



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104914167 A

(43) 申请公布日 2015. 09. 16

(21) 申请号 201510338750. 4

(22) 申请日 2015. 06. 17

(71) 申请人 南京航空航天大学

地址 210016 江苏省南京市秦淮区御道街
29 号

(72) 发明人 严刚 汤剑飞 蔡晨宁 金志光
张林 李永洲

(74) 专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限
公司 32200

代理人 张惠忠

(51) Int. Cl.

G01N 29/14(2006. 01)

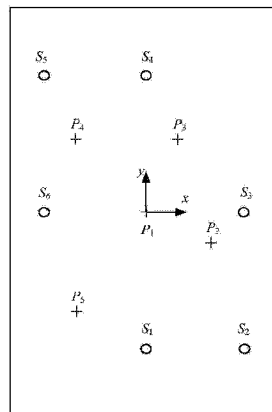
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

基于序贯蒙特卡洛算法的声发射源定位方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于序贯蒙特卡洛算法的定位方法,首先对处于各向同性平面结构上的声发射源,布置多个(不少于4个)用于接收声发射源发出的声发射信号的传感器;然后将声发射源定位转化成贝叶斯滤波问题,分别建立系统方程和测量方程,以各个次传感器与主传感器之间的波达时刻作为已知测量量,以源位置和波速作为未知状态变量。由于缺乏解析解,采用序贯蒙特卡洛模拟算法对未知状态变量进行迭代估计,从而实现不确定性因素影响下声发射源的定位。



1. 一种基于序贯蒙特卡洛算法的声发射源定位方法,用于不确定性因素影响下声发射源的定位;其特征在于,包括以下步骤:

(1) 对于处于各向同性平面结构上的声发射源,布置 N 个用于接收声发射源发出的声发射信号的传感器;所述各传感器中,将其中的一个定为主传感器,其余的则定为次传感器;在前述的各向同性平面结构上建立平面坐标系,使得声发射源的坐标为 (x_s, y_s) ,主传感器的坐标为 (x_i, y_i) ,各次传感器的坐标为 (x_j, y_j) ($j = 1 \cdots i-1, i+1 \cdots N$),其中, N 为正整数, $N \geq 4$;

(2) 通过信号处理方法获得各个传感器接收到的声发射信号的到达时刻,并计算各个次传感器与主传感器之间的到达时刻差 Δt_{ij} ,形成测量向量 Z ;

(3) 以状态向量 X 来表征声发射源的位置和对应的声发射信号波速;定义状态向量 $X = [x_s, y_s, V_g]^T$,其中: (x_s, y_s) 为声发射源的位置坐标, V_g 为对应声发射信号的波速;

(4) 将声发射定位问题转化为贝叶斯滤波问题,建立系统方程和测量方程进行迭代求解状态向量 X ;其中:

系统方程表达式为

$$X_k = X_{k-1} + \omega_{k-1}$$

测量方程表达式为

$$Z_k = h(X_k) + v_k$$

式中: k 为迭代数; ω 为系统噪声; v 为测量噪声; h 是一个非线性函数,用于表达测量向量 Z 中的元素 Δt_{ij} 和状态向量 X 中的元素之间的关系;

$$\Delta t_{ij} = \frac{\sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2} - \sqrt{(x_s - x_j)^2 + (y_s - y_j)^2}}{V_g}$$

式中: Δt_{ij} 为第 j 个次传感器与第 i 个传感器之间的到达时刻差;

(5) 采用序贯蒙特卡洛模拟方法来进行数值求解,迭代算出状态向量 X 估计值,并以满足迭代次数的最后一次迭代出的状态向量 X 估计值作为声发射源位置 (x_s, y_s) 和相应的波速 V_g 的识别值。

2. 根据权利要求 1 所述的基于序贯蒙特卡洛算法的声发射源定位方法,其特征在于:所述的信号处理方法为小波变换方法。

3. 根据权利要求 1 所述的基于序贯蒙特卡洛算法的声发射源定位方法,其特征在于:步骤 (5) 中提及的采用序贯蒙特卡洛模拟方法来进行数值求解估计状态向量 X 的具体步骤是:

(i) $k = 0$, 初始化 N_p 个粒子:根据平面结构尺寸和材料性质确定先验分布 $p(X_0)$, 并从先验分布 $p(X_0)$ 随机抽样获得 \mathbf{X}_0^i , 并设权重 $w_0^i = 1/N_p$, $i = 1, \dots, N_p$;

(ii) $k = k+1$, 从系统噪声 ω 的分布中随机产生过程噪声 ω_{k-1}^i , 并采用系统方程预测 \mathbf{X}_k^i ;

(iii) 计算 $h(\mathbf{X}_k^i)$, 采用测量方程估计 $p(\mathbf{Z}_k | \mathbf{X}_k^i)$, 更新权重 $w_k^i = w_{k-1}^i p(\mathbf{Z}_k | \mathbf{X}_k^i)$, 并归一化权重 $w_k^i = w_k^i / \sum_{i=1}^{N_p} w_k^i$;

(iv) 计算有效样本数量 N_{eff} , 如果 N_{eff} 小于 $N_p/2$, 启动重采样程序, 以概率 $p(\mathbf{X}_k^{i*} = \mathbf{X}_k^i) = w_k^i$, 生成一组新的粒子 $p(\mathbf{X}_k^{i*} = \mathbf{X}_k^i) = w_k^i$;

(v) 计算 X_k 的均值 $\bar{X}_k \approx \sum_{i=1}^{N_p} w_k^i X_k^i$ 作为 X_k 的估计值;

(vi) 回到步骤 (ii), 直到预先设定的迭代数到达或收敛条件满足为止, 输出最后一代状态向量 X 估计值作为最终的状态向量 X 识别值。

4. 根据权利要求 3 所述的基于序贯蒙特卡洛算法的声发射源定位方法, 其特征在于: 所述的迭代次数由预先设定, 或由收敛条件确定; 该收敛条件为: 连续多个迭代步的估计值之差小于预定的值。

5. 根据权利要求 3 所述的基于序贯蒙特卡洛算法的声发射源定位方法, 其特征在于: 在建立系统方程时, 假设系统噪声 ω 的均值为零, 且其协方差矩阵为 σ_ω^2 的正态分布; 在建立测量方程时, 假设测量噪声 v 的均值为零, 且其协方差矩阵为 σ_v^2 的正态分布。

6. 根据权利要求 1 所述的基于序贯蒙特卡洛算法的声发射源定位方法, 其特征在于: 声发射源的不确定性因素为模型误差和测量噪声。

基于序贯蒙特卡洛算法的声发射源定位方法

技术领域

[0001] 本发明属于工程结构无损检测技术领域,提供了一种基于序贯蒙特卡洛算法的声发射源定位方法。

背景技术

[0002] 声发射技术是根据结构内部损伤萌生和扩展时产生的瞬态应力波来判断结构内部损伤的一种监测方法。传统的声发射技术通过从声发射信号中获取声发射参数来对损伤进行评估,每一个声发射参数都是对声发射过程的具体描述。随着导波理论的发展,近些年来,声发射技术开始从参数式声发射向模态声发射转变。模态声发射是对材料中的声发射源所在的超声波模式进行研究,它分析的是声发射源产生的超声模式波。在将声发射信号分解成不同模式的超声导波后,可以利用对超声导波的认识,对声发射源的特征和性质进行分析推断,其中声发射源的定位技术一直是声发射研究领域的一个重要问题。

[0003] 目前在声发射定位领域,以及提出了许多定位方法,其中基于波达时刻的定位方法被广泛地应用。通过已知的传感器位置,以及超声导波的速度,可以采用不同的三角化定位方法,如求解一组非线性方程,或使用优化算法迭代求解,获得声发射源的位置。在这些方法中,对声发射信号中不同模式导波到达时刻的提取非常重要,直接影响声发射源定位的精度。但由于信号噪声、频散效应、信号处理等各种原因,很难获得精确地波达时刻数据。同时,为了事先确定不同模式导波的波速,需要根据结构的材料参数,通过导波方程计算获得。但由于制造工艺、材料老化等原因,结构实际的材料参数与名义值有一定的差别,同时由于模型简化、温度效应等因素,理论计算的波速也与实际的波速有一定的误差。这些问题给声发射源定位带来的影响都是不确定性的。传统的基于波达时刻的定位算法都是确定性的方法,没有考虑这些不确定性因素的影响。

发明内容

[0004] 本发明的目的即在于声发射源定位中,考虑模型误差和测量噪声引起的不确定性影响,提出了一种基于序贯蒙特卡洛算法的定位方法,可用于二维平面结构的声发射源位置和波速的联合求解。

[0005] 为实现以上的技术目的,本发明将采取以下的技术方案:

[0006] 一种基于序贯蒙特卡洛算法的声发射源定位方法,用于不确定性因素影响下声发射源的定位;包括以下步骤:

[0007] (1) 对于处于各向同性平面结构上的声发射源,布置 N 个用于接收声发射源发出的声发射信号的传感器;所述各传感器中,将其中的一个定为主传感器,其余的则定为次传感器;在前述的各向同性平面结构上建立平面坐标系,使得声发射源的坐标为 (x_s, y_s) , 主传感器的坐标为 (x_1, y_1) , 各次传感器的坐标为 (x_j, y_j) ($j = 1 \cdots i-1, i+1 \cdots N$), 其中, N 为正整数 (传感器个数, $N \geq 4$);

[0008] (2) 通过信号处理方法获得各个传感器接收到声发射信号的到达时刻,并计算各

个次传感器与主传感器之间的到达时刻差 Δt_{ij} , 形成测量向量 Z ;

[0009] (3) 以状态向量 X 来表征声发射源的位置和对应的声发射信号波速; 定义状态向量 $X = [x_s, y_s, V_g]^T$, 其中: (x_s, y_s) 为声发射源的位置坐标, V_g 为对应的声发射信号的波速;

[0010] (4) 将声发射定位问题转化为贝叶斯滤波问题, 建立系统方程和测量方程进行迭代求解状态向量 X ; 其中:

[0011] 系统方程表达式为

$$[0012] \quad X_k = X_{k-1} + \omega_{k-1}$$

[0013] 测量方程表达式为

$$[0014] \quad Z_k = h(X_k) + v_k$$

[0015] 式中: k 为迭代数; ω 为系统噪声; v 为测量噪声; h 是一个非线性函数, 用于表达测量向量 Z 中的元素 Δt_{ij} 和状态向量 X 中的元素之间的关系; 另外, 在建立系统方程时, 假设系统噪声 ω 的均值为零, 且其协方差矩阵为 σ_ω^2 的正态分布; 在建立测量方程时, 假设测量噪声 v 的均值为零, 且其协方差矩阵为 σ_v^2 的正态分布;

$$[0016] \quad \Delta t_{ij} = \frac{\sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2} - \sqrt{(x_s - x_j)^2 + (y_s - y_j)^2}}{V_g}$$

[0017] 式中: Δt_{ij} 含义是第 j 个次传感器与主传感器 (第 i 个传感器) 之间的到达时刻差。

[0018] (5) 采用序贯蒙特卡洛模拟方法来进行数值求解, 迭代算出状态向量 X 估计值, 并以满足迭代次数的最后一次迭代出的状态向量 X 估计值作为声发射源位置 (x_s, y_s) 和相应的波速 V_g 的识别值。

[0019] 根据以上的技术方案, 相对于现有技术, 本发明具有以下优点:

[0020] 本发明在对声发射源进行定位时, 考虑了模型误差和测量噪声引起的不确定性影响, 本方法将声发射源定位转化成贝叶斯滤波问题, 分别建立系统方程和测量方程, 以各个次传感器与主传感器之间的波达时刻作为已知测量量, 以源位置和波速作为位置状态变量。由于缺乏解析解, 采用序贯蒙特卡洛模拟算法对未知状态变量进行迭代估计, 最终实现不确定性因素影响下声发射源的定位。

附图说明

[0021] 图 1 是基于波达时刻的声发射源定位示意图;

[0022] 图 2 是检测实例示意图;

[0023] 图 3 是压电传感器 S_1 接收到的声发射模拟源 P_1 发出的声发射信号;

[0024] 图 4 是压电传感器 S_3 接收到的声发射模拟源 P_1 发出的声发射信号;

[0025] 图 5 是序贯蒙特卡洛算法估计的声发射模拟源 P_1 位置的 x 坐标;

[0026] 图 6 是序贯蒙特卡洛算法估计的声发射模拟源 P_1 位置的 y 坐标;

[0027] 图 7 是序贯蒙特卡洛算法估计的声发射信号中 40kHz 导波成份的波速 V_g 。

具体实施方式

[0028] 下面结合附图和具体实施方式, 进一步阐明本发明。应理解下述具体实施方式仅

用于说明本发明而不用于限制本发明的范围。需要说明的是,这些附图均为简化的示意图,仅以示意方式说明本发明的基本结构,因此其仅显示与本发明有关的构成。

[0029] 本发明所述的基于序贯蒙特卡洛算法的声发射源定位方法,用于不确定性因素影响下声发射源的定位,该定位方法主要是考虑了模型误差和测量噪声引起的不确定性影响;包括以下步骤:

[0030] (1) 对于处于各向同性平面结构上的声发射源,布置 N 个用于接收声发射源发出的声发射信号的传感器(参照图 1);所述各传感器中,将其中的一个定为主传感器,其余的则定为次传感器;在前述的各向同性平面结构上建立平面坐标系,使得声发射源的坐标为 (x_s, y_s) ,主传感器的坐标为 (x_i, y_i) ,各次传感器的坐标为 (x_j, y_j) ($j = 1 \dots i-1, i+1 \dots N$),其中, N 为正整数(传感器个数, $N \geq 4$);

[0031] (2) 通过信号处理方法获得各个传感器接收到声发射信号的到达时刻,并计算各次传感器与主传感器之间的到达时刻差 Δt_{ij} ,形成测量向量 Z ;

[0032] (3) 以状态向量 X 来表征声发射源的位置和对应的声发射信号波速;定义状态向量 $X = [x_s, y_s, V_g]^T$,其中: (x_s, y_s) 为声发射源的位置坐标, V_g 为对应声发射信号的波速;

[0033] (4) 将声发射定位问题转化为贝叶斯滤波问题,建立系统方程和测量方程进行迭代求解状态向量 X ;其中:

[0034] 系统方程表达式为

$$[0035] \quad X_k = X_{k-1} + \omega_{k-1}$$

[0036] 测量方程表达式为

$$[0037] \quad Z_k = h(X_k) + v_k$$

[0038] 式中: k 为迭代数; ω 为系统噪声; v 为测量噪声; h 是一个非线性函数,用于表达测量向量 Z 和状态向量 X 之间的关系;

$$[0039] \quad \Delta t_{ij} = \frac{\sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2} - \sqrt{(x_s - x_j)^2 + (y_s - y_j)^2}}{V_g}$$

[0040] 式中: Δt_{ij} 含义是第 j 个次传感器与主传感器(第 i 个传感器)之间的到达时刻差。

[0041] (5) 采用序贯蒙特卡洛模拟方法来进行数值求解,迭代算出状态向量 X 估计值,并以满足迭代次数的最后一次迭代出的状态向量 X 估计值作为声发射源位置 (x_s, y_s) 和相应的波速 V_g 的识别值。

[0042] 上述步骤中提及的采用序贯蒙特卡洛模拟方法来进行数值求解估计状态向量 X 的具体步骤是:

[0043] (i) $k = 0$, 初始化 N_p 个粒子;根据经验(平面结构尺寸和材料性质)确定先验分布 $p(X_0)$, 并从先验分布随机抽样获得 \mathbf{X}_0^i , 并设权重 $w_0^i = 1/N_p$, $i = 1, \dots, N_p$;

[0044] (ii) $k = k+1$, 从系统噪声 ω 的分布中随机产生过程噪声 ω_{k-1}^i , 并采用系统方程预测 \mathbf{X}_k^i ;

[0045] (iii) 计算 $h(\mathbf{X}_k^i)$, 采用测量方程估计 $p(\mathbf{Z}_k | \mathbf{X}_k^i)$, 更新权重 $w_k^i = w_{k-1}^i p(\mathbf{Z}_k | \mathbf{X}_k^i)$, 并

归一化权重 $w_k^i = w_k^i / \sum_{i=1}^{N_p} w_k^i$;

[0046] (iv) 计算有效样本数量 N_{eff} , 如果 N_{eff} 小于 $N_p/2$, 启动重采样程序, 以概率 $p(\mathbf{X}_k^{i*} = \mathbf{X}_k^i) = w_k^i$, 生成一组新的粒子 $p(\mathbf{X}_k^{i*} = \mathbf{X}_k^i) = w_k^i$;

[0047] (v) 计算 X_k 的均值 $\bar{\mathbf{X}}_k \approx \sum_{i=1}^{N_p} w_k^i \mathbf{X}_k^i$ 作为 X_k 的估计值;

[0048] (vi) 回到步骤 (ii), 直到预先设定的迭代数到达或收敛条件满足为止, 输出最后一代状态向量 X 估计值作为最终的状态向量 X 识别值。

[0049] 实例描述

[0050] 如图 2 所示, 所监测的结构为各向均匀同性的铝板, 厚度为 2mm, 在其上一个 300mm×400mm 的区域布置 6 个直径为 10mm 厚度为 1mm 的压电元件作为传感器, 传感器的材料为 P51, 分别命名为 S_1 - S_6 , 各传感器坐标如表 1 所示。

[0051] 采用在铝板上断铅的方式模拟声发射的发生, 共 5 个声发射模拟源, 分别为 P_1 - P_5 , 每次只产生一个声发射模拟源, 各声发射模拟源的位置如表 2 所示。

[0052] 以 S_3 为主传感器, 其他传感器为次传感器。当主传感器监测到的电压值超过一定阈值时, 认为声发射事件发生, 所有传感器同时开始采集声发射信号。如图 3 和图 4 分别是压电传感器 S_1 和 S_3 接收到的声发射模拟源 P_1 发出的声发射信号。在传感器采集到声发射信号后, 采用 Morlet 小波变换对声发射信号进行处理, 提取各个信号的波达时刻, 并计算次传感器与主传感器之间的波达时刻差, 表 3 所示为使用小波变换在 40kHz 频率上提取的波达时刻差数据。

[0053] 以声发射模拟源 P_1 为例, 建立测量向量 $Z = [31.1 \ 64.4 \ 34.4 \ 66.9 \ 5.1]^T$, 采用所发明的基于序贯蒙特卡洛算法的定位方法识别状态向量 $X = [x_s, y_s, V_g]^T$, 图 5 是序贯蒙特卡洛算法识别的声发射模拟源 P_1 位置的 x 坐标, 图 6 是序贯蒙特卡洛算法识别的声发射模拟源 P_1 位置的 y 坐标, 图 7 是序贯蒙特卡洛算法识别的声发射信号中 40kHz 导波成份的波速 V_g 。表 4 为各个声发射模拟源的定位结果。

[0054] 表 1 各传感器坐标 (mm)

[0055]

传感器标	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
x 坐标	0	150	150	0	-150	-150
y 坐标	-200	-200	0	200	200	0

[0056] 表 2 各声发射模拟源坐标 (mm)

[0057]

模拟源标	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
x 坐标	0	100	50	-100	-100
y 坐标	0	-50	100	100	-150

[0058] 表 3 波达时刻差数据 (μs)

[0059]

	Δt_{13}	Δt_{23}	Δt_{43}	Δt_{53}	Δt_{63}
P ₁	31.1	64.4	34.4	66.9	5.1
P ₂	71.7	54.5	125.9	178.0	120.5
P ₃	99.7	105.2	-18.5	52.7	52.4
P ₄	32.0	80.9	-83.5	-104.4	-108.5
P ₅	-112.4	-23.7	46.5	36.7	-82.4

[0060] 表 4 各声发射模拟源定位结果 (mm)

[0061]

模拟源标	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
x 坐标	4.2	108.1	54.2	-98.6	-102.5
y 坐标	-2.4	-50.2	103.7	97.2	-153.9

[0062] 本发明方案所公开的技术手段不仅限于上述技术手段所公开的技术手段,还包括由以上技术特征任意组合所组成的技术方案。

[0063] 以上述依据本发明的理想实施例为启示,通过上述的说明内容,相关工作人员完全可以在不偏离本项发明技术思想的范围内,进行多样的变更以及修改。本项发明的技术性范围并不局限于说明书上的内容,必须要根据权利要求范围来确定其技术性范围。

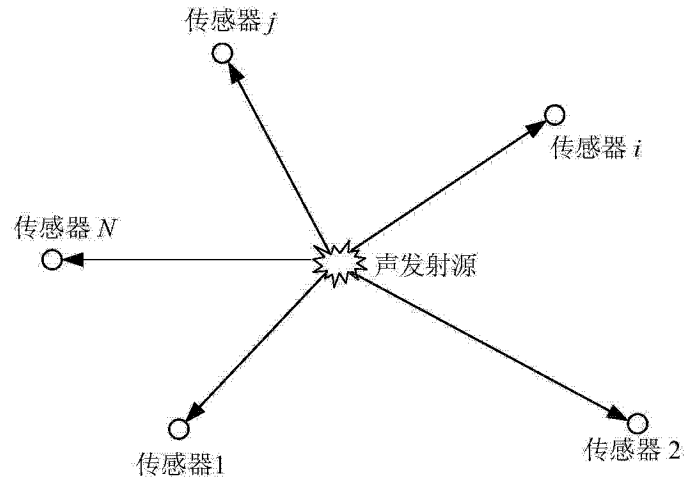


图 1

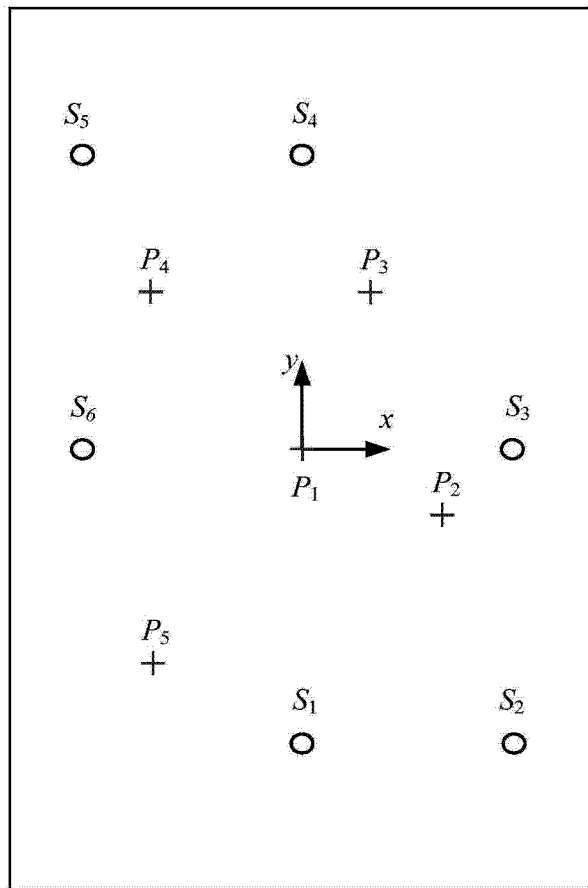


图 2

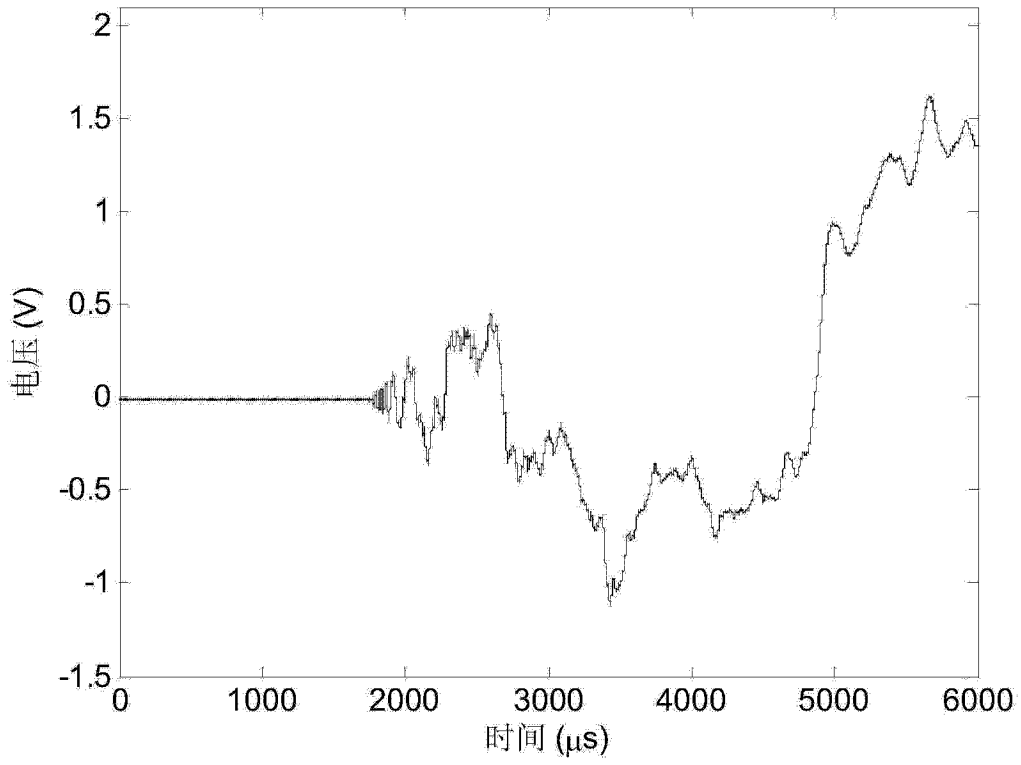


图 3

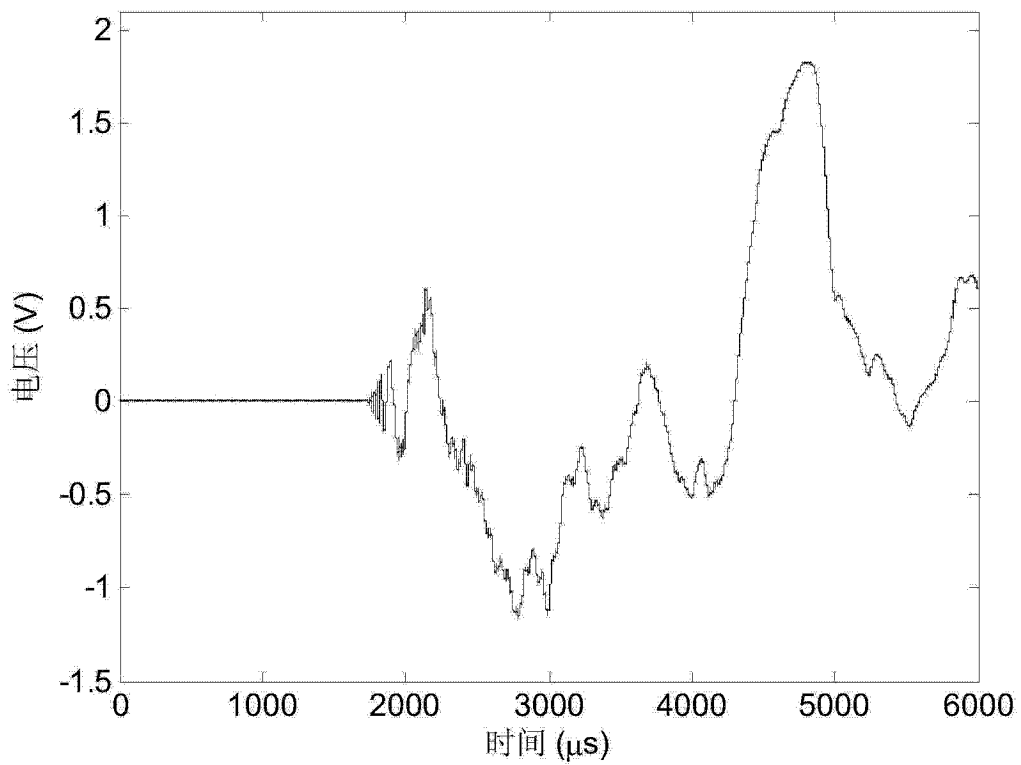


图 4

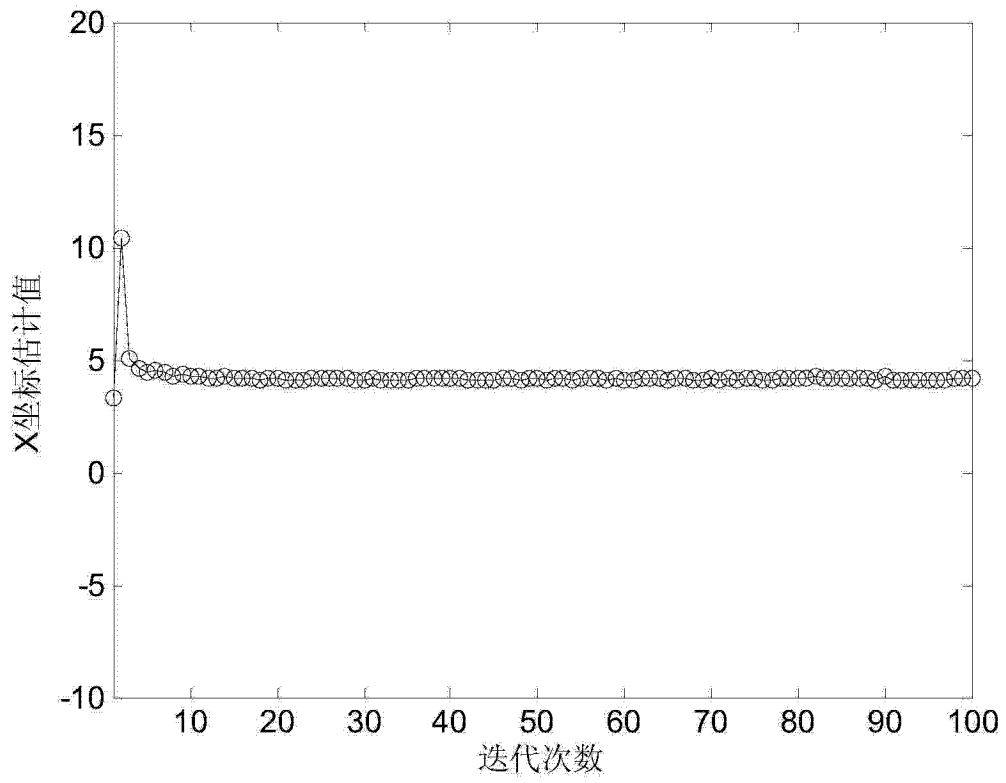


图 5

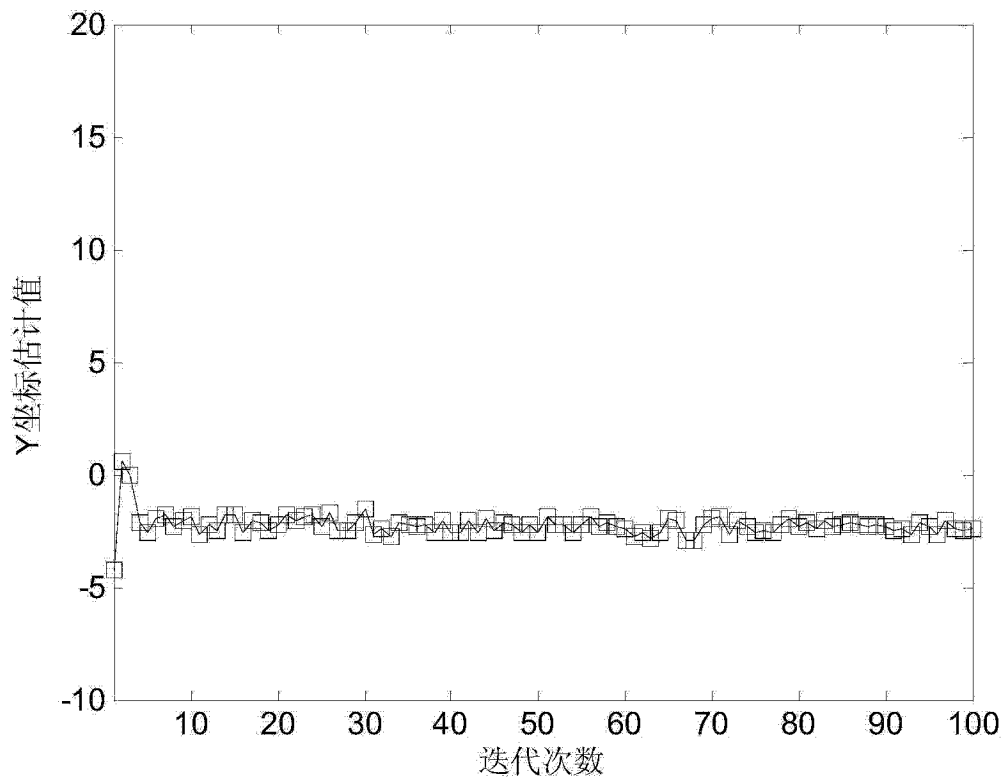


图 6

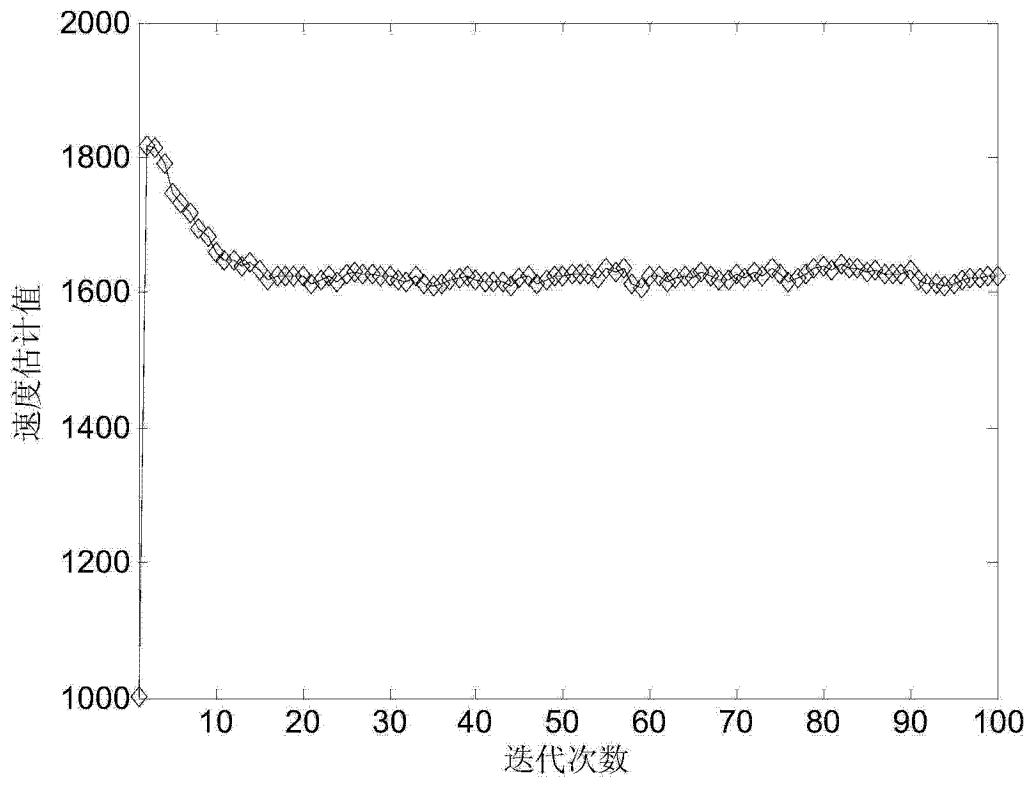


图 7