

文章编号:1671-6833(2014)05-0100-05

基于局部均值分解的机械振动信号趋势项消除方法

赵志科^{1,2}, 张晓光¹, 王 新²

(1. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘 要: 为了消除机械振动信号中趋势项, 提出一种基于局部均值分解(LMD)的趋势项提取新方法. 考虑到机械振动信号中夹杂的趋势项特点, 其残余量并不会对趋势项产生过大的影响, 所以可将 LMD 的最后一个频率分量作为待提取的趋势项. 为了验证该方法的可靠性, 通过数值模拟的方法将线性、多项式和指数趋势项加载到待消除的仿真信号和实测滚动轴承振动信号中, 并将笔者所提的 LMD 方法与常规的最小二乘拟合法、小波分析和 EMD 方法分别用于趋势项的提取. 数值模拟试验和实测数据分析表明, 该方法能够较准确地提取机械振动信号的趋势项, 与其他方法相比具有一定的优势.

关键词: 机械振动信号; 局部均值分解; 趋势项; 包络信号; 纯调频信号

中图分类号: TH 113.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.023

0 引言

由于机械振动信号具有非平稳、非线性的特点, 而在采集振动信号的过程中, 又不可避免地存在偏差, 特别是测量系统受外界环境影响产生的趋势项往往会影响到后续信号处理的可靠性^[1], 因此, 对于消除振动信号中的趋势项方法深入分析和研究具有重要的意义.

目前, 趋势项消除方法主要有最小二乘拟合法、小波变换、EMD 方法等. 除了最小二乘拟合法, 其余都是根据趋势项信号自身频率很低的特点提出的. 小波变换法是通过小波的分解实现对含趋势项低频段的分离或提取, 但是对于未知频率范围的信号无法准确地获取恰当的小波分解层数, 而小波基函数的选择对趋势项的提取影响很大. EMD 方法虽然无需选择额外参数就能够实现信号的自适应分解, 但也存在模态混叠和端点效应的影响, 制约趋势项的提取精度^[2].

LMD 方法的出现与应用, 给机械振动中趋势项的提取带来了新的途径^[3-4]. 由于机械振动信号大多具有多分量的调幅调频信号的特点, 笔者通过数学建模的方法构造了含调幅调频信号的振动仿真信号, 采用 LMD 分解的方法提取信号中包含

的线性、多项式和指数趋势项. 为了验证对实测信号提取趋势项的有效性, 笔者以滚动轴承内圈故障的振动数据为基础, 加载通过数据模拟方法构造的线性趋势作为待消除趋势项数据, 再利用最小二乘拟合法、小波分析和 EMD 方法对其进行趋势项消除, 经比较发现, LMD 的趋势项消除方法具有更好的效果.

1 局部均值分解方法

局部均值分解方法的原理就是从原始信号中分离出包络信号和纯调频信号, 并将包络信号和纯调频信号相乘以便得到一个瞬时频率具有物理意义的 PF 分量, 通过循环迭代处理以至所有的 PF 分量逐个分离出来, 便可以得到该原始信号的时频分布^[5].

步骤 1: 确定原始信号 $x(t)$ 所有的局部极值点 λ_i , 并求出所有相邻局部极值点的平均值将所有相邻的平均值点 m_i 用直线连接起来, 然后用滑动平均法进行平滑处理, 得到局部均值函数 $m_{11}(t)$.

步骤 2: 利用得到局部极值点 n_i 求出包络估计值

$$a_i = \frac{|n_i - n_{i+1}|}{2}. \quad (2)$$

收稿日期:2014-04-29; 修订日期:2014-06-22

基金项目:河南省科技攻关资助项目(142102210048)

作者简介:赵志科(1987-), 男, 河南济源人, 中国矿业大学博士生, 主要从事大型机电设备故障诊断技术的研究, E-mail: zhaozhike168@126.com.

将所有相邻两个包络估计值 a_i 用直线连接起来,然后采用滑动平均方法进行平滑处理,得到包络估计函数 $a_{11}(t)$ 。

步骤3: 将局部均值函数 $m_{11}(t)$ 从原始信号 $x(t)$ 中分离出来,得到

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

步骤4: 将 $h_{11}(t)$ 除以包络估计函数 $a_{11}(t)$ 以实现对 $h_{11}(t)$ 进行解调,得到

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

对 $s_{11}(t)$ 重复上述步骤1~步骤4,便能得到 $s_{11}(t)$ 的包络估计函数 $a_{12}(t)$ 。在理想条件下, $s_{11}(t)$ 应该为一个纯调频信号,即 $s_{1n}(t)$ 的包络估计函数 $a_{12}(t) = 1$ 。如果 $a_{12}(t) \neq 1$ 就说明 $s_{11}(t)$ 不是一个纯调频信号,需要重复进行上述的迭代过程,直至 $s_{1n}(t)$ 成为一个纯调频信号 $s_{1n}(t)$ 为止^[8]。在 $a_{1(n+1)}(t) = 1$ 的条件下,具体的迭代分解过程

$$\begin{cases} h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t); \\ h_{12}(t) = s_{11}(t) - m_{12}(t); \\ \vdots \\ h_{1n}(t) = s_{1(n-1)}(t) - m_{1n}(t). \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{式中:} \begin{cases} s_{11}(t) = h_{11}(t)/a_{11}(t); \\ s_{12}(t) = h_{12}(t)/a_{12}(t); \\ \vdots \\ s_{1n}(t) = h_{1n}(t)/a_{1n}(t). \end{cases} \quad (6)$$

迭代终止的条件为

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

在实际的信号处理过程中,在不影响分解效果的前提下,可以设定存在一个足够小的正值变动量 ε ,当 $s_{1n}(t)$ 的包络估计函数 a_{1n} 达到并处于 $[1 - \varepsilon, 1 + \varepsilon]$ 范围时,可终止程序的继续迭代,避免过度计算的浪费,降低运算时间。在实际中可以认定

$$a_{1n}(t) \approx 1, \quad (8)$$

笔者取 $\varepsilon = 0.001$ 作为迭代终止的条件。

步骤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,即瞬时幅值函数 $a_1(t)$,

$$a_1(t) = a_{11}(t)a_{12}(t)\cdots a_{1n}(t) = \prod_{q=1}^n a_{1q}(t), \quad (9)$$

该包络信号即为 PF 分量的瞬时幅值函数。

步骤6: 将纯调频信号 $s_{1n}(t)$ 和包络信号 $a_1(t)$ 相乘,便可以得到原始信号的第一个 PF 分量

$$PF_1(t) = s_{1n}(t)a_1(t), \quad (10)$$

式中:LMD 分解就是一个逐渐去除高频成分的过程,它的第一个 PF 分量包含了原始信号中的最高频率成分^[9]。 $PF_1(t)$ 为一个单分量的调幅—调频信号,其瞬时幅值是指包络信号 $a_1(t)$ 的幅值,其瞬时频率 $f_1(t)$ 则可通过对纯调频信号 $s_{1n}(t)$ 的进一步计算求得,即

$$f_1(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d[\arccos(s_{1n}(t))]}{dt}. \quad (11)$$

步骤7: 从原始信号 $x(t)$ 中减去第一个 PF 分量 $PF_1(t)$,得到一个新的分离后的信号 $u_1(t)$,并将 $u_1(t)$ 作为原始信号重复上述步骤1~步骤6,循环执行 k 次直至 u_k 成为一个单调函数为止。从原始信号中逐步分离的过程,

$$\begin{cases} u_1(t) = x(t) - PF_1(t) \\ u_2(t) = u_1(t) - PF_2(t) \\ \vdots \\ u_k(t) = u_{k-1}(t) - PF_k(t) \end{cases}. \quad (12)$$

步骤8: 同理,将从原始信号 $x(t)$ 分离出来的所有 PF 分量和残余量 u_k 相累加,这样就实现了对原始信号的重构,即

$$x(t) = \sum_{p=1}^k PF_p(t) + u_k(t). \quad (13)$$

由上述关于 LMD 分解和重构过程可知,LMD 并没有造成原始信号信息的丢失,而信号的完整的时频分布又体现在所有 PF 分量的瞬时幅值和瞬时频率之中^[6-9]。

2 仿真信号分析

定义,含调频调幅信号为 $y(t)$,趋势项信号为 $s(t)$,含趋势项的原始信号为 $x(t)$,其为调频调幅信号与趋势项信号之和,具体表达式为

$$x(t) = y(t) + s(t), t = 1, 2, \dots, N. \quad (14)$$

2.1 调频调幅信号仿真

根据对机械振动信号所含成分的分析可知,其主要由调幅调频信号、调幅信号、正弦信号等多重叠加而成^[13]。笔者构造的仿真数学模型为

$$y(t) = 1.2[1 + 0.5\cos(50\pi t)]\cos[1250\pi t + 2\cos(250\pi t)] + 4\sin(25\pi t)\sin(300\pi t) + \sin(250\pi t/3), \quad (15)$$

式中:采样频率为 1 000 Hz;采样点数为 2 000 个;采样时长为 2 s。

2.2 趋势项信号仿真

为了验证采取 LMD 方法对趋势项信号提取的有效性,笔者通过数学模型构造了线性、多项式

和指数这 3 种典型的趋势项仿真时域信号,以便于 LMD 方法与最小二乘拟合法、小波分析和 EMD 方法在趋势项提取比较中的应用.

线性趋势项: $s_1(t) = c_0 + c_1t$; (16)

多项式趋势项: $s_2(t) = c_0 + c_1t + c_2t^2 + \cdots, c_mt^m$; (17)

指数趋势项: $s_t(t) = ae^{-bt}$. (18)

式中:所用的趋势项的参数为 $c_0 = 0.4; c_1 = 0.8;$
 $c_2 = 0.2; c_3 = 0.02; c_4 = 0.002; a = 0.4; b = 1.0$.

为了便于区分无趋势项与线性、多项式和指数趋势项存在的差异关系,笔者对这 4 种典型的趋势项信号进行了仿真分析,图 1 为实验结果. 如图 1 所示,无趋势项始终维持在 0.4,而线性、多项式和指数趋势项随着时间的增加逐渐偏离正常值 0.4. 同理,趋势项的变化方向也可以朝着逐渐减小的趋势发展,变化方向上的不同并不会对趋势项的消除方法产生影响,笔者仅以仿真呈现逐渐增大作为趋势项的研究对象.

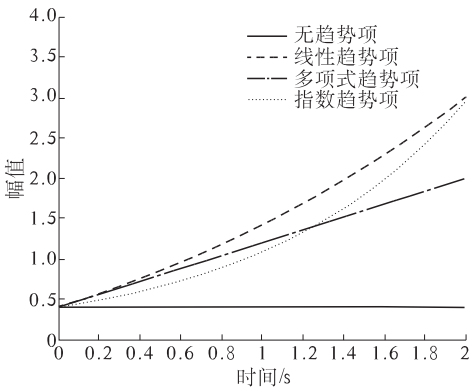


图 1 线性、多项式和指数趋势项比较
Fig.1 Comparison of linear trend, polynomial trend, and Index trend

2.3 LMD 提取趋势项

利用 LMD 对笔者构造的仿真信号进行分解,结果如图 2 所示. 这里以加载线性趋势项为例,从图 2 可以看出原始信号 $x(t)$ 具有明显逐渐线性增加的趋势项,经过 LMD 分解成为 6 个含有不同频率和幅值的 PF 分量. 由于 LMD 是一个从高频到低频逐级递减筛分的过程,且因分解产生的残余量幅值和频率均十分微弱. 考虑到机械振动信号中夹杂的趋势项自身具有频率同样很低,分解产生的残余量并不会对趋势项产生过大的影响,因此,LMD 分解的最后一个 PF 分量作为待提取的趋势项,并依据这一特性,作为提取机械振动信号中趋势项的依据是可靠的. 根据 LMD 分解后的重构原理,剔除最后一个 PF 分量,将前 5 个 PF

分量实现累加,以得到消除趋势项后的信号.

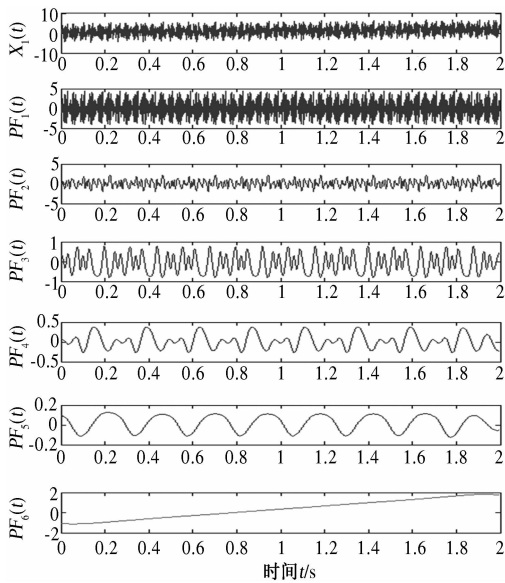


图 2 仿真信号的局域均值分解结果
Fig.2 The LMD result of simulated signal

为了对比经 LMD 方法消除趋势项前后的不同,对上述仿真信号进行分析,具体如图 3 所示. 图中红线定义了信号的范围,从图 3(a)可以看出由于趋势项的存在,仿真信号超出了信号原本的波动范围. 从图 3(b)可以看出经过 LMD 方法实现了对趋势项的有效剔除.

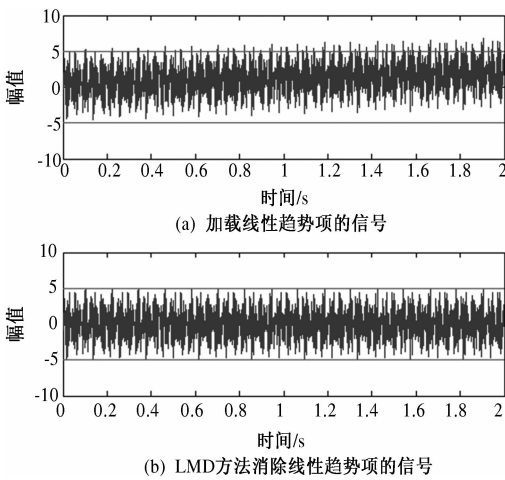


图 3 仿真信号的时域波形:
Fig.3 The domain waveforms of simulated signal

2.4 仿真信号趋势项提取方法比较

以给定的仿真信号 $y(t)$ 为例,分别采用最小二乘拟合法、小波分析、EMD 和 LMD 方法对线性、多项式和指数趋势项进行提取. 由于篇幅限制,且这 3 种趋势项差异不大,笔者仅以线性趋势项的提取为研究. 为了便于区分上述 4 种趋势项提取方法的优劣,笔者以 4 种方法提取的趋势项

与设定趋势项之差为标准,对比分析 4 种方法,如图 4 所示.4 种方法提取的趋势项整体上差异不大,在选择最佳拟合参数条件下,最小二乘拟合法效果最佳,而小波变换则存在初始波动的情况,而 EMD 方法和 LMD 方法则由于端部效应的影响,首尾两端会出现微小的波动.

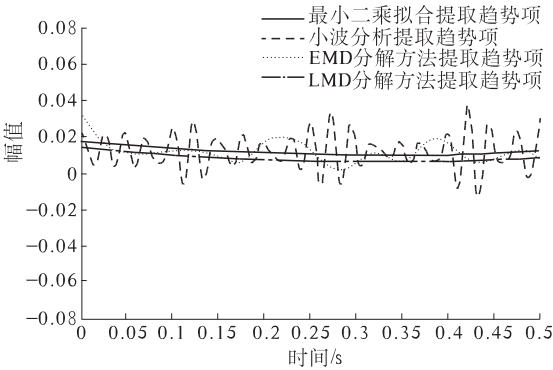


图 4 4 种趋势项提取方法比较

Fig.4 Comparison of four trend extraction method

3 实验分析研究

由于滚动轴承故障振动信号具有多分量调频信号的特点,笔者以美国凯斯西储大学轴承数据中心提供的滚动轴承内圈故障振动信号数据为基础,加载通过数据模拟方法构造的线性趋势作为待消除趋势项数据.趋势项加载前后内圈故障状态的滚动轴承振动信号比较,如图 5 所示.

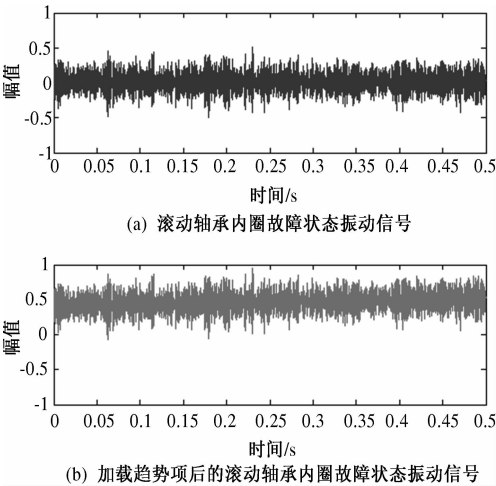


图 5 趋势项加载前后滚动轴承振动信号的比较
Fig.5 Comparison of loading trend before and after for vibration signal of rolling bearings

为了比较最小二乘拟合法、小波变换、EMD 和 LMD 方法对实际振动信号趋势项的提取效果,采用上述的 4 种方法提取内圈故障振动信号的趋势项,并将提取的趋势项与加载的趋势项求差.四

种趋势项提取方法的对比分析结果,如图 6 所示.

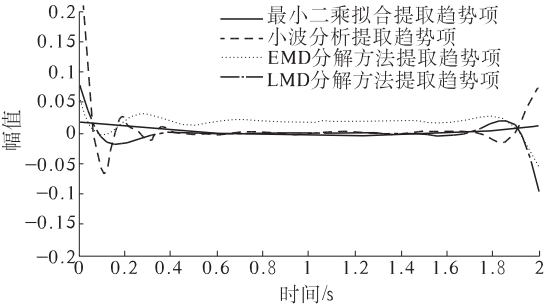


图 6 内圈故障振动的四种线性趋势项提取方法比较
Fig.6 Comparison of four linear trend extraction method for inner race fault rolling bearings

4 结论

(1)通过对含 3 种趋势项类型的仿真信号和实测信号的分析,验证了采用 LMD 分解方法对振动信号趋势项提取的有效性.通过对 4 种方法对仿真信号趋势项提取的比较,发现处于最佳参数设置的最小二乘拟合法能准确地提取趋势项.如果信号最高频率未知,小波分析方法受制于分解层数和小波的基函数选择.EMD 和 LMD 方法对趋势项的提取容易受到分解产生的端部效应的影响,而 LMD 方法不仅具有 EMD 的自适应提取优势,而且 LMD 的端部效果也优于 EMD,分解层数少不易出现模态混叠的现象.

(2)通过对上述 4 种趋势项提取效果的比较,发现采用最小二乘拟合法提取的趋势项与真实的趋势项存在较小的恒差,采用小波变换法在首尾两端会出现较大的波动,采用 EMD 方法则在趋势项中间有一定的脉动,而采用 LMD 方法相比其他 3 种方法最接近真实的趋势项,具有更好的趋势项提取效果.

参考文献:

[1] 孙伟,熊邦书,黄建萍,等.小波包降噪与 LMD 相结合的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2012,31(18): 153 – 156.
[2] 李振兴. 结合经验模态分解的振动信号趋势项提取方法[J]. 飞行器测控学报, 2011,30(1): 56 – 60.
[3] 张淑清,孙国秀,李亮,等. 基于 LMD 近似熵和 FCM 聚类的机械故障诊断研究[J]. 仪器仪表学报, 2013,34(3): 714 – 720.
[4] 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.
[5] Wang Yan-xue, He Zheng-jia, Xiang Jia-wei, et al.

- Application of local mean decomposition to the surveillance and diagnostics of low-speed helical gearbox[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 47 (1): 62 - 73.
- [6] CHENG Jun-sheng, ZHANG Kang, YANG Yu. An order tracking technique for the gear fault diagnosis using local mean decomposition method[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012(55): 67 - 76.
- [7] YANG Yu, CHENG Jun-sheng, ZHANG Kang. An ensemble local means decomposition method and its application to local rub-impact fault diagnosis of the rotor systems[J]. Measurement, 2012, 45(3): 561 - 570.
- [8] 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 - 84.
- [9] CHENG Jun-sheng, YANG Yi, YANG Yu. A rotating machinery fault diagnosis method based on local mean decomposition [J]. Digital Signal Processing, 2011(9): 1 - 11.

Trend Elimination Method of Mechanical Vibration Signal Based on Local Mean Decomposition

ZHAO Zhi-ke^{1, 2}, ZHANG Xiao-guang¹, WANG Xin²

(1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Control Engineering of Henan Province, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: A novel method of trend elimination for mechanical vibration signal by local mean decomposition is proposed in this paper. LMD is a decreasing decomposition process from high-frequency component to low-frequency component step by step, and both in amplitude and frequency of the residual component which is very weak. In view of the low frequency for the trend of mechanical vibration signals, and the residual component from LMD has little impact on the trend. Therefore, the last PF component could be the trend for mechanical vibration signals. In order to validate the correctness of proposed method in this paper, by using the method of numerical simulation to build the common linear trends, polynomial and exponential trend for loading on the simulation signal and the measured vibration signals of rolling bearings. The proposed LMD method, the conventional least square fitting method, the wavelet analysis and the EMD method can be used to extract the trends respectively. Numerical simulation test and the measured data processing results show that this method can accurately extract the trend of the mechanical vibration signal, compared with the other methods to extract the trend, and LMD has a certain advantage.

Key words: mechanical vibration signal; local mean decomposition; trend; envelope signal; purely frequency