

文章编号: 1671-7449(2024)02-0187-07

基于声学超材料的低频隔声模型设计

刘焯昕, 张 权, 韩建宁*

(中北大学 信息与通信工程学院 山西 太原 030051)

摘要: 由于低频声波波长较长且穿透力强、难以衰减, 能很轻易地绕过障碍物, 所以排除低频声波的干扰一直是声学研究中的一大问题。为了实现对低频波的有效吸收, 解决现代生产生活中普遍存在的噪声污染问题, 以声学超材料为基础, 利用COMSOL有限元软件研究设计一种二维三分量局部共振型超材料模型, 对不同频率、不同厚度和不同形状结构的超材料模型隔声效果展开研究。经仿真实验结果验证, 模型能够实现低频声波的吸收, 在20~3 000 Hz频率范围内有效降低低频宽频噪声, 最大可得到30 dB的声衰减, 从而达到良好的低频隔声效果, 这项研究对声学的发展有很好的现实价值和发展空间, 为民用及军用领域对减振降噪的高需求提供了更多的可能, 可在许多不同的应用中发挥作用。

关键词: 声学超材料; 低频隔声; 低频振动噪声; 声子晶体; COMSOL

中图分类号: TP304

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2024.02.012

引用格式: 刘焯昕, 张权, 韩建宁. 基于声学超材料的低频隔声模型设计[J]. 测试技术学报, 2024, 38(2): 187-193.

LIU Yexin, ZHANG Quan, HAN Jianing. Design of low-frequency sound insulation model based on acoustic metamaterial[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(2):187-193.

Design of Low-Frequency Sound Insulation Model Based on Acoustic Metamaterial

LIU Yexin, ZHANG Quan, HAN Jianing*

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Since low-frequency sound waves have longer wavelengths and are penetrating and difficult to attenuate, they can easily bypass obstacles, so excluding the interference of low-frequency sound waves has been a major problem in acoustics research. In order to achieve effective absorption of low-frequency waves and solve the problem of noise pollution that is common in modern production and life, this paper uses COMSOL finite element software to study and design a two-dimensional three-component local resonance type metamaterial model based on acoustic metamaterials, and conducts research on the sound insulation effect of metamaterial models with different frequencies, different thicknesses and different shapes and structures. The simulation experimental results verify that the model can achieve the absorption of low-frequency sound waves, effectively reducing low-frequency broadband noise in the frequency range of 20~3 000 Hz, the maximum acoustic attenuation of 30 dB can be obtained, this thus achieves a good low-frequency sound insulation effect, this research has good realistic value and development space for the development of acoustics, and provides more possibilities for the high demand of vibration and noise reduc-

收稿日期: 2023-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61671414); 山西省基础研究计划资助项目(202103021224201)

作者简介: 刘焯昕(1999-), 女, 硕士生, 主要从事声学超材料研究及声场有限元分析研究。E-mail: 1259348389@qq.com。

* 通信作者: 韩建宁(1980-), 男, 教授, 博士, 主要从事声场有限元分析及声学超材料设计等研究。E-mail: hanjn46@nuc.edu.cn。

tion in civil and military fields. It can be used to screen many different applications.

Key words: acoustic metamaterials; low-frequency sound insulation; low-frequency vibration and noise; phonon crystals; COMSOL

0 引言

随着科技的发展与进步,低频振动噪声在日常生产生活中普遍存在。相比高频声波,低频声波波长更长、衰减更慢。人耳相对敏感的声波频率在200~800 Hz以内,研究表明,长时间处于低频噪声(1 000 Hz)环境下对人体身心健康的潜在影响很大,其中50~300 Hz的噪声危害更加明显,易与人体内器官形成共振,对人体、听觉、神经、心血管、消化系统都存在潜在危害^[1];车内低频振动噪声(30~500 Hz),穿透力和破坏力强,低频“轰鸣声”令人发狂。根据2022年中国噪声污染防治报告数据统计,噪声投诉举报量达到401万件,其中社会生活噪声占57.9%,建筑施工噪声占33.4%,工业噪声占4.5%,交通运输噪声占4.2%^[2]。在追求高质量生活的今天,噪声成了人类社会不得不面对的一个问题。传统隔声方法一般采用扁平宽厚的硬质板材结构,板的面密度越大,隔声性能越好,要想有效隔离数百赫兹的低频声波,受到质量定律影响,板材结构需要厚达1 m^[3],因此很难满足“宽”“轻”“薄”“强”的实际需求^[4]。

声学超材料的基础是声子晶体,是指不同弹性系数和密度的介质周期性排列而成的人工超构材料^[5]。Liu等^[6]在21世纪初提出由高密度铅球包裹着橡胶构成局域共振单元,并将其周期性地嵌入弹性介质(环氧树脂)中从而构成声学超材料。空气声吸声方面,多位研究者提出基于Helmholtz共振结构(利用空气振动的声学结构)隔声、吸声结构材料模型,得到了相关结构厚度减薄后作用频段向低频段靠近的结论^[7]。2008年,杨志宇等^[8]提出了基于局域共振理论薄膜型声学超材料,其在低频段展现出良好的隔声性能,通过叠加多层轻质隔声板,使其在50~1 500 Hz的宽带内获得了较高的声衰减效果,但是膜材料本身的预应力难以控制,也使其存在一定缺陷。声学超材料的发展弥补了传统隔声材料应对低频噪声问题上厚度太大、重量太重、在低频降噪效果仍旧不理想的缺陷,表现出了良好的低频宽带降噪性

能,为低频振动噪声的有效控制提供了全新思路。

本文以声学超材料为基础,设计了一种主要由二维三分量局域共振型声子晶体组成的实验模型,针对不同频率下模型隔声效果做了相关的研究,对不同厚度、不同形状的声学结构模型都进行了相应的实验分析。

1 理论准备与模型设计

1.1 理论准备

声学超材料最典型的特征是具有亚波长的尺寸^[9],它利用厘米量级的结构实现对波长为米量级的弹性波的控制,当声波穿过超材料结构模型时,受到内部周期排列结构的调制,从而影响声波传播,能够实现利用亚波长结构调控低频宽带声波衰减^[10]。如图1所示的三分量结构是典型的包含局域共振声学超材料的声子晶体模型:

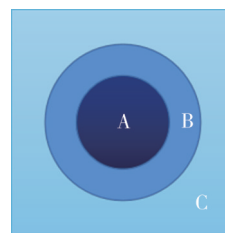


图1 典型的三分量局域共振声子晶体模型

Fig. 1 A typical three-component local resonance phonon crystal model

三分量局域共振超材料在亚波长可以近似认为材料的各个单元做同步运动,不同单元的动力学特性一致^[11]。任取一个单元,当长波长的弹性波入射到这样的结构单元上时,由于包覆层材料(B)足够软,基体(C)和高密度芯体(A)都可看成接近于刚性,可以把基体介质和高密度芯体均看成一个谐振子以单元的中心为平衡位置做简谐振动,即中心高密度芯体以平动方式运动,包覆层橡胶跟随芯体做相应运动^[12,13]。当声波从模型的一侧入射时,基体在其作用下发生振动,然后声能被传输到包覆层和芯体,从而最终导致整个电池结构振动。如果外层材料的杨氏模量很小,而振子的质量 M 很大,其共振频率 $\omega_0 = \sqrt{k/M}$ 可以相当低,式中: k 是弹簧系数。因此,整个模型对

声波的调控可以认为是由于单元振动引起的,由于与双弹簧振子模型相似,可以以此进行类比,双弹簧振子模型的色散方程可以表示为

$$\omega^2 = 4KM_{\text{eff}}^{-1} \sin^2 ka, \quad (1)$$

$$M_{\text{eff}} = M_1 + M_2 \omega_0^2 / (\omega_0^2 - \omega^2), \quad (2)$$

$$\omega_0 = \sqrt{2G/M_2}. \quad (3)$$

式中: m_1 表示双弹簧振动器外层的质量; m_2 表示其内层的质量; M_{eff} 表示有效质量; ω 表示共振频率; a 表示弹簧振子的晶格常数,即两个振动球体之间的距离。把三分量局域共振材料结构与双弹簧振子模型结构做类比分析,最外层基体层质量类比 m_1 ,最内层芯体层质量类比 m_2 ,最内层质量用 $m_{\text{铅芯}}$ 表示,最外层质量用 $m_{\text{聚合物}}$ 表示,中间层橡胶具有很强的弹性,可以看作一个联接弹簧,其弹簧常数用 g 表示。声学模型的色散方程可以表示为

$$m_{\text{铅芯}} = \rho_{\text{铅芯}} \pi R_1^2, \quad (4)$$

$$m_{\text{聚合物}} = \rho_{\text{聚合物}} (a^2 - \pi R_2^2), \quad (5)$$

$$\omega_0 = \sqrt{2G/\rho_{\text{铅芯}} \pi R_1}, \quad (6)$$

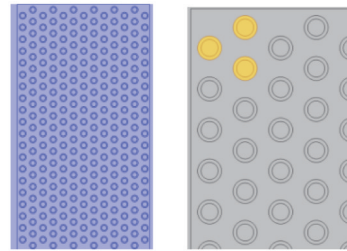
$$M_{\text{eff}} = \rho_{\text{聚合物}} (a^2 - \pi R_2^2) + \rho_{\text{铅芯}} \pi R_2 \omega_0^2 / (\omega_0^2 - \omega^2). \quad (7)$$

当频率达到共振频率时,整个超材料声学模型产生负质量现象^[14],原细胞的最外层聚合物基体和最内层芯体开始微弱振动,而中间层弹性橡胶剧烈振动。这意味着当入射纵波经过局域共振单元时,人工结构中周期排列的散射体产生强烈的多重散射,逐渐转化成横波的效率较高,在阻尼材料中横波的耗散效率极高,因此,声波散射中仅有少部分横波转化回纵波,此时声学材料利用局域共振形成共振吸声。

1.2 有限元模型结构建立

由于二维和三维三组元的共振原理相同,本文统一采用二维模型进行分析,以便更好地从微观角度进行观察,在选择压力声学物理场和频域后,使用COMSOL建立局部共振周期结构声学超材料矩形模型,矩形长和宽分别为0.5 m和0.27 m,如图2(a)所示。超材料模型主要是由3个单元组成局部共振声子晶体,每个结构的材料参数保持一致——内部为金属铅,外部为橡胶。这些组元呈正三角形阵列排列好植入硬衬底材料中,如图2(b)所示;模型整体置于空气中;同时在模型外侧一定距离处安置点源和线源,点源产生的球面波和线源产生的平面波分别从外侧入射到人工周期性声学结构。

本文使用COMSOL有限元法进行数值模拟^[15],其中模拟各部分的参数如表1所示(环境温度 $T=293.15\text{ K}$)。



(a) 矩形结构 (b) 正三角形阵列

图2 模型二维结构

Fig. 2 Two-dimensional structure of the model

表1 材料参数表

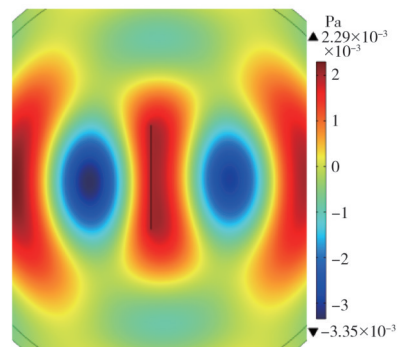
Tab. 1 Material data table

材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	声速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
空气	1	344
铅芯	11 600	1 250
液体橡胶	100	100
聚合物	1 000	1 450

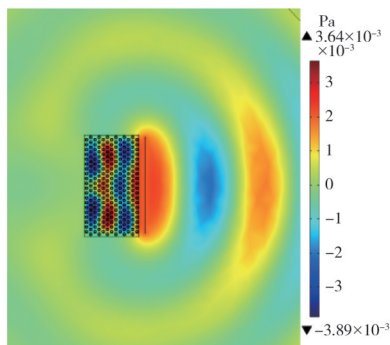
2 仿真结果与分析

2.1 不同频率下的低频隔声效果

在声学研究中,由于声波无法直接观察到,一般通过声压分布情况分析声波传输情况。为了探究不同的入射频率对声波的阻碍效果,采用扫频的方式,将步长设置为20 Hz,对20~3 000 Hz范围内的人射声波进行仿真实验。图3(a)是线声源在自由空间中的传播图,可以看到平面波向两侧线性传输并不断衰减,图3(b)为加入模型后的声波传播图,声源右侧没有超材料的阻隔,红蓝声压交替出现,声压大小随着距离增加衰减,而左侧经过声学超材料模型的阻隔,声压几乎为0 Pa。



(a) 无隔声模型

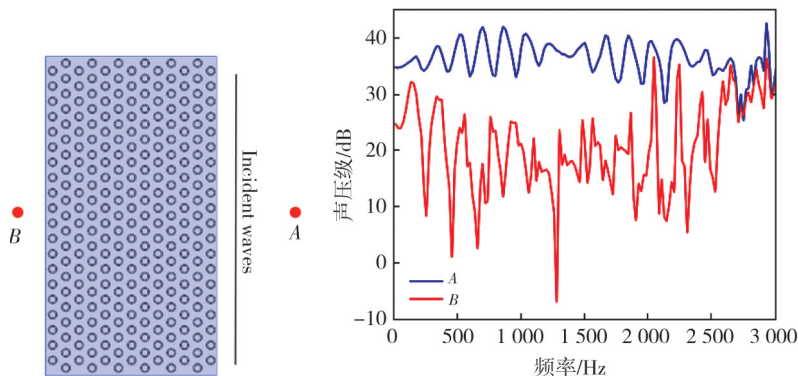


(b) 加入隔声模型

图3 500 Hz时声压分布

Fig. 3 The sound pressure distribution

为了验证声隔离现象的真实性,对模型的其



(a) 二维模型两点位置

(b) 不同频率时声压级曲线对比

图4 声源两侧声压级曲线

Fig. 4 Sound pressure level curves on both sides of the sound source

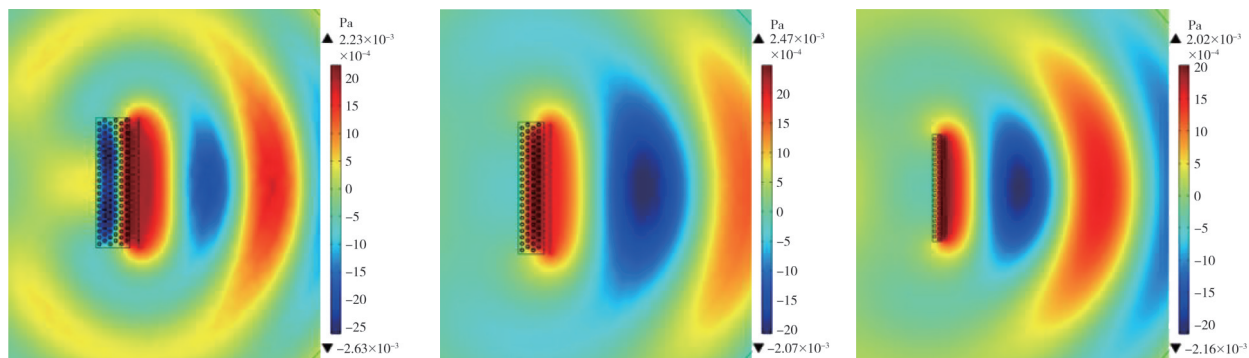
2.2 声学超材料结构厚度对低频隔声效果的影响

考虑到实际应用,结构厚度是制约声学超材料在工程尤其是重大装备(如飞机、舰船、汽车、高铁等)上应用的关键因素。本文提出的结构,厚度也需要进一步降低。以原有的模型为基础,分别

他参数做了探测记录。在声源两侧分别选取A,B两个点,当激励频率在20~3 000 Hz范围内变化时,测量两个点的声压级,结果如图4所示。

图4中的A,B两条曲线分别是声源两侧点的声压级随频率变化的曲线。可看到有超材料模型的声压级比另一侧降低20 dB左右,其中频率在1 000~1 500 Hz时隔声性能最为明显,1 060 Hz时隔声能力可达30 dB,这是由于此时接近谐振频率,中间层橡胶的平动共振在整个单元的振动模式中占主导地位,引起内层芯体及基体材料的剪切形变,实现入射纵波向横波的转化,最大程度实现对声波的耗散,形成共振吸声。当频率超过2 500 Hz时,声压级波形逐渐重合,隔声效果开始减弱。

缩减模型厚度至0.2, 0.1和0.05 m,以线声源为激励,对模型隔声现象进行观察、记录与分析,不同厚度的声学模型仿真效果如图5(a)~图5(c)所示,声源右侧没有模型阻隔,声波呈线性传输并随距离衰减,左侧经超材料后声波被模型吸收,声压值几乎为0 Pa。



(a) 0.2 m

(b) 0.1 m

(c) 0.05 m

图5 不同厚度超材料模型的声压分布

Fig. 5 Sound pressure distribution of metamaterial models of different thicknesses

为了验证模型厚度对隔声效果的影响,分别选取 400, 600, 800 和 1 000 Hz 4 个频率,对同一

频率下不同厚度的超材料模型的隔声效果做对比分析,结果如图 6 所示。

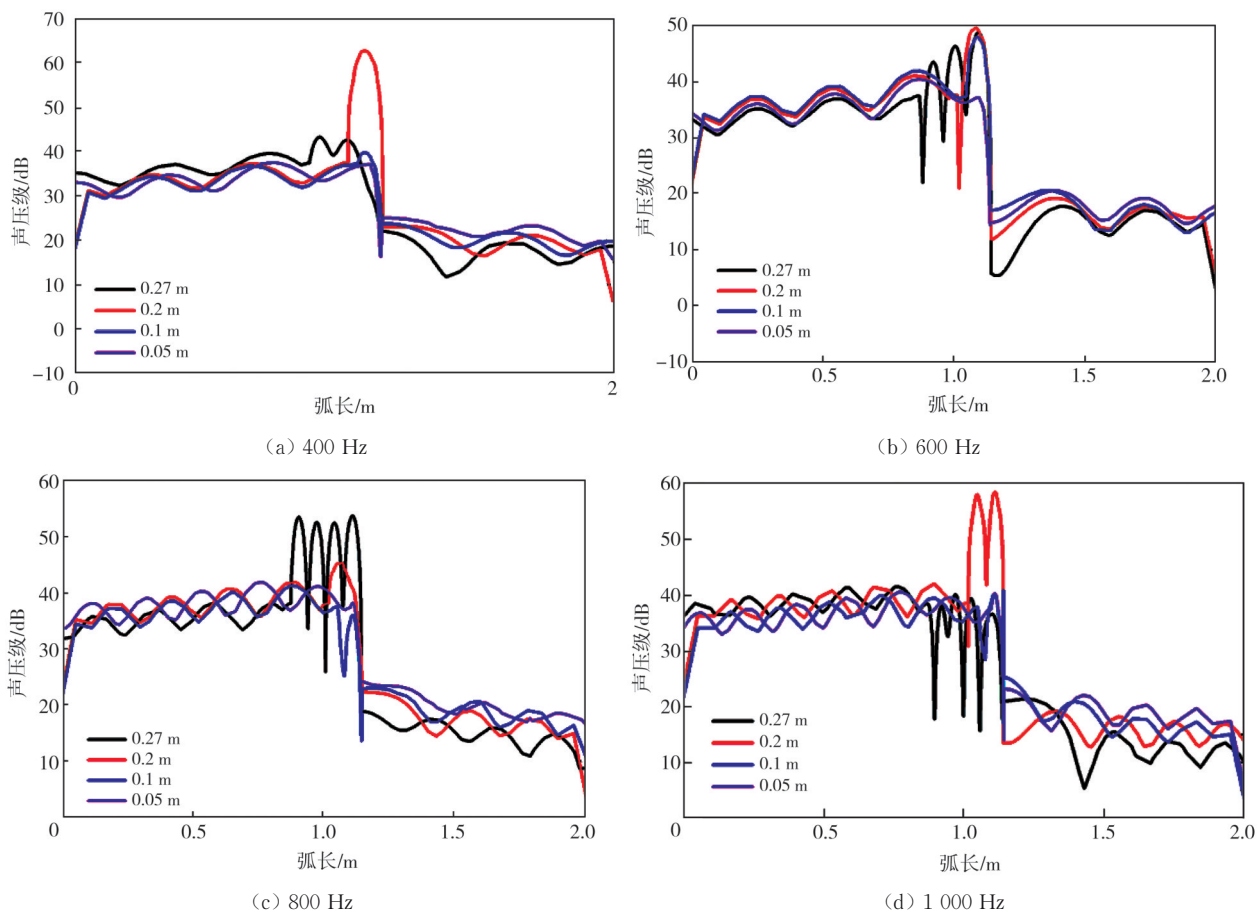


图 6 不同厚度模型的隔声效果对比

Fig. 6 Comparison of sound insulation effects of models of different thicknesses

声波的波长与频率成反比,随着入射声波频率的不断加,声波波长会不断减小。通过声压级波形图对比分析,在同一频率声波激励下,各个厚度模型的隔声量均在 20 dB 以上,其中厚度为 0.27 m 的超材料模型隔声效果要略优于其他模型;当按比例缩减超材料模型厚度时,隔声性能并未呈比例下降,只是略微降低,隔声量之差在 5 dB 以内,打破了隔声材料模型受质量密度的制约。

2.3 声学超材料结构形状对低频隔声效果的影响

本文在线声源的基础上,增加点声源的模拟,在薄状模型结构基础上,增加环形结构,点声源(50 Pa)置于两种模型结构中央,对比观察两侧的仿真结果,如图 7 所示。

形状的改变并未影响模型的隔声效果,在薄状声学模型和环状声学模型结构包围着的内部,声波被局限其中而不能向外传播,声源附近声压值在 50 Pa

左右,模型外侧声压值接近为 0 Pa,加入模型后声衰减效果显著。本文通过绘制水平方向的二维截线导出绝对声压波形图来更直观地描述不同频率下不同形状模型的对比隔声效果,如图 8 所示。

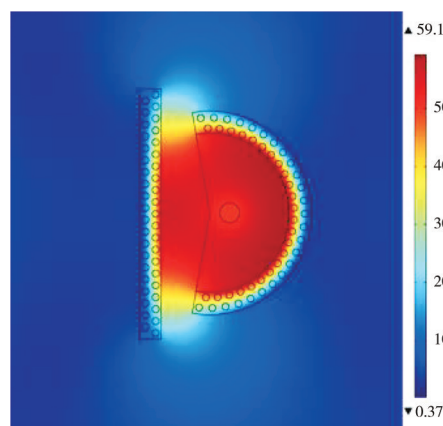


图 7 不同形状模型的声压分布图

Fig. 7 Sound pressure distribution of different shape models

图 8 中弧长 1 m 处为点状激励声源(50 Pa)所在位置,波形峰值处为模型内部声压,最高达到 310 Pa,

已经达到声源处声压值的6倍,这是由于声波在通过声学模型之后,波前的相位由该模型控制,该模型将其声学扩散路径限制在模型内部局域共振单元附近,此时大部分的声能被声学模型吸收。在不同频率下薄状声学模型和环状声学模型均有相似的隔声效果,对于不同场景的需求提供了更大可能。为了进一步探究声学超材料模型结构的影响,设计了一种圆环状模型进行仿真试验,图9分别为声源激励在内部和外部时模型的声压分布情况。

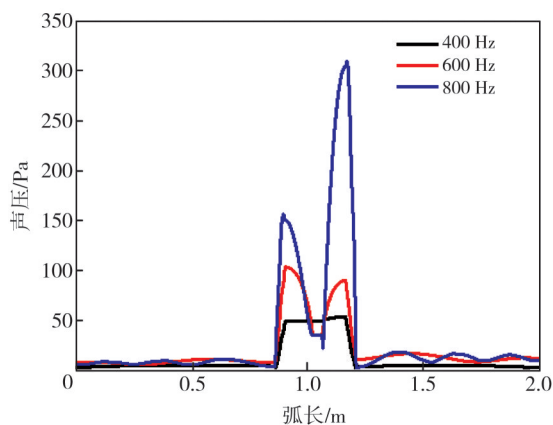
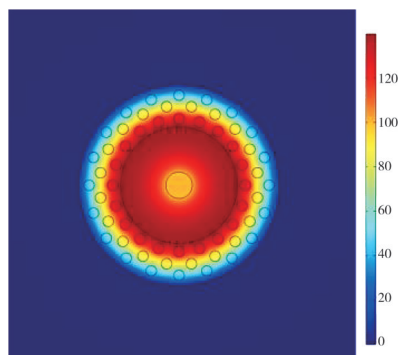
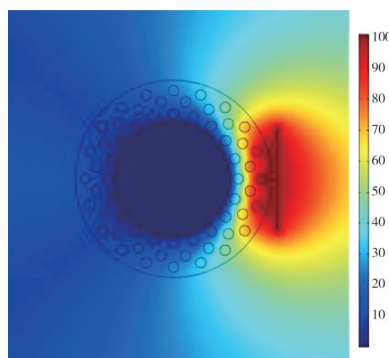


图8 不同频率下声压波形图

Fig. 8 Waveform of sound pressure at different frequencies



(a) 激励源在内部

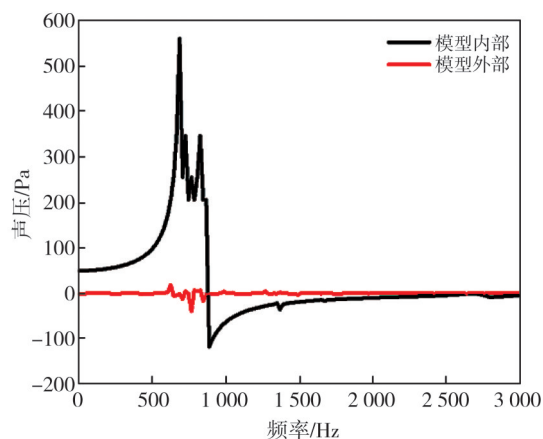


(b) 激励源在外部

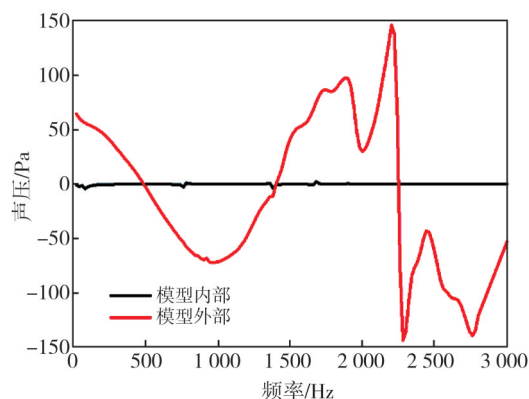
图9 圆环状模型绝对声压分布

Fig. 9 Absolute sound pressure distribution in the circular modell

观察圆环状声学模型的绝对声压分布图,当声源激励(50 Pa)在模型内部时,内部的声压很高,整体呈深红色,而外部的声压很低,几乎为0 Pa;当声源激励(50 Pa)在模型外部,内部的声压始终为0 Pa,声压被模型吸收,形成“黑洞”效应。为了突出该模型的隔声效果,选取了模型内外边界上的两个点,当激励频率在20~3 000 Hz范围内变化时,分别测量两个点的声压,结果如图10所示。



(a) 内部激励



(b) 外部激励

图10 模型内外声压变化图

Fig. 10 Sound pressure change inside and outside the model

图10中的两条曲线分别是模型的外部点和内部点声压力曲线,可以看出,图10(a)中声源激励在模型内部,内部的声压很高,最高可达560 Pa,相反,外部的声压很低,几乎为0 Pa;图10(b)中声源激励在模型外部,外部声压随频率变化在波动,最高可达150 Pa,内部声压在0 Pa左右波动,外部声压随频率波动较大,频率波动越大振幅越大。

3 结论

减振降噪、吸声隔声,是声学超材料兴起以来受

众面最广的研究方向, 现今人们越来越注重高品质生活, 为了更好地保障人们的身心健康, 本文以声学超材料为基础, 利用COMSOL有限元软件研究设计了一种二维三分量局部共振型超材料模型。通过数值仿真, 证明该模型的隔音能力显著, 并且在低频范围内隔声频带较宽, 能够实现 $20\sim 3\,000$ Hz 频率范围内的声波有效吸收, 最高可达到 30 dB 的声衰减; 通过同一频率下不同厚度的超材料模型隔声效果对比分析, 模型厚度和隔声性能并不是呈正比例缩减, 按比例缩减模型厚度后, 模型的声衰减之差在 5 dB 以内; 此外, 发现在特定的频带中, 该模型可以达到收集能量和形成能量焦点的效果。声学超材料隔声模型结构为低频噪声阻隔提供了强有力的解决方案, 这项研究对声学研究和在日常生活中的应用有着极为重要的意义, 也可能推动声学超材料在更多领域的应用。

参考文献:

- [1] 孟德世, 李丽君, 李敏. 声学超材料的结构设计概述[J]. 功能材料与器件学报, 2021, 27(2): 67-76. MENG Deshi, LI Lijun, LI Min. Structural design of acoustic metamaterials[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2021, 27(2): 67-76. (in Chinese)
- [2] 燕翔, 辛鲁超, 赵晓明, 等. 《中华人民共和国噪声污染防治法》下的住宅建筑隔声降噪[J]. 中国环保产业, 2022(6): 19-22. YAN Xiang, XIN Luchao, ZHAO Xiaoming, et al. Sound insulation and noise reduction of residential buildings under the noise pollution prevention and control law [J]. Noise Pollution Prevention and Control Law, 2022(6): 19-22. (in Chinese)
- [3] 吴九汇, 马富银, 张思文, 等. 声学超材料在低频减振降噪中的应用评述[J]. 机械工程学报, 2016, 52(13): 68-78. WU Jiuhui, MA Fuyin, ZHANG Siwen, et al. Application of acoustic metamaterials in low-frequency vibration and noise reduction [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(13): 68-78. (in Chinese)
- [4] 王亚琴, 徐晓美, 林萍. 薄膜型声学超材料的结构设计及隔声特性[J]. 应用声学, 2022, 12(2): 1-12. WANG Yaqin, XU Xiaomei, LIN Ping. Structural design and sound insulation characteristics of the membrane-type acoustic metamaterials [J]. Journal of Applied Acoustics, 2022, 12(2): 1-12. (in Chinese)
- [5] 张若军. 典型声学超材料的低频隔声特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- [6] HAN J N, GUI Z G, WEN T D, et al. Direct and real-time sub-wavelength resolution photoacoustic imaging method based on acoustic lens with negative refractive index[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2016, 7(4): 388-397.
- [7] 徐亚运. 基于薄膜型声学超材料的低频降噪技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [8] 李莹, 欧阳家欣, 孙亮, 等. 由声学超材料制备的音乐录音箱[C]//中国声学学会. 中国声学学会2017年全国声学学术会议论文集.《声学技术》编辑部, 2017: 113-114.
- [9] 唐帅, 温廷敦, 韩建宁. 三角阵列超材料的声传播特性[J]. 河北科技大学学报, 2018, 39(5): 409-415. TANG Shuai, WEN Tingdun, HAN Jianning. Acoustic propagation properties of triangle array metamaterials[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2018, 39(5): 409-415. (in Chinese)
- [10] DRATVA J, PHULERIA H C, FORASTER M, et al. Transportation noise and blood pressure in a population-based sample of adults [J]. Environmental Health Perspectives, 2012, 120(1): 50-55.
- [11] 杨坤, 杨明月, 崔世明, 等. 大尺寸薄膜型声学超材料复合结构低频宽带隔声性能研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(22): 14-22. YANG Kun, YANG Mingyue, CUI Shiming, et al. Low-frequency and broadband sound insulation performance of large-scale composite structures based on membrane-type acoustic metamaterials[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(22): 14-22. (in Chinese)
- [12] 曹瑞. 薄膜型声学超材料隔声性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [13] HAN J N, ZHEN W X, QIN J J, et al. Acoustic multipolar local effects of metamaterial with annular columnar structures [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2017, 8(4): 307-313.
- [14] LANGFELDT F, GLEINE W, ESTORFF O V. Analytical model for low-frequency transmission loss calculation of membranes loaded with arbitrarily shaped masses[J]. Journal of Sound & Vibration, 2015, 349: 315-329.
- [15] 王宇莹, 洪羽剑, 卢钧胜, 等. 基于点源成像的微球成像分辨能力仿真分析[J]. 测试技术学报, 2023, 37(6): 468-473. WANG Yuying, HONG Yujian, LU Junsheng, et al. Simulation analysis of microsphere imaging resolution ability based on point source imaging [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2023, 37(6): 468-473. (in Chinese)