

CHAOSHENG CHENGXIANG
JIANCE FANGFA DE YANJIU YU SHIXIAN

超声成像

检测方法的研究与实现

王浩全 © 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

超声成像检测方法的 研究与实现

王浩全 著

国防工业出版社

· 北京 ·

前 言

超声成像检测由于能够通过彩色或灰度图像反映被测材料内部的质量,可以方便地对缺陷进行定性定量分析,已逐渐成为研究的热点之一。本书主要完成了以下几个方面的工作。

在研究 C 型显示原理的基础上,研制了超声 C 扫描成像检测系统。该系统以工控机为核心,主要包括机械扫查装置、超声发射接收、数据采集和控制电路等部分。在对超声波声场深入探讨的基础上,采用基于时频域的分析方法,运用该系统对树脂基复合材料深度方向的 C 型显示、成像特性等方面进行了有益的探讨。

针对超声层析成像检测中,获取的数据不完全、干扰因素多、误差大等缺点,提出了一种基于环绕式的阵列成像检测方法。该方法具有两大优点:

①可以布置成任意形状,既可以根据试件的形状来布置,也可以根据重建算法的难易程度来布置;

②超声波所经过的区域更加广泛,获得的数据更加全面。

在材料内部衍射较弱、只考虑折射现象的情况下,将射线理论引入到超声层析算法中。针对线性插值射线追踪算法中发射点和缺陷都处于同一列(行)时得到的路径难以绕开缺陷区的缺点,提出了一种基于交叉扫描的射线追踪算法。该算法采用交叉扫描的方式进行前向处理,引用离散点作为次级元对后向处理过程进行简化。通过对路径的追踪证明新的算法能够有效地解决线性插值射线追踪算法中存在的问题。

在获得超声最小走时和最短追踪路径的基础上,利用最小二乘法准则,对 SIRT 重建算法进行了推导。在相关系数矩阵的求取方面,提出了四边扫描算法。该方法利用像素的四条边所在直线与实际超声波的交点,通过判断交点与像素四个边界点的大小关系来实现系数矩阵的求取,使得系数矩阵求取更加方便、快捷。通过实验研究表明:采用环绕式阵列成像方法,在求取系数矩阵的基础上,利用联合迭代重建算法,在同样的迭代次数下,获得的数据更加精确,成像效果更好。

在材料内部衍射较强的情况下,从超声波在连续介质中的传播特性出发,建立了关于精确散射场和全场的波动方程,运用矩量法实现了散射场和全场方程的离散化。基于环绕式阵列成像方法对实验模型进行了设计,利用 Picard 准则对实验模型能否进行正则化进行了判别。运用变形的 Born 迭代解决了波动方程的非线性问题,利用截断奇异值分解正则化方法解决了波动方程的稳定性问题。经实验证明本文所采用的基于空间域层析成像方法不再基于某种近似,可以运用到较强散射的情况,可以反演较高的对比度,而且具有更高的成像质量。

在讨论小波阈值降噪方法的基础上,分析了 Dohono 软、硬阈值化方法存在的缺点,设计了一种基于双曲线的新小波阈值函数。该阈值函数通过对参量的调节,可以获得较优的小波系数的阈值估计,能够克服硬阈值函数不连续和软阈值函数有偏差的缺点。针对超声层析图像的特点,基于区域分割原理,利用灰度直方图区域生长提供生长准则,同时改变分割方向,得到了一种新的分割思路,从而较好地解决了抗噪性和分割精度间的矛盾。基于区域生长与模糊聚类分析方法,提出了区域生长与聚类分析相结合的分割算法,该算法在处理图像中由于信息不足而产生的模糊不确定问题时更加符合实际。

本书是作者在从事超声检测工作十余年的基础上,结合横纵向科研项目完成的。在这里衷心感谢导师韩焱教授对我的精心培养和教育,衷心感谢杨录副教授在成书过程中给予的帮助。我能够顺利地完成本书,是与工作和学习的环境——仪器科学与动态测试技术教育部重点实验室和山西省无损检测工程技术研究中心分不开的,这里的老师和同学给予了我很大的帮助,在此表示衷心感谢!

本书得到了山西省自然科学基金项目、山西省高校科技研究开发项目(200713013)、山西省研究生优秀创新项目(20081068)和中北大学仪器科学与动态测试技术教育部重点实验室青年基金项目的资助。

由于作者水平有限,本书内容还需要不断改进和完善,文中的错漏在所难免,恳请各位专家、师长和同行赐教指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 题目的来源与意义	1
1.2 超声扫描成像的国内外发展现状	3
1.3 射线层析成像的国内外发展现状	4
1.4 波动层析成像的国内外发展现状	6
1.5 超声反演图像处理的研究现状	10
第 2 章 超声检测原理	13
2.1 超声波的产生与接收	13
2.2 超声波的传播特性	14
2.2.1 描述声场的物理量	14
2.2.2 近场区和远场区	15
2.2.3 超声波的界面传播	17
2.2.4 惠更斯原理	19
2.3 超声检测方法	20
2.3.1 超声检测原理	20
2.3.2 探头的选择	22
2.3.3 超声波用于探伤时采用的基本物理量	25
第 3 章 超声 C 扫描成像检测方法	27
3.1 超声 C 扫描显示原理	27

3.2	扫描成像系统的设计	29
3.2.1	机械扫描装置	29
3.2.2	超声波发射接收电路	29
3.2.3	数据采集卡	33
3.2.4	软件部分	38
3.3	检测信号的处理	38
3.3.1	信号的降噪处理	39
3.3.2	信号的特征提取	40
3.4	成像结果与分析	42
3.5	小结	44
第4章	基于射线理论的透射层析成像	45
4.1	层析成像的反演方法	45
4.1.1	变换重建法	45
4.1.2	级数展开法	54
4.2	射线追踪算法的改进	56
4.2.1	常规的射线追踪算法	56
4.2.2	走时路径追踪基础	60
4.2.3	线性插值射线追踪算法中存在的问题	62
4.2.4	基于交叉扫描的射线追踪算法	64
4.2.5	路径追踪结果与分析	69
4.3	迭代重建算法	71
4.3.1	迭代重建算法在超声 CT 中的最优准则	71
4.3.2	代数重建算法	74
4.3.3	联合迭代重建算法	75
4.4	基于四边扫描算法的系数矩阵求取	78
4.5	基于环绕式的阵列探头布置方法	80
4.5.1	线阵探头布置方法	80

4.5.2	环绕式探头布置方法	81
4.6	重建结果与分析	82
4.7	小结	88
第5章	基于波动理论的散射层析成像	90
5.1	精确散射场的数学描述	90
5.1.1	波动方程的建立	90
5.1.2	声波传播特性的描述	93
5.1.3	波动方程的线性化	95
5.1.4	积分方程的离散化	98
5.2	超声散射层析成像原理	103
5.2.1	傅里叶衍射投影算法	103
5.2.2	滤波反向传播算法	106
5.2.3	空间域重建算法	107
5.3	非线性问题的求解	108
5.3.1	Born 迭代	108
5.3.2	变形的 Born 迭代	109
5.3.3	Levenberg-Marquardt 算法	111
5.3.4	迭代算法的比较	112
5.4	离散不适定性问题的研究	113
5.4.1	奇异值分解	113
5.4.2	最小二乘解	114
5.4.3	离散不适定问题的提出	115
5.4.4	Picard 准则	116
5.4.5	正则化方法	121
5.4.6	正则化参数的选择	124
5.5	基于空间域层析成像的实现	127
5.5.1	实验模型的建立	127

5.5.2	Picard 曲线对模型的分析	130
5.5.3	TSVD 正则化方法的实现	132
5.5.4	实验结果与分析	133
5.6	小结	136
第 6 章	超声反演图像的处理	138
6.1	超声反演图像的噪声模型	138
6.2	一种新的小波阈值函数降噪方法	139
6.2.1	小波阈值降噪模型	139
6.2.2	传统阈值函数的缺点	141
6.2.3	基于双曲线的新小波阈值函数	142
6.2.4	降噪结果与分析	147
6.3	常规的图像分割方法	149
6.3.1	阈值分割	149
6.3.2	区域分割	150
6.3.3	聚类分割	151
6.3.4	基于 BP 神经网络的图像分割方法	152
6.4	区域生长分割方法的改进	153
6.4.1	区域分割原理	153
6.4.2	改进的区域生长分割方法	154
6.5	区域生长与聚类分析相结合的分割算法	157
6.5.1	模糊集合理论	157
6.5.2	模糊 C-均值聚类算法	158
6.5.3	新的聚类分割思路	159
6.6	分割结果与分析	160
6.7	小结	164
第 7 章	总结	165
参考文献		167

第 1 章 绪 论

超声检测具有无电离辐射、价格低廉等优点,已成为无损检测领域五大检测手段之一。超声成像检测由于能够通过彩色或灰度图像反映被测材料内部的质量,对缺陷进行定性定量分析,已逐渐成为研究的热点。

1.1 题目的来源与意义

在现代无损检测技术中,超声成像技术是一种令人瞩目的新技术。由于声波可以穿透很多不透光的物体,故利用声波可以获得这些物体内部结构声学特性的信息。超声成像技术就是将这些信息变成人眼可见的图像,从而获得物体内部的结构特征。

超声成像的研究最早可以追溯到 1920 年。苏联著名科学家萨卡洛夫(S. J. Sokolov)从 1920 年起进行了近 20 年的超声成像研究,为声学界做出了重大贡献,并于 1935 年完成了液面成像装置。其后由于技术上的种种原因,超声成像研究进展缓慢。20 世纪 60 年代末,由于电子技术、计算机技术和信号处理技术的飞速发展,超声成像研究恢复了生机。从 20 世纪 70 年代开始逐渐形成了几种较成熟的方法,并且在医学诊断中得到极其广泛的应用,在工业材料超声检测中也开始得到应用。

超声扫描成像方法主要有 B 型、D 型、C 型和 P 型等显示方式。B 扫描所显示的是与声束传播方向平行且与样品的测量表面垂直的样品剖面;D 扫描所显示的是与声束平面及测量表面都垂直的剖面;C 扫描所显示的则是样品的横断面;P 扫描是“投影成

像扫描”的简称,是专为检测焊缝而开发的成像检测设备。

层析成像(Computed Tomography, CT)技术(也称为计算机断层成像技术)是指通过物体外部检测到的数据重建物体内部(横截面)信息的技术,它是把不可分割的对象假想地切成一系列薄片,分别给出每一片上的物体图像,然后把这一系列图像叠加起来,就得到物体内部的整体图像。它是一种由数据到图像的重建技术,主要通过图像反映被测材料或制件内部质量,对缺陷进行定性、定量分析,从而提高检测的可靠性。

CT 技术是一门涉及数学、物理、计算机等知识的边缘性学科,同遗传工程、新粒子发现和宇航技术一起被称为 20 世纪 70 年代国际四大科技成果。CT 技术最初应用于医学领域,并获得巨大成功。它能够提供人体内部高清晰度、高分辨率的三维图像,为医学诊断带来了极大的方便。1979 年 CT 的发明者豪斯菲尔德和柯尔马克获得了诺贝尔医学奖。近年来,CT 技术的应用已拓展到科学、工程等诸多领域,特别在地球物理学、地质勘探和无损检测中得到了广泛的应用。在工程中,按照射线源,层析成像可分为声波 CT、射线 CT 和电磁波 CT;根据应用领域,可分为医学 CT、工业 CT、地震 CT 和大坝 CT 等;根据投影数据类型,可分为走时层析、振幅层析和波形层析等;根据反演的物性参数,可分为波速层析成像、衰减层析成像和电阻抗层析成像等。

目前,CT 技术中应用最为广泛的是 X 射线层析成像技术。X 射线 CT 存在价格昂贵、对人体有害、设备携带不方便等缺点。超声检测与 X 射线检测相比具有指向性好、价格低廉、对人体无害、设备便于携带等优点,因此,人们开始将超声波作为发射源的检测技术应用于层析成像中,利用超声波制造出像 X 射线 CT 一样的成像设备,已逐渐成为超声应用领域的研究者们追求的新目标之一。早期研究者假设超声波在物体内部以直线传播,利用发射器到接收器之间的时间延迟或振幅衰减来重建物体内部的声速、吸收特性等参数,但实际超声波具有明显的衍射特征,在界面上具有显著的折射、衍射,传播路径复杂,这使得超声层析成像技术的理

论研究和 X 射线层析成像有所不同^[1]。

随着电子技术的飞速发展,超声成像技术必然是未来超声检测发展的趋势。对成像方面的一些关键技术进行研究将具有一定的学术价值和广阔的应用前景。

1.2 超声扫描成像的国内外发展现状

超声扫描成像是实现缺陷定性、定量以及无损评价的关键技术之一,在无损检测领域有着广泛应用。通过超声探头对被测对象按照一定的路径进行扫描,可以得到被测对象内部某一深度层面的超声图像。由于探头声学特性的限制,在超声扫描图像中存在缺陷边缘的模糊现象,使得缺陷定量分析过程中,超声图像反映的缺陷与被测材料内部的真实缺陷之间存在一定的差异。因此采用有效的方法确定缺陷边缘对无损评价工作有着重要意义。

超声 C 扫描成像由于具有直观、准确、自动化程度高等特点而被广泛应用于无损检测领域。它是在普通的超声波 A 扫描技术的基础上对信号进行后处理,使缺陷的位置和尺寸能够直观地显示出来,便于对缺陷进行定性和定量分析,在科学研究和生产中得到了越来越多的应用。随着计算机技术的发展超声波 C 扫描技术也逐渐成熟起来,现已成为一种实用的重要检测手段。但对 C 扫描图像中的缺陷进行精确分析和表征一直是超声检测领域中的难题。

超声相控阵技术已有 20 多年的发展历史。最初,由于系统的复杂性、固体中波动传播的复杂性及成本费用高等原因使其在工业无损检测中的应用受限,然而随着电子技术和计算机技术的快速发展,超声相控阵技术逐渐应用于工业无损检测,特别是在核工业及航空工业等领域。目前,国内在超声相控阵技术上的研究应用尚处于起步阶段,主要集中于医疗领域。超声相控阵可以灵活而有效地控制声束使之具有广阔的应用与发展前景,将其同信号分析与处理、数字成像和声时衍射等技术结合起来是其未来主要

发展方向。显然,超声相控阵技术的应用将有助于改善检测的可达性和适用性,提高检测的精确性、重现性及检测结果的可靠性,增强检测的实时性和直观性,促进无损检测与评价的应用及发展。

1.3 射线层析成像的国内外发展现状

超声 CT 成像主要有以射线理论为基础的射线层析和以波动理论为基础的波动层析。射线理论相当于在忽略散射的条件下将超声射线的传播路径看作直线,通过路径追踪、走时求取和迭代重建等方法来实现截面的重构;波动理论则考虑声波的散射效应,研究介质的不均匀性对声场的影响,通过建立介质的参量与接收数据之间的关系,来重建介质参量的分布图像。

射线理论起源于几何光学中光的传播路径研究,随着人们对声学研究的不断深入,“几何声学”这一概念也逐渐引起人们的重视。在早期的超声层析成像方法中,超声波是以直线形式传播作为假设条件,借鉴 X 射线 CT 的有关算法(如傅里叶反变换重建、滤波反投影算法、卷积逆投影重建等)实现重建,这种方法基本上可以达到实时的目的,但是在无损检测中成像效果非常差,主要原因是实际检测中声波在含有缺陷的介质中传播的路径并不是直线。

由于超声 CT 技术与地震波层析技术在许多方面具有相似性:层析面上各点的波速并不相等,波传播的路径是一个与材料不均匀性相关的曲线,真实路径是未知的。于是,人们渐渐开始借鉴地球物理学中研究地球物理结构的方法——射线追踪方法(Ray Tracing Method),并将其运用到超声 CT 中。

射线追踪方法是考虑声波传播过程中路径是折线的一种成像方法,是一种基于超声波传播路径的代数重建方法。它的基本思想是首先假设超声波在物体内的传播是直线,根据超声穿透物体的所用时间,建立超声波传播路径与物体内部参数之间的关系式,并由此求出介质内部的参数的初始估计,然后根据这一参数的初

始估计,并根据射线跟踪方法来校正声波的传播路径,由此新路径再建立参数和传播路径之间的关系式,继续由此关系式求更精确的参数值,如此反复,直至收敛。

近年来,考虑空间所有离散点的走时和射线路径的全局射线追踪方法引起了广泛的关注。这种方法的理论基础是程函方程、Fermat 原理和 Huygen 原理,实际上各种全局算法的基本原理是等价的,它能以较高的精度计算较复杂模型中波的走时。常规的射线追踪方法,通常意义上包括初值问题的试射法和边值问题的弯曲法,但是这些方法存在诸多问题,如难于处理介质中较强的速度变化,难于求出多值走时中的全局最小走时,计算效率较低,阴影区内射线覆盖密度不足。1988 年,Vidale 提出用有限差分法计算走时,为射线追踪开拓了一条新的途径,与传统试射法与弯曲法不同,Vidale 方法计算的是波阵面而不是射线路径^[2]。1990 年,Vidale 又将上述方法推广到三维情况,但基本思路未变^[3]。1993 年,Asakawa 和 Kawanaka 提出了一种称为走时线性插值(Linear Travel-time Interpolation, LTI)的新射线追踪算法,而且通过实验表明用该算法计算走时和追踪路径比有限差分法更为快速、精确^[4]。同时,Asakawa 还从理论上证明了 LTI 法是 Vidale 法的一种高级形式。线性插值射线追踪法是程函方程有限差分法射线追踪的改进。通过实验表明这类全局算法,能模拟较复杂介质,用该算法计算走时和追踪射线路径比其他常规方法更为快速、精确。

在投影数据完全、射线路径为直线的前提下,变换法可以准确地重建材料的内部图像。在超声 CT 中,由于存在数据缺失严重、噪声较大、射线呈弯曲情况,所以变换法并不适合超声重建。在数据完全时,卷积反投影算法和 ART(Algebraic Reconstruction Techniques)的重建质量是令人满意的。在射线投影数 $I < J/3$ (J 为像素数目)、物体密度变化剧烈或具有强噪声场合的情况下,ART 的重建质量远较卷积反投影法好,但 ART 法存在最佳迭代次数,超过此数则不收敛,而对于 SIRT(Simultaneous Iterative Reconstruction Techniques)算法,它总是收敛的,特别是在测量数据不是很准

确时,更显出其在重建质量上的优越性。2001 年湖南大学硕士生缪仑,采用 ART 和 SIRT 算法编制了超声波层析成像分析程序,讨论了计算精度、网格划分的疏密程度等因素对反演结果的影响,迈出了对于混凝土超声波层析成像研究可喜的一步^[5]。2003 年湖南大学黄靓,将射线追踪方法应用到超声 CT 中,实验结果较好,但还是难以反映尺度与超声波波长相当或更小的缺陷^[6]。

射线法层析成像的反演方法已经由最小二乘法发展到各种约束条件下的加权阻尼最小二乘法以及统计法,观测参数也由单一走时数据向多种参数数据发展。反演方法的发展趋势从线性(例如代数重建法、联合迭代重建等方法)逐步向非线性(例如梯队法、模糊神经网络算法和遗传算法等方法)方向发展。

1.4 波动层析成像的国内外发展现状

射线层析算法只考虑了声波折射的问题,在物体内部介质变化不大且衍射情况较弱时比较有效。当介质内部粒子与入射波的波长相当或小于入射波的波长时,由于产生了明显的衍射现象,用该方法确定波的传播路径并成像将会失效。此时,须考虑基于波动理论的波动层析。

波动层析主要分为频域层析成像和空间域层析成像。频域层析成像是根据声波在介质中传播的波动方程,将信号变换到频域,导出傅里叶投影定理,进而实现层析成像。频域层析成像主要分为透射式衍射层析成像方法和反射式衍射层析成像方法。

透射式衍射层析成像方法是基于傅里叶衍射投影定理的一种频域成像方法,傅里叶衍射投影定理与 X 射线 CT 问题中的傅里叶投影切片定理非常相似,其区别在于傅里叶投影切片定理中,投影数据的傅里叶变换对应于物体傅里叶变换在频域上的一条直线,而在傅里叶衍射投影定理中,投影数据的傅里叶变换对应于物体傅里叶变换在频域上的一条半圆弧。反射式衍射层析成像方法也是基于傅里叶衍射投影定理,与透射式衍射层析成像方法不同

点在于数据的傅里叶变换对应于物体傅里叶变换在频域上半圆弧的另一半。

频域层析成像方法由于运用快速傅里叶变换,算法的速度较快,能够产生准实时的成像,但是为了克服声波在复杂介质中传播的非线性,在由波动方程推出傅里叶衍射投影定理时,采用了 Born 近似或 Rytov 近似,因而该方法成立的条件是在弱散射的情况下。

空间域成像方法本质上是基于精确散射场描述的一种层析成像方法,该方法完全考虑了声波的散射特性,比较适合于物体内部介质存在较强散射的情况。

20 世纪 60 年代, Richmond 和 Harrington 给出了微波通过二维物体时散射场的精确描述方法——矩量法。随后,人们将这一方法运用于超声散射场的精确描述中。基于精确场描述的层析成像算法的基本模型通常是矩量法模型,它不再基于 Born 或 Rytov 近似,而是采用反复迭代的方法,来逼近物体内部的全场和未知函数。这种方法于 1983 年由 S. A. Johnson 等人提出以后,引起了超声工作者的极大兴趣,此后,求解超声逆散射成像问题的各类算法也层出不穷^[7]。

从 1983 年开始,Johnson 等人利用超声精确场的描述方法,来反演物体内部的结构,并提出了求解超声逆散射问题的多种方法: Born 迭代、变形 Born 迭代法、Levenberg-Marquardt (L-M) 和 Newton-Kantorovich (N-K) 方法等。1990 年 W. C. Chew 和 Y. M. Wang 在 Born 迭代方法的基础上提出了变形 Born 迭代方法,它是对 Born 迭代方法的进一步改进,能加快收敛速度、提高数据的拟合程度,从而改善逆散射成像的质量,但是由于在每次迭代过程中修正格林函数,当原始散射数据存在误差时,可能会造成噪声的放大,因此其数值稳定性不如 Born 迭代方法^[8]。与这类算法发展的同时,另一类算法则是采用直接求解非线性方程的方法,即 Francoise 在 1997 年提出的 Levenberg-Marquardt 算法^[9] 和 Joachimowicz 在 1998 年提出的 Newton-Kantorovich 算法,它们均是求解非线性

性问题 Gauss-Newton 方法的变形^[10]。

近 20 年来,基于空间域的超声层析成像代数迭代技术迅速发展。这类迭代技术除了计算量大的缺陷外,另一个困扰人们的主要问题是逆散射方程的不适定性问题,即解的存在性、唯一性和稳定性的满足问题。随着计算机技术的迅猛发展,计算量大的问题得到了缓解;对于解的存在性和唯一性问题,人们通过寻找适当的数学方法也可加以解决;对于稳定性(当数据有微小的变化时,解是否较大地偏离问题的真实解)问题,最常用的方法是古典的 Tikhonov 正则化技术。当物体内部介质较复杂,散射特性较强时,由矩量法给出的离散方程的不适定性比较强,采用 Tikhonov 正则化方法的成像效果不十分理想。采用 Tikhonov 正则化方法的优点是容易引入解的先验信息,缺点是对正则化的参数难以调整,如果正则化参数选取的不适当时,求出的解往往与问题的真实解偏差较大。Franchois 在采用 Tikhonov 正则化方法处理微波逆散射成像问题时,在求解过程中加入了较多的关于解的先验信息,如物体内部介质对比度的上下界、边缘轮廓等,取得了一定的效果^[89]。

解决逆散射方程解的稳定性的方法还有截断奇异值分解(Truncated Singular Value Decomposition, TSVD)、截断完全最小二乘法(Truncated Total Least Squares, TTLS)等。TSVD、TTLS 正则化方法在不需任何先验信息的情况下,均能较好地收敛于问题的真实解,但是这两种算法由于均要用到矩阵的奇异值分解技术,因此所需的计算量较大。2003 年浙江大学刘超等曾借鉴 Franchois 的方法,对超声逆散射成像问题进行研究,在求解过程中加入了解的上下界的先验信息、正则化参数的确定,采用目前较常用的几种正则化参数确定方法,针对不同结构、不同对比度物体进行数值仿真,在对比度变化稍大的情况下,采用迭代方法难以得到问题的真实解^[11]。

除了 Tikhonov、TSVD、TTLS 正则化方法外,许多研究者还根据不同的实际问题提出了许多种不同的正则化方法,但这些正则化方法的正则化效果因不适定问题的不同而不同,一种正则化方