



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107219305 B
(45)授权公告日 2019.11.19

(21)申请号 201710406491.3

(22)申请日 2017.06.02

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107219305 A

(43)申请公布日 2017.09.29

(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 周正干 李尚凝 李洋

(74)专利代理机构 北京永创新实专利事务所
11121

代理人 祗志洁

(51)Int.Cl.
G01N 29/06(2006.01)

审查员 刘俊

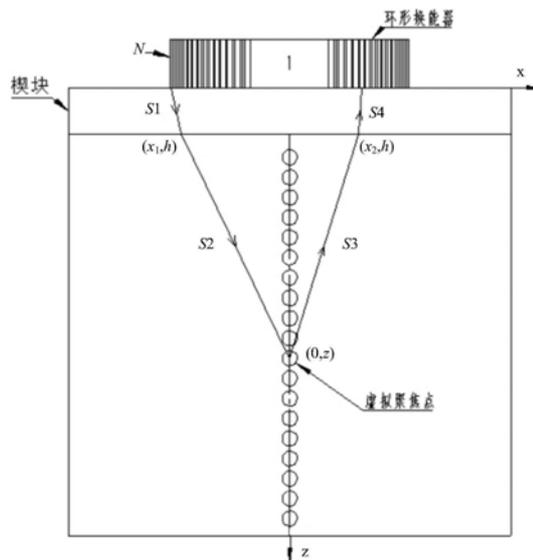
权利要求书1页 说明书4页 附图5页

(54)发明名称

一种基于环形阵列换能器的全聚焦成像检测方法

(57)摘要

本发明提供了一种基于环形阵列换能器的全聚焦成像检测方法,属于超声无损检测。本发明将检测成像区域定为试件沿环形阵列换能器轴向的线形区域;用机械臂夹持环形阵列换能器对各检测区域进行扫查,在扫查各检测区域时,依次激发单个阵元,每次激发,所有阵元均接收超声回波时域信号,形成检测区域的全矩阵数据;将每个检测区域离散成多个检测点,由费马原理确定检测点处的声波传播路径,获得传播时间,利用延时法将采集到的全矩阵数据完备集聚焦到监测点,获得检测点的幅值。本发明能够在使用较少阵元的情况下产生较强的聚焦声场,大大减少电路控制复杂程度,提高了检测厚度和检测精度,可实现检测的智能化、高效化。



CN 107219305 B

1. 一种基于环形阵列换能器的全聚焦成像检测方法,其特征在于,包括如下步骤:

(1) 根据检测精度将待检试件离散成多个线形检测区域,每个检测区域是一个沿环形阵列换能器轴向的线形区域;将每个检测区域离散成多个检测点;

(2) 用机械臂夹持环形阵列换能器对各检测区域进行扫查,对每个检测区域扫描获取一个 $N \times N$ 组全矩阵数据, N 为环形阵列换能器的阵元数目;

所述的待检试件离散成多个线形检测区域,是将试件沿步进方向进行离散,对于离散出的每个截面区域,再沿扫查方向离散,所得的各条状区域就是各个检测区域,所述的步进方向和扫查方向为待检试件的横向和纵向;

(3) 对某检测区域内离散的检测点,由费马原理确定检测点处的声波传播路径,获得传播时间点 t ,再利用延时法将该检测区域的 $N \times N$ 组全矩阵数据中在时间点 t 的数据叠加,获得检测点的幅值。

2. 根据权利要求1所述的全聚焦成像检测方法,其特征在于,所述的环形阵列换能器,在扫查各检测区域时,依次激发单个阵元,每次激发,所有阵元均接收超声回波时域信号,形成检测区域的全矩阵数据。

3. 根据权利要求1所述的全聚焦成像检测方法,其特征在于,所述的环形阵列换能器对应设计有标准待检试件以检验所述的全聚焦成像检测方法;所述的标准待检试件预埋多组缺陷,每组缺陷的深度相同,缺陷的尺寸为环形阵列换能器能检出的最小缺陷尺寸,位于同一组的缺陷的间距为对应聚焦深度处的焦斑直径。

4. 根据权利要求3所述的全聚焦成像检测方法,其特征在于,所述的标准待检试件预埋的缺陷为多组不同深度的平底孔。

一种基于环形阵列换能器的全聚焦成像检测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种超声无损检测方法,特别是涉及一种基于环形阵列换能器超声检测厚度较高、衰减较大的材料的全聚焦成像检测技术。

背景技术

[0002] 超声无损检测是利用超声波与待检试件的相互作用,就反射、透射和散射的超声波进行研究,对试件如金属、塑料、复合材料、陶瓷、橡胶以及玻璃等材料,进行宏观缺陷检测、几何特性测量、组织结构和力学性能变化的检测和表征。

[0003] 阵列超声检测技术是超声无损检测技术中应用最为广泛的检测技术之一,也是超声无损检测领域中应用和研究最为活跃的技术之一。其检测过程可以描述为:由触发信号控制阵列换能器的阵元晶片发射超声波,通过惠更斯原理合成波阵面并在被测试件内部传播,当超声波遇到试件内部的缺陷时会被反射回来,反射回来的超声波包含了缺陷的信息,通过信号提取与处理,利用成像技术获得表征缺陷特征的可视化图像,从而评价被测试件内部缺陷或组织的性能。

[0004] 阵列超声检测依赖于不同的阵列换能器实现检测过程,目前较主流的有线性阵列换能器、矩形阵列换能器和环形阵列换能器,如图1所示。目前研究和应用较多的是线性阵列换能器和矩形阵列换能器。线性阵列换能器控制电路简单、制作成本低,被广泛应用于工业检测领域,但是激发的声束不能双向偏转;矩形阵列换能器可以实现超声波声束的双向偏转,但由于其阵元数目多、控制电路复杂,目前应用受局限;而环形阵列换能器声束剖面呈圆形对称、有较高的横向分辨力,且可在阵元数目远小于线阵和面阵阵元数的情况下形成高分辨率的聚焦声场,尽管其声束不能偏转,在厚度较高、衰减较大的材料无损检测方面有巨大的应用价值。

[0005] 常规全聚焦算法是基于全矩阵数据采集的一种后处理成像算法。全矩阵数据采集即依次激发单个阵元,每次激发所有阵元均接收回波信号,并保存相应接收数据。对于有 N 个阵元的换能器,则可以获得 $N \times N$ 组发射-接收信号,采集该信号数据矩阵称为全矩阵数据采集,如图2所示。采集到全矩阵数据之后,对于检测区域进行空间离散,每一个离散点的图像幅度为全矩阵数据中聚焦到该点的幅度的叠加,此处理方法称为全聚焦成像方法,如图3所示。在全聚焦成像算法的基础上,可解决常规相控阵超声都不容易解决的小于半波长微小缺陷特征(缺陷类型、缺陷方向、缺陷大小)高精度自动识别,以及复杂结构试件的高精度缺陷成像。

[0006] 检测具有高散射、高衰减特性的试件时选用线性阵列换能器或者矩形阵列换能器需要该换能器有较多阵元,但阵元数目增加会导致采集数据的大量增加,大大提高对硬件的要求、降低计算效率;且当成像范围过大,超过换能器的声场覆盖范围时,会使边缘缺陷强度降低、造成较大定位偏差。

[0007] 而环形阵列换能器可以在阵元数目较少的情况下形成高能的聚焦声场,减少数据采集量,提高检测效率。于是,针对环形阵列换能器自身独特的轴向聚焦特点,本发明提出

一种基于环形阵列换能器的轴线全聚焦成像检测方法,以简化检测系统、提高其缺陷检测精度。

发明内容

[0008] 针对目前多采用线性阵列换能器和矩形阵列换能器对增材制造结构等具有较强各向异性的材料的超声无损检测时,由于材料的各向异性对于声束能量的衰减很强,使得需要使用较多阵元进行检测,而检测结果依旧不很理想的问题,本发明利用环形阵列换能器具有使用较少阵元生成较强的聚焦声场的特点,提供了一种基于环形阵列换能器的全聚焦成像检测方法。

[0009] 本发明提供的基于环形阵列换能器的全聚焦成像检测方法,包括步骤如下:

[0010] (1) 根据检测精度将待检试件离散成多个线形检测区域,每个检测区域是一个沿环形阵列换能器轴向的线形区域,将每个检测区域离散成多个检测点;

[0011] (2) 用机械臂夹持环形阵列换能器对各检测区域进行扫描,对每个检测区域扫描获取一个 $N \times N$ 组全矩阵数据, N 为环形阵列换能器的阵元数目;

[0012] (3) 对某检测区域内离散的检测点,由费马原理确定检测点处的声波传播路径,获得传播时间点 t ,再利用延时法从该检测区域的 $N \times N$ 组全矩阵数据中在时间点 t 的数据叠加,获得检测点的幅值。

[0013] 所述的环形阵列换能器,其所有阵元依次作为发射-接收阵元组合;在扫描各检测区域时,依次激发单个阵元,每次激发,所有阵元均接收超声回波时域信号,形成检测区域的全矩阵数据。

[0014] 本发明的优点与积极效果在于:本发明选用环形阵列换能器代替线性阵列换能器或面形阵列换能器,能够在使用较少阵元的情况下产生较强的聚焦声场,大大减少了电路控制复杂程度;针对环形阵列换能器只能轴向聚焦的特点,提供一种轴线全聚焦成像控制方法,可实现整个检测范围的无限聚焦,提高了可检厚度和检测精度;本发明由机械臂夹持换能器进行扫描,可实现检测的智能化、高效化。本发明对衰减较大、内部声速变化的材料的超声无损检测具有重要的实用价值。

附图说明

[0015] 图1是线性阵列换能器、矩形阵列换能器和环形阵列换能器示意图;

[0016] 图2是换能器全矩阵数据采集示意图;

[0017] 图3是常规全聚焦成像方法示意图;

[0018] 图4是本发明提出的全聚焦成像检测方法示意图;

[0019] 图5是采用本发明方法对试件整体检测的示意图;

[0020] 图6是本发明得到的某时刻的 S_{ij} 结果图;

[0021] 图7是本发明自主开发的环形阵列换能器检测软件示意图;

[0022] 图8是本发明设计的含有预埋缺陷的待检式样示意图;

[0023] 图9是本发明搭建的完整实验系统示意图。

具体实施方式

[0024] 下面将结合附图和实施例对本发明作进一步的详细说明。

[0025] 本发明实施例中采用的环形阵列换能器由一个中央晶片和15环阵列组成,中央晶片直径为9.6mm。结合常规基于全矩阵数据采集的全聚焦成像检测方法,本发明提出一种基于环形阵列换能器的全聚焦成像检测方法。

[0026] 图3为常规全聚焦成像检测方法中的后处理算法示意图。在该检测方法中,首先确定检测区域(成像区域)为待检试件的一个截面。针对该检测面,采用全矩阵数据采集方式获得一组全矩阵数据 $f_{(i)j}(t)$,其中 i, j 分别为发射阵元、接收阵元的编号, t 表示采样时间。进行后处理时,如图所示建立直角坐标系 Oxz ,并将该区域离散为一定数量的像素点,即虚拟聚焦点。根据发射、接收阵元到聚焦点的距离计算声波传播时间。以任意虚拟聚焦点 (x, z) 为例,由Snell法则计算出声波从阵元 i 出发经过入射点 $(x_t, 0)$ 到达聚焦点 (x, z) ,再经由出射点 $(x_r, 0)$ 到达阵元 j 的时间 $t_{ij}(x, z)$,从全矩阵数据 $f_{(i)j}(t)$ 中提取该聚焦点所对应的幅值 $I_{ij}(x, z)$ 。将该聚焦点的所有发射-接收阵元组合得到的幅值进行叠加,即可得到该点的全聚焦幅值并进行成像。

[0027] 本发明不同于常规全聚焦成像算法将试件截面定为检测成像区域,所采用的基于环形阵列换能器的全聚焦成像检测方法,将检测成像区域定为试件沿环形阵列换能器轴向的线形区域,根据精度要求将该区域离散成若干个检测点,如图4所示。下面说明本发明方法的实现。

[0028] 首先,根据检测精度要求,选择合适的步距将待检试件离散成多个线形检测区域,如图5所示,在硬件条件允许的情况下实现全区域覆盖。如图5所示,将试件沿步进方向进行离散,对于离散出的每个截面区域,再沿扫查方向离散,所得的各条状区域就是一个个检测区域。图5中,步进方向和扫查方向为待检试件的横向和纵向。用环形阵列换能器对每个检测区域进行检测,所检测的区域是一个沿环形阵列换能器轴向的线形区域。

[0029] 其次,针对单个检测区域,环形阵列换能器依次激发单个阵元,所有阵元均接收回波信号,并保存相应接收信号数据。将环形阵列换能器内所有阵元依次作为发射-接收阵元组合,所采集到的超声回波时域信号,是发射阵元序列、接收阵元序列和时间采样点数的三维数据。本发明实施例中,针对单个检测区域,先由环形阵列换能器的1号阵元激发超声波,1号至15号阵元分别独立接收超声回波信号,所获得的回波数据定义为 $S_{(1)j}(t)$,其中 $j=1, 2, \dots, 15$,共15组数据。然后,依次使环形阵列换能器中各阵元分别激励,重复上述过程,共获得 15×15 组数据。将发射阵元 i 、接收阵元 j 采集的超声回波数据记为 $S_{(i)j}(t)$,为全矩阵数据的第 i 行第 j 列的数据,如图6所示某时刻的 S_{ij} 。 $S_{(i)j}(t)$ 为一组数据,包含每个时间采样点时候接收信号的幅值。

[0030] 由机械臂夹持环形阵列换能器进行快速扫查,每个检测区域扫描获取一个全矩阵数据,采集到待检试件的所有全矩阵数据。

[0031] 选取环形阵列换能器中心为坐标系原点 O ,建立直角坐标系 Oxz 。针对线形检测区域中的任意一点 $(0, z)$,由费马原理确定超声波由探头入射到试件的入射点 (x_1, h) 及由试件返回探头的出射点 (x_2, h) , h 为水浸时的水距。则超声波由阵元激发,传播距离 S_1 到达入射点,再传播距离 S_2 到达该点 $(0, z)$,然后传播距离 S_3 到达出射点,最后传播距离 S_4 到达接收阵元,如图4所示。其传播所需时间的总和为:

$$[0032] \quad t(0, z) = \frac{S1+S4}{c_1} + \frac{S2+S3}{c_2}$$

[0033] 其中 c_1 为水中声速, c_2 为试件中的声速。对于内部具有各向异性的材料,其试件内部声速是变化的,针对不同点可代入不同的 c_2 值。

[0034] 为提高检测成像精度,在硬件条件允许的情况下,将线形检测区域离散成尽可能多的聚焦点,实现无限聚焦。针对某一目标聚焦点,即检测点,利用延时法则将环形阵列换能器中所有发射-接收阵元组合的超声回波信号在该点叠加,即将采集到的全矩阵数据完备集聚焦到每一个聚焦点,获得表征该点信息的幅值:

$$[0035] \quad I(0, z) = \sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^{15} S_{(i)j}(t(0, z))$$

[0036] 由机械臂夹持换能器快速扫查,由此获得被测区域内每一个虚拟聚焦点的幅值,即可完成整个被测区域内的成像。

[0037] 为验证本发明的有效性,本发明自主开发了一套环形阵列换能器超声检测软件,软件界面如图7所示,该软件可实现连接相控阵超声检测板卡、采集并处理超声检测信号、超声检测结果实时成像及换能器声场仿真功能。通过其声场仿真功能,可以获得环形阵列换能器的声场特点,如聚焦深度、焦斑大小等等。本发明实施例中,在波动方程的基础上,推导了二维各向同性固体介质中环形阵列超声换能器的辐射声场,通过c++实现对其声场仿真,获得该换能器在不同聚焦深度处的焦斑直径 d 。再通过有限元仿真软件ABAQUS对环形阵列换能器声场与缺陷的作用进行仿真,获得该换能器可检出的最小缺陷尺寸 r 。

[0038] 根据获得的焦斑大小及最小缺陷尺寸,设计如图8所示的含有预埋缺陷的标准待检试件。标准待检试件中预埋的缺陷尺寸为仿真得出的可检出的最小缺陷尺寸,在不同缺陷深度处的缺陷间距为仿真得出的不同聚焦深度处的焦斑直径。预埋缺陷为多组不同深度的平底孔,对不同深度缺陷的检测可有效验证本发明的纵向分辨力,对一组内两个缺陷的检测可有效验证本发明的横向分辨力。

[0039] 最后,搭建如图9所示的实验系统进行实验验证。如图9所示,搭建硬件系统,相控阵超声检测设备和环形阵列换能器连接,并安装在扫查装置上,相控阵超声检测设备通过USB 接口连接工控机,工控机上安装环形阵列换能器超声检测软件。相控阵超声检测设备在扫查装置扫描过程中,实时检测各检测区域,并在工控机上实时成像。通过对如图8设计标准待检试件进行检测,验证了本发明提供的基于环形阵列换能器的全聚焦成像检测方法,检测精度相较线性阵列换能器和矩形阵列换能器的检测精度高,试件可检厚度提高了,并且成像快,提高了检测效率。

[0040] 本发明不以任何方式限制于在说明书和附图中呈现的示例性实施方式。所示出以及描述的实施方式(的部分)的所有组合明确地理解为并入该说明书之内并且明确地理解为落入本发明的范围内。凡本技术领域技术人员在本发明构思基础上结合现有技术,通过逻辑分析、推理或有限实验可以得到的其他技术方案,也应该被认为落在本发明的权利要求保护范围之内。

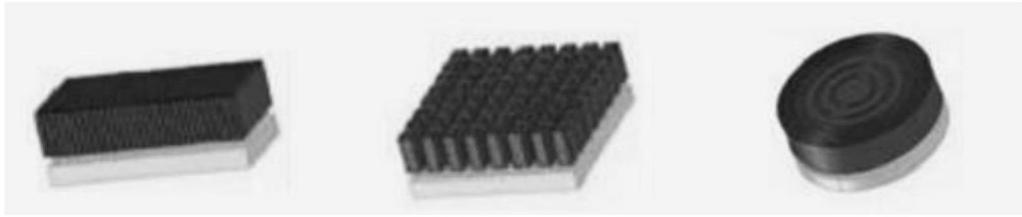


图1

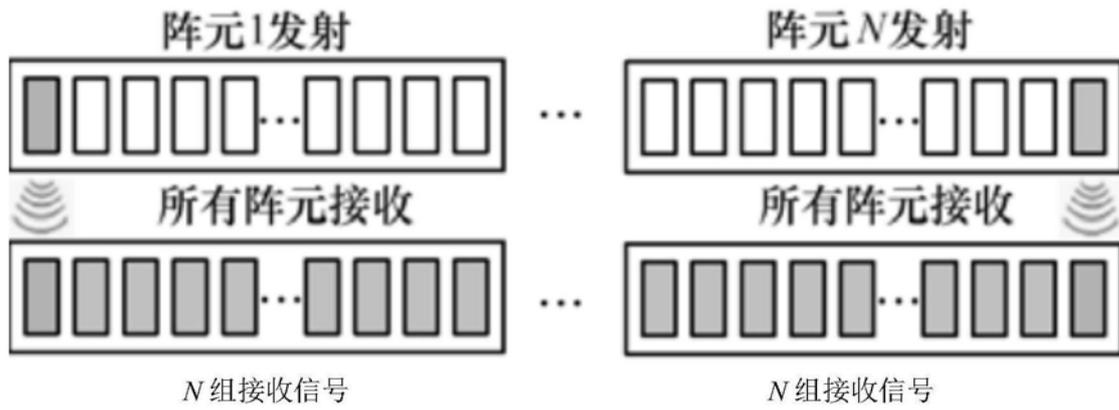


图2

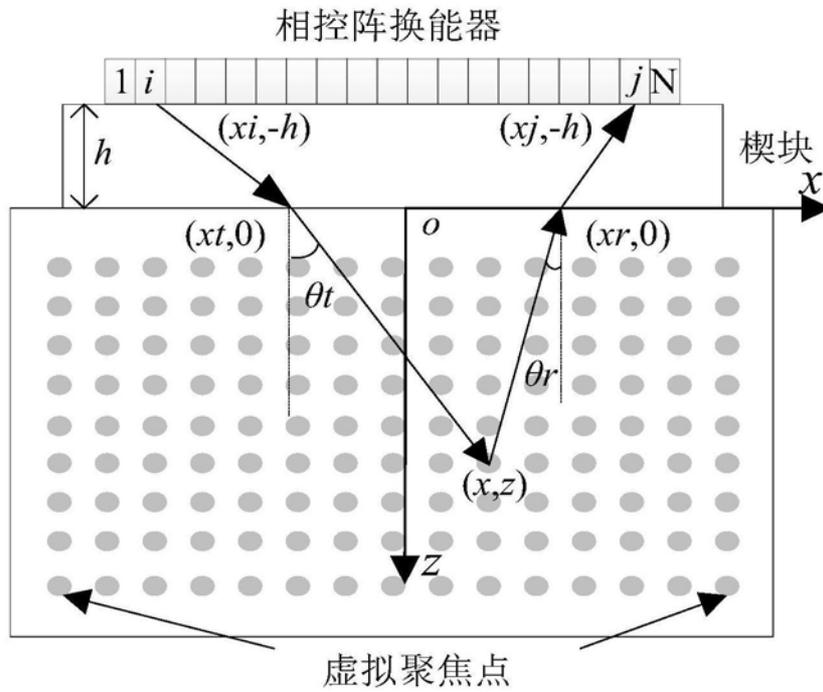


图3

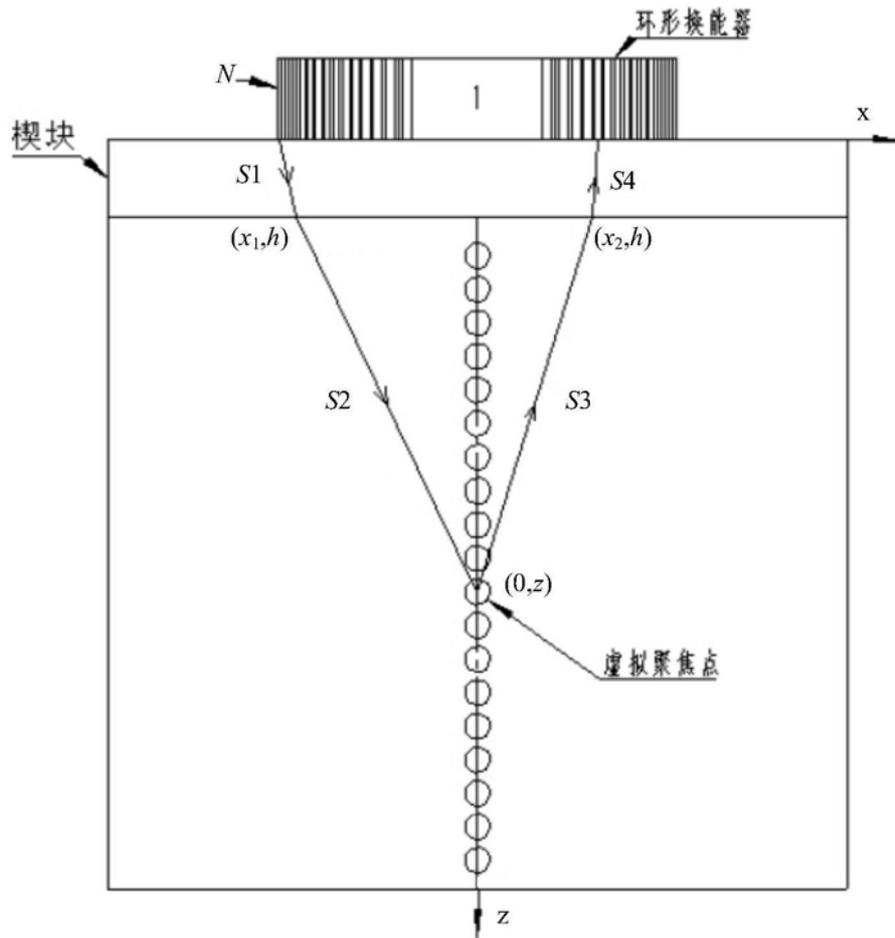


图4

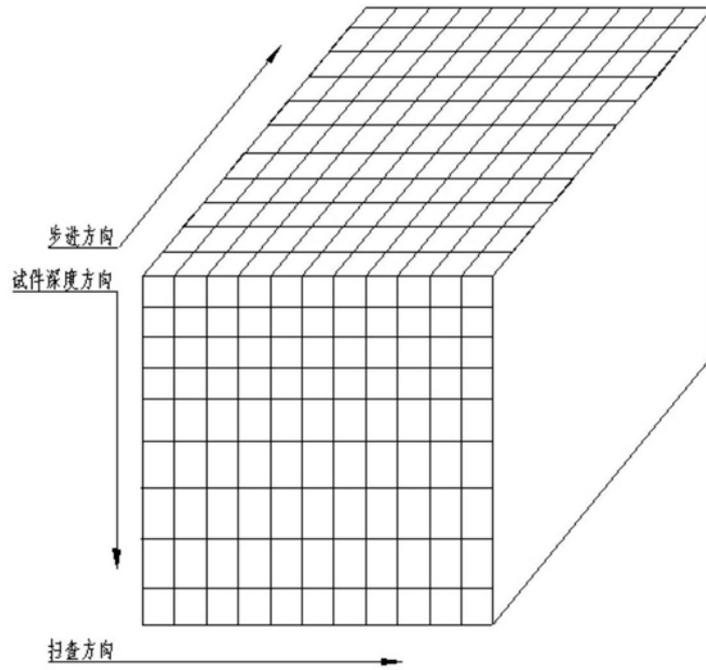


图5

T \ R	1	2	...	<i>j</i>	...	<i>N</i>
1	S_{11}	S_{12}	...	S_{1j}	...	S_{1N}
2	S_{21}	S_{22}	...	S_{2j}	...	S_{2N}
...
<i>i</i>	S_{i1}	S_{i2}	...	S_{ij}	...	S_{iN}
...
<i>N</i>	S_{N1}	S_{N2}	...	S_{Nj}	...	S_{NN}

图6

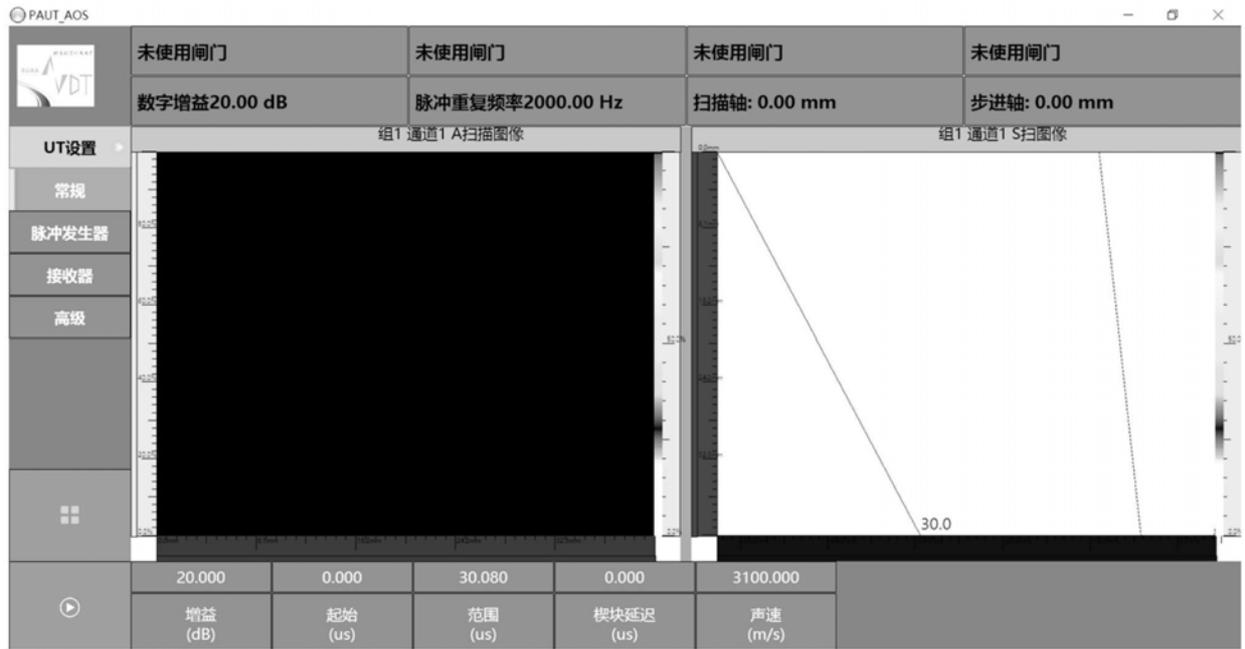


图7

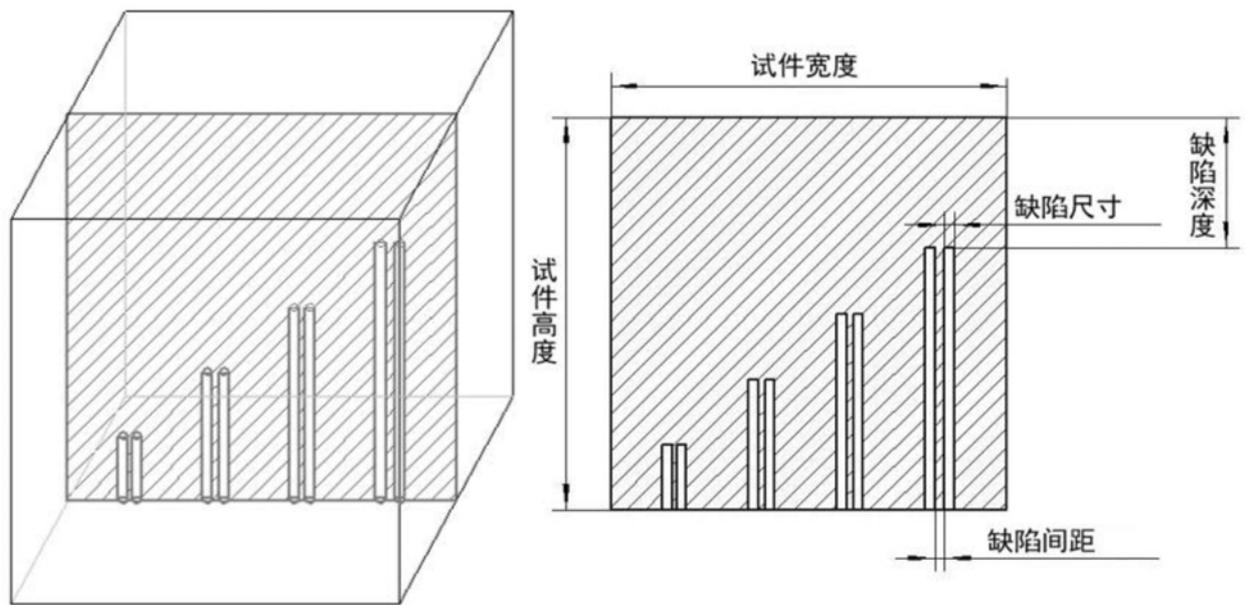


图8

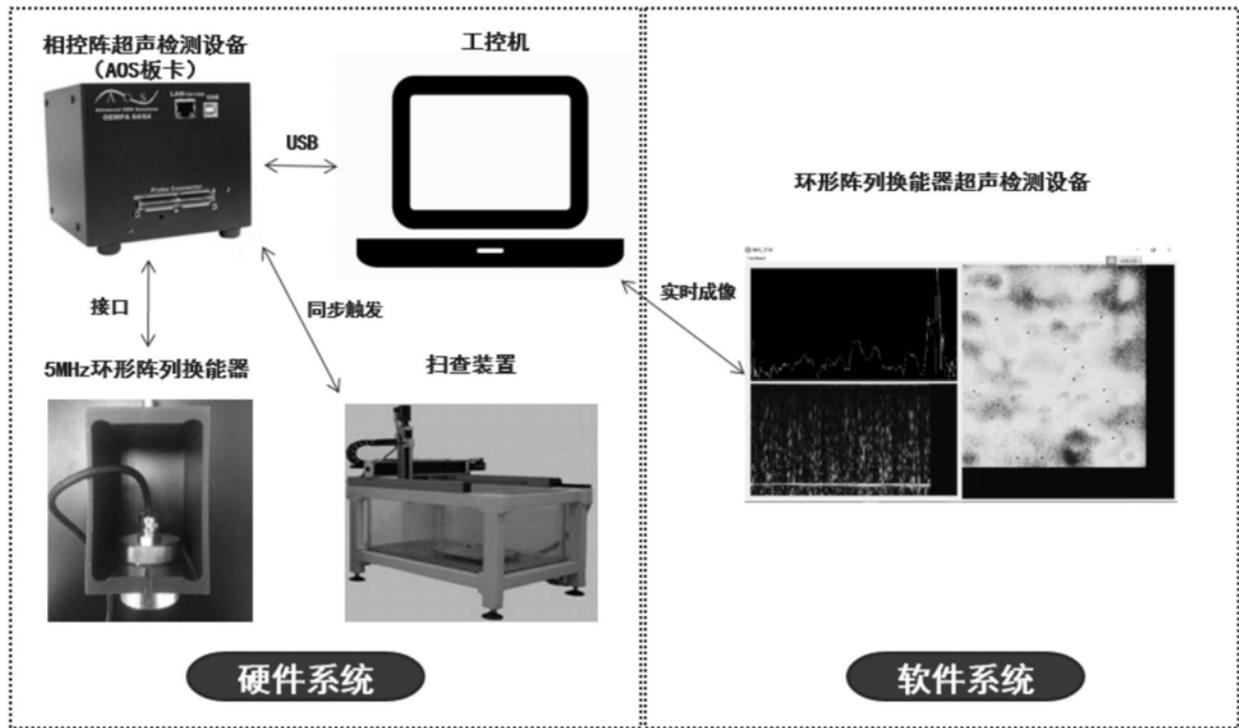


图9