

基于标准化自协方差相关函数的 EMD 改进算法

杨 斌,陈桂明,杨 庆

(第二炮兵工程大学 装备管理工程系,陕西 西安 710025)

摘 要:针对经验模态分解中存在的端点效应问题,提出了一种基于标准化自协方差相关窗函数的改进算法。利用标准化自协方差相关函数作为判定准则,在原信号内部寻找与端点处波形最相似,幅值差异最小的一段波形,用此段波形代替产生端点效应的包络线进行迭代。为有效降低分解误差,对延拓后的信号加窗函数,再进行经验模态分解。通过仿真和工程试验结果表明该算法可以有效地抑制端点效应,具有较高的分解精度,与其他几种常见算法相比具有算法简单、易于实现的特点。

关键词:经验模态分解;端点效应;标准化自协方差相关函数;窗函数

中图分类号:TN911.7

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)05-0067-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.05.017

Improved EMD Algorithm Based on Standardized Auto-covariance Correlation Function

YANG Bin, CHEN Gui-ming, YANG Qing

(Dept. of Equipment Management Engineering, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to solve the problem of end effect in EMD, a standardized covariance window function improved algorithm is proposed. A standardized self-covariance correlation function is used for the similarity criterion of the internal signal to find the endpoint waveform which is the smallest amplitude difference waveforms for data extension, instead of this segmentation waveform to produce the end effect to iterate the envelope. In order to reduce the decomposition error, the analyzed signal is preprocessed by multiplying with the defined window, and the EMD method is used to analyze the preprocessed signal. Simulation and experimental results show that the algorithm can effectively restrain the end effect. The algorithm is simple and easy to implement compared with several other common algorithm.

Key words: empirical mode decomposition (EMD); end effect; standardized auto-covariance correlation function; window function

0 引言

经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 是 N E Huang 提出的适用于非线性、非平稳信号的时频处理方法^[1]。经验模态分解中关键的一步是以信号序列的上下极值点作为插值点拟合信号的上下包络线,如果信号两端的极值点不确定时,上下包络线在序列两端会出现“飞翼”现象,上下包络线均值会产生一定的误差,包络线拟合误差会随着分解层数的增加,误差越来越大,结果严重失真,产生端点效应^[2]。

针对端点效应产生的机理,国内外学者进行了大量研究,提出了一些抑制端点效应的方法,例如:多项

式拟合延拓法^[3]、镜像极值延拓法^[4]、窗函数法^[5]、波形延拓法^[6]、支持向量机预测法。这些方法各有优缺点。在分析研究现有方法的基础上,针对液压泵振动信号特点,提出基于标准化自协方差相关函数的 EMD 改进算法,并通过仿真和试验验证该方法的有效性。

1 经验模态分解理论

1.1 EMD 算法基本原理

经验模态分解是通过筛分的方法把复杂信号分解为一组具有明确物理意义的本征模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF) 之和^[7-9]。要得到本征模态函数应满足以下两个条件^[10]:

(1) 原信号序列极值点和过零点数目必须相等或至多差一个;

(2) 极大值点和极小值点构成的信号序列上下包络线的均值为 0。

经验模态分解算法基本步骤如下:

收稿日期:2012-08-30;修回日期:2012-12-04

基金项目:军队科研项目(装[2008]466)

作者简介:杨 斌(1986-),男,甘肃兰州人,硕士研究生,主要研究方向为机械设备状态监测与故障诊断;陈桂明,博士,教授,博士研究生导师,主要研究方向为机械设备状态监测与故障诊断。

用三次样条插值函数将信号 $x(t)$ 的所有局部极大值点和极小值点插值拟合成信号序列的上下包络线, 计算上下包络线均值 $h(t)$, 记:

$$m(t) = x(t) - h(t) \quad (1)$$

重复第一步直到 $m(t)$ 满足 IMF 的要求, 得到一阶 IMF, 记:

$$c_1(t) = m(t) \quad (2)$$

式中, $c_1(t)$ 是 IMF1。

用原信号 $x(t)$ 减去 $c_1(t)$, 得到一个新信号 $r_1(t)$, 视 $r_1(t)$ 为新的信号。重复以上过程, 得到 $c_2(t), c_3(t), \dots, c_n(t)$ 。当 $c_n(t)$ 或 $r_n(t)$ 满足分解终止条件时, EMD 分解停止。原信号可表示为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (3)$$

式中, $c_i(t), i = 1, 2, \dots, n$ 代表信号 $x(t)$ 的 IMF 分量, 它们包含了信号从高频到低频的各分量, 每一频率段所包含的频率成分都是不同的; $r_n(t)$ 为残余量, 表征了信号 $x(t)$ 的平均变化趋势, 信号 $x(t)$ 由 n 个不同时间尺度下的 IMF 分量和残余分量 $r_n(t)$ 组成。

1.2 端点效应产生机理

由经验模态分解算法步骤可以看出: 由于经验模态分解端点处极值点的不确定, 包络线拟合时在序列两端难以确定包络线拟合的趋势, 会出现“飞翼”现象, 拟合的上下包络线及包络线均值会产生拟合误差, 并且随着分解层数的增多, 包络线拟合的误差越来越大, 分解结果严重失真, 产生虚假 IMF 分量。

2 改进 EMD 算法

2.1 标准化协方差相关函数波形延拓

由于信号端点处极值难以确定, 导致拟合的包络线在信号序列两端点处出现发散。要有效抑制端点效应就必须确定经验模态分解过程中信号两端点处上下包络线的变化趋势。

除了现有的一些方法外, 以标准化协方差相关函数作为判定依据, 在信号内部寻找与端点处波形最相似, 幅度差异最小的匹配波形。可以用该段波形来对原信号两端点进行数据延拓。文中以标准化协方差相关函数为判定函数, 综合考虑波形的相似度和幅度差异, 使延拓后的信号尽量符合原信号的变化趋势, 同时使拟合后的包络线平滑。由于延拓后信号端点依然不固定, 随着分解层数的增多, 端点效应仍会逐步向内“污染”整个信号序列。

2.2 窗函数法

在信号处理中, 窗函数经常被用来加强中心点附近的信号, 抑制两端信号。信号加窗函数后, 由于端点处信号为 0, 端点既是极大值点也是极小值点, 上下包

络线均收敛于端点, 信号包络线变得比较平滑, 样条函数可以更好地拟合包络线, 消除端点效应^[11]。但在分解的过程中, 加窗函数又改变了原信号组成。

2.3 基本方法及算法

针对上述问题文中采用自协方差相关函数进行信号延拓, 对延拓后的信号两端加海明窗, 中间加矩形窗, 最后进行 EMD, 分解完成后舍去延拓部分, 将端点效应抑制在原信号端点以外。信号延拓包括左右两端点, 以左端点为例, 步骤如下:

离散信号 $s(t) = [s(t_1), s(t_2), s(t_3), \dots, s(t_n)]$, 其中有 h 个极大值点和 k 个极小值点。令极大值为 $M = [M(1), M(2), \dots, M(h)]$; 对应的时间序列 $t_M = [t_{M1}, t_{M2}, \dots, t_{Mh}]$; 极小值 $N = [N(1), N(2), \dots, N(k)]$; 对应时间序列 $t_N = [t_{N1}, t_{N2}, \dots, t_{Nk}]$ 。以左端点至第二个极大值点信号序列 $s_1(t) = [s(t_1), \dots, s(t_{M1}), \dots, s(t_{M2})]$ 为研究对象; 以每个极大值点为中心, 并取子波形 $s_i(t) = [s(t_{Mi} - (t_{M1} - t_1)), \dots, s(t_{Mi}), \dots, s(t_{Mi} + (t_{M2} - t_{M1}))]$; 以标准化自协方差相关函数作为判定函数, 如式(4)所示, 寻找与 $s_1(t)$ 波形最相似, 幅值最接近的匹配波形。

$$C = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_{M2}} [s_1(t) - \bar{s}_1][s_i(t) - \bar{s}_i]}{\sqrt{\sum_{t=t_1}^{t_{M2}} [s_1(t) - \bar{s}_1]^2} \sqrt{\sum_{t=t_1}^{t_{M2}} [s_i(t) - \bar{s}_i]^2}} \quad (4)$$

\bar{s}_1, \bar{s}_i 为波形幅值的均值。对 $s_1(t)$ 最匹配的子波形向左进行数据延拓, 延拓的点数视分解要求而定。对信号右端点的数据延拓原理同上。对延拓后的信号加特殊窗函数, 最后进行 EMD, 分解完成后, 舍去两端延拓信号, 即得到原信号的 EMD 结果。

3 仿真验证

为验证文中所提方法抑制端点效应的有效性, 采用如表达式(5)的仿真信号进行试验验证。

$$x(t) = \cos(60\pi t + 0.5\sin(20\pi t)) \times (1 + 0.2\sin(10\pi t)) + \sin(240\pi t) \quad (5)$$

直接进行 EMD 的结果如图 1 所示, 采用标准化自协方差相关窗函数法 EMD 结果如图 2 所示。从图 1 结果可知, 直接进行 EMD 后, 一阶本征模态函数两端存在明显偏差, 二阶本征模态函数左右两端、三阶本征模态函数右端点均存在着端点效应, 随着信号分解的不断进行, 误差越来越大, 严重影响了分解结果。对比图 2 的结果, 文中的标准化自协方差相关函数法一阶本征模态函数、二阶本征模态函数端点效应均得到有效抑制, 三阶本征模态函数分解也较为理想, 残余量符合信号的变化特征。

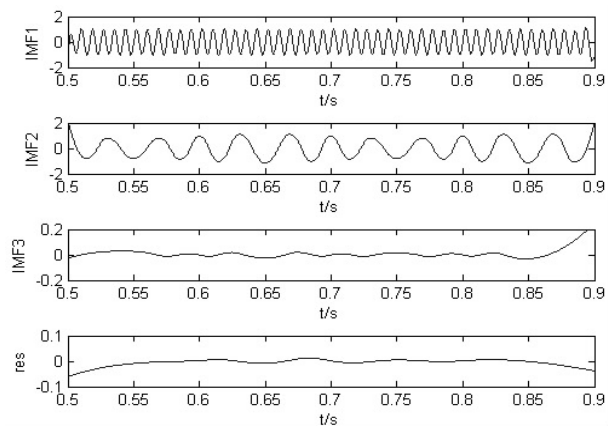


图 1 直接 EMD 结果

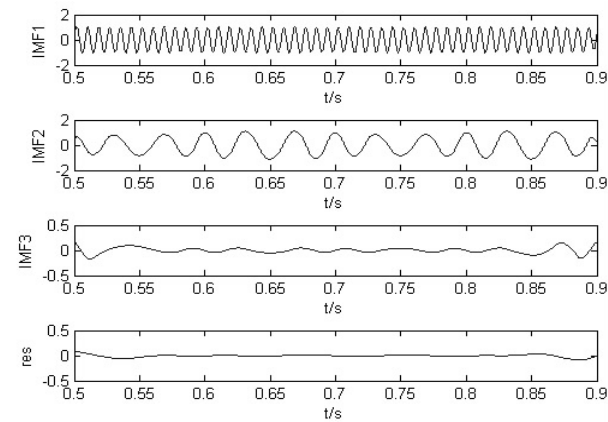


图 2 标准化协方差相关函数法 EMD 结果

为验证文中方法抑制端点效应的优越性,以相同分解终止条件,分别采用多项式拟合法、窗函数法对仿真信号进行 EMD,分解结果如图 3 和图 4 所示。通过几种方法对比可以发现:多项式拟合法一阶本征模态函数存在较大偏差,二阶本征模态函数右端点信号发散;窗函数法二阶左端点、三阶右端点均存在端点效应。综合分析比较,文中提出的标准化协方差相关窗函数法 EMD 算法可靠性更高。

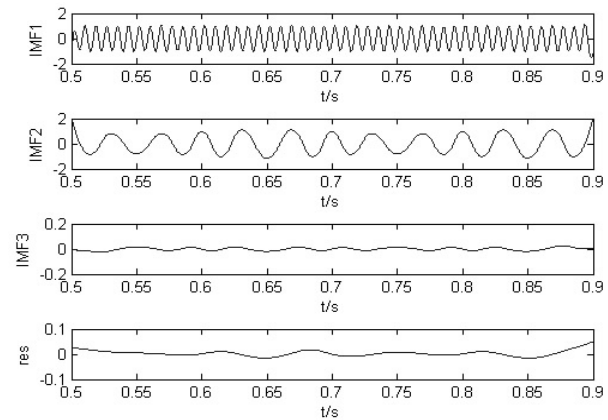


图 3 多项式拟合 EMD

4 实验分析

在实验室针对 CB-KP63 齿轮泵进行试验,采样频

率为 20kHz,采样点数为 1024,采用文中提出的标准化自协方差相关窗函数法进行工程验证。图 5 为未经处理后的 EMD 结果,图 6 为用文中方法处理后的 EMD 结果图。

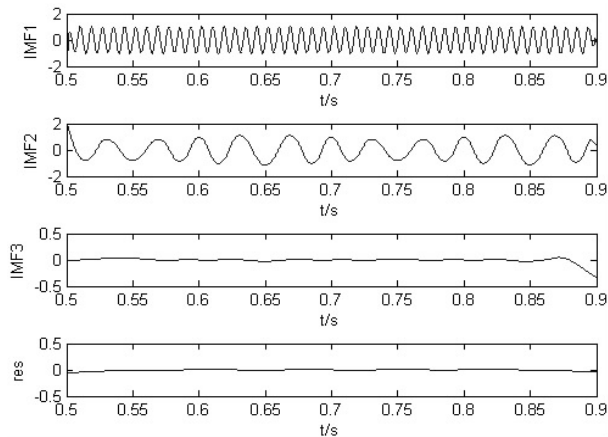


图 4 窗函数法 EMD

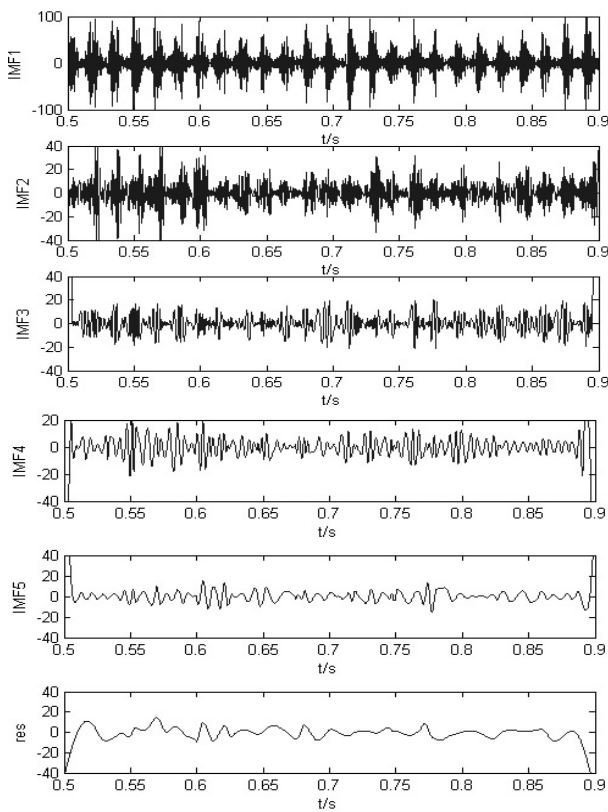


图 5 端点效应未处理时 EMD 结果

通过验证发现:端点效应未处理时,各阶本征模态函数均存在端点效应,分解结果严重失真,信号发生了畸变;经标准化自协方差相关窗函数法处理后,EMD 各阶本征模态函数端点效应得到有效抑制,分解得到的残余量较为合理。试验表明:利用自协方差相关窗函数法能有效抑制端点效应。

5 结束语

针对 EMD 端点效应问题,分析研究端点效应产生

的机理,提出了基于标准化自协方差相关窗函数的抑制端点效应新方法。该方法在寻找与端点波形最相似的匹配波形时,考虑了波形相似度和幅值因素,在对波形延拓后,为了有效抑制端点效应产生的误差污染信号序列,在信号两端加海明窗,中间加矩形窗,既保留了源信号,又降低了包络拟合误差的积累。仿真和试验结果均表明:该方法能有效降低 EMD 包络线拟合误差,有效抑制信号端点处的发散,与其他分解方法相比精度更高。

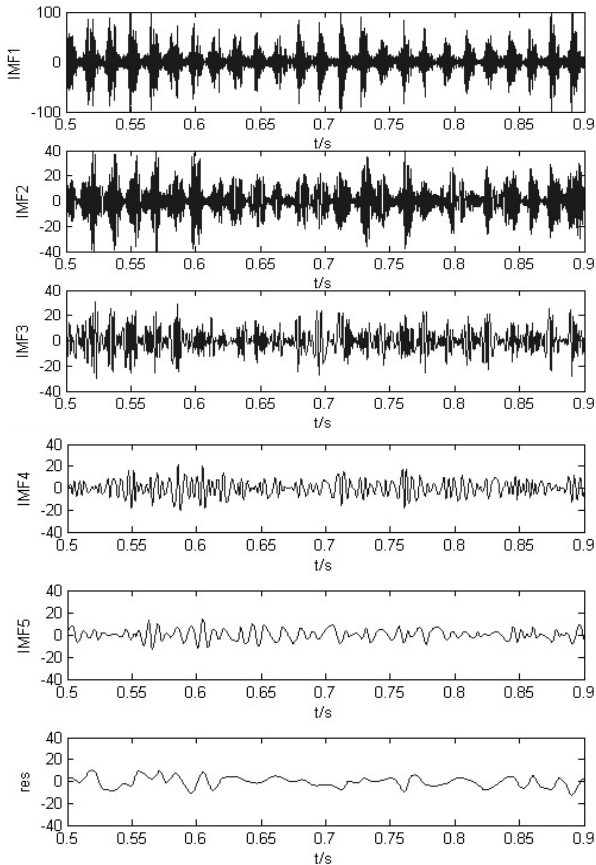


图 6 端点效应处理后的 EMD 结果

参考文献:

- [1] 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 A, 1998, 454: 903-995.
- [2] 沈路, 周晓军, 张志刚, 等. Hilbert-Huang 变换中的一种端点延拓方法[J]. 振动与冲击, 2009, 28(8): 168-171.
- [3] Zhang Qingjie, Zhu Huayong, Shen Lincheng. A new method for mitigation of end effect in empirical mode decomposition[C]//2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. [s. l.]: [s. n.], 2010: 400-403.
- [4] Rilling G, Flandrin P, Goncalves P. On Empirical Mode Decomposition and Its Algorithms[C]//IEEE-Eurasip Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing. [s. l.]: [s. n.], 2003.
- [5] 祈克玉, 施坤林, 霍鹏飞, 等. EMD 端点效应处理在转子摩擦故障诊断中的应用[J]. 振动测试与诊断, 2010, 30(5): 492-495.
- [6] Huang N E. Empirical mode decomposition apparatus, method and article of manufacture for analyzing biological signals and performing curve fitting[P]. United States Patent, 2002.
- [7] 王婷, 杨莘元, 李冰冰. 一种改善 EMD 端点效应的新方法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2009, 14(5): 23-26.
- [8] 胡爱军, 安连锁, 廖贵基. Hilbert-Huang 变换端点效应处理新方法[J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 154-158.
- [9] 刘慧婷, 张旻, 程家兴. 基于多项式拟合算法的 EMD 端点问题的处理[J]. 计算机工程与应用, 2004(16): 84-86.
- [10] Cheng Junsheng, Yu Dejie, Yang Yu. A fault diagnosis approach for roller bearings based on EMD method and AR model[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(2): 350-362.
- [11] 任达千, 吴昭同, 严拱标. EMD 端点效应的评价指标及抑制端点效应的窗函数法[J]. 制造业自动化, 2007, 29(1): 21-24.

(上接第 66 页)

- [2] 任永昌. 软件项目管理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [3] 张珺. 浅谈软件开发项目的成本控制[J]. 经济研究导刊, 2010(27): 111-112.
- [4] 百度知道. 项目管理成本控制的方法[EB/OL]. 2012-08-01. <http://zhidao.baidu.com/question/60352.html>.
- [5] Tomg Chau-Chen, Lee Pei-Hsi, Liao Naiyi. An economic-statistical design of double sampling control chart Original Research Article[J]. International Journal of Production Economics, 2009, 120(2): 495-500.
- [6] Nezhad M S F, Niaki S T A. A new monitoring design for univariate statistical quality control charts[J]. Information Sciences, 2010, 180(6): 1051-1059.
- [7] 秦静, 方志耕, 关叶青. 质量管理学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [8] Gitlow H S. 质量管理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [9] Ren Y C, Xing T, Jiang D Y, et al. Research on Software Quality Control Method Based on Control Chart[C]//CCIE 2011. [s. l.]: IEEE Press, 2011.
- [10] 张公绪, 何国伟, 郑慧英. 新编质量管理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [11] Abudayyeh O, Temel B, Al-Tahtabai H, et al. An Intranet-based cost control system[J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32(2): 87-94.

基于标准化自协方差相关函数的EMD改进算法

作者: [杨斌](#), [陈桂明](#), [杨庆](#)
作者单位: [第二炮兵工程大学 装备管理工程系, 陕西 西安 710025](#)
刊名: [计算机技术与发展](#)
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2013(5)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201305019.aspx