

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代声学科学与技术丛书

# 声学超构材料

## ——负折射、成像、透镜和隐身

**Acoustic Metamaterials:**

Negative Refraction, Imaging, Lensing and Cloaking

[英] Richard V. Craster [法] Sébastien Guenneau 编

阚威威 吴宗森 黄柏霖 译



科学出版社

现代声学科学与技术丛书

Acoustic Metamaterials: Negative Refraction, Imaging,  
Lensing and Cloaking

# 声学超构材料

## ——负折射、成像、透镜和隐身

〔英〕Richard V.Craster 〔法〕Sébastien Guenneau 编

阚威威 吴宗森 黄柏霖 译

科学出版社

北京

图字号: 01-2018-6960

## 内 容 简 介

本书是一本介绍声学超构材料的著作,全书共12章。第1章介绍了等效近似方法等相关理论,第2章分析了周期阵列中声表面波的传播特性,第3章分析了在周期性及准周期性结构中预应力对弯曲波禁带和滤波特性的影响,第4章探讨了亚波长孔阵列的反常透射现象,第5章和第6章分别探讨了医学成像、逆散射以及基于时间反转的超分辨率聚焦等问题,第7~12章都是关于声隐身以及坐标变换的基本理论及近年的研究成果。

本书可作为声学超构材料领域的教师和科研人员的参考书,也可作为相关专业的研究生和高年级本科生教材。

First published in English under the title  
Acoustic Metamaterials: Negative Refraction, Imaging, Lensing and Cloaking  
edited by Richard V. Craster and Sébastien Guenneau  
Copyright ©Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013  
This edition has been translated and published under licence from  
Springer Nature B.V.

### 图书在版编目(CIP)数据

声学超构材料: 负折射、成像、透镜和隐身/(英)理查德 V.C. (Richard V. Craster), (法)圣巴斯蒂安 G. (Sébastien Guenneau)编; 阚威威, 吴宗森, 黄柏霖译. —北京: 科学出版社, 2019.5

(现代声学科学与技术丛书)

书名原文: Acoustic Metamaterials: Negative Refraction, Imaging, Lensing and Cloaking

ISBN 978-7-03-061209-0

I. ①声… II. ①理…②圣…③阚… ④吴… ⑤黄… III. ①声学材料  
IV. ①TB34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019) 第 090036 号

责任编辑: 刘凤娟 孔晓慧 / 责任校对: 杨 然

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年5月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019年5月第一次印刷 印张: 19 3/4

字数: 398 000

定价: 139.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 《现代声学科学与技术丛书》编委会

主 编：田 静

执行主编：程建春

编 委 (按姓氏拼音排序)：

陈伟中	邓明晰	侯朝焕	李晓东
林书玉	刘晓峻	马远良	钱梦騷
邱小军	孙 超	王威琪	王小民
谢菠荪	杨德森	杨 军	杨士莪
张海澜	张仁和	张守著	

## 原书序言 I

什么是声学超构材料？超构材料这一术语最先由 R. M. Walser 于 2000 年提出<sup>\*</sup>，至今已沿用了将近十年。他和追随者一再强调，超构材料是人为构造的，具有原自然界不存在的超常特性，可以通过不同组分材料形成原本由于经典物理规律制约而不会在相应组分中出现的新特性。就这个意义而言，清楚地表明，声学超构材料，不论是在空气中还是在水中传播的声波，也不论是在固体中的体波还是表面弹性波，或其他类型的机械波，都必须具有非同寻常的声学特性。

人们感兴趣的业已迅速发展的声学超构材料，以类似电磁超构材料的波动物理为基础。在负的折射系数、亚波长成像、时间反转技术、变换光学等方面，声学都有与之对应。声学超构材料可以说是电磁超构材料在声学中的类比。这方面的研究活动日益增加，以至于召开了诸多关于声学超构材料的专题会议，而且诸多学术杂志也发行了几个相关主题的特别专刊。然而我们不得不说，对于研究人员，特别是后起之秀，要跟上这个迅猛发展的领域是十分困难的。

因此，该书格外受到重视，因为它是第一本全面介绍声学超构材料研究的书籍，尤其适合没有声学超构材料背景的科学家、工程师和数学家。该书共 12 章，都是由本领域最著名的学者领衔撰写的，一般说来它们都属于综述文章。这种形式的文章使有一些声学理论和应用背景的读者能迅速理解声学超构材料的各种现象、应用和相关理论。该书编者 Richard Craster 和 Sébastien Guenneau 都深入研究过这方面的课题，他们进行过大量理论和实验研究，对声学超构材料研究的发展做出了重要的贡献。当他们自己熟悉的领域在快速发展时，他们意识到需要一个单一的信息来源，让对此感兴趣的科学家能够迅速地从广泛的课题，如动态均一化、亚波长声成像和变换声学中，找到自己所需要的信息。在此之前没有任何现成的教科书可以如此方便地让人获取所有这些信息。我要感谢该书作者们合作所完成的综述文章，感谢他们对当前声学超构材料的研究做了相当深入和广泛的介绍。

声学超构材料融合了多种学科，提出了许多富有趣味性和挑战性的问题。例如，变换声学 with 声隐身密切相关，该问题涉及微分几何、偏微分方程、实验声学、连续介质力学、各向异性、等效介质、多重散射、数值模拟、材料制造等。在其中任何领域有背景的研究人员将会找到他们所感兴趣的课题。我发现在课题涵盖的

---

<sup>\*</sup> Walser R. M. Metamaterials: What are they? What are they good for? APS March Meeting Abstracts, 2000: 5001

方面来看, 声学超构材料是最令人兴奋和值得赞扬的。我希望读者看完该书之后, 会和我一起分享对声学超构材料的这份热情。

Andrew Norris 教授

罗格斯大学, 皮斯卡塔韦, 新泽西州, 美国

## 原书序言 II

超构材料的研究通常被认为仅仅和以前所未有的方式构建装置与系统来控制电磁波和光的传播相关。的确，正是由于这种创新和奋进的观念，John Pendry 爵士引起了全世界的科学家、数学家和工程师对此的兴趣。

然而，逐渐变得明显的是，从超构材料的研究中出现的新概念和技术不仅限于电磁学的领域，事实上，我们正在目睹与波动有关的整个科学领域的一场革命。正是这本书的及时出版，使人们第一次能够全面了解超构材料概念对控制声波和弹性波的影响。

对于那些已经知道声波或弹性波与结构化系统的相互作用的人，无需告诉他们该书有多么重要。而对于那些正在考虑投身于这个领域的人来说，则有许多的理由劝说他们为什么应该开始从事这个领域的研究。该书的确是一个不可多得的有关声学超构材料的指南。首先，值得一提的是 Edmund Hillary 爵士的经典理由：“事出有因”。声学超构材料领域相对来说还在发展之中，却有更丰富的挑战和机会。其次，在光学超构材料研究中遇到的许多困难不一定会出现在声学超构材料中。例如，为了在光学特性中实现强对比度，通常需要使用金属，这伴随着强烈且不希望的能量消耗或损失。在声学和弹性动力学中容易实现强对比度和弱能量耗散的组合。声学超构材料的制造也比光学超构材料容易得多。其他的动机和原因可望在该书的不少章节中有所涉及。

该书的主要作者和贡献者不少是这个新领域里国际知名的和受人尊敬的研究人员。他们利用广博的知识和丰富的经验，组成一个著名的作家团队，把一篇篇优美的文章和一幅幅精巧的图片说明结合在一起，将该领域的基本概念和最新的惊人发展呈现给需要了解这个领域的读者。

该书的出版正值其研究领域发展的激动人心的时期，我们所做的不仅仅是在此领域发展的一个关键阶段，将越来越多的相关研究记录下来，其中包含的思想和技巧将使其在未来几年内成为声波、电磁波等领域科学家图书馆中不可或缺的元素。

Ross McPhedran 教授

澳大利亚悉尼大学物理学院，CUDOS

## 前 言

1931年在苏格兰物理学家和数学家麦克斯韦诞辰一百周年之际，爱因斯坦发表纪念文章赞扬麦克斯韦是牛顿以来最具洞察力和成果最丰富的物理学家。爱因斯坦把麦克斯韦和法拉第以及牛顿的照片并排地悬挂在他书房的墙上。

麦克斯韦最出名的工作是建立了一套完整的经典电磁场理论体系。他把之前没有被联系起来的电、磁和光学的实验观察与方程综合在一起，用了四个偏微分方程揭示了电磁场的本质。重要的是，麦克斯韦方程组保留了它们在坐标变换后的形式不变性，催生了广义相对论的爱因斯坦场方程。1915年以一个简约的形式发表的爱因斯坦的方程组，将10个耦合的非线性方程集合于一体，描述了物质和能量造成时空弯曲的引力的基本相互作用。这些张量公式经几何变换能保持形式不变。在广义坐标系统中，如非欧几里得矩阵，它们把光表达为沿测地线的弧形轨迹。这样，光在时空会被大规模的宇宙物体弯折，如重行星或黑洞（在后一种情况下，光如果进入所谓的视界最终被吞噬，但那是另一回事）。英国物理学家 John Pendry 爵士的贡献是他在2006年认识到，在实验室尺度中通过合理设计超构材料，介电常数和磁导率使光线在电磁空间弯曲，可以极大地提高对光的控制，而时间变量只起一个参数的作用。这种创造性提议打开了光子学新的远景，如快速发展的隐身技术。

此外，麦克斯韦在其他方面也有开创性的工作，比如他在1861年英国皇家学会关于色彩理论的演讲时呈现的第一张耐用的彩色照片（使用三基色分析和合成颜色，几乎成为所有后续光化学和电子色彩学方法的基础）。麦克斯韦为后人所认可的还有，例如，在许多桥梁上可以见到的杠杆-铰链结构刚度方面的基础工作。他较后期的科学遗产也许鲜为人知，却为电磁和声学超构材料的平行发展奠定了基础，因此也极为重要。连续介质力学基于牛顿在1687年出版的《自然哲学的数学原理》，这比麦克斯韦在固体力学方面的工作早了两个世纪，并奠定了大多数经典力学的基础。在这种开创性的工作中，牛顿描述了万有引力定律和运动三大定律。同时，牛顿对光理论也饶有兴趣：他建造了第一架实用反射式望远镜，并且基于三棱镜将白光分解成多种颜色，形成了可见光谱理论。在数学上，牛顿和莱布尼茨一起发展了微积分，它无可否认地成为现代分析的中心。

牛顿第一定律（惯性定律）指出，如果没有外力干预，一个处于静止状态的物体会继续保持静止，而匀速运动的物体倾向于维持它的匀速运动。这个定律的意义是参考系（称为惯性系）的存在使处于参考系中的物体在不受外力作用的情况下



匀速运动 (静止状态是其特例)。该定律是伽利略和洛伦兹力学的核心。在第 1 章,我们在电磁波和机械波之间做出一些有用的类比,使得在转换坐标系后能控制它们的轨迹。变换光学和声学是一个非常热门的话题,并将在第 7~12 章中进一步讨论。牛顿第二定律进一步指出,施加给物体的力等于其质量乘以它的加速度。对于刚性固体而言,该定律依然有效,只是人们该考虑的是固体的质量中心。第 1 章由 Guenneau 和 Craster 撰写。这一章强调牛顿第二定律是一个非常精准的定律,它在电磁超构材料和声学超构材料之间起了一个桥梁性的作用,可以把这两种超构材料近似地看作通过弹簧连接起来的分立的质量系统。利用 20 世纪 90 年代后期由 Kozlov、Movchan 和 Mazy 提出和发展的多结构概念,对开环谐振器组成的局域谐振结构的平均性能 (谐振时有效负磁导率或密度) 进行了详细的动态分析。在小连结和刚体之间交汇处的渐近分析涉及牛顿第二定律。另一种实现真正负折射率的方式是考虑高对比度的材料参数,采用经典的低频均质方法建模。与此相反,声子晶体中全角度负折射 (AANR) 源于这一章也要讨论的最近由 Craster 和 Kaplunov 提出的高频均质化的方法,其实,全角度负折射是负群速度的波沿一定晶格方向传播的结果。

第 2 章由 Khelif、Achaoui 和 Aoubiza 撰写。这一章专注于半无限的基体表面上周期性均匀排列的圆柱体阵列引起的弹性禁带的数值分析 (使用时域有限差分并与 Floquet-Bloch 条件耦合,从而包含了横向的周期性,此处由于垂直方向假设为无限延伸,需建立完美匹配层)。沿表面传播的弹性波 (瑞利波) 一部分会在半平面附近沿法线方向指数衰减,一部分和体 (压力和剪切力的) 弹性波产生耦合。根据圆柱体高度的不同,在物理上,声学超构材料的局域共振行为导致低频禁带 (对于足够高的圆柱体,它们可以弯曲、旋转等),而声子晶体的周期性则导致经典的布拉格效应 (对于高度较小的圆柱体而言)。晶格对称性对禁带的不同影响通常被用来区分声子晶体和超构材料。在柱子较高的情况下,晶格对称式的变化对禁带位置的影响不大,而在后一种情况下,使用六角形而不是正方形的格子可使禁带变宽。

第 3 章由 Gei、Bigoni 和 Bacca 等撰写。他们调研了在周期性、准周期性梁,以及在周期性板中的预应力对弯曲波的禁带和滤波特性的影响。在第一部分中,他们对在有弹性支撑 (Winkler 型) 的施加了预应力的梁中的周期性 Floquet-Bloch 弯曲波的传播建模,得到一个四阶常微分方程。然后,通过调整其中一些单元的尺寸,以引入一些准周期性图案 (超晶格的方法),而这又导致类似于 Anderson 的局域化效果。他们还研究了准周期梁中的禁带和自相似特性。为了定位禁带的位置,使用了在光学中所使用的传输矩阵模型 (而这里的重点是弯曲波)。在第二部分中,作者考虑通过在法向和切向施加牵引力 (拉伸预应力) 形成预应力板,并且进行有限元计算,预期通过改变预应力的方法去调整禁带的位置。

第 4 章由 Estrade、de Abajo 和 Meseguer 等撰写。他们研究了浸于液体的周期

穿孔板中压力波对亚波长小孔的反常透射。为了理解压力波如何进入周期狭窄通道,作者先是使用标量波动方程对刚性壁包围的流体中的压力波建模。将数值结果与考虑了声波从液体到固体壁透射的全弹性声学理论(其中压力波与剪切波耦合)进行比较,相关结果与实验非常吻合。与光波不同的是,从完全刚性薄膜的各个亚波长孔透射的声波近似与它们的面积成正比。此外,完全刚性薄膜中的多孔阵列没有出现全声透射,这与光波在 Ebbesen 实验中的反常透射结果不同。然而除此之外,还观察到质量定律未预测到的反常声屏蔽。作者还揭示出在 Wood 异常极小值和板波模式之间的独特相互作用。

第 5 章由 Simonetti 撰写。对在有很好前景(如乳腺癌检测)的医学成像领域中超声波高分辨率成像技术和实验的最新进展做了非常全面的调研。成像技术中遇到的瑞利准则指的是图像的分辨率的极限是工作波长的一半左右,由于这种限制,无法实现亚波长对象的重建。作者将波束形成算法与逆散射理论结合起来,克服了上述极限。他最初使用的方法涉及远场算符的分解,此算符包含物体亚波长尺度在远场散射波中的信息。这种方法的物理基础是,当探测波在物体内部传播时,多重散射导致了此探测波的变化,它解码了探测波所经历的畸变,因此有必要从逆散射角度恢复成像信息。计算机科学的进步能快速和准确地把物体对自由传播的超声产生的扰动进行映射成像,该方法的分辨率仅由检测器的动态范围决定。

在第 6 章, Fink 和 Lemoult 等回顾了应用于亚波长电磁波和声波成像的时间反转技术的最新进展。作者解释了波动方程的时间反转对称性如何使得换能器元件发出的压力波从远场再聚焦回到原点。在该实验中,在时间反转腔内介质的非均质性使成像效应更为便利,而且越复杂的介质,聚焦的效果越好。作者通过著名的“扫帚实验”: 8 个 2mm 长的电抗型的天线辐射 2.5GHz 的电磁波, 天线周围随机地放置 3cm 长的铜导线, 彼此相距约  $1/30$  波长的距离, 形成时间反转系统使电磁波汇聚到其中两个天线上。周期性排列的苏打罐作为亥姆霍兹共振器可对压力波进行类似的实验。通过时间反演, 聚焦点的分辨率已经达到波长的八分之一, 而且随着迭代时间反转技术的进步, 分辨率可望远好过这个数值。

在第 7 章, Li、Liang、Zhu 和 Zhang 回顾了基于坐标变换的声学超构材料的理论和实验特性。他们解释怎样通过流体中超构材料的密度各向异性控制压力波在结构性流体中的传播。使用该方法的几个例子包括: 一个由黄铜片组成的声学地毯隐身斗篷把地面凸起物造成的散射波前恢复成平面。由 36 个铜片组成在空气中展开呈  $180^\circ$  的放大超透镜可以向三个预定方向辐射压力波。最后, 用多孔结构化超构材料实现了亚波长成像, 由于沿声波导方向非常强的有效密度各向异性, 结构可看作由 Pendry 所提出的在电磁波频段的著名瑞士卷实验的声学版。

在第 8 章, Cummer 阐述变换光学和变换声学之间的类比, 并且通过材料参数和波动现象深入解释什么是虚拟空间(原始介质)和物理空间(变换介质)。通过

压力波的几何变换设计了波束转换器和声学隐身。这一章讨论了声学超构材料的一些具体结构示例，并详述了利用含空气间隙的穿孔薄塑料板所实现的声学隐身实验。

第 9 章由 Sánchez-Dehesa 和 Torrent 撰写。总结了如何将均质化的技术应用于声学隐身。通常基于交替使用不同的密度和模量的流体构成多层结构。作者还建议在流体层中添加一些结构性元件，如所谓的声子晶体的圆柱形物体。通过一个锯齿状的超构材料形成各向异性流体的实验，解释了声学隐身的物理限制。

第 10 章由 Haberman、Guild 和 Alù 撰写。解释如何通过散射消除实现等离子和反共振隐身。他们设法对各向同性的不锈钢、铝和玻璃球，以及一个包含流体的薄壳结构实现压力波的隐身斗篷。他们还研究了由多层流体组成的等离体隐身。

第 11 章由 Kadic、Farhat、Guenneau、Quidant 和 Enoch 撰写。他们研究了表面液体和电子波伪装理论和实验结果。前者基于一种浸渍在流体中的介质结构诱发出的有效各向异性剪切黏度，后者与含介电小圆柱结构的金属表面电磁场的共形变换有关。

在第 12 章中，Vasquez、Milton、Onofrei 和 Seppecher 对麦克斯韦方程 (电磁学)、亥姆霍兹方程 (声学) 和 Navier 方程 (弹性动力学) 的坐标变换技术进行了深入透彻的调研。他们看到可望在弹性隐身术中使用的配有转矩效果的变换质量弹簧网络 (所谓的弹性动力学离散变换)。他们还讨论了通过不完全包围隐身区的有源散射抵消入射场 (外部伪装) 的隐身术。作者利用了他们在零频率 (二维拉普拉斯) 和有限频率 (三维亥姆霍兹) 问题方面丰富的数学工具。有些定理用于在作二维保角变换时有显式多项式解的传导性方程，有些用于在设计实现声隐身时所需的显式单极和偶极源所对应的亥姆霍兹方程。作者最后仔细讨论了紧密排列的球形外部伪装斗篷。

本书共 12 章，对声学超构材料在各个方面的最新发展，包括滤波效应、非正常的声透射、通过断层扫描或时间反转技术实现的亚波长成像、通过声学变换和弹性力学完成的隐身术，甚至声散射消除技术以及有源外部隐身术等，都给出翔实的介绍。但是，我们不认为本书涵盖了结构化表面、固体或流体可能会导致的声波现象的全部主题。尽管如此，我们希望本书谈到的各个课题，以及处理它们的方式 (理论、数值结果、实验)，能够使读者窥见这门新兴的声学超构材料课题的多姿多彩性，并将有助于促进在不久的将来涌现出更多的研究成果和出版物。

在 Springer 出版社有许多我们需要感谢的编辑人员，他们给予本书的出版方方面面的帮助。我们也要感谢老人星学术出版有限公司执行主任 Tom Spicer 对于这项工作的付出。

最后，我们想对所有作者的构思以及他们的投入和贡献表达最深切的谢意，并

感谢 Andrew Norris 教授和 Ross McPhedran 教授欣然同意为本书所撰写的序。

Sébastien Guenneau 于法国马赛

Richard V. Craster 于英国伦敦

# 目 录

第 1 章 声学超构材料基础	1
1.1 引言	1
1.1.1 电磁超构材料和通过反应的隐身术	3
1.1.2 声学超构材料和负折射率透镜	4
1.1.3 基于局域谐振模型的电磁超构材料和声学超构材料的对应关系	5
1.1.4 类比控制方程给出的电磁和声学超构材料的对应关系	7
1.1.5 折射型斗篷: 通过几何变换控制电磁场和弹性波场	9
1.2 窄域谐振器的渐近模型: 声学超构材料的弹簧质量模型	14
1.3 复合材料的均质化	19
1.3.1 高对比介电光子晶体的均质化	19
1.3.2 人造各向异性	20
1.3.3 人造磁性	20
1.4 高对比声子晶体均一化方法	21
1.4.1 均一化结果: 各向异性剪切模量和色散密度	21
1.4.2 多尺度分析	22
1.4.3 在重缩放嵌入体中求解谱问题	25
1.4.4 Zhikov 函数和 Floquet-Bloch 图之间的对应关系	26
1.4.5 色散等效参数和负折射	30
1.5 高频均质化	32
1.6 结论	37
参考文献	37
第 2 章 低频表面波禁带相关应用中的局域谐振结构	41
2.1 引言	42
2.2 模型与计算方法	43
2.3 结果与讨论	45
2.3.1 局域谐振表面导波模式的能带图	45
2.3.2 局域谐振表面导波模式的声波透射	47
2.3.3 局域谐振表面声禁带的晶格对称效应	51
2.3.4 结论	53
参考文献	53

<b>第 3 章 预应力结构的禁带特性</b> .....	55
3.1 引言 .....	55
3.2 基于弹簧模型的周期梁禁带分析 .....	56
3.2.1 色散图和禁带频移 .....	58
3.3 禁带局域缺陷模 .....	59
3.4 拉伸预应力周期板 .....	61
3.5 准周期梁结构中的禁带和自相似性 .....	67
3.5.1 色散图以及通带禁带分布 .....	69
3.5.2 预应力效应 .....	72
参考文献 .....	74
<b>第 4 章 周期性穿孔板结构的超声透射特性</b> .....	77
4.1 引言 .....	78
4.1.1 均匀板 .....	78
4.2 研究背景 .....	79
4.2.1 单孔情况 .....	80
4.3 周期穿孔板理论 .....	85
4.3.1 几何关系 .....	85
4.3.2 刚性固体理论 .....	87
4.4 实验装置 .....	91
4.5 结果 .....	92
4.6 总结和结论 .....	100
参考文献 .....	101
<b>第 5 章 新型超声成像之应用</b> .....	107
5.1 引言 .....	107
5.2 成像问题 .....	111
5.2.1 衍射极限 .....	112
5.3 声散射以及远场算符 .....	113
5.3.1 玻恩近似 .....	114
5.3.2 分解远场算符 $T_\infty$ .....	114
5.4 波数形成和衍射断层成像 .....	116
5.5 亚波长成像 .....	119
5.5.1 含噪声测量结果的信息容量 .....	119
5.6 非线性逆散射 .....	122
5.6.1 取样方法 .....	123
5.7 实验结果 .....	124

5.8 结论	127
参考文献	127
<b>第 6 章 超构材料中利用远场时间反转实现亚波长聚焦</b>	<b>131</b>
6.1 引言	132
6.2 时间反转聚焦的基本原理	133
6.3 电磁波的时间反转以及远场亚波长聚焦	136
6.3.1 基本原理	136
6.3.2 通过远场 TR 方法进行亚波长聚焦的实验验证	137
6.4 在共振导线阵列中基于时间反转的远场亚波长聚焦	140
6.5 相关概念的推广和声学中的应用	145
6.5.1 使用任意的亚波长谐振器进行远程时间反转的亚波长聚焦	145
6.5.2 利用苏打罐阵列以及时间反转打破声音的衍射极限	146
6.6 结论	152
参考文献	153
<b>第 7 章 变换声学和声学成像中的各向异性超构材料</b>	<b>157</b>
7.1 引言	157
7.2 阻断声波的各向异性超构材料	158
7.3 声学斗篷	161
7.4 声亚波长成像	167
7.5 结论	178
参考文献	178
<b>第 8 章 变换声学</b>	<b>183</b>
8.1 引言	183
8.2 初始的想法: 变换电磁学	184
8.2.1 变换电磁学理论	185
8.2.2 变换电磁可以扩展到其他类型的波吗?	186
8.3 变换声学	186
8.3.1 变换声学的简明推导	186
8.3.2 变换声学对材料的一些初始评估	189
8.4 应用实例	190
8.4.1 声束移位	190
8.4.2 声学隐身外壳	193
8.5 制作变换声学材料	196
8.6 变换声学的最新实验结果	197
8.7 相关的理论和启示	198

8.8 总结 .....	199
参考文献 .....	199
<b>第 9 章 通过均质化实现声学隐身 .....</b>	<b>202</b>
9.1 引言: 声学隐身斗篷 .....	202
9.2 一维流体-流体系统的动力学质量各向异性 .....	204
9.3 二维声学晶体的均质化 .....	206
9.4 实施含声学晶体的声学隐身 .....	210
9.4.1 用声学晶体工程实现超构流体 .....	212
9.4.2 利用沟槽结构实现超构流体 .....	213
9.5 实际制作声学隐身斗篷时遇到的问题 .....	216
9.6 总结 .....	218
参考文献 .....	219
<b>第 10 章 等离子壳层声学隐身斗篷 .....</b>	<b>221</b>
10.1 引言 .....	221
10.1.1 概述 .....	222
10.2 理论公式和数值计算 .....	223
10.2.1 散射强度的定义与声隐身的方法 .....	225
10.2.2 散射场的最小化 .....	227
10.3 等离子隐身和反谐振隐身 .....	228
10.3.1 固定刚性球体隐身 .....	229
10.3.2 可穿透流体球的隐身 .....	231
10.3.3 隐身各向同性的弹性球壳 .....	235
10.4 总结 .....	240
参考文献 .....	241
<b>第 11 章 对流体表面波和等离子体激元的隐身术 .....</b>	<b>243</b>
11.1 引言 .....	243
11.2 流体表面波的声学隐身 .....	245
11.2.1 从 Navier-Stokes 方程到亥姆霍兹方程 .....	245
11.2.2 通过均质化获取有效各向异性的剪切黏滞度 .....	247
11.2.3 LSW 隐身物的数值计算 .....	248
11.2.4 LSW 隐身的实验测量 .....	251
11.3 光学伪装的表面等离子体激元 .....	251
11.3.1 表面等离子体激元 (SPP) 简介 .....	251
11.3.2 从变换光学到变换等离子体 .....	254
11.3.3 等离子体隐身的数值分析 .....	255



11.3.4 等离子体隐身的实验测量 .....	258
11.4 LSW 和 SPP 隐身的结束语 .....	260
参考文献 .....	261
<b>第 12 章 变换弹性动力学及外部有源声学隐身 .....</b>	<b>264</b>
12.1 变换弹性动力学 .....	265
12.1.1 连续变换弹性动力学 .....	266
12.1.2 离散变换弹性动力学 .....	268
12.1.3 扭矩弹簧 .....	269
12.1.4 离散型网络扭矩弹簧的同质化 .....	271
12.2 外挂有源伪装的准静态定则 .....	273
12.2.1 外挂有源伪装设计 .....	273
12.2.2 传导率方程 .....	274
12.2.3 在零频率附近的显式多项式解 .....	276
12.2.4 扩展和应用 .....	279
12.3 外挂有源伪装的亥姆霍兹方程 .....	279
12.3.1 格林公式伪装 .....	280
12.3.2 外挂有源伪装 .....	281
12.3.3 一组具有 4 个装置的外挂斗篷系列 .....	284
12.3.4 数值实验 .....	285
参考文献 .....	288
英中文对照 .....	292
《现代声学科学与技术丛书》已出版书目 .....	295