

一种基于二维 Helmholtz 腔阵列的低频宽带隔声结构实验研究

高东宝 刘选俊 田章福 周泽民 曾新吾 韩开锋

A broadband low-frequency sound insulation structure based on two-dimensionally inbuilt Helmholtz resonator

Gao Dong-Bao Liu Xuan-Jun Tian Zhang-Fu Zhou Ze-Min Zeng Xin-Wu Han Kai-Feng

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 014307 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.014307

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.014307>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2017/V66/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二维三组元声子晶体中的半狄拉克点及奇异特性

[Semi-Dirac cone and singular features of two-dimensional three-component phononic crystals](#)

物理学报.2016, 65(4): 044301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044301> 基于等效参数反演的敷设声学

覆盖层的水下圆柱壳体声散射研究

[Investigation of underwater sound scattering on a cylindrical shell coated with anechoic coatings by the finite element method based on an equivalent parameter inversion](#)

物理学报.2016, 65(1): 014305 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014305>

基于绝缘体上硅的一种改进的 Mach-Zehnder 声光调制器

[An improved Mach-Zehnder acousto-optic modulator on a silicon-on-insulator platform](#)

物理学报.2016, 65(1): 014304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014304>

声子晶体中的半狄拉克点研究

[Semi-Dirac points in two-dimensional phononic crystals](#)

物理学报.2015, 64(19): 194301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194301>

稳态损耗因子的衰减法识别研究

[Estimation of steady loss factor with decay rate method](#)

物理学报.2015, 64(18): 184301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184301>

一种基于二维Helmholtz腔阵列的低频宽带隔声结构实验研究*

高东宝[†] 刘选俊 田章福 周泽民 曾新吾 韩开锋

(国防科学技术大学海洋科学与工程研究院, 长沙 410073)

(2016年7月11日收到; 2016年9月27日收到修改稿)

基于圆周排列的Helmholtz共振腔单元, 设计并实现了一种具有低频宽禁带的声人工结构, 可以在结构中心处实现二维隔声效果. 针对实际模型, 搭建了二维声场测量平台, 进行了相应的实验研究, 实验结果与有限元仿真结果符合较好. 该结构在较宽的频带内(680—1050 Hz)可以实现较好的隔声效果, 最大隔声量可达41 dB. 实验中还研究了单元参数及共振状态对隔声效果的影响. 隔声区的大小与共振单元的分布形式有直接关系, 而良好的共振状态将对提高隔声量有一定帮助. 研究结果对设计新型声防护结构具有理论与应用价值.

关键词: Helmholtz共振腔, 低频隔声, 二维声场测量, 声防护

PACS: 43.40.+s, 43.35.Gk, 43.20.+g

DOI: 10.7498/aps.66.014307

1 引言

声人工结构是声学领域近年来发展起来的一个重要研究方向. 一般按照所研究参数的不同, 可以将声人工结构分为声子晶体^[1](主要关注结构的声传输特性)和声学超材料^[2](主要关注结构的等效参数特性)两大类. 从功能上讲, 声人工结构的作用主要是控制声波的传播, 从而实现各种超常的声功能器件^[3-7].

声人工结构通常由周期排列的人工微结构单元构成, 微结构单元形式多样, Helmholtz共振腔(Helmholtz resonator, HR)是其中常见的一种. 在声学领域, 对于Helmholtz腔的研究由来已久^[8-10], 但随着声子晶体研究的深入, 人们发现在周期排列的HR结构共振频率附近会出现性能较好的局域共振型声禁带^[10], 同时从材料学的角度研究表明, HR结构在其共振频率附近会表现出等效质量密度和等效体积模量同时为负的特性^[11-13], 这也为解释其局域共振禁带机理提供了理论支撑.

一维HR阵列由于结构简单, 现象明显且易于分析而受到了更多的关注. 已有文献中, 除了对完美周期结构^[11-13]的声传输特性及等效介质参数进行了系统研究之外, 人们还对含缺陷态的一维结构^[14]和参数梯度分布的结构^[15]都有所研究. Cheng等还对共振单元间存在耦合模式的情况进行了分析, 结果表明此时会出现禁带加宽^[16]或产生新禁带^[17]等现象. 二维HR结构的研究目前还比较有限^[10], 但由于同属局域共振型结构, 因此其他类似声子晶体和超材料研究的成果也可以对其提供一些支撑和参考^[18].

理论与实验研究结果均证明HR结构是一种具有较好局域共振特性的声学超材料, 可以对波长远大于自身尺寸的声波(即低频声波)进行传播控制. 由于是一种局域共振型声人工结构, HR声子晶体所产生的声禁带基本特性主要与单元本身的共振特性相关^[12], 即理论上只需要一个单元就可以产生局域共振型声禁带, 单元间的排列方式不会对禁带本质产生影响.

目前来看, 关于HR结构的研究还主要处于理

* 国家自然科学基金(批准号: 11504425, 41374005)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: gaodongbao@nudt.edu.cn

论与实验验证阶段, 不过HR结构良好的低频声能量局域效果为传统低频隔声隔振问题提供了新的思路^[17]. 由于受到质量定律的限制, 常规材料对低于1000 Hz的声波通常隔声效果较差. 局域共振型超材料通过设计共振单元的基本参数, 可以调节声禁带的位置, 从而实现对波长远大于其尺寸的声波进行控制, 诸多研究成果有望在此方面获得新的突破. 本文正是基于Helmholtz共振腔结构的局域共振特性设计了一种具有低频宽禁带的二维隔声结构. 针对模型特点, 搭建了一套二维声场测量系统. 通过理论分析与实验研究, 证明了该结构良好的区域隔声特性, 并讨论了隔声效果与结构参数之间的基本关系. 由于该结构是“嵌”于水平面之下的, 对水平面之上的物体可以实现没有遮挡的隔声效果, 方便对隔声区域内的重要设施或人员进行低频声防护.

2 模型设计与仿真结果

所设计的结构中包含了四圈呈圆周排列的HR单元, 基本结构如图1所示. 其中 R_1, R_2, R_3 和 R_4 分别表示各圈HR对应的圆环的半径, 分别为50, 100, 150和200 mm. 这里, 将圆环由内至外分别编号为1, 2, 3和4号. 共振腔的基本结构如图1中的附图所示, 其中 a 表示短管的半径, d 表示短管的长度, L 表示腔体的半径, 而 H 表示腔体的长度, 其共振角频率可以表示为 $\omega = c_0 \sqrt{S/d_{\text{effect}}V}$, 其中 $c_0 = 343$ m/s为空气介质的声速, d_{effect} 表示等效短管长度, $S = \pi a^2$ 为短管横截面积, $V = \pi L^2 H$ 为共振腔体积. 在本文中设 $a = 10$ mm, $d = 20$ mm和 $L = 20$ mm为固定值, 而 H 可根据需要进行调节, 以形成不同共振频率的HR单元. 为了保证结构的隔声效果, 需要尽量紧密地排列HR单元, 所设计结构中由内至外各列HR个数分别为6, 12, 18和24个, 单元间距约为52 mm.

当一系列HR单元共振频率梯度变化时, 会产生局域共振型禁带的重叠和耦合, 从而实现宽频禁带效果^[19]. 因此, 本文所设计的结构中将腔体高度由内至外分别设置为 $H_1 = 40$ mm, $H_2 = 35$ mm, $H_3 = H_4 = 30$ mm, 对应共振频率分别为710, 758和819 Hz. 之所以将最外侧两层设置为相同的参数, 是因为最外侧单元所面对的入射波范围较大, 增加单元层数可以提高隔声量. 本结构中各层单元

按照越靠近内侧共振频率越小, 而越靠近外侧共振频率越大的方式设计. 这样设计的原因是已有一维结构研究结果^[14]表明, 当HR单元未共振时(即入射波频率小于其共振频率), 能量主要集中在共振腔内; 而当HR处于已共振状态时(即入射波频率大于其共振频率), 入射波能量则主要分布在波导中. 因此, 在本结构中, 将共振频率较大的置于外侧可以在内部单元处于共振状态时也局域一定的能量, 从而提高此时的隔声量. 数值模拟采用有限元软件COMSOL Multiphysics进行, 网格划分严格按照有限元法的基本原理, 每个波长约为10个网格. 在模拟过程中, 声波沿 x 正方向入射.

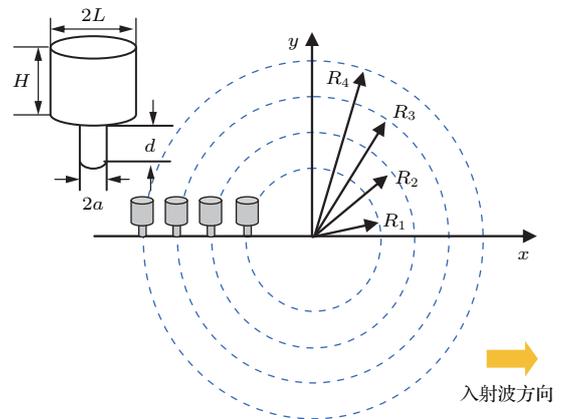


图1 基本结构示意图

Fig. 1. Schematic structure.

图2中绘制出了结构中心点处的隔声量随频率变化曲线. 从图中结果可以清晰地看到在680—1050 Hz范围内存在一个声禁带, 最大隔声量可以达到近80 dB. 中心点频率对应的波长约为单元间隔的8.4倍. 图2结果说明该结构可以对较低频率的宽频带声波产生良好的隔声效果.

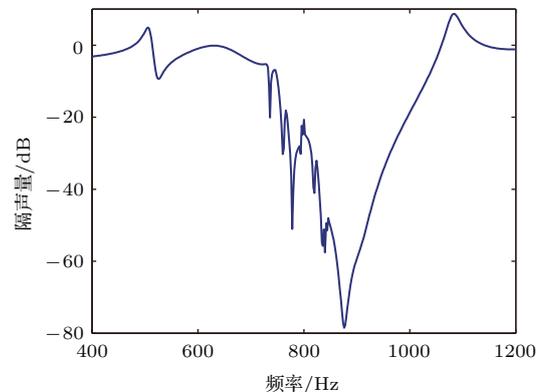


图2 结构中心点处隔声量

Fig. 2. Insulation sound pressure level spectrum of the center position.

这一禁带是由三种共振频率的HR产生的局域共振型声禁带叠加而成的,所以禁带特性与单一共振频率的局域共振型禁带^[12]相比略有差别.从图2中可以看到,声禁带范围内曲线并不是非常光滑,尤其在其左半边,存在多个数值波动频率点.这主要是由两方面原因造成的.一方面,某些谷值对应了不同参数单元的共振频率,如778, 836和876 Hz处.另外一些波动则是由于多种共振特性的单元间相互耦合形成的,本文不做深入讨论.

通过对比公式计算出的共振频率和数值模拟得到的共振频率可以发现,二者之间存在6%—9%的差异,这主要是因为模拟过程中采用的是三维模型,存在壁面、空间等相互作用过程,因此与采用集总模型得到的理论公式结果之间会存在一定的差别.不过,总体来说,差别还是合理的,并且不影响问题的本质.

图3中给出了几个共振频点(778, 836和876 Hz)处声压级分布情况,图中深颜色代表低声压级,即隔声量大的情况,而浅颜色代表高声压级,即隔声量小的区域.

由图3结果可见,当频率为778 Hz时,低声压级区域主要集中在第1层圆环内部,圆环外声压级很高,而此时正是第1层圆环处于共振状态;当频率为836 Hz时,低声压级区域主要集中在第2层圆环内部,此时第2层圆环处于共振态;而当频率为876 Hz时,则正好在第4层圆环内部,此时第3,4层圆环处于共振态.从图中分布结果可见,不同共振态下隔声区域内声场分布都较为均匀.结合图2中结果可知,所设计结构不但具有较大的隔声量,而且在整个隔声区域中声场均匀分布,隔声效果较好.实际应用过程中,该结构可以为某些重要设施提供一个“安静的”的二维隔声区.

为更清晰地获得不同状态下的声场分布特性,从图3中提取了各共振态下 x 和 y 坐标方向上隔声量的分布情况,如图4所示.其中图4(a)表示 x 方向情况,图4(b)表示 y 方向情况.从图中结果可见,三种共振态下,均在各方向上形成了隔声效果较好的“声禁区”.明显可以发现,不同共振频率对应了不同的禁区范围.778 Hz时,“声禁区”主要集中在 $(-0.05\text{ m}, 0.05\text{ m})$ 的区间;836 Hz时,“声禁区”则扩展到了 $(-0.1\text{ m}, 0.1\text{ m})$ 的范围;当最外两层单元共振,即876 Hz时,禁区范围进一步扩大

到 $(-0.15\text{ m}, 0.15\text{ m})$.这说明通过调整不同位置处单元的共振状态,可以获得不同尺寸(面积)的隔声区.

另外,在图4中还可以发现两个有趣的现象.两幅图中均存在多处非常窄的高隔声量位置.通过分析它们的位置可以发现,这些非常窄的高隔声量点正位于两个坐标轴上处于共振态的单元附近.这主要是因为此时临近的单元处于共振状态,较多的能量被局域在共振腔内部,造成其临近位置出现了能量的低点.而距离共振单元较远的地方,受到不同方向散射波的影响,声压级反而没那么低.第二个现象则是在图4(a)中可以明显地看到声场分布不对称的情况.原因在于本文中入射波沿 x 正方向入射,经过 x 负半轴上单元的作用和阻挡,自然进入 x 正半轴的能量就小了很多.由于图4(b)中 y 方向与入射波方向垂直,所以声场分布要对称得多.

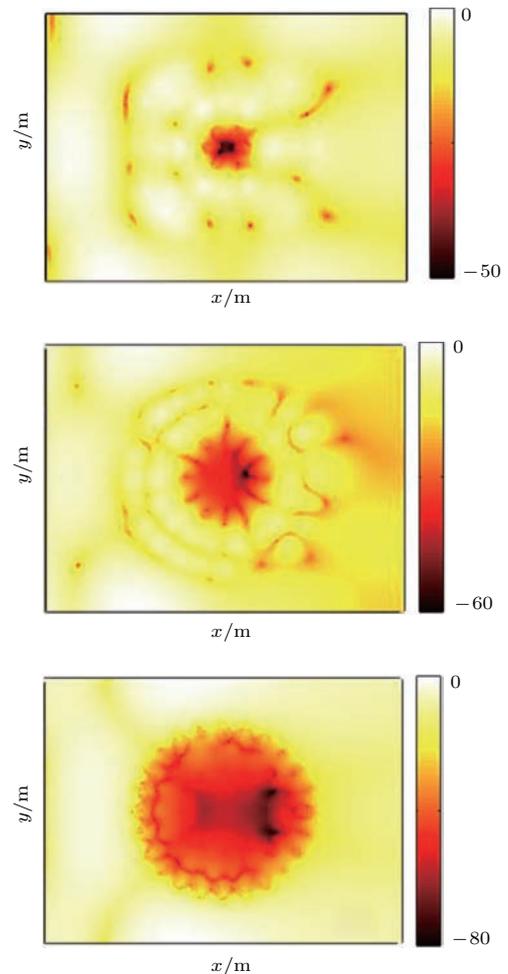


图3 (网刊彩色) 不同共振频点处声压级分布 (a) 778 Hz; (b) 836 Hz; (c) 876 Hz

Fig. 3. (color online) Acoustic field distributions at 778 Hz (a), 836 Hz (b) and 876 Hz (c).

上述结果证明了本文所设计的二维 Helmholtz 共振腔结构可以在较低频率的宽带内 (680—1050 Hz) 实现区域性的隔声效果, 而且从隔声场的特性来看, 分布较为均匀, 隔声范围具有可调性.

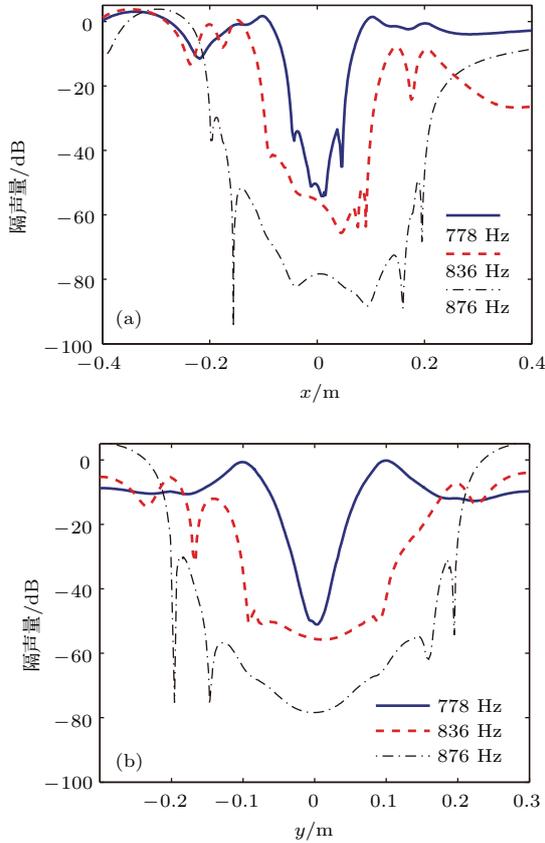


图4 共振状态下 x 和 y 方向上隔声量的分布
Fig. 4. (color online) Insulation sound pressure level distributions in x (a) and y (b) directions at different resonant states.

3 实验设计与结果分析

根据仿真结果设计了实验模型, 如图5所示. 模型采用厚度为 20 mm, 半径为 250 mm 的高密度聚氯乙烯板作为基本材料, 材料声阻抗相对于背景介质空气来说要大得多, 可以认为壁面为硬边界. 实验中利用五层薄板叠加, 整体尺寸与仿真模型相同. 为了形成所需参数的 Helmholtz 共振腔, 在最上层薄板中开有直径为 20 mm 的孔, 作为 Helmholtz 腔的短管. 下面三层薄板开有直径为 40 mm 的孔, 共同构成了 Helmholtz 腔的共振腔. 最下层板不开孔, 作为挡板使用. 由于腔体采用三层板叠加而成, 最大深度可达到 60 mm. 通过调整腔体深度, 可分别形成不同共振频率的共振腔单

元, 最小频率可低至 580 Hz 左右. 实验中, 每个单元尺寸可单独调整, 形成任意组合. 该模型不但可以满足本文实验要求, 还可以为其他研究工作提供支持.

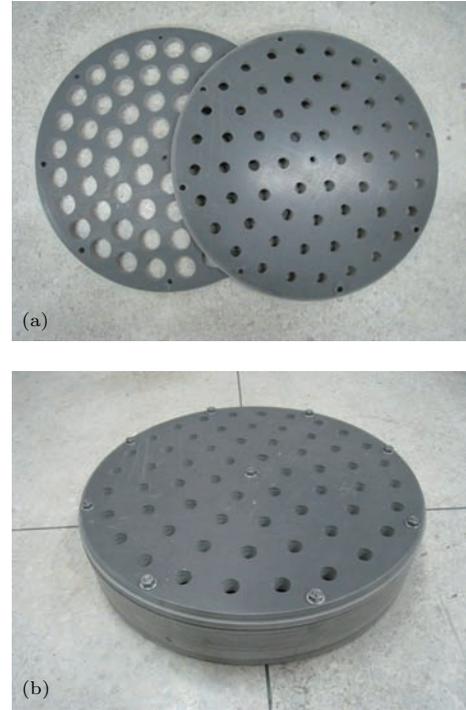


图5 实验模型
Fig. 5. Experimental model.

实验中所搭建的测量系统如图6所示. 实验系统中包含信号发生器、有源音箱、PULSE 3050 信号采集系统、B&K 4192 声信号测量传感器以及用于信号处理与分析的笔记本电脑等. 在测量过程中, 为了形成较好的二维平面波声场, 在模型上方添加了一个二维波导. 波导由上下两块硬塑料板 (材料与模型相同) 构成, 边界处采用螺钉固定及定位. 塑料板厚度为 10 mm, 尺寸为 1.5 m × 1.5 m, 相对于所测结构要大得多. 在波导的三个传播边界处都放置了吸声海绵, 避免了界面处反射波对声场的影响. 上层波导表面开有 11 × 11 个测量孔, 孔间距离为 50 mm, 保证了所测量频段内 (400—1200 Hz) 一个波长最少有 6 个测点, 满足测量需求. 测量范围完全覆盖了隔声结构表面, 可以获得隔声区域内的声场分布情况. 测量过程中, 波导间距为 50 mm, 根据矩形声波导理论^[20]可知, 其截至频率可达到 3400 Hz, 远大于实验中隔声结构工作频段.

测量过程中, 由信号发生器产生所需单频信号通过有源音箱发射, 音箱距离波导入口 1 m, 因此

可将波导入口处声场近似认为是平面波。波导中声场通过传感器进行测量, 经过信号采集系统采集声信号。同时, 波导入口中央也会放置一个传感器, 其测量得到的声压级作为入射声压级。每一点声压级经过多次测量取平均值作为最终结果。各测点隔声量计算过程可表示为 $T_n = \Sigma(P_n - P_{ni})/N$ ($n = 1, 2, \dots, 121$), 其中 P_n 表示波导中第 n 号位置处测到的声压级, P_{ni} 表示第 n 号位置处波导入口声压级, N 表示每一点的测量次数。

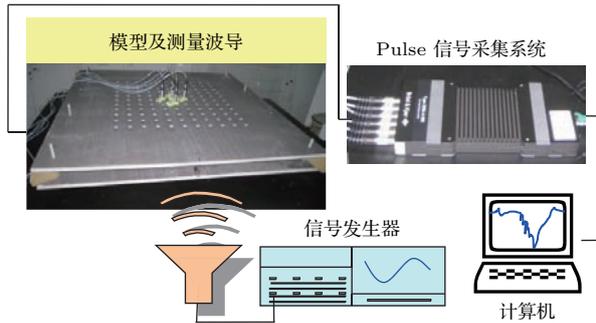


图6 实验测量系统示意图

Fig. 6. Experimental configuration.

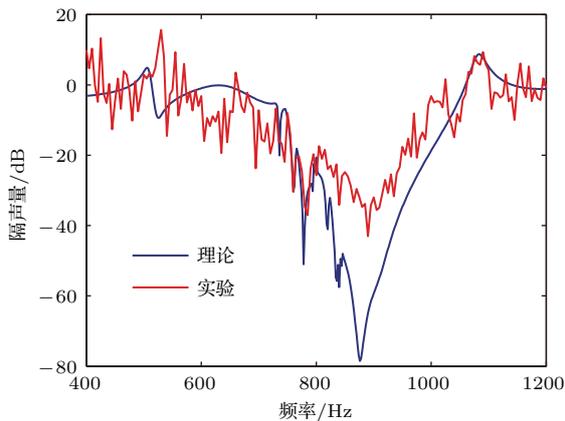


图7 (网刊彩色) 中心点处隔声量随频率变化

Fig. 7. (color online) Spectrum of insulation SPL at center position.

图7中绘出了波导中心点处的隔声量随频率变化曲线, 其中蓝色实线表示有限元理论计算结果, 而红色实线表示实验测量结果。通过结果对比可以发现, 实验所得结果无论在禁带位置还是在禁带宽度方面与理论结果都符合得非常好。实验中, 同样在大约680—1050 Hz范围内出现了一个声禁带, 并且可以清晰地发现其在785, 840和890 Hz处存在三处共振态, 对应了三种几何参数的Helmholtz腔共振频率。实验结果与理论结果之间在Helmholtz腔的共振频率方面略有差异, 这主要

是由于实际模型在加工装配过程中的误差造成的。从数值上而言, 这种差异还是可以接受的, 因为最大的误差也只有1.6%。不过, 在禁带的深度方面, 实验结果明显小于理论结果。有限元计算结果中, 最大隔声量可以达到近80 dB, 而实验中最大隔声量才只有41 dB, 仅约为其一半。本文中由于实际结构存在各种吸收与散射作用, 造成了声波与共振腔之间耦合减弱, 因此并不能如理论计算那样, 使HR共振态完全激发, 所以能量局域程度较为有限, 因而禁带没有那么深。

总的来说, 图7结果依然可以表明本文中所设计结构具有较好的宽频带隔声效果, 而且最大隔声量达到了41 dB。

图8中给出了三种共振频率下波导中声场的分布情况, 其中圆形表示不同层单元所处的位置。由图可见, 不同共振频率下, 波导中隔声区大小不同。通过对比可知, 图8(a)与图3(a)中结果分布非常相近, 低声压级区域只分布在第1层单元范围内。图8(c)中声场分布情况与图3(c)中情况也比较类似, 隔声区域分布较广, 几乎在整个模型区域隔声量均为25 dB以上, 隔声效果较好。

对比图8(b)与图3(b)可以发现, 二者之间存在一些明显的差异。在图3(b)中, 低声压级区域主要集中在第2层单元围绕的范围内; 而在图8(b)中, 这一区域则扩展到了第3、第4层单元区域, 甚至某些位置的声压级还要低一些。在图8(b)中某些位置, 如(0.1, 0), (0.05, -0.1), (-0.05, 0.1), (0.15, 0), (0.05, 0.2)和(0.15, 0.15)等都存在明显的低声压级状态。上述位置正对应了不同层上共振单元的位置, 如(0.1, 0)和(0.05, -0.1)对应于第2层的某些单元, (-0.05, 0.1)和(0.15, 0)对应于第3层的某些单元, 而(0.05, 0.2)和(0.15, 0.15)恰好对应了第4层上的某些单元。结合图4的结果可知, 此时这些单元处于共振态。然而此时入射波频率为840 Hz, 只等于第2层单元的共振频率, 而不等于第3、第4层单元的共振频率, 理论上这两层的单元不应该共振才对。不过, 由于最外侧两层单元的共振频率(890 Hz)与第2层单元的共振频率(840 Hz)相差较小, 同时某些单元在装配过程中可能也造成了尺寸的偏差, 从而导致这些单元共振频率较为相近, 所以当入射波频率在840—890 Hz频段内, 都会造成这些单元不同程度的起振。相似地, 这一现象也可以在图8(c)中发现, 此时不但在第3、第

4层位置处的单元(-0.15, 0), (-0.1, 0.1) 和(0.05, 0.15)产生了共振, 而且在第2层(0.05, -0.05)位置附近的某些单元也出现了共振现象.

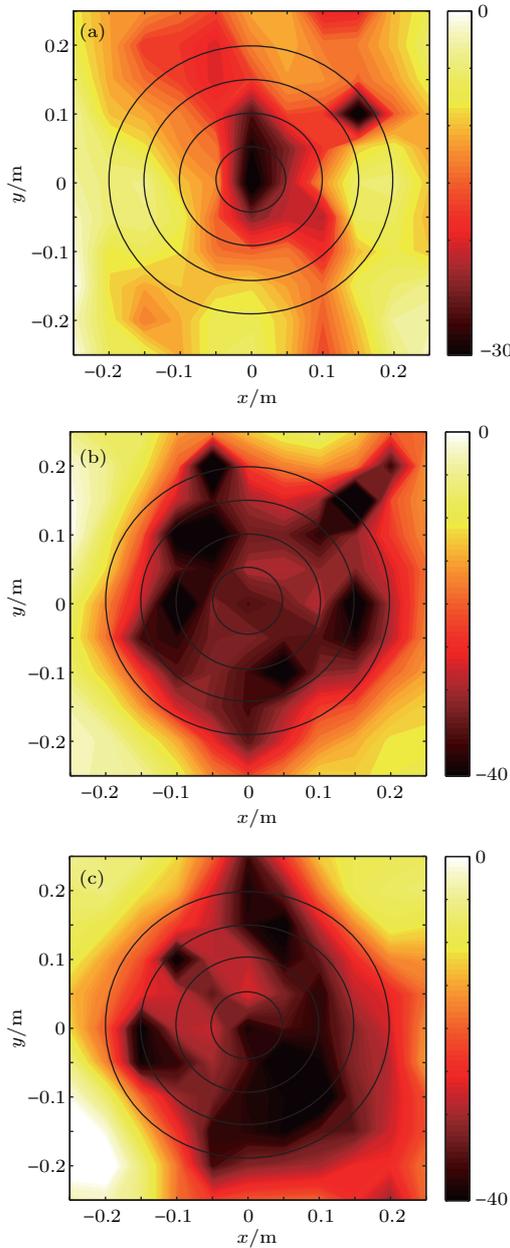


图8 (网刊彩色) 三种共振频率对应的声场分布情况 (a) 785 Hz; (b) 840 Hz; (c) 890 Hz
 Fig. 8. (color online) Acoustic field distributions at frequencies of 785 Hz (a), 840 Hz (b) and 890 Hz (c) for experimental results.

装配误差所导致的共振频率的差别不但增加了隔声区域控制上的难度, 而且也是造成图7中隔声量较低的另外一个重要原因. 由于同一层的单元不能同时共振, 在某些共振态较弱的位置便出现了“漏洞”, 使入射声波从这些位置传播到了隔声区域内部, 以至于降低了隔声量.

为了定量地说明该结构的实际隔声效果, 图9中分别给出了 x 和 y 轴上隔声量的分布结果. 整体来看, 图9中结果与图4中结果相类似, “声禁区”现象比较明显. 对于785 Hz的情况, “声禁区”相对较小, 明显存在漏斗形分布情况, 其他两种频率下“声禁区”分布较广, 隔声量分布曲线更为平缓. 类似地, 在图9中, 也能发现明显的高隔声量位置点, 如图9(a)中840 Hz时-0.1 m和0.15 m两点, 890 Hz时的-0.15 m等处. 结合图8结果可知, 此时该位置单元处于共振态, 这也直接证明了该结构中隔声区是由于共振单元出现了共振现象从而阻止了声波的传播而产生的. 对比发现, 实验结果(图9)与理论结果(图4)仍存在一定的差异, 除了数值方面, 实验结果的分布曲线的对称性明显不如理论结果的好. 这一原因与上文中的分析结果相似, 主要还是因为某些单元的共振态出现了偏差, 从而使结构中声场分布不均匀导致的. 不过总体来说, 实验现象符合理论预期, 证明了该结构具有较好的二维隔声效果.

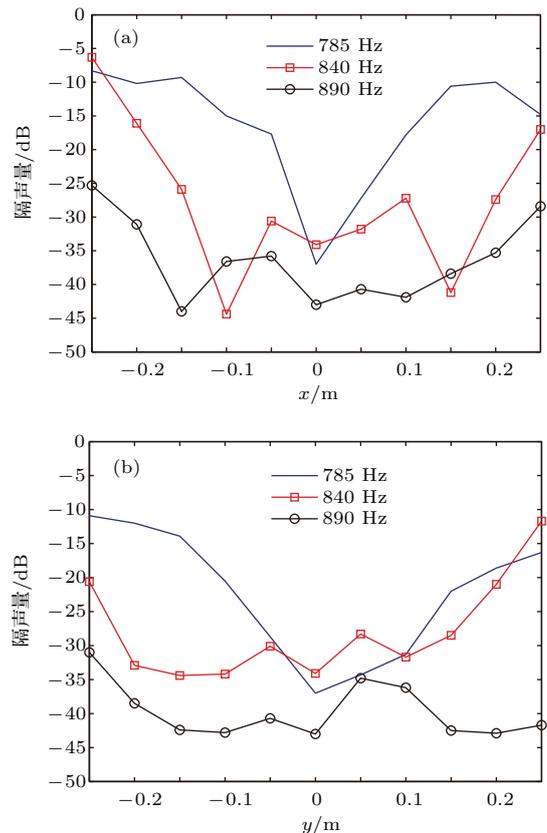


图9 (网刊彩色) 共振状态下 x 和 y 方向上隔声量的分布 (实验结果)
 Fig. 9. (color online) Insulation sound pressure level distributions in x (a) and y (b) directions at different resonant states (experimental results).

4 结 论

本文基于二维分布的Helmholtz共振腔阵列设计了一种具有低频宽禁带隔声效果的人工结构. 该结构具有单元共振频率可调的特性, 可以通过几何参数的优化设计实现针对不同频带的二维区域隔声. 针对该模型, 搭建了一套二维声场测量系统, 进行了理论与实验研究, 结果表明该结构可在680—1050 Hz范围内实现有效隔声, 实验中隔声量最大可达到41 dB. 隔声区内声场分布较为均匀, 隔声区大小与共振态HR的排列情况有关, 可通过调节不同位置处HR的共振频率, 改变隔声区大小. 由于实验中装配误差的存在, 导致隔声量等参数受到了一定的影响, 需要在后续的研究中进一步增强单元的一致性改善隔声效果. 该结构的另一个优点是无需采用具有遮挡效果的隔声材料便能实现区域性的隔声效果, 可以有效地对器件、装备或人员进行声防护.

本文所分析的结构只是一种原理性模型, 在实际应用中还需要根据具体问题来恰当地设计相应参数. 如本文模型中最内层隔声区域直径只有0.1 m, 相对较小, 在实际应用中只要隔声区域的尺寸, 即最内层HR阵列所围成的区域面积大于所需隔声的目标物体的尺寸即可. 另外, 随着声人工结构技术的发展, 研究人员也发现了工作在深亚波长尺度的超材料和单向传输超材料等^[21-23], 为低频隔声问题提供了更广阔的思路.

参考文献

- [1] Kushwaha M S, Halevi P, Dobrzynski L, Djafari-Rouhani B 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 2022
- [2] Liu Z Y, Zhang X X, Mao Y W, Zhu Y Y, Yang Z Y, Chan C T, Sheng P 2000 *Science* **289** 1734
- [3] Zhu R, Liu X N, Hu G K, Sun C T, Huang G L 2014 *Nat. Commun.* **5** 5510
- [4] Zhang S, Xia C G, Fang N 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 024301
- [5] Zhu X F, Liang B, Kan W W, Zou X Y, Cheng J C 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 014301
- [6] Kan W W, Garcia-Chocano V M, Cervera F, Liang B, Zou X Y, Yin L L, Cheng J C, Sanchez-Dehesa J 2015 *Phys. Rev. Appl.* **3** 064019
- [7] Wu L Y, Chen L W, Liu C M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 013506
- [8] Norris A N, Wickham G 1993 *J. Acoust. Soc. Am.* **93** 617
- [9] Sugimoto N, Horioka T 1995 *J. Acoust. Soc. Am.* **97** 1446
- [10] Hu X H, Chan C T 2005 *Phys. Rev. E* **71** 055601
- [11] Fang N, Xi D J, Xu J Y, Ambati M, Srituravanich W, Sun C, Zhang X 2006 *Nat. Mater.* **5** 452
- [12] Cheng Y, Xu J Y, Liu X 2008 *J. Phys. Rev. B* **77** 045134
- [13] Ding C L, Zhao X P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6351 (in Chinese) [丁昌林, 赵晓鹏 2009 物理学报 **58** 6351]
- [14] Gao D B, Zeng X W, Zhou Z M, Tian Z F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 094304 (in Chinese) [高东宝, 曾新吾, 周泽民, 田章福 2013 物理学报 **62** 094304]
- [15] Gao D B, Zeng X W, Zhou Z M, Tian Z F 2014 *Proceedings of the 21th Inter. Congress on Sound and Vib.* Beijing, China, July 13–17, 2014 p2679
- [16] Cheng Y, Xu J Y, Liu X J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 051913
- [17] Cheng Y, Liu X J 2012 *Appl. Phys. A* **109** 805
- [18] Liu J, Hou Z L, Fu X J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 154302 (in Chinese) [刘娇, 侯志林, 傅秀军 2015 物理学报 **64** 154302]
- [19] Fey J, Robertson M 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 114903
- [20] Du G H, Zhu Z M, Gong X F 2001 *Fundamentals of Acoustics* (Nanjing: Nanjing University Press) pp279–283 (in Chinese) [杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬 2001 声学基础 (南京: 南京大学出版社) 第279—283页]
- [21] Zhu X F, Liang B, Kan W W, Peng Y G, Cheng J C 2016 *Phys. Rev. Appl.* **5** 054015
- [22] Zhu X F, Li K, Zhang P, Zhu J, Zhang J T, Tian C, Liu S C 2016 *Nat. Commun.* **7** 11731
- [23] Zhu X F, Ramezani H, Shi C Z, Zhu J, Zhang X 2014 *Phys. Rev. X* **4** 031042

A broadband low-frequency sound insulation structure based on two-dimensionally inbuilt Helmholtz resonator*

Gao Dong-Bao[†] Liu Xuan-Jun Tian Zhang-Fu Zhou Ze-Min
Zeng Xin-Wu Han Kai-Feng

(Academy of Ocean Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 11 July 2016; revised manuscript received 27 September 2016)

Abstract

Helmholtz resonator (HR) has already been demonstrated both theoretically and experimentally to be a meta-material with negative mass density and negative bulk modulus simultaneously. The HR can resonate at a frequency corresponding to a wavelength much longer than its geometrical parameters. At this time, the incident acoustic energy can be located. Therefore, the HR structures are considered to be good choices for controlling low-frequency sound waves. Furthermore, existing results indicate that the wide forbidden band could be formed by a one-dimensional structure shunted with detuned HRs. Based on these aforementioned theories, a man-made acoustical structure with broadband low-frequency sound insulation effect is designed by circularly inbuilt HRs. Beyond this structure's surface, a two-dimensional quiet zone can be created. With the same simulated model, an experimental structure is fabricated based on PVC plastic material. The structure consists of five layered circular plates. In the top four plates, two kinds of holes are drilled. The smaller holes in the top plate act as shot necks of the HR, while the bigger holes in the middle three plates serve as the cavities of the HR. They can construct 60 resonators with different resonant frequencies. Experiments are carried out to study its sound insulation properties. In the experiments, three kinds of HRs with resonant frequencies 785, 840 and 890 Hz from inner loop to outer loop, respectively, are formed. The experimental results are very coincident with the simulation results from the software of COMSOL Multiphysics based on finite element method, which shows that this structure has an excellent sound insulation effect in a frequency band of 680–1050 Hz, and the maximum insulation sound pressure level can reach 41 dB. Meanwhile, the distribution of the two-dimensional sound field is measured. The results point out that the range of the insulation area can be changed with the incident frequency. In addition, the sound insulation effect is sensitive to the resonant state of the HRs. When all of the resonators at the same loop resonate simultaneously, the insulation sound pressure level will be higher. On the contrary, the insulation sound pressure level will be lower because of the energy leaking through the positions where the HRs do not resonate with the others. This work will be of help for designing new sound protection devices for low-frequency sound waves.

Keywords: Helmholtz resonator, low-frequency insulation, two-dimensional acoustic field distribution, sound protection

PACS: 43.40.+s, 43.35.Gk, 43.20.+g

DOI: 10.7498/aps.66.014307

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11504425, 41374005).

[†] Corresponding author. E-mail: gaodongbao@nudt.edu.cn