

DOI: 10.7652/xjtuxb202001009

# 多态反共振协同型薄膜声学超材料低频隔声性能

周国建<sup>1,2</sup>, 吴九汇<sup>1</sup>, 路宽<sup>3</sup>, 田秀杰<sup>2</sup>, 黄威<sup>2</sup>, 朱可达<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 无锡吉兴汽车声学部件科技有限公司  
声学研究院, 214191, 江苏无锡; 3. 中北大学机电工程学院, 030051, 太原)

**摘要:** 针对普通声学材料无法有效衰减车内低频噪声的问题,提出一种摆臂式轻质薄膜型声学超材料结构设计形式,通过在子单胞内引入多态反共振模式实现了低频隔声频带的拓宽及隔声量的提高。该超材料以柔性乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)材料作为框架,并将 4 个金属薄片和 1 个十字形 EVA 摆臂贴附在 0.2 mm 厚的聚酰亚胺(PI)薄膜表面构造成谐振部分。通过对超单胞的声传递损失(STL)、多态反共振模式和负等效参数的分析,揭示了 STL 带宽的拓宽机理;基于超单胞结构衍生设计了大尺寸的柔性隔声超材料,并将大尺寸超材料样件装配到汽车发动机机罩内进行实车降噪测试,通过“混响室-消声室”隔声实验和实车降噪测试进一步预估了超材料对低频噪声的衰减能力。研究结果表明:子单胞间的多态反共振协同模式能调制超单胞处于连续的动态平衡状态,促使低频入射与反射声波相互抵消,从而改善了隔声带宽和隔声量;所设计的超材料可使车内 1 kHz 以下的发动机噪声平均衰减达 3 dB(A),为低频宽带隔声材料的设计提供了一种新的思路,在控制低频噪声方面具有潜在的工程化应用前景。

**关键词:** 薄膜型声学超材料;低频隔声;轻质;多态反共振;实车降噪测试

**中图分类号:** TB535    **文献标志码:** A    **文章编号:** 0253-987X(2020)01-0064-11

## Low-Frequency Sound Insulation Performance of Membrane-Type Acoustic Metamaterials with Multi-State Anti-Resonance Synergy

ZHOU Guojian<sup>1,2</sup>, WU Jiuhui<sup>1</sup>, LU Kuan<sup>3</sup>, TIAN Xiujie<sup>2</sup>, HUANG Wei<sup>2</sup>, ZHU Keda<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Gissing Tech. Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214191, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** A swing-arm type lightweight and flexible acoustic metamaterial is proposed to deal with the problem of low-frequency noise in vehicles that cannot be effectively attenuated by ordinary acoustic materials. Broadening the band of sound transmission loss (STL) and improving the STL amplitude are realized by introducing multi-state anti-resonance modes into subcells. A flexible ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) material is used as the frame of the metamaterial, and four metal platelets and a cross-like EVA swing arm are applied onto the surface of polyimide (PI) membrane with a thickness of 0.2 mm to create resonant parts. The broadening mechanisms of STL bandwidth are revealed through the numerical analyses of STL, multi-state anti-resonance modes and negative effective parameters of a supercell unit. A large-scale flexible sound insulation metamaterial is designed based on the derivation of the supercell

structure, and assembled into the hood of an automobile engine. Its attenuation ability to low-frequency noise is further estimated by the “reverberation chamber-anechoic chamber” sound insulation experiment and the real vehicle noise reduction tests. Relevant research results show that the multi-state anti-resonance synergy modes between the subcells modulate the supercell into a continuous dynamic balance state, cause low-frequency incident and reflected sound waves to cancel each other out, and realize the widening of the sound insulation bandwidth and the improvement of the sound insulation capacity. The designed metamaterial makes the average noise attenuation of engine below 1 kHz up to 3 dB(A). The results of this study provide a new idea for the design of low-frequency broadband sound insulation materials, and have potential engineering application prospects in the low-frequency noise control.

**Keywords:** membrane-type acoustic metamaterials; low-frequency sound insulation; lightweight; multi-state anti-resonance; vehicle noise reduction experiment

根据隔声质量定律,传统的声学材料,例如棉毡类、橡胶类、泡沫类等,在控制中高频噪声方面有良好的降噪效果,事实也是如此,但是因为其质量和体积受制于设计空间的要求,在控制低频噪声方面却一直是个挑战性的工作<sup>[1-5]</sup>。汽车消费者投诉中约有1/3的问题与振动噪声有关,尤其是低频辐射噪声,包括由发动机透过前围钣金传递至乘客舱内的低阶燃烧噪声,由轮胎透过乘客舱地板传递的摩擦和泵气噪声,以及由排气尾管透过行李箱地板传递的排气噪声等。薄膜型声学超材料(MAM)能够以某种特殊的方式操纵和控制低频声波,这为低频降噪材料的突破提供了一个新的契机<sup>[2-4,6-9]</sup>,因此轻质柔性薄膜型低频声学超材料的应用研究具有十分重要的意义<sup>[10]</sup>。

多个谐振子以某种合理的方式分布在MAM单元中能大大丰富其杂合振动模式<sup>[11-16]</sup>。多振子之间的相互反向协同行为使整个单元的振动位移极小,称具有极小位移的振动模式为动态平衡模式<sup>[8,12,15,17-18]</sup>。协同的本意是指在某一指令下,多个个体之间发生同步协调与配合的行为,进而促使集体达成某种优越性能。这种反向对称的动态平衡振动模式会使入射声波发生强烈的反射,促使正向与反向声波相互抵消<sup>[3,16,19-20]</sup>。同时,这种平衡状态也有利于声能向弹性应变能转移。其中,对应的振动频率和振动模式分别被称为反共振频率和反共振模式<sup>[15,21-23]</sup>。与单一谐振子单元相比,多振子单元能产生更多的反共振模式,故能产生多个声传递损失(STL)峰值<sup>[2,6,9,13,15,18,24-25]</sup>。也就是说,通过谐振子的结构和材料参数的合理设计,有可能实现STL带宽和幅值的改善。然而,众多的薄膜/板型声学超材料的反共振模式通常是离散的,被其共振模式阻隔

而不能连续存在,这是导致STL带宽较窄的主要原因<sup>[26-27]</sup>,且隔声频率也不够低<sup>[28-29]</sup>。圆形和方形均质薄膜结构前两阶反共振模式最先以偶极子和四极子式的形式呈现。如果设计一种能实现偶极子和四极子式振动模式共同兼顾的MAM结构,就有可能将有效隔声频带转移至低频。另外,根据局域共振型声学超材料中的分布式振子的设计思路<sup>[8,14,20,30-31]</sup>,在薄膜表面合理分布额外的杂合振子,则可以使偶极子和四极子的振动模式派生出更多的反共振模式,产生更多的STL峰值,因此拓宽MAM低频STL带宽将是可行的。

现有的声学超材料仍然存在一些弊端:声学性能方面,有效隔声频率不够低,STL带宽较窄;应用性方面,结构尺寸庞大且厚重,刚性的支撑框架难以变形,结构复杂,加工成本高,薄膜材料(如硅橡胶等)易老化,张力难以控制<sup>[2,17,18,27,32-36]</sup>等。此外,多数声学超材料的研究以小样件、理论研究为主;多采用平面波辐射的方式在声学阻抗管内测试验证,缺少混响声场中大尺寸模型的隔声性能研究<sup>[7,15,18,24,32,37]</sup>。而在实际应用中,MAM往往会以大面积的结构形式应用于类混响声场条件下<sup>[38]</sup>。所以,研究大尺寸轻质柔性MAM的低频隔声性能是十分必要的。

本文提出一种具有多态反共振模式的对称摆臂式MAM结构,由常用的声学材料乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)薄板、聚酰亚胺(PI)薄膜及金属薄片构成,能产生连续的多态反共振模式,且具有轻质柔性的应用特征和负等效参数特性。首先,通过对超单胞的STL、多态反共振模式、负等效参数和耦合特性的数值分析,揭示了动态平衡和STL带宽的调控机理,同面密度的传统隔声材料对比实验验证了其优良的低频隔声性能;其次,基于超单胞结构而衍生

设计的大尺寸 MAM 样件同样具备优良的低频高 STL 性能,可由“混响室-消声室”隔声实验验证;最后,将大尺寸 MAM 样件装配到汽车发动机机罩内,实车测试结果表明:1 kHz 以下发动机噪声有明显的衰减。

1 新型摆臂式 MAM 低频隔声

1.1 超单胞样件及研究方法

声学超材料的结构和材料分布直接决定其与声波的耦合振动模式,这种耦合振动模式又能调控声波的传递特性。从力学特性上来讲,对称的十字形摆臂结构较容易呈现多种反方向对称的振动模式、实现动态平衡,且能产生偶极子和四极子式的低阶反共振模式。将十字摆臂结构运用到反共振型的 MAM 设计中,并结合局域共振原理中的分布式振子的设计思路,设计了一个新型的柔性摆臂式 MAM 结构,用于改善低频隔声性能。

图 1a 为阻抗管小尺寸 MAM 超单胞样件,直径为 100 mm。样件中的环形 EVA 框架、金属薄片和 EVA 十字摆臂均被贴附在 0.2 mm 厚的 PI 薄膜的同侧。框架起支撑作用,子单胞十字摆臂置于样件中心,另外 4 个子单胞金属薄片对称布置于每两个摆臂之间。这种方式把超单胞分割成 12 个对称的且具有不同参数的子单胞,分别为 4 个摆臂区域、4 个金属薄片区域和 4 个在摆臂尖端的薄膜区域,其中子振子的结构和材料参数对称且具备交错性。该单胞样件较轻薄,整体厚度仅为 2 mm,面密度仅为 1.93 kg/m<sup>2</sup>。此外,如图 1b 所示,厚度为 0.94 mm 的小尺寸均质 EVA 薄板作为对比样件,其面密度与 MAM 相同。通过图 1c 所示的 Brüel & Kjær 4206-T 声学阻抗管隔声实验系统完成 MAM 和 EVA 的 STL 测试<sup>[39]</sup>。该单元的 STL(S)、等效质量( $M_e$ )、等效刚度( $K_e$ )、平均法向位移( $d_z$ )、耦合动能( $W_k$ )、本征模式和耦合振动位移云图均能在 COMSOL Multiphysics 软件中仿真分析。本文所涉及的 MAM 样件结构和材料参数见表 1,空气介质的密度为 1.29 kg/m<sup>3</sup>,空气中的声速为 343.4 m/s。

声传递损失由下式计算获得

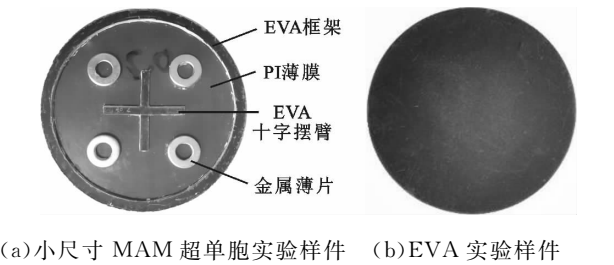
$$S = 10\lg\left(\frac{P_i}{P_o}\right)^2 \tag{1}$$

$M_e$  和  $K_e$  由下式计算得到

$$M_e = \frac{\int P_i - \int P_o}{a_z} \tag{2}$$

$$K_e = \frac{\int P_i - \int P_o}{d_z} \tag{3}$$

式中: $P_i$  和  $P_o$  分别为入射声压和透射声压, $P_i$  的幅值设为 1 Pa; $a_z$  和  $d_z$  分别是 MAM 单元在入射方向的平均加速度和平均法向位移。



(a)小尺寸 MAM 超单胞实验样件 (b)EVA 实验样件



(c)Brüel & Kjær 4206-T 隔声实验系统  
图 1 小尺寸 MAM 与 EVA 实验样件及隔声实验系统

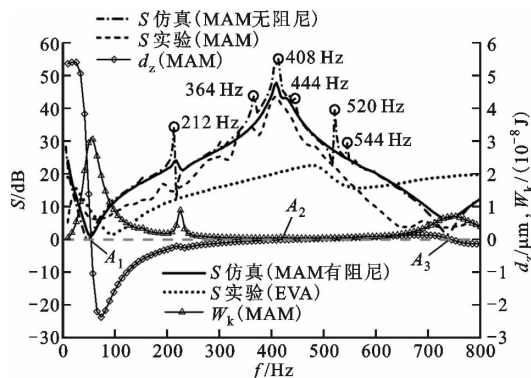
1.2 结果分析及实验验证

无阻尼 MAM 超单胞的 STL 仿真结果如图 2a 所示。仿真结果表明,在 48 Hz( $A_1$  点)和 736 Hz( $A_3$  点)之间该 MAM 单元有一个明显的 S 峰值频带,带宽为 688 Hz;在 408 Hz( $A_2$  点),S 峰值为 55.5 dB。从图 2a 可以看出,众多的 S 峰在低频带宽内得以产生,其频率与图 3 中的多态反振频率一一对应。基于数值计算结果,制作相应的 MAM 超

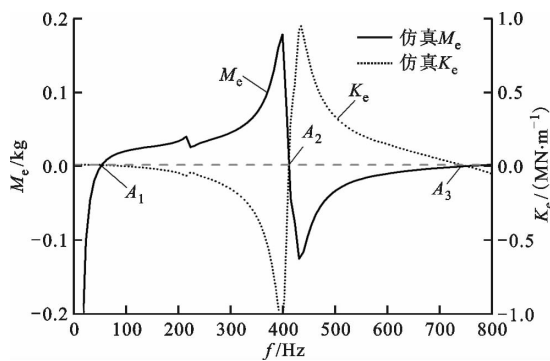
表 1 MAM 样件结构和材料参数

| 材料     | 厚度/mm | 直径/mm | 宽度/mm | 长度/mm | 杨氏模量/Pa              | 密度/(kg · m <sup>-3</sup> ) | 泊松比  | 损耗因子 |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------------------|----------------------------|------|------|
| PI 薄膜  | 0.2   | 100   |       |       | 1.42×10 <sup>9</sup> | 1 100                      | 0.36 | 0.04 |
| EVA 摆臂 | 2.0   |       | 4     | 40    | 1.7×10 <sup>8</sup>  | 2 050                      | 0.45 | 0.09 |
| EVA 框架 | 2.0   | 100   | 5     |       | 1.7×10 <sup>8</sup>  | 2 050                      | 0.45 | 0.09 |
| 金属薄片   | 1.8   | 11.2  |       |       | 2×10 <sup>11</sup>   | 7 800                      | 0.33 |      |

单胞样件并完成阻抗管隔声实验,  $S$  的实验结果如图 2a 所示。从图 2a 中可以看出, 仿真与实验值的趋势基本一致, 只是实验的结果更为平滑, 造成这一结果的主要原因是计算时没有考虑阻尼因素<sup>[43]</sup>。因此, 为了使计算更贴近于样件的真实阻尼特性, 设定 PI 薄膜的损耗因子为 0.04, 实际上损耗因子应为频率的函数, 为了计算方便, 本文采用定值。由图 2a 可以看出, 有阻尼的  $S$  计算结果较为平滑, 无密集的波峰或波谷。但是在 48、212、408 与 736 Hz 依然有明显的波峰或波谷与振动模式对应, 而其他的反共振频率对应的  $S$  峰被“削平”。因此, 阻尼的引入只会削弱  $S$  曲线的峰值, 但不会影响其共振频率。  $S$  仿真和实验数据一致表明该单元的数值仿真结果可以表征 MAM 特殊的物理属性。图 2a 给出了均质 EVA 薄板  $S$  的实验数据, 在 72~560 Hz 之间 MAM 的  $S$  实验数据远高于同面密度的 EVA 薄板, 最多高出 24 dB(在  $A_2$  点), 平均高出 8.2 dB。



(a) MAM 隔声特性



(b) MAM 负等效参数特性

图 2 低频带内 MAM 的高隔声特性

如图 2b 所示, MAM 表现出超材料所具有的负等效参数特性, 在 48 Hz 以下和 416~744 Hz 频带内,  $M_e$  小于 0; 在 56~408 Hz 和 744 Hz 以上频带内,  $K_e$  小于 0。  $A_1$  和  $A_3$  频点为  $M_e$  和  $K_e$  曲线的零值转换点,  $A_2$  点为极值跃迁点。  $M_e$  和  $K_e$  的方向

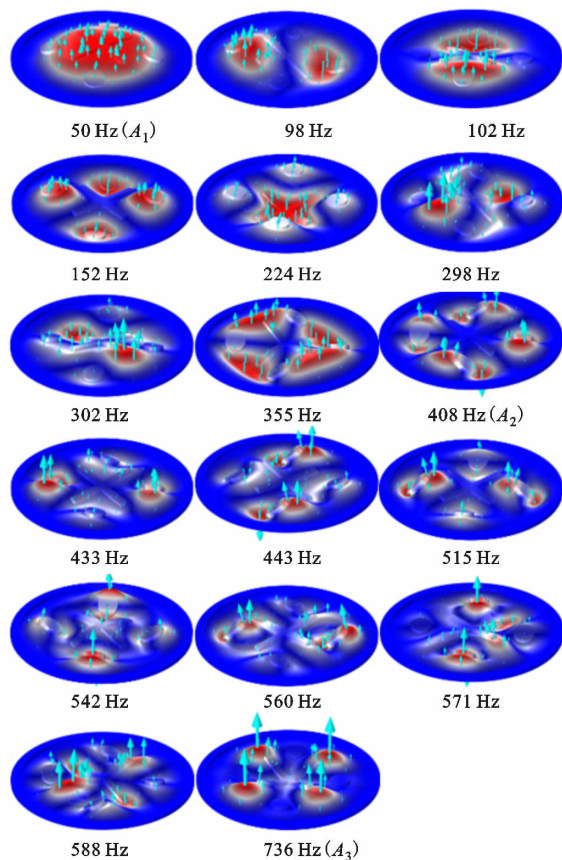
与图 2a 中  $d_z$  的方向完全相关。当  $d_z$  的方向改变时,  $M_e$  和  $K_e$  会在正负之间切换, 反之亦然, 这是因为有  $M_e \propto (-\omega^2 d_z)^{-1}$  和  $K_e \propto (d_z)^{-1}$  的关系。由此, 当  $d_z$  经过准动态平衡位置(在  $A_2$  点,  $d_z=0$ )时,  $M_e$  和  $K_e$  会有一个瞬间的极值跃迁。也就是说, MAM 在动态平衡位置附近( $d_z \approx 0$ ),  $M_e$  和  $K_e$  可以达到极值, 该单元很难被激励,  $S$  幅值较高, 说明处于动态平衡的结构单元几乎不辐射声能。如图 3 所示, 在 STL 带宽内 MAM 产生多达 15 个连续的反共振模式, 且幅度较小。这 15 个反共振模式表现为十字摆臂和 4 个质量片之间的反向协调模式。具体地说, 在 98、102、152、408、433、443、515 Hz, 表现为 2 个或 4 个质量片之间的反向振动; 在 298、302、355、588 Hz, 表现为十字摆臂末端的反向振动; 在 224、542、560、571 Hz, 表现为十字摆臂和金属片之间的反向振动。从这些反共振模式中可以看出, 超单胞内正向振动的子单胞与负向振动的单胞同步且相互协调。由于作用力和反作用力之间的相互关系, 互为反向振动的子单胞的振幅几乎相等但是位移相反, 从而宏观上实现了力的平衡<sup>[1]</sup>。把这些连续的反共振模式与图 2a 中的  $d_z$  曲线结合来看, 正向振动的子单胞的变形分量被负向振动的变形分量抵消, 这种子单胞间正负交互的耦合行为称为协同, 这种行为可实现 MAM 结构振动的动态平衡, 亦即  $d_z \approx 0$ 。

在图 2a 中的  $A_1$  点, 极大的  $d_z$  和  $W_k$  说明 MAM 被入射声波激励发生了强烈的共振行为, 整个单元的振动方向与声波同向, 这个共振行为由图 3 中  $A_1$  点的集总共振模式云图所表征。入射的声波没有被任何反方向声波抵消, 此时产生第一个  $S$  波谷, 称该波谷对应的频率为 STL 带宽下限。同时,  $A_1$  点的整体共振模式表明 STL 带宽下限由超单胞整体的等效参数特性决定。如果降低超单胞整体中心区域的  $K_e$ , 或提升  $M_e$ , 则随后的低频反向振动行为将会在频率轴上提前出现, STL 带宽下限也会被转移至更低的频率<sup>[40, 42]</sup>。经过  $A_1$  点,  $K_e$  和  $d_z$  迅速转移为负值, 同时  $W_k$  也大幅衰减, 这是由负  $K_e$  引起的反向耦合振动行为所致。负向振动的子单胞会逐渐辐射出与入射声波互为反相位的反射声波, 也就是说入射压力声场会被幅值相同、相位相反的反射压力声场抵消, 使得向前传播的声能逐步衰减, 所以  $S$  幅值逐渐增加。在  $A_2$  点, 由极大的负等效参数引起的反向振动的变形分量会促使超单胞的正负位移相互抵消,  $d_z=0$ 。整个超单胞 MAM 在入射波与反

射波的共同叠加作用下处于准动态平衡状态,振动能量无法向前传播。于是,向前传播的声能大幅衰减(可由极小的  $W_k$  表征,  $W_k \approx 0$ ),从而实现了 MAM 附近声场能量宏观上的平衡。这种动态平衡模式的反共振行为确保了 S 幅值的极大化。图 3 中  $A_2$  点的本征模式表明 4 个金属薄片同时表现出偶极子式的反共振模式,且摆动幅度很小。此种模式下可使入射声能分裂成 4 个声场能量平衡区域,入射声能可以得到充分地抵消与转移,这也是声学超材料典型的局域耗能机理。经过  $A_2$  点,  $d_z$  逐渐转移为正值,但仍然很小。单元的准动态平衡被打破,其振动方向逐渐转为与入射声波同向,  $W_k$  也逐渐增加。图 2b 中的  $M_e$  从极小值逐渐趋于 0,  $K_e$  从极大值逐渐趋于 0,这意味着单元的振动速度也在逐步增加,弹性应变能逐渐向动能转变。从图 3 中  $A_2$  点以后的本征模式可以看出,反向振动的金属薄片的贡献度也在弱化(数量和幅度都在减小),即 MAM 对声波的局域耗能能力被削弱。因此,声波的透射能力逐渐增强, S 缓慢下降直至第 2 个 S 波谷( $A_3$  点)。在  $A_3$  点,  $d_z$  从正极值跳变为负极值(与  $A_1$  点一致),  $W_k$  上升至另一个小峰值。由图 3 中  $A_3$  点本征模式可以看出,发生共振的是位于 2 个金属薄片之间(十字摆臂外侧)的 4 个薄膜区域(可看作 4 个小质量的子单胞),且幅度较大。由于这 4 个薄膜区域的质量小于金属薄片,所以  $A_3$  点的  $W_k$  低于  $A_1$  点的  $W_k$ 。  $A_3$  点的振动模式中大质量的金属薄片是相对静止的,没有参与声波的调制解耦。声能一定的情况下,这 4 个小质量子单胞的振动速度较大,因此大量的声能被薄膜聚集而发生透射, S 到达第 2 个波谷,称该波谷对应的频率为 STL 带宽上限。  $A_3$  点的振动模式说明, STL 带宽上限由这 4 个小质量子单胞的等效参数特性决定。如果提升该区域的约束刚度,这种共振模式将在频率轴上推迟产生,即 STL 带宽上限将会向中高频转移,那么 STL 带宽会进一步拓宽。

动态平衡包括结构振动的动态平衡和声场能量的平衡,正是因为这两种动态平衡的协同耦合作用,才使得向前传播的声能急剧衰减<sup>[12]</sup>。因此,当超材料结构和声场耦合至动态平衡状态时,入射的声能会被具有负参数特性的 MAM 强烈反射,声能透射系数极小<sup>[42]</sup>。这种抵消声能的衰减方式确保了 S 极大化,这正是反共振型声学超材料的高隔声机理。由于对称交错分布子单胞间的协同耦合行为,超单胞内产生了多组形态的反共振模式,进而实现

MAM 宽带动态平衡。这种多重反向调节行为使入射声能发生强烈的反射,促成正向与反向声波相互抵消。这种平衡状态也有利于声能向弹性应变能转移。 STL 带宽的下限和上限频率取决于相应区域内的共振行为。只要合理地设计对应区域内的结构和材料参数,将共振模式转化为反共振模式,调控 STL 带宽至理想的频段将是可行的。



箭头的长短和方向表征位移的大小和方向。

图 3 STL 带宽内 MAM 的本征模式云图

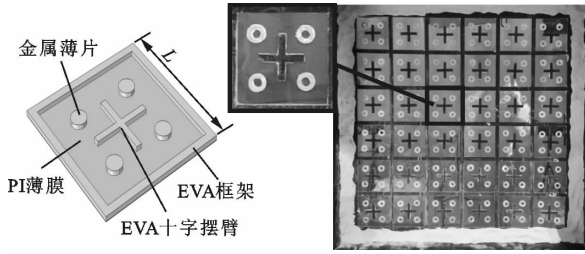
## 2 大尺寸 MAM 低频隔声性能

### 2.1 大尺寸 MAM 样件及 STL 实验

对大尺寸 MAM 的低频隔声特性进行研究,是为了使 MAM 更符合应用特性。基于上述小尺寸 MAM 单元结构,设计了一个晶格常量为  $L$  的正方形超单胞单元,并对其施加 Floquet 周期性边界条件进行仿真分析,仿真模型如图 4a 所示。基于 CAE 模型而衍生制作了尺寸为  $600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$  的大尺寸样件 MAM I ( $L=90\text{ mm}$ ) 和 MAM II ( $L=80\text{ mm}$ ),如图 4b 和 4c 所示,它们的面密度分别为  $2.27\text{ kg/m}^2$  和  $2.33\text{ kg/m}^2$ 。为了对比分析大尺寸 MAM 的低频 STL 性能,选取一个面密度为  $2.4\text{ kg/m}^2$  的大尺寸均质 EVA 薄板样件作为对比样

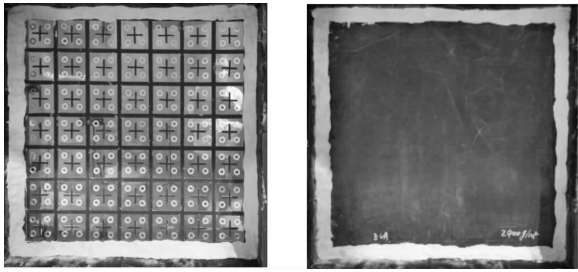
件,如图 4d 所示。

根据 ISO 15186—1 标准<sup>[41]</sup>,使用“混响室-消声室”对大尺寸平板样件实施 STL 测试,测试系统如图 4e 所示。混响室长为 7.2 m、宽为 6.5 m、高为 4.6 m、空间体积为 206 m<sup>3</sup>,激励源为白噪声;消声室长为 5.4 m、宽为 5.2 m、高为 3.6 m、体积为 101 m<sup>3</sup>,背景噪声为 14 dB。在混响室与消声室之间的隔声测试窗口内放置大尺寸平板样件,其周边采用油泥密封和固定,测试温度设定为 22 ℃。用隔声声强法测试,并根据式(4)计算 STL。平均声压级  $L_p$  由混响室内的 5 个麦克风测得;平均声强级  $L_I$  由接收室内声强探头扫描测得。声强探头由两个间距为 50 mm 的传声器组成,有效频率测试范围为 31.5~1 600 Hz。



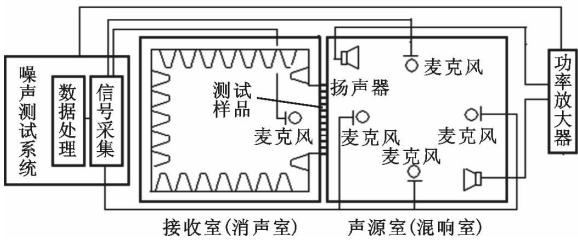
(a) MAM 超单胞仿真模型

(b) 大尺寸样件 MAM I



(c) 大尺寸样件 MAM II

(d) 均质 EVA 薄板



(e) 大尺寸平板声学材料隔声实验测试系统

图 4 大尺寸 MAM 样件及隔声测试系统

S 的测试原理如下

$$S = 10\lg\left(\frac{W_i}{W_t}\right) = 10\lg W_i - 10\lg(S_i I_t) = 10\lg\left(\frac{P_i^2 S_i}{4\rho c}\right) - 10\lg(I_t) - 10\lg(S_i) = 10\lg\left(\frac{P_i^2}{P_r^2}\right) +$$

$$10\lg\left(\frac{S_i}{S_t}\right) + 10\lg\left(\frac{P_r^2}{I_r 4\rho c}\right) - 10\lg\left(\frac{I_t}{I_r}\right) = L_p - L_I - 6.08 \quad (4)$$

式中:  $W_i$  和  $W_t$  分别是测试样件表面的入射和透射声功率;  $S_i$  和  $S_t$  分别是样件表面的入射和透射声波面积,  $S_i = S_t = 0.36 \text{ m}^2$ ;  $P_i$ 、 $P_r$ 、 $I_t$  和  $I_r$  分别是入射声压、参考声压、透射声强和参考声强,  $P_r = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ ,  $I_r = 1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ ; 空气密度  $\rho$  为  $1.18 \text{ kg/m}^3$ 。环境温度为 22 ℃, 声速  $c$  为 343.4 m/s。

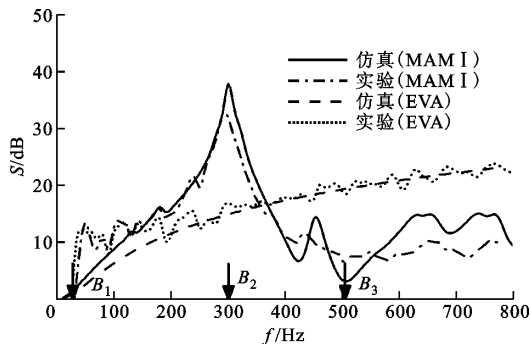
## 2.2 结果分析

如图 5a 所示, 大尺寸 MAM I 及 EVA 的仿真与实验结果一致性都很好, 表明大尺寸周期模型仿真方法的正确性。在 500 Hz 以下, MAM I 有一个明显的 S 峰值频带; 在 150~350 Hz 之间, MAM I 的 S 远高于 EVA, 最多高出 17 dB(在 290 Hz), 平均高出 5.2 dB。因此, 本文提出的超单胞结构在衍生设计的大尺寸 MAM 中仍具有良好的低频隔声性能。

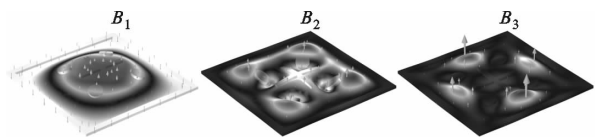
与图 2a 中 MAM 的 S 峰值频带相比, 图 5a 所示的 MAM I 的 S 峰值频带转移至较低频, 是由于 STL 带宽下限受超单胞整体等效参数影响。MAM I 中单胞四周是周期性边界, 其约束强度弱于小尺寸 MAM, 所以 MAM I 中每个超单胞中心区域的弯曲刚度减小; 另外, 从图 5b 中  $B_1$  点的振动位移云图看出, 超单胞中心区域发生集总共振(与图 3 中  $A_1$  点振动模式相同), EVA 框架伴随轻微的反共振, 因此其 STL 带宽下限仅少量地移向更低的频率。图 5b 中  $B_2$  点的反共振模式与图 3 中  $A_2$  点相似, 不同的是  $B_2$  点 4 个子单胞金属薄片外侧薄膜区域的正向振动强于内侧薄膜区域的反向振动, 这是因为 MAM I 中金属薄片外侧的薄膜面积大于内侧, 外侧约束强度低, 容易被激励, 导致薄片振子不易归位至准动态平衡状态; 混响声场内的声波是斜入射到样件表面的, 而不是法向入射, 斜入射声波的折射特性增加了大尺寸平板样件的透射系数。MAM I 的 S 峰值低于小尺寸 MAM。由图 5b 中  $B_3$  点振动云图可以看出, STL 带宽的上限由十字摆臂外侧的薄膜区域的等效参数决定, 在 MAM I 中该区域的面积占比大于超单胞 MAM 中的占比, 导致 MAM I 内薄膜区域的等效约束刚度减小, 所以 STL 带宽的上限也向左偏移, 同时 S 峰值频率也在一定程度上向左偏移。小尺寸超单胞结构在制作成大尺寸样件时, 多态反共振模式不会减少; 有效隔声频带会向更低频转移, 但隔声幅值会有一定的削减,



主要是因为柔性 EVA 框架削弱了子单胞的局域振动强度,子单胞的能量交换能力未能被完全激发。



(a) MAM I 和 EVA 的仿真和实验的 S 数据



(b) 图 5a 中  $B_1$ 、 $B_2$  和  $B_3$  频点对应的振动模式位移云图

图 5 大尺寸 MAM I 的实验与仿真数据和振动模式云图

由图 5a 中大尺寸 MAM 的 S 数据可以看出,在 150~350 Hz 范围大尺寸 MEM 的隔声性能优于同面密度传统 EVA 材料。与以往的 MAM 相比,所设计的隔声超材料在第 1 阶共振与第 2 阶共振模式之间引入了丰富的反共振模式,这也增加了多参数的可调性<sup>[13,15]</sup>。合理调节各子单胞的结构和材料参数,则可以改善大尺寸 MAM I 的有效隔声频带。如图 6 所示,超单胞和子单胞的动态等效参数与薄膜的厚度( $h_f$ )、薄膜的杨氏模量( $E_f$ )、质量振子的厚度( $h_m$ )和  $L$  等设计变量都有直接关系。基于 MAM I,当  $h_f$  从 0.2 mm 减小至 0.15 mm 时,超单胞的等效刚度减小。由图 6 可以看出, S 峰向更低频转移,但 STL 带宽有所变窄。当  $E_f$  从 1.42 GPa 增加至 4 GPa 时,子单胞的等效刚度增加。S 峰和上限均向右偏移,且 STL 带宽也大幅拓宽。薄膜的杨氏模量对 STL 带宽有较高的灵敏度。当  $h_m$  从 2 mm 减小至 1 mm 时,金属薄片子单胞的质量减小,此时决定 STL 带宽上限的金属薄片的反共振频率增加,所以会导致 S 峰频率向右移动。晶格常量减小至  $L=80$  mm 时(其他参数不变),MAM II 的 S 峰和带宽均向右偏移,这有利于控制中低频带的噪声。结构和材料参数的组合设计,可实现更优良的低频宽带隔声能力。例如,把不同参数的单胞组合成一个大的组合单胞,则大尺寸 MAM 的 S 峰将会更加连续、密集。

基于子单胞的振动模式和设计变量的研究,优

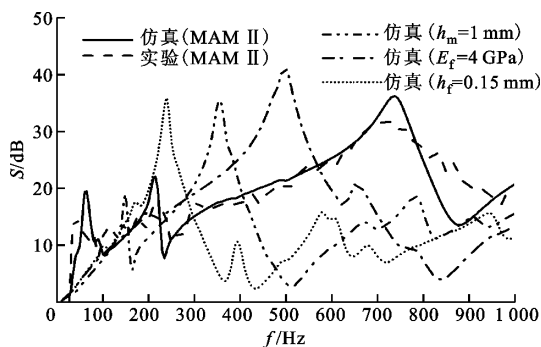


图 6 不同参数大尺寸 MAM 的 S 的实验和仿真数据

化振动区域内的等效参数,可改善 STL 幅值和带宽<sup>[40,42]</sup>,也可以设计具有不同隔声峰值频带的 MAM 模型,将它们有机组合来拓宽隔声频带<sup>[43]</sup>。

### 3 实车降噪测试

低频声学超材料的应用是超材料领域内的研究重点。本文设计的大尺寸 MAM I 和 MAM II 的低频隔声性能优于同面密度的均质 EVA 材料,并由“混响室-消声室”隔声实验验证。本节将进一步在实车上验证 MAM II 的低频降噪性能,为本文设计的 MAM 探寻一种应用实例,促进声学超材料的应用研究。

由于运行工况、激励源及传递路径的多样性和复杂性等,汽车噪声的研究是极具挑战性的。发动机噪声是车内低频噪声的主要来源,尤其是加速轰鸣噪声会让驾乘人员十分烦躁。采用单一变量法,在整车半消声室内对发动机传递至车内的噪声水平进行横向对比测试(用同面密度的 EVA 作为对比),验证 MAM II 的低频降噪效果。其他条件相同(相同的实验室、工况、装配、采集等),这样能直接验证 MAM 有效的低频噪声衰减能力,尤其是对低频噪声峰值的衰减。根据发动机机罩的形状及其“限位设计”,对样件 MAM II 和均质 EVA(对比样件)进行裁切。将样件分别装配在机罩下侧,样件和机罩之间留有一定的空隙,分别在怠速和全油门加速(WOT)工况下测试驾驶员右耳处(DRE)的 A 声压级( $L_{pA}$ )。发动机机罩的原始状态如图 7a 所示,麦克风的测试位置如图 7b 所示。分别测试“机罩(原始状态)”、“机罩+EVA”与“机罩+MAM II”3 种状态对应的 DRE 位置的  $L_{pA}$ ,这 3 种安装形式如图 7c~7e 所示。

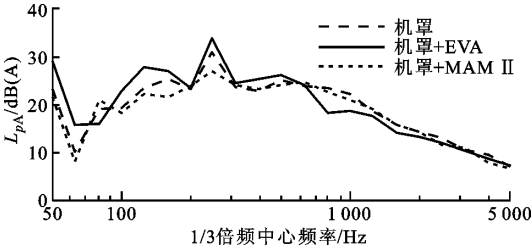
在怠速条件下 3 种装配状态 DRE 处的  $L_{pA}$  如图 8a 所示。测试数据表明:①在 100~630 Hz,加装 EVA 薄板的 DRE 处  $L_{pA}$  反而高于仅机罩状态的



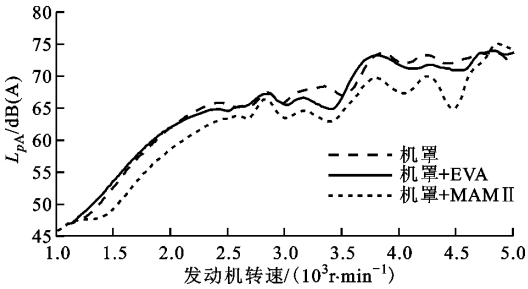
图 7 大尺度 MAM II 实车测试条件及样件装配状态

$L_{pA}$ ,说明 EVA 薄板在发动机低频激励下发生了共振效应,反而增强了低频辐射噪声;②把 EVA 薄板换成 MAM II 后,在 100~630 Hz, MAM II 与 EVA 薄板相比有一定的降噪效果,尤其对 250 Hz 的噪声峰值有明显的衰减;③较小的发动机转速(730 r/min)对 MAM II 的激励不够充分,可能无法全面地激发 MAM II 的反共振模式,所以 MAM 的隔声作用不够明显。在 WOT 条件下,DRE 处的  $L_{pA}$  与发动机转速的关系如图 8b 所示:①与仅机罩状态的  $L_{pA}$  相比,机罩内加装 EVA 薄板的  $L_{pA}$  并没有得到明显的改善;②与同面密度的 EVA 材料相比,加装 MAM II 后的  $L_{pA}$  得到了较大的衰减,在 1 000~5 000 r/min 转速范围内平均减小 2.6 dB(A)。提取图 8b 中 1 500、2 000、3 000、4 500 r/min 4 个转速对应的频谱数据。

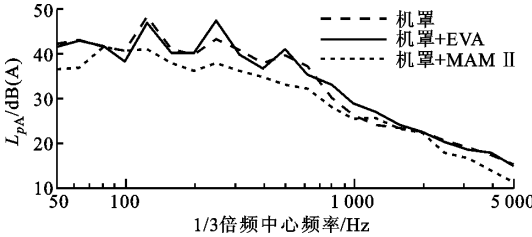
从图 8c~8f 中转速对应的 DRE 处的  $L_{pA}$  频谱数据可以看出:①EVA 薄板对车内噪声改善不明显,某些频率的  $L_{pA}$  反而被加强,这是由于机罩本身



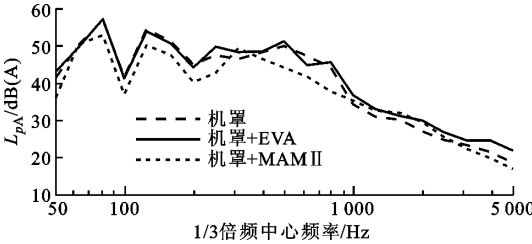
(a)怠速工况下车内 DRE 位置  $L_{pA}$



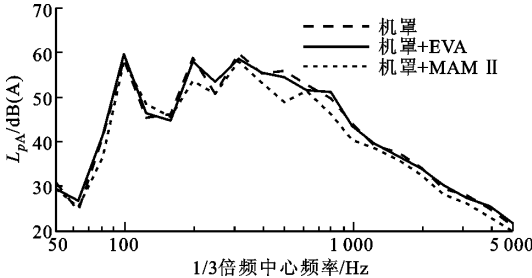
(b)车内 DRE 位置  $L_{pA}$  与发动机转速关系



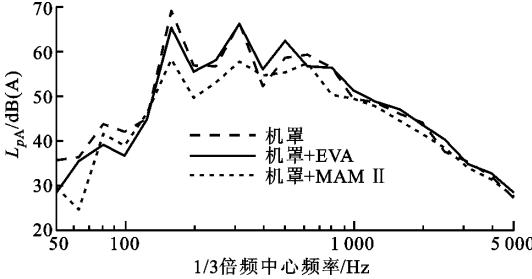
(c)1 500 r/min 转速下车内 DRE 位置  $L_{pA}$



(d)2 000 r/min 转速下车内 DRE 位置  $L_{pA}$



(e)3 000 r/min 转速下车内 DRE 位置  $L_{pA}$



(f)4 500 r/min 转速下车内 DRE 位置  $L_{pA}$

图 8 车内 DRE 位置噪声级(A)测试结果

是密实(不易透声)的普通塑料材质,在此基础上外加一层同样性质的 EVA 重质层材料,这不利于发



动机噪声衰减,反而在某些频率会发生共振;②与原始状态以及加装 EVA 状态相比,在 1 kHz 以下 MAM II 使车内噪声级得到较大衰减,在 1 500、2 000、3 000、4 500 r/min 转速条件时,分别平均衰减了 4.0、3.8、2.1、3.3 dB(A),尤其是对  $L_{pA}$  峰值的衰减较明显,从工程的角度来看,MAM II 能表现出如此的噪声衰减能力,在汽车降噪研究领域已算是极为明显的;③图 8 中  $L_{pA}$  与图 6 中  $L_{pA}$  对比,虽然  $L_{pA}$  谷与 S 峰不能严格对应,但 1 kHz 以下 DRE 处的  $L_{pA}$  衰减频带与 STL 带宽相符。 $L_{pA}$  谷与 S 峰不能严格对应是由于实车 SPL 测试条件与隔声窗口 STL 实验条件有以下区别:①声源不同,发动机舱内声场极其复杂,不是均匀的扩散声场;②传递路径不同,发动机噪声传递至车内的路径复杂,不是单一方式传递;③激励与接收声场不同,发动机舱与乘客舱的模态密度是不均匀的;④装配方式不同,MAM 仅装配在发动机的上表面,而未对发动机声源进行全面隔绝;⑤约束条件不同,MAM 是通过机罩背衬内表面的“限位设计”固定的,而不像隔声窗口内采用的是严格的周边约束形式。以上很多因素是无法量化解析,所以本文采用横向对比测试法(单一变量法)来验证 MAM 在实车上的降噪效果。

结合前文中噪声衰减机理的分析,发动机 WOT 工况下的低频激励容易激发 MAM II 的低频反共振模式,进而 MAM II 能体现出一定的声能抵消和转移特性,因此传递至车内的噪声级会有相应的衰减,且优于车内常用的重质层 EVA 材料。试想如果对发动机外表面实施全部包裹,原则上会有更加明显的降噪效果;在汽车轮弧罩上应用,可处理低频胎噪;在地板上应用,可隔离路面和排气系统的低频噪声。因此,本文提出的 MAM 及其设计原理有望应用于其他低频降噪领域(不限于汽车行业)。

关于装配约束方式对振动特性及耦合声场的影响机理是下一步研究的重点。初步的研究思路是:①测试机罩的激励频率,以及机罩振动到 DRE 位置的声传函;②搭建与应用条件相符的仿真计算模型;③根据结构和材料参数的调控机理及实际的应用条件,设计声学超材料;④制作更符合应用性的初始样件,进行实车降噪测试。

## 4 结 论

本文提出一种轻质柔性摆臂式 MAM 结构,研究了 MAM 超单胞单元、大尺寸结构的低频隔声性能及机理,最后完成了实车机罩降噪测试,得到以下

结果。

(1)本文提出的轻质柔性的摆臂式 MAM 超胞单元在 48~736 Hz 宽频带内表现出优良的低频宽带隔声性能,并被同面密度的均质 EVA 材料验证。

(2)超单胞 MAM 的多态反共振模式、负等效参数和耦合特性,揭示了动态平衡和 STL 带宽/峰值的调控机理。当 MAM 结构和声场耦合至动态平衡状态时,入射的声能会被负等效参数反向调控,确保了 STL 幅值的极大化,这也是反共振型声学超材料的高隔声机理。

(3)大尺寸 MAM 平板样件优良的低频 STL 性能被“混响室-消声室”隔声实验验证。数值分析了结构与材料参数对 STL 带宽的调控机理。可以通过不同隔声峰值频带方案的有机组合,实现宽带高隔声性能。

(4)MAM 对 1 kHz 以下发动机加速噪声有明显的衰减作用,平均衰减达 3 dB(A)。虽然  $L_{pA}$  谷与 S 峰不能严格对应,但 1 kHz 以下 DRE 处的  $L_{pA}$  衰减频带与 STL 带宽是相符合的。

(5)对于 MAM 样件的 STL 实验与实车测试的对应关系及影响机理问题,以及装配约束方式对 MAM 振动特性及声学性能的影响,是后期重要的研究内容。对车内进行全面的噪声特性分析、噪声源识别与传递路径解析,制定针对性的设计方案、包裹方案及测试方法等,使实车测试与隔声窗口实验之间有更好的一致性。

(6)在一定程度上丰富了质量片和薄膜之间的多重协同解耦设计方式,并推进了多态反共振型轻质薄膜声学超材料的研究。此外,大尺寸柔性薄膜声学超材料的设计原理、STL 实验及实车测试,将为低频薄膜型声学超材料的工程化应用提供一种新的解决思路。

## 参考文献:

- [1] BOLTON J S, SHIAU N-M, KANG Y J. Sound transmission through multi-panel structures lined with elastic porous materials [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 191(3): 317-347.
- [2] ZHANG Yuguang, WEN Jihong, ZHAO Honggang, et al. Sound insulation property of membrane-type acoustic metamaterials carrying different masses at adjacent cells [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(6): 063515.
- [3] MEI Jun, MA Guancong, YANG Min, et al. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-

- frequency sound [J]. *Nature Communications*, 2012, 3(756): 1-7.
- [4] YANG Zhiyu, DAI H M, CHAN N H, et al. Acoustic metamaterial panels for sound attenuation in the 50-1 000 Hz regime [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(4): 041906.
- [5] MA Fuyin, WU Jiuhui, HUANG Meng, et al. A purely flexible lightweight membrane-type acoustic metamaterial [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, 48(17): 175105.
- [6] XIAO Yong, WEN Jihong, WEN Xisen. Sound transmission loss of metamaterial-based thin plates with multiple subwavelength arrays of attached resonators [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331(25): 5408-5423.
- [7] YANG Zhiyu, MEI Jun, YANG Min, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(20): 204301.
- [8] MA Guancong, SHENG Ping. Acoustic metamaterials: from local resonances to broad horizons [J]. *Science Advances*, 2016, 2(2): 1501595.
- [9] ZHOU Xiaoqin, WANG Jun, WANG Rongqi, et al. Effects of relevant parameters on the bandgaps of acoustic metamaterials with multi-resonators [J]. *Applied Physics: A*, 2016, 122(4): 427.
- [10] 张思文, 张军, 章晓轩, 等. 局域共振声子结构在汽车地毯低频隔声中的应用 [J]. *汽车工程*, 2016, 38(3): 362-367.
- ZHANG Siwen, ZHANG Jun, ZHANG Xiaoxuan, et al. Application of locally resonant phononic structures to the low-frequency sound insulation of vehicle carpets [J]. *Automotive Engineering*, 2016, 38(3): 362-367.
- [11] SHI Chao, SUN Hongwei, HU Xiaolei, et al. Acoustic metamaterial panels based on multi frequency vibration absorbers [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2016, 7: 980345.
- [12] MA Fuyin, HUANG Meng, WU Jiuhui. Acoustic metamaterials with synergetic coupling [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(21): 215102.
- [13] LIN Guochang, CHEN Songqiao, YUAN Xuebo, et al. Transmission loss of thin membrane-type acoustic metamaterials with negative effective mass [J]. *Materials Science Forum*, 2017, 898: 1749-1756.
- [14] ELFORD D P, CHALMERS L, KUSMARTSEV F, et al. Matryoshka locally resonant sonic crystal [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, 130(5): 2746-2755.
- [15] NAIFY C J, CHANG C, MCKNIGHT G, et al. Transmission loss of membrane-type acoustic metamaterials with coaxial ring masses [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(12): 124903.
- [16] MA Guancong, YANG Min, XIAO Songwen, et al. Acoustic metasurface with hybrid resonances [J]. *Nature Materials*, 2014, 13(9): 873-878.
- [17] HUANG Tauyun, SHEN Chen, JING Yun. Membrane-and plate-type acoustic metamaterials [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, 139(6): 3240-3250.
- [18] MA Fuyin, HUANG Meng, WU Jiuhui. Ultrathin lightweight plate-type acoustic metamaterials with positive lumped coupling resonant [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(1): 015102.
- [19] YANG Min, MA Guancong, YANG Zhiyu, et al. Coupled membranes with doubly negative mass density and bulk modulus [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(13): 134301.
- [20] CHEN Yangyang, HUANG Guoliang, ZHOU Xiaoming, et al. Analytical coupled vibroacoustic modeling of membrane-type acoustic metamaterials: plate model [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 136(6): 2926.
- [21] YANG Min, MA Guancong, YANG Zhiyu, et al. Subwavelength perfect acoustic absorption in membrane-type metamaterials: a geometric perspective [J]. *EPJ Applied Metamaterials*, 2015, 2: 10.
- [22] MA Fuyin, HUANG Meng, XU Yicai, et al. Bi-layer plate-type acoustic metamaterials with Willis coupling [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123(3): 035104.
- [23] NAIFY C J, CHANG C M, MCKNIGHT G, et al. Transmission loss and dynamic response of membrane-type locally resonant acoustic metamaterials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(11): 114905.
- [24] NAIFY C J, CHANG C M, MCKNIGHT G, et al. Membrane-type metamaterials: transmission loss of multi-celled arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(10): 104902.
- [25] ROMEROGARC A V, KRYNKIN A, GARCIAARAFI L M, et al. Multi-resonant scatterers in sonic crystals locally multi-resonant acoustic metamaterial [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2013, 332(1): 184-198.
- [26] CHANG K J, JUNG J, KIM H G, et al. An application of acoustic metamaterial for reducing noise transfer through car body panels [C]// *Proceedings of the*

- SAE 10th International Styrian Noise, Vibration and Harshness Congress. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2018: 2018-01-1566.
- [27] FAN Li, CHEN Zhe, ZHANG Shuyi, et al. An acoustic metamaterial composed of multi-layer membrane-coated perforated plates for low-frequency sound insulation [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(15): 151908.
- [28] ZHANG Hao, WEN Jihong, XIAO Yong, et al. Sound transmission loss of metamaterial thin plates with periodic subwavelength arrays of shunted piezoelectric patches [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 343: 104-120.
- [29] LI Zhen, ZHU Yun, LI Yueming. Thermal stress effects on the flexural wave bandgap of a two-dimensional locally resonant acoustic metamaterial [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123(19): 195101.
- [30] XIAO Xiao, WU Jinbo, MIYAMARU Fumiaki, et al. Fano effect of metamaterial resonance in terahertz extraordinary transmission [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(1): 011911.
- [31] NAIFY C J, CHANG C, MCKNIGHT G, et al. Scaling of membrane-type locally resonant acoustic metamaterial arrays [J]. *Acoustical Society of America*, 2012, 132(4): 2784-2792.
- [32] LIU Chongrui, WU Jiuhui, CHEN Xu, et al. A thin low-frequency broadband metasurface with multi-order sound absorption [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52(10): 105302.
- [33] 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.
- [34] LU Kuan, WU Jiuhui, JING Li, et al. The two-degree-of-freedom local resonance elastic metamaterial plate with broadband low-frequency bandgaps [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(9): 095104.
- [35] MORANDI F, MINIACI M, MARZANI A, et al. Standardised acoustic characterisation of sonic crystals noise barriers: Sound insulation and reflection properties [J]. *Applied Acoustics*, 2016, 114: 294-306.
- [36] BADREDDINE ASSOUAR M, SENESI M, OUDICH M, et al. Broadband plate-type acoustic metamaterial for low-frequency sound attenuation [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(17): 173505.
- [37] VARANASI S, BOLTON J S, SIEGMUND T H, et al. The low frequency performance of metamaterial barriers based on cellular structures [J]. *Applied Acoustics*, 2013, 74(4): 485-495.
- [38] 左曙光, 姝孟, 欢魏, 等. 声子晶体特性研究及在车身板件中减振降噪的应用 [J]. *材料导报: B 研究篇*, 2012, 26(9): 123-126.
- ZUO Shuguang, MENG Shu, WEI Huan, et al. Properties of phononic crystals and applications of vibration and noise reduction with those on the body panels [J]. *Materials Reports: B Research Paper*, 2012, 26(9): 123-126.
- [39] ASTM. Standard test method for measurement of normal incidence sound transmission of acoustical material based on the transfer matrix method: E2611-09 [S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2019: 1-14.
- [40] ZHANG Qianqian, ZHOU Guojian, TIAN Xiujie, et al. Broadband membrane-type acoustic metamaterial structures with polymorphic anti-resonance modes [C] // *Proceedings of the 2019 SAE Noise and Vibration Conference and Exhibition*. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2019: 01-1574.
- [41] 中国国家标准化管理委员会. 声学 建筑和建筑构件隔声声强法测量: 第1部分 实验室测量: GB/T 31004.1—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 1-14.
- [42] ZHOU Guojian, WU Jiuhui, LU Kuan, et al. An approach to broaden low-frequency bandwidth of sound insulation by regulating dynamic effective parameters of acoustic metamaterials [J]. *Journal of Physics: D Applied Physics*, 2019, 52: 215102.
- [43] SUI Ni, YAN Xiang, HUANG Taiyun, et al. A lightweight yet sound-proof honeycomb acoustic metamaterial [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(17): 171905.

(编辑 武红江)