文章编号：1007 - 4252(2021)02 - 0002 - 067

声学超材料的结构设计概述

孟德世，李丽君*，李　敏
(山东理工大学 交通与车辆工程学院，淄博 255049)

摘要： 对声波的人工调控是声学研究的核心问题之一，也是声学成像、治疗、探测通信等领域的关键技术。声学超材料相比天然材料能表现出新的物理效应，如负质量密度、负弹性模量、负折射率等，可以产生和实现多种新颖的声学现象和功能，如声学隐身、声学亚波长成像、声波完美吸收等，呈现出巨大的发展潜力。本文根据近年来声学超材料的研究概况，阐述声学超材料的发展历程，研究内容以及实际应用，对了解声学超材料特性，扩展相关研究，提供了参考。

关键词： 声学超材料；等效质量密度；等效弹性模量；局域共振；声波调控
中图分类号： TB34　　**文献标志码：** A

Structural design of acoustic metamaterials

MENG De-shi，LI Li-jun*，LI Min
(School of Transportation and Vehicle Engineering，Shandong University of Technology，Zibo 255049，China)

Abstract: The artificial control of acoustic waves is one of the core problems in acoustic research，and also the key technology in the fields of acoustic imaging，therapy，detection and communication. Compared with natural materials，acoustic metamaterials exhibit new physical effects，such as negative mass density，negative elastic modulus，negative refractive index，etc.，and it can produce and realize a variety of novel acoustic phenomena and functions，such as acoustic stealth，acoustic subwavelength imaging，acoustic perfect absorption，etc.，that showing great development potential. Based on the research of acoustic metamaterials in recent years，the development history，research content and practical application of acoustic metamaterials are described in this paper，which provides a reference for understanding the properties of acoustic metamaterials and expanding the related research.

Key words: Acoustic metamaterials；Equivalent mass density；Equivalent modulus of elasticity；Local resonance；Acoustic regulation

收稿日期： 2021-03-24；　**修订日期：** 2021-04-12
基金项目： 山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME123).
作者简介： 孟德世(1998-)，男，山东临沂人，硕士，从事车辆振动噪声控制研究(E-mail：1281141325@qq.com)；
李　敏(1996-)，女，山东潍坊人，硕士，从事车辆振动噪声控制研究(E-mail：1780738748@qq.com).
通信作者： 李丽君(1977-)，女，山东淄博人，教授，博士，从事车辆振动噪声控制、隔声及吸声材料、结构强度及刚度评价等研究(E-mail：lilijun@sdut.edu.cn).

0 引言

声学是研究声波的产生、传播和探测的一门科学，它不仅与国防、医疗、航空航天等领域密切相关，也与日常生活紧密联系。如何自由地人为操纵声波的传播是声学研究的核心问题之一，由于天然材料属性的限制，比如无法通过小尺寸调控低频声波，人们需要一种具备超常物理性能的人工复合材料或复合结构来有效调控声波的传播。声学超材料就是满足这一需求的一门学科，声学超材料是在亚波长物理尺度上的具有超常力学、声学性能的复合结构，主要表现在某一特定的频率范围内可以阻碍或抑制声波的传播，这一特性称为带隙，该特性为减振降噪提供了一种全新的思路和方法，受到国内外学者的广泛关注和研究。近年来，声学超材料在多个领域迅速发展，表现出巨大的发展潜力，为声波调控提供了新途径，具有重要的理论和实际应用价值。

1 声学超材料发展历程

超材料的发展源于苏联科学家 Veselago [1] 对调控电磁波的大胆猜想。Veselago 认为如果体现材料色散关系的两个基本参数，介电常数和磁导率为负值(也称为“双负材料”)，那么材料的折射率就会表现为负值，在此之前折射率被认为只能是正值。理论分析表明：在双负材料中，电磁波的能量传播方向(群速度)与相位传播方向(相速度)相反，这时波矢 K、电场 E、磁场 H 三矢量之间满足左手螺旋定则，这与电磁波在传统材料中的传播规律相反。

Bell 实验室的 Yablonovitch [2]，Priceton 大学的 John [3] 在 1987 年类比电子晶体各自独立提出光子晶体的概念，光子晶体的带隙特性(禁带)使得带隙内光波无法通过，这是周期分布的电介质对电磁波调制的结果。Krauss 等 [4] 于 1996 年制造出了第一个可见光频段的一维光子晶体。Pendry 和 Smith 等 [5,6] 提出了金属细线和开口谐振环为单元的周期结构来分别实现负介电系数与负磁导率。

类比光子晶体，Kushwaha 等 [7] 于 1993 年首次明确提出声子晶体的概念并通过计算得到二维声子晶体的带隙。在此之前，Sigalas 和 Economou [8] 于 1992 年发现并计算出声波带隙。与光子晶体类似，声子晶体也是由于周期介质的调控使得在某些频率范围内的弹性波无法通过，形成弹性波带隙。

2000 年，Liu 等 [9] 提出了一种基于局域共振原理的声子晶体结构：用弹性材料包裹高密度质量体，即用软橡胶包裹铅块，如图 1。弹性介质中周期排列的局域共振单元，利用局域共振效应，突破了布拉格散射机理的限制，成功实现了小尺寸结构对低频声波的抑制。

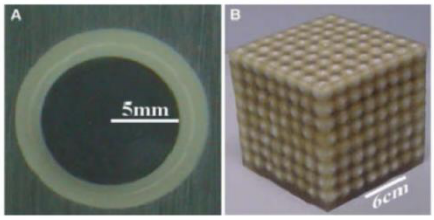


图 1 局域共振声子晶体结构 [9]

Fig. 1 Local resonance phonon crystal structure [9]

Mei 等 [10] 认为局域共振单元使复合介质的等效质量密度发生了很大的变化，在共振频率附近产生了负的等效质量密度，从而实现了低频声波带隙，并于 2012 年研究并设计出一种薄膜型声学超材料(如图 2)，把铁片镶嵌在弹性薄膜上，成功实现在 100 Hz 到 1 000 Hz 大频率范围内吸收空气声波，在系统共振时，由于薄膜和铁片的完全耦合，能够达到完全吸收声波的效果。

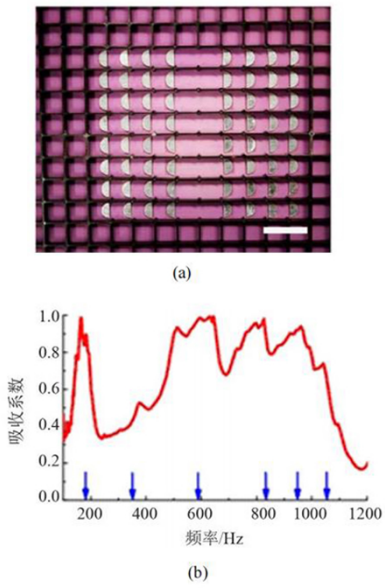


图 2 (a) 薄膜型声学超材料结构模型；(b) 吸声系数曲线 [10]

Fig. 2 (a) structure model and (b) absorption coefficient curve of thin film acoustic metamaterial [10]

Li 等[11] 于 2004 年从理论上证实了存在一种在特定频率范围内同时表现出负的等效弹性模量和负的等效质量密度的复合结构，该结构能表现出独特的物理性质，如负折射率和亚波长声聚焦，由此提出了声学超材料的概念。

具有经过特殊设计的局域共振单元是早期声学超材料的共性，也就是在基体中周期性嵌入具有共振特性的微结构单元，即局域共振单元、亥姆霍兹共振腔等。Fok 等[12] 认为超材料共同特点是都具有局域共振单元，其特性在于能在亚波长范围内实现特殊的声学特性。Norris[13] 于 2008 年提出利用六边形格栅单元结构构造人工周期结构，实现具有类似流体特性的五模超材料(pentamode metamaterials，PM) 的设计思路。PM 通过亚波长的单元结构设计可以实现等效参数的大范围调节，但其性质的变化不需要共振效应。因此，研究声学超材料的另一个研究小组—Torrent 等[14] 认为，能够设计单元使等效材料参数发生大范围变化的人工声学结构就可以称为声学超材料，负等效质量密度和负等效弹性模量等特殊效应是其等效材料参数大范围变化的极端表现。

声学超材料目前没有严格的定义，但通过其发展历程和共性可以定义为: 在亚波长物理长度进行设计，获得天然材料不具备的超常物理性能的人工周期或非周期结构。值得注意的是，声学超材料最突出的特点就是具有负的等效质量密度、负的等效弹性模量以及负折射率等特殊物理效应。

声学超材料最深远的意义在于可以人为调控声波的传播，通过对单元的设计，可以自由地实现如等效质量密度、等效弹性模量为正值、零甚至负值的材料参数，从而实现声波在特定范围的局域、反射、折射，甚至任意方向的弯曲传播。该概念代表的是一种全新的复合材料或结构设计理念，在认识和利用当前材料的基础上，按照自己的意志设计、制备新型材料。

2　声学超材料的主要研究内容

声学超材料已成为基础研究的热点，近年来声学超材料在新物理效应研究、波场控制机理、结构设计、实际应用等方面进行了大量研究工作，可概括如下。

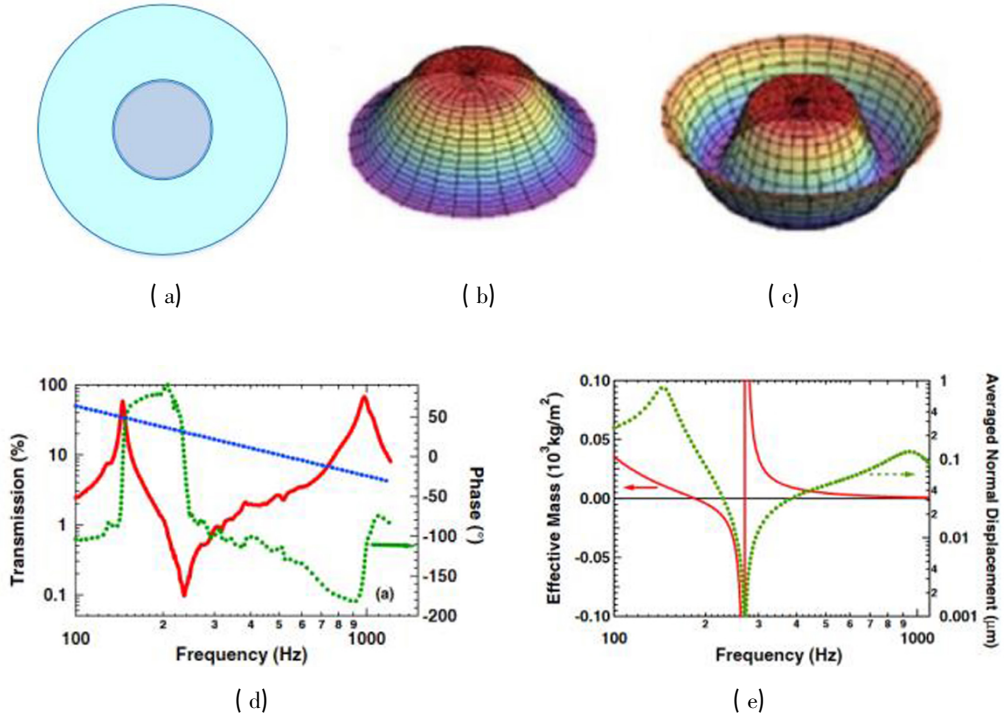
2.1　声学超材料的特殊物理效应研究

介于 Bragg 散射型声子晶体所需结构尺寸与声波波长位于同一数量级的局限性，局域共振型声学超材料能够在较小的尺度设计单元结构产生新效应。目前研究表明，声学超材料能实现的特殊物理效应包括负质量密度、负弹性模量、“双负”特性、负折射效应、低频吸声效应、反常投射效应等。

1) 负质量密度

质量密度是物质的基本属性，常规材料的静态质量密度均为正值，且只跟材料的质量和体积有关[15]。当声学超材料在声波的作用下发生振动时，需要关注的是声学超材料的动态质量密度。由牛顿第二定律 $F = ma$ 可知，在绝大多数情况下，质量单元加速度方向和声波作用力方向相同，等效质量密度为正值。但当在一定的条件下，质量单元的加速度方向与声波作用力相反时，根据 $m = F/a$，等效质量密度为负值，即超材料出现负响应。声学超材料出现负质量密度可以这样解释: 在声波的作用下，超材料内部质点会发生振动，当到达质点的本征频率时，质点的振动不再受外界声波的影响，这时质点加速度方向和声波作用力相反，进而实现负等效质量密度。

Liu 设计的三维核壳结构的声学超材料首先实现了负等效质量密度，但加工制作复杂困难。Sheng 等人[16] 于 2008 年在核壳结构基础上设计出二维薄膜结构。图 3(d) 中蓝色虚线为按照质量密度定律计算的投射结果，明显与实验结果不同，说明薄膜系统共振后的性质与静态质量性质不同。如图 3(e) 所示，在透射低谷附近等效质量为负值。薄膜结构相比核壳结构设计简单，由此成为实现负等效质量密度的主要结构。



(a) (b) (c)

(d) (e)

图 3 (a) 薄膜结构示意图; (b) (c) 两种共振模式; (d) 透射曲线(红),相位曲线(绿),质量密度定律预测曲线(蓝); (e) 等效质量密度曲线(红)和平均位移曲线(绿)[16]

Fig. 3 (a) structure of the film; (b) (c) two resonance modes; (d) transmission curve (red), phase curve (green), prediction curve of mass density law (blue); (e) equivalent mass density curve (red) and average displacement curve (green)[16]

在局域共振思想的指导下,研究者们提出多种能实现负质量密度或近零质量密度模型。Yao 等[17]设计了一维的弹簧振子系统,并通过 CCD (charge coupled device)实验研究了其负等效质量密度和零质量密度,并解释了负质量密度的产生机理。Zhou 等[18]提出了一个近零质量的、具有各向异性质量的平板材料,其中一个对角线具有无穷大质量而另一个对角线质量为零。Yang 等[19]设计了一种负等效质量密度的多重共振薄膜系统,利用薄膜系统的宽频共振,实现 50 Hz 到 1 000 Hz 的宽屏带声吸收。Huang 等[20]设计了一种二维的各向异性负等效质量密度系统。He 等[21]设计了一种周期性排列的非局域共振型的钢条结构,用数值仿真的方法证明了这种结构能够在水介质中实现负等效质量密度和负的折射率。

目前,负质量密度声学超材料结构都是基于局域共振理论进行设计,通过基体中声波与局域振子相互耦合,在共振频率附近,动态质量密度会发生剧烈变化,表现出负的等效质量密度。

2) 负弹性模量

弹性模量同样也是物质的基本属性之一,根据弹性模量表达式,在声场的作用下,声媒质发生压缩膨胀变化。正常情况下,外界声场压力压缩声媒质时,声媒质收缩;外界声场压力拉伸声媒质时,声媒质膨胀。但对于人工设计的声学超材料而言,其在共振状态时以自己的本征频率收缩膨胀变化,而不受外界声场的影响。当外界声场压缩声媒质时,媒质膨胀;当拉伸声媒质时,媒质收缩。此时超材料产生负响应,弹性模量为负值。

2006 年,Fang 利用亥姆霍兹共振腔一维阵列实现了负等效弹性模量[22]。如图 4 所示,在波导的一段输入激励信号,激发亥姆霍兹共振腔短管处的流体运动,当达到共振腔的共振频率时,共振腔短管处的声波与波导声场运动反向,进而导致等效弹性模量为负值。图 4 中,$Re(E)$ 和 $Im(E)$ 分别是等效弹性模量的实部值和虚部值。

Fang 通过亥姆霍兹共振腔首次实现负等效弹性模量后,亥姆霍兹共振腔成为实现负等效弹性模量的主要模型。受其启发,研究者们提出多种负等效弹性模量模型。Hu 等[23,24]设计了二维和三维亥

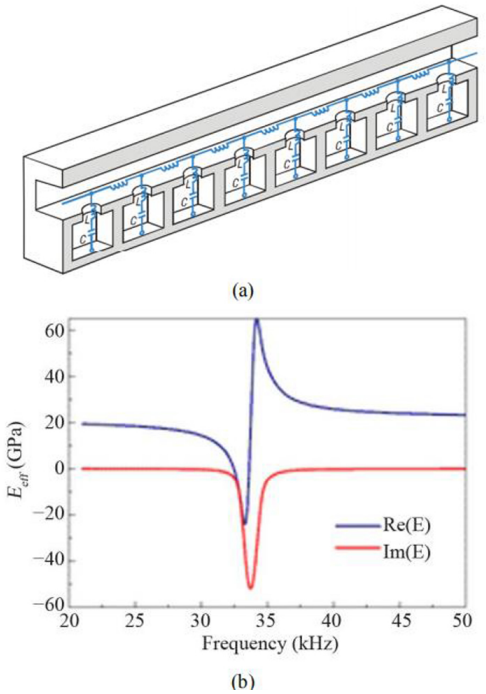


图 4　(a) 由一维亥姆霍兹共振腔组成的声学超材料; (b) 等效模量计算值 [23]

Fig. 4 (a) acoustic metamaterial; (b) composed of one-dimensional Helmholtz resonator and calculated value of equivalentmodulus [23]

姆霍兹共振腔模型，将一维亥姆霍兹共振腔推广到多维，如图 5(a)。Lee 等 [25] 设计了一种具有传播截止频率的负等效亥姆霍兹共振腔模型如图 5(b)，450 Hz 以上声波能在该结构传播，而高于 450 Hz 的声波则不能传播。Noé Jiménez 等 [26] 通过对不同大小共振腔的周期排列，利用禁带重合形成宽禁带并用于吸声屏障，如图 5(c)。Ding 等 [27] 提出一种开口空心球结构，实现了空气介质中的负等效弹性模量，并通过排列不同谐振频率的空心球，实现了多频带的负等效弹性模量，如图 5(d)。

通过上述研究可知，亥姆霍兹共振腔可以利用负等效弹性模量的特性对声波进行有效的调控，但其结构复杂、高成本以及损耗大的特点限制了其应用，并且只针对特定频率范围内声波有效，对范围外的声波几乎没有任何衰减作用。因此，亥姆霍兹共振腔目前还不具备大规模应用的条件，还需继续探究其结构设计新方法以及制造的新工艺。

3) 双负材料参数

在声学超材料中，如果同时具备负等效质量密度结构和负等效弹性模量结构，在某一特定条件耦合就可以实现双负。目前，研究者们提出并设计多种实现双负的结构模型。Lee 等 [28] 通过间隔排列负等效质量的薄膜结构和负等效弹性模量的开侧孔空腔结构，实现了具有双负材料参数的声学超材料，如图 6(a)。Yang 等 [29] 设计出一种由两个薄膜耦合的双负声学超材料，其结构示意图如图 6(b)，与 Lee 的薄膜和共振腔双负模型相比，这种结构设计简单，共振频率可根据需求调节，具有更高的实用价值。Fok 等 [30] 通过亥姆霍兹共振器和弹簧棒谐振器耦合的方式，设计了一种理论上能实现水介质中双负材料参数的声学超材料。

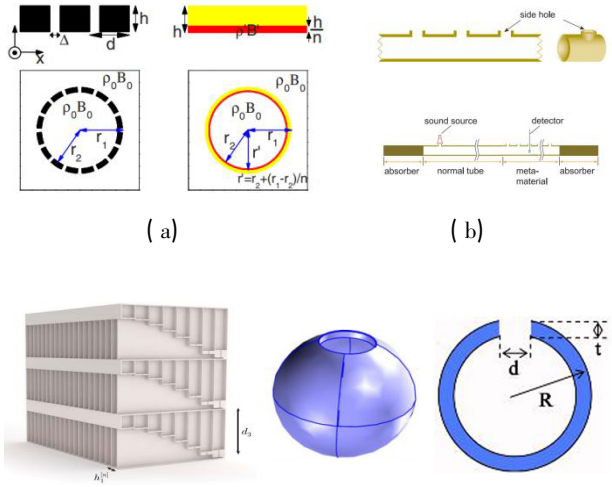


图 5　负等效弹性模量模型 [23-27]

Fig. 5 Negative equivalent elastic modulus model [23-27]

双负材料由于引入两种或多种共振形式，其物理特性更加丰富，但结构设计通常较复杂，且需要多种材料复合，限制了功能设计以及实际应用。如何利用单相材料通过简单设计实现双负性质成为目前研究的关键问题。

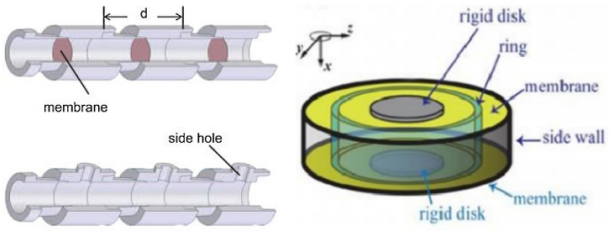


图 6　双负材料参数结构模型 [28,29]

Fig. 6 Parameter structure model of double negative material [28,29]

4) 负折射

负折射是声学超材料的另一特殊性质，对于天然材料，入射波从一种介质射入另一种介质时，入射光线和折射光线会位于法线的两侧，被称为正折射，而当入射光线和折射光线位于法线的同一侧时，这种特殊的现象就被称为负折射。

研究表明，双负性质的声学超材料在长波条件下折射率为负。Zhu 等[31] 设计了单相固体双负参数声学超材料，实现了亚波长负折射。Zhai 等[32] 通过一个钻孔空心管构成的楔形样品，实现了空气介质中的可听声频段的负折射。利用声学超材料的负折射现象，能够实现折射率为零，可以利用零折射率材料实现声隐身等。

5) 其它特殊物理效应

声学超材料除上述物理效应外，还具有声聚焦、反常反射、完美声吸收等。Xia 等[33] 设计了一种非共振的环状结构，通过其在特定本征频率下的固有模式，实现了声波在环结构中心的聚焦。Zhang 等[34,35] 基于声学传输线模型，通过两种亥姆霍兹共振器的组合实现了水介质中的声聚焦。Li 等[36] 利用卷曲空间结构设计了一种二维的超薄声学超表面，在理论上实现了对反射声波的任意调控。之后，Zhu 等[37] 提出了一种无色散的波前调制方法，并利用一个亚波长的褶皱形表面实现了对反射声波的任意调控。Ding 等人[38] 利用具有负等效弹性模量的开口空心球结构设计了一种声学超表面，同样实现了反常反射。Mei 等[39] 设计的薄膜型声学超材料，通过薄膜和铁片的耦合，能实现 100 Hz 到 1 000 Hz 的宽频吸声，并在 172 Hz 吸声频率达到 86%。

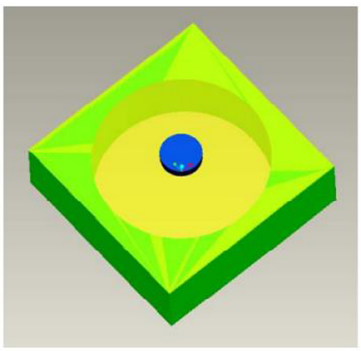
2.2 亚波长条件下声波与结构的相互作用机理研究

声子晶体主要基于 Bragg 散射机理，产生的带隙被称为 Bragg 散射带隙，其出现的频率位置主要受 Bragg 条件控制，即

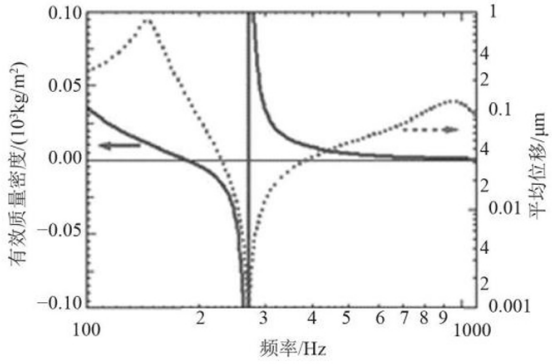
$$a = \frac{n\lambda}{2}(n = 1,2,3\cdots) \quad (1)$$

式中 a 代表声子晶体的晶格尺寸，λ 代表声子晶体的弹性波波长。Bragg 条件表明，Bragg 带隙产生的前提是晶格尺寸与波长位于同一数量级，这就极大的限制了声子晶体对低频声波的调控。

自局域共振的思想提出以后，研究者们提出了多种结构模型应用于低频下声波的控制。Yang 等[40] 制作出薄膜型声学超材料，在弹性薄膜上嵌入质量块，并将薄膜固定，结构单元如图 7。当声波垂直入射薄膜平面时，若声波频率达到薄膜上质量块的共振频率，声波就会被完全反射，无法通过。因此可以通过调整系统的弹性模量来调节带隙频率，以实现某个窄频声波的衰减。根据质量定律，降低这个频段的声波所要求结构的尺寸及质量要远大于薄膜型超材料，该结构实现了声波在亚波长尺寸的衰减[41]。



(a)



(b)

图 7 (a) 薄膜型声学超材料; (b) 计算的有效质量密度[40]

Fig. 7 (a) effective mass density; (b) calculated by thin film acoustic metamaterials

除此之外，吴九汇等[42] 设计出螺旋结构的局域共振型声学超材料，并对低频声波的衰减产生很好效果。赵浩江等[43] 基于局域共振原理设计出一种新型的轮辐式三组元凸起声子晶体板隔振器，可有效对低频振动进行控制。高南沙等[44] 提出一种三维局域共振型声子晶体，该类型声子晶体打开了 50 Hz 以下的超低频带隙，并且通过分析声子晶体的几何模型参数，找到了带隙的影响因素，为三维声子晶体打开超低频带隙提供了一定的指导作用。

局域共振型声学超材料是利用偶极共振原理，使超材料的共振频率和声波频率相当，改变材料等效参数，达到衰减声波的目的[45]。声学超材料更加强调的是结构的设计，利用结构和声波的相互作用实现低频声波衰减的目的。

2.3　声学超材料相关应用

由于声学超材料具备很多传统材料所不具备的物理特性，因此众多研究者们利用声学超材料的奇特性质改良或者设计新的声学器件，并已经取得了很多显著成果。Pendry 等[46]在电磁领域提出的一种具有负折射率的超材料能够将倏逝波放大，进而获得无穷小的成像分辨率，该超材料被称为完美透镜。此方法被应用到声学超材料领域，并发展了多种亚波长成像器件。另外，具有单负材料参数的声学超材料，其单负频带对应的是声波传播禁带，因此被用来设计隔声或吸声材料。此外，通过变换声学的方法，声学超材料还可以实现声隐身。

1) 声学超透镜

近十年来，声学超材料透镜收到研究者们的广泛关注。比如，Lee 等[47]利用负等效质量密度的声学超材料放大倏逝波，实现了近场超分辨的成像。Li 等[48]提出一种扇形结构的二维声学远场超透镜，可以对宽频声波实现远场的超分辨成像。Zhu 等[49]利用周期排列的孔洞结构产生的共振耦合作用，实现了近场的超分辨成像。2014 年，Su 等[50]基于共振隧穿利用多层多孔结构超材料，设计出可以超分辨率成像的且工作频率可调的声学超透镜。

在实际应用中，如水下声纳探测、医用超声成像以及材料结构无伤探测等需要更高效的声学成像效果，而使用声学超材料来制作声学超透镜将会是一个切实可行的方案[51]。

2) 吸声隔振

众所周知，噪声对人体健康有着重要影响，所以开发隔声材料或者吸声结构也是研究声学超材料应用发展的重要方向之一。在空气声方面，多位研究者提出基于局域共振结构、Helmholtz 共振结构的隔声、吸声屏障[52,53]，得到吸、隔声结构厚度减薄、作用频段降低的效果。2005 年，王刚[54]对由柱状共振单元组成的声学超材料板进行研究，并通过实验证明，在这种结构的带隙范围内，弯曲振动会明显被衰减。在水声吸声方面，赵宏刚等[55,56]实验验证了局域共振水声吸声的可行性。噪声、振动与声振粗糙度(Noise，Vibration，Harshness 即 NVH) 作为汽车制造行业一个重要指标，它给用户的感受是最直接的。有相关数据表明，约有 1/3 的汽车故障与车辆 NVH 问题相关。解决从车体结构传递的低频振动和噪声，尤其是 500 Hz 以下的低频噪声，至今仍然是一个技术难题，声学超材料为解决汽车车内噪声问题提供了新的思路和方法。

基于负质量密度、负弹性模量的空气声/水声隔声、吸声超材料为低频、宽带、小尺寸的噪声控制提供了多种有效途径，其设计思想还被引入梁、板、壳等工程结构的振动控制中。其应用范围广阔，尤其在减振吸声方面价值潜力巨大，现有的应用类型如图 8。

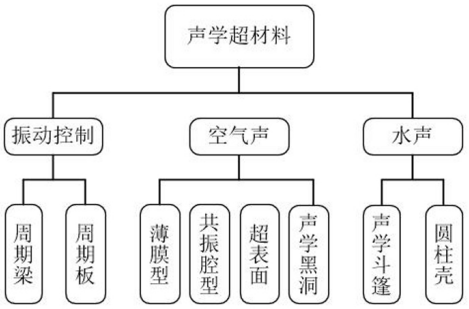


图 8　声学超材料的应用类型

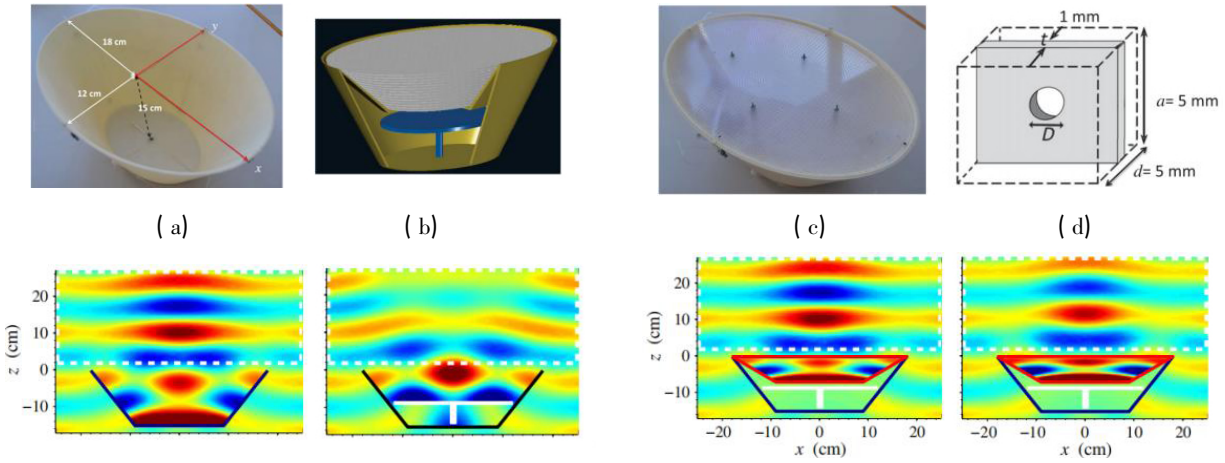
Fig. 8 Application types of acoustic metamaterials

3) 声学隐身

声学超材料能大范围内调节材料等效参数的这一特点为声学隐身技术的发展提供了全新的理论支撑。基于声波方程和麦克斯韦方程的相似性，可将光学领域的变换理论应用于声学坐标变换，其核心是建立坐标变换和材料参数分布之间的关系。

Zhang 等[57]利用通过改变亥姆霍兹共振器尺寸来使等效密度和等效弹性模量为负并设计出一种声波导腔结构，它能实现在水底明显降低声波并隐藏物体的目的。2015 年，Kan 等[58]根据坐标变换原理设计了一种宽带声学隐身材料，可以把放在空腔中的物体完全隐藏。图 9(a) 展示的是该空腔结构，它具有非圆对称性，可以看作一个具有任意形状的空腔。图 9(b) 为包含被隐身物体的空腔示意图。图 9(e) 展示了空腔的散射场; 图 9(f) 只有隐身物体时的散射场; 图 9(g) 展示了物体覆盖理想隐身材料后的散射场; 图 9(h) 展示了物体覆盖有简化隐身材料

之后的散射场。通过最终结果可以看出，装有覆盖了隐身材料的物体的空腔与空的空腔对入射波的散射行为完全一致，物体被完全隐藏。上述研究分析表明，利用声学超材料实现物体隐身的设计基本理念并不复杂：利用经过特殊设计的壳体覆盖需要隐身的物体，控制入射声波全部从壳体穿行而过，绕开壳体内区域。通过坐标变换和结构设计以确定材料参数在空间的合理分布是实现声学隐身的主要问题。



(a) (b) (c) (d)

(e) (f) (g) (h)

图 9 宽带声隐身超材料结构模型(a) 空腔结构；(b) 包含被隐身物体的空腔示意图；(c) 包含被隐身物体的空腔照片；(d) 单元示意图以及散射声场分布(e) 空腔的散射场；(f) 只有隐身物体时的散射场；(g) 物体覆盖理想隐身材料后的散射场；(h) 物体覆盖有简化隐身材料之后的散射场[58]

Fig. 9 Structural model: (a) cavity structure; (b) scheme of the cavity; (c) photograph of cavity with the reduced cloak inserted in the cavity; (d) illustration of the unit cell; and scattered sound field distribution of broadband acoustic stealth metamaterial: (e) empty; (f) with only invisible object inside; (g) with the object covered with ideal stealth material; (h) with the object covered with simplified stealth material [58]

3 总结与展望

目前，声学超材料的相关研究已经成为声学领域中发展最迅速的研究方向之一，随着声学超材料新效应、新特性的不断探索，其在声学和振动等领域表现出巨大的创新潜力。声学超材料打破了传统的设计理念，不再局限于改变材料化学成分转而从结构设计角度出发，其产生的新效应有望实现各类装备的革命性突破，促成国家经济发展和国防建设的跨越式发展。虽然声学超材料的研究大多处于理论阶段，但一旦全面投入应用，将会带来军用、民用装备以及工业产品的重大变革。

参考文献:

[1] 祝雪峰，梁 彬，程建春. 声超常材料与声隐身斗篷[J]. 现代物理知识. 2012，24(02)：40-46.

[2] Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics [J]. Physical Review Letters，1987，58(20)：2059-2062.

[3] John S. Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices [J]. Physical Review Letters，1987，58(23)：2486-2489.

[4] Krauss T F，DeLaRue R M，Brand S. Two-Dimensional Photonic-Bandgap Structures Operating at Near-Infrared Wavelengths [J]. Nature，1996，383(6602)：699-702.

[5] Pendry J B，Holden A J，Robbins D J，et al. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques，1999，47(11)：2075-2084.

[6] Smith D R，Padilla W J，Vier D C，et al. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity [J]. Physical Review Letters，2000，84(18)：4184-4187.

[7] Kushwaha M S，Halevi P，Dobrzynski L，et al. Acoustic Band Structure of Periodic Elastic Composites [J]. Physical Review Letters，1993，71(13)：2022-2025.

[8] Sigalas M M，Economou E N. Elastic and Acoustic Wave Band Structure [J]. Journal of Sound and Vibration，1992，

158(2): 377-382.

[9] Liu Z Y, Zhang X X, Mao Y W, et al. Locally Resonant Sonic Materials [J]. Science, 2000, 289(5485): 1734-1736.

[10] Mei J, Wu Y, Liu Z Y. Effective Medium of Periodic Fluid-Solid Composites [J]. EPL (Europhysics Letters), 2012, 98(5): 54001.

[11] Li J, Chan C T. Double-Negative Acoustic Metamaterial [J]. Physical Review E, 2004, 70(5): 055602.

[12] Fok L, Ambati M, Zhang X. Acoustic Metamaterials [J]. MRS Bulletin, 2008, 33(10): 931-934.

[13] Norris A N. Acoustic Cloaking Theory [J]. Proceedings of the Royal Society A, 2008, 464(2097): 2411-2434.

[14] Torrent D J, Sanchez-Dehesa J. Acoustic Cloaking in Two Dimensions: A Feasible Approach [J]. New Journal of Physics, 2008, 10: 063015.

[15] **陈怀军. 负等效参数声学超材料的特性研究 [D]. 西北工业大学**, 2016.

[16] Yang Z, Mei J, Yang M, et al. Membrane-Type Acoustic Metamaterial with Negative Dynamic Mass [J]. Physical Review Letters, 2008, 101(20): 204301.

[17] Yao S S, Zhou X M, Hu G K. Experimental Study on Negative Effective Mass in a 1D Mass - Spring System [J]. New Journal of Physics, 2008, 10: 043020.

[18] Zhou X M, Hu G K. Superlensing Effect of An Anisotropic Metamaterial Slab with Near-Zero Dynamic Mass [J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(26): 263510.

[19] Yang Z, Dai H M, Chan N H, et al. Acoustic Metamaterial Panels for Sound Attenuation in the 50 - 1000 Hz Regime [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(4): 041906.

[20] Huang H H, Sun C T. Locally Resonant Acoustic Metamaterials with 2D Anisotropic Effective Mass Density [J]. Philosophical Magazine, 2011, 91(6): 981-996.

[21] He Z J, Qiu C Y, Cheng L, et al. Negative-Dynamic-Mass Response without Localized Resonance [J]. EPL (Europhysics Letters), 2010, 91(5): 54004.

[22] Fang N, Xi D J, Xu J Y, et al. Ultrasonic Metamaterials with Negative Modulus [J]. Nature Materials, 2006, 5(6): 452-456.

[23] Hu X H, Ho K M, Chan C T, et al. Homogenization of Acoustic Metamaterials of Helmholtz Resonators in Fluid [J]. Physical Review B, 2008, 77(17): 172301.

[24] Hu X H, Chan C T, Zi J. Two-Dimensional Sonic Crystals with Helmholtz Resonators [J]. Physical Review E, 2005, 71(5): 055601.

[25] Lee S H, Park C M, Seo Y M, et al. Acoustic Metamaterial with Negative Modulus [J]. Journal of Physics-Condensed Matter, 2009, 21(17): 175704.

[26] Jiménez N, Romero-García V, Pagneux V, et al. Rainbow-Trapping Absorbers: Broadband, Perfect and Asymmetric Sound Absorption by Subwavelength Panels for Transmission Problems [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 13595.

[27] Ding C L, Hao L M, Zhao X P. Two-Dimensional Acoustic Metamaterial with Negative Modulus [J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(7): 074911.

[28] Lee S H, Park C M, Seo Y M, et al. Composite Acoustic Medium with Simultaneously Negative Density and Modulus [J]. Physical Review Letters, 2010, 104(5): 054301.

[29] Yang M, Ma G C, Yang Z Y, et al. Coupled Membranes with Doubly Negative Mass Density and Bulk Modulus [J]. Physical Review Letters, 2013, 110(13): 134301.

[30] Fok L, Zhang X. Negative Acoustic Index Metamaterial [J]. Physical Review B, 2011, 83(21): 214304.

[31] Zhu R, Liu X N, Hu G K, et al. Negative Refraction of Elastic Waves at the Deep-Subwavelength Scale in A Single-Phase Metamaterial [J]. Nature Communications, 2014, 5: 5510.

[32] Zhai S L, Chen H J, Ding C L, et al. Double-Negative Acoustic Metamaterial Based on Meta-Molecule [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(47): 475105.

[33] Xia J P, Sun H X, Sun. Acoustic Focusing by Metal Circular Ring Structure [J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(6): 063505.

[34] Bongard F, Lissek H, Mosig J R. Acoustic Transmission Line Metamaterial with Negative/Zero/Positive Refractive Index [J]. Physical Review B, 2010, 82(9): 094306.

[35] Zhang S, Yin L L, Fang N. Focusing Ultrasound with An Acoustic Metamaterial Network [J]. Physical Review Letters, 2009, 102(19): 194301.

[36] Li Y, Liang B, Gu Z M, et al. Reflected Wavefront Manipulation Based on Ultrathin Planar Acoustic Metasurfaces [J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2546.

[37] Zhu Y F, Zou X Y, Li R Q, et al. Dispersionless Manipulation of Reflected Acoustic Wavefront by Subwavelength Corrugated Surface [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10966.

[38] Ding C L, Chen H J, Zhai S L, et al. The Anomalous Manipulation of Acoustic Waves Based on Planar Metasurface with Split Hollow Sphere [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48(4): 045303.

[39] Mei J, Ma G C, Yang M, et al. Dark Acoustic Metamaterials as Super Absorbers for Low-Frequency Sound [J]. Nature Communications, 2012, 3: 756.

[40] Yang Z, Mei J, Yang M, et al. Membrane-Type Acoustic Metamaterial with Negative Dynamic Mass [J]. Physical Review Letters, 2008, 101(20): 204301.

[41] 梅 军, 杨 旻, 杨志宇等. 薄膜型负质量密度声学超常介质 [J]. 物理, 2010, 39(04): 243-247.

[42] 吴九汇, 张思文, 沈 礼. 螺旋局域共振单元声子晶体板结构的低频振动带隙特性研究 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(10): 62-69.

[43] 赵浩江, 宋 扬, 刘荣强. 轮辐板式局域共振声子晶体隔振器的振动特性研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(15): 43-50.

[44] 高南沙, 侯 宏. 三维局域共振型声子晶体低频带隙特性研究 [J]. 材料导报, 2018, 32(02): 322-326.

[45] 刘红星, 吴九汇, 张思文等. 声学超材料研究进展 [J]. 声学与振动, 2013, 1, 7-13.

[46] Pendry J B. Negative Refraction Makes A Perfect Lens [J]. Physical Review Letters, 2000, 85(18): 3966-3969.

[47] Fleury R, Sounas D L, Sieck C F, et al. Sound Isolation and Giant Linear Nonreciprocity in A Compact Acoustic Circulator [J]. Science, 2014, 343(6170): 516-519.

[48] Leroy V, Bretagne A, Fink M, et al. Design and Characterization of Bubble Phononic Crystals [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(17): 171904.

[49] Liang Z X, Li J. Extreme Acoustic Metamaterial by Coiling Up Space [J]. Physical Review Letters, 2012, 108(11): 114301.

[50] Xie Y B, Popa B I, Zigoneanu L, et al. Measurement of A Broadband Negative Index with Space-Coiling Acoustic Metamaterials [J]. Physical Review Letters, 2013, 110(17): 175501.

[51] 袁保国. 基于卷曲空间结构的声学超构透镜研究 [D]. 南京大学, 2020.

[52] Sanchez-Dehesa J, Garcia-Chocano V M, Torrent D, et al. Noise Control by Sonic Crystal Barriers Made of Recycled Materials [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 129(3): 1173-1183.

[53] Cai X B, Guo Q Q, Hu G K, et al. Ultrathin Low-Frequency Sound Absorbing Panels Based on Coplanar Spiral Tubes or Coplanar Helmholtz Resonators [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(12): 121901.

[54] 王 刚. 声子晶体局域共振带隙机理及减振特性研究 [D]. 国防科学技术大学, 2005.

[55] Zhao H G, Liu Y Z, Wen J H, et al. Sound Absorption of Locally Sonic Materials [J]. Chinese Physics Letters, 2006, 23(8): 2132-2134.

[56] Wen J H, Zhao H G, Lv L, et al. Effects of Locally Resonant Modes on Underwater Sound Absorption in Viscoelastic Materials [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 130(3): 1201-1208.

[57] Zhang S, Xia C G, Fang N. Broadband Acoustic Cloak for Ultrasound Waves [J]. Physical Review Letters, 2011, 106(2): 024301.

[58] Kan W W, García-Chocano V M, Cervera F, et al. Broadband Acoustic Cloaking within An Arbitrary Hard Cavity [J]. Physical Review Applied, 2015, 3(6): 064019.