis[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(9): 82-87.
- [6] 程军圣, 于德介, 杨宇. 基于支持矢量回归机的 Hilbert-Huang 端点效应问题的处理方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(4): 24-31.
CHENG Junsheng, YU Dejie, YANG Yu. Process method for end effects of Hilbert-Huang transform based on support vector regression machines[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(4): 24-31.
- [7] 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 Dejie, CHENG Junsheng, YANG Yu. Mechanical fault diagnosis method of Hilbert-Huang transform[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [8] 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 Yaguo. Machinery fault diagnosis based on improved Hilbert-Huang transform[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(5): 71-77.
- [9] XU Yuesheng, ZHANG Haizhang. Recent mathematical developments on empirical mode decomposition[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(4): 681-702.
- [10] FREI M 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 of London, Series A, 2007, 463: 321-342.
- [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): 87-99.
- CHENG Junsheng, ZHENG Jinde, YANG Yu. Empirical envelope demodulation approach based on local characteristic-scale decomposition and its applications to mechanical fault diagnosis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(19): 87-99.
- [12] ZHENG Jinde, CHENG Junsheng, YANG Yu. Generalized empirical mode decomposition and its applications to rolling element bearing fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 40(1): 136-153.
- [13] 丁康, 孔正国. 振动调幅调频信号的调制边频带分析及其解调方法[J]. 振动与冲击, 2005, 24(6): 9-12.
- DING Kang, KONG Zhengguo. Modulated sideband analysis and demodulation method of vibration AM-FM signals [J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(6): 9-12.
- [14] 丁康, 孔正国, 何志达. 振动调幅信号的循环平稳解调原理与应用[J]. 振动工程学报, 2005, 18(3): 304-308.
- DING Kang, KONG Zhengguo, HE Zhida. The principle and application of cyclostationary analysis for demodulation of amplitude modulated signals[J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(3): 304-308.
- [15] 程军圣, 于德介, 杨宇. 基于 EMD 的能量算子解调方法及其在机械故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2004, 40(8): 115-118.
- CHENG Junsheng, YU Dejie, YANG Yu. Energy operator demodulating approach based on EMD and its application in mechanical fault diagnosis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(8): 115-118.
- [16] 秦毅, 王家序, 汤宝平. 基于迭代 Hilbert 变换的多分量信号解调方法研究及应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 37-44.
- QIN Yi, WANG Jiaxu, TANG Baoping. Multicomponent demodulation based on iterated hilbert transform and its application [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 37-44.
- [17] 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.
- [18] 盖强. 局域波时频分析方法的理论研究与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2001.
- GAI Qiang. Research and application on the theory of local wave time-frequency analysis method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2001.
- [19] COHEN L. Time frequency analysis: Theory and applications [M]. New Jersey, USA: Prentice Hall Press, 1995.
- [20] RILLING G, FLANDRIN P, GONCALVES P. On empirical mode decomposition and its algorithms[C]// In Proceedings of IEEE EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing NSIP-2003, Grado, Italy, 2003: 8-11.
- [21] Case Western Reserve University. Bearing data [EB/OL]. [2013-09-04]. <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/download-data-file>.
-
- 作者简介:** 郑近德(通信作者), 男, 1986 年出生, 博士研究生。主要从事动态信号处理和机械故障诊断等方面的研究。
E-mail: lqdlzheng@126.com; jdzheng1986@gmail.com
- 程军圣, 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要从事机械故障诊断、动态信号分析与处理等方面的研究。
E-mail: signalp@tom.com