

# 缺陷形貌的超声成像方法

徐琰锋, 胡文祥, 王 浩

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

**摘要:** 传统超声成像方法如合成孔径聚焦技术、超声衍射时差法, 只能确定缺陷的位置, 无法对整个缺陷形貌进行成像。逆时偏移方法基于波动方程、有限元或有限差分等方法计算声源的正延拓声场分布和接收回波的逆时延拓声场分布, 并对其采用互相关等成像条件, 可以成像缺陷的形貌。针对平底狭缝铝块试样, 采用多阵元超声换能器扫描, 将接收数据用于成像, 并与合成孔径聚焦技术的成像比较, 结果很好验证了逆时偏移成像方法的优越性。

**关键字:** 形貌成像; 逆时偏移; 多元阵

中图分类号: O426.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-03-0222-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.03.008

## Ultrasonic method for imaging appearance of defect

XU Yan-feng, HU Wen-xiang, WANG Hao

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

**Abstract:** Traditional ultrasonic imaging methods, such as the synthetic aperture focusing technique and the time of flight diffraction, can find the position of a defect. However, it cannot image shape and appearance of the defect. The reverse time migration (RTM) method based on wave equation and implying the cross-correlation imaging condition between source propagation field and back-propagation field, which are calculated from measuring data by using finite element or finite differential method, can image shapes and appearances of defects. A multi-elements transducer is used to scan aluminum sample with a slot in our experiment. Comparing with synthetic aperture focusing technique, RTM imaging results show that it is a method superior to traditional one.

**Keyword:** imaging of defect appearance; reverse time migration; multi-element array

## 0 引言

传统超声成像方法<sup>[1,2]</sup>仅仅能够确定缺陷的位置及横向尺寸, 无法获得缺陷的形貌信息。无法准确评估缺陷, 为结构健康监控带来了极大的困难。比如, 检测存在平底竖直狭缝的试样和内部有圆孔缺陷的试样, 只要两者缺陷的上表面形状尺寸相当, 合成孔径聚焦技术(Synthetic Aperture Focus Technique, SAFT)<sup>[3]</sup>及其他传统成像方法得到的成像结果几乎完全相同。其原因是, 传统的超声成像方法实现方式较为简单, 并未利用声场中的众多信息, 如多次反射波。相反, 为了减小伪像, 提高成像信噪比, 传统成像方法往往采用各种滤波方法压制多次反射波。然而, 缺陷的下表面及侧面结构信息恰恰隐藏在多次反射波中。

有效利用多次反射波信息的成像方法需要满足两个条件。首先, 成像方法必须基于波动方程。大多数传统成像方法基于射线理论, 如时域 SAFT, 通过计算表面接收换能器到达成像点的传播时间, 延时叠加获得成像。使用射线理论计算多次反射波的传播路径是相当不切实际的。其次, 成像方法必须能够处理界面的反射与折射。频域 SAFT<sup>[4]</sup>是以波动方程为基础, 为了解决时域 SAFT 在多层介质成像的困难而被提出的。但是, 其计算方法无法使声波在界面上反射, 多次反射波不能够聚焦到缺陷上, 却可能在下层介质中形成伪像<sup>[5]</sup>。

源于地震成像领域的逆时偏移方法(Reverse Time Migration, RTM)<sup>[6]</sup>基于波动方程, 使用有限元或有限差分等数值方法计算声波在假设的声场模型中传播, 因此可以处理多次反射波。上世纪 80 年代, 该方法由 Whitmore<sup>[7]</sup>, Baysal<sup>[8]</sup>, Mcmechan<sup>[9]</sup>等学者相继提出, 可以理解为将表面接收数据沿着时间减小的方向反向传播的过程, 由反射点散射的声波重新聚焦回到散射点位置。

叠前逆时偏移的成像条件都是以 Claerbout 的时间一致性理论<sup>[10]</sup>为基础, 即反射界面存在于震源

收稿日期: 2013-11-30; 修回日期: 2014-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11374230, 11104205)。

作者简介: 徐琰锋(1988—), 男, 上海人, 博士研究生, 研究方向为超声无损检测。

通讯作者: 胡文祥, E-mail: wxhu@tongji.edu.cn

波场和接收波场在时间和空间上一致的地方, 成像条件主要有三种<sup>[11]</sup>: 激发时间成像条件, 振幅比成像条件和互相关成像条件。激发时间成像条件, 利用射线追踪确定声波到达成像点的时间, 使用有限差分逆推声场到这一时刻, 将该位置在此时刻的位移作为成像值。激发时间成像条件难以处理多次反射波, 成像质量较低, 无法获得缺陷形貌信息。对于复杂结构, 激发时间成像条件较难得到准确的传播时间。振幅比成像条件利用接收回波逆时延拓声场, 将其和声源沿时间正向延拓声场的比值表征反射系数, 但是稳定性不高。相对而言, 互相关成像条件<sup>[12]</sup>应用广泛, 由 Claebout<sup>[10]</sup>提出的零延迟互相关成像条件发展而来, 使用声源沿时间正向延拓声场和接收回波沿时间逆向延拓声场的互相关表征界面成像值。根据时间一致性理论, 声场互相关系数越大的位置存在缺陷或界面。

本文针对平底垂直狭缝的铝块试样, 采用线阵换能器扫描。并且对实验数据进行逆时偏移, 采用互相关条件成像。本文使用商业有限元软件 COMSOL Multiphysics 计算声场。声场的计算模型的尺寸及参数与试样均相同, 但不存在任何缺陷。

## 1 逆时偏移技术

逆时偏移基于波动方程, 分别计算声波沿时间增大方向的正向传播和沿时间减小方向的逆时传播。根据时间一致性原理, 应用成像条件表征成像值。一般, 逆时偏移的声场计算基于声学波动方程<sup>[13]</sup>

$$\nabla \nabla \cdot p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

$\nabla$  为拉普拉斯算符,  $c$  是材料的声波速度, 声压  $p$ 。

采用多阵元换能器对缺陷试样进行扫描, 记录下所有阵元的接收回波数据。接收数据应用于逆时偏移, 其成像方法可以分为以下三个步骤:

(1) 假设合适的声场模型, 基于上述波动方程计算声源沿时间正向传播声场。

(2) 将实验测量或仿真得到的记录回波数据作为声源, 在步骤(1)假设的声场模型中计算沿时间逆向传播声场。

(3) 应用互相关成像条件, 计算空间各点成像值。

逆时偏移方法的步骤(2), 声场沿时间反向传播类似于 Fink 的时间反转概念<sup>[14]</sup>。时间反转方法通过将多阵元相控阵探头的接收信号反转, 并入射到原试样, 实现声波在缺陷处聚焦的目的, 从而增强缺

陷回波的幅度。声场的逆时延拓则是在无缺陷的假设模型下, 模拟各阵元的接收回波沿时间减小的方向传播的过程。本文的处理方法首先将接收信号时间反转, 然后将反转后的信号输入到各个阵元, 计算声波沿时间正向传播的声场。这里需要说明, 将接收信号时间反转后, 计算其沿时间正向传播的声场, 其计算结果和接收信号沿时间反向传播的声场是相同的。时间反转是通过实验的方式达到增强缺陷信号的目的, 而逆时偏移则是通过数值计算方法模拟声波的逆时传播场, 并最终获得成像的后处理算法。两者的思想相似, 但实现方式及目的完全不同。

图1中存在平底狭缝的试样表面放置多阵元换能器, 其中第  $S$  个阵元作为声源发射信号, 所有阵元同时接收回波信号。假设合理的计算声场模型, 一般尺寸及声学参数与试样相似, 但不存在任何缺陷。声源  $S$  发射的声波在模型中的正向声传播, 记录下各个时刻的空间声场分布  $S_s(x, y, t)$ 。声源正向传播场的计算可以预先完成。将接收阵元  $R$  接收的回波信号作为声源, 计算其在模型中的逆时延拓, 并记录空间声场分布  $R_s(x, y, t)$ 。

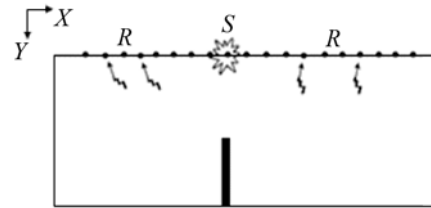


图1 多阵元超声测试示意图

Fig.1 Scheme of testing with a multi-elements ultrasonic transducer

假设表面激励声源信号为  $F(t)$ , 接收回波为  $p(x, 0, t)$ , 则正向声传播和逆时声传播的输入信号分别是

$$\begin{aligned} S_s(x, 0, t) &= F(t) \\ R_s(x, 0, t) &= p(x, 0, T-t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $T$  为接收波形的最大时间。为了便于使用有限元方法计算声场传播, 将接收回波时间反转<sup>[14,15]</sup>。时间反转后, 声场的延拓时间是从  $t=0$  到  $t=T$ 。对  $S_s(x, y, t)$  和  $R_s(x, y, t)$  进行互相关计算, 作为空间点  $(x, y)$  的成像值。

$$I(x, y) = \frac{\sum_t S_s(x, y, t) R_s(x, y, t)}{\sum_t S_s^2(x, y, t)} \quad (3)$$

根据 Claerbout 的时间一致性原理, 只有当声源发射的声波与接收信号逆时传播的声波在空间某位置相遇时, 表明该位置存在缺陷或界面, 此时,  $S_s(x, y, t)$  与  $R_s(x, y, t)$  的互相关值最大。因此, 用其

表征成像值。某位置  $(x, y)$  的互相关值越大, 表示该位置存在散射点的可能性越大。式(3)的成像条件用  $S(x, y, t)$  归一化, 可抑制靠近声源的伪像。根据不同情况, 也可使用  $R(x, y, t)$  归一化。最后, 将不同位置声源得到的成像图叠加, 完成逆时偏移成像。

## 2 实 验

实验系统采用 Ultrasonix 公司开放性多阵元相控阵研究平台, 并使用 128 通道的信号采集器 SonixDAQ 采集信号, 采样频率为 40 MHz。多阵元探头 128 阵元, 阵元宽度为 0.2698 mm, 间隔为 0.3048 mm。图 2 是平底裂缝铝块和多阵元探头, 铝块厚度为 23 mm, 裂缝宽度为 0.5 mm, 高为 12 mm, 相对于线阵孔径尺度, 铝块长度很大, 因此左右边界的反射波可以不予考虑。发射频率为 3 MHz, 接收延迟时间为 6.7  $\mu\text{s}$ , 接收信号的时间长度要能够包含多次反射波, 但是不同模式成分的多次反射波也是产生伪像的主要原因。因此, 需要选择合理的接收时间长度, 这里接收总时间设置为 16.5  $\mu\text{s}$ , 恰好能接收到铝块底部的二次反射波。扫描过程是第  $4n+1$  个阵元发射声信号( $n=0, 1, 2, \dots, 31$ ), 所有阵元同时接收回波。

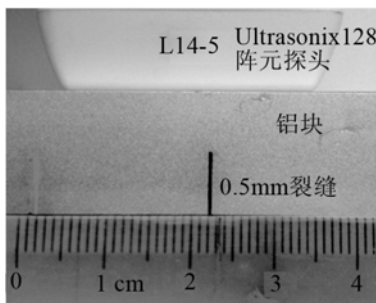


图 2 实验样品及多阵元换能器  
Fig.2 Experimental sample and multi-elements transducer

## 3 结果及讨论

图 3 是 B 型扫描图, 存在激发电干扰信号(标记 3)。槽表面的回波(标记 1)到达时间约为 3.5  $\mu\text{s}$ , 铝块下界面的第一次回波(标记 2)到达时间是 7.3  $\mu\text{s}$ , 7.3  $\mu\text{s}$  后接收到的回波都是多次反射波。虽然多次反射波的幅度很小, 但是包含缺陷的侧面形貌信息。

图 4 是第 61 个阵元( $n=15$ )发射, 所有 128 个阵元接收到的回波信号。从图 4 可以看到表面波的幅度很大, 且与缺陷回波混杂在一起。表面波的存在会对成像结果造成极大的影响, 因此在计算成像前

需要先滤去表面波。表面等间隔阵元的表面波到达时间间隔相同, 从图 4 可以看到其视速度不变, 因此表面波成分在频率波数域呈倾斜直线分布(如图 5 箭头标记)。利用这一特点, 采用 FK 滤波就可以有效地压制接收信号中的表面波成分。FK 滤波后的波形如图 6 所示。从图 6 可见, 中表面波被抑制的同时, 完好地保留了缺陷及界面的回波。

接收信号滤去表面波后, 作为逆推声场的声

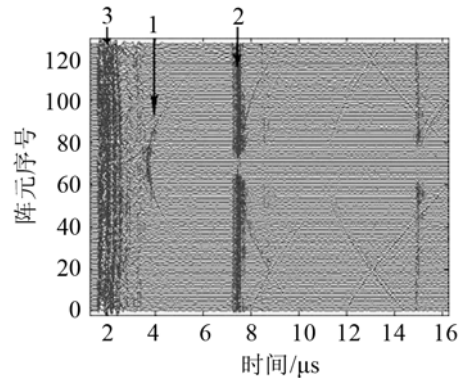


图 3 平底狭缝铝块的 B 型扫描图。1-裂缝缺陷回波; 2-铝块底部回波; 3-电干扰信号。  
Fig.3 B-Scan result of aluminum sample with a slot (Mark 1, echo from slot; 2, Echo from the bottom of aluminum block; 3, Electrical disturbance signal)

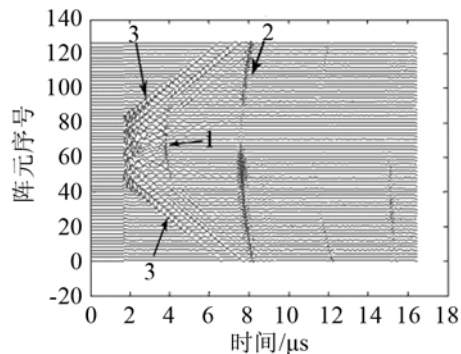


图 4 接收信号。1-缺陷回波; 2-底部界面回波; 3-表面波  
Fig.4 Receiving data: 1, Defect echo; 2, Echo from bottom of block; 3, Rayleigh wave

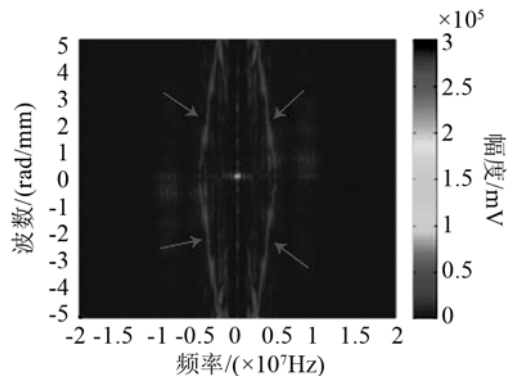


图 5 接收信号(图 4)的频率波数域分布 (箭头标记的斜线表示表面波能量)  
Fig.5 Receiving data (Fig.4) in frequency-wavenumber domain (The oblique lines, arrows marked, stand the Rayleigh wave power.)

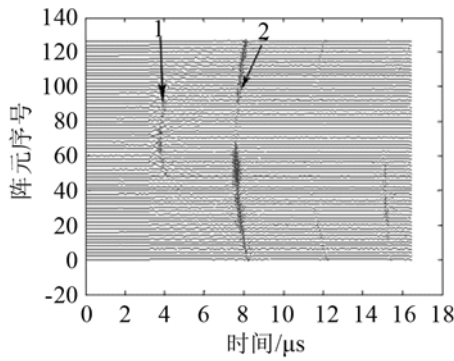


图 6 FK 滤波。1-缺陷回波；2-底部界面回波  
Fig.6 FK filtering. 1, Defect echo; 2, Echo from bottom of block

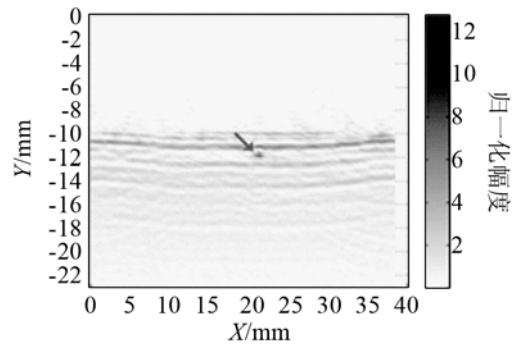


图 8 SAFT 成像(箭头标记出裂缝位置)  
Fig.8 SAFT result (Slot position is marked by arrow)

源，输入到声场计算模型中，应用有限元法计算声场的逆时传播。假设矩形模型的水平长度是 40 mm，与多阵元换能器的长度相同，高度是 23 mm，与铝块的高度相同，声传播速度  $c=6300$  m/s，密度  $2700$  kg/m<sup>3</sup>。矩形有限元模型的上下边界为全反射边界，左右侧边界设置为辐射边界。

有限元计算得到所有 32 组接受数据的逆时传播声场  $R_s(x, y, t)$ 。将  $R_s(x, y, t)$  和预先计算的声源正向传播场  $S_s(x, y, t)$  应用互相关成像条件(式(3))，得到的成像结果见图 7。声波无法透射到狭缝内，因此在狭缝内部声场的互相关值相对较小。在图 7 的灰度图中可清晰地看到白色的狭缝形貌。狭缝像的位置及高度与实际缺陷相同，横向宽度略有差异。

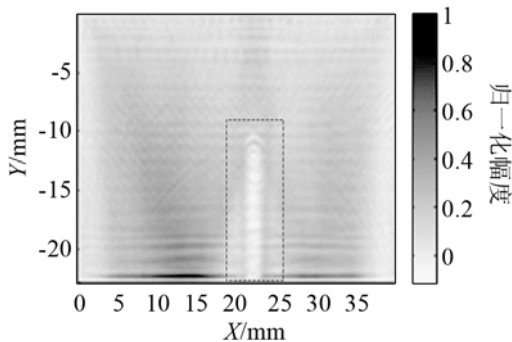


图 7 RTM 成像(矩形框标记裂缝缺陷)  
Fig.7 RTM result (Slot defect is marked by rectangle.)

合成孔径聚焦技术(SAFT)广泛应用于超声成像领域，可以提高成像分辨率。这里，为了验证逆时偏移方法独特的优点，将逆时偏移结果和 SAFT 的成像结果进行比较。如图 8 是对图 3 的 B 型扫描数据采用频域 SAFT 方法得到的成像结果，箭头标记的是 SAFT 成像结果的缺陷像，图 8 中的横线是由于过滤电干扰信号(图 3 中的标记 3)引起的信号跳变。SAFT 虽然能够准确地确定狭缝上端的位置，但无法获得整个缺陷的形貌信息。显然，传统方法无法成像缺陷的形貌，逆时偏移成像技术可以弥补

传统成像方法在形貌成像上的劣势。

目前，信噪比不佳是逆时偏移成像结果中存在的不足之处。图 8 中，狭缝缺陷周围分布着较多伪像。声波在固体中传播时，换能器接收到的信号存在纵波和横波等模式转换波。式(1)的标量波动方程忽略模式转换波的影响，只能考虑一种模式波的传播。因此，接收回波中的其他成分会以与实际不相等的传播速度在模型中传播。这些模式转换波无法在缺陷位置聚焦，反而会形成伪像。在上述计算模型中，采用铝块的纵波速度作为声传播速度。那么回波中的横波成分以及转换波成分，被以纵波速度重新发射出去，这些回波无法在散射点位置发生聚焦，就形成了伪像，降低整个成像质量。也就是说，当以纵波速度作为声传播速度时，只有未发生过任何模式转换的纯纵波能够准确地聚焦在狭缝位置，而其他模式波是产生伪像的主要原因。

### 4 结论

针对固体块中的纵向分布裂缝缺陷，采用逆时偏移技术进行了成像方法研究。实验采用多阵元换能器扫描平底狭缝的铝块，将接收数据应用于逆时偏移，并使用互相关成像条件表征成像值，得到的成像结果能够清晰地分辨槽的位置及形貌，获得了良好效果。

实验的成像结果表明逆时偏移能够较好成像缺陷的形貌，相对于传统的合成孔径成像方法有明显的优越性。但成像结果也存在伪像。造成伪像的主要原因是声场计算均以纵波速度为声波速度，接收回波中的转换波模式被以与其不相同的声波速度传播，无法在缺陷位置聚焦。分离纵横波模式是解决伪像的最直接方法，也是目前正在开展的工作。相关结果将另文讨论。

当然，逆时偏移成像方法也存在其他缺点，如

计算量巨大, 极其耗时, 高效率的声场快速算法也将是需要考虑的课题。

#### 参 考 文 献

- [1] 彭虎. 超声成像算法导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.
- [2] Stepinski T. Ultrasonic nondestructive inspection of solid objects[C]// AIP Conference Proceedings. 2012, 1433: 11.
- [3] Spies M, Rieder H, Dillhöfer A, et al. Synthetic aperture focusing and time-of-flight diffraction ultrasonic imaging—past and present[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2012, 31(4): 310-323.
- [4] Busse L J. Three-dimensional imaging using a frequency-domain synthetic aperture focusing technique[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1992, 39(2): 174-179.
- [5] Olofsson T. Phase shift migration for imaging layered objects and objects immersed in water[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2010, 57(11): 2522-2530.
- [6] 牟永光. 地震数据处理方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- [7] Whitmore N D. Iterative depth migration by backward time propagation[C]// 1983 SEG Annual Meeting. 1983.
- [8] Baysal E, Kosloff D D, Sherwood J W C. Reverse time migration[J]. Geophysics, 1983, 48(11): 1514-1524.
- [9] McMechan G A. Migration by extrapolation of time-dependent boundary values[J]. Geophysical Prospecting, 1983, 31(3): 413-420.
- [10] Claerbout J F. Toward a unified theory of reflector mapping[J]. Geophysics, 1971, 36(3): 467-481.
- [11] Chattopadhyay S, McMechan G A. Imaging conditions for prestack reverse-time migration[J]. Geophysics, 2008, 73(3): S81-S89.
- [12] Kaelin B, Guitton A. Imaging condition for reverse time migration[C]// 2006 SEG Annual Meeting. 2006.
- [13] Sava P, Hill S J. Overview and classification of wavefield seismic imaging methods[J]. The Leading Edge, 2009, 28(2): 170-183.
- [14] Fink M. Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1992, 39(5): 555-566.
- [15] Müller S, Niederleithinger E, Bohlen T. Reverse time migration: a seismic imaging technique applied to synthetic ultrasonic data[J]. International Journal of Geophysics, 2012, Article ID: 128465.