

基于声学超材料的低频可调吸收器

翟世龙 王元博 赵晓鹏

A kind of tunable acoustic metamaterial for low frequency absorption

Zhai Shi-Long Wang Yuan-Bo Zhao Xiao-Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 034301 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181908

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181908>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微穿孔蜂窝波纹复合声学超材料吸声行为

Micro-perforated acoustic metamaterial with honeycomb-corrugation hybrid core for broadband low frequency sound absorption

物理学报. 2018, 67(23): 234303 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181368>

新型负模量声学超结构的低频宽带机理研究

Low-frequency wide-band mechanism of a new type acoustic metamaterial with negative modulus

物理学报. 2017, 66(9): 094301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.094301>

局域共振型声学超材料机理探讨

Mechanism for local resonant acoustic metamaterial

物理学报. 2015, 64(15): 154302 <https://doi.org/10.7498/aps.64.154302>

负质量密度声学超材料的反常多普勒效应

Inverse Doppler effect of acoustic metamaterial with negative mass density

物理学报. 2017, 66(2): 024301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.024301>

基于石墨烯振幅可调的宽带类电磁诱导透明超材料设计

Tunable grapheme amplitude based broadband electromagnetically-induced-transparency-like metamaterial

物理学报. 2018, 67(9): 097801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180114>

基于声学超材料的低频可调吸收器*

翟世龙[†] 王元博 赵晓鹏

(西北工业大学理学院应用物理系, 智能材料实验室, 西安 710129)

(2018年10月26日收到; 2018年12月2日收到修改稿)

在当今社会, 噪声污染已经成为人类健康的一大威胁, 如何有效地控制和消除噪声污染一直是科研领域的一个重要话题. 本文以开口环嵌套结构为模型, 设计并制备了一种声学超材料. 通过理论分析、数值模拟和实验测试, 发现由于模型内部空腔的强烈耦合共振效应, 该超材料可以在低频区域实现接近完美的吸声效应. 此外, 通过简单地绕轴旋转其内腔开口方向, 即可改变该超材料的相对阻抗值, 进而在较宽的频带范围内实现对吸收峰位置的可调控制. 由于该超材料具有深亚波长的尺寸, 因此非常有利于低频吸声器件的小型化和集成化, 同时该模型也为宽带吸收器的设计奠定了基础.

关键词: 可调, 声学超材料, 低频, 吸收器**PACS:** 43.20.+g, 43.40.+s, 43.28.+h**DOI:** 10.7498/aps.68.20181908

1 引言

低频噪声始终是影响人们生活质量的一个重要因素. 目前应用最广的吸声材料主要包括聚氨酯泡沫、三聚胺、矿物棉、纺织品、棉花和特制的隔音材料等, 然而这些材料的尺寸普遍较大, 而且吸声效率往往较低, 尤其是在 2000 Hz 以下的低频区域^[1-4]. 声学超材料是一类由尺寸远小于波长的微结构单元构建而成的人工复合材料^[5-8]. 通过巧妙地设计其微结构单元, 声学超材料可以对入射波进行任意调控, 并且能够表现出一些远超天然材料的奇特性质, 例如负折射、反常多普勒、隐身和平板聚焦等^[9-12], 因此声学超材料已经成为近年来声学领域的研究热点. 研究表明, 如果组成超材料的共振散射体与波导之间满足临界耦合条件, 那么流经超材料的声波能量会被共振散射体的内部损耗完全抵消^[13], 因此人们认为这类声学超材料是解决低频声波吸收问题的有效途径. 针对这一问题, 研究者们开展了大量的探索性研究^[14-26]. 其中, 沈平课题组^[14,15]利用薄膜型声学超材料在低频处产生了

负的等效质量密度, 进而实现了选择性声吸收; Cai 等^[16]设计了一种卷曲空腔结构, 利用结构的共振效应同样实现了高效的声吸收; Starkey 等^[17]利用存在空气隙的穿孔板设计了一种超薄声学超材料, 由于该结构具有非常大的热黏滞损耗, 因此可以产生接近完美的声吸收; Li 和 Assouar^[18]将钻孔板与共面的卷曲空腔组合, 通过局域共振效应来使其阻抗与空气匹配, 进而使全部声能量得以进入并局域在其结构内部, 最终利用开口处空气与腔壁的强的黏滞摩擦效应实现高效吸声; Climente 等^[21]利用梯度折射率超材料设计了一种声学黑洞, 可以将声能量导入黑洞内部并损耗掉, 实现了全向宽带声吸收. 然而, 构成上述声学超材料的结构单元大都是被动式的, 即一旦加工成型, 其材料性质就已固定, 不能再改变. 这一缺陷极大地限制了声学超材料的发展, 因此迫切需要具有材料性质和工作频段可灵活调节的声学超材料^[24,27]. Chen 等^[28]利用电磁铁对周期性薄膜和侧孔结构进行可变张力调节, 进而设计了一种具有双负材料性质的可调声学超材料; 此外, Ma 等^[29]利用电磁铁调控的薄膜阵

* 国家自然科学基金 (批准号: 11804278, 11174234, 51272215) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: G2017KY0105) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: shilongzhai@nwpu.edu.cn

列设计了一种声学超表面, 并实现了对室内声场分布的可控调节. 虽然目前已有可调声学超材料的研究, 但是鲜有人将这一研究思路拓展到低频可调吸声领域^[30]. 在本课题组的前期工作中, 我们系统地研究了两种声学人工“超原子”的声学性质, 分别为具有负等效弹性模量的开口空心球 (split hollow sphere, SHS) 模型^[31]和具有负等效质量密度的空心管 (hollow tube, HT) 模型^[32]. 研究表明这两种“超原子”均具有明显的吸声效应.

基于前期研究, 本文将这两种“超原子”耦合成一个整体, 设计了一种新型的开口环嵌套模型. 该声学超材料模型具有结构简单、容易制备的优势. 由于低频入射声波可以在该结构内部激发两种“超原子”强烈的耦合共振效应, 进而能够实现接近完美的声能量吸收; 此外, 通过简单的改变内开口环的旋转角度, 该超材料即可在较宽的低频范围内实现工作频率的可控调节.

2 模型分析

设计可调声学超材料模型的重点是找到其共振频率与结构参数之间的关系, 并通过改变结构参

数来改变其共振频率, 进而实现频率可调的目的. 对于一个局域共振型的声学超材料, 当入射声波的频率接近其共振频率时, 流体介质的黏滞损耗、材料的摩擦损耗和阻尼损耗会使该结构对入射声波产生强烈的吸收^[1]. SHS 作为一种声学“超原子”是典型的亥姆霍兹共振器结构^[31], 其二维模型如图 1(a) 所示, 图中的蓝色箭头表示入射声波的传播方向, 蓝色虚线箭头表示声波在腔体中传播的路径. 根据等效媒质理论和等效电路原理, 该结构的内部空腔部分可以被看作是一个等效电容 C_0 , 而开口的颈部可以被看作是一个等效电感 L_0 , 两者串联, 如图 1(b) 所示. 两者与 SHS 结构参数之间的关系为

$$C_0 \propto \frac{\pi r^2}{\rho_0 c_0^2}, \quad L_0 \propto \frac{\rho_0 h}{d}, \quad (1)$$

其中 ρ_0 和 c_0 分别是空气的密度和声速, r 是内部空腔的半径, d 和 h 分别为开口处的宽度和等效长度. 该结构的共振频率 f_0 可以由等效电感和等效电容计算得到:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}. \quad (2)$$

从 (1) 和 (2) 式可以看出, SHS 的几何参数直接影响其声学性质. 当入射声波的频率接近其共振频率

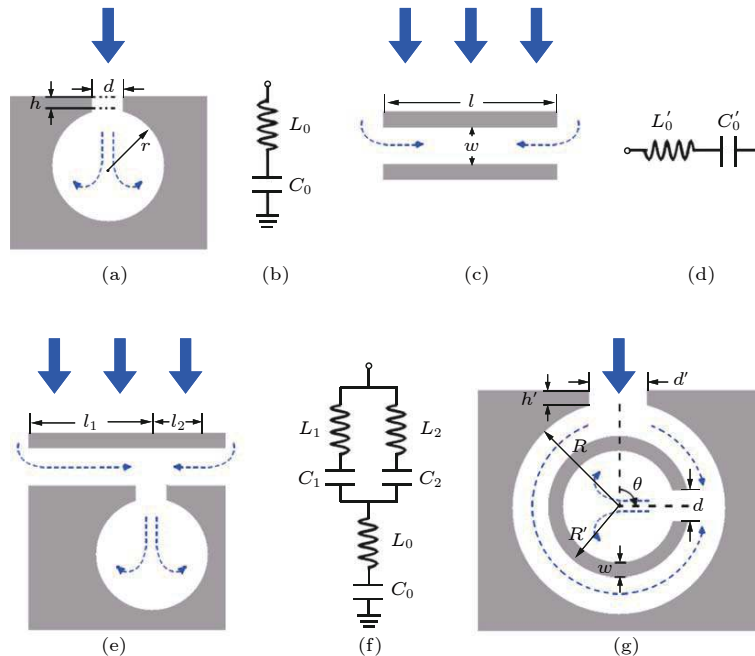


图 1 可调声学超材料的模型设计 (a), (b) 二维 SHS 的结构示意图和等效电路图; (c), (d) 二维 HT 的结构示意图和等效电路图; (e), (f) SHS 和 HT 耦合后的结构示意图和等效电路图; (g) 进一步变形优化得到的可调声学超材料模型的结构示意图

Fig. 1. Model design of the acoustic metamaterial: (a), (b) Schematic diagram and equivalent circuit diagram of the two-dimensional SHS; (c), (d) schematic diagram and equivalent circuit diagram of the two-dimensional HT; (e), (f) schematic diagram and equivalent circuit diagram of the coupled structure of SHS and HT; (g) schematic diagram of the tunable acoustic metamaterial obtained by the deformation and optimization of the coupled structure.

时,大量的声能量被局域在腔体内部,进而产生吸声效应.类似地,另一种声学“超原子”——HT结构的内部空腔可以被看作是一个等效电感 L'_0 和一个等效电容 C'_0 串联^[32],如图1(c)和图1(d)所示.两者与HT的结构参数之间的关系为

$$L'_0 \propto \frac{\rho_0 l}{w}, \quad C'_0 \propto \frac{wl}{\rho_0 c_0^2}, \quad (3)$$

其中 l 和 w 分别为HT内部空腔的长度和宽度.结合(2)和(3)式可以看出,HT的几何参数同样会直接影响其声学性质.当入射声波的频率接近其共振频率时,声能量同样会局域在腔体中,进而产生吸声效应.

为了获得接近完美的吸声效应,并最终实现频率可调的目的,首先将SHS和HT耦合成一个整体,如图1(e)所示.该耦合结构可被看作是两个长度分别为 l_1 和 l_2 的HT(其等效电感分别为 L_1 和 L_2 ,等效电容分别为 C_1 和 C_2)并联后再与一个开口环串联,等效电路如图1(f)所示.在其他参数不变的前提下,该耦合结构总的等效电感 L 和等效电容 C 可以分别表示为

$$L = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} + L_0, \quad C = \frac{(C_1 + C_2) C_0}{C_1 + C_2 + C_0}. \quad (4)$$

结合(1)–(4)式,可以将该耦合结构的共振频率表示如下:

$$f \propto \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{wl_1 + wl_2 + \pi r^2}{\pi r^2 (l_1 l_2 d + hwl_1 + hwl_2)}}. \quad (5)$$

这里,设定HT的总长度 $l = l_1 + l_2$ 为一定值,并且除了 l_1 和 l_2 以外其他结构参数值都保持不变,那么该耦合结构的共振频率仅受SHS和HT的耦合位置影响.然而该耦合模型一旦加工成型,其几何参数就被固定,其共振频率将为一定值,不可调谐.为了实现可调的目的,需要对该耦合结构进一步变形优化,将上部的HT部分弯曲成环绕内层开口空腔的外层空腔,得到开口环嵌套结构,如图1(g)所示,其内腔的开口方向可以通过机械方式进行旋转.旋转的角度 θ 不同,相当于 l_1 和 l_2 的值发生改变,即等效电路中的 L_1 和 L_2 的值改变,因而其声学响应也会不同. l_1, l_2 与 θ 之间的关系满足如下公式:

$$l_1 = \frac{\theta}{2} (R + R'), \quad l_2 = \frac{2\pi - \theta}{2} (R + R'), \quad (6)$$

其中, R 和 R' 分别为外层环形空腔的外径和内径,外层环形空腔的径向宽度 $w = R - R'$.将(6)式代入到(5)式中可知,仅通过简单地改变旋转角度 θ ,就可以对该开口环嵌套模型的共振频率进行可

控调节,进而实现可调声吸收.

3 仿真计算及数据分析

为了验证上述理论分析,首先利用有限元分析软件COMSOL 5.3a对所提出的可调声学超材料模型进行了数值仿真研究.仿真的模型结构与图1(g)完全一致,其中外层开口的宽度和深度分别为 $d' = 5$ mm和 $h' = 3$ mm,环形空腔的外径和内径分别为 $R = 20$ mm和 $R' = 14$ mm,内层开口空腔的开口宽度为 $d = 5$ mm,壁厚为 $w = 4$ mm.内层开口空腔可绕其中心轴线进行 0° – 180° 任意旋转.为了最大程度地接近真实环境,选取声热耦合模块对该模型进行仿真^[30].声波的传播媒质为空气,考虑到黏滞损耗,设置空气为黏性流体.空气的质量密度和空气中的声速分别为 $\rho = 1.21$ kg/m³和 $c = 343$ m/s.声波的辐射模式为平面波辐射.由于固体材料部分的阻抗远大于空气阻抗,因此图1(g)中所有灰色部分被设置为声硬边界.为了消除求解域中侧向边界对声波的散射效应,将其设置为周期性边界,其周期长度为50 mm.仿真求解的频率范围为500–1600 Hz.

图2(a)展示了仿真得到的该超材料模型的吸收系数对比结果.从图2(a)可以看出,对于不同的内腔旋转角度($0^\circ, 90^\circ$ 和 180°),该超材料均会出现一个非常强的共振吸收峰,峰值位置分别出现在1000, 810和755 Hz.即随着内腔旋转角度的增大,吸收峰的位置会发生红移,该结果证明了这种超材料吸收器能够在低频区域表现出较大的可调特性.值得注意的是,该超材料吸收器的总体厚度只有50 mm,仅为其工作波长的近1/8,这就意味着该吸收器具有深亚波长的尺寸,因而更有利于器件的小型化和集成化.通常情况下,为了获得完美的吸收效应,吸收器的阻抗必须与声波传输媒质相匹配,即阻抗的虚部必须接近0,同时实部必须接近1.

为了进一步理解该超材料的吸收机理,对比了其在上述三种内腔旋转角度下的相对阻抗(Z/Z_0)值随频率的变化,结果如图2(b)所示.从图2(b)可以看出,三者的虚部分别在1000, 810和755 Hz处穿过零点,而这三个频率点刚好对应各自共振吸收峰的位置.并且在相应频率处,三者的实部分别为1.07, 1.29和1.30,即逐渐远离空气阻抗,因此其共振吸收峰强度有所减弱.但是由于其阻抗仍然接近于1,因此整体仍然保持接近完美的吸收性能.此外,还对不同旋转角度下的共振频率进行了理论

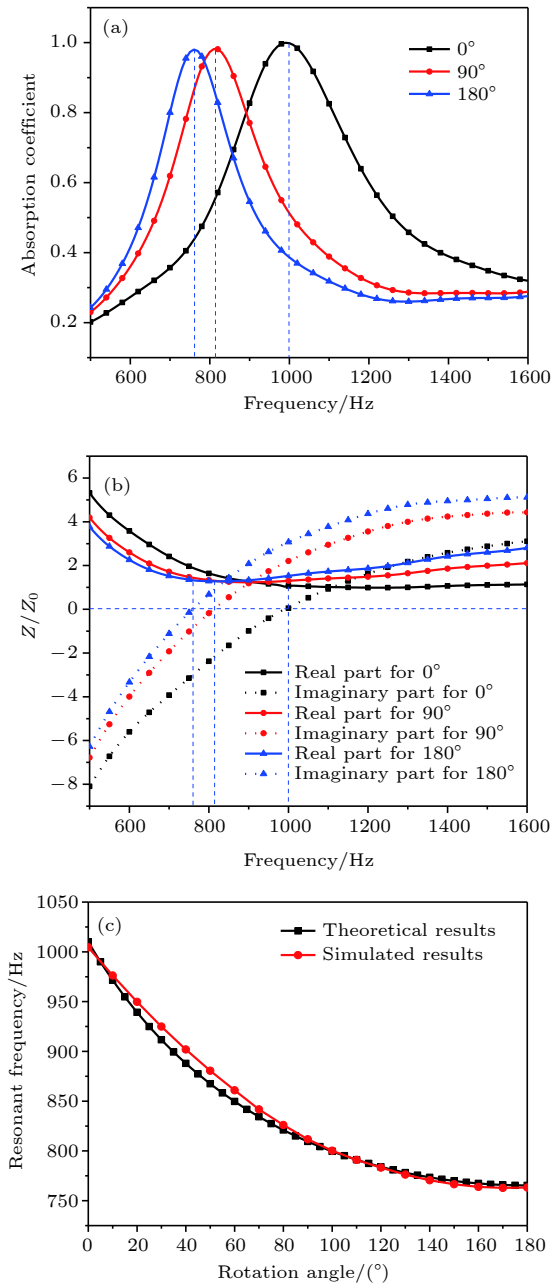


图 2 仿真得到的可调声学超材料的吸收性能对比 (a) 不同内腔旋转角度下的吸收系数随频率的变化; (b) 不同内腔旋转角度下的相对阻抗实部与虚部随频率的变化; (c) 理论和仿真得到的共振频率随内腔旋转角度的变化关系

Fig. 2. Simulated comparison of the absorption performance of tunable acoustic metamaterial: (a) Absorption coefficient for different rotation angles of the inner split ring as a function of frequency; (b) real parts and imaginary parts of the relative impedance for different rotation angles of the inner split ring as a function of frequency; (c) comparison of the theoretical and simulated resonant frequency as a function of rotation angle.

和仿真结果对比, 如图 2(c) 所示. 从图 2(c) 可以看出, 仿真结果与理论模型匹配得很好, 因此也验证了理论模型的正确性. 为了更直观地描述该超材料

的共振吸声过程, 针对内腔旋转角度为 0° 的状态, 提取了其在三个不同频率 (分别为 500, 1000 和 1600 Hz) 下的声场能量 (p^2) 分布图, 分别如图 3(a)、图 3(c) 和图 3(e) 所示, 白色箭头表示入射声波的传播方向. 可以看出, 在非共振频率下 (图 3(a) 和图 3(e)), 入射声波和反射声波的叠加会在求解区域中产生非常明显的驻波. 虽然超材料内部的声能量相较外部会有所增大, 但其最大值仅为 7 Pa^2 . 相比之下, 在共振频率处, 超材料内部的声能量为近 40 Pa^2 , 远远大于超材料外部的声能量. 由于此时激发了超材料内部强烈的耦合共振模式, 几乎所有入射声能量都被局域在超材料内部, 只有极少部分可以从超材料中逃逸出来. 虽然大部分声能量被局域在超材料结构内部, 但是真正起到声能损耗的关键部位并不完全与之重合. 文献[16]中提到, 声能量在超材料结构中的损耗受其内部的空气介质和结构材料之间的相对速度影响. 空气的运动速度越大, 其与结构材料之间的摩擦力就越大, 进而声能损耗也越大. 因此, 又提取了各对应频率下超材料内部空气介质的局域速度场分布, 分别如图 3(b)、图 3(d) 和图 3(f) 所示. 可以看出, 超材料开口处的空气流速远大于其内部的流速, 因此声能损耗主要发生在开口处. 此外, 在共振频率时, 空气流速的最大值是非共振频率时的近 5 倍, 局域于超材料中的声能量最终被转化为热能耗散掉^[33], 因此表现出了接近完美的吸声效应.

4 3D 打印样品制备及实验验证

利用 3D 打印机制备了该超材料吸收器样品. 由于需要在阻抗管中通过双麦克风法对样品的吸声性能进行测试^[32], 而阻抗管为内径 100 mm 的金属圆筒, 因此整个超材料样品被设计成圆柱形, 如图 4(a) 所示. 为了便于调节, 整个样品由四个部分组装而成, 分别如图 4(b)—4(e) 所示. 在 xz 平面内, 样品的半径为 $R_1 = 49.75 \text{ mm}$. 外层开口腔体和内层可旋转开口腔体的高度均为 $H = 80 \text{ mm}$; 在 xy 平面内, 样品的所有几何参数与二维仿真模型完全一致.

实验拼装时, 在外层腔体的顶部和底部涂覆一层油性黏土, 使其能与两个密封端紧密地结合在一起, 以此来保证整个结构单元的密封性. 实验中同样选取了三个不同的内腔旋转角度 (分别为 0° , 90° 和 180°) 进行测试, 得到吸声系数随入射波频率的变化关系如图 5 所示. 三种状态下所对应的

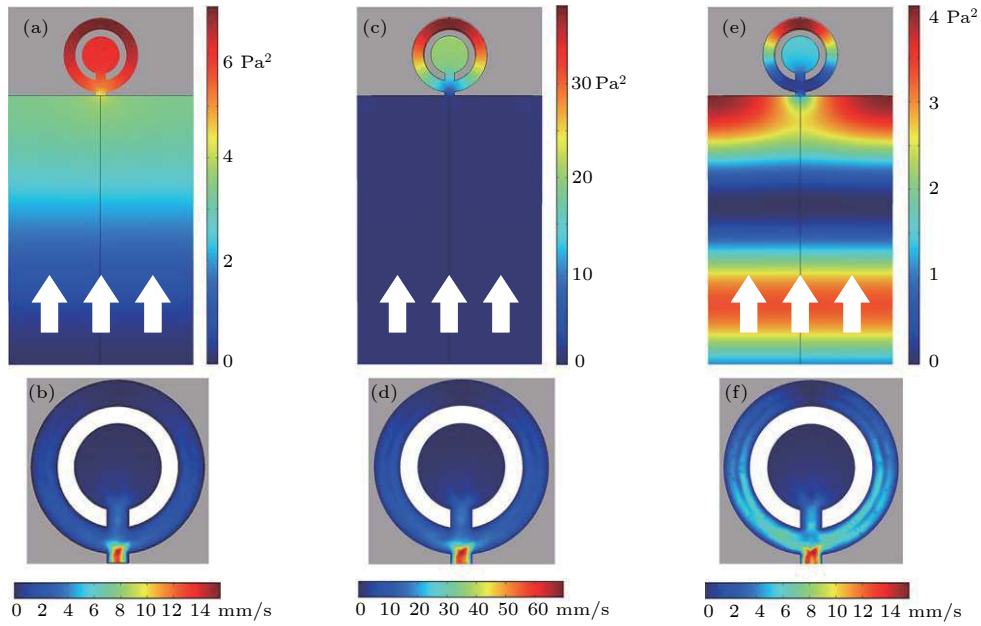


图 3 不同频率下的声能量和空气介质局域速度分布图对比 (a), (b) 500 Hz 处的声能量和空气局域速度图; (c), (d) 1000 Hz 处的声能量和空气局域速度图; (e), (f) 1600 Hz 处的声能量和空气局域速度图
 Fig. 3. Comparison of the sound energy and local speed distributions at different frequencies: (a), (b) Sound energy and local speed fields at 500 Hz; (c), (d) sound energy and local speed fields at 1000 Hz; (e), (f) sound energy and local speed fields at 1600 Hz.

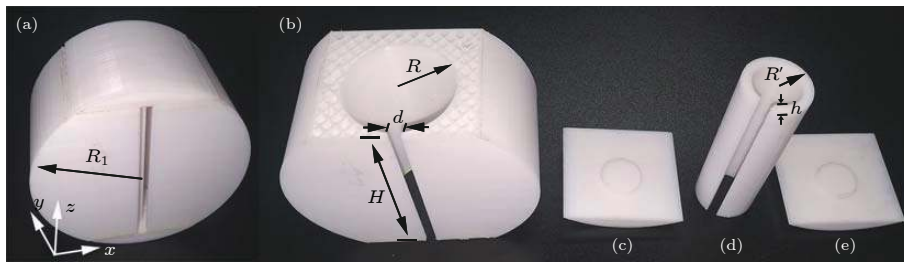


图 4 3D 打印制备的样品实物图 (a) 组装成整体的样品; (b) 外层开口腔体; (c) 顶部密封端; (d) 内层可旋转开口腔体; (e) 底部密封端
 Fig. 4. Photographs of sample prepared by 3D printing technology: (a) Assembled whole sample; (b) outer split cavity; (c) top seal; (d) inner split ring; (e) bottom seal.

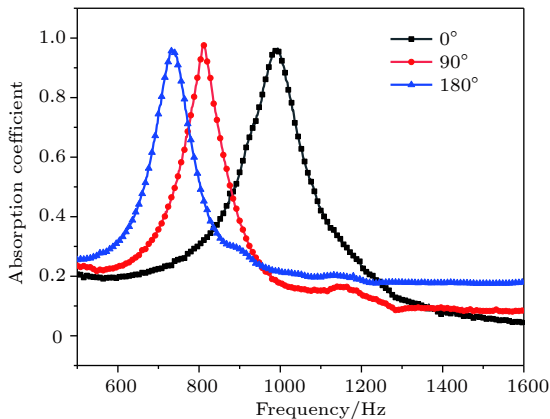


图 5 实验测试得到的样品在不同内腔旋转角度 (分别为 0°, 90°和 180°) 下的吸收系数随频率的变化
 Fig. 5. Experimental absorption coefficient of the sample at different rotation angles (i.e. 0°, 90°and 180°, respectively) of the inner split ring as a function of frequency.

共振吸收峰值位置分别为 992, 813 和 737 Hz, 均非常接近仿真结果 (分别为 1000, 810 和 755 Hz). 对比图 2(a) 和图 5 可以发现, 实验测得的峰值吸收系数稍小于仿真结果, 这是由样品的加工误差造成的. 除此之外, 变化趋势与仿真预测保持高度一致. 因此, 在实验上也验证了这种低频可调声学超材料吸收器的可行性.

5 结 论

本文基于两种典型的声学“超原子”结构 (SHS 和 HT) 设计并制备了一种新型的开口环嵌套声学超材料. 结合理论分析、数值模拟和实验测试, 证明了由于两种“超原子”的强烈耦合共振效

应, 该超材料可以在低频区域将几乎全部的入射声能量局域在其结构内部, 进而表现出接近完美的吸声性能. 此外, 通过简单地旋转内层开口空腔, 即改变两种“超原子”的耦合位置, 就可以调控该超材料的相对阻抗值, 进而在 750—1000 Hz 范围内实现可调完美吸收. 由于该超材料的尺寸仅为其工作波长的近 1/8, 因此非常有利于声吸收器件的小型化和集成化. 该超材料吸收器可被应用于低频噪声的可调控制, 同时该模型也为宽带吸收器的设计奠定了基础.

参考文献

- [1] Rahimabady M, Statharas E C, Yao K, Mirshekarloo M S, Chen S, Tay F E H 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 241601
- [2] Gwon J G, Kim S K, Kim J H 2016 *Mater. Des.* **89** 448
- [3] Xue B, Li R, Deng J, Zhang J 2016 *Ind. Eng. Chem. Res.* **55** 3982
- [4] Padhye R, Nayak R 2016 *Acoustic Textiles* (Singapore: Springer)
- [5] Ding C L, Dong Y B, Zhao X P 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 194301 (in Chinese) [丁昌林, 董怡宝, 赵晓鹏 2018 *物理学报* **67** 194301]
- [6] Liu Z Y, Zhang X X, Mao Y W, Zhu Y Y, Yang Z Y, Chan C T, Sheng P 2000 *Science* **289** 1734
- [7] Fang N, Xi D J, Xu J Y, Ambati M, Srituravanich W, Sun C, Zhang X 2006 *Nat. Mater.* **5** 452
- [8] Lee S H, Park C M, Seo Y M, Wang Z G, Kim C K 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 054301
- [9] Li Y, Liang B, Zou X Y, Cheng J C 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 063509
- [10] Zhai S L, Zhao X P, Liu S, Shen F L, Li L L, Luo C R 2016 *Sci. Rep.* **6** 32388
- [11] Zhai S L, Chen H J, Ding C L, Li L L, Shen F L, Luo C R, Zhao X P 2016 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 225302
- [12] Ma G C, Fan X Y, Ma F Y, de Rosny J, Sheng P, Fink M 2018 *Nat. Phys.* **14** 608
- [13] Xu Y, Li Y, Lee R K, Yariv A 2000 *Phys. Rev. E* **62** 7389
- [14] Yang Z, Mei J, Yang M, Chan N H, Sheng P 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 204301
- [15] Mei J, Ma G, Yang M, Yang Z, Wen W, Sheng P 2012 *Nat. Commun.* **3** 756
- [16] Cai X, Guo Q, Hu G, Yang J 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 121901
- [17] Starkey T A, Smith J D, Hibbins A P, Sambles J R, Rance H J 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 041902
- [18] Li Y, Assouar B M 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 063502
- [19] Richoux O, Achilleos V, Theocharis G, Brouzos I 2018 *Sci. Rep.* **8** 12328
- [20] Badreddine Assouar M, Senesi M, Oudich M, Ruzzene M, Hou Z 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 173505
- [21] Climente A, Torrent D, Sanchez-Dehesa J S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 144103
- [22] Romero-García V, Theocharis G, Richoux O, Merkel A, Tournat V, Pagneux V 2016 *Sci. Rep.* **6** 19519
- [23] Li J, Wang W, Xie Y, Popa B I, Cummer S A 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 091908
- [24] Li Y, Shen C, Xie Y, Li J, Wang W, Cummer S, Jing Y 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 035501
- [25] Wang X, Luo X, Zhao H, Huang Z 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 021901
- [26] Peng X, Ji J, Jing Y 2018 *J. Acoust. Soc. Am.* **144** EL255
- [27] Xia J P, Zhang X T, Sun H X, Yuan S Q, Qian J, Ge Y 2018 *Phys. Rev. Appl.* **10** 014016
- [28] Chen Z, Xue C, Fan L, Zhang S Y, Li X J, Zhang H, Ding J 2016 *Sci. Rep.* **6** 30254
- [29] Ma G, Fan X, Sheng P, Fink M 2018 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **115** 6638
- [30] Wang Y, Zhao H, Yang H, Zhong J, Zhao D, Lu Z, Wen J 2018 *J. Appl. Phys.* **123** 185109
- [31] Ding C L, Hao L M, Zhao X P 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 074911
- [32] Chen H J, Zeng H C, Ding C L, Luo C R, Zhao X P 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 104902
- [33] Yang M, Sheng P 2017 *Annu. Rev. Mater. Res.* **47** 83

A kind of tunable acoustic metamaterial for low frequency absorption*

Zhai Shi-Long[†] Wang Yuan-Bo Zhao Xiao-Peng

(*Smart Materials Laboratory, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China*)

(Received 26 October 2018; revised manuscript received 2 December 2018)

Abstract

Low frequency noise is always an important factor affecting people's quality of life. At present, the most widely used sound absorbing materials include polyurethane foam, trimeric amine, mineral cotton, textiles, cotton and special sound insulation materials. However, the sizes of these materials are generally large, and the sound absorption efficiencies are often low, especially in a low frequency range (below 2000 Hz). Acoustic metamaterial is a kind of artificial composite material, which is constructed by microunits whose dimensions are much smaller than the working wavelength. The results show that if the strong coupling condition between the resonant scatter and the waveguide is satisfied, the sound energy flowing through the metamaterial will be completely offset by the internal loss of the resonant scatter. Therefore, it is believed that this kind of acoustic metamaterial can solve the absorption problem of low-frequency sound waves. In order to solve this problem, researchers have conducted a lot of exploratory researches. However, most of the structural units that are constructed with acoustic metamaterials are passive, that is, once the material is processed and shaped, its properties are fixed and cannot be changed. This defect greatly limits the development of acoustical metamaterials, so it is urgent to study acoustical metamaterials whose material properties and the working frequency bands are flexibly adjustable. Although tunable acoustic metamaterials have been studied, few people have extended this research to the field of low-frequency tunable sound absorption. In our previous work, we systematically studied the acoustic properties of two kinds of acoustic artificial "meta-atoms", namely, open hollow sphere model with negative equivalent elastic modulus and hollow tube model with negative equivalent mass density. The research shows that these two kinds of "meta-atoms" both have obvious sound absorption effect. According to our previous studies, in this paper we couple these two kinds of "meta-atoms" into a whole, and design a new nested model of open loop. The model has the advantages of simple structure and easy preparation. Through theoretical analysis, numerical simulation and experimental testing, it is found that the strong coupling resonance effects between these "meta-atoms" can be excited by the low frequency incident acoustic wave in the nested structure, thus achieving nearly perfect sound energy absorption. In addition, the relative impedance of the metamaterial can be changed by simply rotating the inner splitting ring around the axis, therefore the position of the absorption peak can be freely controlled in a wide frequency band. Because of its deep sub-wavelength size, the metamaterial is very useful for miniaturizing and integrating the low-frequency acoustic absorption devices. What is more, this model also lays a foundation for designing the broadband absorbers.

Keywords: tunable, acoustic metamaterial, low frequency, absorber

PACS: 43.20.+g, 43.40.+s, 43.28.+h

DOI: 10.7498/aps.68.20181908

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11804278, 11174234, 51272215) and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. G2017KY0105).

[†] Corresponding author. E-mail: shilongzhai@nwpu.edu.cn