

[51] Int. Cl.
G01N 29/04 (2006.01)



专利号 ZL 03159421.2

[11] 授权公告号 CN 100338460C

权利要求书 4 页 说明书 18 页 附图 7 页

1. 一种检测元件的方法，包括：

(a) 激励形成阵列的多个换能器，以产生沿所选的射线路径从阵列聚焦到元件的超声发射束，所述阵列被具有一种材料速度的间隔物从所述元件分隔开；

(b) 利用换能器作为接收元件产生多个回声信号；以及

(c) 处理多个频道中的所述回声信号，所述处理包括：

(i) 沿所述所选的射线路径将所述回声信号动态聚焦到所述元件中至少一个焦点 P，其中所述动态聚焦包括：

调节延迟波形，以补偿所述超声发射束在所述元件和所述间隔物之间界面上的折射；

将所述延迟波形加到所述各频道中的所述回声信号，以产生多个延迟的回声信号；

(ii) 调节活性接收元件数作为波幅 R_s 的函数，提供接收动态孔径，其中所述调节活性接收元件数包括补偿超声发射束在元件和间隔物之间界面上的折射；

(iii) 合计来自所有所述活性接收元件的所述延迟回声信号，以产生聚焦的回声信号。

2. 如权利要求 1 所述的检测方法，其中所述激励换能器包括对各所述换能器分别加激励信号脉冲，所述检测方法还包括：

(d) 以相对表面法线的角度 θ 沿所述所选射线路径操纵所述超声发射束，所述操纵包括：

(i) 调节发射延迟波形以补偿所述超声发射束在所述元件和所述间隔物之间的所述界面上的折射，所述发射延迟波形包括多个发射延迟，各发射延迟包括一个静态操纵项，以及

(ii) 用所述发射延迟波形调制所述激励信号脉冲；以及

(e) 通过所述将所述延迟波形加到所述各频道的所述回声信

号, 产生操纵的回声信号, 藉以形成所述延迟的回声信号, 其中所述延迟波形包括多个接收延迟, 各接收延迟包括一个静态操纵项, 其中所述调节所述延迟波形调节各所述静态操纵项以补偿所述界面的折射。

3. 如权利要求 2 所述的检测方法, 其中所述操纵包括以角度 θ 和 ψ 沿所述所选射线路径操纵所述超声发射束。

4. 如权利要求 1 所述的检测方法, 其中:

所述换能器的所述激励包括在每个连续激励时间间隔 t_i 将一个单独的信号脉冲加到各所述换能器上,

所述回声信号的所述产生是对每个所述连续激励时间间隔 t_i 进行,

所述动态聚焦包括在每个连续第 i 个所述激励时间间隔 t_k 期间, 将所述回声信号沿所述所选的射线路径动态聚焦到各波幅 R_i 的多个焦点 P_i ,

所述调节所述活性接收元件数是作为所述波幅 R_i 的函数对每个所述连续激励时间间隔 t_i 进行, 以及

所有所述活性接收元件的所述延迟回声信号的所述合计是对每个所述连续激励时间间隔进行, 以产生对所述各波幅 R_i 的聚焦回声信号。

5. 一种检测元件的方法, 包括:

(a) 对形成阵列的每个换能器分别加激励脉冲, 以产生沿所选的射线路径从阵列聚焦到所述元件的超声发射束, 所述阵列用材料速度为 v_w 的间隔物与所述元件分隔开;

(b) 以相对表面法线的角度 θ 沿所述所选射线路径操纵超声发射束, 所述操纵包括:

(i) 调节发射延迟波形以补偿所述超声发射束在所述元件和所述间隔物之间所述界面上的折射, 所述发射延迟波形包括多个发射延迟, 各发射延迟包括一个静态操纵项, 以及

(ii) 用所述发射延迟波形调制所述激励脉冲;

(c) 利用所述换能器作为接收元件产生多个回声信号; 以及

(d) 利用延迟波形处理多个频道的所述回声信号, 所述延迟波形包括多个接收延迟, 每个接收延迟包括一个静态接收操纵项, 所述处理包括:

(i) 调节各所述静态接收操纵项以补偿所述超声发射束在所述元件和所述间隔物之间所述界面上的折射;

(ii) 对所述各频道的所述回声信号加所述延迟波形, 以产生多个延迟回声信号; 以及

(iii) 合计来自接收元件的延迟回声信号, 产生操纵的回声信号。

6. 如权利要求 4 所述的检测方法, 其中所述处理步骤还包括:

(iv) 调节活性接收元件数作为波幅 R_s 的函数, 以提供接收的动态孔径, 其中所述调节接收元件数包括补偿所述超声发射束在所述元件和所述间隔物之间的所述界面上的折射;

其中所述合计步骤包括合计来自所有所述活性接收元件的所述延迟回声信号, 以产生所述操纵的回声信号。

7. 如权利要求 5 所述的检测方法, 其中所述操纵包括以角度 θ 和 ϕ 沿所述所选射线路径操纵所述超声发射束。

8. 如权利要求 5 所述的检测方法, 其中所述对形成阵列的每个换能器分别加激励脉冲, 以产生沿所选的射线路径从阵列聚焦到所述元件的超声发射束的步骤包括对各所述换能器分别加激励脉冲, 以产生聚焦到所述元件的剪切波超声发射束。

9. 如权利要求 5 所述的检测方法, 其中所述对形成阵列的每个换能器分别加激励脉冲, 以产生沿所选的射线路径从阵列聚焦到所述元件的超声发射束的步骤包括对各所述换能器分别加激励脉冲, 以产生沿所述元件的所述表面聚焦的表面波超声发射束。

10. 一种沿元件的弯曲表面以及在材料速度为 v_w 的间隔物上检测

所述元件的方法，所述检测方法包括：

(a) 调节发射延迟波形，以补偿至少一个表面几何效应，所述延迟波形包括多个发射延迟，每个所述发射延迟包括一个静态表面几何项；

(b) 用所述发射延迟波形调制多个激励信号脉冲；

(c) 将所述调制激励信号脉冲加到形成阵列的多个换能器上，所述阵列由所述间隔物使之与所述元件分开，以产生沿所选路径从所述阵列聚焦到所述元件上的超声发射束；

(d) 利用所述换能器作为接收元件产生多个回声信号；

(e) 处理多个频道的所述回声信号，所述处理包括：

(i) 将延迟波形加到所述各频道的所述回声信号上，以产生多个延迟回声信号，以补偿至少一种表面几何效应，所述延迟波形包括多个接收延迟，每个接收延迟包括一个静态表面几何项；以及

(ii) 合计来自所述接收元件的所述延迟回声信号，以产生一个表面几何效应补偿回声信号。

一种检测元件的方法

技术领域

本发明一般涉及工业应用的超声成像方法，具体地说，是利用先进的相控阵超声系统检测在工业环境中发现的元件和结构（统称为元件）缺陷的改进的超声成像方法。

背景技术

工业应用中使用较轻的元件以及使用较长的工程设计寿命的工业元件都增加了对用于工业环境的增强的无损伤检测技术的需求。为满足当前的需求，就需要以更高的生产率检测更小的缺陷。医学成像工具，例如 GE LOGIQ 9 以及 GE LOGIQ Book 等，包括许多工业应用所需要的特性。

工业应用的常规超声检测系统或采用具有固定聚焦透镜的探头或采用有限能力的相控阵成像技术。其限制包括：如果是固定聚焦透镜系统就只能在场的聚焦深度内进行检测，或在相控阵系统的界限内产生聚焦束。一般，工业应用的常规超声系统或使用脉冲回声模式的单探头，或使用透射或投掷和捕捉（pitch and catch）模式的一对探头。这些探头或不聚焦，或用附加的透镜聚焦。要求在大深度范围内的高灵敏度工业检测通常伴随着使用适当的聚焦探头作多次扫描。这种检测由于需要多次扫描所以很费时。高灵敏度大深度范围的检测也用多区域法进行，此时使用多频道获取系统来同时监控来自多探头的数据，每个探头监控测试元件内一个单独的深度。工业应用的常规超声检测系统通常限于测试元件的单角度声束询问。成角度超声束的产生方法是：或者将探头附加在楔形材料上，

相对测试元件形成一个角度；或是将探头浸入具有一种材料速度的材料中，此速度与测试元件速度的不同足以引起声束的折射。

用于工业检测的常规相控阵成像超声系统通常限于声束的形成，更先进的这类系统可提供动态深度聚焦，但不能进行动态孔径定径。动态孔径定径对操纵声束性能是需要的。

因此需要提供一种工业应用的检测方法，它既可提供动态聚焦，又可提供动态孔径定径。该方法还需要能补偿在测试元件和间隔物（例如水间隔物）之间界面上的折射。也需要提供一种工业应用的检测方法，它能因测试元件/间隔物界面的折射而对操纵超声发射束进行补偿。此外，还需要校正因弯曲的测试元件/间隔物之间界面而引起的表面几何效应。为了增加生产率，也需要提供一种单次检测方法，这样不需要费时的移动探头就可检测工业元件。也需要一种可利用超声检测技术来检测通过管道的产品流质量的方法。为了减少检测时间，需要采用全阵列声透射。而且，对于工业应用，需要引入具有相应探头位置的图像与通常医学应用中使用的先进超声成像系统的同步。

发明内容

简要地说，按照本发明的一个实施例，提供了检测元件的一种方法。该检测方法包括激励形成阵列的多个换能器，以产生沿所选射线路径从阵列聚焦到元件上的超声发射束。阵列被具有材料速度 v_w 的间隔物与元件分开。该检测方法还包括利用换能器作为接收元件来产生多个回声信号，并在多个频道处理回声信号。处理包括将回声信号沿所选的射线路径动态地聚焦到元件中至少一个焦点 P 上。动态聚焦包括调节延迟波形以补偿在测试元件和间隔物之间界面上超声发射束的折射并将延迟波形加到各频道的回声信号上以产生多个延迟的回声信号。处理还包括将活性接收元件数作为波幅 R_s 的函数来调节，以提供接收时的动态孔径。调节接收元件数包括补偿在

元件和间隔物之间界面上超声发射束的折射。处理还包括从活性接收元件合计延迟的回声信号以产生一个聚焦的回声信号。

检测元件的另一个方法实施例包括对阵列中的每个换能器加单独的激励脉冲，产生沿所选的射线路径聚焦到元件的超声发射束。如上述，阵列被具有材料速度 v_w 的间隔物与元件分开。检测方法还包括沿所选的射线路径以相对表面法线的角度 θ 操纵超声发射束。操纵包括调节发射延迟波形，以补偿在测试元件和间隔物之间界面上超声发射束的折射并用发射延迟波形调制激励脉冲。检测方法还包括利用换能器作为接收元件产生多个回声信号并利用延迟波形处理多个频道中的回声信号，延迟波形包括多个接收延迟，每个接收延迟包括一个静态接收操纵项。回声信号处理包括调节每个静态接收操纵项以补偿在元件和间隔物界面上的超声发射束的折射，将延迟波形加到各频道中的回声信号上以产生多个延迟的回声信号，并合计来自接收元件的延迟回声信号以产生一个操纵的回声信号。

还提供了用于检测具有检测表面的元件的单次方法的实施例。单次检测方法包括：（a）定位换能器阵列，使之面对元件的检测表面，（2）激励换能器，产生沿所选射线路径从阵列聚焦到元件上的超声发射束，（c）利用换能器作为接收元件产生多个回声信号，（d）围绕一个轴改变阵列和元件的相对角度方向并重复步骤（b）和（c），以及（e）处理多个频道中的回声信号，以形成至少一个处理的回声信号。

还提供了检测通过管道的产品流的方法实施例。该检测方法包括激励形成阵列的多个换能器以传送超声能量到管道内，由反射的超声能量产生多个接收信号，并处理在多个频道中的接收信号。处理包括将接收信号与频率基准进行比较以确定对反射的超声能量所造成的多个频率偏移。

附图说明

参考附图阅读了以下详细说明后就能更好的理解本发明的这些以及其它特性，方面和优点，在所有附图中同样的符号代表同样的部件，附图包括：

图 1 是超声成像系统的方框图；

图 2 示出由间隔物分开的阵列和元件，元件和间隔物具有不同的材料速度，分别为 V_s 和 V_w ；

图 3 示出由换能器阵列和弯曲表面元件之间的间隔物引起的二次透镜效应；

图 4 示出单次检测方法；

图 5 示出元件的“缝合”图像，对材料速度与元件材料速度不同的间隔物有补偿或没有补偿；

图 6 示出透射检测方法；

图 7 示出常规的“投掷和捕捉”检测技术；

图 8 示出对投掷和捕捉都使用换能器阵列的改进的“投掷和捕捉”检测技术；

图 9 示出检测通过管道检测产品流的方法；

图 10 示出对阵列中第一组换能器的每一个（换能器）同时激励；

图 11 示出对投掷和捕捉使用单一换能器阵列的另一改进的“投掷和捕捉”检测技术。

具体实施方式

A. 动态孔径和动态聚焦

参阅图 1 和 2 说明检测元件 10 的一种方法。该方法包括激励组成阵列 14 的多个换能器 12，以产生沿所选射线路径 16 从阵列聚焦到元件 10 上的超声发射束，如图 1 所示，图 1 以方框图形式示出超声成像系统 100。每个换能器 12 都由，例如，发射器 28 所产生的脉冲激励。如图 2 所示，阵列 14 由材料速度为 C_w 的间隔物 18 与元件 10 分开。典型间隔物 18 包括水，其它液体，例如油和甘油，以及加

工的楔（靴）。靴标出的实例包括一些固体结构，加工成一侧与换能器表面的几何形状相配合，另一侧与元件的几何形状相配合。靴常用有机玻璃或透明合成树脂形成。该方法还包括利用换能器 12 作为接收元件 12 产生多个回声信号，并在多个频道 20 处理回声信号。例如，将反射回阵列 14 的超声能量由各换能器 12 转换成电信号（回声信号）并通过一组开关 32 单独加到接收器 30 上。对于图 1 所示的示范系统，发射器 28，接收器 30 以及开关 32 都由数字控制器 19 根据操作员输入的命令来控制。

处理包括将回声信号沿所选的射线路径 16 动态聚焦到元件 10 中至少一个焦点 P 上。动态聚焦包括调节有多个接收延迟的延迟波形（profile）以补偿在测试元件 10 和间隔物 18 间界面 22 上超声发射束的折射。典型的接收延迟包括时间和/或相位延迟，在图 1 中以 (T_k) 表示。如果是线性阵列 14，每个接收延迟包括一个在接收回声时变化的声束聚焦时间延迟，以提供在发出回声的波幅内所接收的超声能量的动态聚焦。正如在授于 O'Donnell 的美国专利号 5,235,982，题目为“Dynamic transmit focusing of a steered ultrasonic beam”中所述，（该专利已作为参考文献包括在本文内），延迟一般可用下式表示：

$$T_k = (k - (N-1)/2)^2 d^2 \cos^2 \theta / 2Rv$$

式中 R 为来自阵列 14 中心的焦点 P 的波幅，v 是元件 10 的材料速度， θ 是声束 16 相对表面法线 21 的入射角。但，该表达式并不补偿在元件/间隔物界面 22 的折射。为补偿在界面 22 上的折射，此表达式的典型调整为：

$$T_k = [k - (N-1)/2]^2 d^2 \cos^2 \theta / [2(R_w v_w + R_s v_s)]$$

式中 R_w 是声束在间隔物 18 中沿中心声束轴 16 延伸的长度， v_w 是在间隔物 18 中的材料速度， R_s 是声束在元件 10 中沿中心声束轴 16

延伸的长度, v_s 是在元件 10 中的材料速度。延迟波形加到各频道 20 的回声信号上, 产生多个延迟的回声信号。例如, 接收器 30 以一系列波幅 R_s (R_w 对于既定角 θ 为常数) 取样回声信号, 并提供适当的接收延迟以便沿取样声束动态聚焦到点 P。这样, 每次发射一个超声脉冲都能获得一系列回声信号样本, 它们代表着由位于沿超声接收声束的相应系列点 P 所反射的声波数量。

为了提供接收时的动态孔径 24, 处理还包括调节作为波幅 R_s 函数的 (R_w 对于既定入射角 θ 为常数) 活性接收元件的数量。此处所用的词语“活性接收元件” 12 是指其回声接收信号包括在总体聚焦回声信号内的换能器。示范的活性接收元件在图 2 中以阴影表示。相反, 非活性接收元件 12 的回声信号在计算聚焦回声信号时忽略不计。

调节接收元件 12 的数量包括对超声发射束在元件 10 和间隔物 18 之间界面 22 的折射加以补偿。例如, 对于入射到在元件而元件表面处材料速度没有显著变化的元件的超声束 16, 为了维持恒定的焦数 F , 孔径宽度 A 根据公式 $F=R/A$ 来调节。所以在此常规实例中, 随着波幅 R 的增加, A 也必须增加以维持恒定的焦数 F 。换句话说, 有更多的活性接收元件 12 的延迟回声信号对聚焦回声信号起作用。如上述, 超声发射束 16 在元件 10 和间隔物 18 之间的界面 22 处由于材料速度 v_w 和 v_s 不匹配而发生折射。为补偿该折射, 根据表达式 $F=[R_w + R_s (v_s / v_w)] / A$, 对孔径宽度 A 进行调节。

除了上述动态聚焦和动态孔径定径之外, 处理还包括将来自全部活性接收元件的延迟回声信号加以合计, 产生一个聚焦的回声信号。例如, 延迟回声信号在接收器 30 中加以合计, 形成聚焦的回声信号, 该聚焦的回声信号可以用来, 例如, 产生显示器 17 上图像中的一个像素或一个线条。

虽然对提供动态孔径定径和动态聚焦是以材料速度不匹配的由间隔物 18 分开的元件 10 和阵列 14 进行说明的, 但该组合也适用于

对元件 10 的接触超声检测, 例如作为工业检测应用。“接触”的意思是指阵列 14 被放置成直接和元件 10 相接触。(图 1 和 2 中未示出。)但, 如果没有隔离物 18, 元件 10 的表面 22 处就没有材料速度的不匹配, 因而元件 10 的表面 22 处也就没有折射。于是, 对于没有间隔物 18 的元件 10 的超声检测, 不作动态定孔径和聚焦校正以补偿在元件表面 22 处的折射。没有间隔物 18 的动态孔径定径和聚焦在例如授于 Charles E. Thomas 的美国专利号 4, 180, 790, 题目为“Dynamic Array Aperture and Focus Control for Ultrasonic Imaging Systems”中有说明, 该专利已作为参考包括在本文内。

有利的是, 动态孔径结合动态聚焦的使用能在整个检测深度内控制所需的聚焦特性。

最好阵列 14 含有大量的换能器 12, 例如 128 个或 1024 个, 以提供大的检测面积。要使用大量的换能器而不相应增加频道 20 的数量并减少所需的开关 32 的数量, 换能器 12 可以复用, 例如在授于 Thomas 等的美国专利号 5, 329, 930, 题目为“Phased Array Sector Scanner with Multiplexed Acoustic Transducer Elements”中所述, 该专利已作为参考包括在本文内。有利的是, 相对常规的工业超声检测方法而言, 独立使用 128 个换能器 12 或通过复用使用 1028 个换能器 12 便于提高生产率和检测的灵活性。

最好引导或操纵超声束将声束通过一组角度 θ 移动来扫描元件 10。按照一个更特别的实施例, 单独的激励信号脉冲加到各个换能器上, 用分别的电压驱动各换能器 12 (变迹法)。该实施例示于图 2, 此时检测方法还包括沿所选的射线路径 16 以相对表面法线 21 的角度 θ 来操纵超声发射束。操纵包括调节发射延迟波形以补偿超声发射束在界面 22 的折射。发射延迟波形包括一组发射延迟, 而且每个发射延迟包括一个静态操纵项。示范的发射延迟包括时间和/或相位延迟, 在图 1 中也用 (T_k) 表示。操纵还包括用发射延迟波形调制激励信号脉冲。例如, 发射器 28 对加到序列换能器元件 12 上的每

个信号脉冲都加一个发射延迟。如果发射延迟为零 ($T_k = 0$)，则所有换能器元件 12 同时受激，所得的超声束被导向垂直于间隔物 18 和元件 10 之间的界面 22。为操纵超声束，从阵列 14 的一端 ($k=1$) 到另一端 ($k=N$) 加到第 k 个信号脉冲的发射延迟 T_k 可以表示为：

$$T_k(\theta) = (d/v_w) \sin \theta (k-1)$$

式中 d 为换能器元件 12 之间的距离，如图 1 所示。该发射延迟波形 (T_k) 补偿了在界面 22 上受控超声束的折射。除了操纵超声束的发射，该检测方法还包括形成受控的聚焦回声信号，方法是将延迟波形加到各频道的回声信号上来形成延迟的回声信号（操纵接收）。在此操纵实施例中，延迟波形包括一组接收延迟，每个接收延迟包括一个静态接收操纵项。对每个静态接收操纵项加以调节以补偿在界面的折射。每个静态接收操纵项在接收时是和上述发射延迟同样的延迟 $T_k(\theta)$ 。虽然只示出了一个角度 θ ，本专业的技术人员能了解也可沿相对共用轴 21 的多个角度 (θ, ψ) 来操纵超声束。本实施例包括单角度 (θ) 和多角度 (θ, ψ) 操纵。

为了在各种深度 R_i 扫描元件 10，使用了多次发射。对于检测方法的该具体实施例，在每个连续激励时间间隔 t_i 将各信号脉冲加到各换能器 12 上，对每个连续激励时间间隔 t_i 产生回声信号。例如，在第一时间间隔 t_1 ，分别驱动每个换能器 12，产生第一组回声信号。在第二时间间隔 t_2 ，分别驱动每个换能器 12，产生第二组回声信号，依此类推。在此实施例中，在每个连续第 i 个激励时间间隔 t_i ，回声信号沿所选的射线路径 16 动态聚焦到不同波幅 R_i 的多个焦点 P_i 。在焦点 P_i 的动态聚焦包括调节包含多个接收延迟 T_{ki} 的各延迟波形 (T_{ki})，以补偿超声发射束在元件 10 和间隔物 18 之间界面 22 上的折射。这些调节的进行如上所述。除了对每个时间间隔 t_i 动态聚焦，对于本具体实施例的检测方法，对每个时间间隔 t_i ，进行动态定孔径。具体地说，对每个连续激励时间间隔 t_i 调节作为波幅 R_i 函数的

活性接收元件的数量，以补偿超声发射束在元件 10 和间隔物 18 之间界面 22 上的折射。为了对每个波幅 R_i 产生一个回声聚焦信号，对每个连续激励时间间隔，将来自所有活性接收元件的延迟回声信号例如在接收器 30 中加以合计。

为显示所得的图像数据，将来自多个深度的图像数据组合（缝合）成单一帧（图像）是有用的。采用显示系统 17 显示该单一帧。图像缝合在业界已知，此处不再赘述。但应指出当通过间隔物 18 形成图像时，常规医学超声成像系统会由于间隔物 18 (V_w) 和元件 10 (V_s) 之间的材料速度差而使图像失真，该失真在图 5 中示出。如图所示，未经补偿的图像使对应于间隔物 18 的图像部分失真 V_s/V_w 。为了补偿界面 22 上材料速度的不匹配，按照一个具体的实施例，对应于间隔物 18 的图像部分减少了 V_s/V_w 。经补偿的图像也示于图 5。另一种校正是去除对应于间隔物 18 的图像部分。例如用加在显示系统 17 上的成像软件，就可以进行以上任一种校正。

B. 操纵

本发明的另一种方法实施例也结合图 1 和图 2 加以说明。检测元件 10 的检测方法包括对形成阵列 14 的各个换能器 12 分别加激励脉冲，产生沿所选射线路径 16 从阵列 14 聚焦到元件 10 的超声发射束。如图 2 所示，阵列 14 用材料速度为 c_w 的间隔物 18 与元件 10 分开。该方法还包括以相对表面法线 21 的角度 θ 沿所选射线路径操纵超声发射束。操纵包括调节发射延迟波形 (T_k) 以补偿超声发射束在界面 22 的折射，如上所述。操纵还包括用发射延迟波形 (T_k) 调制激励脉冲，如上所述。检测方法还包括用换能器 12 作为接收元件 12 产生多个回声信号，并利用延迟波形处理多个频道 20 的回声信号。延迟波形包括多个接收延迟，每个接收延迟具有一个静态接收操纵项，如上所述。处理包括调节每个静态接收操纵项以补偿在元件 10 和间隔物 18 之间界面 22 上超声发射束的折射，将延迟波形 (T_k) 加

到各频道 20 中的回声信号上以产生多个延迟的回声信号，并合计来自接收元件 12 的延迟回声信号以产生一个操纵的回声信号。如上对第一实施例所述，回声信号由每个换能器 12 产生并通过一组开关 32 分别加到接收器 30 上。每个接收延迟 $T_k(\theta)$ 加到各第 k 个换能器 12 上的回声信号以形成各延迟回声信号。延迟回声信号在接收器 30 中合计。

除了操纵超声束外，提供动态孔径定径对检测工业元件也是有用的。因而，对于更特别的实施例，处理步骤还包括将活性接收元件 12 数量作为波幅 R 的函数来调节，以提供接收时的动态孔径 24。如上述，活性接收元件 12 是其回声接收信号包括在总体操纵回声信号内的换能器 12。相反，非活性接收元件 12 的回声信号在计算操纵回声信号时忽略不计。由于界面 22 上材料速度的不匹配，接收元件 12 数量的调节包括补偿界面 22 上超声发射束的折射。例如，根据表达式 $F = [R_w + R_s (v_s / v_w)] / A$ ，对孔径宽度 A 进行调节，如上所述。如前指出， R_w 是声束在间隔物 18 中沿中心声束轴 16 延伸的长度， C_w 是在间隔物 18 中的材料速度， R_s 是声束在元件 10 中沿中心声束轴 16 延伸的长度， v_s 是在元件 10 中的材料速度。 R_w 和 R_s 在图 2 中有示范表示。对于此操纵加动态孔径的实施例，合计步骤包括将所有活性接收元件 12 的延迟回声信号加以合计，产生受操纵的回声信号。虽然只示出了一个角度 (θ) ，本专业的技术人员能认识到也可沿相对多个角度 (θ, ψ) 来操纵超声束。本实施例包括单角度 (θ) 和多角度 (θ, ψ) 操纵。

除了操纵纵向波，也需要操纵其它波型来检测工业元件。工业元件 10，诸如锻件、坯料、焊点（焊件）、及其它固体，支持剪切波和表面波的传播。简要的说，声波具有三种主要的传播模式：纵向、剪切和表面波。另外的传播模式包括拉姆波（Lamb wave），史通利波（Stonely wave），和延伸波（extensional wave）。剪切波的速度 V_{SH} 大约为纵向波速度 V_L 的一半（ $V_{SH} \sim 0.5 V_L$ ），表面波的速

度 V_{SU} 大约为剪切波速度的 0.9 倍 ($V_{SU} \sim 0.9 V_{SH}$)。如以上对图 2 的讨论, 以角度 θ 入射到间隔物 18/元件 10 的界面 22 (例如水/钢界面 22) 的超声束在元件中以折射角 ϕ 折射, 入射和折射角之间的关系由斯涅耳 (Snell) 定律决定: $\sin \theta / \sin \phi = V_w / V_s$ 。更特别的是, 这三种模式具有一个特殊的折射角 ϕ 。即, 纵向波以折射角 ϕ_L 折射, 由 $\sin \theta / \sin \phi_L = V_w / V_L$ 决定; 剪切波以折射角 ϕ_{SH} 折射, 由 $\sin \theta / \sin \phi_{SH} = V_w / V_{SH}$ 决定; 表面波以折射角 ϕ_{SU} 折射, 由 $\sin \theta / \sin \phi_{SU} = V_w / V_{SU}$ 决定。随着入射角 θ 的增加, 折射角 ϕ_L 和 ϕ_{SH} 也增加, 直到达到各自的临界角 $\phi_L = 90^\circ$ 和 $\phi_{SH} = 90^\circ$, 在此点纵向波和剪切波不再在元件 10 中传播。入射角 θ 相应的临界值由斯涅耳定律决定并对纵向和剪切波型各不相同, 这是因为这两种波型具有不同的速度 V_L 和 V_{SH} 。

如上述, 工业元件 10 支持剪切和表面波的传播。所以, 对于本检测方法的另一具体实施例, 单独的激励脉冲加到每个换能器 12 上, 产生聚焦到元件 10 中的剪切波超声发射束。有利的是, 在同一频率下剪切波的波长 λ_{SH} 大约等于纵向波波长 λ_L 的一半, 就可对缺陷有更大的分辨率。此外, 如果入射角 θ 超过第一临界角 ϕ_L , 纵向波就不在元件 10 中传播, 使用剪切波就可在所需角度 θ 检测元件, 而没有错误的纵向波信号干扰超声检测。同理, 对于本检测方法的另一具体实施例, 单独的激励脉冲加到每个换能器 12 上, 产生沿元件表面 22 的表面波超声发射束。有利的是, 用表面波对工业元件作超声检测便于检测元件表面 22, 包括探测元件 10 表面 22 上的裂纹 (表面裂纹)。常规的超声检测方法采用纵向波, 因此是一种容量检测工具。表面波波型增强了表面裂纹的探测和检测能力。

本专业的技术人员将认识到, 这里所描述的其他检测技术也有利地结合了这些剪切和表面波波形检测。

C. 表面几何形状

现参阅图 1 和图 3 说明沿元件 10 的弯曲表面 22 (例如锥形、圆柱形或复合半径表面 22) 以及在材料速度为 c_w 的隔离物 18 上检测元件 10 的方法。由于隔离物 18 的材料速度 V_w 和元件 10 的材料速度 V_s 不匹配, 弯曲的表面 22 通过折射产生二次透镜效应, 隔离物 18 起着像透镜的作用, 改变了超声束的特性。该二次透镜效应在图 3 中示出, 它使所得图像的质量下降。该检测方法实施例校正了这种二次透镜效应, 并包括调节发射延迟波形以补偿至少一个表面几何形状的效应。发射延迟波形包括一组发射延迟 T_k , 每个发射延迟包括一个静态表面几何项, 可以用费尔马 (Fermat) 方程计算从同相到达所需焦点 P 的每个元件 12 获得能量所需的延迟来确定这一项。该方法还包括用发射延迟波形 (T_k) 调制多个激励信号脉冲。更具体地说, 发射器 28 从阵列 14 的一端 ($k=1$) 到另一端 ($k=N$) 对各第 k 个激励信号脉冲加每个发射延迟 T_k 。该方法还包括将各个已调制激励信号脉冲加到形成阵列 14 的各换能器 12 上。阵列 14 与元件 10 分开相距 R_w 。这样, 超声发射束的产生就可沿所选射线路径 16 从阵列 14 聚焦到元件 10 中。通过静态表面几何项, 加上发射延迟 T_k 校正了发射的二次透镜效应。检测方法还包括利用换能器 12 作为接收元件 12 产生多个回声信号, 并处理在多个频道 20 中的回声信号。

除了校正了发射的二次透镜效应外, 该检测方法还校正了接收的二次透镜效应。因此, 回声信号处理包括对在各频道 20 中的回声信号加延迟波形, 以产生多个延迟回声信号, 用以波补偿至少一个表面几何效应。与发射延迟波形类似, 该延迟波形包括一组接收延迟 (T_k), 每个接收延迟包括一个静态表面几何项, 可以用费尔马方程计算从同相到达所需焦点 P 的每个元件 12 获得能量所需的延迟来确定这一项。更具体地说, 静态表面几何项对发射和接收是相同的。更具体地说, 接收延迟 T_k 是在数字控制器 19 的控制下由接收器 30 从各第 k 个接收元件 12 加到回声信号上。

处理回声信号还包括合计来自接收元件 12 的延迟回声信号, 产

生一个表面几何效应补偿回声信号。回声信号可以例如在控制器 19 的控制下在接收器 30 中合计。

D. 单次检测

工业应用通常涉及检测多种元件 10 的检测，例如坯件和锻件。因此，有效的检测过程对减少检测时间和成本是至关重要的。为了增强检测效率，提供了一种单次检测方法实施例，用于检测具有检测表面 22 的元件 10。单次检测方法结合图 4 进行说明，包括定位面对元件 10 的检测表面 22 的换能器 12 的阵列 14，例如图 4 所示。阵列 14 可以直接或经过间隔物 18 面对检测表面 22。此外，阵列 14 可以径向或轴向与元件 10 对准。图 4 中，标有“R”和“A”的阵列 14 分别径向或轴向与元件 10 对准。此外，也可以将阵列 14 形成为沿元件 10 既径向又轴向地延伸，例如安排成直角（未示出）。单次检测方法还包括激励换能器 12，产生沿所选射线路径 16 从阵列 14 聚焦到元件 10 上的超声发射束。利用换能器 12 作为接收元件 12 来产生多个回声信号。单次检测方法还包括围绕轴 26 改变阵列和元件的相对角度定向，重复进行激励换能器 12 的步骤以及产生多个回声信号。阵列 14 和元件 10 的相对角度定向可以用围绕轴 26 旋转阵列 14 或旋转元件 10 的方法来改变。回声信号在多个频道 20 中处理，形成至少一个已处理的回声信号。虽然处理步骤是按围绕轴 26 旋转阵列 14 来列出，但应理解该顺序包括了序列处理和集中处理。对于顺序处理，先适当定位阵列 14，激励换能器 12，产生一组回声信号并加以处理。然后旋转阵列 14，重复激励，产生和处理步骤，得到第二组回声信号，等等。同理，对于集中处理，阵列 14 围绕轴 26 的每一次角度增量产生数组回声信号，然后处理这些组的回声信号。得到的已处理回声信号或作为单独的帧显示，或缝合在一起，形成元件的单一图像。

有利的是，用围绕轴 26 的多个角度增量检测元件 10，可以避免

阵列 14 在元件表面 22 上的平移运动，增加了检测过程的整体效率。根据单次检测方法的一个具体实施例，对应于元件 10 的最终图像的已处理回声信号是这样获得的：即阵列 14 和元件 10 的相对定向仅限于围绕轴 26 旋转。“限于”的意思是最终图像是在阵列 14（或元件 10）围绕轴 26 的一个或多个旋转定向时获得，没有阵列 14 相对元件 10 的其它定位。例如，对此实施例，不需要阵列 14 相对元件 10 作平移运动。最好，对此实施例，阵列 14 足够大，以能延伸到元件 10 上所感兴趣的面积，这样围绕轴 26 旋转阵列 14 就能扫描到整个感兴趣的面积。例如，可以使用单个的大阵列或用数个较小的阵列组合在一起。有利的是，该实施例避免了费时又麻烦的阵列 14 或元件 10 的重新定位。

按照适用于具有弯曲检测表面 22 的元件 10 的更具体的实施例（图 4 中未示出），定位步骤还包括或直接或通过间隔物 18 使阵列 14 的轮廓与弯曲的检测表面 22 相仿。

E. 透射

除了单射线检测外，也可以将元件 10 定位在发射阵列 14 和接收阵列 14 之间来检测元件 10，如图 6 所示。常规是使用单超声探头（未示出）通过透射超声检测来检测元件 10。这些探头要移动数次来扫描元件。有利的是，利用阵列 14 作发射和接收便于电子扫描元件 10，从而不需要检测设备在元件 10 上作费时的机械运动。

F. 投掷和捕捉

另一种常规的检测技术示于图 7。如图所示，超声发射束由第一探头 42 “投掷”到检测元件 10 中，并被第二探头 42 “捕捉”。该技术用于裂隙 - 尖端的折射探测。图示结构用于探测元件 10 中裂隙 40 的底部和尖端，而且根据此信息，确定裂隙 40 的大小。但此技术要求对探头 42 的机械操纵，因此比较慢也麻烦。用阵列 14 来代替

各单个探头 42 改进了参阅图 7 所述的技术。图 8 和 11 示出一种改进的“投掷和捕捉”检测方法，在该方法中用单一阵列 14 既作投掷又作捕捉。更具体地说，阵列 14 的至少一个换能器 12 子集受激来发射超声束，且至少一个换能器 12 子集接收反射的超声能量。各发射和接收换能器 12 子集在图 8 和 11 中以“T”和“R”表示。如图 8 所示，一个换能器 12 子集用作发射，一个子集用作接收。对于图 11 的实施例，一个换能器 12 子集用作发射，两个子集用作接收。这种单射线投掷和捕捉实施例不限于图 8 和 11 所示的具体配置，而可包含单阵列 14 的任何安排，其中至少一组换能器形成发射的声束，至少另一组换能器 12 接收来自测试元件 10 的反射声束。

G. 多普勒

已知用超声测量血流，最好能将为监控血流所开发的超声技术延伸到工业应用，例如通过导管或管道（例如化学供料管）或通过仪器管道（已用的例如，用于热交换流）监控产品流。工业应用中的管道、导管及产品在其中流动的其它容器在此统称为“管道”。需要对通过管道的产品流进行检测，是因为在管道壁上的沉积（或积聚）会限制和/或扰乱产品流通过管道。此外，热交换器会阻塞或卡住，引起流限制。超声最好能提供非破坏性，非侵入性的检测方法，以检测和监控这类问题。

结合图 9 说明检测通过管道 50 的产品流的方法。该方法包括激励形成阵列 14 的多个换能器 12，以传送超声能量入管道 50。例如，由发射器 28 在控制器 19 的控制下通过 T/R（发射/接收）开关 32 来激励换能器 12。应注意，虽然阵列 14 在图 9 中示为与管道 50 相接触，阵列 14 和管道 50 也可以用一种间隔物分开，例如水、其它适宜于将超声能量耦合到管道 50 和阵列 14 的液体，或一种靴（未示出）。该方法还包括从反射的超声能量产生多个接收信号，并处理多个频道 20 中的接收信号。对于图 9 所示的实施例，接收信号由换

能器 12 作为接收元件 12 产生。处理包括将接收信号与频率基准进行比较,以确定对反射的超声能量所造成的多个频率偏移。处理例如由受数字控制器 19 控制的接收器 30 进行。根据更具体的实施例,处理还包括产生通过管道 50 的产品流的图像。对于图 9 的实施例,利用已知的成像软件(未示出)将图像显示在显示器 17 上。将通过管道的产品流成像,就可探测和监控管道壁上的沉积所引起的流限制。

对于另一个实施例,检测方法还包括将频率偏移转换成声音输出。例如利用已知的声频软件(未示出),例如在 GE LOGIQ 9 中所提供的,将频率偏移转换成音频输出,再通过至少一个扬声器 44 发射出去。将频率偏移转换成音频输出为操作员检测通过管道的产品流的问题提供了一种快速手段。

H. 全阵列声透射

为增强对工业元件超声检测的信噪比,另一种工业超声检测方法包括全阵列声透射。参阅图 10 来说明检测元件 10 的这种方法。该检测方法包括同时激励阵列 14 中的第一组换能器 12,如图 10 所示。示范的第一组换能器 12 用有阴影的换能器 12 表示。信噪比随第一组中包含的换能器 12 的数量而增加。根据一个具体的实施例,第一组换能器 12 包括形成阵列 14 的所有换能器。换句话说,对此具体的实施例,形成阵列 14 的每个换能器 12 同时被激励,从而提供全阵列声透射。第一组换能器由(例如)发射器 28 在数字控制器 19 的控制下激励。

该检测方法还包括用阵列中的第二组换能器 12 作为接收元件 12 从元件 10 接收一组反散射的超声信号,并利用接收元件 12 从反散射超声信号产生多个接收信号。根据一个具体的实施例,第二组换能器 12 包括形成阵列 14 的所有换能器。该方法还包括处理接收信号以形成一组声束形式图像数据。接收信号可由(例如)接收器 30

在数字控制器 19 的控制下进行处理。这些处理步骤是已知的，示范的处理步骤在授予 Chiao 等人的美国专利号 6, 048, 315，题目为“Method and Apparatus for Ultrasonic Synthetic transmit Aperture Imaging Using Orthogonal Complementary Codes”有所说明，此专利已作为参考包括在本文内。

通过同时激励第一组换能器 12，元件 10 的整个感兴趣的区域就可有声穿透，而不需要靠连续激励形成阵列 14 的换能器 12 来电子扫描元件 10。这样，相对连续驱动形成检测阵列 14 的换能器 12 而言，图 10 所示的方法增加了获得检测数据的速度。成像时间（故而检测时间）的相应减少增加了生产率，这在工业环境中特别有利。应用此方法实施例来检测坏件也很有利，即驱动第一组换能器 12 一次，坏件 10 就完全有声透射，相对连续激活换能器 12 来说减少了检测时间。

I. 图像位置

医学应用的超声检测系统很先进，而且提供了许多工业应用所需的特性，例如动态聚焦，动态孔径，操纵，以及多普勒频率偏移。医学应用的先进超声检测系统的实例包括 GE LOGIQ 9 和 GE LOGIQ Book。但，医学应用的超声检测系统通常采用基于任意定时基准的预定义扫描速率，以触发一个新图象形成序列。“任意”的意思是指定时基准不与阵列位置相联系。但对于工业应用，最好能识别获得既定帧（图象）的位置，以便在检测后充分表征元件 10。所以，上述检测方法最好能获得与阵列 14 和正被检测的元件之间的相对位置同步的图像（帧）。更具体的说，所采用的定时基准应选择为与阵列 14 和元件 10 的相对位置同步。例如可以用编码器来跟踪运动的轴线位置。常用的脉冲/位置同步技术称为“位置脉冲”（pulse on position”，在机械系统（此处为阵列 14）到达下一个数据获取位置时加一个 TTL 电平脉冲。

如上述，许多医学应用的许多超声检测系统，例如 GE LOGIQ 9 和 GE LOGIQ Book，一般不使图像与获取此图像的位置同步。所以，对于本发明的另一个实施例，将超声检测系统，例如 GE LOGIQ 9 和 GE LOGIQ Book，更改为获取与阵列 14 的机械位置同步的数据。更具体地说，定时输入与输出被改为与位置相关，对医学应用的超声检测系统的示范定时输入包括用于 EKG 输入或用于脚踏开关（未示出）的电路。

虽然此文仅示出并说明了本发明的某些特性，本专业的技术人员可以作许多更改和变动。所以应理解所附权利要求应覆盖符合本发明真正精神的所有这些更改和变动。

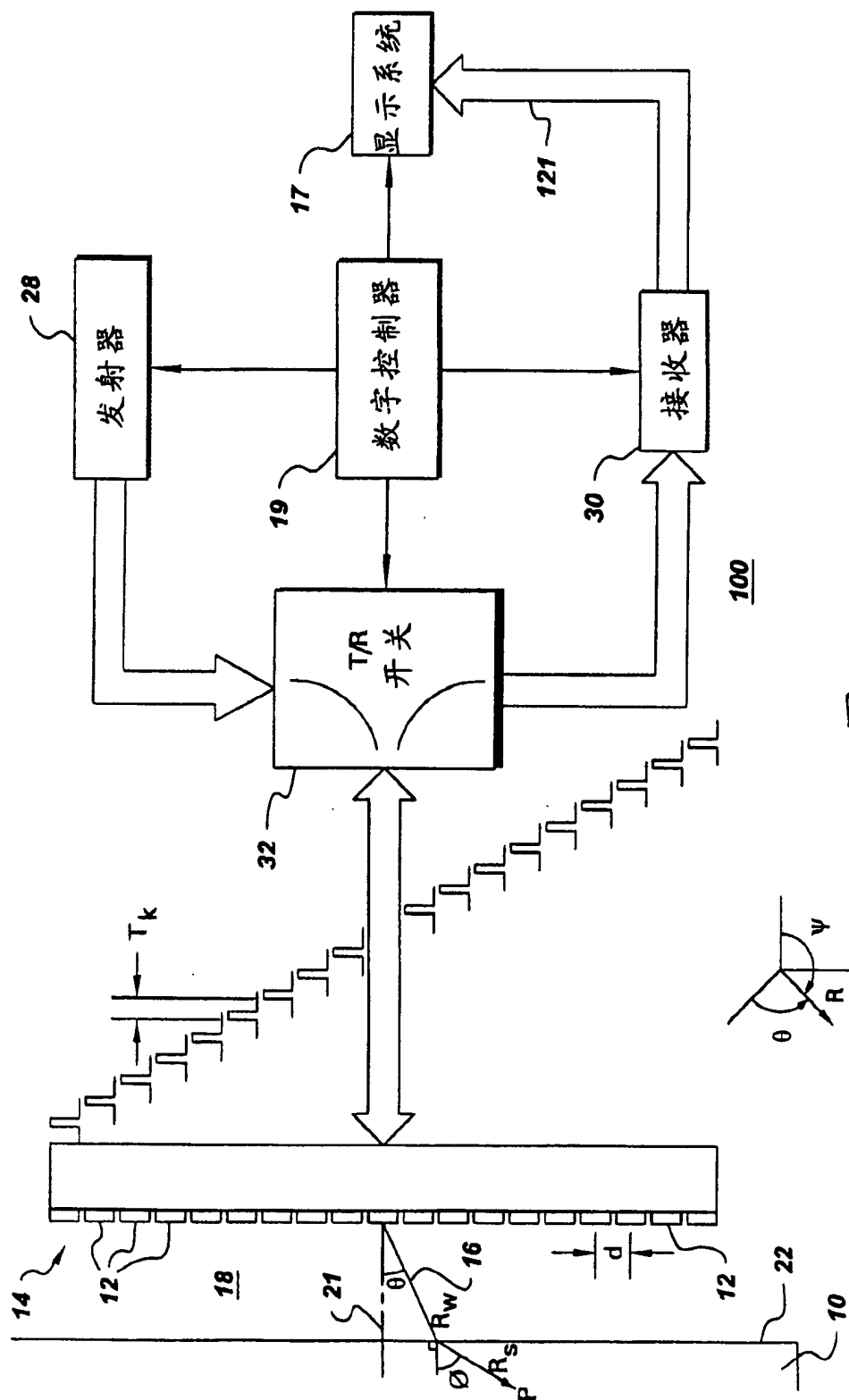


图 1

图 2

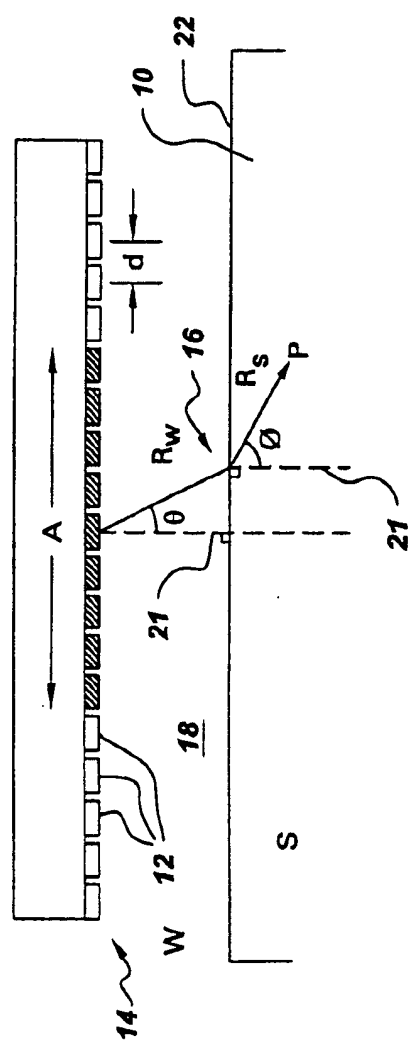


图 3

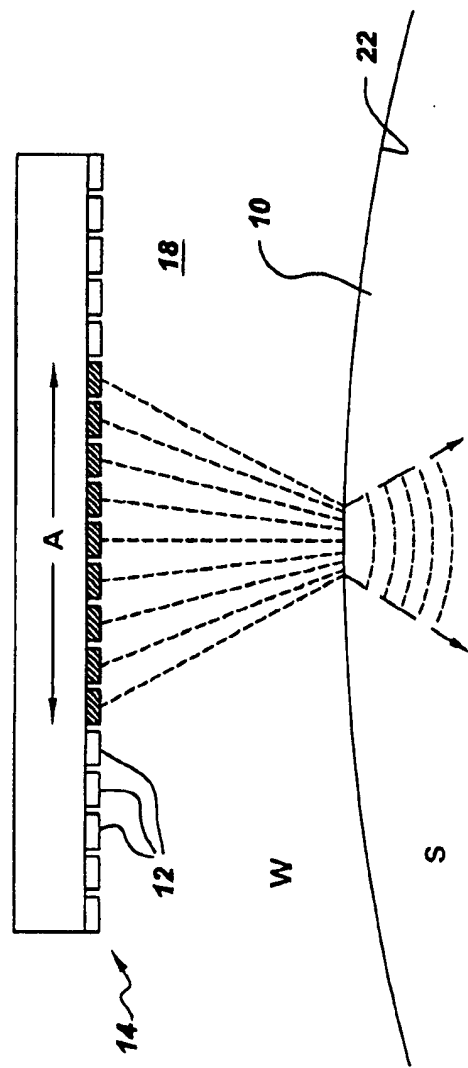


图 4

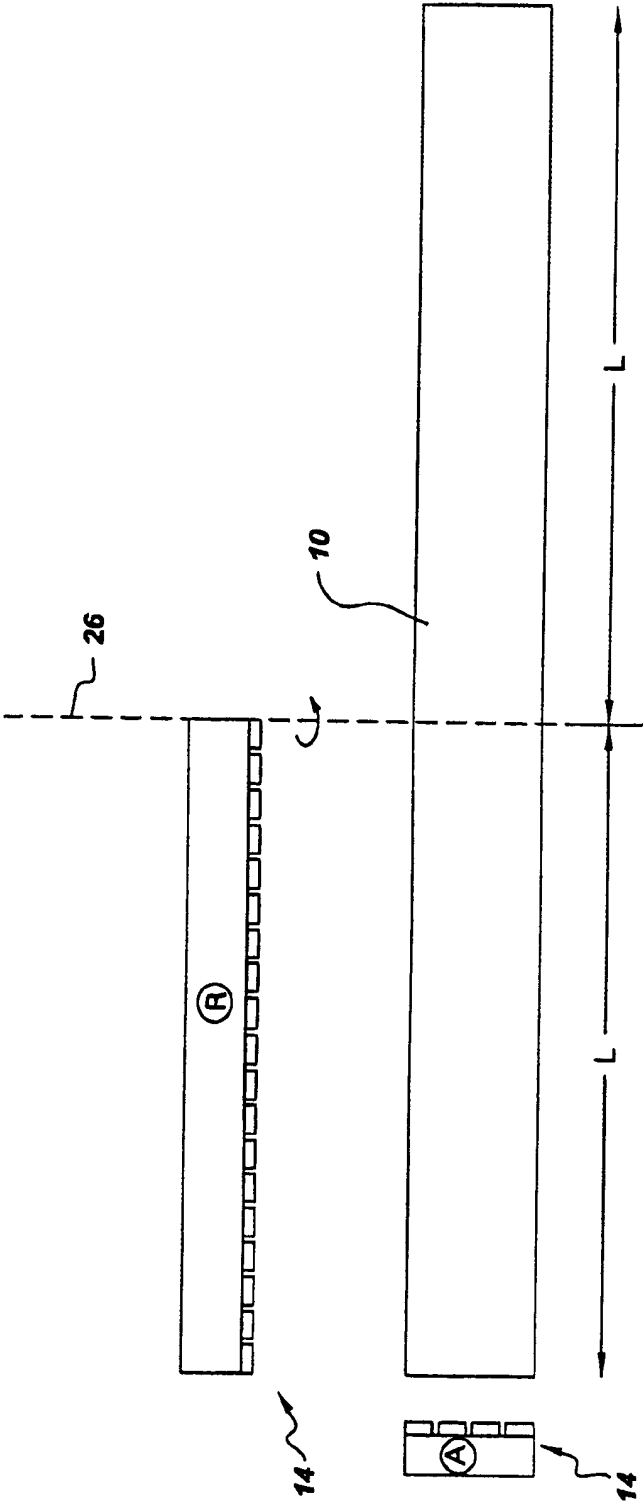
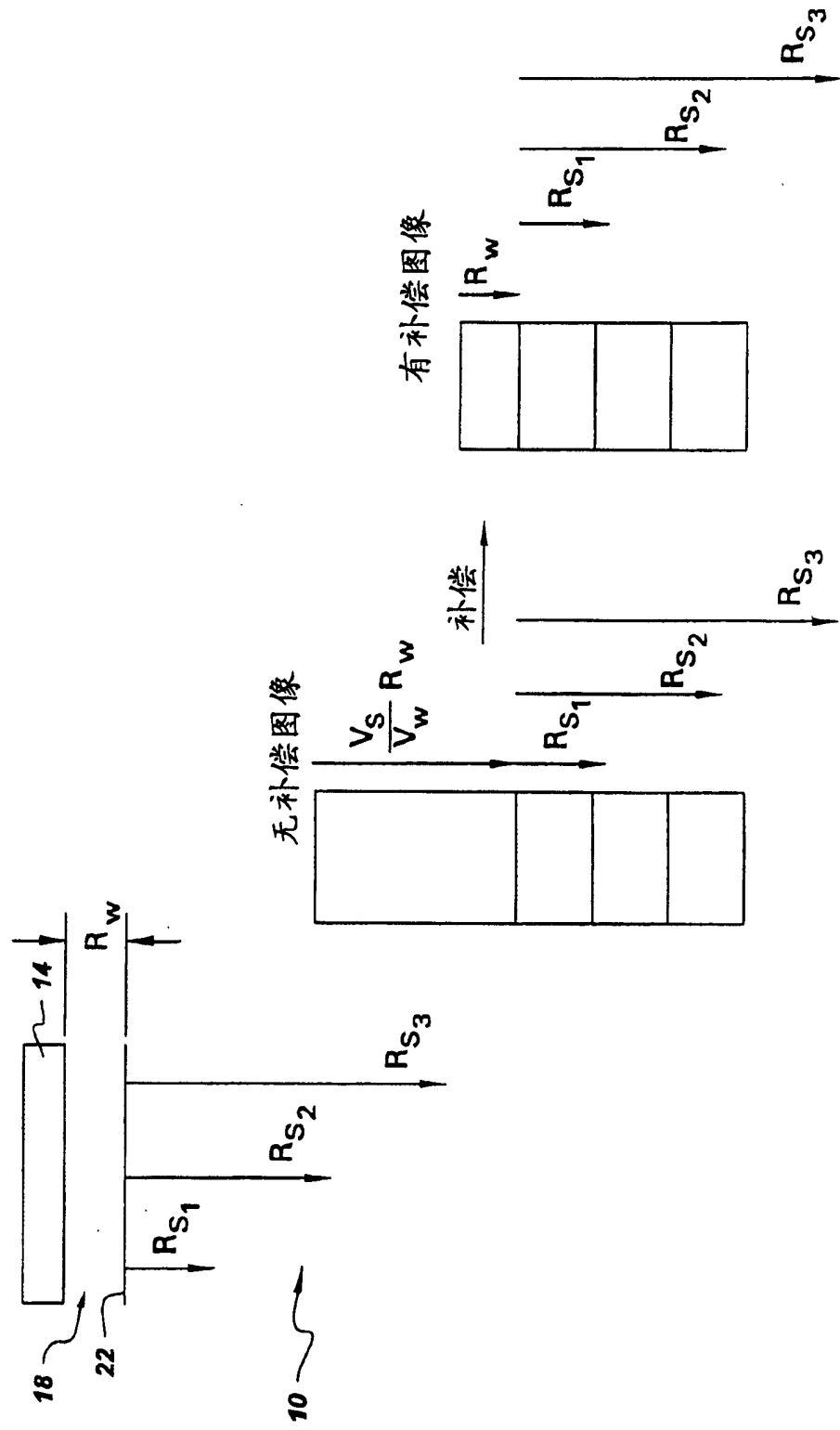


图 5



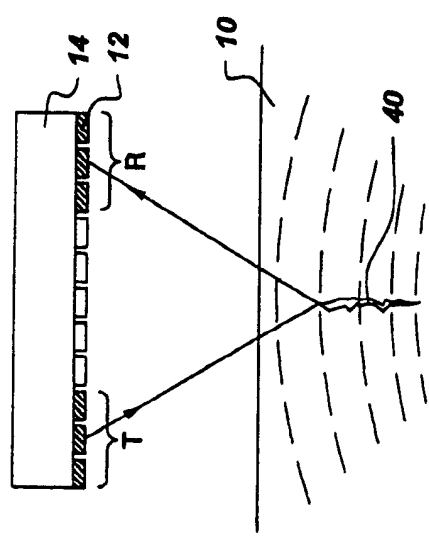
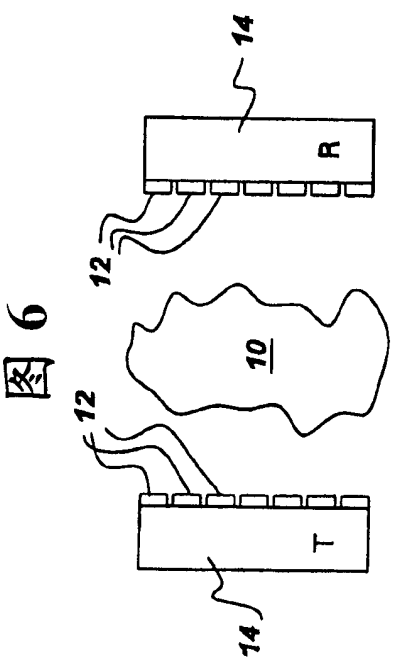
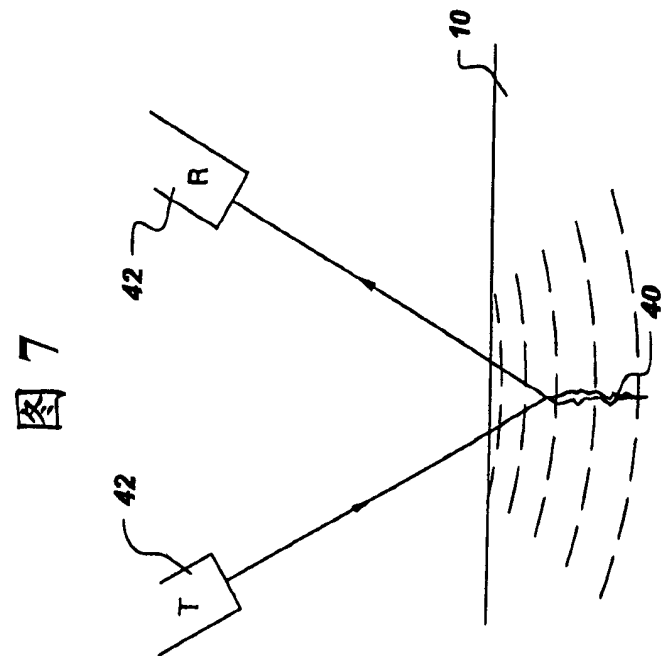
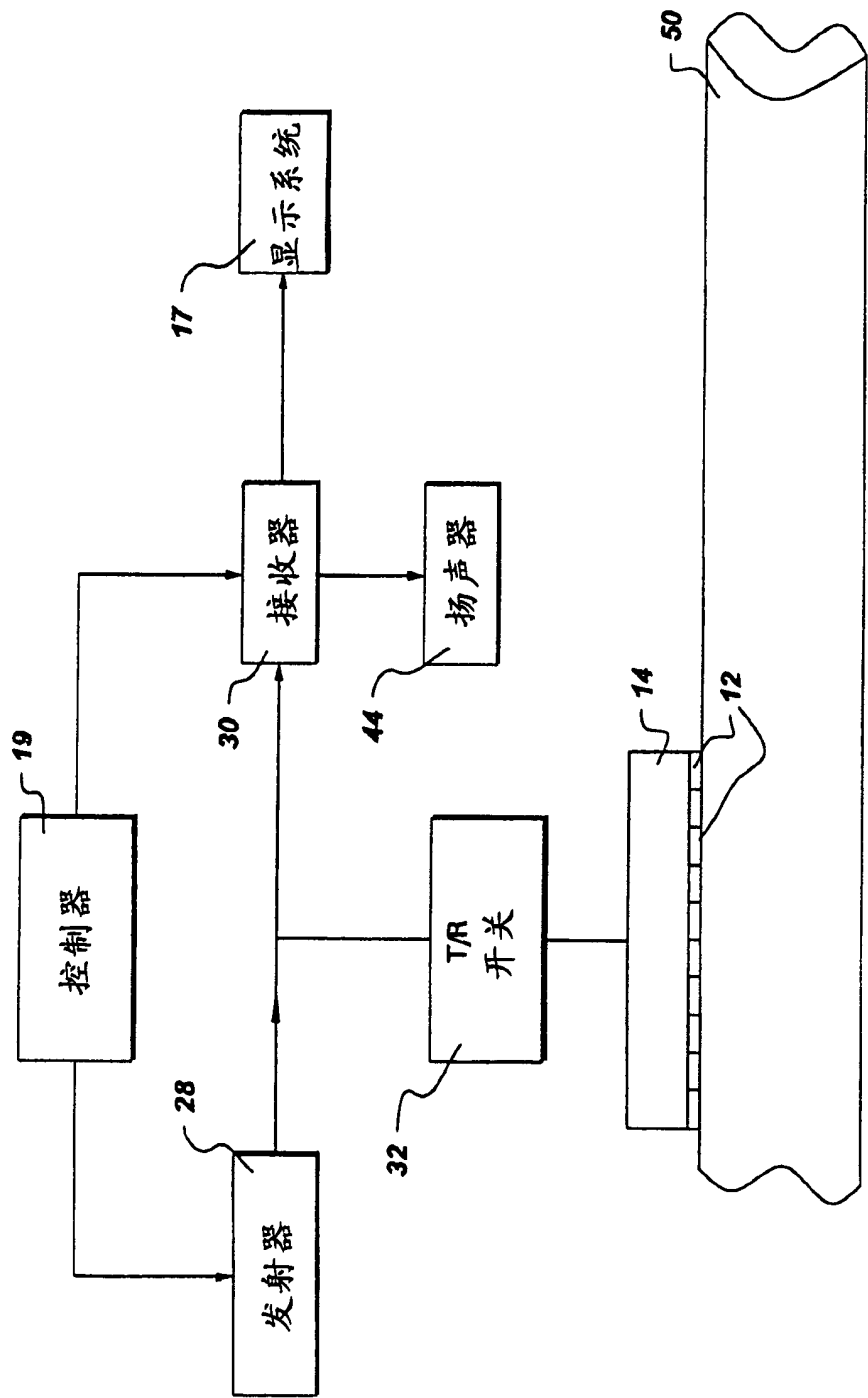


图 8

图 9



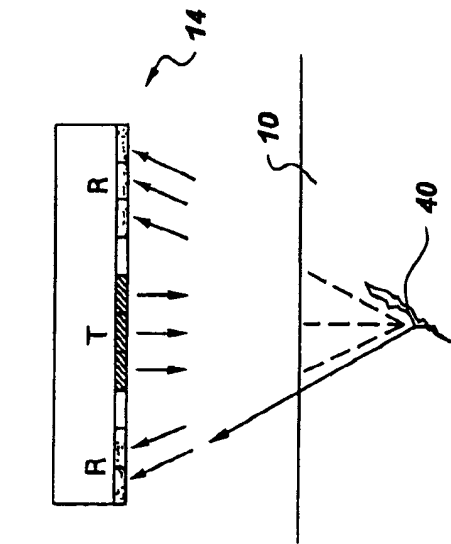


图 10

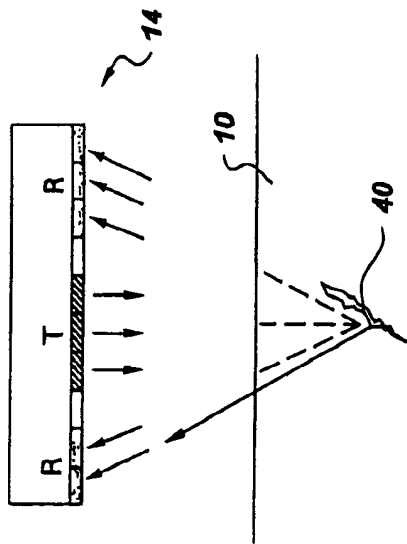


图 11