



国际信息工程先进技术译丛

WILEY

声学成像技术及 工程应用

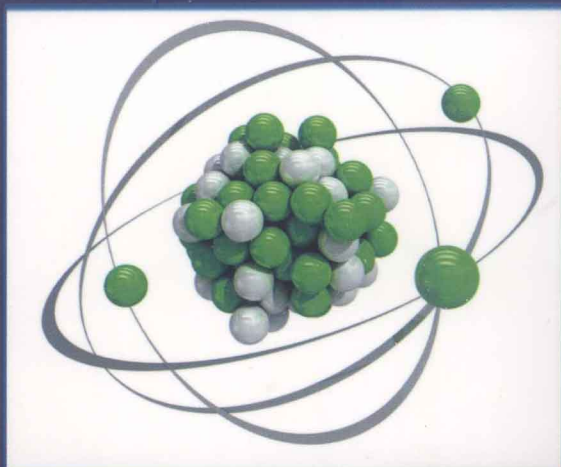
Acoustical Imaging Techniques and
Applications for Engineers

(新加坡) Woon Siong Gan 编著

李平 吴文焘 李虹 王玲芳 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际信息工程先进技术译丛

声学成像技术及工程应用

(新加坡) Woon Siong Gan 编著
李 平 吴文焘 李 虹 王玲芳 等译



机械工业出版社

本书首先介绍了声学和声成像的基本理论和原则,随后探讨了声成像技术在各方面的应用,如无损检测、医学成像、水下声学成像和声纳及地球物理勘探。本书将不同技术集合起来,重点讨论声学领域和常规理论的相似性。除此以外,还提到一些领先的话题,如无损测试的非线性声学成像和应用,声学成像混沌理论的应用,声学成像和负折射的统计处理等。本书的主要特点是全面性地概括了声学成像的重点应用;介绍了声学运动方程的规范不变性;包含了对声传播最新理论的处理方法。

本书适合声学、材料、无损检测和医疗声学相关专业本科高年级、研究生,和声学相关专业的工程技术人员、研究人员。

Copyright © John Wiley & Sons, Ltd. 2012.

All Rights Reserved-This Translation published under License.

Authorized translation from the English Language edition, Acoustical Imaging Techniques and Application for Engineers, ISBN 978-0-470-6616-0-4, Woon Siong Gan, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书原版由 Wiley 公司出版,并经授权翻译出版。

版权所有,侵权必究。

本书中文简体翻译出版授权机械工业出版社独家出版,并限定在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书封面贴有 Wiley 的防伪标签,无标签者不得销售。

本书版权登记号:图字 01-2013-1405 号。

图书在版编目(CIP)数据

声学成像技术及工程应用/新加坡:颜允祥编著;李平等译. —北京:机械工业出版社, 2013. 10

(国际信息工程先进技术译丛)

书名原文: Acoustical Imaging, Techniques and Applications for Engineers

ISBN 978- 7- 111- 43877- 9

I. ①声… II. ①颜…②李… III. ①声学成像 IV. ①0426. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 204648 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:赵玲丽

版式设计:常天培 责任校对:纪敬

封面设计:赵颖喆 责任印制:李洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·22.75 印张·509 千字

0001—2500 册

标准书号:ISBN 978- 7- 111- 43877- 9

定价:99.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

译者序

声学成像利用声波获取、记录和重现被成像目标的某种特征。声学成像涉及众多学科,但主要建立在深入理解介质中声波传播规律的基础之上,并得益于现代声学材料和元件及电子技术的进步而得到快速发展和广泛应用。与其他众多成像手段相比,声学成像有其自身的特点,声波既可以穿透不透明介质对其内部结构成像,又是一种没有危害的安全成像方式。目前声学成像最典型的应用包括无损检测、水下成像、地球物理探测和医学成像等,尤其是超声医学成像几乎人所共知。

作为声学领域的工作者,译者对声学成像的几个领域都有一定程度的涉及,因而对声学成像的理论、方法、技术和应用都充满兴趣并给予特别关注。今年初偶然发现了这本去年刚刚出版的有关声学成像的书,当时还只能在互联网上看到书名、目录和简单的介绍,但强烈的好奇心和对该领域信息的敏感性使我们产生了一“读”为快的渴望。也许是机缘的巧合,又是偶然的的机会获悉机械工业出版社正在筹划翻译出版该书的中文版,于是几乎未加思索地欣然承担了此书的翻译任务。当时的想法主要有两点:一是希望通过自己的工作为一部分读者提供阅读的方便,二是也想将翻译过程作为一次再学习、充实和提高的机会。

如前所述,领命之时对本书的了解还仅限于书名和目录。现在,经过几个月的艰辛努力,译稿终于得以完成。译者最初所期望一次再学习过程也已经完成,此时可以说对本书也有了一个比较全面、深入、透彻的了解,于是可以简要地总结一点翻译的体会和阅读的建议与读者共享。

本书的最大特点是涵盖范围十分广泛,有关声学成像的所有方方面面几乎都有不同程度的涉及,具体体现如下:

1) 从理论到实践的广泛覆盖,对于某些声学成像,给出了从物理方程到成像方法甚至到仪器设备的全面介绍;

2) 声学成像形式的广泛覆盖,涉及目前声学成像系统的3种主要类型:脉冲—回波型(B型超声是典型代表)、相位—幅度型(声全息术)和幅度映射型(声学显微镜);

3) 多个应用领域的广泛覆盖,从小尺度的医学成像和无损检测到大尺度的地球物理探测和水下声学成像;

4) 技术发展角度的广泛覆盖,除了传统、经典的声学成像,还包含了该领域的新发明和比较前沿的研究进展,如弹性成像、非线性成像、时间反转、随机和统计处理、混沌理论和负折射的应用等。

基于上述特点,译者认为本书是声学成像领域的一部比较广泛的综述书籍。

但要在这样一本篇幅有限的书里完美地容纳如此繁多的内容并非易事。作为综述，书中的主要内容大多来自所列的参考文献，如何在浩繁的资料中取其精华成书而又不失完整性、系统性、连贯性和统一性是一个巨大的挑战。译者在翻译过程中力求遵从忠实原文、如实翻译的原则，但发现原书存在不少必须指出或纠正的错误，既有公式、符号表述也有文字叙述方面的。为此译者一方面查阅了大量原始参考文献，另一方面对部分公式重复进行了推导。因此读者今天所看到的，已经不仅仅是原书的文字翻译，还包含了很多对原文的重新校对和修正。其中，为避免过于繁琐，对于可以明确判断为排版印刷问题和明显笔误的简单错误，直接进行了改正而未做说明，但对于那些比较重要的修改则以注释的形式予以说明并给出原文的表述，这样做也是为了便于读者进行甄别。另外，为了读者阅读方便，译者还针对个别内容增加了少量注释。

中国有句成语叫做“瑕不掩瑜”。译者认为，那些具有一定理论和实践基础，从事声学成像领域或者想要了解这一领域的读者在阅读本书以后，对于拓展视野定会有所裨益。正如本书的序中所言，对本书的期望是它将引导广大读者更好地了解和更广泛地应用声学成像的丰富资源。

本书的序言部分、第1~4章、第9~11章由李平译，第5~8章由吴文焘译，第12~15章由李虹译，王玲芳统稿并校对。在翻译过程中，王弟英、游庆珍、李传经、吴昊、李睿、吴秋义、李冬梅、潘东升、吴璟、郝惠宁、李小翠、张鑫、李秋荫、张平、黄琳、芦苏华等同志参加了部分的翻译工作，在此表示感谢。同时感谢机械工业出版社，感谢出版社的编辑和相关同志。

最后，译者期望实现当初翻译本书的另一个初衷，就是期望通过自己的工作作为一部分读者提供阅读的方便。不过，需要指出的是，本书的内容仅代表作者个人的观点和见解，并不代表译者及其所在单位的观点。另外，由于翻译时间比较仓促，疏漏错误之处在所难免，敬请读者原谅和指正。

译者

原 书 序

声波提供了与可见光非常不同的成像形式。声波像 X 射线一样可以穿透不透明的介质，这正是其在医学和无损检测中得到应用的原因。声波具有很宽的频率范围。人眼能看到的可见光的频谱范围只有一个倍频程，但人耳能听到的声音频率范围却可达 8 个倍频程以上，而超声波还可以一直扩展到更高的频率范围。通常声波比电磁波的传播速度要慢 5 个数量级，这意味着获得亚微米量级的波长需要用几个吉赫（GHz）频率的声波。换能器可以将电信号转换为声波，反之亦然，电信号的产生和处理可以用全数字技术实现。

声波具有丰富而复杂的传播形态。在液体中除了极短距离以外声波几乎都是纵波。在固体中则还可以存在正交振动的剪切波。在接近固体表面处会具有剪切波与纵波组合的传播，并且可以耦合到与固体表面接触的液体中。对于像水晶或某些复合物等各向异性固体，它们会呈现非常丰富的声学现象，如波束偏转——波的传播方向并不垂直于波阵面。不同介质之间的声学特性差异巨大，由此可导致强烈的声散射，如固体中的微小裂痕就是如此。声波不仅可以对物体的几何形状成像，还可以探查它们的力学特性。很多物质在实验所达到的声波振幅下就会呈现出非线性特性。

对声波的传播规律有了深入了解，同时有了设计精巧、复杂的仪器来产生和检测声波，由此便开启了令人兴奋的各种应用。例如，原子力显微镜能够通过点与面之间的非线性相互作用以纳米的分辨率探测声场；扫描透镜和阵列可以用于获得衍射极限的图像，其分辨率从声学显微镜中的微米到医学成像和无损检测中的毫米量级，直到声纳和地球物理探测中更大的范围都有应用。

所有这些都需要建立在深入理解液体和固体中声波传播规律的基础之上，并且得益于发展先进的仪器设备。Gan 博士的著作针对上述需求作了全面阐述。我对本书的期望是它将引导广大读者更好地了解 and 更广地应用声学成像的丰富资源。

G. A. D. Briggs

于牛津大学

关于作者

Woon Siong Gan 博士毕业于英国伦敦皇家学院 (Imperial College (London)) 物理系, 1965 年获得物理学学士学位, 1967 年 5 月获得声学与振动科学高等毕业证书, 1969 年 2 月获得声学专业博士学位。其后, 他先后在伦敦皇家学院、伦敦切尔西学院 (Chelsea College (London)) 和意大利的里雅斯特理论物理国际中心 (International Centre for Theoretical Physics (Trieste, Italy)) 从事博士后工作。他现任 IEEE 终身高级会员、英国工程技术研究所 (Institute of Engineering and Technology (UK)) 研究员、英国声学研究所 (Institute of Acoustics (UK)) 研究员、南非声学研究所 (Southern African Acoustics Institute) 研究员、新加坡工程师协会 (Institution of Engineers, Singapore) 会员、美国医学超声学会 (American Institute of Ultrasound in Medicine) 高级会员, 自 1969 年起为美国声学学会 (Acoustical Society of America) 会员。

他于 1989 年创建了新加坡声学学会 (Society of Acoustics (Singapore)) 并担任理事长, 并且是国际声学及振动研究所 (International Institute of Acoustics and Vibration, II-AV) 的前所长。

他还是 IEEE 信号处理新加坡分会 (Signal Processing Singapore Chapter of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (USA)) 的创始人, 1970 ~ 1979 年曾任新加坡南洋大学 (Nanyang University (Singapore)) 物理系副教授, 1979 ~ 1989 年担任声学顾问。他于 1989 年创办了新加坡声学技术私营有限公司 (Acoustical Technologies Singapore Pte Ltd), 这是一家从事超声技术研发的公司, 曾研发出扫描声学显微镜和声表面波器件并获得专利。到目前为止, 该公司是新加坡唯一的一家超声技术公司, 主要从事超声成像业务。

他同时致力于理论研究, 在声学成像、有源噪声抵消和规范不变性在声学中的应用方面发表过若干论文。

2007 年他发表了《Gauge Invariance of Acoustic Fields (声场的规范不变性)》的论文, 论文的观点通过声学超材料的制作得到了实验验证, 结果表明声场的不变性同时等价于负质量密度和负体积模量。这些成果在理想声透镜的负折射中得到了应用。作者所获得的重要发现是, 负折射是声学隐身中常用的坐标变换 (规范不变性) 的特殊情况, 即奇偶性或方向余弦行列式或变换矩阵等于 -1 的情况。他当前正致力于开拓一个基于声学超材料的称为“新声学”的新领域。这意味着, 当负质量密度和负压缩性取代了正质量密度和正压缩性, 以及基于声子晶体的能带隙特性, 声学波动方程将会得到不同以往的解。融合声波传播过程中的折射、衍射和散射 3 种基本机制, 使得我们可以随意掌控声波在固体中的传播方向, 从而引发出新奇的声学现象和新型声学装置的应用, 这正是作者将其称为“新声学”的缘故。

目 录

译者序

原书序

关于作者

第1章 绪言	1
参考文献	3
第2章 声学及其成像的物理基础	4
2.1 引言	4
2.2 声在固体中的传播	4
2.2.1 线性波动方程的导出及其解	4
2.2.2 线性声学波动方程和新应力场方程中的对称性	5
2.3 应用规范位势理论求解波动方程	6
2.4 有限振幅声波在固体中的传播	7
2.4.1 高阶弹性理论	7
2.4.2 非线性效应	8
2.4.3 非线性声学运动方程的导出	8
2.4.4 高阶声学运动方程的解	9
2.5 能量吸收引起的非线性效应	9
2.5.1 热传导引起的能量吸收	9
2.5.2 位错引起的能量吸收	9
2.6 固体中声传播的规范理论表述	10
2.6.1 无穷小振幅声波动方程中的协变导数	11
2.6.2 大振幅声波动方程的协变导数	11
参考文献	11
第3章 信号处理	12
3.1 信号处理和图像处理中的数学工具	12
3.1.1 矩阵理论	12
3.1.2 矩阵的一些性质	12
3.1.3 傅里叶变换	14
3.1.4 Z 变换	18
3.2 图像增强	18
3.2.1 空间低通、高通和带通滤波	18
3.2.2 放大与内插	19
3.2.3 复制	19

3.2.4 线性内插	19
3.2.5 图像变换	20
3.3 图像采样和量化	21
3.3.1 采样与复制	21
3.3.2 从样本重建图像	21
3.3.3 奈奎斯特频率	22
3.3.4 采样定理	22
3.3.5 二维采样理论应用实例	22
3.3.6 用于随机场的采样定理	22
3.3.7 采样和重建的实际限制	23
3.3.8 图像量化	23
3.4 图像的随机建模	23
3.4.1 自回归模型	24
3.4.2 自回归模型的特性	24
3.4.3 滑动平均模型	24
3.5 波束形成	25
3.5.1 波束形成原理	25
3.5.2 声纳波束形成的要求	26
3.6 有限元法	26
3.6.1 引言	26
3.6.2 应用	27
3.7 边界元法	28
参考文献	29
第4章 声学成像的常用方法	30
4.1 引言	30
4.2 层析术	30
4.2.1 玻恩近似	34
4.2.2 利托夫近似	35
4.2.3 傅里叶衍射定理	36
4.2.4 重建和反向传播算法	36
4.3 全息术	41
4.4 脉冲—回波模式和透射模式	44
4.4.1 C型扫描法	44
4.4.2 B型扫描法	46
4.5 声学显微镜方法	49
参考文献	50
第5章 时间反转声学和超分辨技术	52
5.1 引言	52

5.2 时间反转声学理论	52
5.3 时间反转声学在医学超声成像中的应用	58
5.4 时间反转声学在超声无损检测中的应用	59
5.4.1 液—固界面上的时间反转声学理论	60
5.4.2 无损检测中的 TRM 实验实现	61
5.4.3 非相干求和	63
5.4.4 来自于斑噪声区域的时间反转信号	63
5.4.5 迭代技术	63
5.4.6 包含硬 α 区域的迭代处理	64
5.4.7 纯斑噪声区域的迭代处理	64
5.5 TRA 在地雷或埋入体探测中的应用	66
5.5.1 引言	66
5.5.2 理论	67
5.5.3 实验过程	68
5.5.4 实验设置	69
5.5.5 Wiener 滤波器	69
5.5.6 实验结果	70
5.6 时间反转声学在水声中的应用	71
参考文献	71
第 6 章 非线性声学成像	73
6.1 混沌理论在声学成像中的应用	73
6.1.1 衍射层析成像中遇到的非线性问题	73
6.1.2 混沌的定义和历史	73
6.1.3 分形的定义	74
6.1.4 混沌和分形的联系	75
6.1.5 乳腺癌的分形性质	75
6.1.6 分形的类型	76
6.1.7 分形近似	78
6.1.8 扩散限制凝聚	78
6.1.9 生长区概率分布 GSPD	79
6.1.10 使用 GSPD 近似散射场	80
6.1.11 离散赫姆霍兹波动方程	81
6.1.12 Kaczmarz 算法	81
6.1.13 Hounsfield 法	83
6.1.14 在 Kaczmarz 算法中使用 GSPD	84
6.1.15 应用频域内插的分形算法	84
6.1.16 频域内插分形算法最终方程的导出	84
6.1.17 仿真结果	85

6.1.18 Born 近似和分形近似的对比	87
6.2 非经典非线性声学成像	88
6.2.1 引言	88
6.2.2 由 CAN 产生谐波的机制	89
6.2.3 非线性共振模态	91
6.2.4 非经典 CAN 谱的实验研究	92
6.2.5 CAN 在非线性声学成像和无损检测中的应用	93
6.2.6 结论	95
6.3 非线性声学成像的调制法	96
6.3.1 引言	96
6.3.2 调制声学方法的原理	96
6.3.3 裂缝位置的调制模态法	97
6.3.4 用于 NDT 调制方法的实验步骤	98
6.3.5 调制模态系统的实验步骤	98
6.3.6 结论	100
6.4 谐波成像	101
参考文献	101
第7章 高频声学成像	103
7.1 引言	103
7.2 换能器	103
7.3 电子电路	104
7.4 软件	105
7.5 高频超声成像的应用	106
7.6 皮肤科和眼科 150MHz 超声成像系统	106
7.7 150MHz 系统的信号处理	106
7.8 声学显微镜的电子电路	111
7.8.1 门控信号及其在声学显微镜中的应用	111
7.8.2 准单频系统	113
7.8.3 甚短脉冲技术	114
参考文献	115
第8章 声学成像的统计处理	116
8.1 引言	116
8.2 非均匀性散射	117
8.3 波场的统计特性研究	118
8.3.1 菲涅尔近似或近场近似	120
8.3.2 远场成像条件(夫琅和费近似)	121
8.3.3 起伏的互相关性	125
8.3.4 准静态条件	128

8.3.5 幅度起伏的时间自相关	129
8.3.6 实验验证	131
8.3.7 起伏理论在聚焦系统衍射图像中的应用	134
8.3.8 结论	134
8.4 统计处理的连续介质方法	134
8.4.1 引言	134
8.4.2 抛物线方程理论	134
8.4.3 折射率起伏假设	135
8.4.4 平均场方程和通解	135
参考文献	138
第9章 无损检测	139
9.1 缺陷检测的特点	139
9.2 自动化超声检测	141
9.2.1 引言	141
9.2.2 检测过程	142
9.2.3 AUT 系统实例	142
9.2.4 AUT 中的信号处理和缺陷特征的自动化增强	143
9.3 导波用于 NDT 声学成像	146
9.4 应力测量和材料研究中的超声技术	148
9.4.1 引言	148
9.4.2 内部应力测量	149
9.4.3 “吻粘接”评价中的 $V(z)$ 曲线技术	151
9.5 干接触或非接触换能器	153
9.5.1 缺陷深度、尺度和特征	153
9.5.2 一发一收扫频法	153
9.5.3 一发一收冲激法	153
9.5.4 机械阻抗分析法	153
9.6 相控阵换能器	154
9.6.1 引言	154
9.6.2 相控阵的意义	155
9.6.3 超声相控阵技术的原理	156
9.6.4 聚焦法则	158
9.6.5 基本扫描和成像	158
9.6.6 相控阵检测相对常规超声检测的优势	159
参考文献	160
第10章 医学超声成像	161
10.1 引言	161
10.2 声传播的物理原理	161

10.2.1 声波在固体中的传播	161
10.2.2 对比度	163
10.3 成像模式	163
10.3.1 B型扫描	163
10.3.2 C型扫描	169
10.4 B型扫描仪器	171
10.4.1 手动系统	171
10.4.2 实时系统	173
10.4.3 机械扫描	174
10.4.4 电子扫描	175
10.5 C型扫描仪器	179
10.5.1 Sokolov 管	179
10.5.2 超声全息术	179
10.6 组织谐波成像	181
10.6.1 引言	181
10.6.2 组织谐波成像的原理	182
10.6.3 组织谐波图像的形成	185
10.6.4 组织谐波成像的特点	186
10.6.5 一些商用系统	188
10.7 弹性成像	188
10.7.1 引言	188
10.7.2 人工触诊和弹性成像的对比	188
10.7.3 激励作用力和成像形式的选择	191
10.7.4 弹性成像的物理基础	192
10.7.5 图像形成算法	195
10.7.6 一些商用系统	198
10.8 彩色多普勒成像	203
10.8.1 多普勒超声	203
10.8.2 脉冲(门控)多普勒和频谱多普勒	204
10.8.3 量化多普勒技术	205
10.8.4 速度测量	205
10.8.5 谱多普勒波形测量	205
10.8.6 血流量测量	206
10.8.7 彩色多普勒	206
10.8.8 新兴技术	207
10.9 超声造影	208
10.9.1 引言	208
10.9.2 气泡超声心动图	208

10.9.3 微泡造影剂	208
10.9.4 工作过程	210
10.9.5 应用	210
10.10 3D 医学超声成像	211
10.10.1 引言	211
10.10.2 可选 3D 超声	212
10.10.3 3D 超声的风险降低	213
10.10.4 未来发展	213
10.10.5 局部麻醉	214
10.11 发展趋势	214
参考文献	215
第 11 章 水下声学成像	219
11.1 引言	219
11.2 水下声学成像系统原理	219
11.2.1 扩展损失	220
11.2.2 衰减损失	220
11.2.3 传播理论	220
11.2.4 海面的反射和散射	221
11.2.5 海底的反射和散射	222
11.2.6 海底反射损失	222
11.2.7 声道	223
11.3 部分水下声学成像系统的工作原理	225
11.4 水下声学成像系统的特点	227
11.5 成像形式	230
11.5.1 声纳声学成像	230
11.5.2 正视声学成像	232
11.6 几个有代表性的水下声学成像系统	233
11.6.1 聚焦声学成像系统	233
11.6.2 电子波束聚焦水下声学成像系统	234
11.6.3 全息声学成像	237
11.7 机器人技术在水下声学成像中的应用	240
参考文献	241
第 12 章 地质勘探	242
12.1 引言	242
12.2 声学全息术应用到地震成像	243
12.3 现场试验范例	243
12.3.1 一维全息图阵列	243
12.3.2 二维全息阵列	244

12.4	实验室建模	249
12.5	图像处理和增强技术	249
12.5.1	弱信号增强	249
12.5.2	相位对比增强技术	249
12.6	计算机重建	250
12.6.1	共轭图像的去除	250
12.6.2	傅里叶变换全息图	250
12.6.3	计算机重建范例	251
12.6.4	横波传播或频率域偏移	253
12.6.5	相关全息图	253
12.7	地震全息术的其他应用	253
12.8	地震全息术中的信号处理	254
12.8.1	速率过滤	254
12.8.2	二维傅里叶变换技术	255
12.8.3	Tau-p 变换 (倾斜叠加)	255
12.8.4	Tau-p 反变换	256
12.8.5	$k-\omega$ 和 Tau-p 变换的范例	258
12.9	将衍射 X 线体层照相术应用到地震成像	261
12.9.1	重建算法	267
12.9.2	VSP 情形的计算机仿真	270
12.10	小结	271
	参考文献	272
第 13 章	量子声学成像	274
13.1	引言	274
13.2	将光学压电换能器用于产生纳米声波	274
13.3	纳米波的光学方向	277
13.4	纳米成像/量子声学成像	277
13.5	太赫兹声波的产生和放大	281
13.6	在有源 SL 中由光泵浦产生的电子逆转和声子放大理论	283
13.7	量子声学成像的源	285
13.8	量子声学成像的光子纠缠	285
13.9	量子声学成像的应用	286
	参考文献	287
第 14 章	负折射、声学超材料和声学隐身	289
14.1	引言	289
14.2	Veselago 理论的限制	289
14.2.1	引言	289
14.2.2	齐次电磁波方程的规范不变性	290

14.2.3 声场方程的规范不变性	291
14.2.4 声学隐身	291
14.2.5 非线性齐次声波动方程的规范不变性	292
14.2.6 我对负折射的重要发现,是坐标变换或负折射和隐身统一理论的一个特例 ...	292
14.2.7 结论	293
14.3 完美声学透镜的多散射方法	293
14.4 声学隐身	298
14.4.1 引言	298
14.4.2 换能声学的求导	299
14.4.3 应用到一个特例	302
14.5 具有联立负质量密度和负体积模量的声学超材料	303
14.6 依据非线性坐标变换的声学隐身	306
14.7 水下物体的声学隐身	310
14.8 将双重负性扩展到非线性声学	310
参考文献	310
第15章 基于超材料的新声学	312
15.1 引言	312
15.2 新声学和声学成像	313
15.3 声子晶体的基底	313
15.4 声子晶体理论——多散射理论	314
15.4.1 计算细节	317
15.4.2 结果讨论	317
15.5 由规范不变性(坐标变换)推导得到的负折射——另一种负折射理论 ...	318
15.5.1 作为负折射和隐身统一理论的规范不变性	318
15.5.2 曲线坐标广义形式的 Snell 定律	320
15.5.3 使用坐标变换设计一个完美透镜	320
15.5.4 一种通用的隐身透镜	321
15.6 在具有不同宇称的两种介质界面处声波的反射和传递	321
15.7 负包含的衍射理论	322
15.7.1 衍射 X 线体层照相术前向问题的形式化	322
15.7.2 对一种负介质中衍射过程的建模	326
15.7.3 数值仿真的结果	327
15.7.4 在数值仿真中要注意的要点	332
15.8 通过操作声音传播的预定方向,以包括质量密度和体积模量的广义形式,扩展到衍射理论	333
15.9 衍射理论的一种新方法——基于材料参数的一种严格理论	334
15.10 由反射不变量推导负折射(左右对称性)——负折射的一种新方法	334
15.11 各向同性不变性、时间反向不变性和折射不变性的统一理论	336

15.12	将新声学应用到声学波导	336
15.13	新的弹性性质	337
15.14	基于超材料的非线性声学	337
15.14.1	原理	337
15.14.2	声音衰减应用的非线性声学超材料	339
15.15	声学超材料中的超声衰减	339
15.15.1	能量传递和波衰减的机制	340
15.15.2	应用	340
15.16	声子晶体器件的应用	341
15.17	规范理论和 MST 在超材料中扮演角色的重要性比较——超材料理论的 总结	342
15.18	相比于非线性声学，新声学的影响	342
15.19	结论	342
	参考文献	343
第 16 章	未来方向和未来技术	345
	参考文献	345