



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110069744 B

(45) 授权公告日 2020.11.03

(21) 申请号 201810057419.9

(22) 申请日 2018.01.22

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110069744 A

(43) 申请公布日 2019.07.30

(73) 专利权人 北京航空航天大学
地址 100191 北京市海淀区学院路37号

(72) 发明人 王中宇 姚贞建

(51) Int. Cl.
G06F 17/14 (2006.01)
G06K 9/00 (2006.01)

(56) 对比文件
CN 106788092 A, 2017.05.31
CN 105259580 A, 2016.01.20
US 2001048719 A1, 2001.12.06

陈彦龙等. 基于DCT和EMD的滚动轴承故障诊断. 《电子测量技术》. 2012, 第35卷 (第2期), 121-

125.

Zhaohua Wu等. On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series. 《Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America》. 2007, 14889-14894.

Zhenjian Yao等. Empirical mode decomposition-adaptive least squares method for dynamic calibration of pressure sensors. 《Measurement Science and Technology》. 2017, 1-10.

Huang NE等. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis. 《Proceedings Mathematical Physical & Engineering sciences》. 2003, 2317-2345.

审查员 蔡震震

权利要求书1页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

一种压力传感器阶跃响应信号稳定值的估计方法

(57) 摘要

本发明涉及一种压力传感器阶跃响应信号稳定值的估计方法,其特征在于:其中包含下列步骤:(1)利用离散余弦变换及其逆变换对压力传感器阶跃响应信号进行预处理,得到能量集中且消除了振幅量化误差的重构信号;(2)利用经验模态分解将重构信号分解为不同频带的分量,用低频分量之和估计其趋势信号;(3)计算趋势信号在时间方向的梯度曲线与横坐标轴围成闭合区域面积最小的区间,利用重构信号在该区间的均值估计压力传感器阶跃响应信号稳定值。上述方法对压力传感器阶跃响应信号的数据样本量和高频噪声无特定要求,且能充分利用信号的趋势信息,实现阶跃响应信号稳定值的有效估计。



1. 一种压力传感器阶跃响应信号稳定值的估计方法,其特征在于,该方法包括如下步骤:

步骤(1)、阶跃响应信号重构;

步骤(2)、阶跃响应信号趋势估计;

步骤(3)、阶跃响应信号稳定值估计;

步骤(1)中所述的阶跃响应信号重构,具体实现过程如下:

利用离散余弦变换对采集的压力传感器阶跃响应信号进行处理,得到变换信号,并对变换信号进行阈值处理,采用阶跃响应信号重构率指标计算变换信号处理时的阈值,对处理后的信号进行逆离散余弦变换,得到能量集中且消除振幅量化误差的压力传感器阶跃响应重构信号;

步骤(2)中所述的阶跃响应信号趋势估计,具体实现过程如下:

针对步骤(1)中得到的压力传感器阶跃响应重构信号,利用经验模态分解将其分解为一系列不同频段的分量信号,采用低频分量信号之和估计压力传感器阶跃响应重构信号的趋势信号,并利用趋势信号与压力传感器阶跃响应重构信号的相关系数和归一化欧氏距离指标估计趋势信号中包含经验模态分解得到的低频分量个数;

步骤(3)中所述的阶跃响应信号稳定值估计,具体实现过程如下:

计算步骤(2)中得到的趋势信号在时间方向的梯度曲线,计算梯度曲线与时间坐标轴围成各闭合区域的面积,面积最小的区域对应的时间区间即为压力传感器阶跃响应信号的稳定区间,压力传感器阶跃响应重构信号在稳定区间内的均值即为压力传感器阶跃响应信号的稳定值。

一种压力传感器阶跃响应信号稳定值的估计方法

技术领域

[0001] 本发明属于计量测试领域,涉及一种压力传感器阶跃响应信号稳定值的估计方法。

背景技术

[0002] 阶跃压力广泛地存在于爆炸测试、医学仪器、材料冲击测试、航空发动机等领域。在实际测量中,阶跃压力的稳定时间一般为几毫秒到十几毫秒。阶跃压力属于一种瞬变的动态过程,不仅测试环境复杂,而且很难控制。压力传感器的阶跃响应信号在阶跃压力的稳定时间内存在波动,导致信号的稳定值难以准确估计,严重地影响阶跃压力的测量精度。

[0003] 阶跃响应信号稳定值的常用估计方法为区间均值法,该方法根据主观判断得到传感器阶跃响应信号的稳定区间,然后采用稳定区间内的均值估计出阶跃响应信号的稳定值。该方法不需要任何拟合和迭代运算,能快速的得到阶跃响应信号的稳定值。由于估计精度依赖于人的主观判断,很难有效地保证估计结果的可靠性;并且一旦阶跃响应信号包含幅值较大的低频波动,则无法直接获取稳定区间导致方法失效。为此出现了一种基于趋势估计的阶跃响应信号稳定值估计方法,先估计传感器阶跃响应信号的趋势曲线;根据趋势曲线在时间方向的梯度估计稳定区间;利用信号在稳定区间内的均值估计出阶跃响应信号的稳定值。最常用的趋势估计方法为基于多项式回归模型的最小二乘法,这种估计方法的精度在很大程度上取决于多项式的阶数。其他的趋势估计方法还有移动平均、信号平滑和傅里叶滤波等,但是都仅适用于平稳信号和线性信号,不适用于阶跃压力的动态测量中。经验模态分解是一种基于信号转换的信号处理方法,将信号分解为一系列窄带分量,对信号的分布无特定要求,广泛地应用于结构损伤检测、航迹关联、目标定位和振动测试等领域的信号趋势估计中。在阶跃压力的测量过程中,由于压力幅值的瞬态变化,导致传感器阶跃响应信号出现幅值很大的突变现象,且当采集系统的振幅分辨率比较低时,阶跃响应信号存在显著的振幅量化误差,制约了经验模态分解方法在阶跃响应信号趋势估计中的效率。本发明将离散余弦变换和经验模态分解的优点相结合,提出一种压力传感器阶跃响应信号稳定值的估计方法。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于:提供一种压力传感器阶跃响应信号稳定值的估计方法,针对传感器在阶跃压力测量过程中受低频噪声干扰导致阶跃响应信号稳定值无法准确估计的问题,利用离散余弦变换及其逆变换对采集的压力传感器阶跃响应信号进行预处理,得到能量集中且消除振幅量化误差的重构信号;采用经验模态分解方法将重构信号分解为不同频段的分量,采用低频分量之和估计出重构信号的趋势;根据趋势信号在时间方向的梯度曲线与横坐标轴围成闭合区域的最小面积得到稳定区间,采用重构信号在稳定区间内的均值估计出压力传感器阶跃响应信号的稳定值。

[0005] 本发明的技术方案:一种压力传感器阶跃响应信号稳定值的估计方法,由以

下步骤实现：

[0006] (1) 阶跃响应信号重构；

[0007] (2) 阶跃响应信号趋势估计；

[0008] (3) 阶跃响应信号稳定值估计。

[0009] 其中，步骤(1)所述的阶跃响应信号重构，具体实现过程如下：

[0010] 利用离散余弦变换对采集的压力传感器阶跃响应信号进行预处理，得到变换信号为

$$[0011] \quad X_0(k) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=1}^N C(k)x_0(n) \cos \left[\frac{(2n-1)(k-1)\pi}{2N} \right] \quad (1)$$

[0012] 式中， $x_0(n)$ 为压力传感器阶跃响应信号， $n=1, 2, \dots, N$ ； $X_0(k)$ 为 $x_0(n)$ 的离散余弦变换信号； $C(k)$ 为正交因子， $k=1, 2, \dots, N$ ， N 为 $x_0(n)$ 的长度。

[0013] 为了使阶跃响应信号的能量更加集中，令变换信号小于某一个阈值的幅值为0，其他幅值保持不变；对阈值处理后的信号进行逆离散余弦变换，得到压力传感器阶跃响应信号的重构信号为

$$[0014] \quad x_1(n) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{k=1}^N C(k)X_1(k) \cos \left[\frac{(2n-1)(k-1)\pi}{2N} \right] \quad (2)$$

[0015] 其中，步骤(2)所述的阶跃响应信号趋势估计，具体实现过程如下：

[0016] 令 $t=n/f_n$ ，则步骤(1)得到的重构信号 $x_1(n)$ 变换为连续形式 $x_1(t)$ ，其中 f_n 为压力传感器阶跃响应信号的采样频率。采用经验模态分解方法对 $x_1(t)$ 进行处理，得到一系列频带不同的窄带分量 $c_i(t)$ 和一个残余分量 $r_m(t)$ ，则 $x_1(t)$ 表示为

$$[0017] \quad x_1(t) = \sum_{i=1}^m c_i(t) + r_m(t) \quad (3)$$

[0018] 式中， m 为窄带分量的个数。

[0019] 选取最后 s 个低频分量和残余分量之和估计重构信号的趋势，即

$$[0020] \quad C_{\text{sum}}^{(s)}(t) = \begin{cases} \sum_{i=m-s+1}^m c_i(t) + r_m(t) & s=1, 2, \dots, m \\ r_m(t) & s=0 \end{cases} \quad (4)$$

[0021] 式中， $C_{\text{sum}}^{(s)}(t)$ 为重构信号的趋势信号。

[0022] 令 $n=tf_n$ ，则趋势信号 $C_{\text{sum}}^{(s)}(t)$ 转化为离散形式 $C_{\text{sum}}^{(s)}(n)$ 。根据重构信号 $x_1(n)$ 和趋势信号 $C_{\text{sum}}^{(s)}(n)$ 之间的相关系数和归一化欧氏距离两个指标，确定出式(4)中 s 的最优值。

[0023] 其中，步骤(3)所述的阶跃响应信号稳定值估计，具体实现过程如下：

[0024] 由步骤(2)估计得到的压力传感器阶跃响应的趋势信号记为 $C_{\text{trend}}(t) = C_{\text{sum}}^{(s)}(t)$ ，计算该趋势信号在时间方向上的梯度曲线为

$$[0025] \quad C_{\text{gra}}(t) = \frac{\partial C_{\text{trend}}(t)}{\partial t} \quad (5)$$

[0026] 令 $C_{\text{gra}}(t) = 0$ ，求出趋势 $C_{\text{trend}}(t)$ 的极值点横坐标值，记为 $\{t_1, t_2, \dots, t_D\}$ ，其中 D 为极值点的个数。梯度曲线 $C_{\text{gra}}(t)$ 与横坐标轴围成 $D-1$ 个闭合区域。

[0027] 分别计算D-1个闭合区域的面积,假设第a个闭合区域的面积最小,则所对应的区间 $[t_a, t_{a+1})$ 为稳定区间。由重构信号 $x_1(n)$ 在稳定区间内的均值估计出压力传感器阶跃响应信号的稳定值 V_{sv} 为

$$[0028] \quad V_{sv} = \frac{1}{L} \sum_{l=t_a f_n+1}^{t_{a+1} f_n} x_1(l) \quad (6)$$

[0029] 式中,L为 $x_1(n)$ 在区间 $[t_a, t_{a+1})$ 内的长度, $L = (t_{a+1} - t_a) f_n$ 为

附图说明

[0030] 图1为本发明一种压力传感器阶跃响应信号稳定值的估计方法流程图;

[0031] 图2为压力传感器阶跃响应曲线;

[0032] 图3为压力传感器阶跃响应曲线的重构信号;

[0033] 图4为重构信号的趋势曲线;

[0034] 图5为趋势曲线的梯度和极值点。

具体实施方式

[0035] 下面结合附图和具体实施例子进一步说明本发明。

[0036] 本发明针对传感器在阶跃压力测量时受低频噪声干扰导致阶跃响应信号稳定值无法准确估计的问题,提出一种压力传感器阶跃响应信号稳定值的估计方法。

[0037] 一、见图1,本发明一种压力传感器阶跃响应信号稳定值的估计方法,包括以下几个步骤:

[0038] (1) 阶跃响应信号重构;

[0039] (2) 阶跃响应信号趋势估计;

[0040] (3) 阶跃响应信号稳定值估计。

[0041] 1、阶跃响应信号重构

[0042] 假设采集的压力传感器阶跃响应信号为

$$[0043] \quad X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n), \dots, x_0(N)) \quad (1)$$

[0044] 式中, $x_0(n)$ 为压力传感器阶跃响应信号的第n个值; $n=1, 2, \dots, N$;N为 X_0 的长度。

[0045] 采用离散余弦变换对采集的压力传感器阶跃响应信号进行预处理,得到变换后信号为

$$[0046] \quad X_0(k) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=1}^N C(k)x_0(n) \cos \left[\frac{(2n-1)(k-1)\pi}{2N} \right] \quad (2)$$

[0047] 式中, $X_0(k)$ 为 $x_0(n)$ 的离散余弦变换信号; $k=1, 2, \dots, N$;C(k)为正交因子,其定义为

$$[0048] \quad C(k) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{2} & k=1 \\ 1 & k=2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

[0049] 压力传感器阶跃响应信号经过离散余弦变换后,其大部分能量都集中于变换后信号的低频段,为了减小阶跃响应信号的突变,令变换后信号小于阈值Q的幅值为0,其他幅值

保持不变。因此得到阈值处理后信号 $X_1(k)$ 为

$$[0050] \quad X_1(k) = \begin{cases} X_0(k) & |X_0(k)| \geq Q \\ 0 & |X_0(k)| < Q \end{cases} \quad (4)$$

[0051] 对阈值处理的信号 $X_1(k)$ 进行逆离散余弦变换,得到压力传感器阶跃响应信号的重构信号

$$[0052] \quad x_1(n) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{k=1}^N C(k) X_1(k) \cos \left[\frac{(2n-1)(k-1)\pi}{2N} \right] \quad (5)$$

[0053] 式中, $n=1, 2, \dots, N$ 。

[0054] 经过离散余弦变换处理后,传感器阶跃响应信号的能量更集中,并且消除了阶跃响应信号的振幅量化误差。

[0055] 采用压力传感器阶跃响应信号 $x_0(n)$ 的重构率 R 来确定阈值 Q ,其定义为

$$[0056] \quad R = 1 - \frac{\|x_0(n) - x_1(n)\|_2}{\|x_0(n)\|_2} \quad (6)$$

[0057] 式中, $\|\cdot\|_2$ 表示信号的2范数。为了保证算法的运行效率且重构信号不失真,取 $R=95\%$ 。

[0058] 2、阶跃响应信号趋势估计

[0059] 令 $t=n/f_n$,则步骤1得到的重构信号 $x_1(n)$ 变换为连续信号 $x_1(t)$,其中 f_n 为压力传感器阶跃响应信号的采用频率。采用经验模态分解方法对 $x_1(t)$ 进行处理,得到一系列窄带分量,称为本征模态函数,每个本征模态函数必须满足以下两个条件:(1)极值点与过零点数量在整个数据集上相等或最多相差一个;(2)任意时间上,由局部极大值点估计的上包络线和局部极小值点估计的下包络线的均值为零。分解的基本步骤如下:

[0060] 步骤(1):识别重构信号 $x_1(t)$ 的局部极小值点和局部最大值点;

[0061] 步骤(2):采用三次样条曲线分别连接所有的局部最小值点和局部最大值点,得到 $x_1(t)$ 的下包络线 $l(t)$ 和上包络线 $u(t)$,计算上包络线和下包络线的均值为

$$[0062] \quad m_1(t) = \frac{1}{2}(u(t) + l(t)) \quad (7)$$

[0063] 步骤(3):从信号 $x_1(t)$ 中减去 $m_1(t)$,得到差值信号为

$$[0064] \quad h_1^{(1)}(t) = x_1(t) - m_1(t) \quad (8) \text{ 如果 } h_1^{(1)}(t) \text{ 满足本征模}$$

态函数的两个条件,则 $h_1^{(1)}(t)$ 为 $x_1(t)$ 的第一个本征模态函数分量;否则,令 $x_1(t) = h_1^{(1)}(t)$,重复步骤(1)至步骤(3)计算过程 k 次,直到得到的 $h_1^{(k)}(t)$ 满足本征模态函数的两个条件,此时 $x_1(t)$ 的第一个本征模态函数分量 $c_1(t)$ 为

$$[0065] \quad c_1(t) = h_1^{(k)}(t) \quad (9)$$

[0066] 步骤(4):从重构信号 $x_1(t)$ 中减去 $c_1(t)$,得到残余信号 $r_1(t)$ 为

$$[0067] \quad r_1(t) = x_1(t) - c_1(t) \quad (10)$$

[0068] 令 $x_1(t) = r_1(t)$,重复步骤(1)至步骤(4)计算过程 i 次,得到第 i 个本征模态函数分量为

$$[0069] \quad c_i(t) = r_{i-1}(t) - r_i(t) \quad i=2, 3, \dots, m \quad (11)$$

[0070] 继续上述分解过程,直到最终的残余分量 $r_m(t)$ 成为单调函数或者只包含一个极值点,此时从 $r_m(t)$ 中无法再分解出本征模态函数分量。综合式(10)和式(11),重构信号 $x_1(t)$ 表示为

$$[0071] \quad x_1(t) = \sum_{i=1}^m c_i(t) + r_m(t) \quad (12)$$

[0072] 因此,重构信号 $x_1(t)$ 被分解为 m 个本征模态函数分量和一个残余分量,并且这些分量的频带由高到低变化。

[0073] 选取 s 个低频带本征模态函数分量和残余分量之和来估计重构信号的趋势,即

$$[0074] \quad C_{\text{sum}}^{(s)}(t) = \begin{cases} \sum_{i=m-s+1}^m c_i(t) + r_m(t) & s=1, 2, \dots, m \\ r_m(t) & s=0 \end{cases} \quad (13)$$

[0075] 令 $n = t f_n$,则趋势信号 $C_{\text{sum}}^{(s)}(t)$ 转化为离散形式 $C_{\text{sum}}^{(s)}(n)$ 。则式(13)中 s 的最优值通过重构信号 $x_1(n)$ 和趋势信号 $C_{\text{sum}}^{(s)}(n)$ 之间的相关系数 $CC(s)$ 和归一化欧氏距离 $NED(s)$ 两个指标确定,其定义分别为

$$[0076] \quad CC(s) = \frac{\sum_{n=1}^N (x_1(n) - \bar{x}_1(n))(C_{\text{sum}}^{(s)}(n) - \bar{C}_{\text{sum}}^{(s)}(n))}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (x_1(n) - \bar{x}_1(n))^2 \sum_{n=1}^N (C_{\text{sum}}^{(s)}(n) - \bar{C}_{\text{sum}}^{(s)}(n))^2}} \quad (14)$$

$$[0077] \quad NED(s) = \frac{\text{Dist}(s)}{\max_s \{\text{Dist}(s)\}} \quad (15)$$

[0078] 式中, $\bar{x}_1(n)$ 和 $\bar{C}_{\text{sum}}^{(s)}(n)$ 分别为 $x_1(n)$ 和 $C_{\text{sum}}^{(s)}(n)$ 的均值; $\text{Dist}(s)$ 为 $x_1(n)$ 和 $C_{\text{sum}}^{(s)}(n)$ 之间的欧式距离,其定义为

$$[0079] \quad \text{Dist}(s) = \sqrt{\sum_{n=1}^N (x_1(n) - C_{\text{sum}}^{(s)}(n))^2} \quad (16)$$

[0080] 因此,当相关系数 $CC(s)$ 和归一化欧氏距离 $NED(s)$ 都趋于局部稳定时, s 为最优值。

[0081] 3、阶跃响应信号稳定值估计

[0082] 由步骤2估计得到的压力传感器阶跃响应的趋势信号记为 $C_{\text{trend}}(t) = C_{\text{sum}}^{(s)}(t)$,计算该趋势信号对时间的导数,得到趋势信号在时间轴方向的梯度曲线为

$$[0083] \quad C_{\text{gra}}(t) = \frac{\partial C_{\text{trend}}(t)}{\partial t} \quad (17)$$

[0084] 令 $C_{\text{gra}}(t) = 0$,求出趋势曲线 $C_{\text{trend}}(t)$ 的极值点横坐标值,记为 $\{t_1, t_2, \dots, t_D\}$,其中 D 为极值点的个数。梯度曲线 $C_{\text{gra}}(t)$ 被横坐标轴分成 $D-1$ 个闭合区域,第 d 个闭合区域的面积由下式计算

$$[0085] \quad S(d) = \left| \sum_{t=t_d}^{t_{d+1}-1} C_{\text{gra}}(t) / f_n \right|, \quad d=1, 2, \dots, D-1 \quad (18)$$

[0086] 式中, f_n 为采样频率。

[0087] 不同闭合区域的面积反映了压力传感器阶跃响应信号在相应区间的稳定性。分别

计算D-1个闭合区域的面积,假设第a个闭合区域的面积最小,表示为

$$[0088] \quad S(a) = \min_{d=1,2,\dots,D-1} \{S(d)\} \quad (19)$$

[0089] 则S(a)对应的区间 $[t_a, t_{a+1})$ 为稳定区间。由重构信号 $x_1(n)$ 在稳定区间内的均值估计出压力传感器阶跃响应信号的稳定值 V_{sv} 为

$$[0090] \quad V_{sv} = \frac{1}{L} \sum_{l=t_a f_n+1}^{t_{a+1} f_n} x_1(l) \quad (20)$$

[0091] 式中,L为 $x_1(n)$ 在区间 $[t_a, t_{a+1})$ 内的长度, $L = (t_{a+1} - t_a) f_n$ 。

[0092] 二、下面以701K压电式压力传感器测量由激波管系统产生的阶跃压力的阶跃响应数据进行分析,其中数据的采样频率为5MHz,计算其稳定值:

[0093] 1、701K压力传感器原始测量数据,见图2。

[0094] 2、利用步骤(1)对图1的阶跃响应信号进行预处理,得到重构信号,见图3。

[0095] 3、利用步骤(2)估计图2重构信号的趋势信号,见图4。

[0096] 4、利用步骤(3)计算图3趋势信号的梯度曲线和极值点,见图5,并分解计算梯度曲线与横坐标轴围成闭合区域的面积,见表1。得到闭合区域(2)面积最小,根据闭合区域(2)两侧的极值点横坐标值确定稳定区间为 $[1.91, 2.54)$ ms,根据式(20)计算该压力传感器阶跃响应信号的稳定值为0.559V。

[0097] 表1 压力传感器阶跃响应信号的趋势梯度曲线闭合区域面积

闭合区域	面积 (mV)
(1)	21.66
(2)	2.92
(3)	16.02
(4)	9.13
(5)	8.33
(6)	8.42
(7)	38.91

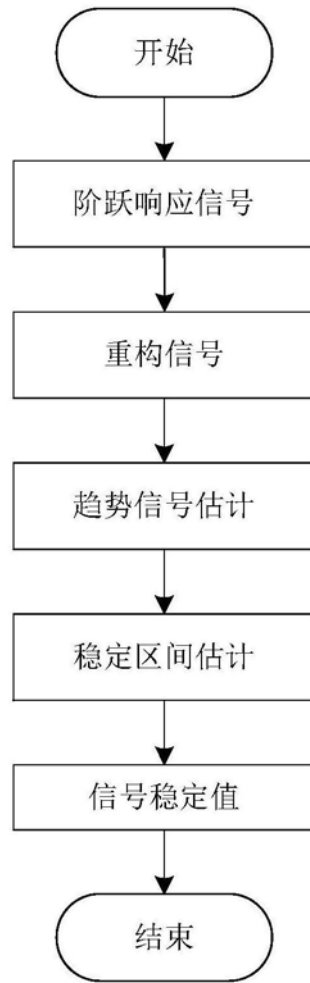


图1

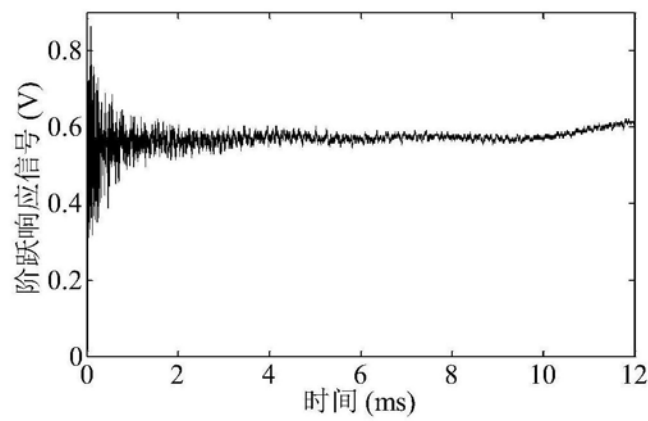


图2

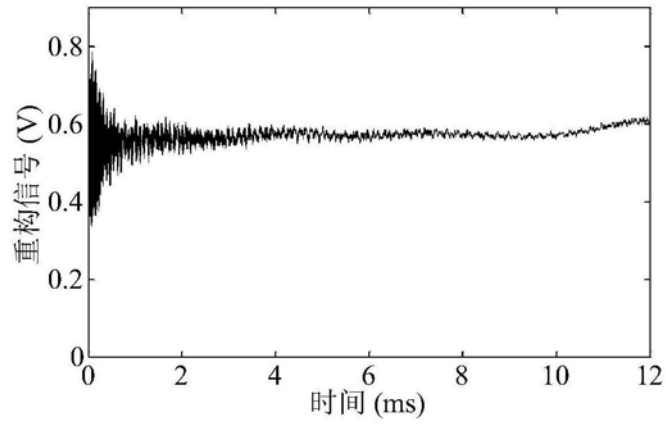


图3

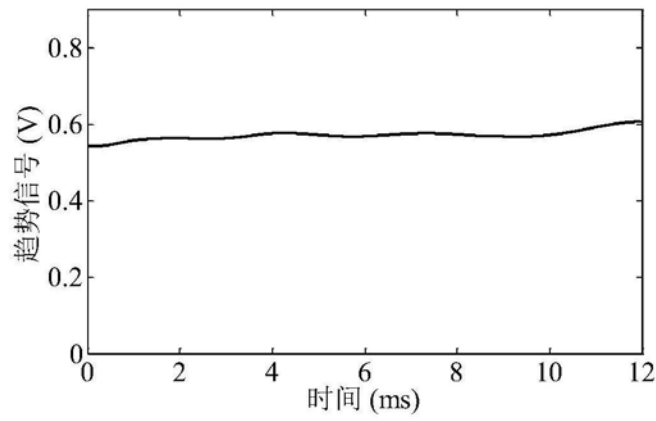


图4

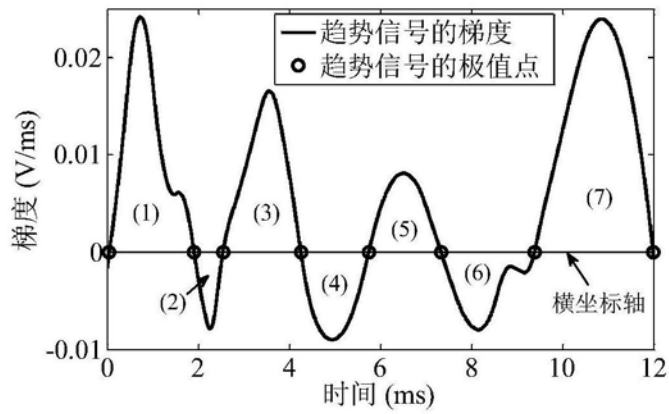


图5