

文章编号:1006-1355(2023)02-0272-06

用于变频噪声吸收的压电声学超材料

刘仕韬, 胡晓磊, 谷立敏, 黄震宇

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院仪器系, 上海 200240)

摘要:提出基于压电声学超材料的吸声单元结构和电路,通过调节压电并联负阻抗电路实现吸声频率移动。吸声结构由质量块、压电层合板和刚性背板组成,压电并联电路包含负电容和负电阻电路。通过建立包含吸声结构声阻抗和电路阻抗的吸声系数分析模型,获得吸声频率与负电容的关系函数,并通过模型的稳定性分析确定吸声频率可调范围。单元样件的数值仿真和声管实验表明,负电容电路可将样件单元的吸声频率从1 130 Hz移动到910 Hz,负电阻电路可以补偿吸声系数到0.9以上。仿真与实验结果在可调频率范围内基本一致。

关键词:声学;声学超材料;噪声吸收;压电材料;负电容电路

中图分类号:O42

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2023.02.042

Piezoelectric Acoustic Metamaterials for the Absorption of Frequency-tunable Noises

LIU Shitao, HU Xiaolei, GU Limin, HUANG Zhenyu

(Department of Instrument Science and Engineering, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract : A sound-absorbing unit based on the piezoelectric acoustic metamaterial is proposed, which can realize the tuning of the sound-absorbing frequencies in a narrow frequency band through the adjustment of the piezoelectric shunt negative impedance circuit. The structure of the piezoelectric metamaterial consists of a mass block, a piece of thin substrate plate laminated with a piezoelectric plate, and a backing plate. And the shunt circuit of the piezoelectric plate includes a negative capacitance circuit and a negative resistance circuit. The model of the absorption structure consisting of acoustic impedance and electric impedance is established for analyzing the absorption coefficient, and the relation function between the acoustic absorption frequency and the negative capacitance is obtained. Based on the stability analysis of the model, the tunable range of the absorption unit is determined. Simulation and experiments of a sample unit verify the frequency tunable characteristics and the sound absorption compensation. Simulation and experiment results show that the negative capacitance circuit can shift the central absorption frequency of the unit from 1 130 Hz to 910 Hz, and the sound absorption coefficient can be compensated to over 0.9 by adjusting the negative resistance circuit. The simulation and experimental results are basically consistent each other in the tunable frequency range.

Key words : acoustics; acoustic metamaterials, sound absorption, piezoelectric material, negative capacitance circuit

发动机和马达等旋转动力设备,会产生低至百赫兹的窄带高峰值噪声^[1]。随着转速或工作负载的变化,旋转设备的噪声峰值频率也随之变化^[2],这就要求吸声材料和结构的吸声频率可以调节。

传统的吸声材料和结构,如多孔材料^[3]、纤维材料^[4]和亥姆霍兹谐振器^[5],需要几十厘米的尺寸才能

完美吸收百赫兹的噪声。例如,微孔板很容易吸收中高频吸声,但很难吸收低频噪声。另外,通过机械结构改变穿孔率调整吸声频率也很不方便^[6-7]。最近提出的迷宫声学超材料^[8-9],仅需几厘米的尺寸就能吸收宽带低频噪声,但是结构复杂、重量较重。

带有背板的薄膜声学超材料可以用轻薄结构吸收窄带低频噪声^[10-11]。通过将压电片层压在薄膜或薄板上,薄膜型声学超材料的声学特性变得可调^[12-14]。通常采用负电容电路并联在压电片两端,称为压电分流电路,用于调节压电片的动态刚度。在各种有源声学系统的相关研究中探索了压电片的动态刚度与并联负电容电路之间的关系^[15-18]。

收稿日期:2022-01-10

作者简介:刘仕韬(1997-),男,福建省三明市人,硕士研究生,专业方向为声学振动分析。

通信作者:黄震宇,男,副教授,专业方向为工程声学及振动。

E-mail: bighuang@sjtu.edu.cn

此外,基于压电材料声学应用的声电耦合模型,可利用等效电气网络,统一描述声学结构、压电材料和分流电路^[19-20],便于分析声能和各参数间关系^[21-22]。

本文基于压电声学超材料,提出一种工作频率可调的吸声单元。建立吸声单元的声电耦合模型,分析吸声频率与负电容关系,通过仿真和实验验证吸声单元的可调吸声效果。

1 全吸收条件

1.1 带背板的压电声学超材料

带背板的压电声学超材料 (Piezoelectric Metamaterial with a Backing Plate, PMBP) 由压电层合板,空腔和刚性背板构成。其中,压电层合板由基板与压电片层叠组成。PMBP单元如图1所示,基板与刚性背板的外侧边缘为固定约束,两根导线将分流电路连接到压电片的电极。

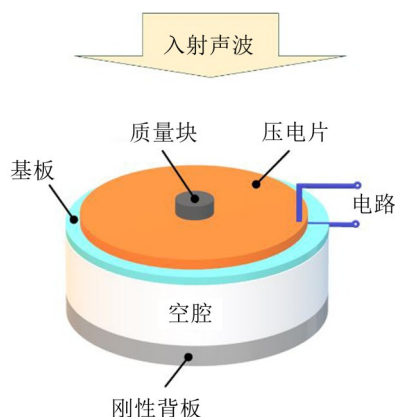


图1 带背板的PMBP

在低频下,PMBP的振动在面内为同相位,吸声频率由压电层合板的动态刚度和动态质量决定。其中,通过分流电路可以调节压电片的动态刚度,进而调节整个层合板的刚度来实现调节。动态质量可由附着在压电层合板上的质量块进行调节。

1.2 PMBP完全吸收条件

为了使PMBP充分吸收入射声波,空气与PMBP的交界面需满足零反射条件,刚性背板与空气的交界面需满足零透射条件,实现对声能完全吸收。

将空气、压电层合板、空腔和刚性背板的声阻抗分别表示为 Z_0 、 Z_1 、 Z_a 、 Z_2 ^[23],完全吸收的条件可以用阻抗表示为:

$$\begin{cases} Z_1 + Z_a = Z_0 \\ Z_2 \rightarrow \infty \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知:PMBP入声面的等效声阻抗为 Z_1 和 Z_a 之和,应等于空气的声阻抗 Z_0 ,此时所有声波都不发

生反射,完全进入超材料内部空腔。若空腔中没有吸声材料,声波将抵达背板。由于背板的声阻抗 Z_2 足够大,声波无法通过背板传播,声能将在空腔中聚集,最终被结构阻尼、腔体和电路电阻有效吸收。这种现象在文献[10]中有所指出,并在文献[23-24]中进行了详细研究。

2 PMBP的等效电路模型

由于PMBP涉及声学超材料、压电材料和电路,因此可利用集总等效电路模型分析PMBP的参数。PMBP工作在低频段时,其动态特性由1阶模态主导,但受较高价相邻模态影响。为了分析吸声频率与系统参数的关系,理论模型只包含1阶模态信息,将模态参数转换为1阶RLC电路进行分析。如图2所示^[19-20],等效电路模型的左右部分分别代表声学域和电学域,两个物理场之间基于压电耦合效应建立关系,在模型中用变压器表示。

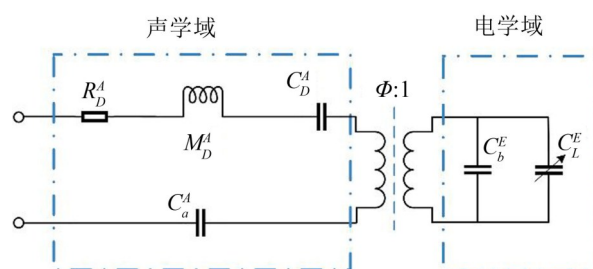


图2 PMBP的等效电路模型

图中 R_D^A 为等效阻尼, M_D^A 为模态质量, C_b^E 为模态刚度, C_a^A 为空腔等效刚度, C_b^E 为压电片等效电容, C_L^E 为可变电容。 Φ 为变压系数,与压电材料的机电耦合系数有关。

根据式,完全吸收条件是声电耦合模型的输入阻抗等于空气阻抗,空气阻抗为纯实数,因此并联电路阻抗的虚部应为零,即:

$$Z' = j\omega M_D^A + \frac{1}{j\omega} \left(\frac{1}{C_b^E} + \frac{1}{C_a^A} + \frac{\Phi^2}{C_b^E + C_L^E} \right) \quad (2)$$

其中: j 为虚数符号, ω 为角频率。用函数 $F(f)$ 表示并联电容与全吸收频率 f 之间的关系,当吸声频率为 f 时,全吸声的电容为:

$$C_L^E = F(f) = \frac{\Phi^2 C^A}{4\pi^2 C^A M_D^A f^2 - 1} - C_b^E \quad (3)$$

其中:

$$C^A = \frac{C_b^A C_a^A}{C_b^A + C_a^A} \quad (4)$$

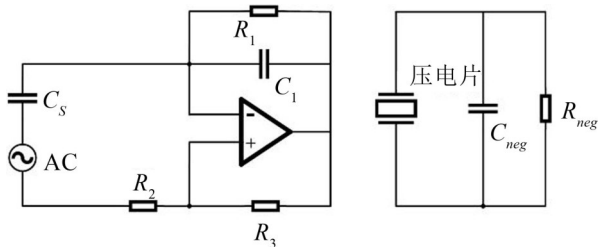
式(3)表明选择合适的电容能够实现完全吸收。由于这个等式可能为正也可能为负,因此我们需要引入负电容。

3 负电容电路设计

负电容电路可用来调整压电片的动态刚度,根据压电片在电路作用下动态刚度的减小和增加,可将负电容电路分为软电路和硬电路^[16-17]。在负电容电路的作用下,PMBP的吸声频率可移动到开路和短路条件限制的频率范围之外。低频吸声比高频吸声更难实现,采用软电路能够将PMBP的吸声频率移到低频。软电路可以通过图3所示的电路实现^[25]。电路的等效电容 C_{ncc} 为:

$$C_{ncc} = -\frac{R_3}{R_2} \left(C_0 + \frac{1}{j\omega R_1} \right) \quad (5)$$

软负电容电路相当于一个负纯电容 C_{neg} 和一个负纯电阻 R_{neg} 并联,其中负电容可以调节频率,负电阻可以调节吸声系数^[18]。调整 R_3 和 R_2 的比值,可以改变负电容的大小。

(a) 负电容软电路^[25]

(b) 等效电路

图3 负电容电路拓扑结构及PMBP等效电路

负电容电路的稳定性与压电片有关,压电片可以等效为一个交流电流源AC和电容器 C_s 的串联。对于软电路,如果忽略电阻部分,则电路的稳定性条件为^[17]:

$$\left| C_{neg} / C_b^E \right| > 1 \quad (6)$$

这意味着负电容 C_{neg} 的绝对值必须大于 C_b^E ,即零应力条件下的压电片的等效内电容,以此保持电路稳定。

4 PMBP吸声性能仿真

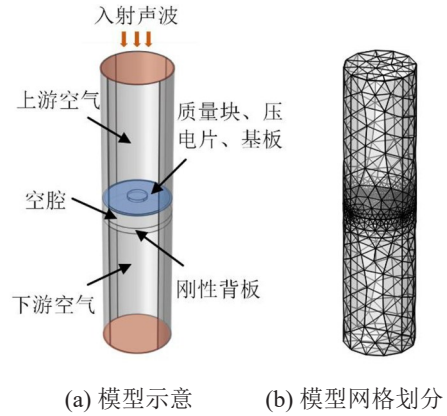
在COMSOL5.6中建立PMBP有限元模型,如图4(a)所示,PMBP有限元模型的几何和材料参数如图5、表1和表2所示,这些参数与PMBP实际样品相同。仿真最大研究频率为1 500 Hz,计算的声波波长为0.228 7 m,模型中最大网格单元小于波长的1/6,设置为0.03 m满足条件,如图4(b)所示。

表1 PMBP的几何参数

	半径/mm	厚度/mm
基板	$r_s = 13.5$	$h_s = 0.254$
压电片	$r_p = 12.5$	$h_p = 0.2$
质量块	$r_m = 4.94$	$h_m = 2.016$
空腔	$r_s = 13.5$	$L = 10$

表2 PMBP的材料参数

	材料	杨氏模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比/1
基板	PC	2.5	1 200	0.37
压电片	PZT-52	56	7 600	0.36
质量块	不锈钢	200	7 850	0.30



(a) 模型示意 (b) 模型网格划分

图4 PMBP的有限元建模

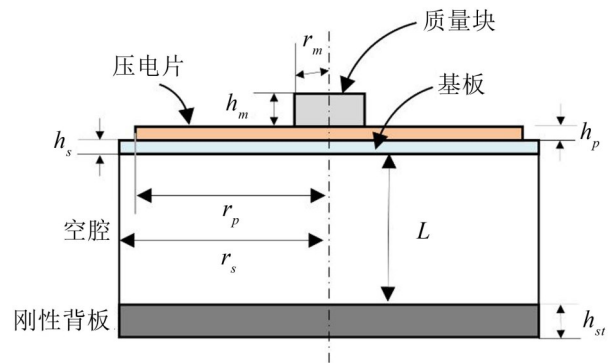


图5 PMBP模型的几何形状

有限元模型由三种物理场耦合,分别是压力声学、固体力学和电学。压力声学中声管两端设置为平面波辐射,所有的散射波以平面波的形式从声管的两端向外辐射,其他部分为硬声场边界。固体力学场中,基板和刚性背板的外围边界由固定约束连接在声管壁上,质量块与压电片之间直接贴合。电学场中,压电片的下表面接地,上表面与外接电路相连。

设置入射声压的幅度为1 Pa,吸收声能与入射声能的比值定义为吸声系数。在开路条件下,不受电路影响,入射声能在基板振动中被损耗。在仿真中,假设基板的阻尼损耗系数为零,则PMBP的吸声系数也为零。如果板中存在少量阻尼,则在满足式(3)中全吸声条件的频率处的吸声系数大大增加。图6展示了基板的机械阻尼变化时,PMBP吸声系数的变化趋势。随着阻尼损耗因子的增加,吸声频谱的峰值频率保持不变,而吸声系数的峰值减小,吸声带宽变大。由于阻尼在样品的制造过程中是不可避免的,且难以保证达到最优,因此PMBP的吸收系数

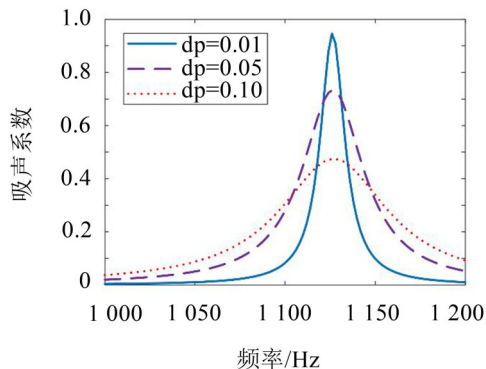


图6 开路条件下基板结构阻尼吸声系数曲线比较

在没有电路作用的情况下很难达到完全吸收。

在仿真中设置合适的阻尼损耗因子0.05,这与实验中样本单元的等效阻尼相似。在没有并联负电路的情况下,开路(oc)和短路(sc)的吸声系数在图7中进行了比较。当PMBP处于开路状态时,其吸声频率为1126 Hz,当PMBP被短路,其吸声频率向低频移动到1116 Hz,频移较小,仅有10 Hz。开路和短路状态下的吸声系数峰值分别为0.73和0.75,未满足全吸声条件。

为了增大吸声频率的变化,采用负电容电路作为分流电路。如图7所示,通过适当调节分流电路的等效负电容值,可使得PMBP的峰值频率明显降低,同时峰值吸声系数逐渐降低。

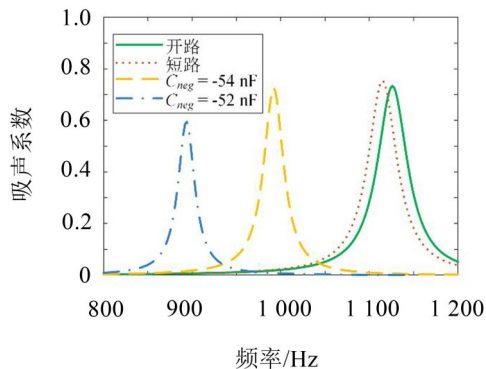


图7 仿真中不同负电容的吸声系数曲线对比

峰值吸收系数的降低是由PMBP入声面声阻抗的实部阻抗失配引起的。PMBP入声面的声阻抗实部由基板的阻尼决定,当其与空气阻抗不匹配时,可以通过分流电路的负电阻产生负电致阻尼进行补偿。图8展示了-54 nF的负电容电路在电阻补偿前后的吸声系数,通过引入-1 MΩ的负电阻,可将最大吸收系数从0.7提升到0.9,接近全吸收。

将表3中的参数代入式(3),可以评估负电容的稳定极限,即 $C_{neg} < -49.49$ nF。由于负电容和压电片的动态刚度呈双曲线关系,因此越接近稳定条件极限,吸声频率的可调控范围变大,如表4所示。根据理论分析,增大PMBP单元尺寸能够降低吸声频率,

表3 等效电路模型中的电气参数

C_b^A/pF	C_{air}/pF	M_b^A/H	C_b^E/nF	Φ	$d_A/(\text{mm}^3 \cdot \text{V}^{-1})$
2.26	0.46	8 949.3	49.3	22.3	0.05

表4 仿真与理论吸声频率对比

负电容/nF	-54	-52
理论吸声/Hz	1 006	889
仿真吸声/Hz	992	894

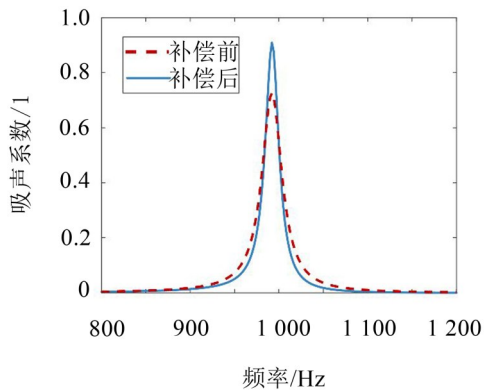


图8 负电容的吸收系数补偿

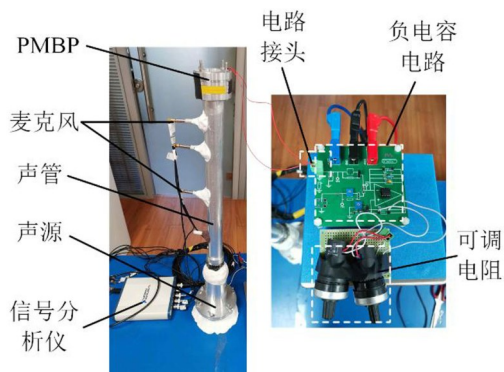
在仿真中调整基板、压电片和质量块直径分别为60 mm、52 mm和20 mm时,其吸声频率能够达到500 Hz以下,实现低频吸声。

5 实验验证和结果分析

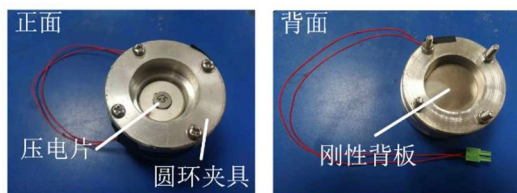
PMBP的实验是在声阻抗管中进行的,试验平台如图9(a)所示。扬声器安装在管的底部,PMBP样品固定在管的顶部。沿管放置两个相距15 cm的麦克风,用于测量管内声压。信号分析仪NI-USB-4431用于驱动扬声器产生宽带白噪声,同时记录麦克风采集的声音信息,通过上位机,基于采集到的声音信号计算出射声压和反射声压的大小。由于背板为刚性背板,因此近似认为透射声压为0,故吸声系数是通过反射声压和入射声压的比值来计算的。

PMBP样品和具有可调负电容的分流电路如图9(b)所示。PMBP的基板和刚性背板被一个铝制圆环夹具固定,有效声作用区域为圆形,通过夹具,PMBP可被安装在声阻抗管的顶部进行测量。实验中质量块与压电片之间用胶水联结。PMBP样品的参数与仿真相同,列于表1和表2中。

实验中电路状态包括开路、短路和-52 nF和-54 nF的等效负电容,其对应的吸收系数曲线如图10所示。表5对比分析了实验与仿真中,不同电路状态下PMBP的吸声频谱峰值频率,可见实验和仿真具有高度的一致性,误差不超过2%。实验中PMBP在电路控制下的吸声峰值频率移动范围从开路的1 130 Hz到-52 nF的910 Hz,超过200 Hz,调节的极



(a) 吸声曲线实验装置



(b) 实验样品与并联电路

图9 实验装置和样品

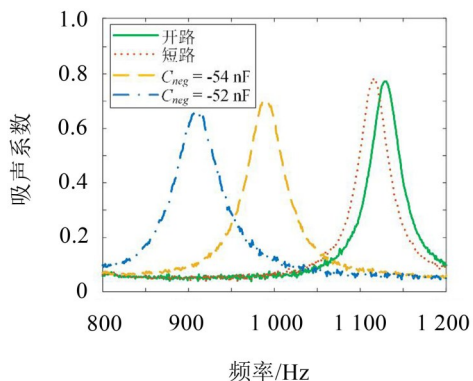


图10 实验中不同负电容的吸声系数曲线对比

表5 不同负电容的实验与仿真吸声频率的比较

吸声频率/Hz	开路	短路	-54 nF	-52 nF
实验	1 130	1 116	989	910
仿真	1 126	1 116	992	894

限范围受到负电容电路稳定性的限制。

从表4和表5看出,仿真和实验差别较小,而理论与实验有较大差别,这与理论模型只包含一阶模态信息的情况一致。根据误差相对值,理论与实验的吸声频率相对误差不超2%,表明简化的理论模型可以较为准确地反映吸声频率大小和变化趋势。仿真与实验的误差主要由材料误差引入,包括压电材料的电学参数和材料几何此次的加工误差。

开路和短路的吸声峰值约为0.8,当通过调整负电容将吸声频率调至较低频率时,吸声系数的峰值逐渐减小,例如-52 nF时降为0.65。该现象是由阻抗实部失配引起,这与仿真结果(见图7)一致。

从图11可以看出,通过调整负电容电路的电阻

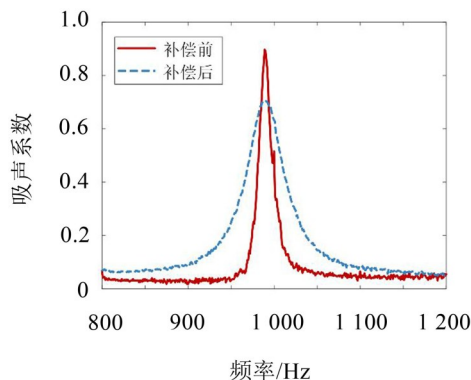


图11 负电容吸声系数补偿前后吸声系数曲线对比

部分,PMBP样品的吸声系数被补偿到接近完全吸收。以-54 nF为例,通过增加-100 kΩ的电阻,吸声系数峰值从0.7上升到0.9以上。表明PMBP的吸声频率可由外部电路调整,同时吸声系数保持在较高水平。

根据PMBP样品的几何参数,包括气腔深度在内的样品厚度仅为10 mm,且PMBP板的重量为1 g,刚性背板的重量为5 g,通常可由隔音罩代替。可见,PMBP吸声单元可安装在极薄的空间内实现较低频吸声,还能通过调节电路参数改变吸声频率和吸声系数。

6 结语

本文提出了一种可调吸声单元(PMBP),它由一个质量块、一块压电层合板和刚性背板组成。通过连接负电容电路,可以利用负电容调节PMBP的吸声频率,以及负电阻补偿吸声系数。建立等效电路模型,推导出吸声频率与负电容之间的关系,并给出了系统的稳定性条件,得出系统稳定的可调频率范围。在有限元仿真中计算了不同负电容的吸声曲线,得到仿真和理论的吸声频率非常吻合,且补偿后基本可实现全吸收。最后,在实验中验证了PMBP的吸声频率可调特性和吸声补偿效果。与开路相比,实验中的最大频移为200 Hz,带宽超过了开路频率的20%。不同负电容下的吸声频率与仿真结果非常接近,理论、仿真和实验相互验证。因此证明了PMBP单元的吸声频率和吸声系数峰值可由分流电路的等效负电容模块和等效负电阻模块分别控制。

本研究的可调吸声单元有较高的可扩展性,为后续单元的阵列化奠定了理论和实验基础,PMBP阵列可直接附着在刚性壁板上,在极薄的空间内实现低频吸声,具有较高的工程价值。将来通过设计合理的反馈电路控制系统,可使得PMBP自动跟随噪声频率的变化调整自身吸声频率。

参考文献:

- [1] WRONA S, PAWELCZYK M, CHEER J. Acoustic radiation-based optimization of the placement of actuators for active control of noise transmitted through plates[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 147: 107009.
- [2] GRIFFIN S, WESTON A, ANDERSON J. Adaptive noise cancellation system for low frequency transmission of sound in open fan aircraft[J]. *Shock and Vibration*, 2013, 20(5): 989-1000.
- [3] 魏斌, 张冠军, 陈足君, 等. 多孔夹芯层组合方式对夹层板隔声特性影响研究[J]. *噪声与振动控制*, 2021, 41(3): 228-233.
- [4] ZHU T, CHEN S, ZHU W, et al. Sound absorption property of polyurethane foam with polyethylene fiber[J]. *Materials Science*, 2019, 25(1): 85-89.
- [5] LI J, WANG W, XIE Y, et al. A sound absorbing metasurface with coupled resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(9): 091908.
- [6] 田文昊, 吴锦武, 李威, 等. 双层串联微穿孔板吸声体吸声特性研究[J]. *噪声与振动控制*, 2019, 39(4): 32-35.
- [7] 张慧洁, 刘超, 李翔, 等. 低频吸声复合结构的研制与性能研究[J]. *噪声与振动控制*, 2021, 41(5): 236-240.
- [8] LONG H, SHAO C, LIU C, et al. Broadband near-perfect absorption of low-frequency sound by subwavelength metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2019: 6.
- [9] 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(1): 13595.
- [10] MA G, YANG M, XIAO S, et al. Acoustic metasurface with hybrid resonances[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(9): 873-878.
- [11] 邱克鹏, 秦云飞, 费晨, 等. 薄膜声学超材料降噪性能分析及设计[J]. *噪声与振动控制*, 2021, 41(2): 7-14.
- [12] AKL W, BAZ A. Active control of the dynamic density of acoustic metamaterials[J]. *Applied Acoustics*, 2021, 178: 108001.
- [13] POPA B-I, CUMMER S A. Non-reciprocal and highly nonlinear active acoustic metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 3398.
- [14] ZHANG H, XIAO Y, WEN J, et al. Ultra-thin smart acoustic metasurface for low-frequency sound insulation[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(14): 141902.
- [15] IMOTO K, NISHIURA M, YAMAMOTO K, et al. Elasticity control of piezoelectric lead zirconate titanate (PZT) materials using negative-capacitance circuits[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(9S): 7019.
- [16] MOKRÝ P, FUKADA E, YAMAMOTO K. Sound absorbing system as an application of the active elasticity control technique[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(11): 7356-7362.
- [17] DATE M, KUTANI M, SAKAI S. Electrically controlled elasticity utilizing piezoelectric coupling[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 87(2): 863-868.
- [18] SLUKA T, KODAMA H, FUKADA E, et al. Sound shielding by a piezoelectric membrane and a negative capacitor with feedback control[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2008, 55(8): 1859-1866.
- [19] PRASAD S A N, GALLAS Q, HOROWITZ S, et al. Analytical electroacoustic model of a piezoelectric composite circular plate[J]. *AIAA Journal*, 2006, 44(10): 2311-2318.
- [20] LIU F, HOROWITZ S, NISHIDA T, et al. A multiple degree of freedom electromechanical Helmholtz resonator[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, 122(1): 291-301.
- [21] MONROE N M, LANG J H. Broadband, large scale acoustic energy harvesting via synthesized electrical load: II. Electrical load[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(5): 055033.
- [22] MONROE N M, LANG J H. Broadband, large scale acoustic energy harvesting via synthesized electrical load: I. Harvester design and model[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(5): 055032.
- [23] WANG X, LUO X, ZHAO H, et al. Acoustic perfect absorption and broadband insulation achieved by double-zero metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(2): 021901.
- [24] WANG X, XU J, DING J, et al. A compact and low-frequency acoustic energy harvester using layered acoustic metamaterials[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(2): 025035.
- [25] FUKADA E, DATE M, KIMURA K, et al. Sound isolation by piezoelectric polymer films connected to negative capacitance circuits[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2004, 11(2): 328-333.