飞行器舱室内壁蛛网仿生薄膜声学 超材料设计



曹尔泰1,延浩2,黄河源1,2

1.西北工业大学,陕西西安 710072

2.中国飞机强度研究所 航空声学与振动航空科技重点实验室, 陕西 西安 710065

摘 要:飞行器舱室内部噪声对乘员及飞行操控和通信构成了显著威胁,薄膜声学超材料(MAM)在满足轻量化要求的同时 具有出色的降噪性能,能够满足航空工业领域对降噪和飞行器重量的双重要求。受蛛网启发,本文通过结合膜、框和一组振 子设计了一种仿生薄膜声学超材料。计算和试验结果表明,仿生模型的振子质量减少了19%,降噪带宽扩展了61%。此外, 本文研究了三种设计参数(薄膜形状、振子位置和模型大小)对结构降噪性能的影响规律,并分析了其多级反共振模态。结 果表明,圆形模型在降噪性能上优于两个方形模型。当振子位置在半径比为0.54时,可获得最佳的降噪性能。模型在尺寸 减小时仍有较大的降噪效果,但当尺寸增大时有失效的可能。非固定框在2×2阵列模型中有助于形成反共振模态,而在3×3 阵列模型中作用则相反。根据不同的频率需求调节设计参数,能够适配于飞行器内部复杂、多变的噪声环境。

关键词:薄膜声学超材料;仿生结构;飞行器降噪;宽频吸声;结构设计;舱内噪声

中图分类号:V250.3

文献标识码:A

随着科技工业的快速发展,噪声污染已成为主要的环 境污染之一,在航空工业领域中尤为如此。由机械及气动 噪声引发的飞行器舱室内部噪声对乘员构成了显著威胁, 可能诱发乘员疲劳、损害听力,甚至妨碍飞行操控和通 信^[1-3]。常规的降噪手段包括抑制噪声源、控制传递路径以 及保护接收者,但抑制噪声源面临设计困难和影响航空性 能等挑战,保护接收者则难以防护低频噪声,而通过控制传 递路径来实现噪声的隔离和吸收显得更为实用,并且对已 定型的飞行器改造具有较高的适用性。然而,受质量定律 的限制^[4],传统的减振降噪材料和结构在低频段的效果有 限,且增大材料厚度或密度对改善效果的贡献并不显著,考 虑到航空工业领域对飞行器重量(质量)的高度敏感性,这 种方法的经济性不佳。因此,发展新的传递路径控制技术 以实现降低噪声、减轻重量、降低成本、优化飞行性能和提 升驾驶舒适度的目标迫在眉睫。

由 Yang Zhiyu 等^[5]首创的薄膜声学超材料(MAM)在共振频率附近已被证明具有有效的负动态模量,在满足轻量

DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2024.03.002

化要求的同时具有出色的降噪性能^[6]。与板和壳形超材料 不同,通过改变振子的形状、重量、数量和位置,薄膜声学超 材料单元的共振频率和声学特性可以更加灵活地变化^[7]。 声学超材料可以被广泛应用于航空航天领域^[8-11],王晓乐 等^[12]已经将声学超材料应用于直升机舱壁低频降噪。尽管 关于降噪的薄膜声学超材料已被广泛研究,但设计膜上振 子的质量分布以实现轻质结构、宽频带和高声学性能仍然 是一个挑战。

本文提出了应用于航空舱室壁板的蛛网仿生薄膜声学 超材料结构,该结构在保持轻量化的同时显著扩大了声衰 减带宽^[13-14]。蛛网结构的排列增强了振子和中心膜沿环向 和径向的耦合,从而在低频范围内产生更多相邻的多态反 共振模态,以扩展声衰减带宽。

本文研究了不同膜形状和振子位置对声衰减带宽的影 响,通过参数分析,设计了具有最佳降噪性能的薄膜声学超 材料,并讨论了该设计对模型大小的适用性,探讨了提高降 噪性能的机制和蛛网仿生设计的参数之间的交互作用。本

收稿日期: 2023-07-19; 退修日期: 2023-11-22; 录用日期: 2024-01-05 基金项目: 航空科学基金(20200015053004)

引用格式: Cao Ertai, Yan Hao, Huang Heyuan.Design of spider web bio-inspired membrane acoustic metamaterials for aircraft cabin walls [J].Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(03):11-19. 曹尔泰, 延浩, 黄河源. 飞行器舱室内壁蛛网仿生薄膜声学超材料设计 [J].航空科学技术, 2024, 35(03):11-19.

文为开发轻量化、宽带宽、高性能的降噪材料做出了贡献, 对飞行器舱室内壁降噪材料研发具有重要意义。

1 蛛网仿生薄膜声学超材料构型设计

如图1(a)所示,本文参考基准模型^[15],构建了一个中心 对称的近圆形蛛网结构。在蛛网结构的部分节点上添加了 适当大小和形状的振子,逐步细化了仿生模型的结构以扩 展声透射损失(STL)的带宽。在蛛网模型中,一个大的十 字形振子位于蛛网结构的中心,振子的4个臂与蛛网的4个 径向对齐。另外,蛛网的第一圈经过基准模型中圆形振子 的几何中心。在蛛网的第一圈中添加了形状为条形和十字 形的小振子,以丰富结构的混合振动模态。蛛网的第二圈 对应于框,提供了额外的结构支撑。

图1(b)展示了三种模型,这些模型具有相同的膜面积, 但膜的形状不同,其中圆形模型即为原始设计的蛛网仿生 模型。通过修改圆形模型的膜形状并保持其膜面积不变, 设计了方形模型1和方形模型2。两个方形模型均具有中 心对称性,模型内部振子的排列除了旋转角度,均与圆形模 型相同。方形模型1的十字形振子以其径向垂直于方形的 四边进行排列,而方形模型2的十字形振子以其径向指向 方形的4个角进行排列。如图1所示,受蛛网启发,本文将 膜、框和一组振子组合在一起,设计了一种基于蛛网构型的 仿生薄膜声学超材料。在此基础上,研究了薄膜形状、振子 位置和模型尺寸三个设计参数对结构降噪性能的影响规 律,并分析了结构的多级反共振模态。

如图1(c)所示,设r为由4个条形和4个十字形金属振 子的中心所围成的圆的半径与整个膜的半径的比值。圆形 膜与非圆形膜的面积相同,非圆形膜的半径视为与其等面 积的圆形膜的半径。对于上一节中的圆形模型,r为0.56。 本文在3.3节讨论了r对圆形模型的STL曲线和模态的影 响。由于受圆形模型的结构限制,r_{max}是0.74,这时振子靠 近框;r_{min}是0.42,这时振子靠近中心的大十字形振子。在 讨论膜形状和振子位置对模型降噪性能的影响时,应注意 膜上的振子是不变的。

在试验过程中,由于受到声阻抗管直径大小的限制,本 文设计了外径为100mm的薄膜声学超材料,这通常不适用 于实际应用。为了评估模型大小对蛛网模型降噪能力的影 响,本文确定了薄膜声学超材料设计中降噪效果最佳的模 型进行整体大小的修改,如图1(d)所示。在修改模型大小 时,垂直于声音传播方向的参数被按比例缩小,以保持模型 大小变化的等比例。相反,与声音传播方向平行的参数保



Fig.1 Bionic design and parameter analysis of MAM

持不变。原始模型的外径为100mm,并被设定为基准,定 义此时的缩放比例为100%。对于后续的任何大小变化,模 型的缩放将根据外径与100mm的比例进行调整。

对于圆形模型,聚酰亚胺(PI)膜的厚度为0.2mm;光固 化树脂框的厚度为2mm,外径为100mm,宽度为5mm。中 央使用乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)制造的十字形振子 尺寸为40mm×4mm,厚度为2mm;四周的条形和十字形振 子的尺寸均为14mm×2mm,厚度为1.8mm。EVA十字和光 固化树脂框部件通过3D打印制备。条形和十字形振子的 材料为45钢,通过机械加工制备。这些振子和框通过PI膜 黏合组装成所有模型。材料参数见表1。

表1 薄膜声学超材料模型的材料参数

Table 1 Material parameters in the membrane-type metamaterial models

	弹性模量/Pa	密度/(kg/m ³)	泊松比
PI	1.42×10 ⁹	1100	0.36
EVA	1.7×10^{8}	2050	0.45
45钢	2×10 ¹¹	7800	0.33
光固化树脂	2.5×10 ⁹	1100	0.23

2 仿真分析与试验测试

2.1 声一固耦合数值仿真

如图2所示,本试验利用COMSOL Multiphysics软件构 建了薄膜声学超材料的多物理场耦合模型。为了计算超材 料的STL和模态,本文采用了声一固耦合分析模块。在图 2(a)中,声音从入射面发出,并通过其入射压力场的声学部 分对MAM产生影响。MAM的固体力学部分被用于模拟 薄膜和振子的阻尼,并计算薄膜的频率响应。透过MAM 的声音经过透射压力场传播,最后被完美匹配层所吸收。 声一固耦合界面是MAM与透射/入射压力场之间的交界。 MAM的外部边界是固定约束,而空气领域的边界(透射压 力场和入射压力场)则是硬声场边界。

在进行有限元计算时,将模型的一个部分与振子的上 表面共平面进行网格划分。振子部分的最大单元尺寸为 3mm,其余部分的最大单元尺寸为10mm。基于现有的平 面网格,使用扫掠法对剩余部分进行网格划分。在完美匹 配层中设置6层网格。本文使用的模型共有37410个网格。 网格划分后的数值模型如图2(b)所示。选择频域求解器, 计算频率范围为50~1600Hz,间隔为5Hz。如图2(c)所示, 不同网格密度的有限元计算产生的STL结果相似,证明有 限元模型是网格独立的。

计算参数 STL 被定义为声能通过结构时的能量损失,由于声能与声压的平方成正比,所以 STL 可以表示为

$$STL = 10 \lg\left(\frac{\left|\left\langle p_{in}\right\rangle\right|}{\left|\left\langle p_{our}\right\rangle\right|}\right) \tag{1}$$

式中, p_{in} 为在入射面处的声压; p_{out} 为在完美匹配层前的声压。 p_{in} 的振幅设为1Pa, $\langle \rangle$ 和| |分别是参数的均值和模。

2.2 试验装置与测量

如图 3(a) 所示, 本文根据 ASTM E2611-09 标准^[16]测量 了薄膜声学超材料的 STL, 测量设备包括控制系统、麦克



风、阻抗管、声源和功率放大器。阻抗管的前部是声源管, 它发出平面波,功率放大器可以调整声音的大小。声阻抗 管直径为100mm,厚度为3mm,能够防止过度的声反射或 透射损失。为减少反射波的影响,使用一块厚海绵作为消 声终端,位于阻抗管的末端。

本文选择的测量方法是四麦克风法,该法有助于准确捕





and STL measurement

捉通过样品的声波。为了确保声场畸变最小,麦克风被放在 足够远离样品的地方。测试频率范围是120~1600Hz,采样间 隔为0.78125Hz,为频率分析提供了良好的分辨率。为了确 保测量的准确性,需要在测量前排除背景噪声和麦克风校正 的影响。海绵的吸收频率覆盖了声阻抗管中的全频率范围, 但只部分吸收了声源的声波,因此需要采用两次测量法:一 次设置有消声终端,而另一次没有消声终端。通过控制系统 综合两次测量得出最终结果。每次测量重复10次并取平均 值,以减少随机误差、提高信噪比。最后,通过测量样品前后 4个麦克风之间的传递函数,计算出样品的STL。这种方法 能够确定薄膜声学超材料在宽频率范围内的STL,这对于理 解它们的声学性能和潜在应用至关重要。

本文讨论的模型形状有圆形和方形两种,需要分别制造 圆形和方形的试件用于验证仿真结果的准确性。按照前文 中提到的圆形模型准备圆形试件。由于试验中使用的声阻 抗管的横截面是直径为100mm的圆形,这意味着方形模型1 和方形模型2无法放入其中。因此,用边长更小的方形试件 进行模拟以验证正确性。方形试件是将一个用螺丝固定的 45钢夹具叠加在圆形试件上制成的,其上的振子和振子位置 与圆形模型相同。夹具的外圆部分直径为98mm,内部的方 形开口边长为65mm、厚度为5mm。安装夹具时,内部的正方 形需要垂直于内部中央十字形振子的径向方向。试件使用 橡胶环密封安装,以减少声泄漏对透射损失的影响。

如图3(b)和图3(c)所示,对于圆形和加挡板的方形模型,对比模拟和试验的STL曲线。整体趋势、峰值频率和谷值频率的差异很小,模拟和试验结果非常吻合,验证了薄膜 声学超材料的数值分析方法的准确性。

3 结果与讨论

3.1 蛛网结构降噪性能

本文使用典型的 STL 指标来衡量薄膜声学超材料的降 噪性能。在 0~1600Hz 的频率范围内, STL 超过 10dB 的总 带宽被定义为 $B_{\rm T}$, 这将全面评估讨论范围内整个 MAM 的 降噪效果,并被用作判断哪个模型更优的依据。同时,为了 描述 STL 谱中的多个共振峰以及它们是如何耦合的, STL 谱的第一个和第二个波谷被定义为 f_{v1} 和 f_{v2} , 它们之间的频 率范围是第一 STL 带宽 δ_{10} 归一化(Normalization)带宽被 定义为 $\delta_{1}^{\rm N} = |f_{v2} - f_{v1}| |f_{v10}$ 同样,第二个和第三个波谷之间 的频率范围被定义为第二个 STL 带宽 δ_{20}

基于基准模型,本文提出了结合仿生概念和声学超材 料设计概念的蛛网仿生薄膜声学超材料。蛛网结构的布置 增强了沿环向和径向的多个振子之间的耦合,产生更多的 相邻多级反共振模态以扩展 STL带宽。如图4所示,仿生 模型在保持更轻质量设计(比基准模型减少19%)的同时, 可以显著增强联合声衰减。仿生模型的总带宽 B_T比基准 模型增加了61%。本文构建的圆形模型与仿生模型相同。

3.2 薄膜形状对降噪性能的影响

如图5所示,本文基于蛛网仿生薄膜声学超材料设计, 研究了薄膜形状、振子位置和模型尺寸三个参数对降噪性 能的影响。图5(a)绘制了圆形模型、方形模型1和方形模



图4 基准模型和蛛网仿生模型的降噪性能对比

Fig.4 Comparison of noise reduction performance between the benchmark model and the bio-inspired model

型2的STL频率特性曲线,三种模型的综合降噪性能如图5 (b)所示。相比于圆形模型,方形模型1的STL峰更为分散,峰值减少了5%,同时归一化带宽 δ_1^N 下降了30%。值得注意的是,尽管方形模型1相较圆形模型有更为剧烈的波动,但在测量范围内的整体降噪性能相当,总带宽 B_T 反而增加了0.3%。而相对于圆形模型,方形模型2的降噪性能显著降低,STL峰值降低13%,总带宽 B_T 和归一化带宽 δ_1^N 分别降低5%和38%。

图 5(c)展示了圆形模型、方形模型1和方形模型2在典型频率下的几种模态。所有模型都有类似的二阶和四阶模态^[15],但并非在相同的频率产生。可能的原因是不同形状的薄膜影响了形成多级反共振模态的频率,从而影响了STL峰值的合成。例如,在接近750Hz的频率处,方形模型2的STL曲线处于波谷,与圆形模型和方形模型1不同。此外,不同的薄膜形状会影响多级反共振模态的形态。方形模型的振子对薄膜分段的均匀性不如圆形模型,一些局部反共振模态的幅度较弱,这是两个方形模型降噪效果不佳的一个解释。

总之,在膜面积相同的情况下,圆形模型在1600Hz以 下的降噪性能明显好于两个方形模型,这与蛛网通常为圆





形的实际情况相符。

3.3 振子位置对降噪性能的影响

当振子中心与膜半径之比r分别取 0.44、0.54 和 0.68 时,圆形模型的 STL频率特性曲线如图 6(a) 所示,不同r的 STL 曲线俯视图如图 6(b) 所示,总体性能指标如图 6(c) 所





示。当r = 0.54时,总带宽 B_{T} 最大,相较于原始圆形模型提升1%。归一化带宽 δ_{1}^{N} 减少0.2%,但带宽 δ_{1} 提升了9.8%。

图6(d)显示了r从0.42到0.74时,对应于二阶、四阶和 高阶模态的频率。它们都有类似的模态,这说明改变振子 位置大多数时候不会改变典型模态的形成。振子对模态的 影响往往体现为:对于较大的r,相同的模态出现的频率较 低。此外,这种趋势并非在所有模态中都一致。结合图6 (b)中的STL曲线分布,当振子中心与膜半径之比r为0.54 时,每个模态对应的频率相互耦合,共同组成了宽频的STL 峰,降噪效果最好。

3.4 模型尺寸对降噪性能的影响

为了研究模型尺寸对蜘蛛网模型降噪效果的影响,选 择了降噪效果最好的MAM设计(圆形,r取0.54)进行总体 尺寸变化的适用性研究。当保持模型比例不变,改变整体 模型尺寸时,如图7(a)所示,STL峰值集中,随着模型尺寸 变大,降噪性能显著下降。当模型尺寸变小时,STL峰值分 散但仍保持一定宽度的B_T,这意味着降噪性能并未显著下 降。较小模型、较大模型和参考模型的总体性能指标对比 如图7(b)和图7(c)所示。

如图7(d)所示,模态的变化证实了相同的结论。不同 尺寸的模型也具有类似的二阶、四阶和高阶模态。然而,随 着模型尺寸变大,同种模态出现的频率逐渐降低,这与STL 峰值的集中一致。这种差异是由模型各个组件的材料参数 相互耦合引起的。因此,当对模型阵列化以获得更大的降 噪区域时,如果忽略框的影响(固定框),在同一面积内应使 用更小尺寸的蛛网单元。

3.5 非固定框下阵列密度对降噪性能的影响

当考虑非固定框的影响时,情况可能会发生变化:此时 框也能够参与反共振模态的构建。图8(a)对比了相同总面 积下1×1、2×2、3×3型阵列模型的STL性能。可以观察到, 3×3阵列模型的STL峰值频率可以近似视为原始1×1单元 模型的扩展,特别是对于1×1单元模型在500Hz以下的频 率以及3×3阵列模型在800Hz以下的频率。对比3×3阵列 模型和2×2阵列模型在1000Hz以上的STL可以看出,随着 模型变小,STL峰值所在频率放大的趋势仍然存在,但2×2 阵列模型的低频并不遵循这一趋势。这可能是因为2×2阵 列模型的框架在一定程度上取代了MAM中中央十字形振 子的作用,导致在700Hz以内出现了薄膜超材料的典型低 频特性。因此,2×2阵列模型可以被视为一种新的MAM, 非固定框也参与到了低频STL峰的构建中。随着模型变 小,STL峰值在700Hz以上的频率上仍存在放大的趋势。



Fig.7 Comparison of noise reduction performance for the model of different sizes

图8(b)展示了1×1和2×2类型阵列模型在STL的典型 频率下的几种振动模态。所有模型都展现了类似的二阶和 四阶模态,但它们并不在相似的频率产生。例如,2×2阵列 模型在295Hz处的4个二阶模态组合形成了一个新模态, 其中非固定框是这个模态的关键组成部分。这也支持了 2×2阵列模型的自由框架在一定程度上取代了MAM中央 十字振子作用的结论。另外,由于3×3阵列模型非固定框 框架节点不处于模型中心,会较少地参与到反共振模态的 构建中。在3×3阵列模型中,只有一部分单元经常展现出 典型的模态,而不是所有的单元,并且它们的振幅不同,这 影响了它们的降噪性能。对比三个模型在780Hz附近的模 态以及STL曲线,2×2阵列模型和3×3阵列模型都有STL峰 值,而1×1阵列模型则没有,这在一定程度上解释了模态和 STL结果之间的对应关系。

因此,在用薄膜声学超材料设计阵列并应用于飞行器 舱室内壁时,应考虑固定结构的支撑框或至少每2×2单胞



Fig.8 Comparison of noise reduction performance for the model with three array approaches

进行固定,这是因为使用非固定框可能会影响降噪效果。

4 结论

本文基于蛛网仿生结构设计了一种仿生薄膜声学超材料,包含膜、框和一组振子。根据计算和试验结果,与基准模型相比,仿生模型的膜上振子质量减少了19%,降噪带宽扩展了61%。此外,本文还探讨了多个关键参数对降噪性能的影响,这些参数包括薄膜的形状、振子的位置、模型的大小以及在非固定框架条件下振子阵列密度的变化。不同的参数影响了多级反共振模态的形态,这也是STL性能出现差异的原因。

在相同的膜面积下,圆形模型在1600Hz以下的降噪性 能显著优于两个方形模型。通过调整振子的位置,可以进 一步优化整体降噪性能,特别是当振子中心与膜半径之比 为0.54时,降噪效果达到最佳。此外,随着蛛网仿生模型尺 寸的变化,其降噪性能也会受到影响:在模型尺寸缩小时, 它仍然表现出良好的降噪性能;但当模型尺寸增大时,其效 果可能会降低。在非固定框架下阵列时,随着振子阵列变得 更密集,STL峰值所处的频率有所扩大。在2×2阵列模型中, 自由框架有助于形成反共振,从而在700Hz以下形成了一个 显著的高降噪区域,展现出了多级设计的潜力。而在3×3阵 列模型中,只有部分单胞表现出了典型的振动模态,并且它 们的振幅不尽相同,从而影响了模型的整体降噪性能。

本文在飞行器舱室内壁降噪材料的应用上具有实用价 值。传统的隔音材料往往较重,会增加飞行器的总重量,而 本文设计的基于蛛网结构的仿生薄膜声学超材料不仅重量 轻、性能优异,而且可以根据不同的频率需求进行调节,这对 于解决飞行器内部复杂、多变的噪声环境具有重要意义。

总之,本文有助于开发轻质、宽降噪带宽和高性能的飞 行器舱室内壁降噪材料,也为薄膜声学超材料的形状和参 数选择提供了参考。

参考文献

[1] 程道来, 仪垂杰, 梁祖峰. 飞机噪声及防治对策的研究[J]. 噪 声与振动控制, 2005(5): 47-51.

Cheng Daolai, Yi Chuijie, Liang Zufeng. Research on airplane noise and the strategy of control[J]. Noise and Vibration Control, 2005(5): 47-51. (in Chinese)

 [2] 杨晓军,周昊旻,李国良.超声速飞机噪声合格审定标准制定 中的关键要素分析[J].航空科学技术,2021,32(10):26-31.
 Yang Xiaojun, Zhou Haomin, Li Guoliang. Analysis of key elements in the establishment of supersonic aircraft noise certification standards[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(10): 26-31. (in Chinese)

- [3] 梁宁远,陈宝,韩松辰,等.高速直升机舱内噪声主动控制技术研究[J].航空科学技术,2023,34(9):41-51.
 Liang Ningyuan, Chen Bao, Han Songchen, et al. Research on active control technology of high-speed helicopter interior noise[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34 (9): 41-51. (in Chinese)
- [4] Poletti C, Buchwald B, Lewin P. Handbook of noise control[J]. Columbia Law Review, 1958, 58(4): 580-583.
- [5] Yang Zhiyu, Mei Jun, Yang Min, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass[J]. Physical Review Letters, 2008, 101(20): 204301.
- [6] Chen Yangyang, Huang Guoliang, Zhou Xiaoming, 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.
- [7] 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.
- [8] 窦玲玲,米永振,黄斌根,等.直升机舱室声学超材料壁板的低频隔声性能分析[J].噪声与振动控制,2021,41(1):12-15+20.
 Dou Lingling, Mi Yongzhen, Huang Bingen, et al. Low-frequency sound insulation analysis of acoustic metamaterial cabin panels in a helicopter[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(1): 12-15+20. (in Chinese)
- [9] 宋波,张磊,王晓波,等.面向航空航天的增材制造超材料的 研究现状及发展趋势[J].航空制造技术,2022,65(14):22-33. Song Bo, Zhang Lei, Wang Xiaobo, et al. Research status and development trend of additive manufacturing metamaterials toward aerospace[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(14): 22-33. (in Chinese)
- [10] 赵瑞,严昊,席柯,等.声学超表面抑制第一模态研究[J].航空 科学技术,2020,31(11):104-112.
 Zhao Rui, Yan Hao, Xi Ke, et al. Research on acoustic metasurfaces for the suppression of the first mode[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(11): 104-112. (in Chinese)
- [11] 丁昌林,史剑兵,董仪宝,等.一种双频和宽频超表面材料的 探索研究[J].航空科学技术,2022,33(5):76-81.
 Ding Changlin, Shi Jianbing, Dong Yibao, et al. Exploratory

research on a dual-band and broadband metasurface materials [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(5): 76-81. (in Chinese)

- [12] 王晓乐,孙萍,顾鑫,等.直升机声学超材料舱壁的低频多带 隙降噪特性[J/OL].航空学报:1-17. (2023-10-12).http://kns. cnki.net/kcms/detail/11.1929.v.20230627.1342.002.html.
 Wang Xiaole, Sun Ping, Gu Xin, et al. Low frequency and multibandgap noise reduction characteristics of the acoustic metamaterial-based helicopter sidewall[J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica: 1-17. (2023-10-12). http://kns.cnki.net/kcms/ detail/11.1929.v.20230627.1342.002.html.(in Chinese)
- [13] Huang Heyuan, Cao Ertai, Zhao Meiying, et al. Spider webinspired lightweight membrane-type acoustic metamaterials for

broadband low-frequency sound isolation[J]. Polymers, 2021, 13(7): 1146.

- [14] Cao Ertai, Jia Ben, Guo Dong, et al. Bionic design and numerical studies of spider web-inspired membrane-type acoustic metamaterials[J]. Composite Structures, 2023, 315: 117010.
- [15] Zhou Guojian, Wu Jiuhui, Lu Kuan, et al. Broadband lowfrequency membrane-type acoustic metamaterials with multistate anti-resonances[J]. Applied Acoustics, 2020, 159: 107078.
- [16] ASTM International. ASTM E2611-09: Standard test method for measurement of normal incidence sound transmission of acoustical materials based on transfer matrix method[S]. ASTM International, 2009.

Design of Spider Web Bio-inspired Membrane Acoustic Metamaterials for Aircraft Cabin Walls

Cao Ertai¹, Yan Hao², Huang Heyuan^{1,2}

1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2. Key Laboratory of Aeronautical Acoustics and Vibration Aviation Technology, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi' an 710065, China

Abstract: The internal noise in an aircraft cabin poses a significant threat to passengers as well as flight control and communication. Membrane Acoustic Metamaterials (MAM) exhibit excellent noise reduction properties while fulfilling lightweight requirements, meeting the aviation industry's dual requirements of noise reduction and weight control. Inspired by the spider web, this paper proposed a bio-inspired MAM design, which integrates a membrane, frame, and set of resonators. Computational and experimental results show that the bio-inspired model reduces the resonator mass by 19% and expands the noise reduction bandwidth by 61%. Furthermore, this paper investigated the influence of three design parameters (membrane shape, resonator position, and model size) on the structure's noise reduction performance and analyze its multi-level anti-resonance modes. The results suggest that the round model outperforms the other two square models in noise reduction performance. When the resonator position has a radius ratio of 0.54, it yields the best noise reduction performance. While the model maintains a considerable noise reduction effect when reduced in size, it may fail when the size increases. The free frame contributes to the formation of anti-resonance modes in the 2×2 array model, but has an opposite effect in the 3×3 array model. By adjusting the design parameters according to different frequency requirements, our design can adapt to the complex and changeable noise environment inside the aircraft.

Key Words: membrane acoustic metamaterials; bio-inspired structures; aircraft noise reduction; broadband sound absorption; structural design; cabin noise

Received:2023-07-19; Revised: 2023-11-22; Accepted: 2024-01-05 Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20200015053004)