



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102539532 A

(43) 申请公布日 2012. 07. 04

(21) 申请号 201110458080. 1

(22) 申请日 2011. 12. 31

(71) 申请人 中南大学

地址 410083 湖南省长沙市岳麓区麓山南路
932 号

(72) 发明人 李雄兵 胡宏伟 倪培君 徐向群
杨岳 张维国 张杨

(74) 专利代理机构 长沙市融智专利事务所
43114

代理人 欧阳迪奇

(51) Int. Cl.

G01N 29/06 (2006. 01)

G01N 29/44 (2006. 01)

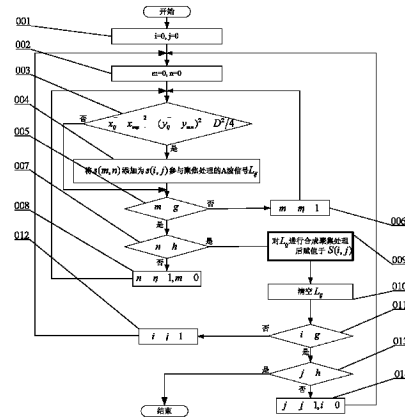
权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 6 页

(54) 发明名称

一种基于二维邻域合成孔径聚焦的超声 C 扫描成像方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于二维邻域合成孔径聚焦的超声 C 扫描成像方法,包括探头声束扩散角的可视化、建立聚焦处理点邻域的数学模型、采集超声 A 波信号、合成聚焦处理超声 A 波信号、对缺陷进行超声 C 扫描成像五个步骤,本发明的技术效果在于,通过以目标点为中心的二维邻域进行聚焦,同时考虑探头的晶片直径、近场长度、声束扩散角来决定合成孔径聚焦处理点的邻域,使扫描结果相比现有的 SAFT 方法更加精确,有效地抑制声束扩散角对超声无损检测的不利影响,从而提高了超声 C 扫描成像的精度。



1. 一种基于二维邻域合成孔径聚焦的超声 C 扫描成像方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一、将一个支撑杆固定在水槽底座上,支撑杆顶端固定一个直径为 6mm-10mm 光滑金属小球,调节连接于五自由度运动台架上的圆柱形的超声探头位置,使超声探头处于小球上方且超声探头的轴线与水平面垂直,然后控制超声探头在轴线保持与水平面垂直的情况下,沿小球的同一条水平方向的径线在小球上方作同一竖直平面内的弓字形扫描,采集多个采样点处声波遇小球表面所产生的回波信号,并提取该信号最大幅值,再通过将该信号最大幅值映射成颜色 RGB(r, g, b) 三参数相等的灰度值的方法对探头声场进行可视化,即获得能表示探头声场的超声 C 扫描图像;

步骤二、针对步骤一所得到的超声 C 扫描图像,运用半波法选取超声扫描图像二值化的阈值,使探头的声场图像从 C 扫描图像的背景中分离出来,然后采用数字图像处理方法提取出声场图像的边缘及声束中心线,在此基础上计算出声束扩散角 ϕ 、近场区长度 z,假设探头晶片直径为 d,晶片中心点与目标点之间的水声程为 s,目标点所需的聚焦邻域的圆面直径为 D,建立聚焦处理点邻域的数学模型为

$$D = d + 2(s - z) \tan \frac{\phi}{2} \quad (1);$$

步骤三、将待测工件进行离散,分成 g 行 h 列,行与列的交点定为 A 波信号的采集位置,第 i 行 j 列交点处所采集的超声 A 波信号表示为 $s(i, j) = \{x_{ij}, y_{ij}, q_{ij}(k) | k = 1, 2, \dots, r\}$,其中假设 i, j 分别代表行与列的序号, x_{ij}, y_{ij} 代表该采集位置的坐标值, $q_{ij}(k)$ 表示该 A 波信号采样点序列中的第 k 个采样点幅值, r 表示采样点长度;

步骤四、将超声 A 波信号进行合成聚焦处理;

步骤五、针对二维邻域合成聚焦处理后的超声 A 波信号,先确定第一个峰值最大的波形为界面波,然后找出相对于界面波的波间距小于被测工件厚度的波形即缺陷波,计算缺陷波中每个采样点幅值的平方并累加得到缺陷的能量特征值,并将能量特征值通过调色板技术将缺陷特征值映射成颜色 RGB(r, g, b) 三参数相等的灰度值,以 A 波信号采集点的坐标值为中心点,以采样间距为边长绘制一个正方形小图元,将所有的 A 波信号经过缺陷可视化处理后,即获得了被测工件的超声 C 扫描图像。

2. 根据权利要求 1 所述的一种基于二维邻域合成孔径聚焦的超声 C 扫描成像方法,其特征在于,所述的步骤四中超声 A 波信号进行合成聚焦处理包括以下步骤:

步骤 1、将 i, j 都赋值为 0;

步骤 2、将临时行列号 m, n 赋值为 0;

步骤 3、判断信号采集位置 $s(i, j)$ 与 $s(m, n)$ 之间的距离是否小于 $D/2$, 小于 $D/2$ 执行步骤 4, 否则执行步骤 5;

步骤 4、将 $s(m, n)$ 添加至 $s(i, j)$ 参与聚焦处理的 A 波信号列表 L_{ij} ;

步骤 5、判断 m 是否等于行序号的最大值 g, 如果不相等则执行步骤 6, 否则执行步骤 7;

步骤 6、行号值 m 加 1 后返回步骤 3 继续执行;

步骤 7、判断 n 是否等于列序号的最大值 h, 如果不相等则执行步骤 8, 否则执行步骤 9;

步骤 8、列号值 n 加 1, 行号值 n 赋 0 后返回步骤 3 继续执行;

步骤 9、对 A 波信号的列表 L_{ij} 进行合成聚焦处理并赋值给第 i 行 j 列交点处新的超声

A 波信号 $S(i, j)$;

步骤 10、清空列表 L_{ij} ;

步骤 11、判断行号 i 是否等于行序号的最大值 g , 如果不相等则执行步骤 12, 否则执行步骤 13 ;

步骤 12、行号值 i 加 1 后返回步骤 2 执行 ;

步骤 13、判断列序号 j 是否等于列序号的最大值 h , 如果相等则整个流程结束, 否则执行步骤 14 ;

步骤 14、列序号 j 加 1, 行号值 i 赋 0 后执行步骤 2。

3. 根据权利要求 2 所述的一种基于二维邻域合成孔径聚焦的超声 C 扫描成像方法, 其特征在于, 所述步骤 9 的执行流程为 :

从 A 波信号列表 L_{ij} 中选取 $s(i, j)$ 作为合成聚焦处理的基准点信号, 设定采样点阈值后对该基准 A 波信号的采样点序列进行遍历, 获取缺陷波的有效分析区间 $[k_b, k_e]$, 假设列表 L_{ij} 中某个 A 波信号采集位置与基准的距离是 l , 超声卡采样频率是 f , 超声波在被测工件中的传播速度为 c , 则该 A 波信号的有效分析区间为 $\left[2f\sqrt{(k_b c/2f)^2 + l^2}/c, 2f\sqrt{(k_e c/2f)^2 + l^2}/c - k_b + k_e\right]$, 在对列表 L_{ij} 中所有参与聚焦处理信号进行有效区间分析后, 将每个信号的有效区间内排序相同的采样点的幅值进行求和后再求平均值, 然后将平均值重新赋值给基准点信号有效分析区间内相应的采样点作为幅值, 即获得该采集点位置聚焦处理后的 A 波信号 $S(i, j)$ 。

一种基于二维邻域合成孔径聚焦的超声 C 扫描成像方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种超声无损检测成像方法,特别涉及一种基于二维邻域合成孔径聚焦的超声 C 扫描成像方法。

背景技术

[0002] 超声波检测可在不损伤构件使用性能与形状的条件下判断其内部缺陷状况,是现代工业许多领域中保证产品质量与性能、稳定生产工艺的重要手段,A 波信号作为超声检测过程中采集到的原始数据,在超声自动检测中的作用举足轻重:它既是超声 C 扫描成像的依据,也是扫描结果后续分析和处理的基础。可见,获得精确的 A 波信号是准确检出缺陷的保证。

[0003] 而超声探头发射声波时具有一定的声束扩散角,当探头处于被测对象的不同位置时可能接收到同一目标点的超声回波,使得采集到的缺陷信号不够精确,从而影响缺陷定位、定量分析结果的精度。声束扩散角与晶片直径、频率成反比,但大孔径探头制作复杂且应用不便,频率过高会存在声束能量衰减严重的问题。因此,仅靠改用不同参数的探头来抑制扩散角的影响不现实。合成孔径聚焦技术(Synthetic Aperture Focusing Technique, SAFT)是一种先进的信号处理方法,可在应用小孔径探头的前提下,通过采集目标点邻域的信号并加以分析处理,模仿一个大孔径探头进行工作,从而提高超声信号的分辨率。

[0004] 目前,SAFT 在超声检测领域的应用主要集中在超声 B 扫描成像方面,针对构件 C 扫描图像研究较少。现有的相关 SAFT 算法应用于超声领域也存在如下不足:①参与聚焦的处理点限于目标点的一维邻域,实质上属于 1D-SAFT 算法。如图 1 所示:以目标点为中心,只在一条线段上考虑处理点的分布,这种算法仅抑制了扩散角在某一个方向的散射影响,很难达到理想的聚焦效果。因此有必要对以目标点为中心的二维邻域进行聚焦(2D-SAFT),如图 2 所示。②合成聚焦处理时没有充分考虑探头的声场特征的影响,往往凭借经验值决定参与聚焦处理的超声 A 波信号的个数和分布,而考虑各个探头的晶片直径、近场长度、声束扩散角角来决定合成孔径聚焦处理点的邻域更为合理,效果更加理想。

发明内容

[0005] 为了抑制声束扩散角对超声 C 扫描的不利影响,获取准确的超声 A 波数据,本发明提供一种面向超声 A 波数据,同时考虑处理点合理规划及数据预处理问题的基于二维邻域合成孔径聚焦的超声 C 扫描成像方法。

[0006] 为了实现上述技术目的,本发明的技术方案是,一种基于二维邻域合成孔径聚焦的超声 C 扫描成像方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤一、如图 3 所示,将一个支撑杆固定在水槽底座上,支撑杆顶端固定一个直径为 6mm-10mm 光滑金属小球,调节连接于五自由度运动台架上的圆柱形的超声探头位置,使超声探头处于小球上方且超声探头的轴线与水平面垂直,然后控制超声探头在轴线保持与水平面垂直的情况下,沿小球的同一条水平方向的径线在小球上方作同一竖直平面内的弓

字形扫描,采集声波遇小球表面所产生的回波信号,并提取该信号最大幅值,再通过将幅值映射成颜色 RGB(r, g, b) 三参数相等的灰度值的方法对探头声场进行可视化,即获得能表示探头声场的超声 C 扫描图像,如图 4 所示;

[0008] 步骤二、针对步骤一所得到的超声 C 扫描图像,运用半波法选取超声图像二值化的阈值,使声场图像从 C 扫描图像的背景中分离开来,如图 5 所示。然后采用数字图像处理的方法提取出声场图像的边缘及声束中心线,在此基础上计算出声束扩散角 φ 、近场区长度 z ,假设探头晶片直径为 d ,晶片中心点与目标点之间的水声程为 s ,目标点所需的聚焦邻域的圆面直径为 D ,建立聚焦处理点邻域的数学模型为

[0009]

$$D = d + 2(s - z) \tan \frac{\varphi}{2} \quad (1);$$

[0010] 步骤三、将待测工件进行离散,分成 g 行 h 列,行与列的交点定为 A 波信号的采集位置,则第 i 行 j 列交点处所采集的超声 A 波信号表示为 $s(i, j) = \{x_{ij}, y_{ij}, q_{ij}(k) | k = 1, 2, \dots, r\}$,其中假设 i, j 分别代表行与列的序号, x_{ij}, y_{ij} 代表该采集位置的坐标值, $q_{ij}(k)$ 表示该 A 波信号采样点序列中的第 k 个采样点幅值, r 表示采样点个数;

[0011] 步骤四、将超声 A 波信号进行二维邻域合成孔径聚焦处理;

[0012] 步骤五、针对二维邻域合成聚焦处理后的超声 A 波信号,先确定第一个峰值最大的波形为被测构件的界面波,然后找出相对于界面波的波间距小于被测工件厚度的波形即缺陷波,计算缺陷波中每个采样点幅值的平方并累加得到缺陷的能量特征值,并通过调色板技术将缺陷能量特征值映射成颜色 RGB(r, g, b) 三参数相等的颜色灰度值,以 A 波信号采集点的坐标值为中心点,以采样间距为边长绘制一个正方形小图元,将所有的 A 波信号经过缺陷可视化处理后,即获得了被测工件的超声 C 扫描图像。

[0013] 所述的一种基于二维邻域合成孔径聚焦的超声 C 扫描成像方法,所述的步骤四中,将超声 A 波信号进行合成聚焦处理包括以下步骤:

[0014] 步骤 1、将 i, j 都赋值为 0;

[0015] 步骤 2、将临时行列号 m, n 赋值为 0;

[0016] 步骤 3、判断信号采集位置 $s(i, j)$ 与 $s(m, n)$ 之间的距离是否小于 D ,小于 D 执行步骤 4,否则执行步骤 5;

[0017] 步骤 4、将 $s(m, n)$ 添加至 $s(i, j)$ 参与聚焦处理的 A 波信号列表 L_{ij} ;

[0018] 步骤 5、判断 m 是否等于行序号的最大值 g ,如果不相等则执行步骤 6,否则执行步骤 7;

[0019] 步骤 6、行号值 m 加 1 后返回步骤 3 步继续执行;

[0020] 步骤 7、判断 n 是否等于列序号的最大值 h ,如果不相等则执行步骤 8,否则执行步骤 9;

[0021] 步骤 8、列号值 m 加 1,行号值 n 赋 0 后返回步骤 3 步继续执行;

[0022] 步骤 9、对 A 波信号的列表 L_{ij} 进行合成聚焦处理并赋值给第 i 行 j 列交点处新的超声 A 波信号 $S(i, j)$;

[0023] 步骤 10、清空列表 L_{ij} ;

[0024] 步骤 11、判断行号 i 是否等于行序号的最大值 g ,如果不相等则执行步骤 12,否则执行步骤 13;

- [0025] 步骤 12、行号值 i 加 1 后返回步骤 2 执行；
- [0026] 步骤 13、判断列序号 j 是否等于列序号的最大值 h ，如果相等则整个流程结束，否则执行步骤 14；
- [0027] 步骤 14、列序号 j 加 1，行号值 i 赋 0 后执行 002 步。
- [0028] 所述的一种基于二维邻域合成孔径聚焦的超声 C 扫描成像方法，所述步骤 9 的执行流程为：
- [0029] 从 A 波信号列表 L_{ij} 中选取 $s(i, j)$ 作为合成聚焦处理的基准，设定采样点阈值后对该基准 A 波信号的采样点序列进行遍历，可参见图 7，提取针对缺陷的有效分析区间 $[k_b, k_e]$ ，假设列表 L_{ij} 中某个 A 波信号采集位置与基准的距离是 l ，超声卡采样频率是 f ，超声波在被测工件中的传播速度为 c ，则该 A 波信号的有效分析区间为 $\left[2f\sqrt{(k_b c/2f)^2 + l^2}/c, 2f\sqrt{(k_e c/2f)^2 + l^2}/c - k_b + k_e\right]$ ，将每个信号的有效区间内排序相同的采样点幅值进行求和后再求平均值，然后将平均值重新赋值给基准点信号有效分析区间相应的采样点作为幅值，即获得该采集点位置聚焦处理后的 A 波信号 $S(i, j)$ 。
- [0030] 本发明的技术效果在于，通过以目标点为中心的二维邻域进行合成聚焦，提高了信号聚焦效果，同时考虑各个探头的晶片直径、近场长度、声束扩散角角来决定合成孔径聚焦处理点的邻域，使扫描结果相比现有的 SAFT 方法更加精确，有效地提高了超声 C 成像的精度。

附图说明

- [0031] 图 1 为现有 SAFT 处理方法中目标点的邻域示意图；
- [0032] 图 2 为本发明 SAFT 处理方法中目标点的邻域示意图；
- [0033] 图 3 为本发明装置示意图；
- [0034] 图 4 为本发明利用小球扫描所得出的探头声场超声 C 扫描图像；
- [0035] 图 5 为本发明从 C 扫描图像的背景中分离出来的探头声场图像；
- [0036] 图 6 为本发明超声探头声场特性参数示意图；
- [0037] 图 7 为本发明超声 A 波信号的采集示意图；
- [0038] 图 8 为本发明二维邻域合成聚焦处理的流程图；
- [0039] 图 9 为本发明合成聚焦处理的示意图图；
- [0040] 图 10 为本发明的试块实物图；
- [0041] 图 11 为本发明试块上的缺陷尺寸图；
- [0042] 图 12 为本发明所处理的 C 扫描图像；
- [0043] 图 13 为未经合成聚焦处理的原始 C 扫描图像；
- [0044] 图 14 为采用传统 SAFT 处理的 C 扫描图像。

具体实施方式

[0045] 参见图 3- 图 14，本具体实施方式以扫面表面有不规则形状凹槽的试块为例来说明本发明的检测方法，本发明通过控制用计算机上安装的运动控制卡来控制安装于五自由度运动台架上的超声探头，超声探头在水槽中活动，并将超声信号经前置放大器传输至控

制用计算机的超声卡,超声卡将处理后的超声信号传输至控制用计算机进行进一步处理。检测步骤如下:

[0046] 步骤一:如图3所示,将一个固定在底座的支撑杆上直径为6mm-10mm光滑金属小球置于水槽中,支撑杆的长度一般为25cm左右为佳,超声探头连接于五自由度运动台架上,使超声探头处于小球上方且超声探头的轴线与水平面垂直,然后控制超声探头在轴线保持与水平面垂直的情况下,沿小球的同一条水平方向的径线在小球上方作同一竖直平面内的弓字形扫描,即超声探头保持水平移动进行一次扫描后,向上竖直移动一段距离,然后再沿原水平移动的反方向再次扫描,采集声波遇小球表面所产生的回波信号,并提取该信号最大幅值,通过将该最大幅值映射成颜色RGB(r, g, b)三参数相等的灰度值的方法对探头声场进行可视化,设所采集的最大幅值为 V_{max} ,而颜色RGB(r, g, b)三参数的取值范围是(0, 255),故将 V_{max} 的值线性映射给颜色RGB(r, g, b)三参数,即 $V_{max} = 0$ 时,颜色RGB(r, g, b)三参数同时赋值为0, V_{max} 为超声采集卡所能采集的最大值时,颜色RGB(r, g, b)三参数同时赋值为255, V_{max} 为其他中间值时,则按比例给颜色RGB(r, g, b)三参数赋相同的值,即可将幅值转换为颜色灰度值;探头声束扩散角包含于探头声场,将抽象的声场进行可视化便于探头声束扩散角的提取,而使用光滑小球作为靶反射体,声场任意位置的声束都能对准球靶的法线方向,能最大限度得到反射回波保证测量的准确性,而且成本低、操作简单。

[0047] 步骤二:针对步骤一所得到的超声C扫描图像,运用半波法,即首先遍历声场图像中最大的超声信号值,将该值的一半作为阈值对其进行二值化处理,使声场从背景中分离开来;接着对二值化后的C图像按从左至右、从上至下的顺序进行扫描,然后采用数字图像处理方法提取出声场图像的边缘及声束中心线,声束中心线上最后一个极大超声信号点至声源的距离称为近场长度z,如图6所示。在声场图像的远场区垂直于声束中心线方向上二个不同位置分别截取图像轮廓,若 s_1, s_2, d_1, d_2 分别为二次截取时距声源的长度和截距、则探头扩散角根据公式 $\varphi = 2 \cdot \arctan((d_2 - d_1)/(s_2 - s_1))$ 计算。假设探头晶片直径为d,晶片中心点与目标点之间的水声程为s,目标点邻域的圆面直径为D,建立聚焦处理点邻域的数学模型为

[0048]

$$D = d + 2(s - z) \tan \frac{\varphi}{2} \quad (1);$$

[0049] 步骤三、如图7所示,将被测工件进行离散,分成g行h列,行与列的交点定为A波信号的采集位置,第i行j列交点处所采集的超声A波信号表示为 $s(i, j) = \{x_{ij}, y_{ij}, q_{ij}(k) | k = 1, 2, \dots, r\}$,其中假设i, j分别代表行与列的序号, x_{ij}, y_{ij} 代表该采集位置的坐标值, $q_{ij}(k)$ 表示该A波信号采样点序列中的第k个采样点幅值,r表示采样点长度;

[0050] 步骤四、按照图8所示流程对超声A波信号进行合成聚焦处理,包括以下步骤:

[0051] 步骤1、将i, j都赋值为0;

[0052] 步骤2、将临时行列号m, n赋值为0;

[0053] 步骤3、判断信号采集位置 $s(i, j)$ 与 $s(m, n)$ 之间的距离是否小于D,小于D执行步骤4,否则执行步骤5;

[0054] 步骤4、将 $s(m, n)$ 添加至 $s(i, j)$ 参与聚焦处理的A波信号列表 L_{ij} ;

[0055] 步骤5、判断m是否等于行序号的最大值g,如果不相等则执行步骤6,否则执行步

骤 7；

[0056] 步骤 6、行号值 m 加 1 后返回步骤 3 继续执行；

[0057] 步骤 7、判断 n 是否等于列序号的最大值 h ，如果不相等则执行步骤 8，否则执行步骤 9；

[0058] 步骤 8、列号值 m 加 1，行号值 n 赋 0 后返回步骤 3 继续执行；

[0059] 步骤 9、对 A 波信号的列表 L_{ij} 进行合成聚焦处理并赋值给第 i 行 j 列交点处新的超声 A 波信号 $S(i, j)$ ；

[0060] 步骤 10、清空列表 L_{ij} ；

[0061] 步骤 11、判断行号 i 是否等于行序号的最大值 g ，如果不相等则执行步骤 12，否则执行步骤 13；

[0062] 步骤 12、行号值 i 加 1 后返回步骤 2 执行；

[0063] 步骤 13、判断列序号 j 是否等于列序号的最大值 h ，如果相等整个流程结束，否则执行步骤 14；

[0064] 步骤 14、列序号 j 加 1，行号值 i 赋 0 后执行步骤 2。

[0065] 其中步骤 9 的执行流程为：

[0066] 从 A 波信号列表 L_{ij} 中选取 $s(i, j)$ 作为合成聚焦处理的基准点信号，设定采样点阈值后对该基准 A 波信号的采样点序列进行遍历，参见图 9，提取针对缺陷的有效分析区间 $[k_b, k_e]$ ，假设列表 L_{ij} 中某个 A 波信号采集位置与基准的距离是 l ，超声卡采样频率是 f ，超声波在被测工件中的传播速度为 c ，则该 A 波信号的有效分析区间为 $\left[2f\sqrt{(k_b c/2f)^2 + l^2}/c, 2f\sqrt{(k_e c/2f)^2 + l^2}/c - k_b + k_e \right]$ ，在对列表 L_{ij} 中所有参与聚焦处理信号进行有效区间分析后，将每个信号的有效区间内排序相同的采样点的幅值进行求和后再求平均值，然后将平均值重新赋值给基准点有效区间内相应的采样点作为幅值，即获得该采集点位置聚焦处理后的 A 波信号 $S(i, j)$ 。

[0067] 步骤五、针对二维邻域合成聚焦处理后的超声 A 波信号，先确定第一个峰值最大的波形为界面波，然后找出相对于界面波的波间距小于被测工件厚度的波形即缺陷波，计算缺陷波中每个采样点幅值的平方并累加得到缺陷的能量特征值，并将能量特征值通过调色板技术将缺陷特征值映射成颜色 RGB(r, g, b) 三参数相等的灰度值，以 A 波信号采集点的坐标值为中心点，以采样间距为边长绘制一个正方形小图元，将所有的 A 波信号经过缺陷可视化处理后，即获得了被测工件的超声 C 扫描图像。

[0068] 试块上的缺陷距离表面的深度为 5.6mm，缺陷底部光滑，试块厚度 15mm，缺陷的长径 35.2mm，短径 16.4mm，面积 550.28mm²。

[0069] 本实施例采用上海思雀柯信息科技有限公司生产的六自由度 CYS-1100 型号超声 C 扫描系统进行实验，选用的超声卡为 UT-2001 型高速采样卡，探头为汕头超声仪器研究所生产的 2.5Z14SJ 型号的水浸平探头，该探头的晶片直径为 14mm，近场长度为 81.6mm，球靶法声场测量中的钢球直径为 4mm，通过 C 扫描成像对探头声束扩散角进行可视化，在此基础上计算得出该平探头的声束扩散角 ϕ 为 6.8°，因此，建立聚焦处理点邻域的数学模型为 $D = 14 + 2(s - 81.6) \tan 3.4^\circ = 14 + 0.119(s - 81.6)$ 。设置 50mm*50mm 数据采集矩形区域，步距为 0.3mm，水声距为 150mm，采样点长度为 2000。计算得出邻域半径为 $D = 22.13\text{mm}$ ，对检测

区域进行弓字形扫描并实时采集超声 A 波信号,扫描完毕后采用本发明的二维邻域超声 A 波信号聚焦方法进行处理,最后提取其缺陷的能量(幅值平方和)特征值,通过调色板技术对缺陷进行 C 扫描成像。其中图 11 为经过 2D-SAFT 处理的 C 扫描图像,图 12 为未经合成聚焦处理的原始 C 扫描图像,图 14 为采用传统 1D-SAFT 处理的 C 扫描图像。三种方法下缺陷特征对比见表 1 所示。

[0070]

A 波信号的处理方法	长径 mm	短径 mm	面积 mm ²	长径误差 mm	短径误差 mm	面积误差 mm ²
二维邻域合成聚焦处理	35.5	16.7	571.36	0.3	0.3	21.08
未经合成聚焦处理	36.7	17.6	627.41	1.5	1.2	77.13
传统的合成聚焦处理	35.8	17.0	597.82	0.6	0.6	47.54

[0071] 表 1

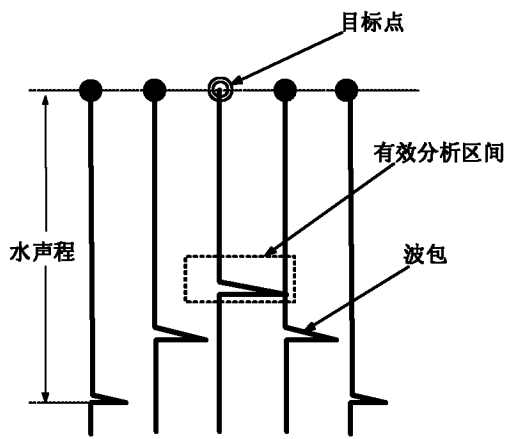


图 1

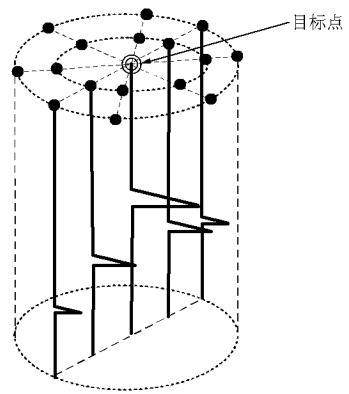


图 2

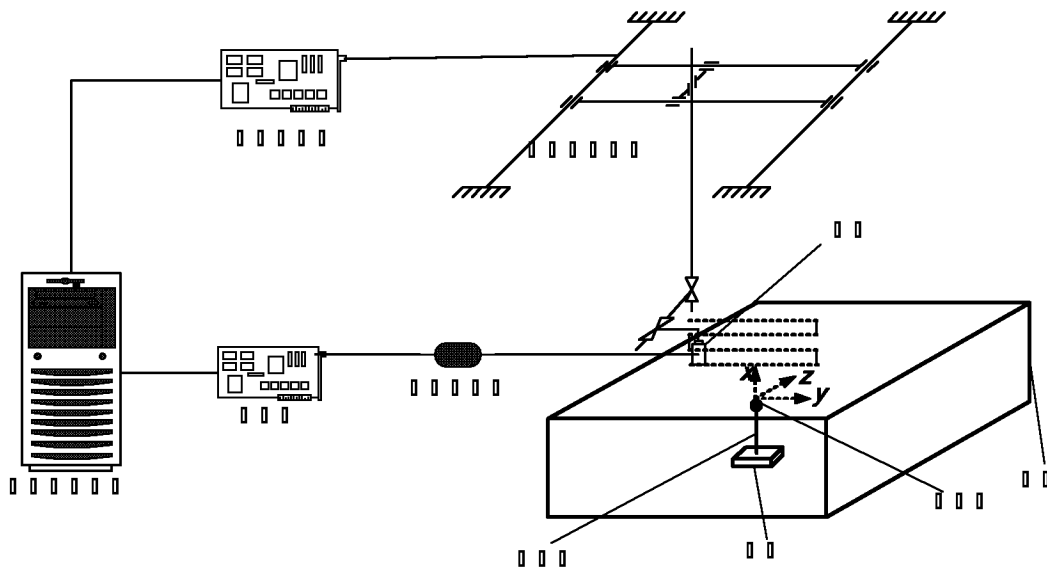


图 3

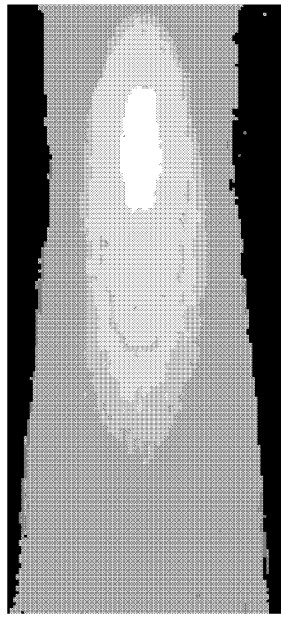


图 4



图 5

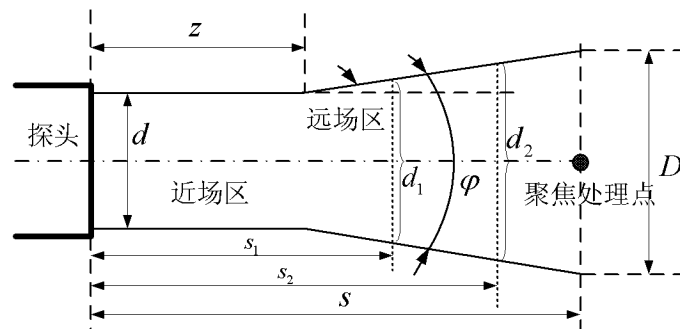


图 6

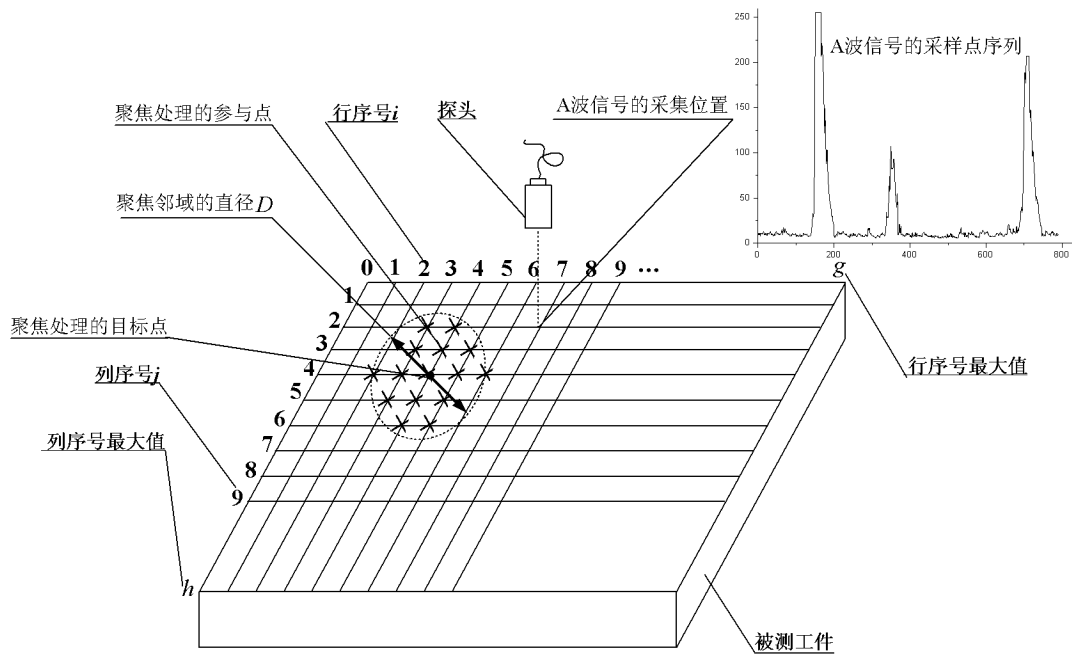


图 7

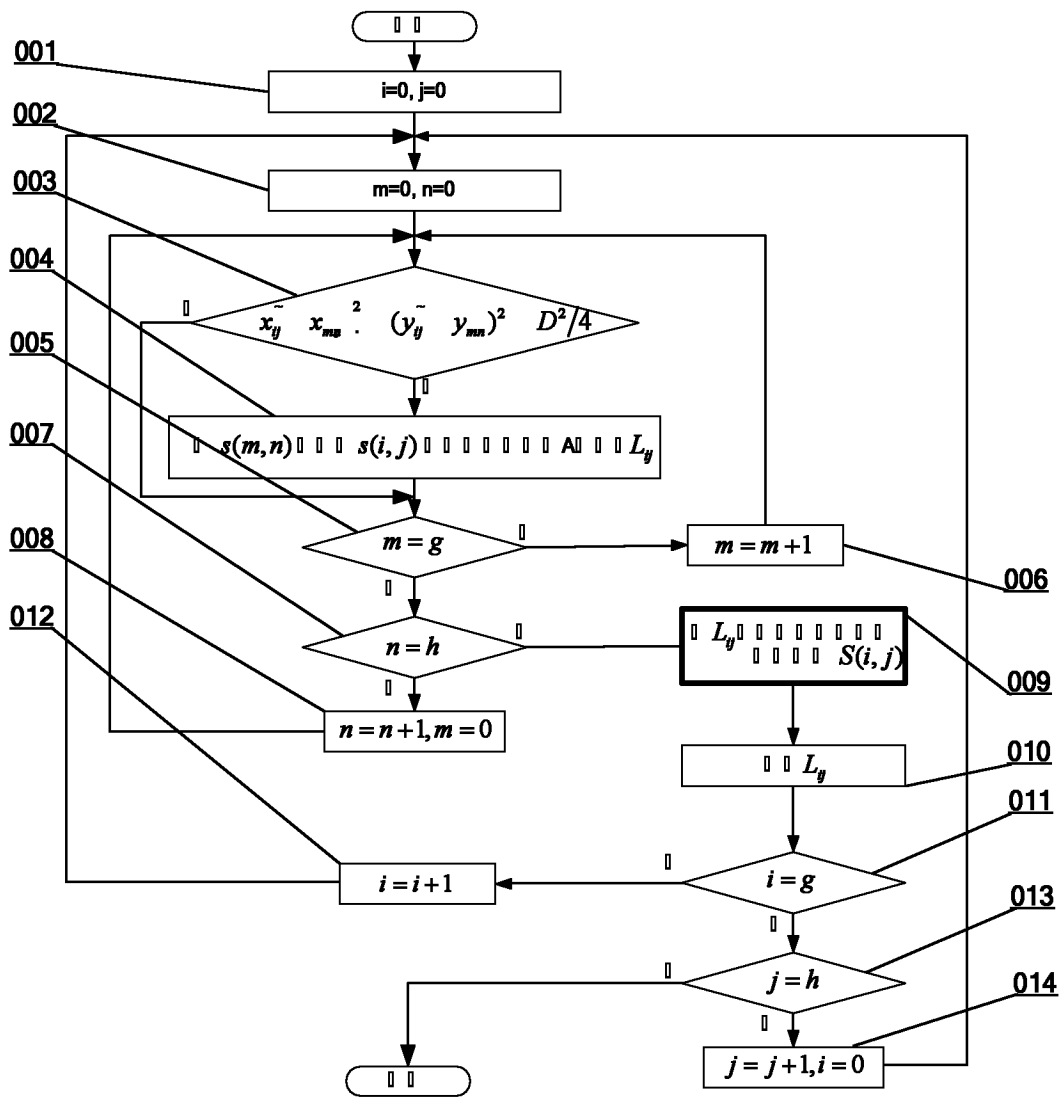


图 8

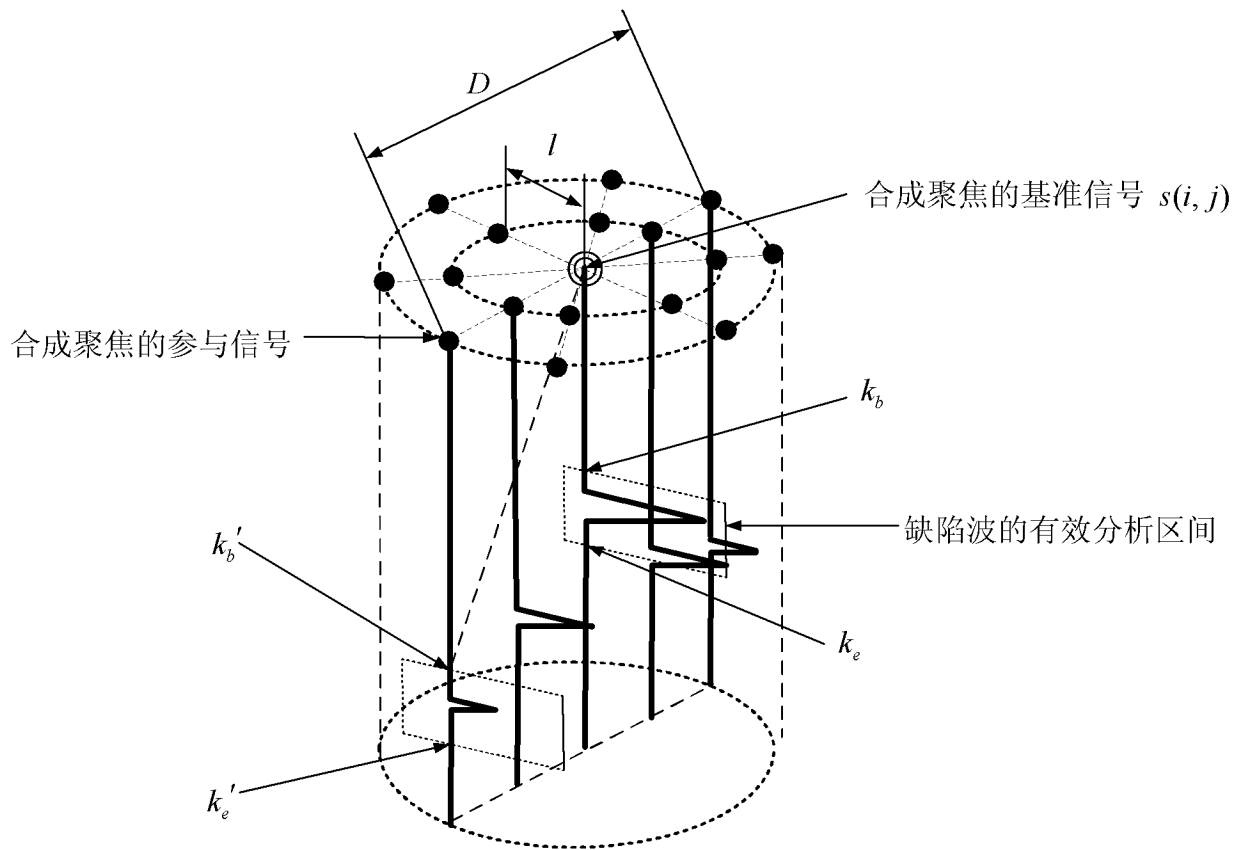


图 9

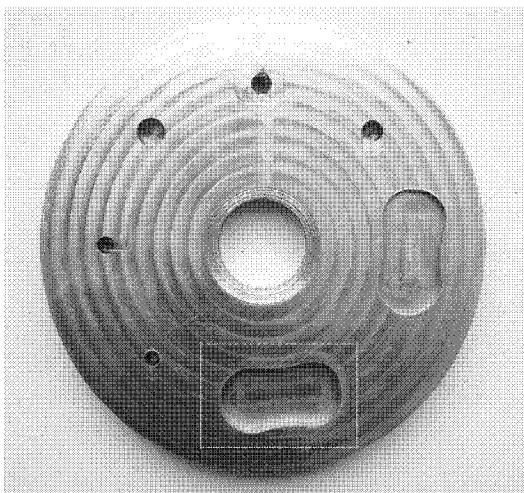


图 10

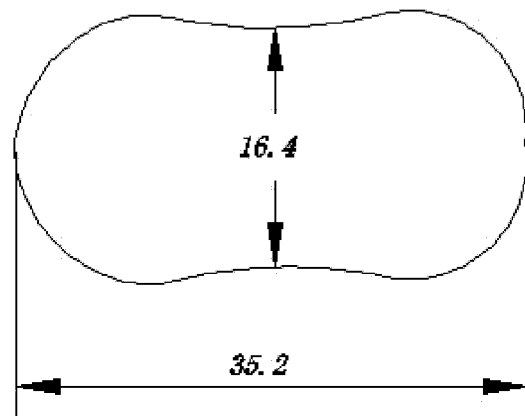


图 11

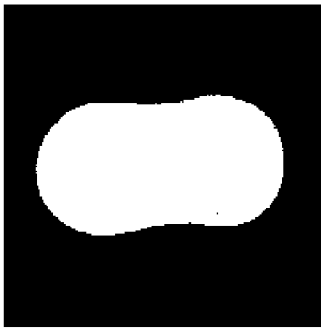


图 12



图 13

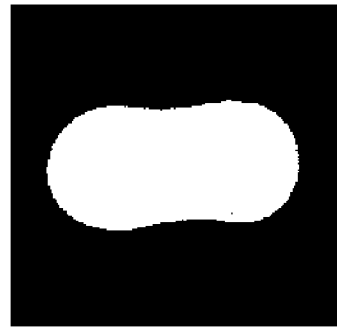


图 14