

◇ 研究报告 ◇

声学超材料对低频噪声的消声特性

陈龙虎[†]

(中北大学机械工程学院 太原 030051)

摘要: 针对低频噪声较难消除的问题, 设计了亥姆霍兹共振腔与声学超材料薄膜耦合的消声结构, 在利用有限元软件进行屈曲分析薄膜的临界状态得知声学超材料薄膜结构临界失稳力为 0.087 N·m, 利用 COMSOL 声固耦合模块研究薄膜形态对传递损失峰值频率的影响。结果表明: 薄膜扭转角度由 0° 增加到 30° 时, 薄膜总体刚度增加, 传递损失峰值对应频率向右偏移了 30 Hz, 变化并不明显。为了扩大频率偏移范围, 在扭转 30° 的基础上, 对扭矩棒施加垂直向下的压力, 压力由 0 kPa 增加到 2 kPa, 薄膜预应力增大, 系统刚度增加, 使得传递损失峰值向右偏移了 170 Hz。最后搭建实验平台, 验证了薄膜在扭转时的频率偏移与仿真基本吻合, 在不同压力时频率偏移一致, 进而可以实现较大范围的低频率噪声控制。为声学超材料的设计和控制提供有效的依据。

关键词: 低频噪声; 声学超材料; 有限元分析; 传递损失

中图分类号: O429

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2020)03-0438-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.03.017

The muffling characteristics of acoustic metamaterials to low frequency noise

CHEN Longhu

(College of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problem of low frequency noise is difficult to eliminate, the Helmholtz resonator and acoustic metamaterial silencing structure of membrane coupling is designed. The buckling analysis by using finite element software of the critical state of thin-film learned that the critical buckling force of the acoustic metamaterial structure is 0.087 N·m, and the influence of film form on the peak frequency of transmission loss is studied by using the COMSOL acoustic-solid coupling module. The results show that when the torsion angle of the thin film increases from 0° to 30°, the overall stiffness of the thin film increases, and the frequency corresponding to the peak value of transfer loss shifts to the right by 30 Hz, with no obvious change. In order to expand the frequency offset range, a vertical downward pressure is applied to the torque bar on the basis of torsion of 30°. The pressure increases from 0 kPa to 2 kPa, and the membrane prestress increases and the system stiffness increases. As a result, the peak value of transfer loss is shifted 170 Hz to the right. Finally, the experimental platform was built to verify that the frequency offset of the thin film during torsion is basically consistent with the simulation, and the frequency offset is consistent at different pressures, so as to achieve a wide range of low frequency noise control. It provides an effective basis for the design and control of acoustic metamaterials.

Keywords: Low-frequency noise; Acoustic metamaterials; Finite element analysis; Transfer loss

2019-07-04 收稿; 2019-08-20 定稿

作者简介: 陈龙虎 (1996-), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 研究方向: 噪声控制。

[†] 通信作者 E-mail: 1097559063@qq.com

0 引言

噪声对人们身体健康的影响很大,其中低频噪声最为显著,由于低频噪声的波长较长,不易衰减,抑制难度大,因此,针对低频噪声控制技术的深入研究至关重要。声学超材料具有高反射、低透射的隔声性能,在调控低频噪声方面有着明显的优势。薄膜型声学超材料具有负等效质量密度以及负的等效弹性模量^[1],可以对低频噪声进行有效的控制。Mei等^[2]提出一种由刚性框架、柔性薄膜和附加质量块组成的薄膜声学超材料结构。2010年, Lee等^[3]利用多周期排列亥姆霍兹共振器作为主流体通道之路,成功研制出“双负声学超材料”。2014年, Langfeldt等^[4]采用预浮空气的两块声学超材料堆叠排列实现对结构的振动频率和声传递损失的调节。2015年, Ma等^[5]通过改变薄膜声学超材料的柔度和质量,实现500 Hz以下低频内全部带隙以及在0~100 Hz范围内超低频弯曲带隙。

目前,一般采用改变声学超材料的结构参数来改变自身的振动频率,实现宽频带消声和针对不同频率低频噪声选择性降噪。本文从结构优化角度出发,对薄膜进行理论分析,通过仿真和实验研究褶皱型薄膜对消声性能的影响。

1 耦合结构理论分析

声波传播具有一定的频率,当声学超材料薄膜的固有频率与声波频率一致时,声波通过薄膜产生的振动与薄膜结构本身的振动相互抵消,从而削弱耦合结构周围的振动,实现消声的效果。通过理论分析薄膜的振动特性来研究它的工作频率。本文设计的消声结构为薄膜与亥姆霍兹共振腔耦合结构,这种结构可以等效为两自由度系统,如图1所示,共振腔体积为 $V_1 + V_2$,等效刚度为 k_1 ,等效质量为 m_1 ,位移是 x_1 ;薄膜等效刚度为 k_2 ,等效质量为 m_2 ,位移是 x_2 。根据无阻尼吸振器双自由度系统串联关系,得到等效系统的自由运动方程:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0. \quad (1)$$

进而得到特征方程

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} k_1 + k_2 - m_1\omega^2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - m_2\omega^2 \end{bmatrix} = 0, \\ \omega^4 - \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right) \omega^2 + \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, ω 为固有圆频率,取正值,解得:

$$\begin{cases} \omega_1 = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right) + \frac{1}{2} \times \sqrt{\left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right)^2 - \frac{4k_1 k_2}{m_1 m_2}}}, \\ \omega_2 = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right) - \frac{1}{2} \times \sqrt{\left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right)^2 - \frac{4k_1 k_2}{m_1 m_2}}}. \end{cases} \quad (3)$$

将薄膜与共振腔的等效强度与等效质量代入式(3)中,即可求得亥姆霍兹共振腔和声学超材料消声频率分别为

$$\begin{cases} f_1 = w_1/(2\pi), \\ f_2 = w_2/(2\pi). \end{cases} \quad (4)$$

根据式(2)还可以得到

$$\begin{cases} \omega_1^2 + \omega_2^2 = \frac{0.5(k_1 + k_2)}{m_1} + \frac{0.5k_2}{m_2}, \\ \omega_1 \omega_2 = \sqrt{\frac{k_1 k_2}{m_1 m_2}}. \end{cases} \quad (5)$$

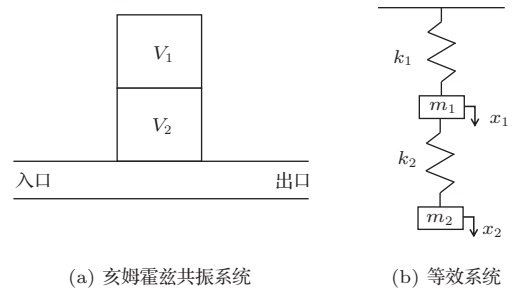


图1 亥姆霍兹共振串联系统等效示意图

Fig. 1 The equivalence diagram of Helmholtz resonance series system

其中, w_1 和 w_2 非负, 假设霍兹共振腔的刚度 k_1 与质量 m_1 不变, 薄膜的质量 m_2 不变, 增加薄膜刚度值 k_2 , 则对应的共振频率 w_2 也随之增加。在此理论分析结果的基础上, 通过改变超材料薄膜的形态, 来改变薄膜刚度, 进行实现噪声频率可调谐。

2 褶皱型薄膜声学性能研究

2.1 声学超材料薄膜结构参数

由于声学超材料薄膜的刚度很小, 在受到外力作用时, 很容易出现局部褶皱而失去稳定性, 因此需要对薄膜进行屈曲分析。基于欧拉杆原理的失稳准则: 当结构承受轴向压缩载荷作用时, 若压缩载荷超过临界值, 结构的应力刚化产生的应力刚度矩阵就会抵消结构本身的刚度矩阵, 平衡状态变为不稳定, 即任意干扰产生的挠曲在扰动除去后不仅不消失, 而且还将继续扩大, 结构无法恢复到原有的平衡状态。为了保证薄膜声学超材料在稳态状态下进行实验, 对褶皱型薄膜进行数值分析, 研究薄膜在特定载荷下的稳定性。本文选择硅胶材料薄膜作为研究对象, 为了得到预期的薄膜褶皱形态, 采用直径为 40 mm 的铜片与超材料薄膜同轴心紧密粘接, 扭矩棒与铜片胶连接, 扭转扭矩棒从而带动薄膜转动 10° 、 20° 和 30° 。因为铜片和薄膜内圆完全连接, 因此可等效为圆环模型, 其材料参数和尺寸如表 1 所示。

表 1 声学超材料参数及尺寸

Table 1 Parameters and dimensions of acoustic metamaterial

材料	硅胶
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	980
弹性模量/Pa	6.4×10^7
泊松比	0.49
厚度/mm	0.2
薄膜半径/mm	50
铜片半径/mm	20

2.2 超材料薄膜屈曲分析

在 ANSYS Workbench 软件中根据模型尺寸建立圆环薄膜有限元模型, 在薄膜结构中心创

建节点(remote point), 建立其与圆环薄膜内边缘的刚性约束, 使其仅有绕 z 方向旋转的自由度, 对模型进行网格自动划分, 对节点施加 $0.2\text{ N}\cdot\text{m}$ 扭转载荷, 然后对圆环薄膜的外边缘进行固定约束, 开始计算。得到如图 2 所示的前六阶屈曲模态。

第一阶和第二阶屈曲模态表现为反对称“月牙形”褶皱, 由圆环内边缘向外边缘扩展, 二者褶皱振幅几乎一致, 特征值屈曲载荷也十分接近, 不同之处在于二者褶皱出现的角度近似是正交的。第三阶和第四阶屈曲模态表现为对称“花瓣形”褶皱, 由圆环内边缘向外边缘扩展, 特征值屈曲载荷相差不大。第五阶和第六阶的褶皱形态与前几阶一致, 总是正负相间的成对出现, 呈现中心对称或者是反对称形态。褶皱数量一致的相邻两阶屈曲模态载荷因子和振幅相近, 只存在角度变化。

根据仿真计算得到相应失稳模态, 根据第一阶模态中的 Load Multiplier 值可以得到薄膜屈曲载荷因子为 0.4332, 而屈曲载荷等于载荷因子与所施加的载荷大小的乘积^[6], 从而得到临界失稳力为 $0.087\text{ N}\cdot\text{m}$ 。利用扭矩扳手测量薄膜扭转角度在 30° (扭矩最大) 时的扭矩为 $0.07\text{ N}\cdot\text{m}$, 小于薄膜的临界失稳力, 因此可以保证薄膜在不失稳状态下进行仿真与实验。

2.3 仿真分析

为了验证褶皱型薄膜声学超材料扭曲角度对传递损失的影响, 利用 COMSOL 软件建立仿真模型, 对模型进行网格划分, 如图 3 所示。上腔和下腔的半径为 50 mm, 高度为 75 mm, 下腔与管道间通过 6 个圆柱形颈部管连接, 颈部半径为 4 mm, 高度为 6 mm, 弹性薄膜半径为 50 mm, 厚度为 0.2 mm。管道尺寸为 $300\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 。

对薄膜边缘进行固定约束, 施加预应力分别使薄膜扭曲 0° 、 10° 、 20° 和 30° , 管道左端为入口, 声速为 340 m/s, 右端压力出口为 0, 计算步长为 10, 得到传递损失曲线, 如图 4 所示。图 4 中第一峰值对应频率为亥姆霍兹腔的共振频率, 第二峰值对应频率为薄膜的共振频率。随着扭曲角度的增加, 第一峰值基本不变, 第二峰值从 520 Hz 偏移到 550 Hz。

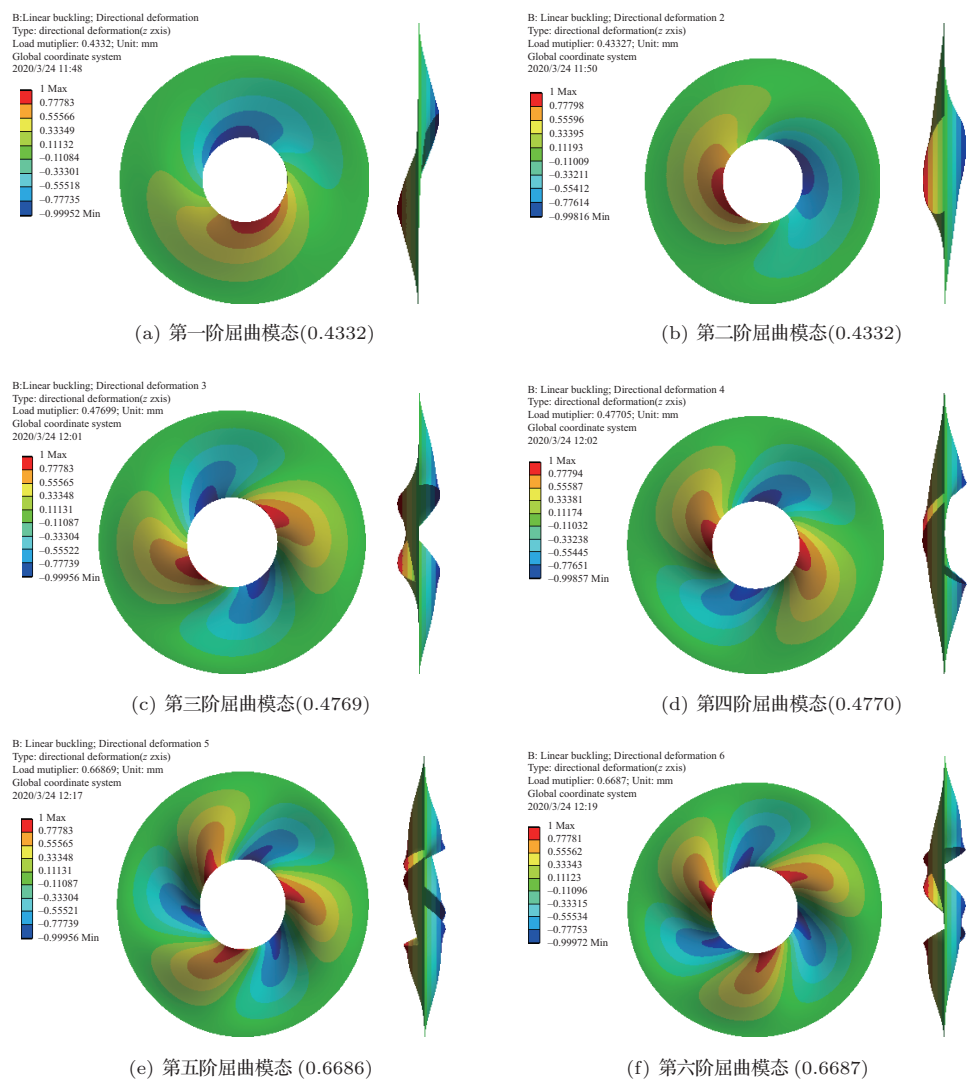


图 2 屈曲模式云图

Fig. 2 Nephogram of buckling mode

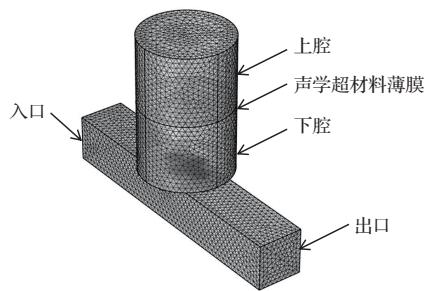


图 3 模型网格划分图

Fig. 3 Diagram of model mesh

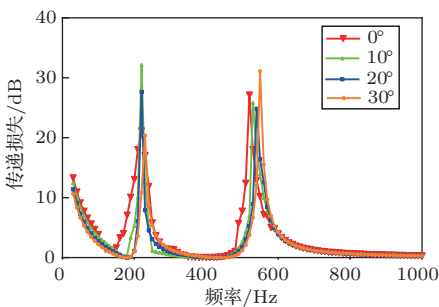


图 4 传递损失曲线

Fig. 4 The curve of transfer loss

2.4 声学超材料消声性能测试

2.4.1 实验原理分析

传递损失是评价隔声性能的重要标准之一，其峰值越大，说明结构的消声效果越好。本实验采用四传感器法测量传递损失，测量原理如图5所示。

首先通过音频软件发出声波信号，使用功率放大器将微弱的声波信号放大，经过扬声器发出平面声波 A 进入声源管。4 个传声器结合 LabVIEW 软件进行时域信号采集，最后利用 MATLAB 软件处理采集的信号，得到传递损失曲线图。

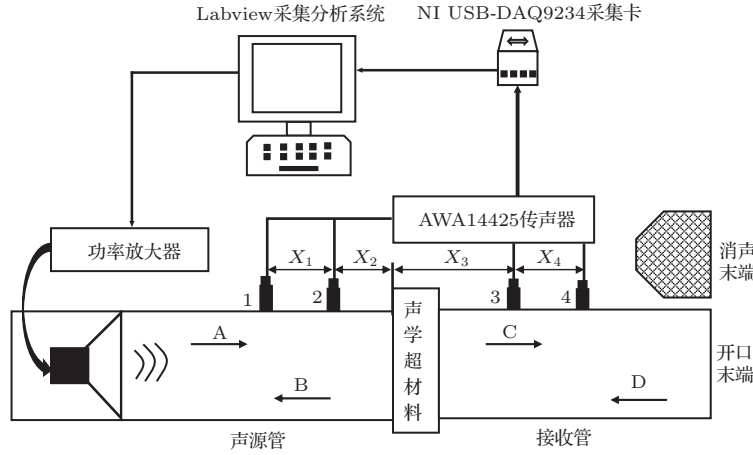


图5 四传感器法测试传递损失示意图

Fig. 5 The diagram of four sensors testing transfer loss

声波A传递至声学超材料后分成3个部分,第一部分被声学超材料吸收,第二部分声波B被声学超材料反射回来,第三部分C透过声学超材料进入接收管,声波反射回来形成反射波D。通过4个传感器测得声压值分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 ,得到

$$\begin{cases} P_1 = A e^{jk(X_1+X_2)} + B e^{-jk(X_1+X_2)}, \\ P_2 = A e^{jkX_2} + B e^{-jkX_2}, \\ P_3 = C e^{-jk(X_3-d)} + D e^{jk(X_3-d)}, \\ P_4 = C e^{-jk(X_3-d+X_4)} + D e^{jk(X_3-d+X_4)}, \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, A 表示入射声压, B 表示声学超材料反射声压, C 表示透射声压, D 表示末端反射声压, d 表示声学超材料的厚度。从而由式(6)得到

$$\begin{cases} A = \frac{1}{2j} \frac{P_1 e^{-jkX_2} - P_2 e^{-jk(X_1+X_2)}}{\sin(kX_1)}, \\ B = \frac{1}{2j} \frac{P_2 e^{-jk(X_1+X_2)} - P_1 e^{jkX_2}}{\sin(kX_1)}, \\ C = \frac{1}{2j} \frac{P_4 e^{jk(X_3-d)} - P_3 e^{jk(X_3-d+X_4)}}{-\sin(kX_4)}, \\ D = \frac{1}{2j} \frac{P_3 e^{-jk(X_3-d+X_4)} - P_4 e^{-jk(X_3-d)}}{-\sin(kX_4)}. \end{cases} \quad (7)$$

透射系数为

$$t_p = \frac{\sin(kX_1)}{\sin(kX_3)} \frac{P_3 e^{jkX_4} - P_4}{P_1 - P_2 e^{-jkX_1}} e^{jk(X_2+X_3-d)}. \quad (8)$$

透射系数的倒数为传递损失:

$$TL = -20 \lg |t_p|. \quad (9)$$

2.4.2 实验平台搭建

本文选择声学超材料薄膜与亥姆霍兹腔耦合建立如图6所示的实验装置。该套测试系统主要由功率放大器、扬声器、阻抗管、AWA14425传声器、NI USB-DAQ9234四通道IEPE数据采集卡和声学超材料等组成。4个传感器的距离一定,测量出其声压值即可计算出结构的传递损失。四传感器测量法提高了低频范围内消声结构的测试精度,更加精准地测定声波经过消声结构时的传递损失[7]。

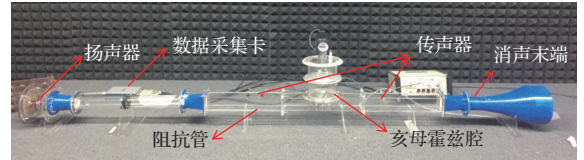


图6 传递损失测试装置及仪器

Fig. 6 The equipment and instruments for testing transfer loss

2.4.3 薄膜扭转角度对传递损失的影响

为了研究褶皱型薄膜扭曲角度对传递损失的影响,设计如图7所示双亥姆霍兹共振腔结构。采用直径为50 mm的铜片与超材料薄膜同轴心紧密粘接,扭矩棒与铜片胶接,扭转扭矩棒从而带动薄膜扭曲。

将扭矩棒分别转动 10° 、 20° 和 30° 得到如图8所示的传递损失曲线。由图8中可以看出:随着薄膜扭转角度的增加,第一峰值基本不变,第二峰值由510 Hz 偏移到540 Hz。系统的传递损失曲线频率整体向低频偏移。因为随着扭转角度增大,薄膜

总体刚度减小,薄膜的特征频率降低,使得传递损失峰值对应的频率偏移30 Hz。实验结果与仿真结果基本一致,从而验证了仿真结果的正确性。

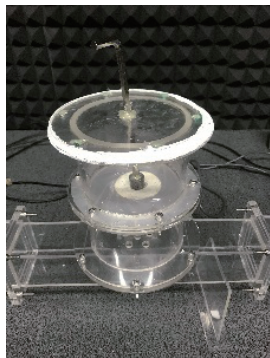


图7 褶皱型声学超材料结构

Fig. 7 Folded acoustic metamaterials

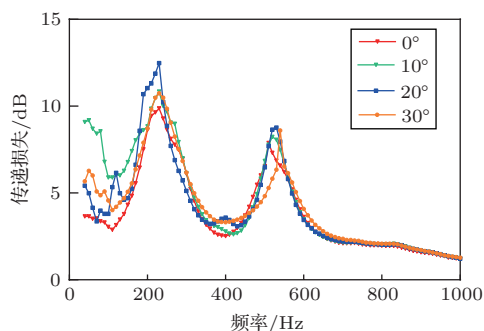


图8 扭转角度与传递损失关系

Fig. 8 The relationship of torsion angle and transfer loss

3 对扭矩棒施加压力的大小对传递损失的影响

由上述研究可知薄膜扭曲对传递损失的影响并不大,只偏移了30 Hz,因此为了进一步扩大消声性能,通过对扭矩棒施加压力的方式来降低薄膜的刚度从而实现频率的大范围偏移。首先利用COMSOL软件对薄膜声学超材料消声性能进行仿真,然后进行实验,与仿真进行对比得到施加压力后的声学超材料消声能力。

3.1 薄膜消声性能仿真分析

为了验证施加压力后的声学超材料对传递损失的影响,利用图4所示的声学超材料共振网格模型,不同的是对扭矩棒施加了垂直向下的压力,压力

由0 kPa增加到2 kPa。得到如图9所示的传递损失曲线:压力由0 kPa增加到2 kPa时,传递损失曲线第一阶频率比较集中,第二阶频率由540 Hz偏移到了720 Hz,共偏移了180 Hz。

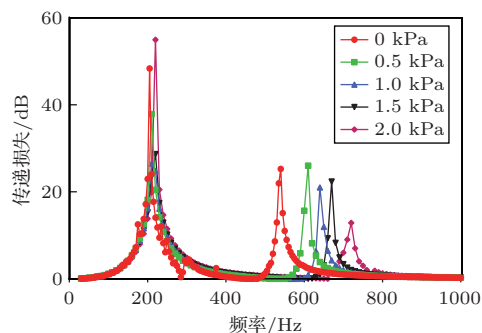


图9 压力大小与传递损失的影响(仿真)

Fig. 9 The effect of pressure and transfer loss (simulation)

3.2 薄膜消声性能实验

在图6所示实验装置的基础上,对扭矩棒施加的压力由0 kPa增加到2 kPa,得到如图10所示的传递损失曲线。传递损失第一阶频率基本不变,第二阶频率由550 Hz偏移到了720 Hz。因为随着压力增大,薄膜向下凹陷越大,薄膜预应力增大,系统刚度增加,使得传递损失峰值对应的频率向高频偏移170 Hz。实验结果与仿真结果基本吻合。

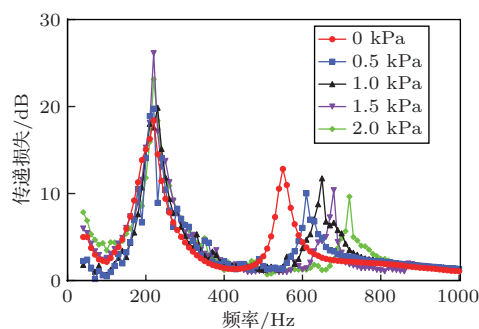


图10 压力大小对传递损失的影响(实验)

Fig. 10 The effect of pressure on transmission loss (experiment)

4 结论

本文首先对薄膜结构的振动特性进行理论分析和有限元分析,接着通过仿真与实验研究声学超材料的消声性能。得到如下结论:

(1) 声学超材料具有良好的低频消声性能, 设计了亥姆霍兹共振腔与薄膜耦合的声学超材料消声结构, 其传递损失曲线会产生两个峰值, 峰值对应的频率即是消声工作频率。

(2) 利用 ANSYS 屈曲分析得到声学超材料的屈曲载荷因子为 0.4332, 临界失稳力为 0.087 N·m。之后通过 COMSOL 仿真与实验验证可知, 薄膜扭曲角度增加使第二峰值对应频率向低频偏移, 扭曲角度增加到 30° 时, 频率共偏移了 30 Hz。

(3) 为了更大范围地控制频率偏移, 对扭矩棒施加了垂直向下的压力, 压力由 0 kPa 增加到 2 kPa 时, 第二峰值对应频率向高频偏移 170 Hz。进而实现了 540~720 Hz 范围内低频噪声选择性降噪。

(4) 不论是对薄膜施加扭力还是对薄膜施加向下的压力, 都改变了薄膜的刚度, 随着扭力和向下压力的增大, 薄膜的刚度也随之增加, 传递损失曲线第二峰值对应的频率增大, 从而验证了对耦合结构理论分析的正确性。在此基础上可以通过改变薄膜的刚度来调节消声频率的范围。

参考文献

- [1] 周榕, 吴卫国, 闻轶凡. 一种带薄膜结构的 Helmholtz 腔声学超材料[J]. 声学技术, 2017, 36(4): 297-302.
Zhou Rong, Wu Weiguo, Wen Yifan. A kind of Helmholtz cavity acoustic metamaterials with thin film structure[J]. Technical Acoustics, 2017, 36(4): 297-302.
- [2] Mei J, Ma G, Yang M, et al. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound[J]. Nature Communications, 2012, 3: 756.
- [3] 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.
- [4] Langfeldt F, Riecken J, Gleine W, et al. A membrane-type acoustic metamaterial with adjustable acoustic properties[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 373: 1-18.
- [5] Ma F, Wu J, Huang M, et al. A purely flexible lightweight membrane-type acoustic metamaterial[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48(17): 175105.
- [6] 张锦莱. 薄膜结构的屈曲与振动特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [7] 姬艳露, 吕海峰, 刘继宾. 表面张力对薄膜型声学超材料隔声性能的影响[J]. 功能材料, 2019, 50(1): 1120-1125.
Ji Yanlu, Lyu Haifeng, Liu Jibin. Effect of surface tension on sound insulation performance of thin film metamaterials[J]. Functional Materials, 2019, 50(1): 1120-1125.