

# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102539528 A

(43) 申请公布日 2012. 07. 04

(21) 申请号 201110281076. 2

(22) 申请日 2011. 09. 21

(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 何存富 郑阳 吴斌 周进节

李杨

(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 魏聿珠

(51) Int. Cl.

G01N 29/04 (2006. 01)

G01N 29/07 (2006. 01)

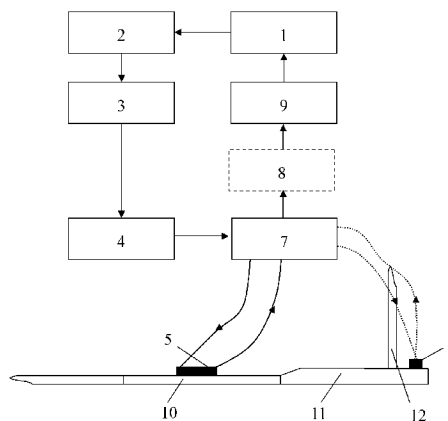
权利要求书 2 页 说明书 4 页 附图 8 页

## (54) 发明名称

基于超声 Lamb 波的储罐底板腐蚀检测系统及方法

## (57) 摘要

基于超声 Lamb 波的储罐底板腐蚀检测系统及方法,属于压力容器无损检测技术领域。由上位机 (1) 连接控制任意函数发生板卡 (2),任意函数发生板卡 (2) 与功率放大器 (3) 相连,功率放大器 (3) 与多通道切换开关 (4) 相连,多通道切换开关 (4) 与信号分离器 (7) 相连,信号分离器 (7) 与检测传感器阵列及多通道数据采集板卡 (9) 相连,多通道数据采集板卡 (9) 连入上位机 (1),多通道数据采集板卡 (9) 将采集到的信号传输到上位机。本发明无需清空储罐或进行液面升降,可对边缘板进行在线检测,对于中幅板的离线检测,相较于其它检测方法,本发明一次激励接收即可完成一整块钢板的检测,快速高效。



1. 基于超声 Lamb 波的储罐底板腐蚀检测系统,包括:上位机(1)、任意函数发生板卡(2)、功率放大器(3)、多通道切换开关(4)、检测传感器阵列、信号分离器(7)、前置放大器(8)和多通道数据采集板卡(9);其特征在于:由上位机(1)连接控制任意函数发生板卡(2),任意函数发生板卡(2)与功率放大器(3)相连,功率放大器(3)与多通道切换开关(4)相连,多通道切换开关(4)与信号分离器(7)相连,信号分离器(7)与检测传感器阵列及多通道数据采集板卡(9)相连,多通道数据采集板卡(9)连入上位机(1),多通道数据采集板卡(9)将采集到的信号传输到上位机。

2. 根据权利要求1所述的基于超声 Lamb 波的储罐底板腐蚀检测系统,其特征在于:所述的检测传感器阵列包括线型传感器阵列(5)与环型传感器阵列(6)。

3. 根据权利要求1所述的基于超声 Lamb 波的储罐底板腐蚀检测系统,其特征在于:所述的检测传感器阵列采用电磁声传感器,信号分离器(7)与多通道数据采集板卡(9)之间连有前置放大器(8)。

4. 根据权利要求1所述的基于超声 Lamb 波的储罐底板腐蚀检测系统,其特征在于:用于边缘板检测的线形传感器阵列(5)放置于边缘板超出管壁的部分上,超出的宽度约为10-15cm;用于中幅板检测的环型传感器阵列(6)放置于中幅板中间。

5. 运用权利要求所述的基于超声 Lamb 波的储罐底板腐蚀检测系统的检测方法,其特征在于:包括如下步骤:

步骤一:确定检测模态、频率及群速度:将储罐底板视为自由板,根据其厚度和材料参数,按频散方程绘制出对应的频散曲线;选取 S0 模态的 Lamb 波检测模态,并对频率低于 1MHz 的 S0 模态各频率点的波结构进行分析;通过选取群速度频散曲线变化率缓慢的频率段来缩小波结构研究的分析范围针对该频率段的各频率点画出波结构图,选取波结构图中位移场分布在板厚方向呈直线的频率点作为检测频率  $f_0$ ,最后,对应群速度频散曲线找到检测频率  $f_0$  所对应的群速度;

步骤二:将被检结构的几何形状离散化为网格,用网格的中心点坐标  $(x_m, y_n)$  代表每一个网格,其中  $x, y$  代表横向和纵向分组,  $m, n$  代表指定坐标原点后网格的横纵坐标;布置传感器阵列,边缘板的检测,采用线型布置传感器阵列,布置于壁板外侧的边缘板上,中幅板的检测,采用环型阵列,布置于板的中心位置处;测量记录阵列中每一个传感器的坐标;

步骤三:采用一种中心频率为  $f_0$  的由高斯窗调制的 5 周期正弦波信号经过 chirp 变换后的信号作为激励信号,并将传感器阵列中的传感器顺序编号为  $T_i, i = 1, 2, \dots, n, n$  为该组传感器阵列中传感器的个数,其中线型阵列按从一端到另一端递增的顺序,环型阵列则在指定  $T_1$  传感器后按逆时针顺序递增;从  $T_1$  传感器开始,所有传感器依次进行激励,在每次激励过程中,全部传感器同时进行接收信号。得到原始的  $n \times n$  组时域信号,每组信号为一激励接收对  $S_{ij}$ ,角标  $i$  代表激励传感器编号,角标  $j$  代表接收传感器编号;

步骤四:对原始的检测信号进行逆变换,从 chirp 信号中解调有用的检测信号,即中心频率为  $f_0$  的由高斯窗调制的 5 周期正弦波信号在板中传播后接收到的检测信号,然后对信号进行带通滤波,得到信号矩阵  $H_{ij}$ ;

步骤五:波的传播满足公式:  $l = c_g \cdot t$  其中  $l$  为波的传播距离,  $c_g$  为波的群速度,  $t$  为波的传播时间。由此可根据已知的各传感器空间位置,计算出波的传播距离,进而确定各焦点的时间延迟矩阵,根据延时矩阵从信号矩阵  $H_{ij}$  中得到对应时间点的幅值矩阵  $A_{ij}$ ;

步骤六:坐标  $(x_m, y_n)$  代表的网格的颜色值  $C_{mn}$  由下式给出:

$$C_{mn} = \sum A_{ij}$$

将  $C_{mn}$  进一步映射为 RGB 或灰度值即可得到整个板的缺陷分布图像。

## 基于超声 Lamb 波的储罐底板腐蚀检测系统及方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于压力容器无损检测技术领域,具体涉及一种利用超声 Lamb 波无损检测技术实现储罐底板腐蚀检测的系统和方法。

### 背景技术

[0002] 大型石油储罐在工业生产和国家战略石油储备中应用广泛。在长期服役过程中,大型储罐受诸多因素影响容易发生腐蚀,导致原油泄漏和结构失效。而储罐储存的物料多为易燃易爆或有毒油品,本身容量大,一旦失效往往会造成火灾、爆炸事故,不仅会给油气工业带来巨大的经济损失,而且可能会造成重大人员伤亡事故和严重的环境污染。

[0003] 目前储罐底板腐蚀定期检测常用的方法有超声波、射线、渗透、磁粉、漏磁和声发射检测等。除声发射检测外其它方法都需要开罐离线检测,即停用储罐、倒料、打开并置换清洗,使检测人员进入罐中进行各项检测,并且这些检测方法都是点检测,费时费力,检测成本较高。并且射线检测对人体有害,磁粉检测工况恶劣。虽然声发射检测是一种在线检测技术,但在检测前应把储存介质液面降低,检测时再把液位升高,分别在 85%,95%和 100%液位进行保压,底板上的腐蚀缺陷处将会产生声发射信号。这些信号被等距布置在储罐底板边缘的低频传感器接收,再采用圆周上任意三个传感器实现定位。检测过程复杂耗时,且易受环境噪声的影响,同时由于其是一种被动声检测技术,只能监测到活性缺陷,对于已存腐蚀缺陷无法测知。

[0004] 专利《钢质储罐底板的导波在线检测方法》(专利号:200810240571)采用楔形传感器,有一定的波束指向性,只能依次手动改变检测方向,重复检测过程来实现对底板的检测,检测效率低。同时,沿储罐处边缘布置一圈传感器是没有必要的,因为 Lamb 波在焊缝处将发生复杂的散射与波型转换,穿越焊缝的回波信号无法用于检测过程。

[0005] 专利《基于换能器阵列虚拟聚焦的板结构兰姆波无损检测方法》(专利号:200910238113)所述的成像方法依赖于两个重要前提:(1)精确计算板结构的频散曲线;(2)阵列中所有的传感器必须具有同样的发射与接收灵敏度;(3)消除膺像需要有参考信号(通过理论计算或是在板完整时预先获得其参考信号)。此方法对于储罐底板的检测将无法使用,原因如下:首先,储罐底板结构复杂,且由于其会负载油液等,目前,并没有很好的方法精确计算它的频散曲线,这就使得上述专利中利用波数域进行波包紧缩的方法无法实现;其次,实际检测过程中,由于检测系统及传感器不可能具有完全一致的表现,因而无法具有同样的发射与接收灵敏度;再次,由于储罐底板结构的复杂性,很难准确获得理论计算的参考信号,且检测方法多用于已经服役的储罐,无法获得板完整时的参考信号。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的在于克服已存在检测手段的检测效率低、检测实用性不够的缺点,用 Lamb 波对储罐底板腐蚀状况进行检测,具体来说就是利用一种低频(80kHz ~ 1MHz)零阶对称模态(S<sub>0</sub>模态)Lamb 波实现储罐底板腐蚀的检测与定位,采用一种周向一致激励和

接收 S0 模态 Lamb 波的电磁声传感器进行信号的激励接收,运用阵列全聚焦算法对缺陷分布实现成像,检测过程分边缘板在线检测系统与中幅板离线检测系统两部分。

[0007] 本发明的技术方案,具体见图 1,装置包括:上位机 1、任意函数发生板卡 2、功率放大器 3、多通道切换开关 4、检测传感器阵列、信号分离器 7、前置放大器 8 和多通道数据采集板卡 9。由上位机 1 连接控制任意函数发生板卡 2,任意函数发生板卡 2 与功率放大器 3 相连,功率放大器 3 与多通道切换开关 4 相连,多通道切换开关 4 与信号分离器 7 相连,信号分离器 7 与检测传感器阵列及多通道数据采集板卡 9 相连,多通道数据采集板卡 9 连入上位机 1,多通道数据采集板卡 9 将采集到的信号传输到上位机。

[0008] 所述的检测传感器阵列包括线型传感器阵列 5 与环型传感器阵列 6。

[0009] 所述的检测传感器阵列采用电磁声传感器,信号分离器 7 与多通道数据采集板卡 9 之间连有前置放大器 8。

[0010] 其中,用于边缘板检测的线形传感器阵列 5 放置于边缘板超出管壁的部分上,超出的宽度约为 10-15cm;用于中幅板检测的环型传感器阵列 6 放置于中幅板中间,见图 2、图 3 所示。

[0011] 运用上述的基于超声 Lamb 波的储罐底板腐蚀检测系统的检测方法,包括如下步骤:

[0012] 步骤一:确定检测模态、频率及群速度:将储罐底板视为自由板,根据其厚度和材料参数,按频散方程绘制出对应的频散曲线(如图 10、图 11)。选取 S0 模态的 Lamb 波检测模态,并对频率低于 1MHz 的 S0 模态各频率点的波结构进行分析。通过选取群速度频散曲线变化率缓慢的频率段来缩小波结构研究的分析范围(如图 11 中的 0-500kHz),针对该频率段的各频率点画出波结构图(如图 12),选取波结构图中位移场分布在板厚方向呈直线(或近似直线)的频率点作为检测频率  $f_0$ 。最后,对应群速度频散曲线找到检测频率  $f_0$  所对应的群速度,以备之后计算所用。

[0013] 步骤二:将被检结构的几何形状离散化为网格,用网格的中心点坐标  $(x_m, y_n)$  代表每一个网格( $x, y$  代表横向和纵向分组, $m, n$  代表指定坐标原点后的网格的横纵坐标)。布置传感器阵列,边缘板的检测,采用线型布置传感器阵列,布置于壁板外侧的边缘板上,中幅板的检测,采用环型阵列,布置于板的中心位置处;测量记录阵列中每一个传感器的坐标。

[0014] 步骤三:采用一种中心频率为  $f_0$  的由高斯窗调制的 5 周期正弦波信号经过 chirp 变换后的信号作为激励信号,并将传感器阵列中的传感器顺序编号为  $T_i (i = 1, 2, \dots, n, n$  为该组传感器阵列中传感器的个数),其中线型阵列按从一端到另一端递增的顺序,环型阵列则在指定  $T_1$  传感器后按逆时针顺序递增;从  $T_1$  传感器开始,所有传感器依次进行激励,在每次激励过程中,全部传感器同时进行接收信号。得到原始的  $n \times n$  组时域信号,每组信号为一激励接收对  $S_{ij}$ ,角标  $i$  代表激励传感器编号,角标  $j$  代表接收传感器编号;

[0015] 步骤四:对原始的检测信号进行逆变换,从 chirp 信号中解调有用的检测信号,即中心频率为  $f_0$  的由高斯窗调制的 5 周期正弦波信号在板中传播后接收到的检测信号,然后对信号进行带通滤波,得到信号矩阵  $H_{ij}$ 。

[0016] 步骤五:波的传播满足公式:  $l = c_g \cdot t$  其中  $l$  为波的传播距离,  $c_g$  为波的群速度,  $t$  为波的传播时间。由此可根据已知的各传感器空间位置,计算出波的传播距离,进而确定各聚焦点的时间延迟矩阵,根据延时矩阵从信号矩阵  $H_{ij}$  中得到对应时间点的幅值矩阵  $A_{ij}$ 。

[0017] 步聚六:坐标  $(x_m, y_n)$  代表的网格的颜色值  $C_{mn}$  由下式给出:

$$[0018] \quad C_{mn} = \sum A_{ij}$$

[0019] 将  $C_{mn}$  进一步映射为 RGB 或灰度值即可得到整个板的缺陷分布图像。

[0020] 本发明相对于已存在的检测方法,其优点主要在于,第一,本发明的方法无需清空储罐或进行液面升降,可对边缘板进行在线检测;第二,本发明方法将传感器布置于储罐罐壁外的边缘板上,无需进入储罐内部即可实现对储罐底板边缘板腐蚀情况的检测;第三,本发明方法在检测过程中,可以同时检测到底板上下表面的缺陷,即底板与油液接触面及底板与砂垫层接触面上的腐蚀缺陷;第四,对于中幅板的离线检测,相较于其它检测方法,本发明方法一次激励接收即可完成一整块钢板的检测,快速高效;第五,本发明方法对不要求传感器有一致的接触状态,也不要求传感器和硬件各通道的一致性,可很好地应用于工程实际,且检测受环境噪声影响较小。这些特点是其它检测方法所不具备的。

#### 附图说明:

[0021] 图 1 检测系统装置图;

[0022] 图 2 边缘板检测传感器阵列安装位置示意图

[0023] 图 3 中幅板检测传感器阵列安装位置示意图

[0024] 图 4 阵列传感器检测储罐底板示意图

[0025] 图 5 高斯窗调制的 5 周期正弦信号

[0026] 图 6 chirp 信号

[0027] 图 7 chirp 信号频谱

[0028] 图 8 全聚焦成像算法示意图

[0029] 图 9 信号处理流程图

[0030] 图 10 厚 11mm 的钢板的相速度频散曲线

[0031] 图 11 厚 11mm 的钢板的群速度频散曲线

[0032] 图 12 厚 11mm 的钢板中 S0 模态 50kHz 时的波结构图及位移场分布图

[0033] 图中,1- 上位机软件,2- 任意函数发生板卡,3- 功率放大器,4- 多通道切换开关,5- 线型阵列传感器,6- 环形阵列传感器,7- 信号分离器,8- 前置放大器,9- 多通道数据采集板卡,10- 中幅板,11- 边缘板,12- 壁板。

#### 具体实施方式

[0034] 以一种  $10 \times 10^4$  浮顶油罐检测为例进行说明。

[0035] 此种油罐的边缘板尺寸为:  $21 \times 2000 \times 6350 \text{mm}^3$ , 板材为 12MnNiVR, 中幅板尺寸为:  $11 \times 2800 \times 13800 \text{mm}^3$ , 板材为 Q235-B。

[0036] 绘制边缘板及中幅频率小于 1MHz 范围内的频散曲线。选择低频 (1MHz 以内)、零阶对称模态 (S0 模态) 的 Lamb 波进行检测。相较于其它模态与频率段的 Lamb 波,其优势在于:首先,这个频率范围内的 S0 模态 Lamb 波频散程度很小,从而使得定位精度较高;其次,此范围内的 S0 模态波结构面内 位移沿钢板厚度几乎平均分布,使得检测对整个板厚上的腐蚀缺陷都保持很高的灵敏度;再次,相较于另一种常用的 Lamb 波检测模态 A0 模态, S0 模态面内位移占绝对主导,离面位移很小,因而几乎不受上层负载 (油液) 与下层沥青砂垫层

的影响,从而在理论模型中可忽略上层油液与下层沥青砂垫层,使得检测与信号分析变得很简洁,而 A0 模态的群速度受负载的影响变化很大,不便于利用其进行检测。如图 8 中所示的 11mm 厚中幅板的频散曲线。

[0037] 在此频率范围内,对 S0 模态的波结构进行分析,找出面内位移沿厚度均匀分布或是近似均匀分布的频率作为检测频率。如图 9 中所示的厚 11mm 的钢板中 S0 模态 50kHz 时的波结构图及位移场分布图。从此图可知,50kHz 时面内位移沿厚度方向分布近似呈直线,且其群速度变化缓慢,频散程度小,满足检测要求。从频散曲线中找出此频率下对应的 S0 模态群速度。此频率下的群速度也可以利用两个传感器,采用一激一收的方式,在板中测得。

[0038] 此例选用一种周向一致激励、接收 S0 模态 Lamb 波的电磁声传感器。边缘板的检测,采用线形或近线形布置传感器阵列,中幅板的检测,采用圆形阵列。阵列中传感器的个数不限,一般传感器个数越多,越能获得较好的成像效果,但是传感器个数的增加将增加硬件成本与计算速度,所以传感器个数的选择应在保证成像效果的基础上,尽量少。但无论线型与圆型阵列中的传感器个数如何变化,所有的检测过程完全一样。选择线型与圆型阵列的原因:首先,这两种阵列的形状可保证成像分辨率一样的情况下,传感器个数尽量少,大大节省硬件成本与计算时间;其次,考虑边缘板在线检测时,需将传感器阵列安装于罐外,安装空间的限制使得传感器阵列只能沿罐外边缘板放置,因而阵列近似为线型,需要指出的是,即使阵列不为严格的线型,例如弧形的情况下,信号处理与成像过程完全一样。最后,圆型阵列在执行中幅板检测时,将阵列置于板的中心位置,这样将保证以传感器为中心的各个方向都有较好的成像效果。本例中采用十个传感器组成阵列进行检测。

[0039] 激励信号采用一种 chirp 信号,如图 5 中所示。此 chirp 信号经过逆变换后可得到高斯窗调制的 5 个周期的正弦波信号。利用 chirp 信号可以在激励信号中包含更大的能量,检测距离将明显提高。设阵列中有  $n$  个传感器,如图 6 中所示,编号为  $T_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ,线型阵列按从一端到另一端递增的顺序,环型阵列则在指定  $T_1$  传感器后按逆时针顺序递增进行编号。信号的激励与采集过程为:从  $T_1$  传感器始,所有传感器依次进行激励,在每次激励过程中,全部传感器同时进行接收信号。这时将得到原始的  $n \times n$  组时域信号,每组信号为一激励接收对  $S_{ij}$ ,角标  $i$  代表激励传感器编号,角标  $j$  代表接收传感器编号,如  $S_{13}$  为传感器  $T_1$  激励  $T_3$  接收。

[0040] 信号处理与成像过程。对原始的检测信号进行逆变换,从 chirp 信号中解调有用的检测信号,然后对信号进行带通滤波,得到信号矩阵  $H_{ij}$ ,将检测结构的几何形状离散化为各个网格,用网格中心点坐标  $(x_m, y_n)$  代表每一个网格。在已知各传感器空间位置的情况下,计算各聚焦点的时间延迟矩阵,从信号矩阵  $H_{ij}$  中得到对应时间点的幅值矩阵  $A_{ij}$ ,将所有的幅值相加并映射为颜色值,定义为此网格处的颜色。在对所有点完成颜色计算后,即可完成对整个结构的成像处理。

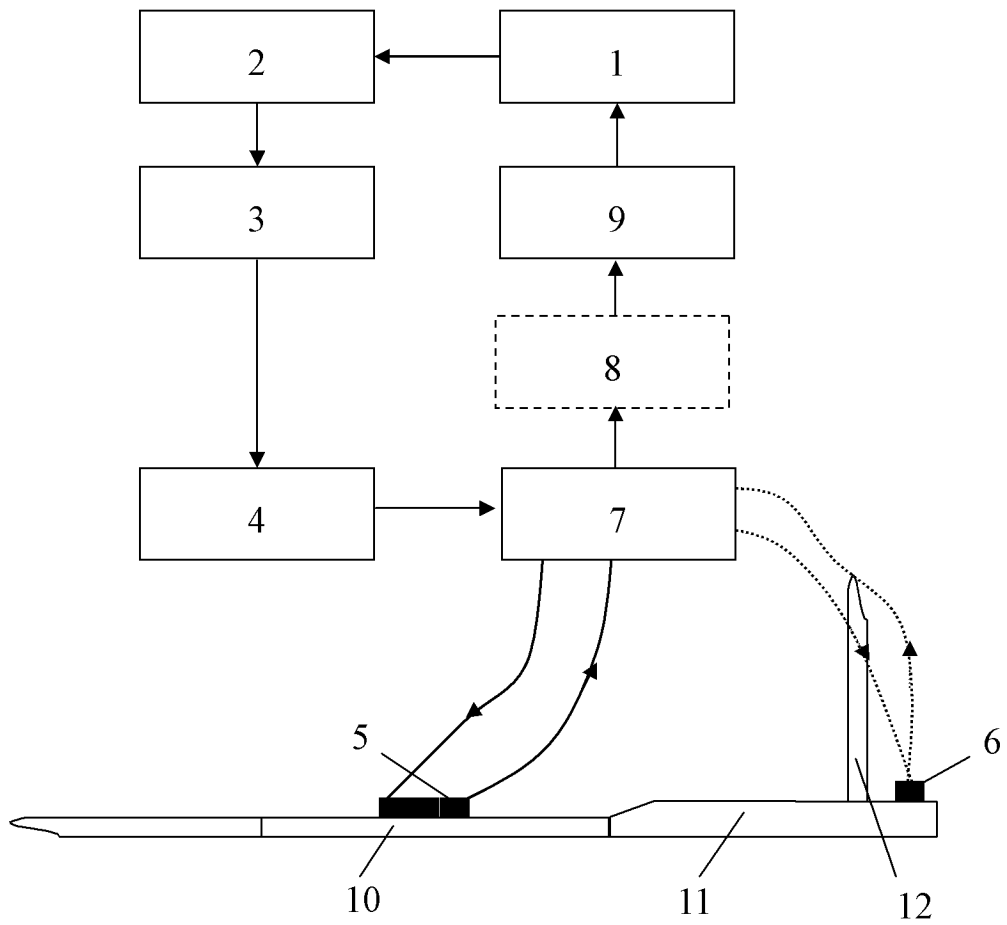


图 1



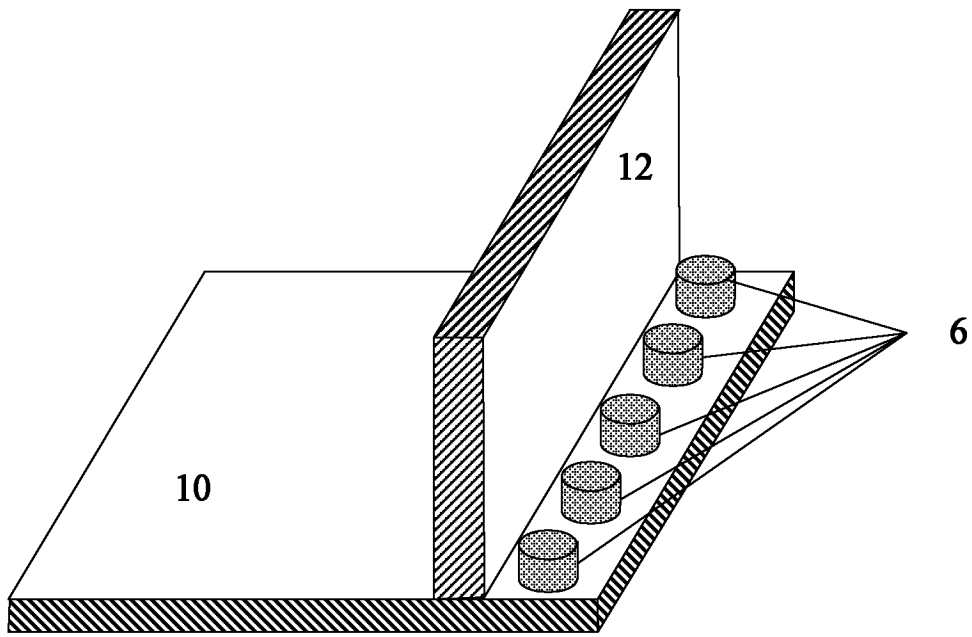


图 2

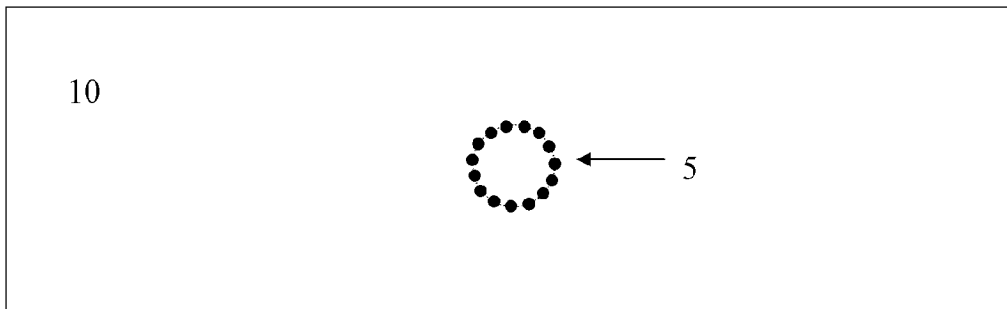


图 3

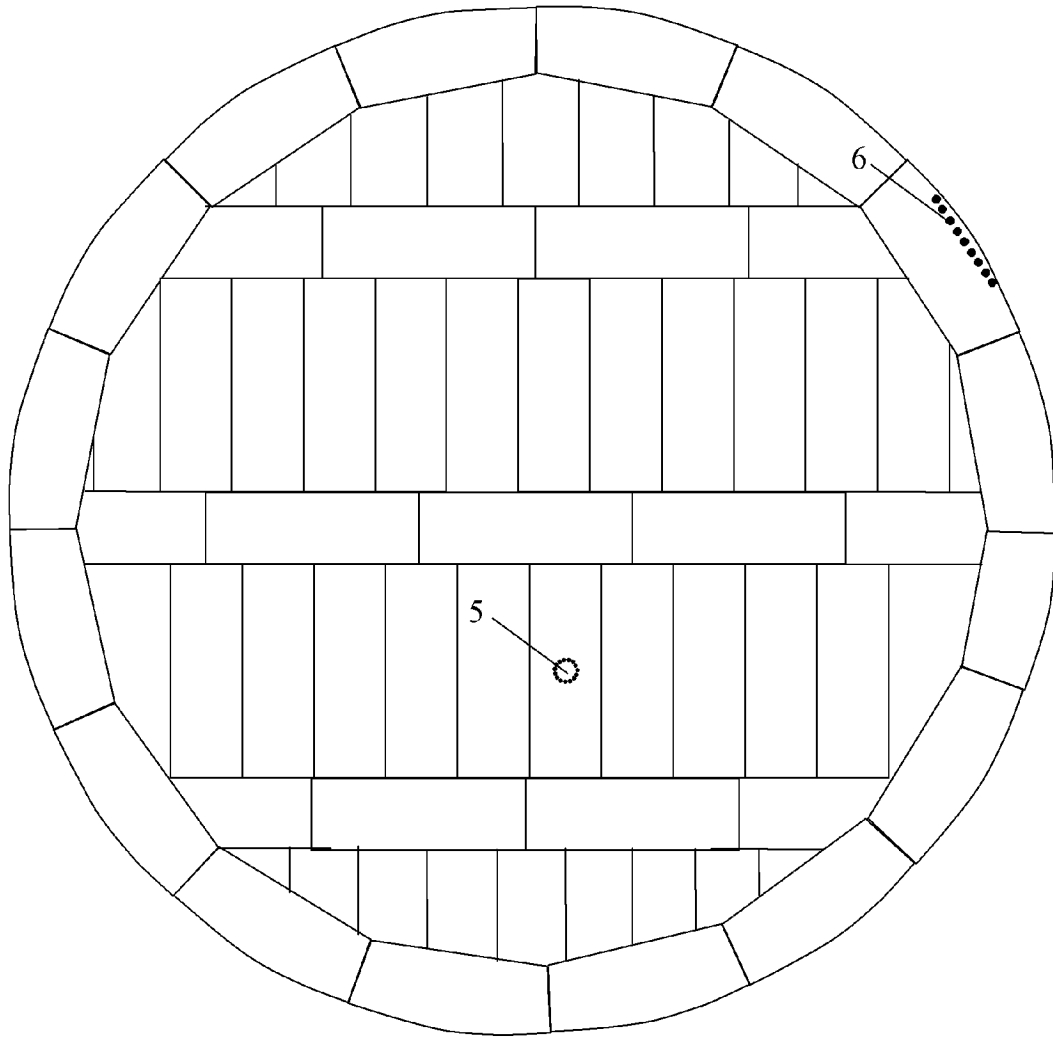


图 4

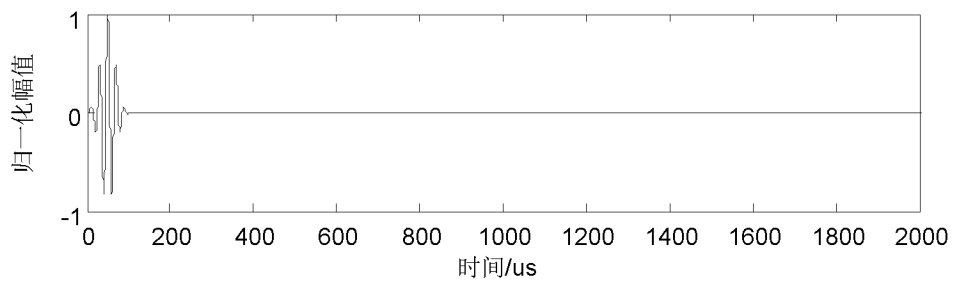


图 5

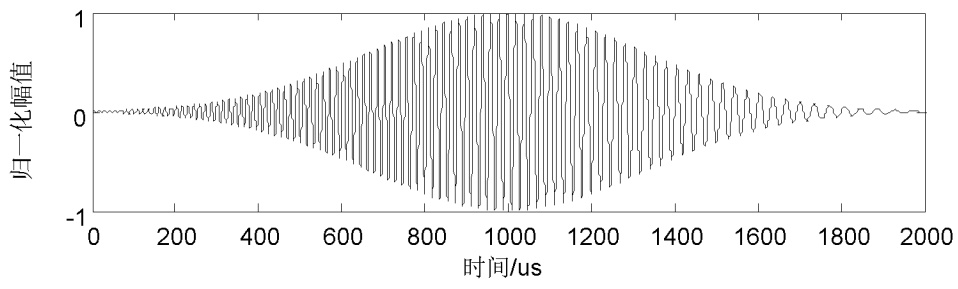


图 6

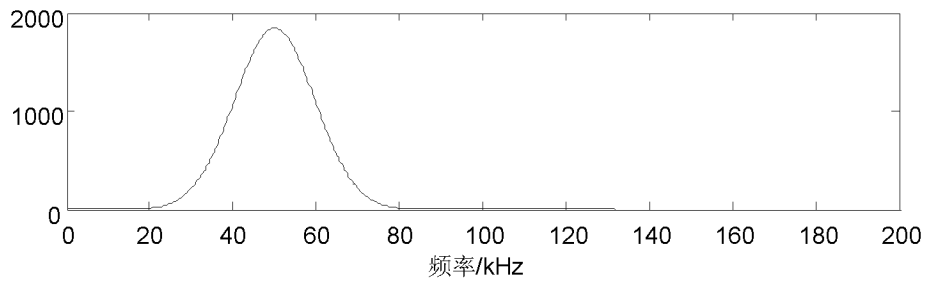


图 7

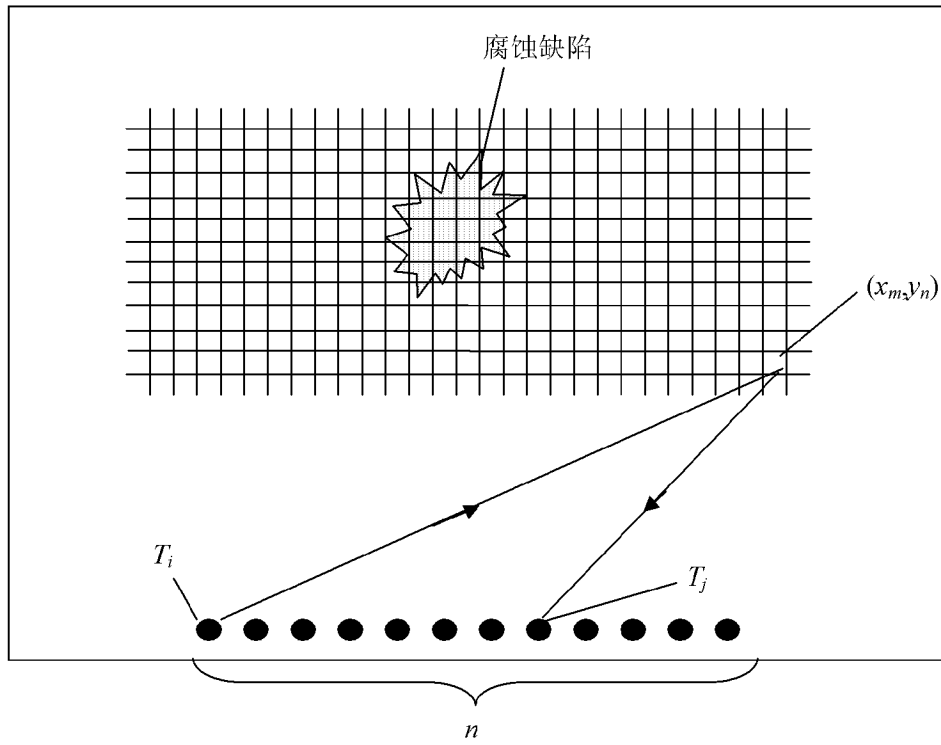


图 8

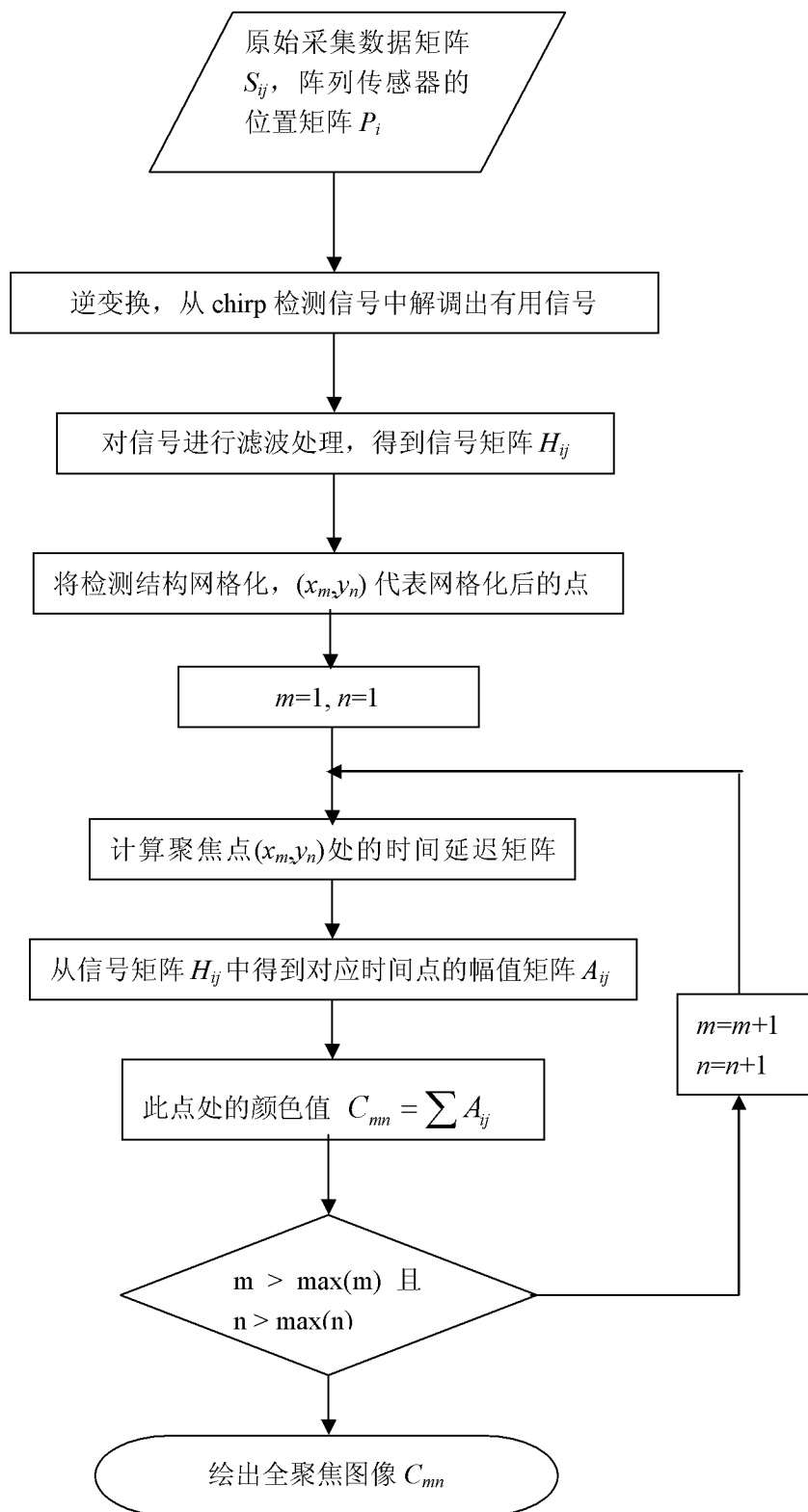


图 9

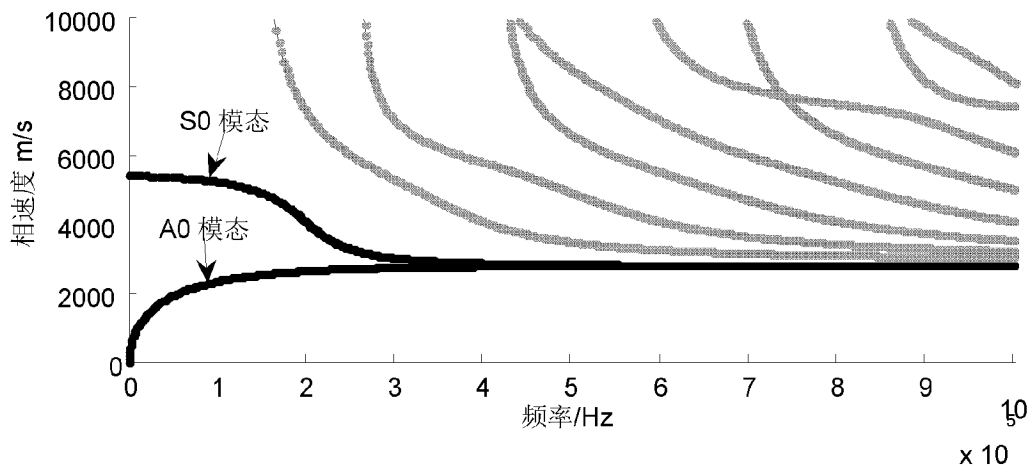


图 10

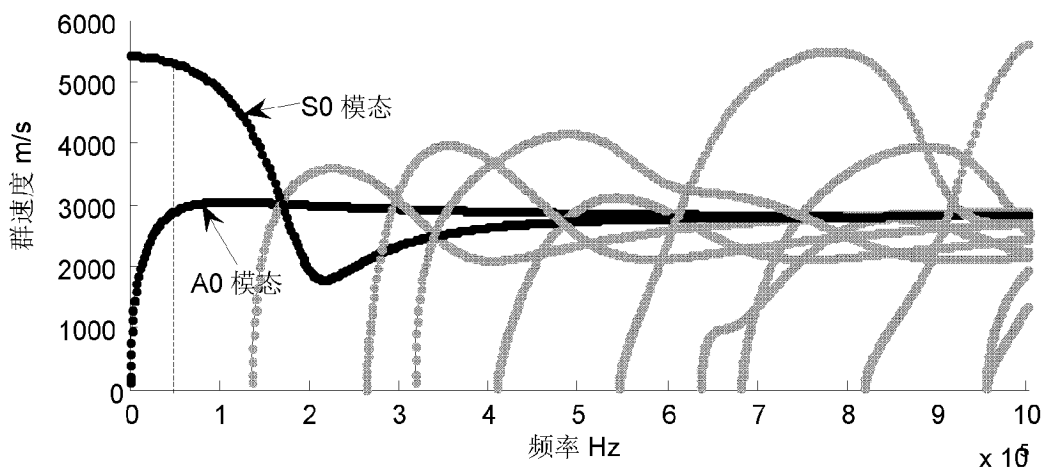


图 11

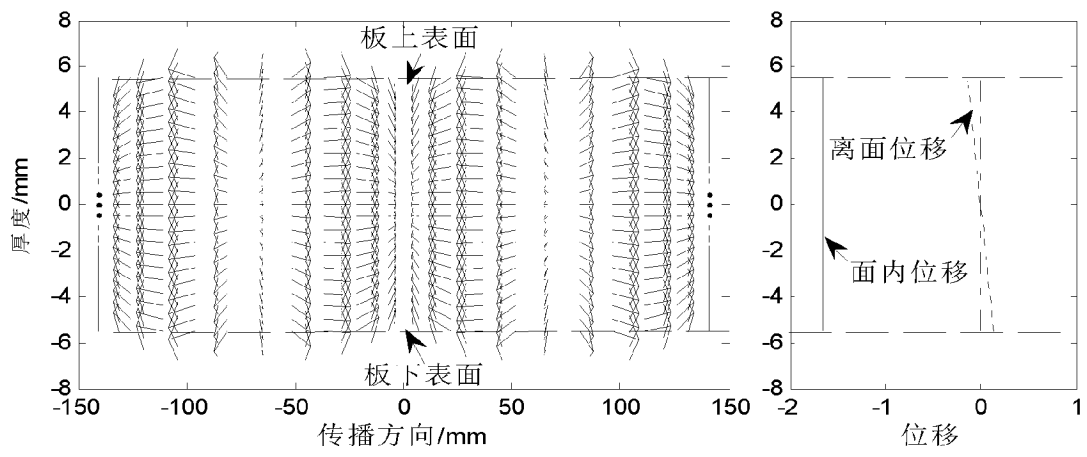


图 12