

宽频带薄膜型声学超材料附加质量分布规律分析

丁 北^{1,2}, 王 炜^{1,2}

(1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300350; 2. 天津市非线性动力学与控制重点实验室, 天津 300350)

摘 要: 薄膜型声学超材料因其良好的低频域减振降噪性能而备受关注, 其中涉及到的附加质量分布问题也具有重要的研究价值, 直接关系到薄膜结构的整体隔声性能。考虑到现有针对质量分布规律的研究仍有待深化, 该文章以一类薄膜型声学超材料为对象, 通过分析多种附加质量分布形式(集中、分散)对应的结构隔声特性, 验证了等质量下分散结构相对于集中分布具备更好的隔声性能, 进一步明确了质量块质量、数量及其布置环数对于隔声性能的影响规律, 形成了可在低频域实现宽频降噪的质量分布方案, 即: 质量块均匀分布在圆膜上而不产生聚集。仿真及试验分析均表明, 该方案能够在保持超材料深亚波长尺寸的同时, 强化低频域宽频减振降噪性能, 有利于实现结构轻量化设计, 并为目标驱动的薄膜型声学超材料功能优化提供了参考依据。

关键词: 薄膜型声学超材料; 质量分布; 隔声性能

中图分类号: O422. 4; TB353 + .1

文献标志码: A

DOI: 10. 13465 /j. cnki. jvs. 2023. 15. 027

Additional mass distribution law of broadband membrane-type acoustic metamaterial

DING Bei^{1,2}, WANG Wei^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Nonlinear Dynamics and Control, Tianjin 300350, China)

Abstract: Membrane-type acoustic metamaterial attracts much attention due to its excellent performance in low frequency domain for vibration and noise reduction, the additional mass distribution problem involved also has important study value, it is directly related to the overall sound insulation performance of membrane-type structure. Here, considering the existing study on mass distribution law still needing to be deepened, a class of membrane-type acoustic metamaterials was taken as the study object, structural sound insulation characteristics corresponding to various additional mass distribution forms of concentrated form and dispersed form were analyzed to verify dispersed structures under the condition of equal mass having better sound insulation performance compared to centralized mass distribution, further clarify influence laws of mass blocks' mass, number, and their arrangement ring number on sound insulation performance, and form the mass distribution scheme being able to realize broadband noise reduction in low frequency-domain. This scheme was that mass blocks being uniformly distributed on a circular film without causing aggregation. Both simulation and experimental analysis showed that this scheme can keep deep subwavelength size of metamaterial, and enhance low-frequency domain broadband vibration and noise reduction performance to be conducive to realizing lightweight structural design, and provide a reference basis for functional optimization of target driven membrane-type acoustic metamaterials.

Key words: membrane-type acoustic metamaterial; mass distribution; sound insulation performance

由于低频声波具有波长较长、穿透能力强且不易衰减的特点, 因此涉及相关领域的减振降噪问题具有重要的研究价值。根据质量作用定律, 对低频声波的控制需要障碍物具备较大的尺寸或质量, 这无疑对航

空航天、精密机械等领域的低频域减振降噪问题提出了更高的要求。近年来, 局域共振型声学超材料的出现为此类低频声波的抑制与调控提供了新的思路^[1-2], 其中精巧设计的元胞赋予了超材料异于自然材料的特性, 能够在特定频域以亚波长尺寸实现对空气声^[3]、水声^[4-5]和振动^[6-7]的吸收和阻隔, 并产生负质量密度^[8]、负体积模量^[9]或者二者兼具的双负现象^[10]。作为本文的研究重点, 薄膜型声学超材料(membrane-type

基金项目: 国家自然科学基金(12172248; 12021002)

收稿日期: 2022-05-25 修改稿收到日期: 2022-10-18

第一作者 丁北 女, 博士生, 1996 年生

通信作者 王炜 男, 博士, 副教授, 1980 年生

acoustic metamaterials, MAM) 是根据局域共振原理^[11-12]设计的一类复合结构,由外框固定的张紧薄膜以及附加质量块组成,具有低频隔声性能好、深亚波长、环境友好等特点,近年来已取得了丰富研究成果^[13-20]。例如: Zhang 等研究了 MAM 的隔声性能随材料参数的变化规律,证明了其完全依赖于材料的本构参数和人为设计的几何参数,即通过材料选择和参数设计,可以实现在目标频带内有效抑制声波的传播。然而,传统超材料结构制备完成后各个参数也随之固定,导致工作频带宽度受到限制。因此,研究人员尝试从材料、结构等方面入手,甚至直接引入可调措施进行频带的主动控制^[21-25],例如: 利用电压调节介电弹性薄膜的张力,从而控制衰减频带的位置。此外,还有部分学者通过调整附加质量形状和位置,以达到拓宽结构隔声频带的目的,其中: Naify 等^[26]研究了带有环形质量的 MAM 的传输损耗问题,发现增加环形质量可以增加 STL(sound transmission loss) 的带宽或者引入多个峰值,可以在一定频带内增加结构隔声能力。Zhou 等^[27]利用多谐振单元模型替代原单一谐振器,产生多个负质量区域,对应形成多个隔声频带。Lu 等^[28]研究了 MAM 的点质量、环形质量和开口环形质量对隔声性能的影响,优化了偏心质量的分布以改善声学性能,从而进一步明确了附加质量对超材料隔声性能的影响。由此可知,质量分布是否合理将直接影响结构隔声性能的优劣,合理的质量分布可以在不损失结构隔声性能的前提下降低结构复杂性。然而,上述工作仍以单一质量分布问题为主,缺少对于附加质量分布方式的系统性分析。

综上所述,MAM 对于隔声降噪具有良好的潜在结构优势,但是要充分发挥上述优势,需要对附加质量分布规律进行深入的研究。因此,本文以多种分散型附加质量的 MAM 为对象,通过 COMSOL 数值仿真和阻抗管试验测试相结合的手段,评估单向和双向质量分布方案对于隔声性能的影响;获得了圆膜上质量块质量、数量、布置环数对结构隔声性能的影响规律。据此设计的声学超材料,可在低频域获得超宽隔声频带,避免了为调节频带引入的复杂结构和外部激励条件。相关质量分布规律对目标驱动的圆形薄膜声学超材料设计具有重要的借鉴价值。

1 仿真计算与分析

声学超材料的附加质量分布的变化影响结构与声波之间的相互作用,进而影响超材料的隔声性能。因此,本文在低频域下(50 ~ 1 650 Hz) ,在总附加质量保持一致时,以具备不同质量分布规律的 3 组样本为例,考察质量块沿圆膜周向分散布置以及径向和周向同时

分散布置对结构隔声性能的作用效果。从有限元数值仿真和物理试验两个角度,深入讨论质量块分布数量、质量及划分环区域数对结构隔声性能的影响规律。

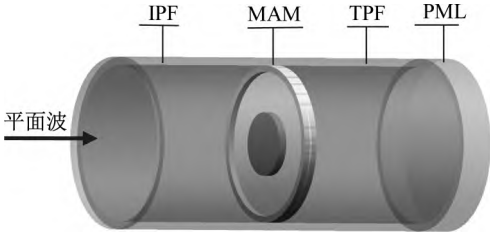


图1 MAM 仿真计算示意图
Fig. 1 Simulation diagram of MAM

仿真方面,应用有限元软件 COMSOL Multiphysics 5. 5 进行: 选择声-固相互作用模块,进行频域研究,频率范围 50 ~ 1 650 Hz,步长 10 Hz; 整体网格尺寸均小于最小波长的 1/6,其中,MAM 元胞网格进一步细化,以确保结果足够精确;如图 1 所示,模型包括空气域和固体域两部分,空气域包括入射压力场(incident pressure field,IPF)、透射压力场(transmission pressure field,TPF) 和完美匹配层(perfect match layer,PML),固体域对应 MAM 元胞。其中,空气域与固体域交界为声-结构耦合边界,空气域的其他边界为硬声场边界,MAM 的四周选择固定边界;入射压力场的激励设置为幅值 1 Pa 的平面波,经 IPF 与 MAM 耦合,引起薄膜的振动,进而带动周围空气运动,将声波辐射到 TPF。TPF 末端连接 PML,防止声波多次反射,影响计算结果。此处,将传声损失(L_{ST}) 作为声波对结构阻隔能力的评价指标,其计算公式为

$$L_{ST} = 10\lg\left(\frac{1}{T}\right) \tag{1}$$

式中, $T = (I_{out}/I_{in})^2$ 为透射率, I_{in} 为入射场声强, I_{out} 为透射场声强。进行样本特性对比时,计算了 15 dB 带宽的宽度作为样本性能的评价指标。

材料方面,选择了经济环保,来源广泛的聚酰亚胺薄膜,厚度为 0. 05 mm; 附加质量是高度为 2 mm 的钕铁硼磁铁,成对吸附在薄膜两侧; 外框是宽度为 4 mm,高度为 4 mm 的铝框,材料参数如表 1 所示。

表1 材料参数
Tab. 1 Parameters of the materials

材料	E/Pa	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	ν
铝	7.1×10^{10}	2 700	0. 346
聚酰亚胺	2.0×10^9	1 200	0. 360
钕铁硼	1.6×10^{11}	7 450	0. 240

MAM 样本如图 2 所示,其中: S1(a) 为传统的 MAM,薄膜用外框固定,附加质量作为一个整体集中地附着在薄膜上。为探讨附加质量分布差异对于超材料隔声性能的影响,将 S1(a) 上集中的附加质量在圆膜中心和四周排布,其中,中心区域和四周区域分别为薄

膜半径 $0 < r < 10 \text{ mm}$ 的圆形区域和 $10 \text{ mm} < r < 46 \text{ mm}$ 的环形区域。附加质量表示为

$$m_t = m_c + m_r n_r = m_c + m_r \sum_{i=1}^k n_i \quad (2)$$

式中: m_t 为附加总质量; m_c 为中心位置质量; m_r 和 n_r 分别为周向质量块的质量和数量; n_i 为第 i 个环形区域上质量块个数; k 为周向均匀划分的环区域数, 其中, 当 $k=1$ 时, 质量仅在圆膜周向分散, 当 $k>1$ 时, 质量在周向和径向同时分散。如图 2(b) 所示, 虚线区域表示 k 个环区域, 其中第 2 个环形区域布置了质量块。

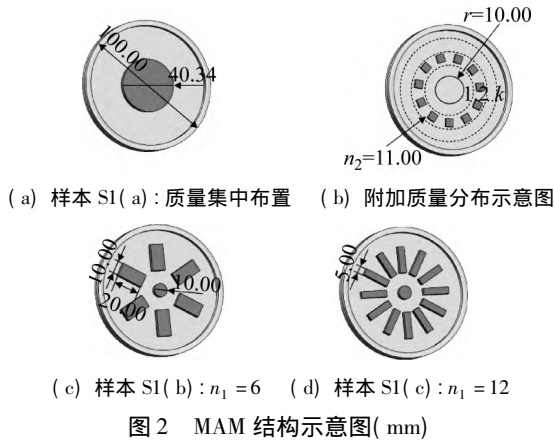


图 2 MAM 结构示意图 (mm)

Fig. 2 Diagram of membrane-type acoustic metamaterials (mm)

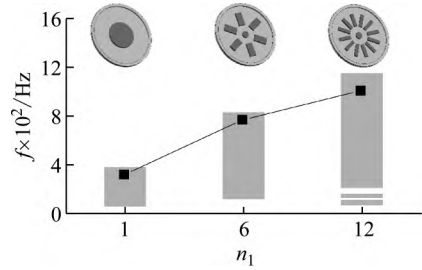
以下将总附加质量 m_t 和中心区域质量 m_c 固定, 分别考察质量块质量 m_r 与数量 n_r 和所分布环区域数 k 的变化对隔声带宽的影响, 并进行传声损失的对比讨论。

1.1 附加质量的周向分散对隔声效果的影响

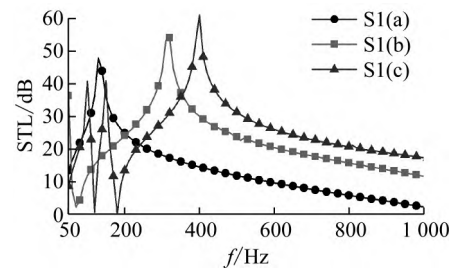
当 $k=1$ 时, 质量仅在周向分散, 在径向仍保持集中; 同时, 对应于 n_1 的不同取值形成了周向分散程度不同的放射形分布。此处, 先后取 $n_1=6, 12$, 并分别记为 S1(b) 和 S1(c), 与 S1(a) 组成第一组样本进行对比。

第一组样本 15 dB 隔声频带宽度和位置及传声损失, 如图 3 所示, 由于样本隔声频带较窄, 此处仅绘制 50~1 000 Hz 区间 STL 及等效参数。结果显示: 质量经过周向分散, S1(a) 的隔声带宽约增加了两倍, 体现了明显的带宽调节效果。对应于 S1(a), 此时质量集中布置 $m_r = m_t$, 共振频率仅由唯一质量块在声波的作用下产生, 其隔声峰值出现在较低频率处, 且整体隔声频带窄, 结构仅在 130 Hz 附近有隔声作用, 这恰好体现了常规 MAM 的局限性。然而, 随着 n_1 增加, m_r 逐渐减小, 共振频率增大, 质量块的分散激发了结构更加丰富的模式, 在形成放射形分布后, 隔声性能发生了明显的变化。例如: 对应于样本 S1(c), $m_r \approx m_t/12$, $n_1=12$, 随着质量块质量减小, 传声损失依次出现了多个局部峰值, 整体隔声带宽增加。图 4 展示了部分振动模式, 其中包含了周向质量、中心质量和薄膜各自振动形式及

其协同振动形式, 连续产生了多阶反共振模式, 显著丰富了结构与入射声波之间的耦合形式, 因而隔声性能在更宽频带得到强化。另一方面, 薄膜横向平均位移 d_z 与等效质量 M_{eff} 和等效刚度 K_{eff} 分别满足 $M_{\text{eff}} \propto -\omega^2 \cdot d_z^{-1}$ 和 $K_{\text{eff}} \propto d_z^{-1}$ 。如图 5 所示, 当 STL 到达峰值时, $d_z=0$, MAM 的隔声能力来源于此时等效质量 M_{eff} 和等效刚度 K_{eff} 产生了极值跳变, 声波难以激励结构振动, 结构也无法将声波再辐射出去。因此, 相比于集中分布, 放射形分散分布具备良好的宽频隔声能力。



(a) 在测试频段内 15 dB 隔声频带宽度及位置



(b) 传声损失

图 3 第一组样本

Fig. 3 The first set of samples

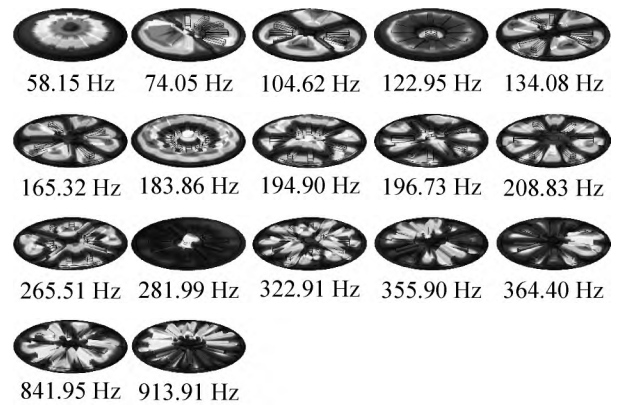
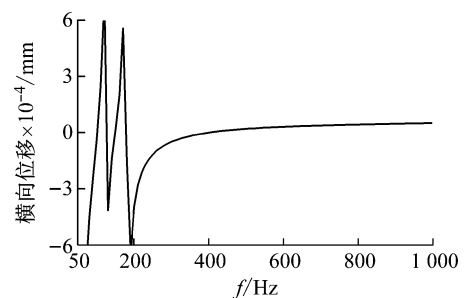
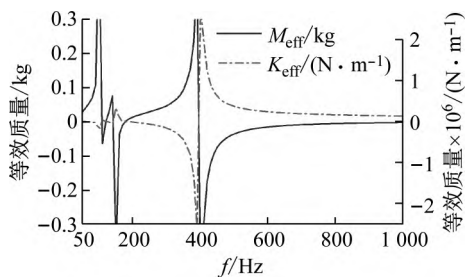


图 4 样本 S1(c) 的模式

Fig. 4 Modes of sample S1(c)



(a) 横向平均位移 d_z



(b) 等效质量 M_{eff} 和等效刚度 K_{eff}

图5 样本 S1(c) 的等效参数

Fig.5 Effective parameters of sample S1(c)

1.2 附加质量的双向分散对隔声效果的影响

1.2.1 质量块数量与质量的影响

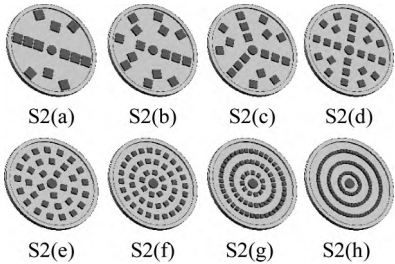
首先讨论附加质量周向和径向同时分散时,质量块的数量及质量变化对结构隔声性能的影响。在总附加质量保持一致前提下,取 $k=3$,即质量块沿圆膜周向分布在3个环形区域上(圆膜半径 $10\text{ mm}<r<22\text{ mm}$, $22\text{ mm}<r<34\text{ mm}$ 和 $34\text{ mm}<r<46\text{ mm}$ 的3个等宽度的区域),方形质量块边长从 10 mm 减小到 3 mm ,对应质量块数量 n_r 由 12 增加到 133 ,记为样本 S2(a)~S2(h)。在布置质量块时,首先在圆膜的单侧径向布置,再在各环形区域等角度填充质量块至指定数量。每个环形区域上所布置的质量块总质量与对应环形区域的内径成正比,具体布置方案如表2所示。

表2 第二组样本布置方案

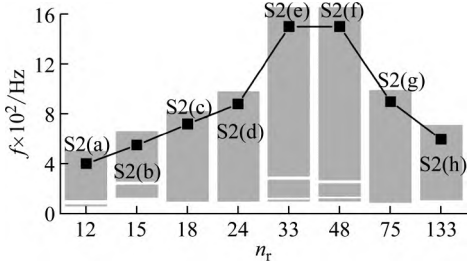
Tab.2 Distribution patterns of the second set of samples			
样本编号	质量块边长/mm	n_r	$[n_1\ n_2\ n_3]$
S2(a)	10	12	[2 4 6]
S2(b)	9	15	[2 5 8]
S2(c)	8	18	[3 6 9]
S2(d)	7	24	[4 8 12]
S2(e)	6	33	[5 11 17]
S2(f)	5	48	[8 16 24]
S2(g)	4	75	[11 25 39]
S2(h)	3	133	[22 44 67]

图6为各样本示意图及其在测试频段内15 dB隔声频带宽度及位置。结构隔声带宽先递增后递减,其峰值达到了1500 Hz。具体而言,以样本 S2(b)、S2(e)和 S2(h)为例,其传声损失如图7所示,其中:曲线整体依然保持先增加后减小的趋势,并在0~400 Hz区间呈现了多峰多谷、大波动的特点,不同之处在于样本 S2(b)和 S2(h)在波动处达到峰值后迅速衰减,而 S2(e)在产生波动后继续增强,在910 Hz处才达到峰值。相对于2.1节中的周向分布,质量双向分散后, m_r 减小,径向上质量块之间距离增加,质量不断分散; n_i ($i=1\ 2\ 3$) 增加,周向上质量块之间距离减小,质量不断聚集。样本 S2(b)和 S2(h)分别在径向和周向上产生了质量聚集,当间距足够小时,可视为类似样本

S1(a)的集中质量,因此隔声性能衰减。样本 S2(e)介于周向或径向聚集的中间过渡阶段,在双向上质量均匀分散,产生的隔声频带宽度和整体隔声性能优于其他样本,特别在400 Hz以上范围,具有最理想的隔声性能。



(a) 示意图



(b) 在测试频段内15 dB隔声频带宽度及位置

图6 第二组样本

Fig.6 The second set of samples

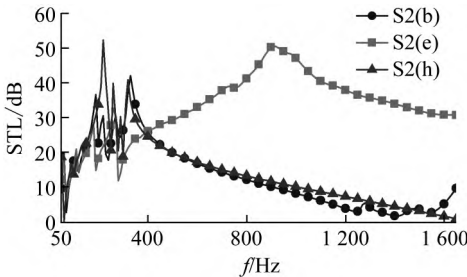


图7 样本 S2(b)、S2(e)和 S2(h)的传声损失

Fig.7 STL of samples S2(b), S2(e) and S2(h)

1.2.2 附加质量分布环区域数的影响

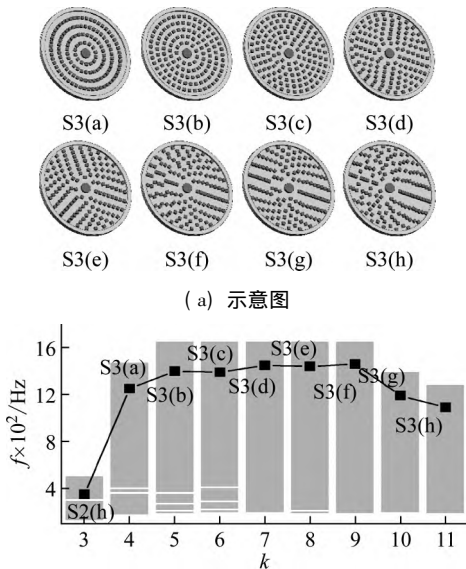
样本 S2(h)质量块较小,便于布置在多个环形区域上。因此,采用此模型,讨论在质量块边长为 3 mm ,总数量 $n_r=133$,即总附加质量保持不变前提下,环区域数 k 由 3 增加到 11 ,对应的环形区域宽度由 12 mm 减小到 3.2 mm 时,对隔声性能的影响,记为样本 S3(a)~S3(h)。各环形区域对应附加质量与其内径成正比,其布置方式与第二组样本相同:首先沿圆膜单侧径向布置,再填充每个环形区域质量块至指定数量,具体方案如表3所示。

由于第三组样本隔声频带较宽,为了清晰对比各样本隔声特性,绘制了其在测试频段内20 dB隔声频带宽度及位置。如图8所示,除 S2(h),其他样本隔声带宽均达到了1000 Hz以上,隔声性能覆盖了大部分测试区间。图9列举了样本 S3(a)、S3(d)和 S3(g)传声损失,与第二组样本类似,整体保持多峰多谷、大波动

的特点,曲线的峰值所在频率向高频移动,随后向低频移动。 $m_r = 0.007m_l$,质量分散程度较第二组增强,因此第三组样本的整体隔声性能较好。当 k 逐渐增加时,圆膜上质量分布从周向聚集转变到径向聚集,因此出现了隔声带宽先增加,后减小的趋势。结合上述结论,质量分散布置时,受到总质量保持一致的限制, n_r 与 k 的变化都可能导致质量在某一方向产生聚集,为得到结构宽频带隔声性能,应将质量块合理布置,避免这种质量聚集产生。

表 3 第三组样本布置方案

Tab. 3 Distribution patterns of the third set of samples			
样本编号	环形区域 宽度/mm	k	$[n_1\ n_2\ \cdots\ n_k]$
S2(h)	12.0	3	[22 44 67]
S3(a)	9.0	4	[14 27 40 52]
S3(b)	7.2	5	[11 19 27 34 42]
S3(c)	6.0	6	[9 14 20 25 30 35]
S3(d)	5.1	7	[8 11 15 19 23 27 30]
S3(e)	4.5	8	[7 9 12 15 18 21 24 27]
S3(f)	4.0	9	[6 8 10 12 15 17 19 22 24]
S3(g)	3.6	10	[5 7 9 10 12 14 16 18 20 22]
S3(h)	3.2	11	[5 6 8 9 10 12 14 15 16 18 20]



(b) 在测试频段内 20 dB 隔声频带宽度及位置

图 8 第三组样本

Fig. 8 The third set of samples

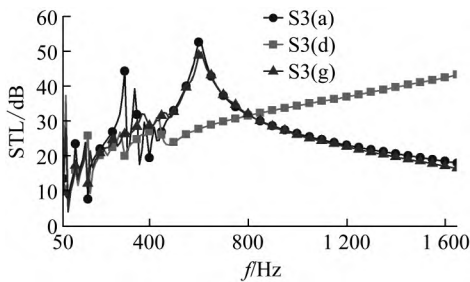
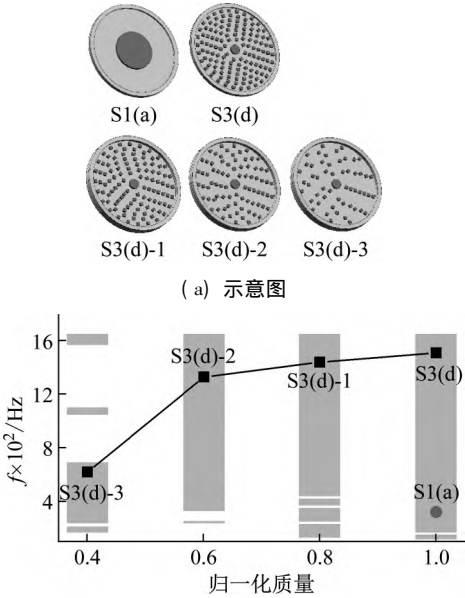


图 9 样本 S3(a)、S3(d) 和 S3(g) 的传声损失

Fig.9 STL of samples S3(a) ,S3(d) and S3(g)

第三组样本均具有较宽的隔声频带,适当减小总质量仍然能够保持宽频隔声。以 S3(d) 为例,减小质量块数量 n_r 至 80% ,60% 和 40% ,分别记为样本 S3(d)-1 ,S3(d)-2 ,S3(d)-3。如图 10 所示,相比于集中布置方案 S1(a) ,S3(d)-3 以 40% 的质量在测试频段内获得了额外一倍的隔声频带。因此,小尺寸质量块合理分散布置在圆膜上,可以拓宽隔声频带同时实现超材料结构轻质化,有利于 MAM 的实际应用。



(b) 在测试频段内 15 dB 隔声频带宽度及位置

图 10 S3(d) 及其轻质化样本

Fig. 10 The lightweight samples of S3(d)

2 试验测试

为了验证仿真结果的准确性,在每组中选择 3 个样本进行测量验证。利用阻抗管测量样本的隔声性能,基本装置由阻抗管、传声器(4 个)、功率放大器、数据采集器和计算机组成,连接方式如图 11 所示。阻抗管的内径为 100 mm,测试区间为 63 ~ 1 600 Hz。在试件四周缠绕生料带后安装进阻抗管,以确保密封性良好,钹铁硼磁铁靠磁力成对吸附在薄膜两侧以高效利用薄膜,样本的尺寸与仿真参数保持一致。



图 11 试验装置图

Fig. 11 Photograph of test system

图 12(a) 展示了第一组样本试验结果,质量逐步分散引起 STL 波动,并将隔声峰值不断向高频方向推移,因而验证了周向分散质量比集中质量具备更宽隔声频带。图 12(b) 描述质量在双向分散时,隔声能力随质

量块数量与质量的变化。较大质量块不利于质量的分散;减小质量导致数量增加,周向产生质量聚集。因此,这两种情况相应隔声频带较窄。S2(e)介于二者之间,总质量较均匀地分散在圆膜上,因此在测试区间保持良好的隔声性能。类似地,图12(c)所展示了同尺寸质量块在不同环形区域下的分布,其整体隔声性能较第二组进一步提高。环区域太小或太大会引起质量块在周向或径向的聚集,STL在波动处达到峰值后迅速衰减,如S3(a)和S3(g);S3(d)处于过渡阶段,较小的质

量块将总质量分散,而且在周向和径向都保持一定距离,在经历波动后STL持续增加,具有理想的宽频带隔声能力。试验结果中STL峰值均低于仿真结果,且曲线波动不剧烈,主要原因是仿真中未考虑材料阻尼的影响;数值误差是由样本尺寸偏差以及磁铁之间磁力相互作用产生。然而,在整体角度分析,测量的试验结果与仿真结果规律保持一致。因此,试验结果验证了上述分析,进一步证实本文提出质量布置方案的有效性。

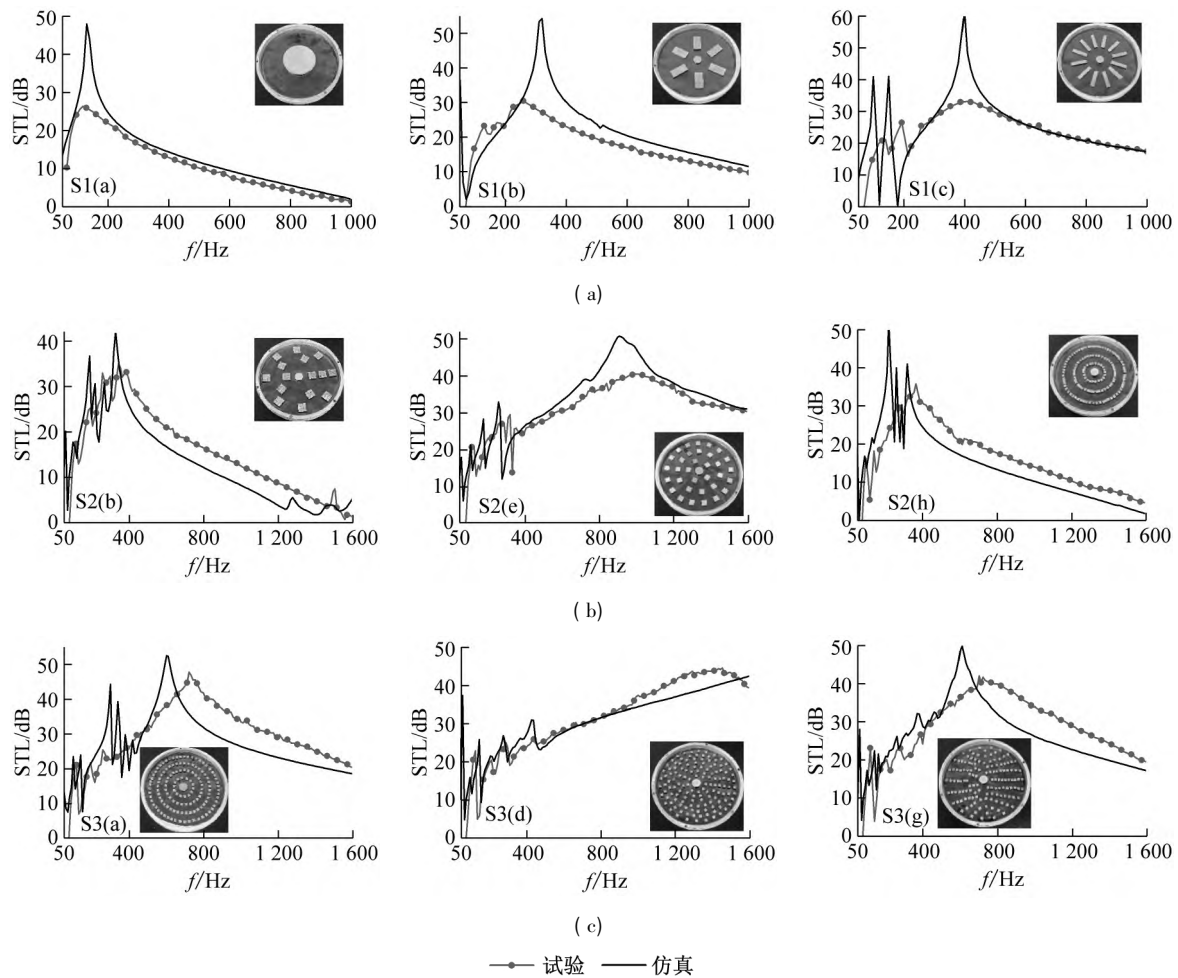


图12 试验样本图片及相应传声损失

Fig. 12 Photographs of samples and corresponding STL

综上所述,本文在保持总质量 m_t 一定时,通过研究 n_r 和 m_r 以及 k 的变化,分析了附加质量在双向分布对整体结构隔声性能影响规律,提出一种利于结构轻质化的附加质量布置方案。相比常见的集中布置,将质量分散在薄膜上更利于结构获得宽频带隔声性能,因为分散的质量显著丰富了结构与声波耦合的模式,使多阶反共振模态连续出现,STL相应出现多个峰值,隔声性能在宽频带得以保持;质量在圆膜上双向分散而不产生任一方向的质量集中时,隔声能力比仅在周向上分散更好,若出现质量聚集,隔声性能随之下降;较小的 m_r 更利于总质量在整个圆膜上均匀分布,更易

获得超宽频带,同时有助于实现结构轻质化。

3 结论

本文通过仿真与试验结合,研究了等质量下,附加质量在周向和径向分散布置对MAM隔声性能的影响,结果表明:

- (1) 相比传统布置方式,质量分散布置可使结构获得额外的隔声频带,提高隔声性能,其中额外获得的隔声频带宽度取决于质量布置的分散程度。
- (2) 在双向均匀布置附加质量时,结构具有超宽频带的隔声性能,15 dB带宽可达到1 500 Hz。

(3) 小质量块利于提高总质量的分散程度,更容易获得超宽隔声频带,STL在90%的测试区间达到了20 dB以上;同时利于结构轻量化,仅以40%质量产生的带宽约为集中质量对应带宽的2倍。

综上所述,本文通过对比集中与分散质量的隔声特性,发现均匀分散质量的薄膜结构具备更好的隔声性能,明确了质量块大小及布置环数对隔声性能的影响规律,提供了一种在低频域实现宽频带的隔声方案。在结构保持深亚波长尺寸同时,显著提高了MAM在低频域的隔声频带带宽。相关工作作为后续目标驱动的MAM实际应用提供了设计参考依据。

参考文献

- [1] LIU Z Y, ZHANG X X, MAO Y W, et al. Locally resonant sonic materials[J]. *Science*, 2000, 289: 1734–1736.
- [2] 罗英勤, 楼京俊, 张焱冰. 内嵌局域共振型散射体结构的低频吸声性能研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(8): 86–92.
LUO Yingqin, LOU Jingjun, ZHANG Yanbing. A study on low frequency sound absorption performance of structure embedded local resonant scatters[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(8): 86–92.
- [3] 牛嘉敏, 吴九汇. 非对称类声学超材料的低频宽带吸声特性[J]. *振动与冲击*, 2017, 37(19): 45–49.
NIU Jiamin, WU Jiuhui. Low frequency wide band sound absorption performance of asymmetric type acoustic metamaterials[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 37(19): 45–49.
- [4] GU Y H, ZHONG H B, BAO B, et al. Experimental investigation of underwater locally multi-resonant metamaterials under high hydrostatic pressure for low frequency sound absorption[J]. *Applied Acoustics*, 2021, 172: 107605.
- [5] 马承志, 王立博, 吴九汇. 水下吸声超材料的质量集中效应[J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(12): 163–171.
MA Chengzhi, WANG Libo, WU Jiuhui. Mass concentration effect of underwater sound-absorbing metamaterials[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(12): 163–171.
- [6] 张印, 尹剑飞, 温激鸿, 等. 基于质量放大局域共振型声子晶体的低频减振设计[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(17): 26–32.
ZHANG Yin, YIN Jianfei, WEN Jihong, et al. Low frequency vibration reduction design for inertial local resonance phononic crystals based on inertial amplification[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(17): 26–32.
- [7] 吴昱东, 李人宪, 丁渭平, 等. 基于局域共振声子带隙的扭转减振器设计方法[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(9): 180–184.
WU Yudong, LI Renxian, DING Weiping, et al. Design method for torsional vibration dampers based on local resonance phononic crystals band-gap[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(9): 180–184.
- [8] YANG Z Y, MEI J, YANG M, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(20): 204301.
- [9] FANG N, XI D J, XU J Y, et al. Ultrasonic metamaterials with negative modules[J]. *Nature Materials*, 2006, 5: 452–456.
- [10] DING Y Q, LIU Z Y, QIU C Y, et al. Metamaterial with simultaneously negative bulk modulus and mass density[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(9): 093904.
- [11] STEIN A, NOUH M, SINGH T. Widening, transition and coalescence of local resonance band gaps in multi-resonator acoustic metamaterials: from unit cells to finite chains[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 523: 116716.
- [12] 杨文, 杨凯伦, 郭旭, 等. 附着式局域共振声子晶体薄板的带隙解析解[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(8): 238–243.
YANG Wen, YANG Kailun, GUO Xu, et al. Analytical sound of band gap in an attached locally resonant phononic crystal thin plate[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(8): 238–243.
- [13] BAE M H, OH J H. Amplitude-induced bandgap: new type of bandgap for nonlinear elastic metamaterials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2020, 139: 103930.
- [14] CHEN Y Y, HUANG G L, ZHU X M, et al. Analytical coupled vibroacoustic modeling of membrane-type acoustic metamaterials: membrane model[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 136(3): 969–979.
- [15] 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.
- [16] MA F Y, HUANG M, WU J H. Acoustic metamaterials with synergetic coupling[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(21): 215102.
- [17] WANGX P, CHEN Y Y, ZHOU G J, et al. Synergetic coupling large-scale plate-type acoustic metamaterial panel for broadband sound insulation[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 459: 114867.
- [18] ZHANG Y G, WEN J H, XIAO Y, et al. Theoretical investigation of the sound attenuation of membrane-type acoustic metamaterials[J]. *Physics Letters A*, 2012, 376(17): 1489–1494.
- [19] 曹卫锋, 白鸿柏, 朱庆. 薄膜型声学超材料的低频吸收性能研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 27(14): 188–194.
CAO Weifeng, BAI Hongbai, ZHU Qing. Analysis on the low frequency acoustic absorption performance of a metamaterial membrane[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 27(14): 188–194.
- [20] 朱庆, 白鸿柏, 路纯红, 等. 薄膜超材料的等效特性分析及试验研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(18): 91–97.
ZHU Qing, BAI Hongbai, LU Chunhong, et al. Analysis on the equivalent properties of metamaterial membranes[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(18): 91–97.
- [21] LANGFELDT F, KEMSIES H, GLEINE W, et al. Perforated membrane-type acoustic metamaterials[J]. *Physics Letters A*, 2017, 381(16): 1457–1462.
- [22] SUN K H, KIM J E, KIM J, et al. Sound energy harvesting using a doubly coiled-up acoustic metamaterial cavity[J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(7): 075011.

参考文献

- [1] BRUGMANS J. Parametric instability of deep-water risers [D]. Delft: Delft University of Technology, 2005.
- [2] HSU C S. The response of a parametrically excited hanging string in fluid [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1975, 39: 305–316.
- [3] KUIPER G L, BRUGMANS J, METRIKINE A V. Destabilization of deep-water risers by a heaving platform [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2008, 310(3): 541–557.
- [4] 杨和振, 李华军. 参数激励下深海立管动力特性研究 [J]. *振动与冲击*, 2009, 28(9): 65–69.
YANG Hezhen, LI Huajun. Research on dynamic characteristics of deep-sea riser under parametric excitation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(9): 65–69.
- [5] 张杰, 唐友刚, 黄磊. 深海立管参激振动研究综述 [J]. *船舶工程*, 2012(6): 1–4.
ZHANG Jie, TANG Yougang, HUANG Lei. A review of research on parasitic vibration of deep-sea risers [J]. *Ship Engineering*, 2012(6): 1–4.
- [6] 肖飞. 深海顶张力立管在多频参数激励下的稳定性分析和可靠性评估 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [7] 王威, 陈炉云. 复杂预应力对立管参激振动特性的影响分析 [J]. *船舶力学*, 2018, 22(2): 214–223.
WANG Wei, CHEN Luyun. Analysis of the influence of complex prestress on the parasitic vibration characteristics of risers [J]. *Ship Mechanics*, 2018, 22(2): 214–223.
- [8] MENG S, SONG S D, CHE C D, et al. Internal flow effect on the parametric instability of deepwater drilling risers [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 149: 305–312.
- [9] 董自鑫, 桑松, 曹爱霞, 等. 单频与多频激励下深海 TTR 立管参激特性分析 [J]. *中国造船*, 2018, 62(1): 110–122.
DONG Zixin, SANG Song, CAO Aixia, et al. Analysis of deep-sea TTR riser excitation characteristics under single-frequency and multi-frequency excitation [J]. *China Shipbuilding*, 2018, 62(1): 110–122.
- [10] 陈柏全, 余杨, 余建星, 等. 顶张式立管液压气动式张紧器的数值模拟 [J]. *振动与冲击*, 2019, 38(10): 85–91.
CHEN Baiquan, YU Yang, YU Jianxing, et al. Numerical simulation of hydraulic pneumatic tensioner for top tension risers [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(10): 85–91.
- [11] PESTANA R G, ROVERI F E, FRANCISS R, et al. Marine riser emergency disconnection analysis using scalar elements for tensioner modelling [J]. *Applied Ocean Research*, 2016, 59: 83–92.
- [12] LI S, CAMPBELL M, HOWELLS H, et al. Tension loss of hydro-pneumatic riser tensioners [C]//ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Nantes: ASME, 2013.
- [13] ANDERSSON S, SÖDERBERG A, BJÖRKLUND S. Friction models for sliding dry, boundary and mixed lubricated contacts [J]. *Tribology International*, 2007, 40(4): 580–587.
- [14] LEE H, ROH M I, HAM S H, et al. Dynamic simulation of the wireline riser tensioner system for a mobile offshore drilling unit based on multibody system dynamics [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 106: 485–495.
- [15] 王坤鹏, 薛鸿祥, 唐文勇. 全耦合深海平台系统中液压张紧器的数值模拟 [J]. *上海交通大学学报*, 2012, 46(10): 1652–1657.
WANG Kunpeng, XUE Hongxiang, TANG Wenyong. Numerical simulation of hydraulic tensioner in fully coupled deep-sea platform system [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2012, 46(10): 1652–1657.
- [16] YU A L, CHENG Y M, BHAT S. Evaluation of key hydraulic tensioner performance parameters for ultra deep water applications [C]//ASME International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engineering. Estoril: ASME, 2008.
- [17] 吴晨, 余建星, 余杨, 等. 张紧器系统对顶张式立管固有频率的影响研究 [J]. *振动与冲击*, 2020, 39(11): 209–216.
WU Chen, YU Jianxing, YU Yang, et al. Research on the influence of tensioner system on natural frequency of top-tensioned riser [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(11): 209–216.
- [18] PAÏDOUSSIS M P. Fluid-Structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow [M]. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2014.
- [19] 李欢, 李鹏, 范松, 等. 基于 AMESim 的隔水管张紧器抗反冲控制研究 [J]. *石油机械*, 2019, 47(9): 84–89.
LI Huan, LI Peng, FAN Song, et al. Research on anti-recoil control of riser tensioner based on AMESim [J]. *Petroleum Machinery*, 2019, 47(9): 84–89.
- [20] XWA B, XIA B, ZI B, et al. Dynamic recoil response of tensioner and riser coupled in an emergency disconnection scenario [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 247: 110730.
- [21] 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.
- [22] ZHOU G J, WU J H, LU K, et al. An approach to broaden the low-frequency bandwidth of sound insulation by regulating dynamic effective parameters of acoustic metamaterials [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52(21): 215102.
- [23] YU X, LU Z B, CUI F S, et al. Tunable acoustic metamaterial with an array of resonators actuated by dielectric elastomer [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2017, 12: 37–40.
- [24] ZHANG H, XIAO Y, WEN J H, et al. Ultra-thin smart acoustic metasurface for low-frequency sound insulation [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(14): 141902.
- [25] XING C, CHEN X X, GANG A S, et al. Active acoustic metamaterials with tunable effective mass density by gradient magnetic fields [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105: 071913.
- [26] LU Z B, YU X, LAU S K, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with eccentric masses for broadband sound isolation [J]. *Applied Acoustics*, 2020, 157: 107003.

(上接第 231 页)