

各向同性薄板中横穿孔缺陷的超声兰姆波层析成像^{*}

张海燕¹ 周 全¹ 吕东辉¹ 刘镇清²

(1 上海大学通信与信息工程学院 上海 200072)

(2 同济大学声学所 上海 200092)

2005 年 5 月 17 日收到

2006 年 4 月 20 日定稿

摘要 本文将地球物理中的跨孔层析重建技术用于兰姆波的定量无损评价。综合射线追踪与代数重建技术 (ART), 发展了横穿孔缺陷的超声兰姆波层析成像方法。基于 Snell 定律和费马原理, 采用射线追踪方法寻求发射和接收换能器之间超声兰姆波的实际传播路径并计算走时, 然后采用 ART 算法对走时数据进行速度图像重建, 给出了具有人工横穿孔缺陷铝板的数值模拟和实验数据的直射线和弯曲射线重建图像。结果表明, 弯曲射线 ART 方法比直射线 ART 方法重建的缺陷尺寸更接近于缺陷的真实尺寸, 并且当考虑射线弯曲时, 重建图像的赝象也有所降低。

PACS 数: 43.35

Ultrasonic Lamb wave tomography of through hole flaws in isotropic thin plates

ZHANG Haiyan¹ ZHOU Quan¹ LÜ Donghui¹ LIU Zhenqing²

(1 School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072)

(2 Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092)

Received May 17, 2005

Revised Apr. 20, 2006

Abstract A “cross borehole” tomographic reconstruction technique exploited by seismologists is used for quantitative Lamb wave nondestructive evaluation (NDE) in this paper. Combining ray tracing with algebraic reconstruction technique (ART), ultrasonic Lamb wave tomography for through hole flaws is developed. Based on Snell law and Fermat’s principle, ray tracing is used to find actual ray paths and calculate travel times of ultrasonic Lamb waves between transmitting and receiving transducers. ART is then carried out to realize the velocity imaging reconstruction for the given set of arrival times. Reconstruction for both simulated and experimental data acquired on aluminum plates with machined through hole flaws is presented with straight-ray and curved-ray. The results demonstrate that the sizes of flaws reconstructed with curved-ray ART appear to be closer to their real size than straight ray ART, and the artifacts of reconstructed images are also reduced when ray-bending is considered.

引言

相对传统体波的逐点扫描方式, 超声兰姆波检测因其一次扫描一条线, 并且收发探头可置于试件的同一侧, 对大型板类结构的无损检测具有快捷、高效的特点而备受关注。这使得研究人员不断努力, 发掘其在不同应用中的潜力^[1-4]。兰姆波可在结构的一点发射, 另一点接收, 对感兴趣的检测区域沿不同方向扫描, 得到多源发射—多源接收的兰姆波投影数据, 利用这些不同方向的投影数据可以重建缺陷区域的图像, 类似于地球物理、医学等学科的由投

影重建图像的层析成像 (Computerized Tomography, 简称 CT)。根据利用的理论基础不同, 层析成像可分为射线 CT (几何声学理论) 和衍射 CT (波动声学理论)。衍射理论中, 将物体看成声学量 (密度、声速等) 连续变化的非均匀体, 根据波动方程来求解声波的传播及散射声场, 在这些复杂的求解过程中, 往往需要做一些简化假定, 如弱散射近似等, 并采用 Born 近似或 Ratov 近似求解波动方程的近似理论。这些近似反而引起较大的误差, 致使衍射理论用于层析成像并不比射线理论有效。

由于兰姆波层析成像仅需在大型板结构的边缘

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (10504020)

设置换能器,即可能得到整个结构的质量图像,在定量无损评价方面具有较大的应用前景。兰姆波层析成像的思想来源于医学,医学上 X 射线 CT 的巨大成功使得层析成像逐渐拓展到无损检测领域。作为层析成像在兰姆波无损评价中的初步应用,国际上多将医学上的 X 射线层析成像方法直接用于兰姆波层析成像,也即假定超声兰姆波与 X 射线一样,在物体内部是以直线传播的,然后利用发射和接收换能器之间的时间延迟或振幅(能量)衰减,重建物体内部的声速或吸收特性参数^[5-14]。这种设想忽略了兰姆波的散射和衍射效应,是不切实际的。考虑到缺陷散射的影响, Malyarenko 和 Hinders^[15] 发展了兰姆波衍射层析成像,采用模拟退火、迭代打靶法弯曲射线追踪方法,以及 SIRT(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique)技术重建了铝板中的横穿圆孔、平底圆孔、平底椭圆孔缺陷,通过与直射 SIRT 成像的实验结果对比,其弯曲射线 SIRT 方法更接近于缺陷的真实尺寸,重建图像与缺陷的大小及其严重程度、射线密度及其均匀性等有关。文献 16 讨论了兰姆波遇单个横穿孔缺陷的散射,指出缺陷散射使得重建图像上出现从孔的边缘呈扇形条纹向周围辐射的赝象。

由此看来,作为直射技术的自然延伸,发展弯曲射线追踪方法寻求发射和接收换能器之间的真实传播路径,有可能提高重建缺陷的精度,降低赝象,提供高分辨率兰姆波层析图像。本文基于 Snell 定律和 Fermat 原理对发射换能器和接收换能器之间超声 Lamb 波的射线追踪问题进行了研究。根据声波层析成像原理,利用程函方程的积分,通过离散化处理,寻求声波射线与对应慢度(群速度的倒数)的关系,建立数学模型,然后采用代数重建方法(Algebraic reconstruction technique—ART)求解,实现了铝板中横穿孔缺陷的定量无损评价。

1 理论与方法

1.1 声波层析理论

用射线法求解复杂介质中的波场,其实质是一种近似高频渐近的方法,它借鉴了几何光学近似——光的直线传播、独立传播、反射和折射理论。在笛卡儿坐标系中, Helmholtz 声波方程^[17]为:

$$\nabla^2 p + \frac{\omega^2}{c^2(r)} p = -\delta(r - r_s), \quad (1)$$

式中, $r = (x, y, z)$, $c(r)$ 为声速, ω 是位于 r_s 的 δ 源的频率。若 $c(r)$ 是随空间连续变化的函数,则可近

似认为,不同频率 ω 的谐波虽有不同的振幅 $A_j(r)$,但有与振幅无关的相位。此时,方程(1)有如下形式的解:

$$p(r) = e^{i\omega\tau(r)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j(r)}{(i\omega)^j}. \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),令 $\omega \rightarrow \infty$ (高频近似),得:

$$|\nabla\tau|^2 = \frac{1}{c^2(r)}. \quad (3)$$

式(3)称为程函方程(Eikonal equation)。与波阵面垂直的矢量 $\nabla\tau$, 定义了常相位 $\tau(r)$ 的表面。几何声学中的射线也被定义为与波阵面垂直的曲线,这意味着 $\nabla\tau$ 总是与射线相切。因此,程函方程描述了波阵面与速度分布的空间关系,反映了走时与速度分布的数学关系,因而它是走时与速度分布的基本关系式。波阵面的法线族定义了射线,而走时 t 可看成是慢度 $S(r)$ (群速度的倒数)^[17] 沿射线的积分。由此可得:

$$t = \int_R \frac{1}{c(r)} dr = \int_R S(r) dr, \quad (4)$$

式(4)中, R 为积分路径。当介质速度发生变化时,射线方向随之改变。因此,实际上 R 为曲线。

1.2 基于 Snell 定律的射线追踪

在几何光学近似的条件下,费马原理(Fermat's principle)指出,光沿着一条路径在两个已知点之间传播的能量对于相邻路径的一阶偏差为零,即光沿着所需时间最短的路径传播。则式(4)中的积分路径 R 即是下面变分极小问题的解:

$$t = \int_R \frac{1}{c(r)} dr = \int_R S(r) dr = \min_{R'} \int_{R'} S(r) dr. \quad (5)$$

基于 Snell 定律的射线追踪方法^[18],不是直接求解波动方程(1),而是考虑到透射波路径上,任意两个介质的分界面两侧射线路径应满足 Snell 折射定律。这样,在穿过介质的整条射线路径上,任意连续三点之间也应该满足 Snell 折射定律(如图 1 所示):

$$\frac{\sin\theta_1}{V_1} = \frac{\sin\theta_2}{V_2}. \quad (6)$$

将 P_1 、 P_2 、 P_3 的坐标代入(6)式,可知:

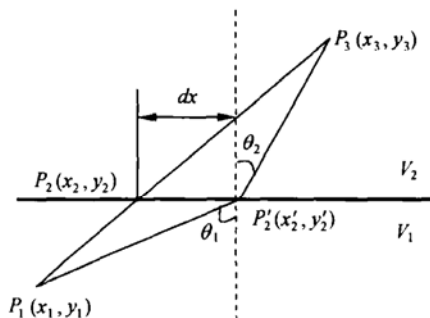


图 1 Snell 原理

(1) 当分界面为 x 轴方向时, 声波走时

$$t = f(dx) = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2 - dx)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{V_1} + \frac{\sqrt{(x_3 - x_2 - dx)^2 + (y_3 - y_2)^2}}{V_2} \quad (7)$$

对式 (7) 求导:

$$f'(dx) = \frac{(x_2 - x_1 + dx)}{V_1 \sqrt{(x_2 - x_1 + dx)^2 + (y_2 - y_1)^2}} - \frac{(x_3 - x_2 - dx)}{V_2 \sqrt{(x_3 - x_2 - dx)^2 + (y_3 - y_2)^2}}$$

根据费马原理, t 要取得最小值, 令 $f'(dx) = 0$, 则得到式:

$$\frac{V_1(x_3 - x_2 - dx)}{\sqrt{(x_3 - x_2 - dx)^2 + (y_3 - y_2)^2}} = \frac{V_2(x_2 - x_1 + dx)}{\sqrt{(x_2 - x_1 + dx)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (8)$$

由式 (8) 可以求得 dx 值, 从而得到折射点 $P'_2(x'_2, y'_2)$ 坐标, 其中 $x'_2 = x_2 + dx$, $y'_2 = y_2$ 。

(2) 当分界面为 y 轴方向时, 同理可得:

$$\frac{V_1(y_3 - y_2 - dy)}{\sqrt{(y_3 - y_2 - dy)^2 + (x_3 - x_2)^2}} = \frac{V_2(y_2 - y_1 + dy)}{\sqrt{(y_2 - y_1 + dy)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \quad (9)$$

由式 (9) 可求得 dy 值, 从而得到折射点 $P'_2(x'_2, y'_2)$ 坐标, 其中 $x'_2 = x_2$, $y'_2 = y_2 + dy$ 。

选用对分法求解方程 (8) 和 (9) 在区间 $[a, b]$ 的根, 区间 $[a, b]$ 对于方程 (8) 来说表示的是 $[x_1, x_3]$, 对于方程 (9) 来说表示的是 $[y_1, y_3]$ 。

1.3 ART 迭代重建算法

把待测区域介质和式 (5) 用 N 个网格离散化, 这时射线追踪问题转化为求射线通过的网格单元坐标、射线长度及走时。对第 i 条射线的走时表示为:

$$t_i = \sum_{j=1}^N l_{ij} s_j \quad (i = 1, 2, \dots, M), \quad (10)$$

式中: l_{ij} 是第 i 条射线穿过的第 j 个网格的路径长度, l_{ij} 的表示如图 2 所示, 图中的黑点表示换能器的发射位置 m 和接收位置 n 。 s_j 为第 j 个网格单元内慢度, N 为离散单元个数, M 为射线条数。当 M 条射线穿过检测区域时, 根据式 (10) 可以得到关于未知量 s_j 的线性方程组:

$$LS = T, \quad (11)$$

其中 $L = (l_{ij})_{M \times N}$ 为距离矩阵, $T = (t_i)_{M \times 1}$ 为走时列向量, $S = (s_j)_{N \times 1}$ 为慢度列向量。由于射线路径本身也与慢度参数有关, 式 (11) 的求解是一个反演过程, 即由走时数据求得各离散单元的慢度分布图像。

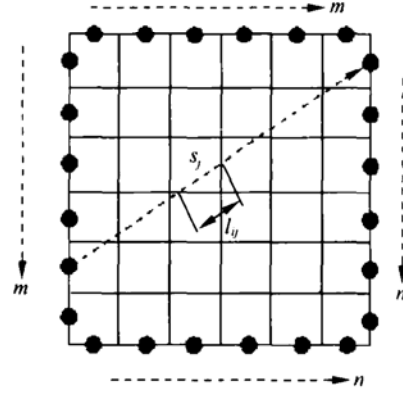


图2 跨孔扫描示意

(m : 发射位置; n : 接收位置)

射线密度对重建图像的质量是很关键的, 应尽可能让更多的射线穿过感兴趣的缺陷区域。然而, 射线条数的增多会使计算量大大增加, 从而增加图像重建的时间。ART 代数重建方法的优点是对较少的射线条数也即对不完整的投影数据也能获得令人满意的结果, 对下面将要进行的兰姆波跨孔扫描数据采集较为适用, 数值模拟和实验也证明了这一点。

2 数值模拟

假设由一块均匀介质构成的矩形铝板内存在横穿圆孔或椭圆孔缺陷, 在铝板的两个邻边 (图 2 中的左边和上边) 分别设置 (不必等间距) 若干个发射换能器 (图 2 中的黑点 m 所代表的位置), 在它们的对边 (图 2 中的右边和下边) 对等地安放同样多的接收换能器 (图 2 中的黑点 n 所代表的位置), 本次数值计算中取 $m = n = 15$ 。采用跨孔方式, 也即反复采用一点发射、多点接收的扇形扫描, 首先把发射换能器固定在第一个发射位置, 分别在对面的各个接收位置接收声波走时, 然后把发射换能器移动到下一个发射位置, 重复以上扇形扫描, 直到把每个发射位置全部做完, 则总共有 $15 \times 15 \times 2 = 500$ 条射线。

无缺陷铝板中兰姆波群速度频散曲线如图 3 所示, 计算中取纵波速度 $c_l = 6350$ m/s, 横波速度 $c_t =$

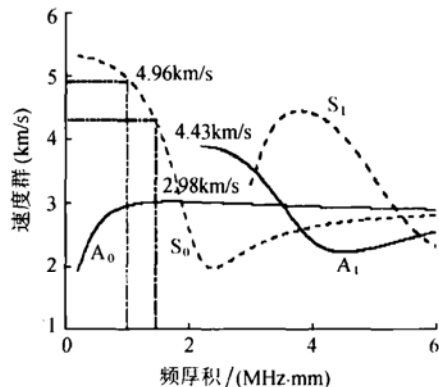


图3 铝板群速度频散曲线

3050 m/s。经计算, A_0 和 A_1 模式的重建图像与 S_0 模式肉眼看来差别很小, 因此, 这里仅给出 S_0 模式的结果。需要说明的是, 这里以及后面的实验中, 我们均是以无缺陷铝板在某频厚积下的群速度值作为理论计算值, 缺陷散射对兰姆波频散曲线的影响并没有考虑, 这在其他有关兰姆波层析成像的文献中都有应用^[5-15]。事实上, 在频厚积为 1 MHz·mm 下 (仅存在基本模式 A_0 、 S_0), S_0 模式的群速度为 4.96 km/s。根据兰姆波在传播过程中遇缺陷速度的变化, 基于上述射线追踪方法, 计算由每个发射器到达每个接收器的传播路径及走时, 作为 ART 层析成像的输入数据, 给出其重建图像。计算步骤如下:

(1) 建立速度模型。用于层析成像的铝板可以看成是由一个矩形网格组成, 这里, 我们将其划分为 $64 \times 64 = 4096$ 个网格, 每个网格中的介质速度假设是均匀的, 则每个网格中的速度是常数, 但是不同网格中的速度是不一样的。兰姆波遇强散射缺陷会发生衍射, 表现为兰姆波绕缺陷而行, 使得发射和接收之间的传播时间变长。模型中, 用速度降低的兰姆波描述缺陷, 大致相当于兰姆波绕过缺陷传播^[14,15,19]。若均匀介质铝板中 S_0 模式的传播速度为 4.96 km/s, 此数值模拟中, 我们用 2.5 km/s 代表缺陷区域。

(2) 建立直线模型, 作为初始模型。在已知发射点和接收点位置的情况下, 求出它们两点的连线与网格线的交点和直线路径的走时, 作为后面修正射线路径的初始值。

(3) 在初始直线模型上, 从发射点出发顺序选取

三点 (直线与网格的交点), 通过对分法求出中间折射点。用此修正的折射点替代先前假设的折射点, 以它为起点出发再顺序选取三点, 再求折射点。直到追踪到作为折射点的接收点前一点时, 完成一次射线追踪。

(4) 将发射点和中间修正的一系列折射点、接收点连起来就是修正好的射线路径, 计算它的走时 t_{i1} 。

(5) 再以接收点作为起点, 以修正好的射线路径作为基础再进行射线追踪, 得到另一条修正射线路径, 计算走时 t_{i2} 。

(6) 如此重复修正, 直到前后两次修正的射线路径的走时差 $\Delta t_i = t_{i1} - t_{i2}$ 小于某一控制精度为止, 才认为该射线追踪终止。

(7) 记录每条射线在各网格内的长度以及每条射线的走时, 进行 ART 层析成像输出。

图 4—图 6 给出了存在不同缺陷的铝板数值计算数据层析成像结果。图中的 (a) 示出了实际缺陷的形状、大小和位置, 图中的 (b) 和 (c) 为分别采用直射线 ART 和我们上面介绍的弯曲射线 ART 方法的重建图像结果。可以直观地看出, 图 4—图 6(b) 的直射线 ART 方法重建的缺陷尺寸比实际缺陷尺寸要大, 而图 4—图 6(c) 的弯曲射线 ART 重建的缺陷尺寸相对要小, 更接近于缺陷的真实尺寸。这表明我们所采用的方法能追踪到真实的射线路径, 层析成像的结果能反映真实的速度分布。

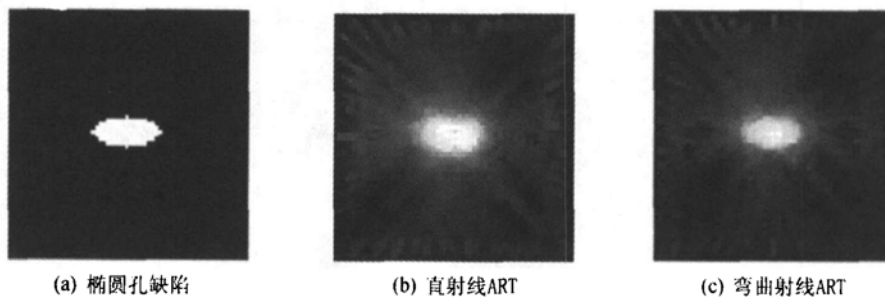


图 4 椭圆孔缺陷数值计算走时数据层析成像

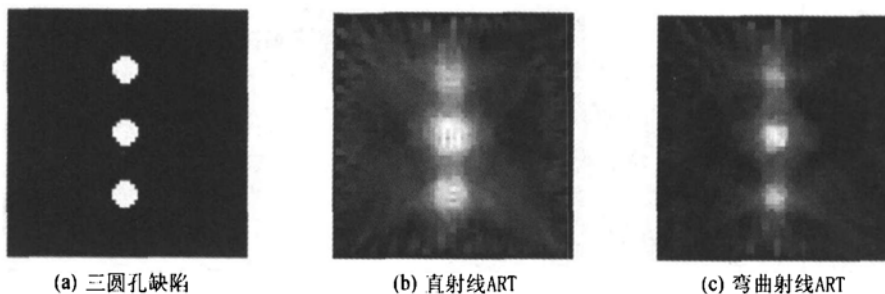


图 5 三圆孔缺陷数值计算走时数据层析成像

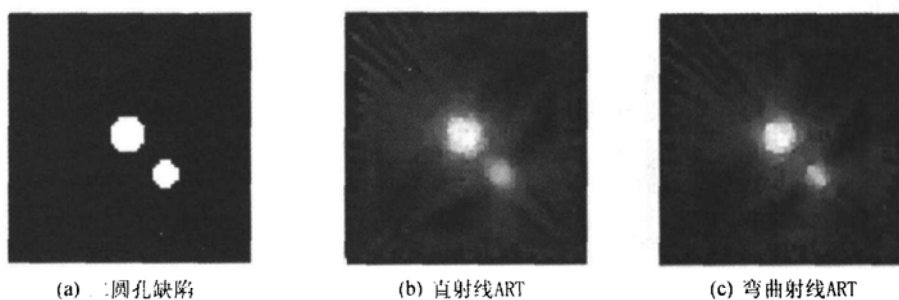


图 6 二圆孔缺陷数值计算走时数据层析成像

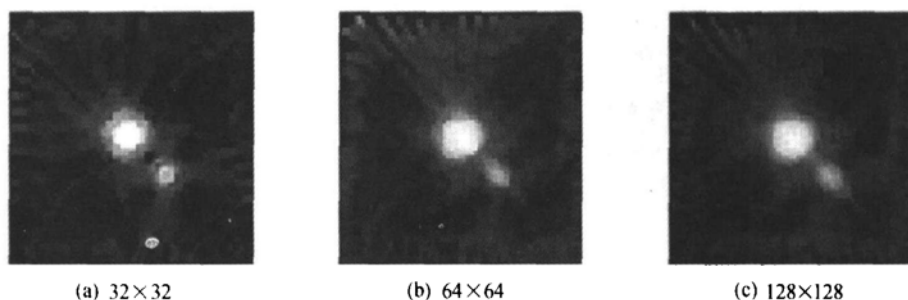


图 7 不同网格划分方式弯曲射线 ART 成像

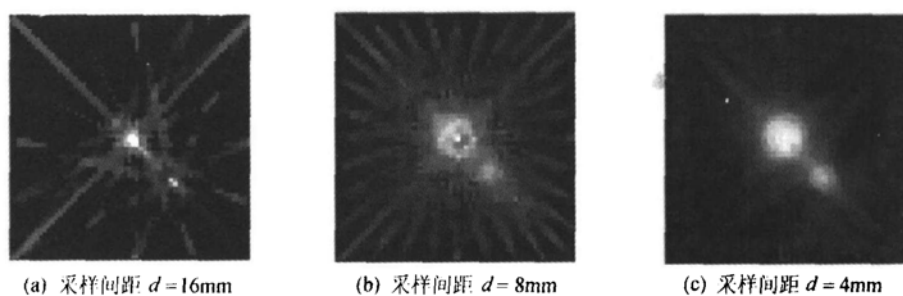


图 8 不同采样间距弯曲射线 ART 成像

网络的分割方式和换能器的间距对成像质量有一定影响。网格越密, 采样间距越小, 则扫描速度越慢, 而超声成像分辨率越高。图 7 和图 8 分别给出了不同网格划分方式和不同采样间距时两圆孔缺陷的弯曲射线 ART 成像结果。从图中可以直观地看出, 网格划分越细, 采样越密集, 成像效果越接近圆孔的真实形状。

3 实验

实验样品是厚为 1.44 mm 的铝板上存在 8 mm 直径的横穿孔缺陷。用普通的可变角超声纵波和横波换能器发射和接收兰姆波, 发射和接收换能器的中心频率均为 1 MHz。因此, 相应的频厚积为 1.44 MHz·mm。实验中我们以最快模式的到达时间作为实际走时, 则在此频厚积下, 应该为 S_0 模式, 其群速度的理论值为 4.43 km/s(见图 3)。虽然在理论上或实际现场检测中, 应采用方形阵列换能器以实现快速数据采集。然而, 在实验室条件下, 目前我们

仅采用一对独立的对发—对收换能器进行扫描。数字示波器的采样频率为 10 MHz, 采样点数为 2000, 发射换能器和接收换能器的发射角和接收角均为 27° 。采用图 9 所示的跨孔扫描, 在感兴趣的 $64 \times 64 \text{ mm}^2$ 区域(缺陷位于其中心)的水平方向和垂直方向布置换能器, 换能器的步长为 8 mm, 则各边共有 9 个收发位置。以左边为发射位置, 其对边为接收位置采集走时数据, 共得到 $9 \times 9 = 81$ 个走时数据。由于圆孔

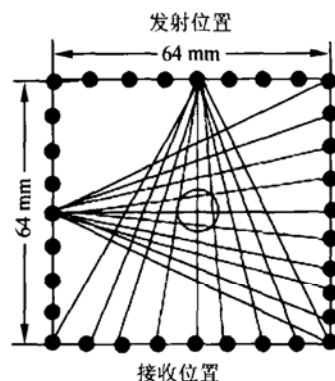


图 9 缺陷位置及收发探头跨孔扫描示意图

缺陷的对称性, 对上下收发位置我们采用了与左右收发位置相同的走时数据。这样, 在进行层析成像时共有 $9 \times 9 \times 2 = 162$ 个实验走时数据。图 10 给出了收发换能器频率为 1 MHz, 穿过圆孔中心换能器中心距为 64 mm 时的兰姆波波形, 此距离也为收发换能器之间的最短距离。

图 11(a) — (d) 给出了无缺陷和含有圆孔缺陷铝板 S_0 模式的理论及实验走时波形, 横坐标为射线编号, 纵坐标为时间, 波形中的黑点代表某条射线所对应的走时数值。图 11 中波形的振荡是由跨孔扫描中射线长度的变化引起的。从图 11 中可以直观地看出, 缺陷的存在使得兰姆波的传播时间延长, 这与实际是一致的。而弯曲射线的走时比直线走时更接近于实测走时, 因而弯曲射线追踪方法也能更反映超声兰姆波的实际传播路径。

本文的最终目的是要真实地重建铝板中缺陷的图像以实现兰姆波的定量无损评价, 因此, 还必须利用图 11 中的理论及实验走时数据进行层析成像, 同时也是为了验证我们所应用的方法的有效性。图 12

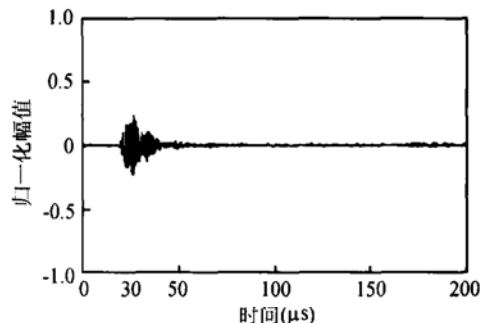
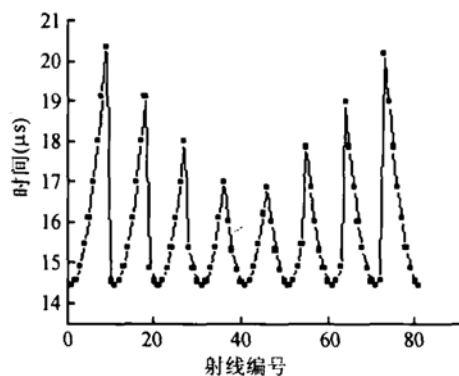
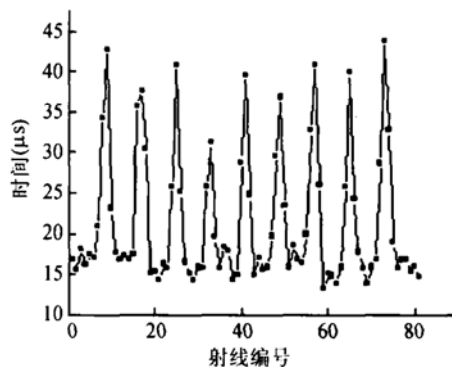


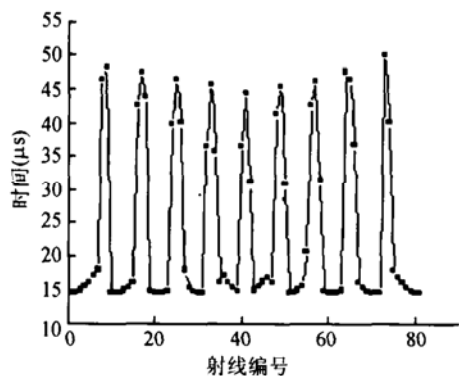
图 10 收发换能器频率为 1 MHz, 穿过圆孔中心换能器中心距为 64 mm 时的兰姆波波形。



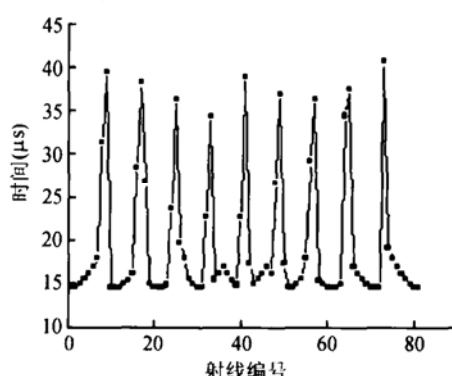
(a) 无缺陷铝板 S_0 模式理论走时



(b) 圆孔缺陷铝板 S_0 模式实验走时

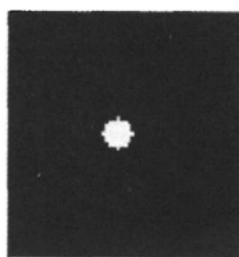


(c) 圆孔缺陷铝板 S_0 模式直线理论走时

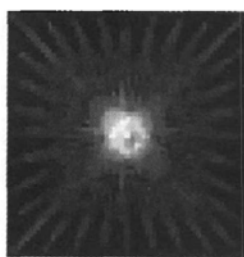


(d) 圆孔缺陷铝板 S_0 模式弯曲射线理论走时

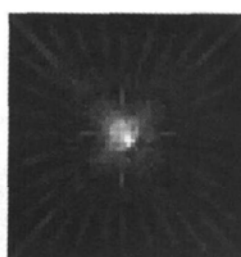
图 11 无缺陷及含圆孔缺陷铝板 S_0 模式理论及实验走时波形



(a) 圆孔缺陷



(b) 直射线ART



(c) 弯曲射线ART

图 12 圆孔缺陷铝板 S_0 模式实验走时层析成像

给出了圆孔缺陷的直射线和弯曲射线 ART 兰姆波层析成像结果, 图像尺寸均为 $64 \times 64 \text{ mm}^2$ 。成像过程如下:

(1) 将成像区域划分成 $64 \times 64 = 4096$ 个离散网格单元, 给出每个网格单元内速度分布的初始模型向量 V_0 (理论慢度), 记其倒数为慢度 S_0 。

(2) 根据发射和接收位置, 采用文中所述的射线追踪方法, 由公式 (10) 计算理论走时 $t_i^{th} (i = 1, 2, \dots, 162)$, 则共有 162 条射线路径, 得到 162 个走时数据。

(3) 计算拟合残差:

$$\Delta t_i = t_i^{ob} - t_i^{th} (i = 1, \dots, 2, \dots, 162). \quad (12)$$

式中: t_i^{ob} 为第 i 条射线的实测值, Δt_i 为走时实测观测值与理论计算值之差。

(4) 构造走时 (或速度) 扰动方程:

$$\Delta T = L \Delta S, \quad (13)$$

式中: $\Delta T = (\Delta t_i)_{162 \times 1}$ 为 162 维列向量, $\Delta S = (\Delta s)_{64 \times 64}$ 为初始模型参数 (慢度) 的修正量, $L = (l_{ij})_{162 \times 4096}$ 为理论计算的射线穿过网格的长度矩阵。

用 ART 方法, 由式 (13) 解出 ΔS 后, 代入下式对初始模型参数进行修正:

$$S = S_0 + \Delta S. \quad (14)$$

重复步骤 (2) — (5) 进行迭代计算, 直到走时观测值与理论计算值之差小于预先给定的某个精度, 这时的模型参数 S 即为最终慢度分布结果, 取其倒数得速度分布 V , 用于成像输出。

从成像结果来看, 图 12(c) 的缺陷尺寸更接近于其真实尺寸, 与数值模拟的结论是一致的。与文献 12 中兰姆波 CT 实验仅能确定缺陷中心所在位置的结论相比, 我们的实验结果要更为准确一些。

由于 A_0 模式在 $1.44 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 附近频散效应较 S_0 模式要低, 因而时域波包更易保持其形状, 作为对比, 我们也给出了 A_0 模式 (其群速度的理论值为 2.98 km/s , 见图 3) 的实验走时层析成像, 图 13 所示。

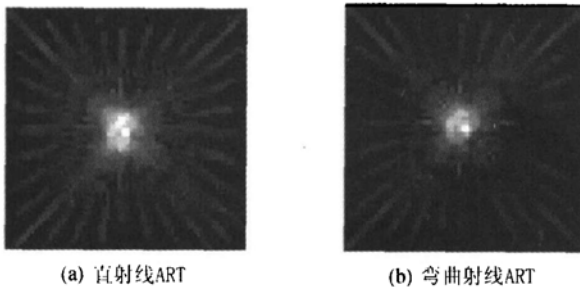


图 13 圆孔缺陷铝板 A_0 模式实验走时层析成像

可以看到, 对于 A_0 模式, 无论是直射线 ART 还是弯曲射线 ART, 其成像效果在缺陷的大小和形状方面比 S_0 模式都有所改善。图 12 和图 13 的实验结果与 Malyarenko^[15] 应用打靶法射线追踪、SIRT 成像方法所得到的结论是一致的, 从而验证了我们方法的正确性。

4 结束语

兰姆波对大型板类结构的快速扫描方式使其在工业无损检测中具有广阔的应用前景。然而, 由于其复杂的传播机理, 直接对其波形进行判断存在一定困难。本文根据兰姆波对发-对收检测的特点, 采用地球物理中的跨孔扫描方式, 将层析成像方法用于兰姆波无损检测, 从重建图像中可直观地观测缺陷的形状、大小和位置, 从而在很大程度上延伸了兰姆波定量无损评价的能力。

由于介质中横穿孔缺陷的衍射影响, 简单的照搬医学中的 X 直射线条层析成像方法与兰姆波的实际传播路径不符。通过与直射线条层析成像结果的对比, 基于 Snell 定律弯曲射线追踪方法可以追踪到真实的射线路径, 数值模拟和实验数据的 ART 层析成像可以较精确地反映缺陷的实际尺寸。

兰姆波遇横穿孔这样的严重缺陷会引起强散射, 使得重建图像上出现膈象。这种现象在直线层析和弯曲射线层析中都存在, 如图 4—图 6 以及图 12、图 13(b)、13(c) 中的星状射线条纹伪迹。与直射线条相比, 弯曲射线图像膈象的程度似乎有所降低。因此, 就膈象来说, 弯曲射线的重建图像质量也有所改善。

文中兰姆波层析成像实验既验证了所采用的理论和方法的可行性, 同时也为兰姆波层析成像走向实际应用奠定了一定基础。下一步的工作将是理论与方法的进一步改进以及实验系统的进一步完善, 如层析成像算法的优化, 精确提取走时数据的信号处理手段等, 从而使兰姆波定量层析成像的结果更为准确可靠。

参 考 文 献

- 1 刘镇清, 贺鹏飞, 易 勇. 一种用于计算板中缺陷兰姆波散射的混合边界元法. 力学季刊, 2003; 24(3): 334—340
- 2 郑祥明, 顾向华, 史立丰, 史耀武. 超声兰姆波的时频分析. 声学学报, 2003; 28(4): 368—374
- 3 Rose J L. A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential. J. Pressure Vessel Tech., 2002; 24: 273—282

- 4 张海燕, 刘镇清, 马小松. 界面层对层状各向异性复合结构中 Lamb 波的影响. *物理学报*, 2003; **52**(10): 2492—2499
- 5 Jansen D P, Hutchins D A. Immersion tomography using Rayleigh and Lamb waves. *Ultrasonics*, 1992; **30**: 245—254
- 6 Hutchins D A, Jansen D P, Edwards C. Lamb wave tomography using non-contact transduction. *Ultrasonics*, 1993; **31**: 97—103
- 7 Jansen D P, Hutchins D A, Mottram J T. Lamb wave tomography of advanced composite laminates containing damage. *Ultrasonics*, 1994; **32**: 83—89
- 8 Wright W, Hutchins D, Jansen D, Schindel D. Air-coupled Lamb wave tomography. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, 1997; **44**: 53—59
- 9 Hinders M K, Malyarenko E V, McKeon J C P. Contact scanning Lamb wave tomography. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998; **104**(3, part 2): 1790(A)
- 10 McKeon J C P, Hinders M K. Parallel projection and cross-hole Lamb wave contact scanning tomography. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999; **106**(5): 2568—2577
- 11 Malyarenko E V, Hinders M K. Fan beam and double cross-hole Lamb wave tomography for mapping flaws in aging aircraft structures. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000; **108**(4): 1631—1639
- 12 喻 明, 兰从庆, 许克克等. Lamb 波 CT 成像的实验研究. *声学技术*, 1995; **14**(4): 162—164
- 13 Hou J, Leonard K R, Hinders M K. Automatic multi-mode Lamb wave arrival time extraction for improved tomographic reconstruction. *Inverse Problems*, 2004; **20**: 1873—1888
- 14 Leonard K R, Malyarenko E V, Hinders M K. Ultrasonic Lamb wave tomography. *Inverse Problems*, 2002; **18**: 1795—1808
- 15 Malyarenko E V, Hinders M K. Ultrasonic Lamb wave diffraction tomography. *Ultrasonics*, 2001; **39**: 269—281
- 16 Malyarenko E V, Hinders M K. Lamb wave scattering from a through hole. *J. Sound and Vibration*, 1999; **224**(5): 843—862
- 17 Wang Y Q, Kline R A. Ray tracing in isotropic and anisotropic materials: Application to tomographic image reconstruction. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1994; **95**(5): 2525—2532
- 18 唐修生, 王五平, 方 璟等. 基于 Snell 定律的射线追踪程序实现及模拟计算. *焦作工学院学报 (自然科学版)*, 2004; **23**(2): 118—122
- 19 Leonard K R, Hinders M K. Guided wave helical ultrasonic tomography of pipes. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2003; **114**(2): 767—774

声学消息

中国声学学会第六届会员代表大会暨 2006 年全国声学学术会议

中国声学学会第六届会员代表大会暨 2006 年全国声学学术会议于 2006 年 10 月 18 日—10 月 22 日在厦门召开。共有 430 人参加了本次大会。马大猷院士、应崇福院士、张仁和院士、侯朝焕院士、杨士莪院士、马远良院士、吴硕贤院士等参加了会议。

根据中国声学学会的章程, 参加会议的中国声学学会第六届会员代表审议通过了第五届理事会工作报告、财务报告, 审议通过了中国声学学会章程(修改稿)。选举产生了中国声学学会第六届理事会理事 98 名。在第六届理事会第一次会议上, 选举产生了中国声学学会第六届理事会常务理事 30 名。第六届理事会同时还选举田静为中国声学学会第六届理事会理事长, 杨德森、宗健、钱梦霖、程建春为中国声学学会第六届理事会副理事长, 张春华为中国声学学会第六届理事会秘书长。经第六届会员代表大会审议聘任张仁和、侯朝焕为名誉理事长, 王威琪、汪承灏、宫先仪、侯自强为名誉理事。

本次学术会议共收到学术论文 356 篇。论文集中刊登论文 282 篇, 包括综述报告 3 篇, 物理声学 13 篇, 水声学 62 篇, 超声学、量子声学及声学物理效应 58 篇, 噪声、噪声效应及其控制 34 篇, 结构与建筑声学 14 篇, 语言声学及语音通讯 14 篇, 生理与心理声学 11 篇, 生物声学 1 篇, 音乐声学 3 篇, 声学测量、信号处理与分析的方法、仪器 55 篇, 声学换能器 14 篇。

应崇福院士作了“液体中的声处理应用和声空化工程”的综述报告。沈钧贤研究员作了“动物声通讯及听觉机理研究新进展”综述报告。李明轩研究员作了“检测超声”的综述报告。综述报告介绍了声空化、声通讯及检测超声三个研究领域的当前最新进展及未来发展趋势。

大会分七个分会场进行学术交流, 分别是水声学, 噪声、噪声效应及其控制和结构与建筑声学, 超声、量子声学及声学物理效应, 声学测量、信号处理与分析的方法、仪器, 语言声学及语言通讯和生理与心理声学, 声学换能器, 物理声学。

同时在会上还召开了矢量水听器与环境噪声标准两个专题研讨会。

(中国声学学会学会办公室)