

# 基于经验模态分解的超声波管外测压信号去噪

孙凌逸, 黄先祥, 蔡伟, 杨志勇

(第二炮兵工程学院兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 西安 710025)

**摘要:** 在超声波管外测压中, 回波信号往往受到噪声的干扰, 所以在提取信号特征时, 需对回波信号进行去噪。提出了一种基于经验模态分解(EMD)的超声波信号去噪方法, 首先利用 EMD 求出信号的本征模态函数(IMF), 然后通过对比分析, 利用反映信号主要特征的模态分量对信号进行重构以实现去噪。实验结果表明, 该方法能够有效地去除噪声, 提高超声回波信号的信噪比。

**关键词:** 经验模态分解; 超声波; 管外测压; 去噪

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-05-0427-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.05.011

## An EMD-based signal de-noising method for ultrasonic pressure measurement outside pipeline

SUN Ling-yi, HUANG Xian-xiang, CAI Wei, YANG Zhi-yong

(National Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory & Technology,  
The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** In ultrasonic pressure measurement outside pipeline, echo signal is disturbed by electronic noise, structure noise and so on. Before analysis, the ultrasonic echo signal should be de-noised to get better results. In this paper, a de-noising method of ultrasonic signal based on empirical mode decomposition (EMD) is proposed. Firstly, the original ultrasonic signal is decomposed into a finite number of intrinsic mode functions (IMF) by EMD, then the modes reflecting the important features of the signal are combined together to reconstruct the de-noised signal. The experimental results show that this method has better performance in removing the noise and enhancing the signal-to-noise ratio (SNR) of ultrasonic echo signal.

**Key words:** empirical mode decomposition; ultrasonic; pressure measurement outside pipeline; de-noising

## 0 引言

由于液压系统管路内介质特性(压力场、温度场、流场等)的不确定性以及不同信号源的影响, 如超声波源信号、不同界面回波信号以及环境噪声等, 导致超声波管外测压回波信号呈现出时频有限的非平稳特性。同时在超声波的传播过程中信号会发生衰减并引入各种噪声干扰, 因此, 要想获取反映目标参数的特征量, 就必须对回波信号进行去噪, 以减小噪声干扰的影响。

小波变换通过小波基的伸缩和平移, 实现了信号的时频分析局部化, 利用其多分辨特性可以实现干扰背景下信号的有效检测。因其具有传统降噪方法不可比拟的优越性, 在信号去噪中被广泛应用。但由于小波变换存在基函数选取、分解层次确定、

频域重叠和阈值不确定等问题, 所以, 小波变换对信号的局部没有自适应性, 不具备自适应的信号分解特性<sup>[1]</sup>。

经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)<sup>[2]</sup>是由 Norden E. Huang 于 1998 年提出的一种新的信号时频分析方法, 该方法基于信号的局部特征时间尺度, 可以把信号分解为若干个本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)之和, 各 IMF 分量突出了数据的局部特征。该方法与小波变换的区别在于它是后验的, 不需要事先选定基函数, 而是根据信号本身的特性自适应产生合适的模态函数, 这些模态函数很好地反映信号在任何时间局部的频率特性<sup>[3]</sup>, 因此经验模态分解是自适应的信号处理方法, 非常适合处理非线性和非平稳信号。

超声波回波信号具有较强的非平稳特征, 采用适当的经验模态分解对其进行分析, 可以更准确、有效地把握信号特征信息。本文将经验模态分解应用到超声波管外测压信号的去噪中, 对 EMD 去噪方法进行了分析和实验。

收稿日期: 2010-10-19; 修回日期: 2011-01-18

作者简介: 孙凌逸(1979—), 男, 河南镇平人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为智能检测及无线传感器网络。

通讯作者: 孙凌逸, E-mail: sunlyi79@163.com

## 1 经验模态分解的基本原理

经验模态分解可以将复杂的信号分解成一系列具有不同时间尺度的本征模态函数, 每个本征模态函数必须满足以下 2 个条件: (1) 在整个数据段内, 局部极值点数与过零点数目必须相等或者至多相差 1; (2) 在任何一点, 由局部极大值点形成的包络线和由局部极小值点形成的包络线的均值为零, 即信号关于时间轴局部对称。

第一个条件是显然的, 它与传统上平稳 Gaussian 过程的“窄带”要求相似; 第二个条件是种新的思想, 它将经典的全局条件修改成为局部条件, 这种限定可以去除由于波形不对称而造成的瞬时频率的波动。满足以上两个条件的模态分量, 其连续两个过零点之间只有一个极值点, 即只包括一个本征模态的振荡, 没有复杂的叠加波存在。如此定义的本征模态函数并不被限定为窄带信号, 可以是具有一定带宽的非平稳信号。

同时, 由于将所有的本征模态函数相加即可对信号进行完全重构, 故经验模态分解过程是完备的, 其本质上是一个筛选过程, 分解步骤如下:

(1) 确定  $x(t)$  的所有局部极值点和过零点, 分别对所有局部极大值点和局部极小值点进行三次插值, 形成上、下包络线, 求两包络线的均值  $m(t)$ 。

(2) 求取  $x(t)$  与  $m(t)$  的差值  $h_1(t)$ , 在理想情况下应该是一个本征模态函数, 但是对非线性、非平稳数据而言, 可能一些信号包络线的均值与局部均值不同, 因而仍会有一些非对称波存在。在这种情况下, 将  $h_1(t)$  视为待处理信号继续进行筛选过程

$$h_{11} = h_1 - m_{11} \quad (1)$$

直至  $h_k$  符合本征模态函数的二个条件, 则分解出的第一个 IMF 为

$$c_1 = h_k \quad (2)$$

从原信号  $x(t)$  中减去  $c_1$ , 得到余项  $r_1(t) = x(t) - c_1$ , 由于原信号可能包含不止一个本征模态函数, 因而需继续对  $r_1(t)$  进行筛选。

(3) 把  $r_1(t)$  当作一个新的“原始”序列重复以上过程, 得到  $x(t)$  的第二个满足 IMF 条件的分量  $c_2$ , 重复循环  $n$  次, 得到信号  $x(t)$  的第  $n$  个满足 IMF 条件的分量。当  $r_n(t)$  成为一个单调函数不能再从中提取满足 IMF 条件的分量时, 循环结束。

经过分解后, 原始信号可表示为

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

即经验模态分解可将任何一个信号  $x(t)$  分解为  $n$  个

本征模态函数分量和一个残余分量之和, 分量  $c_1, c_2, \dots, c_n$  分别包含了信号从高到低不同频率段的成分, 每一频率段所包含的频率成分不同, 而且随信号  $x(t)$  本身的变化而变化,  $r_n(t)$  则表示信号  $x(t)$  的中心趋势。

## 2 超声波管外测压及回波信号分析

当液压系统压力发生变化时, 会导致管路油液中超声波声速的变化, 进而导致超声波发射与接收信号之间的时间差发生变化。由于传播时间比声速容易测量, 故将管路测压转化为求解超声波在油液中的传播时间, 这样油液压力与超声波声速之间的关系就转化成压力与超声波传播时间之间的关系, 从而通过对声时的测量得到油液压力的大小。

由于液体介质没有剪切弹性, 只能传播纵波, 所以液压系统管外测压采用纵波直探头, 其工作原理如图 1 所示。垂直安装在管路外壁的探头发射超声波, 超声波经耦合层进入上管壁后, 一部分从界面 2 反射回上管壁, 另外一部分经界面 2 透射到油液中继续向下传播。到达界面 3 时, 部分超声波透射进入下管壁, 该部分信号能量很弱, 可忽略; 其余超声波从界面 3 反射回来, 在油液中向上传播至界面 2, 经界面 2 透射并穿透上管壁后被探头接收, 该部分为承载油液压力变化信息所需的回波信号。

回波信号进入探头前需通过上管壁, 通常, 液压系统管路壁厚只为几个毫米, 界面 2 处的反射回波与界面 1 处的反射回波将发生混叠, 并且声波会在上管壁内发生多次反射与透射, 势必影响到回波信号的波形。

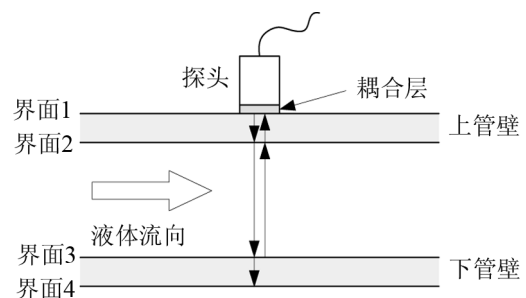


图 1 超声波管外测压示意图

Fig.1 The sketch of ultrasonic pressure measurement outside pipeline

这里采用 5 MHz(实测 4.012 MHz)的直探头进行管外测压实验, 管路外径 16mm, 壁厚 2mm, 管内油液为 10 号航空液压油, 实测管外测压回波信号如图 2(b)所示(采样频率为 62.5 MHz)。同时进行试块测厚实验, 并与之对比, 试块厚度 40mm, 材料为钢质。信号图中横坐标为时间, 以采样点表示,

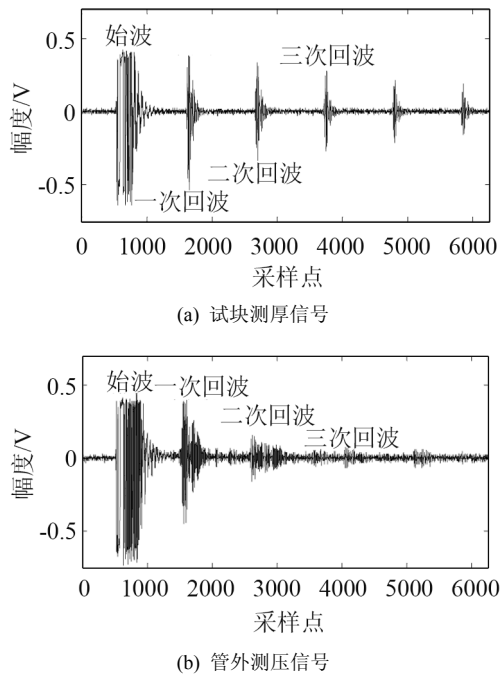


图 2 两种超声波检测信号  
Fig.2 Two kinds signals of ultrasound measurement

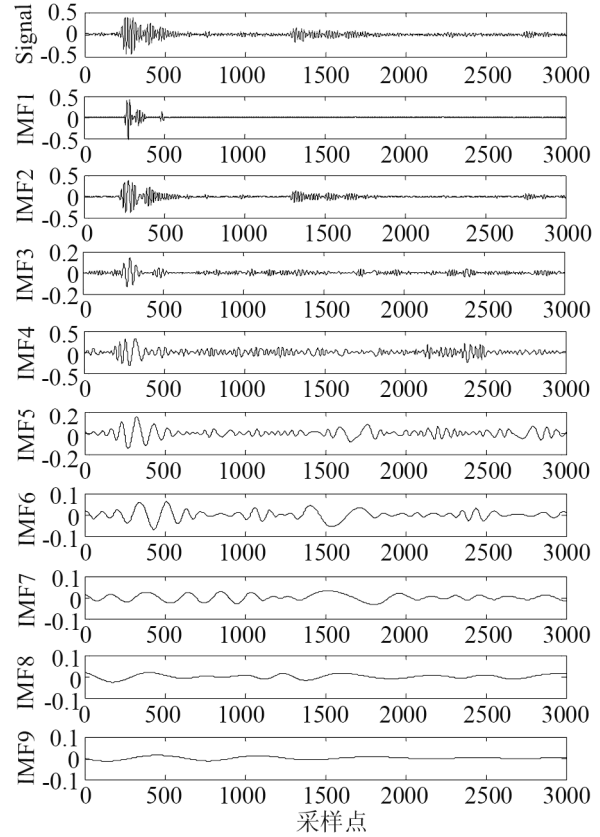
以下同。

由图 2 可知, 在相同硬件条件下(探头、超声发射/接收电路、数据采集电路等), 不同测试对象的回波信号差别很大: 图 2(a)中测厚信号的回波强度大, 易区分, 采用传统的信号处理手段(确定峰值等)即可计算时差, 进而求得试块的厚度; 而在图 2(b)中, 管外测压受声时小以及多个界面回波信号的影响, 回波产生混叠, 回波的准确位置难以确定, 加之检测环境中存在的噪声干扰, 采用传统的信号处理方法计算时差比较困难, 而时差的变化量正反映出管内油液压力的变化情况。

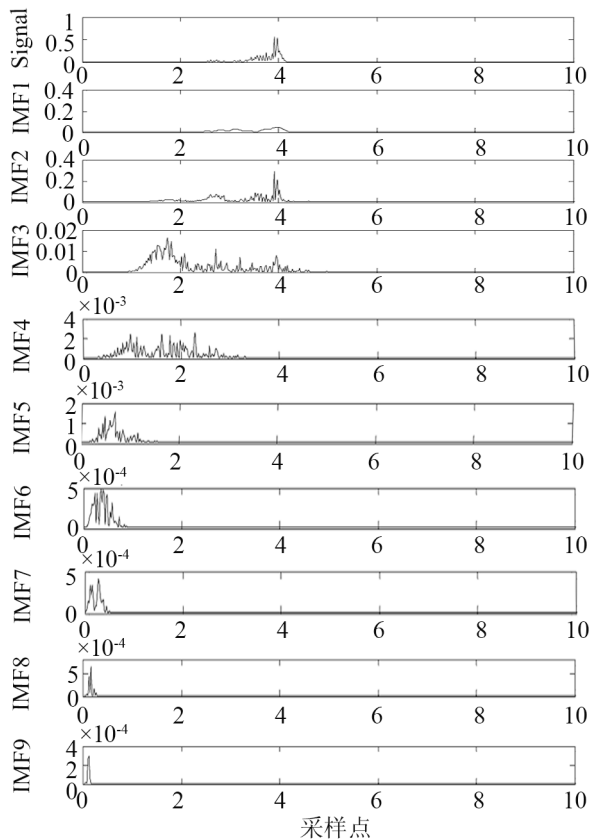
由于管外测压信号及其噪声干扰信号基本都属于非稳态信号, 因此很难通过对实测信号进行直接滤波的方法来去除噪声。考虑到经验模态分解总是将信号中最主要的成分先提取出来, 因此可以尝试利用分解得到的前几个 IMF 来恢复被干扰的真实信号, 而对于后几个 IMF, 如果干扰的成分比较突出, 可以直接将其滤除。

### 3 EMD 在管外测压信号去噪中的应用

图 3 是超声波管外测压信号的 EMD 分解及 IMF 幅频图。图 3(a)为超声波管外测压信号(一、二、三次回波)的原始波形及 EMD 分解结果。该信号经 EMD 分解后得 9 个不同的本征模态函数(如图所示从上到下依次排列), 以及一个表征趋势的残余分量。由于得到的残余分量是单调的, 幅值也较小,



(a) 超声波管外测压信号的 EMD 分解



(b) 各 IMF 幅频图

图 3 超声波管外测压信号的 EMD 分解及 IMF 幅频图  
Fig.3 EMD decomposition of the signal in ultrasonic pressure measurement outside pipeline and IMFs' frequency spectrogram

表 1 IMF 特征参数计算结果  
Table1 IMF characteristic parameters

	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	IMF9
最大幅值	0.4225	0.3898	0.1410	0.0326	0.0156	0.0062	0.0032	0.0021	0.0014
信号能量	0.6627	1.4229	0.1783	0.0263	0.0068	0.0022	0.0011	4.7636e-004	2.0974e-004
与原始信号相关性	0.5125	0.7182	0.1510	0.0503	0.0208	0.0130	0.0040	-0.0005	-0.0028

对于分析超声波管外测压信号的作用不大，故在超声波管外测压信号分析中可不考虑残余分量的影响。

这里采用最大幅值、信号能量和与原始信号相关性这三个特征参数对 IMF 分量进行分析，分别对每个 IMF 分量求出最大幅值、信号能量、与原始信号相关性，如表 1 所示。

从图 3(a)和表 1 可以看出，IMF4 及其以后本征模态的振幅已经相当小，前三个模态已基本描述了该信号的特征。根据超声波管外测压信号的特征，在三个有效 IMF 分量中，可以确定分量 IMF2 和 IMF3(具有明显的物理意义)具有典型的超声波管外测压信号的特点。但分量 IMF3 与原始信号相关性已大为减弱，且其中心频率也大大偏离探头的工作频率，见图 3(b)。

图 4 是各 IMF 分量的能量分布，横坐标表示第几个 IMF 分量，纵坐标表示每个分量的能量。从图 3 可以看出，虽然前 3 个分量的能量比较大，但能量主要集中在第 2 个分量，也就是说超声回波信号的能量主要集中在分量 IMF2 中。结合上文对各 IMF 分量特征的分析，选取模态分量 IMF2 对回波信号进行重构。重构后的信号如图 5(b)所示，其混叠程度大为减低，波形特征更加突出，并且较好地保留了原始信号的细节。

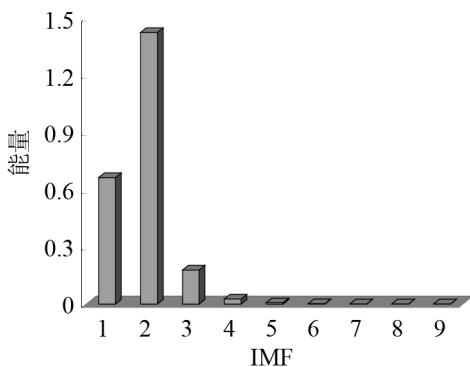
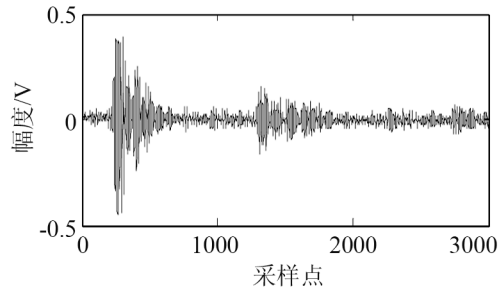
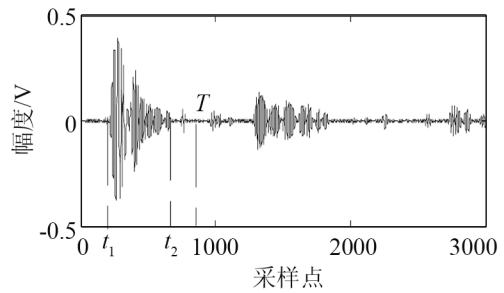


图 4 各 IMF 的能量  
Fig.4 Energy of every IMF

从图 5 中可以看出，与原始信号相比，经 EMD 方法去噪后，噪声水平得到较好抑制，由噪声引起的回波幅值变化基本可以忽略。文中通过在时域内截取一次回波，并对比其去噪前后的信噪比来验证 EMD 方法的去噪效果。这里引入信噪比公式<sup>[4]</sup>：



(a) 原始回波信号



(b) 去噪后回波信号

图 5 原始回波信号与重构后的去噪信号对比  
Fig.5 Comparison between original signal and reconstruction signal

$$SNR=10 \lg \left( \frac{\frac{1}{t_2-t_1+1} \sum_{t=t_1}^{t_2} x^2(t)}{\frac{1}{t_1} \sum_{t=1}^{t_1} x^2(t) + \frac{1}{T-t_2} \sum_{t=t_2+1}^T x^2(t)} \right) \quad (4)$$

式中  $t_1, t_2, T$  如图 5(b)所示。

利用式(4)对一次回波的信噪比进行计算：去噪前的信噪比  $SNR_{in}$  为 13.855 dB，去噪后的信噪比  $SNR_{out}$  为 19.387 dB，信噪比提高了 5.532 dB。

## 4 实例分析

利用小型压力油源系统，结合本文第 3 部分中的实验条件，针对 0MPa、5MPa、10MPa、15MPa 的管路压力，进行回波信号采样。试验时，采用基于互相关函数的时延估计方法来计算声时差。由于基于互相关函数的时延估计方法是以基准信号为基础的，这里以 0MPa 压力下的回波信号为基准信号，分别对 5MPa、10MPa、15MPa 压力下的声时差进行计算，得到声时差计算结果如表 2 所示。可见，经 EMD 去噪后，回波声时差的误差大幅降低。

表2 回波声时差计算结果  
Table1 Time difference of echo signal

压力/MPa	声时差/ns				
	理论值	去噪前	绝对误差	去噪后	绝对误差
5	283.2	256.6	9.39%	275.4	2.75%
10	556.8	591.6	6.25%	567.6	1.94%
15	822.4	885	7.61%	839.8	2.12%

## 5 结论

本文提出了一种基于经验模态分解的超声波管外测压信号去噪方法,通过对采集到的超声回波信号进行经验模态分解,然后对分解得到的各IMF分量进行特征分析,并结合IMF分量的能量,选取包含有效回波信息的IMF分量进行信号重构,在保留回波信号特征信息的前提下去除了大部分噪声,这对回波信号的进一步分析非常有意义。该方法在超声波管外测压信号去噪方面表现出的良好性能,为今后超声波信号的处理提供了一定的参考。

### 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,2006:14-23.  
YU Dejie, CHENG Junsheng, YANG Yu. The Hilbert-Huang Transform in machinery failure diagnosis[M]. Beijing: Science Press, 2006: 14-23.
- [2] HUANG N E, ZHEN Shen, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proc. R. Soc. Lond. A, 1998, 454: 903-995.
- [3] Patrick Flandrin, Gabriel Rilling, Paulo Goncalvés. Empirical mode decomposition as a filter bank[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2): 112-114.
- [4] Kim J, Udpa I, Udpa S. Multi-stage adaptive noise cancellation for ultrasonic NDE [J]. NDT&E International, 2004, 34(5): 319-328.
- [5] 张琦, 阙沛文, 陈天璐. 基于经验模态分解的管道超声回波信号噪声消除[J]. 测试技术学报, 2006, 20(6): 508-511.  
ZHANG Qi, QUE Peiwen, CHEN Tianlu. Denoising in pipeline ultrasonic echo-signal based on empirical mode decomposition[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2006, 20(6): 508-511.
- [6] 孙立瑛, 李一博, 曲志刚, 等. EMD 信号分析方法的声发射管道泄漏检测研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(10):161-164.  
SUN Liying, LI Yibo, QU Zhigang, et al. Study on acoustic emission detection for pipeline leakage based on EMD signal analysis method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(10): 161-164.
- [7] 刘劲, 马杰, 田金文. 基于 EMD 的脉冲星信号消噪算法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(20): 212-214.  
LIU Jin, MA Jie, TIAN Jinwen. Algorithm of pulsar signal de-noising based on EMD [J]. Computer Engineering and Application, 2008, 44(20): 212-214.
- [8] 孙伟峰, 彭玉华, 许建华. 基于 EMD 的激光超声信号去噪方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2008, 38(5): 1-6.  
SUN Weifeng, PENG Yuhua, XU Jianhua. A de-noising method for ultrasonic signal based on EMD[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2008, 38(5): 1-6.
- [9] 樊建平, 杨录, 张艳花. 基于 EMD 的超声信号建模与识别[J]. 声学技术, 2009, 28(3): 374-378.  
FAN Jianping, YANG Lu, ZHANG Yanhua. Ultrasonic signal modeling and identification based on empirical mode decomposition[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(3): 374-378.