维普资讯 http://www.cqvip.com

研究报告

用平面探头发射、聚焦探头接收的线性合成孔径聚焦技术

肖焕立 黄振俨 郭成彬 应崇福
(中国科学院声学研究所)

1989 年 9 月 27 日收到

为了解决现有合成孔径聚焦技术(SAFT)方案中分辨率与灵敏度这一矛盾,在现有 SAFT 成像的基础上,新提出了一种平面探头发射、聚焦探头接收的线性合成孔径聚焦技术的成像方案。对该方案进行了理论分析,推导出了相应的成像算法,并建立了一套包括超声分析仪、超高速数据采集装置、机械扫描装置和计算机组成的 SAFT 成像系统,发展了相应的实验方法和计算机软件,对三组具有不同形状的人工缺陷的试块进行了成像实验,结果较好,分辨率至少可达 1.5λ.

一、引 言

随着电子计算机和高速数字信号处理技术的发展和高速数据采集和存贮系统的出现,超声成像技术得到了迅猛的发展,出现了许多新的超声成像方法[1-3]. 其中合成孔径聚焦技术是一种较有希望的方法.

目前 SAFT 有两种主要的信号发射接收方案:一是用收发合置的聚焦探头[5-7](焦点落在试块表面),另一是用收发合置的平面探头[8],两者都用水浸法. 前者因用聚焦探头,能量损失较大,因而接收信号的信噪比较低,影响了缺陷图像的质量;后者因用了平面探头,其接收换能器较强的指向性限制了合成孔径的大小,影响了缺陷图像的横向分辨率.

为了解决信噪比和横向分辨率这一矛盾,我们提出了用平面探头发射、聚焦探头接收的方案. 根据这一方案,我们推导出了相应的理论计算公式和成像算法,并在实验室建立了一套适合于 SAFT 成像的高速数据采集和自动扫描系统,对三种具有不同形状的人工缺陷进行了成像实验,取得了较好的结果,缺陷图像比较清晰,横向分辨率至少可达 1.5 倍波长.

二、理 论 推 导

我们仅从点散射体出发来推导本方案的成像算法,推导中只近似采用标量场. 由于实验只进行了二维成像,因此推导也仅是二维的,至于三维情况可以引伸出来.

假定试块母体是各向同性、均匀和线性的,其声速为 c,试块上表面是一平面. 试块内有一点散射体 S. 在通过 S 的垂直平面内,我们选取直角坐标系 (x,z),x 轴位于试块上表面,方向为接收换能器的扫描方向,z 轴的正方向指向试块内部,原点 O 任选. 点散射体的坐标为 (x_0,z_0),如图 1 所示.

现有一平面探头(直径远大于波长)位于试块上表面,向试块内发射平面脉冲波. 设发射脉冲为 $F(t)$,t 为时间,则在试块内形成的入射声场可表示为

$$\Phi_i(z;t) = F(t - z/c) \tag{1}$$

其中 Φ_i 表示入射声场,z 为深度,c 为声速.

现有一接收器,位于试块上表面 $(x_R, 0)$ 处,它接收到从 S 点的散射信号,可以表示为

维普资讯 http://www.cqvip.com

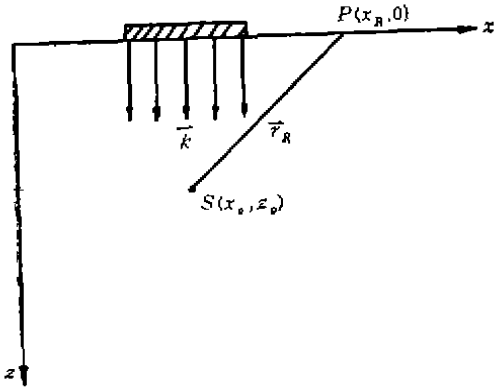

图 1 点散射体的散射声场示意图

$$\Phi_R(x_R, 0; t) = \frac{A}{r_R} F(t - z_0/c - r_R/c) \tag{2}$$

其中 A 为比例常数，取决于散射体的散射"本领"，$(x_R, 0)$ 为接收器的位置，z_0 为点散射体的深度，r_R 为

$$r_R = \sqrt{(x_R - x_0)^2 + z_0^2} \tag{3}$$

假设 $F(t) = \delta(t)$，则式(2)可表示为

$$\Phi_R(x_R, 0; t) = \frac{A}{r_R} \delta(t - z_0/c - r_R/c) \tag{4}$$

显而易见，式(4)只有当

$$t = z_0/c + r_R/c \tag{5}$$

时为非零。式(5)称为渡越时间轨迹。对式(5)作适当变换可以得到

$$\frac{(ct - z_0)^2}{z_0^2} - \frac{(x_R - x_0)^2}{z_0} = 1 \tag{6}$$

式(6)表明：渡越时间轨迹为 (x_R, ct) 平面上双曲线的一支，$\Phi_R(x_R, 0; t)$ 的非零值位于该双曲线上，如图 2(a) 所示。

另一方面，试块内不含散射体的任意点 (x', z')，也有一支双曲线

$$\frac{(ct - z')^2}{z'} - \frac{(x_R - x')^2}{z'^2} = 1 \tag{7}$$

它也可以在 (x_R, ct) 平面上画出一支双曲线，如图 2(b) 所示。这说明，空间某点有散射体时，它所对应的渡越时间轨迹上的点都有非零值，当无散射体时几乎没有非零值。SAFT 正是利用这一原理来进行成像的。

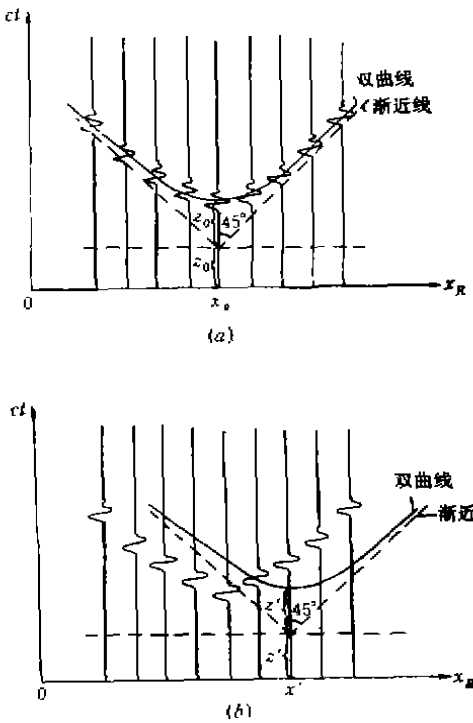

图 2 渡越时间轨迹示意图

(a) 双曲线为点散射体的渡越时间轨迹；
(b) 双曲线为非点散射体的渡越时间轨迹。

我们以重建幅度的大小作为空间某点有无散射体(即缺陷)的判据。重建幅度是指接收器在合成孔径内各个位置上收到的某点的散射信号，根据该点所对应的渡越时间进行重新叠加所得到的总和，以 $\gamma(x, z)$ 表示，则为[1]

$$\gamma(x, z) = \int_{x_{R1}}^{x_{R2}} r\Phi_R(x_R, 0; t) dx_R \tag{8}$$

其中

$$t = z/c + r/c \tag{9}$$

$$r = \sqrt{(x_R - x)^2 + z^2} \tag{10}$$

x_{R1}，x_{R2} 为合成孔径两端的 x 轴坐标。

式(8)即为 SAFT 成像的理论计算公式，它表明当渡越时间轨迹(式(9))满足式(5)时，γ 值很大，当不满足时，γ 值相对很小。

三、实验装置及成像步骤

一般地说，SAFT 成像过程包括三个基本步骤：(1)原始数据采集；(2)数据处理及图像重建；(3)缺陷图像显示。

维普资讯 http://www.cqvip.com

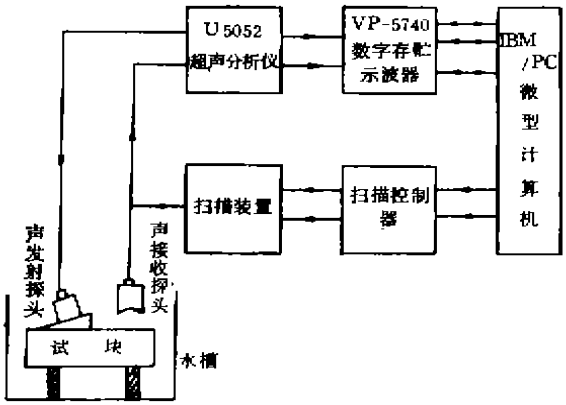

图 3　高速数据采集及扫描自动控制超声成像系统连接框图

1. 原始数据的采集

我们在实验室建立了一套高速数据采集和扫描自动控制的超声成像系统，它主要由 U 5052 超声分析仪、声发射探头、声接收探头、扫描装置及扫描控制器、VP-5740A 数字存贮示波器和 IBM/PC/AT 微机组成，其连接框图如图 3 所示

声发射探头为一直径 25.4 mm、中心频率为 2.25MHz 的宽带窄脉冲探头，接收探头为一直径 10.0mm、中心频率为 2.25MHz、水中焦距为 20.0mm 的聚焦探头。发射探头是不动的，接收探头沿着与试块表面平行的方向移动，其焦点始终在试块表面上。为了避开发射探头对接收探头的干扰，我们让发射探头与试块表面成一小角度(约为 9°)，用有机玻璃楔耦合。数据采集的流程图如图 4 所示。采样频率为 100 MHz，采样点数为 1024 点。

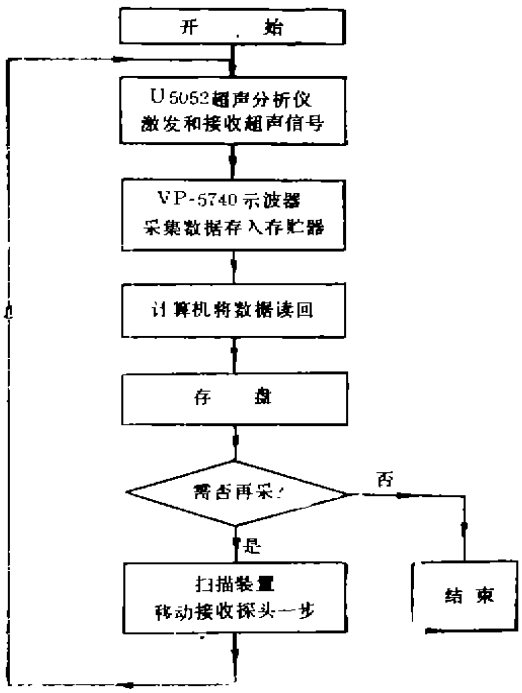

图 4　数据采集流程图

2. 数据处理及图像重建

首先将在合成孔径内各接收点取得的原始射频信号转变成视频信号，然后进行叠加计算。

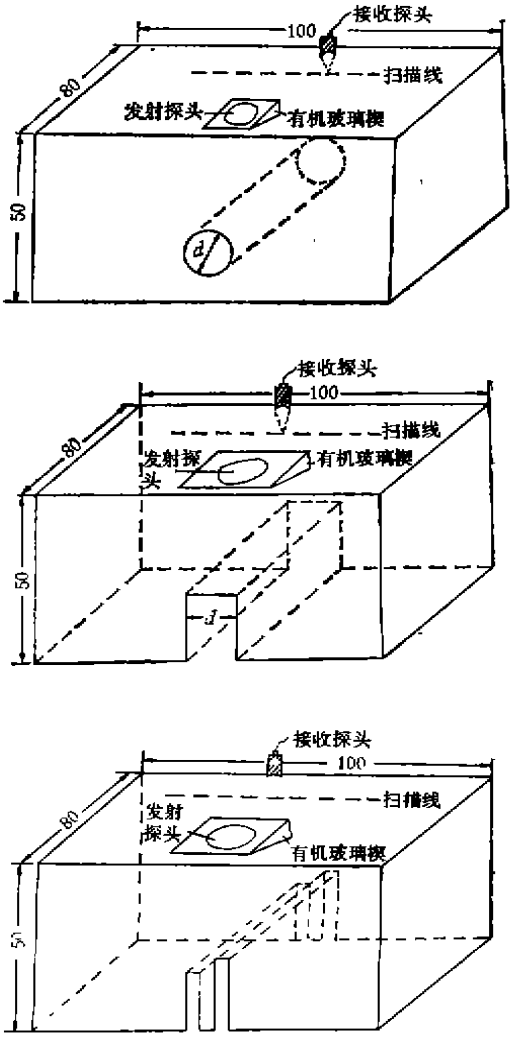

图 5　SAFT 试块示意图

(a) 具有一个横穿孔的试块. (b) 具有一个平底槽的试块. (c) 具有二个平底槽的试块

维普资讯 http://www.cqvip.com

根据第二节，我们知道当接收点的位置（x_R,0）改变时，可以收到来自不同方向的缺陷散射信号，把这些信号根据不同的渡越时间轨迹分配到相对应的空间各点，然后将它们叠加，即得到空间各点的重建幅度。

3. 图像显示

我们采用缺陷声场图像和缺陷脉冲前沿图像两种方式来描述 SAFT 的成像结果。根据实验我们发现。当重建幅度落在最大值至 −2dB 之间时认为该点有缺陷，低于 −2dB 时无缺陷，这样得到的结果与实际情况吻合较好，其图像称为"缺陷声场图像"。为了更好地描述缺陷的轮廓，我们对上述缺陷进行加工。只取对着声波入射方向的部份，称为"脉冲前沿图像"。

四、实验结果及分析

为了评价 SAFT 的成像效果，我们制作了三组共六个含有不同类型人工缺陷的试块。第一组试块共三个，各有一个与试块上表面平行的横穿孔，直径 d 分别为 6mm，10 mm 和 15 mm，孔的最高点离上表面均为 30mm，如图 5(a) 所示。第二组试块共二个，各有一个与试块上表面平行的平底槽，槽宽分别为 6mm 和 15mm，槽底与试块上表面也均为 30mm，如图 5(b) 所示。第三组试块共一个，含有两个平底槽，槽宽均为 4mm，槽底与试块上表面平行，互相也平行，间隔为 4mm，两槽底与试块上表面相距分别为 26mm 和 30mm，如图 5(c) 所示。

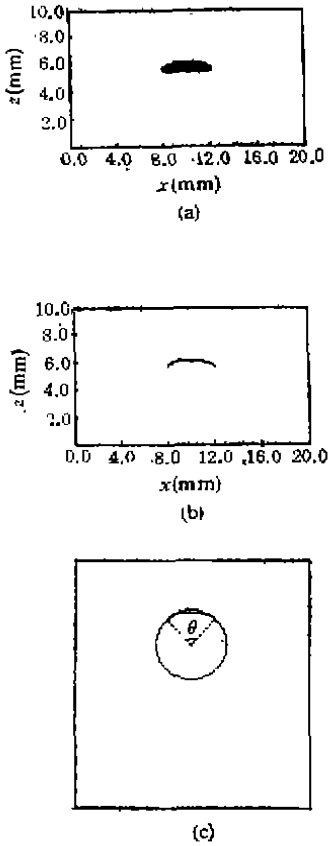

图 6　d = 6mm 横穿孔的 SAFT 图像. $\theta \approx 80°$

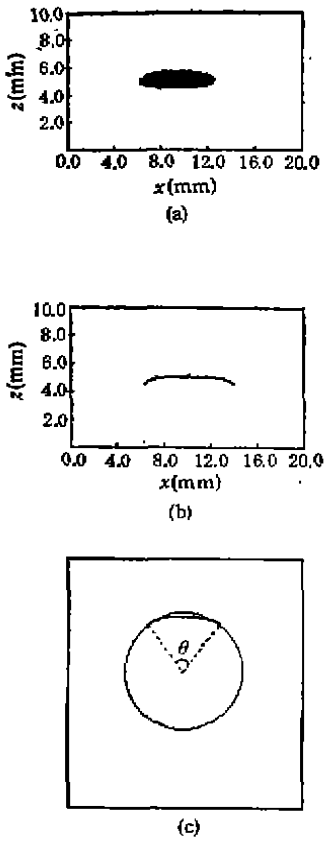

图 7　d = 10mm 横穿孔的 SAFT 图像. $\theta \approx 70°$

第一组试块的成像结果如图 6—8 所示，第二组试块的成像结果如图 9—10 所示，第三组试块的成像结果如图 11 所示。在图 6—11 中，(a) 显示了缺陷的声场图像；(b) 显示了缺陷的脉冲前沿图像；(c) 是 (b) 与试块的剖面图

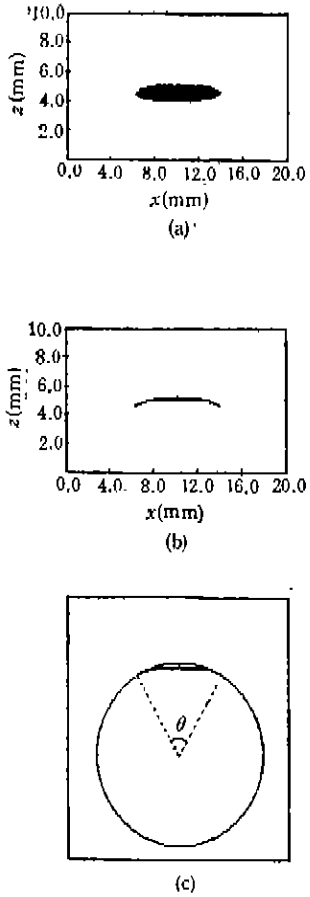

图8 $d=15$mm 横穿孔的 SAFT 图像，$\theta\approx60°$

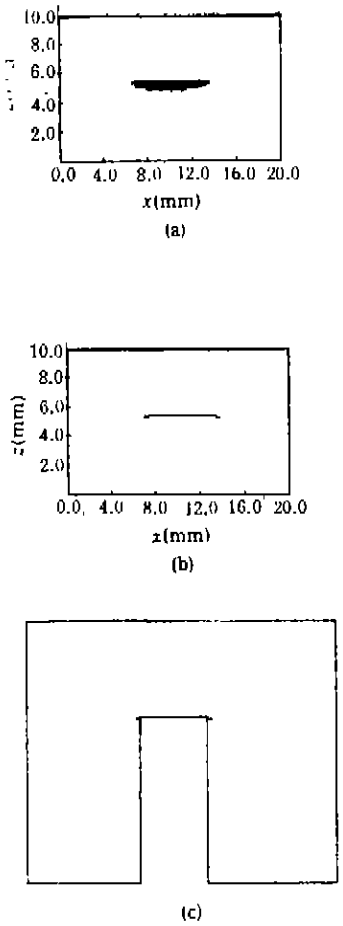

图9 宽 6mm 槽的 SAFT 图像

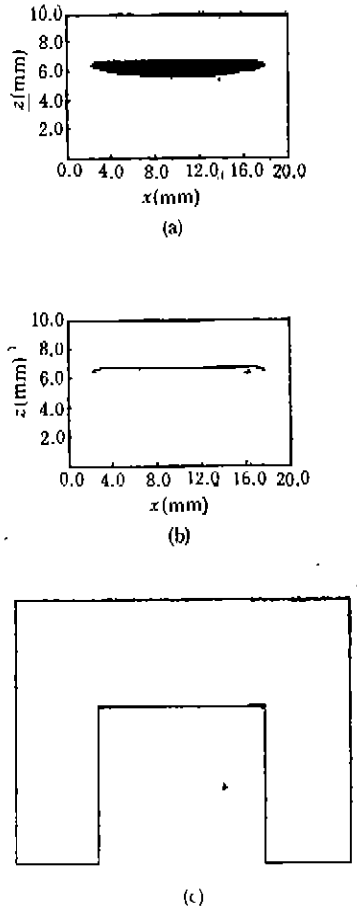

图10 宽 15mm 槽的 SAFT 图像

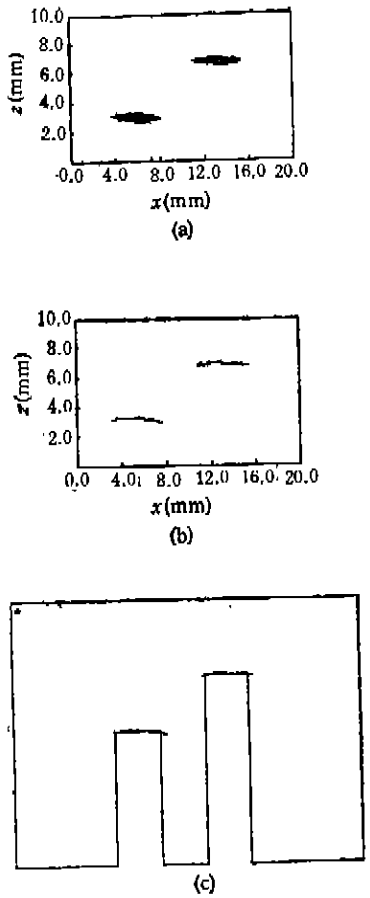

图11 宽4mm双槽的 SAFT 图像

维普资讯 http://www.cqvip.com

维普资讯 http://www.cqvip.com

画在了一起，以将成像结果与实物比较。

从图 6—11 可以看到，脉冲前沿图像与实物缺陷的上部吻合较好，从图 11 可以看到横向分辨率和纵向分辨率均可达到 4 mm，按波长 2.6mm 计算，分辨率可达 1.5λ。对于平底槽，成像结果与实物吻合非常一致，而圆柱横穿孔稍微有些偏差，但可以区分开平底槽和横穿孔。

五、结　论

对 SAFT 成像我们提出了"平面探头发射、聚焦探头接收"的信号发射接收方案，并研究了它的可行性。发射接收探头分开的优点是：缺陷在固定的入射波照射下所产生的散射场不受接收探头移动的影响，这样便于缺陷的精确重建。用平面探头作为发射换能器，使平面波把缺陷"照得更亮"一些，用聚焦探头作为接收换能器可以近似于点接收源，因为它有较宽的指向性[6]，又有精确的接收位置，从而使成像效果较好。

对三组试块进行了实验，实验结果与实物吻合较好，其纵向和横向分辨率均可达 1.5λ。由于没有制作足够多的试块，我们未能确定本方案所能达到的极限分辨率，这一点有待于以后的进一步探索。

同采用我们自己制作的聚焦探头又发又收的结果相比，本方案明显地提高了信号的信噪比。但本方案的不利之处是：① 安排发射探头和接收探头的位置比较困难；②渡越时间的计算比较麻烦。在成像实验中大部份都用软件实现，因此实时能力较差，成一幅图像的时间需要 40—90 分钟。

参 考 文 献

[1] Neumann Barbian, 无损检测译文选（中科院声学所等译），11—22.

[2] Schmitz, Muller, Schafer, 无损检测译文选（中科院声学所等译），55—67.

[3] Bojarski, *IEEE Trans, Antennas and Propagation*, **AP-30**-5 (1982), 980—989.

[4] Burckhardt, Grandchamp, Hollmann, *Acoustical Holography*, **5** (1974), 391—413.

[5] Doctor, Hall, Reid, *NDT International*, **19**-3 (1986), 163—167.

[6] Schmitz, Line Synthetic Aperture Focusing Technique, Izfp Report, 1981.

[7] Busse, Collins, Doctor, Nuclear Regulatory Commission Report NUREG/CR-3625, March 1984.

[8] Burch, Burton, *Ultrasonics*, **27** (1984), 275—281.

用超声多普勒方法检测感光乳剂中的气泡

严仁博　黄振俨　郭成彬　宋凤臣　王秀芬

（中国科学院声学研究所）

1990 年 3 月 20 日收到

利用超声多普勒方法能检测出直径小至 80μm 的感光乳剂中的单个气泡。介绍了装置的原理。考虑到测量管中流场不稳定性和声场分布的影响，给出测量管的结构设计，试验结果是符合预计的。

一、引　言

在感光胶片的生产过程中，要求能有效地检测出即将涂布于片基上的乳剂所含的气泡，以保证产品质量，降低生产成本。实际上在化工等其他一些生产领域中，常需要对各种不同性质液体进行消除气泡的工艺处理，因之气泡检测在这些领域也有着广泛的应用前景。国内也曾报道用超声连续波穿透法检测感光乳剂中