



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105004792 A

(43) 申请公布日 2015. 10. 28

(21) 申请号 201510429022. 4

(22) 申请日 2015. 07. 20

(71) 申请人 北京工业大学

地址 100124 北京市朝阳区平乐园 100 号

(72) 发明人 焦敬品 马婷 杨素方 何存富
吴斌

(74) 专利代理机构 北京思海天达知识产权代理
有限公司 11203

代理人 沈波

(51) Int. Cl.

G01N 29/06(2006. 01)

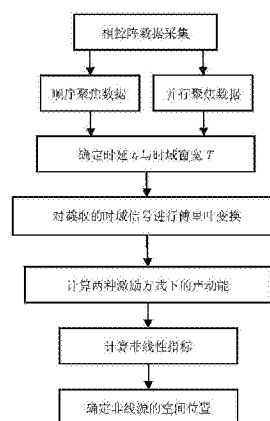
权利要求书3页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

一种用于微裂纹检测的非线性超声相控阵成像方法

(57) 摘要

一种用于微裂纹检测的非线性超声相控阵成像方法, 本方法利用超声相控阵检测系统, 采集微缺陷在顺序聚焦与并行聚焦方式下的检测信号, 首先确定合适的接收延时 t_r 与时域截取窗的宽度 T , 对截取的检测信号进行傅里叶变换; 再分别计算顺序聚焦与并行聚焦方法的声动能 E_s 、 E_p 及两种聚焦方式的相对能量差 γ ; 最后根据 γ 确定非线性源的位置, 即微缺陷的位置。



1. 超声相控阵检测系统,其特征在于:该系统包括计算机(1)、超声相控阵系统(2)、相控阵换能器(3)以及待检测试件(4);其中,超声相控阵系统(2)一端与计算机连接,另一端与相控阵换能器连接,相控阵换能器(3)与待检测试件(4)通过耦合介质进行耦合;在计算机的控制下超声相控阵系统激励/接收模块产生激励信号,通过相控阵换能器激励出超声波信号,沿待测试件传播,并通过相控阵传感器接收反射的超声波信号,然后通过相控阵系统信号激励/接收模块进行接收传输到计算机中,通过计算机中相应采集软件即可获得检测的A扫波形;所述的相控阵换能器采用由32个阵元组成的线阵相控阵探头。

2. 依权利要求1所述的超声相控阵检测系统,一种非线性超声相控阵成像方法,其特征在于:该方法具体识别步骤如下,

步骤一:利用超声相控阵检测系统采集顺序聚焦与并行聚焦方式下的检测信号;

(1) 将超声相控阵检测系统设置为全矩阵采集模式,采集被测缺陷的全矩阵数据 $f_{kl}(t)$ ($k = 1, 2, 3 \cdots N, l = 1, 2, 3 \cdots N$);其中,下标 k 表示阵列换能器中第 k 个阵元激励, l 表示阵列换能器中第 l 个阵元接收;

(2) 将超声相控阵检测系统设置为点聚焦模式,采集并行聚焦方式下每个聚焦点的检测信号 $h_l(t)$ ($l = 1, 2, 3 \cdots N$);其中,下标 l 表示阵列换能器中第 l 个阵元接收;

步骤二:建立成像坐标系,定义相控阵探头中每个阵元在坐标系中的位置以及每个成像像素点在坐标系中的位置;坐标系原点定义在阵元序列的中心,其中 (x_{tx}, z_{tx}) 为激励阵元的坐标, (x_{rx}, z_{rx}) 为接收阵元的坐标, (x, z) 为成像点坐标;

步骤三:确定接收延时 t_r 与时域截取窗的宽度 T ,对截取的检测信号进行傅里叶变换:

$$F_{kl}(\omega) = \int_{t_r}^{t_r+T} f_{kl}(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

$$H_l(\omega) = \int_{t_r}^{t_r+T} h_l(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

步骤四:分别计算聚焦点处两种聚焦方法的声动能 E_s 、 E_p 及相对能量差 γ ;

步骤五:对两种聚焦方式下的能量 E_s 、 E_p 进行成像,对两种聚焦方式的相对能量差 γ 进行成像,以定位非线性源;

该方法利用聚焦时刻以后任意瞬时两种聚焦检测方法得到的系统总声能的差值来表征聚焦点处的相对非线性能量损失;但是测量系统无法直接获得聚焦点处的超声场,因此聚焦点的能量损失必须根据其后续特性来推断出;

在理想扩散声场中,任意位置的声能密度均匀,且声能在各个方向传递的几率相等;实际上,由于超声波在晶界及试件边界的多次散射,初始相干激励在传播一段时间后可满足扩散声场的存在条件;在扩散声场中,任意点的声能与此时此刻系统的总能量成正比;因此,尽管聚焦点处的相对非线性能量损失仅出现在相干场传播的子集内,但它在扩散声场中是均匀分布的;因此,在并行聚焦和顺序聚焦的扩散声场中,任意位置处的能量差异为聚焦点处聚焦时刻的能量损失测量提供了一个近似值,相应地可用于该点处超声非线性的表征;因此,基于并行聚焦和顺序聚焦的扩散声场分析,其一定时延下扩散场的声动能差可用于聚焦点处声能损失的表征;

由于扩散声场仅是统计意义上的静态,因此,利用一定时间窗口内 (t_r, t_r+T) 的积分来表示其能量值,其中 t_r 为信号的接收延时时间, T 为时间窗宽;随着时间的增加,声场将收

敛于扩散状态；但是，由于超声波传播的耗散性，信噪比会随着时间的增加而降低；同时，由于顺序激励时检测信号的幅值较低，其受非相干噪声的影响更大，导致两种聚焦方式下扩散声场能量比较的有效性随数据采集时延的增加而降低；因此，在使接收信号幅值最大和扩散声场收敛的情况下，应折中地选择接收信号的时延；

对于 N 个阵元组成的阵列，顺序聚焦检测中聚焦点处的扩散声动能 $E_s(\bar{r})$ 可表示为：

$$E_s(\bar{r}) = \sum_{l=1}^N \left(\int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega^2 \left| \sum_{k=1}^N F_{kl}(\omega) e^{i\omega \delta_k(\bar{r})} \right|^2 d\omega \right) \quad (3)$$

其中 (ω_1, ω_2) 为基波频带范围， $\delta_k(\bar{r})$ 是聚焦在 $\bar{r}$ 处时激励阵元 k 上施加的时延；

类似地，并行激励下声动能 $E_p(\bar{r})$ 可以表示为：

$$E_p(\bar{r}) = \sum_{l=1}^N \left(\int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega^2 |H_l(\bar{r}, \omega)|^2 d\omega \right) \quad (4)$$

利用顺序激励和并行激励下归一化的能量差，非线性效应导致的激励带宽内（基波）的相对能量损失 $\gamma(\bar{r})$ 可表示为：

$$\gamma(\bar{r}) = \frac{E_s(\bar{r}) - E_p(\bar{r})}{E_s(\bar{r})} \quad (5)$$

根据非线性超声相控阵成像结果 $\gamma(\bar{r})$ 可以确定非线性源的位置。

3. 根据权利要求 2 所述的一种非线性超声相控阵成像方法，其特征在于：实验中采用的线性阵列相控阵探头，型号为 5L-32A5，其参数如表 1 所示；被测试件的材料为钢，尺寸为 $240\text{mm} \times 47\text{mm} \times 25\text{mm}$ ，在其中部有一长 20mm 线切割缺口，利用疲劳试验机在线切割顶端处加工一长约 9mm 的疲劳裂纹，因此裂纹尖端距离检测表面 20mm；激励信号中心频率为 5MHz，采样频率为 16.6MHz；

表 1 探头基本参数

参数名称	参数值/单位
晶片个数	32
晶片宽度	0.5mm
中心频率	5MHz
晶片间距	0.1mm

步骤一：利用超声相控阵检测系统采集顺序聚焦与并行聚焦方式下的检测信号；

(1) 将超声相控阵检测系统设置为全矩阵采集模式，采集被测缺陷的全矩阵数据 $f_{kl}(t)$ ($k = 1, 2, 3 \cdots N, l = 1, 2, 3 \cdots N$)，其中，下标 k 表示阵列换能器中第 k 个阵元激励， l 表示阵列换能器中第 l 个阵元接收；

(2) 将超声相控阵检测系统设置为单点聚焦模式，采集并行聚焦方式下每个聚焦点的检测信号 $h_l(t)$ ($l = 1, 2, 3 \cdots N$)；其中，下标 l 表示阵列换能器中第 l 个阵元接收；

步骤二：建立成像坐标系，定义相控阵探头中每个阵元在坐标系中的位置以及每个成

像像素点在坐标系中的位置 ;坐标系原点定义在阵元序列的中心,其中 (x_{tx}, z_{tx}) 为激励阵元的坐标, (x_{rx}, z_{rx}) 为接收阵元的坐标, (x, z) 为成像点坐标 ;

步骤三 :确定接收延时 $t_r = 0.9\text{ms}$ 与时域截取窗的宽度 $T = 200\ \mu\text{s}$,对截取的检测信号进行傅里叶变换 ;

步骤四 :分别计算聚焦点处两种聚焦方法的声动能 E_s 、 E_p 及相对能量差 γ ;

步骤五 :对两种聚焦方式下的的能量 E_s 、 E_p 进行成像,对两种聚焦方式的相对能量差 γ 进行成像,以定位非线性源 ;由图可知, γ 值在疲劳裂纹尖端处附近较大,可以确定疲劳裂纹的位置。

一种用于微裂纹检测的非线性超声相控阵成像方法

技术领域

[0001] 本发明属无损检测领域,具体涉及一种非线性超声相控阵成像方法,该方法用于非线性源(如疲劳裂纹)的检测与识别。

背景技术

[0002] 结构在长期服役过程中受到疲劳载荷、冲击及腐蚀、高温等环境因素的作用会逐渐老化,表现为出现不同程度的损伤。其中,疲劳裂纹是一种不稳定性缺陷,对结构的潜在危害性最大。在外界因素的作用下,疲劳裂纹可能发生迅速扩展使结构发生突然断裂。因此,采取有效的手段实现结构疲劳裂纹的早期检测、定位,对于确保重大基础设施的正常运行和人们生命财产安全至关重要。

[0003] 非线性超声技术对材料微观组织结构、机械损伤以及组织病理的敏感性高,特别适合于结构中疲劳裂纹的检测。但目前的非线性超声测量结果或局限于空间平均值,或通过繁琐的成像实现隐式的局部化,缺乏有效的非线性超声成像手段。同时,这些隐式的非线性成像方法需要利用光学测量方法获得检测点信息,其检测范围因而仅局限于表面测量,使这些技术的应用受到了很大限制。

[0004] 与之相反,线性超声成像因相控阵技术而变得极为容易。全矩阵成像是近年来广泛应用的一种阵列成像方法。与相控阵成像中阵元的并行激励不同,在全矩阵成像中,利用全矩阵数据采集模式,对阵元进行顺序激励,并在后处理中对全矩阵数据施加虚拟时延,以等价地仿效施加物理时延下的并行激励。将顺序激励并通过后处理实现的虚拟聚焦和阵元并行激励实现的真实聚焦分别称为顺序聚焦和并行聚焦。利用上述两种相控阵激励方式,将非线性与相控阵技术相结合,考虑两种激励模式下聚焦点处的非线性响应的差别表征聚焦点处是否存在疲劳裂纹,从而实现疲劳裂纹的空间定位。

[0005] 本文创新点在于提出了一种基于并行激励、顺序激励两种相控阵激励方式下扩散声场能量差的非线性阵列成像方法,综合考虑超声波与微缺陷相互作用的多种非线性效应,能够较精确地实现微缺陷定位检测。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于发展一种基于两种相控阵聚焦方式下扩散声场能量差的非线性阵列成像方法,通过该方法可以较精确地确定微缺陷的位置。基于不同相控阵聚焦方式下扩散声场能量差的非线性成像方法利用顺序聚焦与并行聚焦方式中阵列成像区域中聚焦点的相对能量差表示该点的非线性效应,存在非线性源(微缺陷)时聚焦点的相对能量差较大,因而可以判断非线性源的有无。

[0007] 本发明提出的基于两种相控阵聚焦方式下扩散声场能量差的非线性成像方法,其基本原理如下:

[0008] 两种聚焦检测模式中超声波的线性传播特性相同,但其非线性传播特性不同。并行聚焦时,结构中聚焦位置处的绝对声压要高于顺序聚焦时任意单独激励下的绝对声压。

因此,在并行聚焦检测时,若聚焦点处存在损伤等非线性源,其非线性效应将会导致更多的能量从基波频率向其它频率转移。因此,顺序聚焦和并行聚焦两种检测成像方法在聚焦点处激励的线性响应及成像结果完全相同,但两种方法在聚焦点处激发的非线性响应及激励带宽内(基波)的能量损失有很大的差别。

[0009] 一般说来,介质的非线性响应不仅包含高次谐波,也包含分谐波以及激励带宽内频率分量的和频、差频的组合,而这些非线性效应的共性是有能量从激励带宽的转移。因此,利用激励带宽内(基波)的能量损失作为非线性表征指标,考虑到了疲劳裂纹可能产生的多种非线性效应,可望大大提高对疲劳裂纹的检测能力。

[0010] 基于相控阵聚焦原理的微裂纹定位方法的关键是需要获得两种聚焦检测模式中聚焦点处激励带宽内(基波)的能量损失。由于超声测量系统无法直接获得聚焦点处的超声场,因此,需要对聚焦声场的传播及分布特性进行研究,以找到一种可用于聚焦点处基波声能损失计算的有效途径。

[0011] 首先,分析两种检测模式下声能损失差异的时间、空间分布特点。在两种检测模式下,波的线性传播特性对声能的干涉作用是相同的,且仪器非线性和阵列与试件界面接触非线性对声能传输的影响也相同。同时,在非聚焦处,由于各阵元发射的超声波没有发生相互干涉作用,其非线性相互作用造成的激励带宽内(基波)的能量损失也是相同的。因此,激励频带内(基波)的能量差别仅仅是由于聚焦点处聚焦时刻的幅值差异造成的。因此,可以利用聚焦时刻以后任意瞬时两种聚焦检测方法得到的系统总声能的差值来表征聚焦点处的相对非线性能量损失。为此,可以通过对后续的扩散声场分析来实现。

[0012] 在理想扩散声场中,任意位置的声能密度均匀,且声能在各个方向传递的几率相等。实际上,由于超声波在晶界及试件边界的多次散射,初始相干激励在传播一段时间后可满足扩散声场的存在条件。在扩散声场中,任意点的声能与此时刻系统的总能量成正比。因此,尽管聚焦点处的相对非线性能量损失仅出现在相干场传播的子集内,但它在扩散声场中是均匀分布的。因此,在并行聚焦和顺序聚焦的扩散声场中,任意位置处的能量差异为聚焦点处聚焦时刻的能量损失测量提供了一个近似值,相应地可用于该点处超声非线性的表征。

[0013] 随着时间的增加,声场将收敛于扩散状态。但是,由于超声波传播的耗散性,信噪比会随着时间的增加而降低。同时,由于顺序激励时检测信号的幅值较低,其受非相干噪声的影响更大,导致两种聚焦方式下扩散声场能量比较的有效性随数据采集时延的增加而降低。因此,在使接收信号幅值最大和扩散声场收敛的情况下,应折中地选择接收信号的时延。由于扩散声场仅是统计意义上的静态,因此,可以利用一定时间窗口内(t_r, t_r+T)的积分来表示其能量值,其中 t_r 为信号的接收延时时间, T 为时间窗宽。对于 N 阵元阵列,顺序聚焦检测中聚焦点处的扩散声动能 E_s 可表示为:

$$[0014] \quad E_s(\vec{r}) = \sum_{l=1}^N \left(\int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega^2 \left| \sum_{k=1}^N F_{kl}(\omega) e^{i\omega \delta_k(\vec{r})} \right|^2 d\omega \right) \quad (1)$$

[0015] 类似地,并行激励下声动能 $E_p(\vec{r})$ 可以表示为:

$$[0016] \quad E_p(\vec{r}) = \sum_{l=1}^N \left(\int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega^2 |H_l(\vec{r}, \omega)|^2 d\omega \right) \quad (2)$$

[0017] 利用顺序激励和并行激励下归一化的能量差,定义如下的非线性特征指标:

$$[0018] \quad \gamma(\bar{r}) = \frac{E_s(\bar{r}) - E_p(\bar{r})}{E_s(\bar{r})} \quad (3)$$

[0019] 其中, $\gamma(\bar{r})$ 为非线性效应导致的激励带宽内(基波)的相对能量损失。 $f_{kl}(t)$ 为 k 阵元顺序激励 1 阵元接收的时域信号。 $\delta_k(\bar{r})$ 是聚焦在 $\bar{r}$ 处时激励阵元 k 上施加的时延。 $h_l(\bar{r}, t)$ 为所有阵元在时延 $\delta_k(\bar{r})$ 下并行激励, 阵元 1 接收到的时域信号。 $F_{kl}(\omega)$ 和 $H_l(\omega)$ 为时间窗口 (t_r, t_r+T) 内, $f_{kl}(t)$ 和 $h_l(\bar{r}, t)$ 的频谱, $F_{kl}(\omega) = \int_{t_r}^{t_r+T} f_{kl}(t) e^{-i\omega t} dt$ 和 $H_l(\omega) = \int_{t_r}^{t_r+T} h_l(t) e^{-i\omega t} dt$, t_r 为接收时延, (ω_1, ω_2) 为基波频带范围。激励带宽对疲劳裂纹检测的敏感性以及聚焦点处激励能量的强度及转移量都有不同程度的影响, 需要综合考虑。激励带宽选择的一般原则是无内部能量转移情况下的最大值。

[0020] 因此, 基于并行聚焦和顺序聚焦的扩散声场分析, 其一定时延下扩散场的声动能差可用于聚焦点处声能损失的表征。

[0021] 本发明的技术方案如下:

[0022] 本发明中使用了超声相控阵检测装置, 如图 1 所示。该超声相控阵检测装置包括计算机 1、超声相控阵系统 2、相控阵换能器 3 以及待检测试件 4。其中, 超声相控阵系统 2 一端与计算机 1 连接, 另一端与相控阵换能器 3 连接, 相控阵换能器 3 与被测试件 4 通过耦合介质进行耦合。在计算机的控制下超声相控阵系统激励/接收模块产生激励信号, 通过相控阵换能器激励出超声波信号, 沿待测试件传播, 并通过相控阵传感器接收反射的超声波信号, 然后通过相控阵系统信号激励/接收模块进行接收传输到计算机中, 通过计算机中相应采集软件即可获得检测的 A 扫波形。所述的相控阵换能器采用由 32 个阵元组成的线阵相控阵探头。

[0023] 本发明提出的基于不同相控阵聚焦方式下扩散声场能量差的非线性成像方法, 其流程图如图 2 所示。具体可以按照以下步骤实施检测:

[0024] 步骤一: 利用超声相控阵检测系统采集顺序聚焦与并行聚焦方式下的检测信号。

[0025] 1) 将如图 1 所示的超声相控阵检测系统设置为全矩阵采集模式, 采集被测缺陷的全矩阵数据 $f_{kl}(t)$ ($k = 1, 2, 3 \dots N, 1 = 1, 2, 3 \dots N$)。其中, 下标 k 表示阵列换能器中第 k 个阵元激励, 1 表示阵列换能器中第 1 个阵元接收;

[0026] 2) 将超声相控阵检测系统设置为点聚焦模式, 采集并行聚焦方式下每个聚焦点的检测信号 $h_l(t)$ ($1 = 1, 2, 3 \dots N$)。其中, 下标 1 表示阵列换能器中第 1 个阵元接收;

[0027] 步骤二: 建立如图 3 所示的成像坐标系, 定义相控阵探头中每个阵元在坐标系中的位置以及每个成像像素点在坐标系中的位置。坐标系原点定义在阵元序列的中心, 其中 (x_{tx}, z_{tx}) 为激励阵元的坐标, (x_{rx}, z_{rx}) 为接收阵元的坐标, (x, z) 为成像点坐标。

[0028] 步骤三: 确定接收延时 t_r 与时域截取窗的宽度 T , 对截取的检测信号进行傅里叶变换:

$$[0029] \quad F_{kl}(\omega) = \int_{t_r}^{t_r+T} f_{kl}(t) e^{-i\omega t} dt \quad (4)$$

$$[0030] \quad H_t(\omega) = \int_{t_r}^{t_r+T} h_t(t) e^{-i\omega t} dt \quad (5)$$

[0031] 步骤四：根据公式 (1)、(2) 和 (3)，分别计算聚焦点处两种聚焦方法的声动能 E_s 、 E_p 及相对能量差 γ ；

[0032] 步骤五：对两种聚焦方式下的的能量 E_s 、 E_p 进行成像，对两种聚焦方式的相对能量差 γ 进行成像，以定位非线性源。

附图说明

[0033] 图 1 检测装置框图。

[0034] 图 2 非线性超声阵列成像方法步骤。

[0035] 图 3 被测试件。

[0036] 图 4 成像坐标系。

具体实施方式

[0037] 以下利用检测实验得到的数据，对本发明方法的有效性进行详细说明。

[0038] 采用的试验系统如图 1 所示，实验中采用的线性阵列相控阵探头，型号为 5L-32A5，其参数如表 1 所示。被测试件如图 4 所示，材料为钢，尺寸为 $240\text{mm} \times 47\text{mm} \times 25\text{mm}$ ，在其中部有一长 20mm 线切割缺口，利用疲劳试验机在线切割顶端处加工一长约 9mm 的疲劳裂纹，因此裂纹尖端距离检测表面 20mm。激励信号中心频率为 5MHz，采样频率为 16.6MHz。

[0039] 表 1 探头基本参数

[0040]

参数名称	参数值/单位
晶片个数	32
晶片宽度	0.5mm
中心频率	5MHz
晶片间距	0.1mm

[0041] 步骤一：利用超声相控阵检测系统采集顺序聚焦与并行聚焦方式下的检测信号；

[0042] (1) 将如图 1 所示的超声相控阵检测系统设置为全矩阵采集模式，采集被测缺陷的全矩阵数据 $f_{kl}(t)$ ($k = 1, 2, 3 \cdots N, l = 1, 2, 3 \cdots N$)，其中，其中，下标 k 表示阵列换能器中第 k 个阵元激励， l 表示阵列换能器中第 l 个阵元接收；

[0043] (2) 将超声相控阵检测系统设置为单点聚焦模式，采集并行聚焦方式下每个聚焦点的检测信号 $h_l(t)$ ($l = 1, 2, 3 \cdots N$)。其中，下标 l 表示阵列换能器中第 l 个阵元接收；

[0044] 步骤二：建立如图 3 所示的成像坐标系，定义相控阵探头中每个阵元在坐标系中的位置以及每个成像像素点在坐标系中的位置。坐标系原点定义在阵元序列的中心，其中 (x_{tx}, z_{tx}) 为激励阵元的坐标， (x_{rx}, z_{rx}) 为接收阵元的坐标， (x, z) 为成像点坐标。

[0045] 步骤三：确定接收延时 $t_r = 0.9\text{ms}$ 与时域截取窗的宽度 $T = 200 \mu\text{s}$ ，对截取的检测信号进行傅里叶变换；

[0046] 步骤四:分别计算聚焦点处两种聚焦方法的声动能 E_s 、 E_p 及相对能量差 γ ;

[0047] 步骤五:对两种聚焦方式下的的能量 E_s 、 E_p 进行成像,对两种聚焦方式的相对能量差 γ 进行成像,以定位非线性源。由图可知, γ 值在疲劳裂纹尖端处附近较大,可以确定疲劳裂纹的位置。

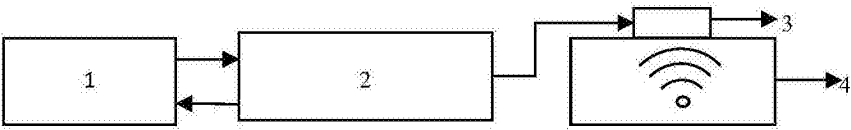


图 1

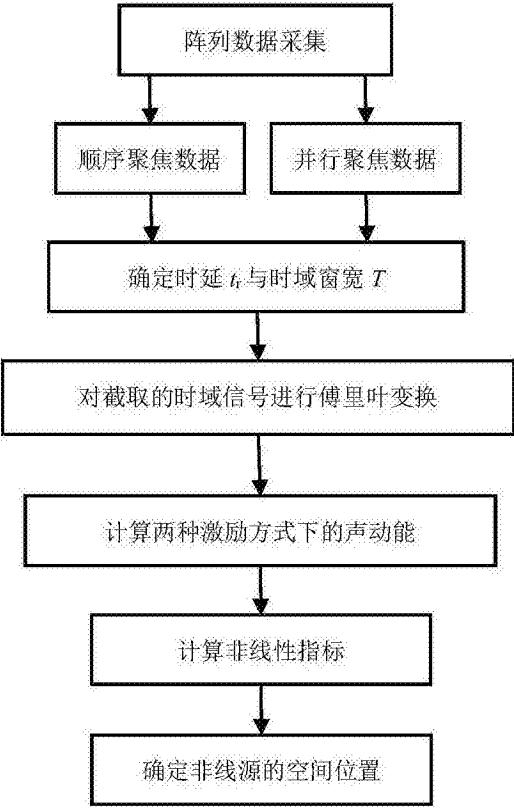


图 2

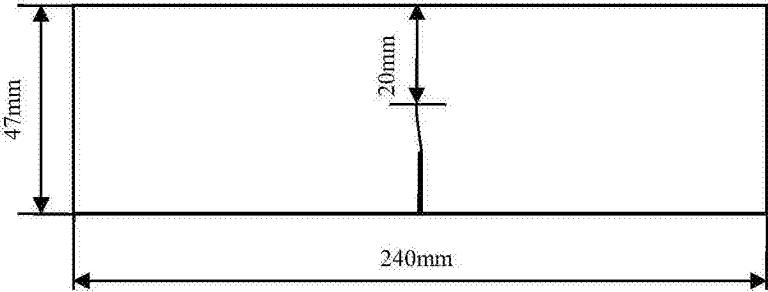


图 3

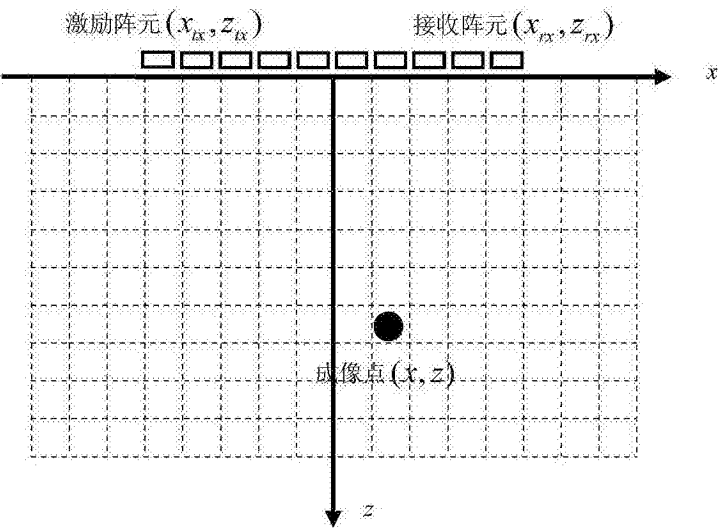


图 4