

基于亥姆霍兹共振与空间盘绕的组合型隔音通风超结构的设计及优化

甄妮, 刘琪, 时磊

天津科技大学机械工程学院, 天津

收稿日期: 2024年4月3日; 录用日期: 2024年5月3日; 发布日期: 2024年5月11日

摘要

噪声污染问题在当今社会已日益严重。为了满足人们对居住环境既可隔音又能通风的需求, 现提出一种新型可通风的隔音降噪声学超结构。该结构同时考虑了亥姆霍兹共振与空间盘绕两种隔声机理。通过实验和数值仿真计算, 在保持25%高通风率的同时, 最大声音传输损耗在峰值处可达20 dB。600~1000 Hz中低频率范围出现了宽带, 传输损耗值为8~10 dB; 在1000 Hz以上的频率范围出现了一个较为平缓的曲线, 全都保持着12 dB以上的传输损耗。为了获得更好的隔音效果, 详细讨论了各几何参数对声音传输损耗的影响。最后, 通过遗传算法对该结构几何参数进行优化, 实现了更佳的宽带低频隔音效果。该结构将在声学工程领域中表现出巨大的应用潜力。

关键词

隔音通风, 亥姆霍兹共振, 空间盘绕, 遗传算法

The Design and Optimization of a Ventilated Sound Insulation Metastructure Based on Helmholtz Resonance and Coiling-up Space

Ni Zhen, Qi Liu, Lei Shi

School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin

Received: Apr. 3rd, 2024; accepted: May 3rd, 2024; published: May 11th, 2024

Abstract

The problem of noise pollution has become increasingly serious in today's society. In order to

文章引用: 甄妮, 刘琪, 时磊. 基于亥姆霍兹共振与空间盘绕的组合型隔音通风超结构的设计及优化[J]. 现代物理, 2024, 14(3): 79-89. DOI: 10.12677/mp.2024.143010

meet people's demand for both sound insulation and ventilation, a new type of ventilation sound insulation and noise reduction acoustic metastructure is proposed based on Helmholtz resonance and coiling-up space simultaneously. Both numerical analyses and experiments are implemented to obtain the sound transmission loss of this metastructure, and the two results are in good agreement. A maximum sound transmission loss up to 20 dB will be obtained, with a high ventilation rate of 25%. A broad-band sound insulation in mid-low frequency range (600~1000 Hz) is achieved, with sound transmission loss of 8~10 dB; and a relatively flat curve appears over 1000 Hz, with sound transmission loss of more than 12 dB. The effects of several geometric parameters on the sound transmission loss are discussed in detail. Finally, the structural geometry parameters are optimized by the genetic algorithm to achieve a better broadband low-frequency sound insulation. The metastructure will show great potential applications in the field of sound insulation.

Keywords

Sound Insulation and Ventilation, Helmholtz Resonance, Space Coiling, Genetic Algorithm

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

噪声污染[1]问题不但时刻影响着人们的正常生活与工作, 对人体的身心健康也会造成很大的危害[2][3]。传统的隔音降噪技术通常铺设一些隔音材料, 如隔音泡沫, 岩棉板等[4]。这些材料需要增加其厚度和重量才能达到较好的隔音效果, 在实际应用中受到了很大的限制。此外, 基于节能减排的需求, 可通风的隔音材料已成为新的研究趋势。而传统材料中隔声与通风之间一直存在矛盾。

近年来, 声学超材料的快速发展为隔音通风题提供了新的思路。声学超材料是指由特殊设计的人工声学微结构单元周期排列在弹性介质中构成的新型声学材料或结构, 可以获得自然界材料所不具有的超常物理特性, 如负质量密度、负折射、负模量等[5]。目前, 根据不同的隔声机理, 可以将声学超材料分为三大类结构: 薄膜型结构, 亥姆霍兹共振腔结构, 空间盘绕型结构, 这几类结构各有优缺点。薄膜型结构较易实现在低频段的隔音[6][7][8]。但是该类结构往往通风效果不佳。此外, 薄膜型结构还存在诸如预设张力的耐久性以及断裂等问题。亥姆霍兹共振腔的结构[9][10][11]是当前应用较为普遍的一种类型, 可以在保证良好通风的效果下实现低频隔音, 但隔音频率范围相对较窄。第三种是空间盘绕型结构[12][13][14]。声波在其中传播时, 由于传播路径的显著增长从而大大消耗了声波能量, 起到隔音的作用。该类结构最大的优点是可以在较宽频段实现声音传输损耗, 但其空间结构较为复杂, 且结构本身厚度较大。

通过对比三种声学超材料的优缺点, 本文提出了一种将亥姆霍兹共振和空间盘绕相结合的声学超结构。通过实验和数值仿真计算, 验证了该结构不仅能在较宽的低频范围实现良好的隔音效果, 还能保证较高的通风率。该结构可以广泛地应用于隔音降噪领域, 对于提高人们生活质量具有重要意义。

2. 隔音通风超结构的设计及研究方法

2.1. 结构设计

本文提出的亥姆霍兹共振和空间盘绕组合型隔音通风超结构如图 1 所示[15]。隔音通风超结构整体尺

寸为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 。隔音通风超结构分别由空间盘绕区域、亥姆霍兹共振区域以及中心通风区域组成。为了具备较大的通风率，设置中心通风区域的面积为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ ，即通风率为 25%。该隔音通风超结构一半为空间盘绕区域，另一半结构则为亥姆霍兹共振区域，二者由隔板分隔开。亥姆霍兹共振腔的正方形进声口设置于中心通风孔的侧壁上，位于侧壁面积的几何中心，面积为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。侧壁从进声口向亥姆霍兹共振腔的腔内延伸，形成一个微小的正方形空腔凸起，称该空腔为亥姆霍兹共振腔的颈部，与进声口同轴心。颈部向亥姆霍兹共振腔内凸起长度设为 10 mm 。空间盘绕结构以隔板分为左右两个对称结构。进声口同样设置于通风口侧壁上，但上、下两层的进声口位置相对错开。每一个空间盘绕区域又以隔板分为三个通道，通道间距分别为 4 mm ， 4 mm 和 3 mm 。以此来增加声波的传播路径，从而使声波能量耗散更多，起到更好的隔音效果。隔音通风超结构各几何参数值见表 1。

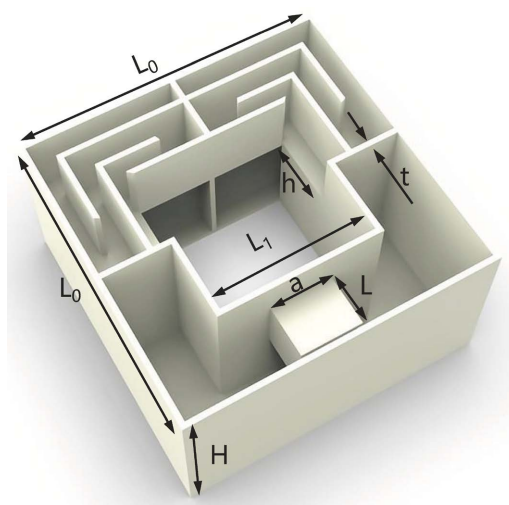


Figure 1. 3D schematic diagram of the combined ventilated sound insulation metastructure
图 1. 组合型隔音通风超结构三维示意图

Table 1. Geometric parameters of ventilated sound insulation metastructure
表 1. 隔音通风超结构几何参数

参数名称	设定数据(mm)
结构尺寸宽度 L_0	60
结构厚度 H	40
通风口宽度 L_1	30
颈部边长 a	10
颈部长度 L	10
进声口宽度 h	14.5
壁厚 t	1

2.2. 研究方法

为了验证该隔音通风超结构的隔音效果，对该结构的声音传输损耗进行了仿真计算与实验验证。

本文采用 B&K 公司的 4206 型阻抗管对所设计的隔音通风超结构进行实验测试，如图 2(a)所示。图 2(b)所示为采用环氧树脂材料利用 3D 打印技术制作的隔音通风超结构样品。选用的树脂材料参数为：质

量密度 $\rho = 1130 \text{ kg/m}^3$, 杨氏模量 $E = 2.6 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.4$ 。由于测试所用声学阻抗管的直径为 100 mm , 为了满足阻抗管的实验要求, 采用 45 号钢材机加工一个圆环形固定装置, 方便将样品放置固定在圆形阻抗管内进行实验。该圆环直径为 99 mm , 厚度为 20 mm , 中间正方形空白区域为 $61 \text{ mm} \times 61 \text{ mm}$ 。在固定装置和隔音通风超结构的侧表面均缠绕有纸胶带, 纸胶带可以起到防止空气的泄露以及起到保护阻抗管内壁的作用。如图 2(c)所示, 为定制的 45 号钢圆环和 3D 打印的环氧树脂隔音通风超结构试件的组合件。图 2(d)为整个实验测试系统及过程示意。

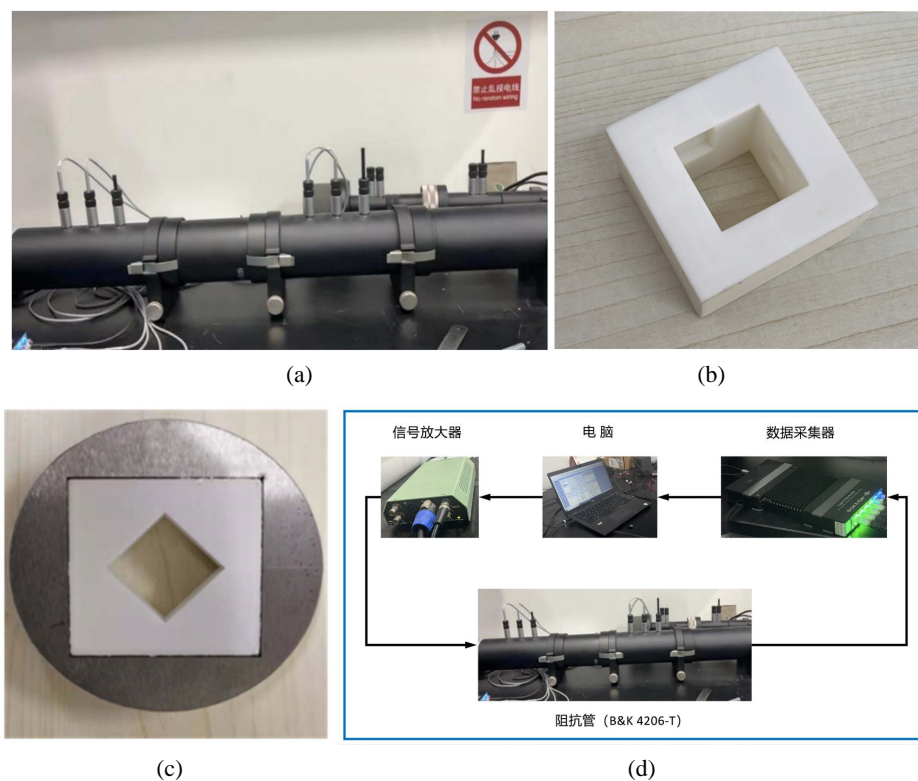


Figure 2. (a) impedance tube; (b) 3D printed sample; (c) the sample fixed in a holder fabricated by 0.45% carbon steel; (d) the experimental test system

图 2. (a) 阻抗管; (b) 3D 打印样品; (c) 圆环与样品组装件; (d) 实验测试系统

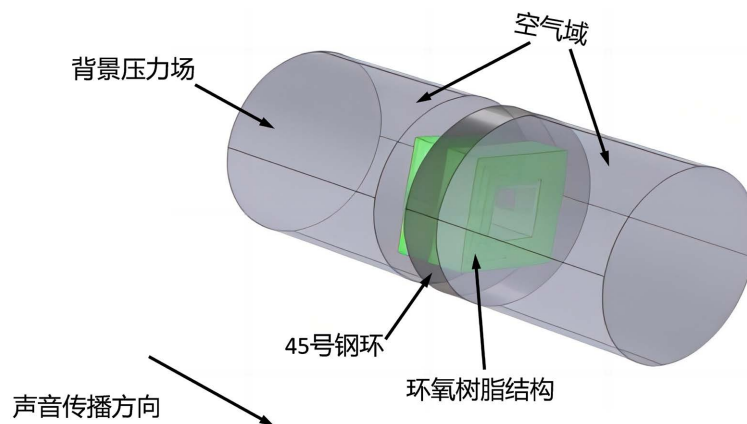


Figure 3. The calculation domain of ventilated sound insulation metastructure

图 3. 隔音通风超结构仿真示意图

在仿真计算过程中,采用的是有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 对隔音通风超结构的声音传输损耗(STL)进行仿真计算。考虑到该结构设计的特点,空气热粘性对其传输损耗的影响较大,所以同时使用了 COMSOL Multiphysics 中的压力声学模块、固体力学模块与热粘性模块对该隔音通风超结构的传输损耗进行仿真计算。如图 3 所示,在结构的两端增加了两个空气域,用来模拟入射声场和出射声场。然后采用平面波辐射边界条件来模拟入射声波。最后对计算域进行网格划分并进行数值计算。

声音在空气域中的传播控制方程为[16]:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p - \frac{\omega^2 p}{\rho_0 c_0^2} \right) = 0 \quad (1)$$

其中, p 是声压, ρ_0 是空气密度, c_0 是空气中的声速。声波在结构中传播的控制方程可以表示为:

$$(\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot u) + \mu \nabla^2 u + \rho \omega^2 u = 0 \quad (2)$$

其中, u 是位移矢量, λ 和 μ 是结构材料的第一和第二 Lamé 常数。Lamé 常数可以与杨氏模量 E 和泊松比 ν 相关,如下方程所示:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

在空气和结构之间的界面处,边界条件为:

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial n} = \omega^2 u_n, T_{ij} n_j = pn \quad (4)$$

其中, u_n 是固体边界的法向位移, n 是在空气域内定向的法向单位矢量, T_{ij} 是柯西应力张量。边界条件确保了结构中的弹性波和空气中的压力声波的耦合。那么声弹性方程的离散形式可以写成[17]:

$$\begin{pmatrix} K_s & S_{fs}^T \\ 0 & K_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{u} \\ p \end{pmatrix} - \omega^2 \begin{pmatrix} M_s & 0 \\ -S_{fs} & M_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{u} \\ p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

\bar{u} 和 p 分别表示网格节点处的位移和压力。 F 是节点力。 K_s 和 K_f 是结构和空气的刚度矩阵。 M_s 和 M_f 是结构和空气的质量矩阵。 S_{fs} 表示流固耦合矩阵,以及 S_{fs}^T 是 S_{fs} 的转置矩阵。

在本文中,空气的材料参数为密度 $\rho_0 = 1.21 \text{ kg/m}^3$,比热比 $\nu_0 = 1.4$,空气粘度 $\eta_0 = 1.813 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,热导率 $\kappa_0 = 0.025 \text{ W/(m} \cdot \text{k)}$,定容比热 $C_T = 0.712 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{k)}$,空气中的声速 $c_0 = 343 \text{ m/s}$ 。在空气域结构的每一端使用平面波辐射边界条件,入射振幅在左边。声音传输损耗(STL)可以通过以下方式获得:

$$STL = 10 \lg |P_i/P_t|^2 \quad (6)$$

P_i 和 P_t 分别表示入射声压和透射声压的振幅。

3. 结果与讨论

图 4 给出了该组合型隔音通风超结构的声音传输损耗(STL)的实验和数值仿真结果。图中红色实线代表实验的 STL 曲线图,黑色虚线代表仿真的 STL 曲线图,二者吻合得较好。从图中可以看出,在 600 Hz~1600 Hz 范围内,每条曲线均产生了两个传输损耗峰值。进一步对比研究发现,第一个峰值是由于亥姆霍兹腔共振引起的,在 600 Hz 附近测量到约 15 dB 的声音传输损耗;第二个峰值是由于空间盘绕结构所引起的,在 810 Hz 附近测量到约 20 dB 的声音传输损耗。而且频率在 1000 Hz 以上有“平台曲线”的出现也是因为空间盘绕结构的作用,从而拓宽了整体的隔音频率范围。在 800 Hz 频率范围以下,仿真结果的传输损耗分贝值略低于实验结果,究其原因是因为 3D 打印试件结构表面较为粗糙,入射声波的能量产生额外的耗散,从而导致了更高的声音传输损耗。

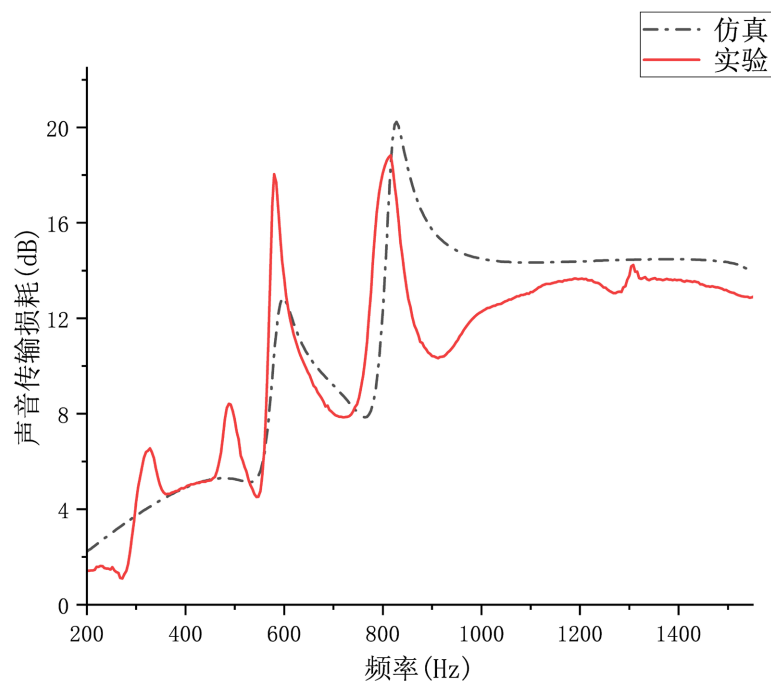


Figure 4. Experimental and simulation results of sound transmission loss of the combined ventilated sound insulation metastructure

图 4. 组合型隔音通风超结构声音传输损耗的实验结果与仿真结果

3.1. 亥姆霍兹共振机理

经典的亥姆霍兹共振腔如图 5(a)所示。当腔体共振频率所对应的波长远大于腔体的几何尺寸时，可将亥姆霍兹共振腔内的空气视为弹簧。其等效刚度为 k ，颈部位置的空气柱视为质量块，其等效质量设为 m ，如图 5(b)所示。整个结构可视为质量块 - 弹簧系统。在声波的作用下，颈部的空气柱在质量块 m 受到扰动时像弹簧一样做往复运动。在运动过程中，颈部的空气柱与结构的壁面产生摩擦，将声能转化为热能。当外来声波频率与结构的共振频率相同时，颈部内的空气柱位移最大，因此消耗声能最大，隔音效果也最好[18]。

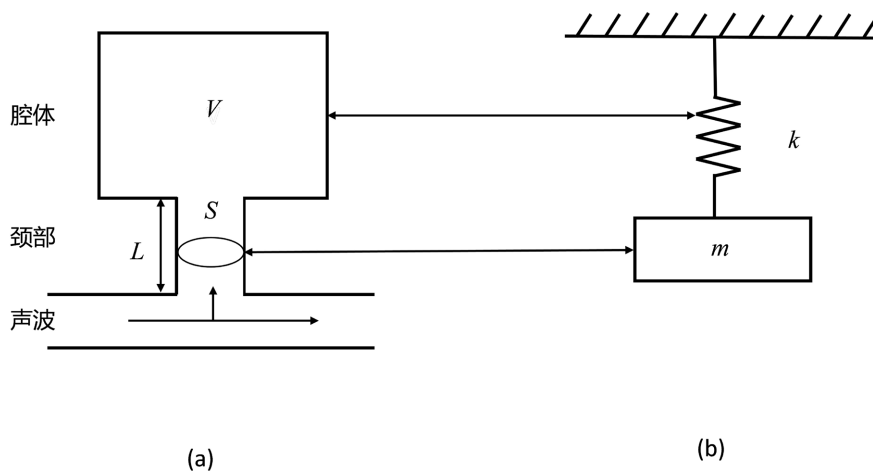


Figure 5. (a) Schematic of Helmholtz resonance cavity; (b) schematic of mass block-spring system

图 5. (a) 亥姆霍兹共振腔示意图；(b) 质量块 - 弹簧系统示意图

亥姆霍兹共振腔的共振频率与各几何参数的关系, 如式(7)所示[19]:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{LV}} \quad (7)$$

其中, c 为声速, S 为颈部面积, L 为颈部长度, V 为共振腔体积。

3.2. 几何参数的影响

3.2.1. 亥姆霍兹共振腔几何参数变化的影响

为了考察几何参数对该组合型隔音通风超结构的声音传输损耗的影响, 分别计算了固定颈部开口为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 颈部长度为 5 mm , 7 mm , 10 mm ; 以及固定颈部长度为 10 mm , 开口尺寸分别为 $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$, $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 几组情况下的 STL, 如图 6(a)和图 6(b)所示。可以看出, 当增大颈部长度时, 峰值所对应的共振频率降低, 尤其第一共振频率降低明显, 但同时 STL 略有下降。而减小颈部开口面积, 也能降低共振频率及 STL。该结果可以用公式(7)很好地解释。增大颈部长度, 以及减小颈部开口面积, 都会导致共振频率降低。

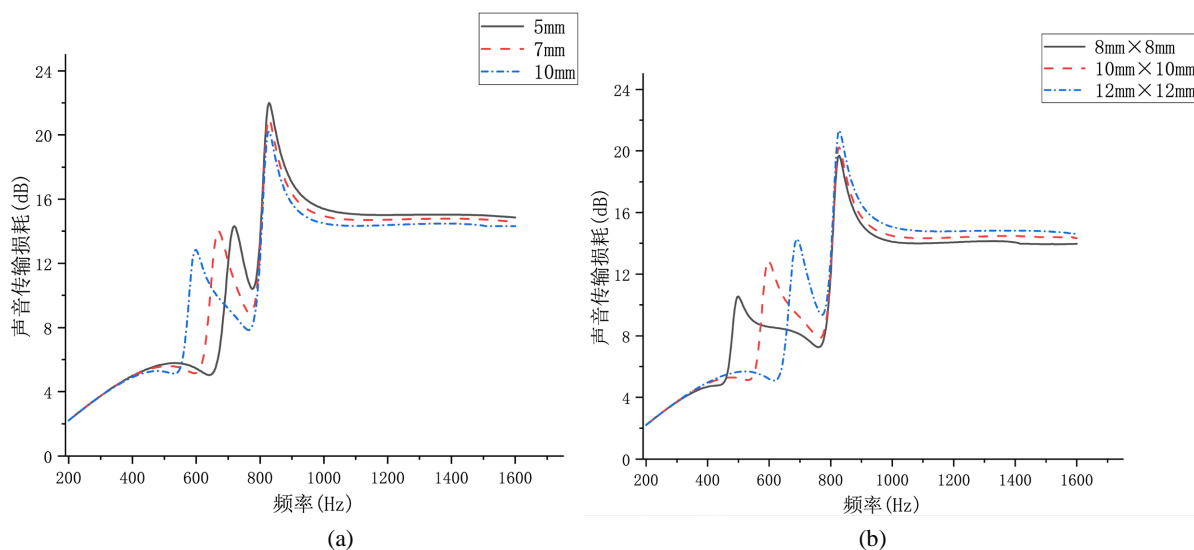
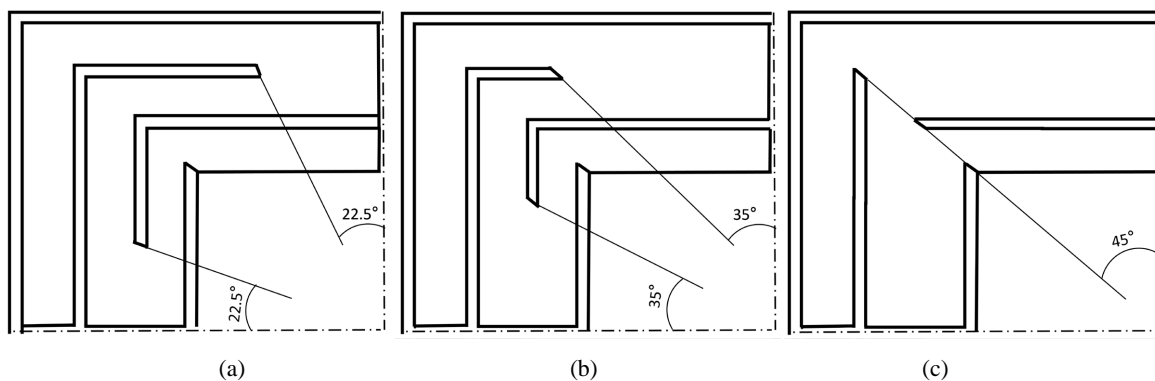


Figure 6. Effects of (a) neck length and (b) cross-sectional size of neck on sound transmission loss

图 6. (a) 颈部长度和 (b) 颈部开口面积对声音传输损耗的影响

3.2.2. 空间盘绕部分几何参数变化的影响



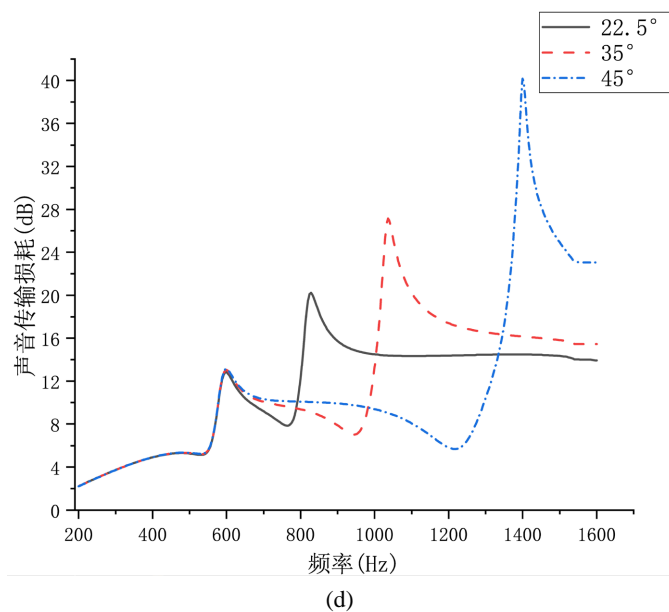


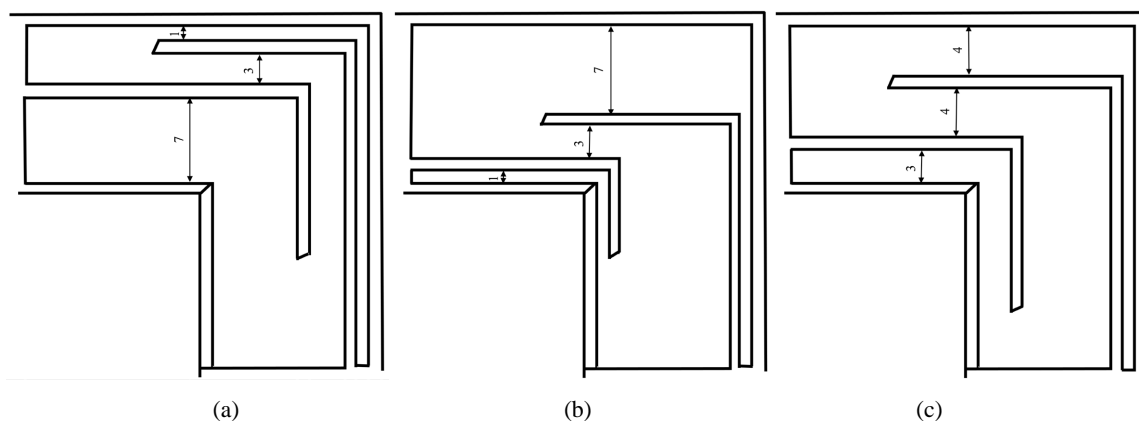
Figure 7. Schematic diagrams for partition opening angle of (a) 22.5°; (b) 35°; (c) 45°; (d) sound transmission loss results at the three angles
图 7. 隔板开口角度为(a) 22.5°; (b) 35°; (c) 45°的空间排布及(d) 三种角度下的传输损耗仿真结果图

根据空间盘绕结构隔音机理, 对该空间盘绕结构的隔板开口角度, 隔板间隙以及进声口宽度等几何参数进行改变, 讨论各参数对声音传输损耗的影响。

上图 7(a)~(c) 展现了当隔板开口角度分别为 22.5°, 35°, 45° 时, 导致了声波传播路径有所不同, 进而影响了声音传输损耗曲线图的第二个峰值。由图 7(d) 可知, 若想在低频段实现良好的隔音降噪, 可通过适当降低隔板开口角度来达到目的。

不同隔板间隙如下图 8(a)~(c) 所示, 前两者隔板间隙分别按规律从小到大和从大到小变化, 第三个为非规则变化间隙, 观察其对隔声性能的影响。如图 8(d) 所示, 发现不同隔板间隙也会对声音传输损耗及频率产生不同的影响。

空间盘绕结构的进声口宽度不同也会产生不同的隔音效果。如下图 9 所示, 当进声口宽度 h 分别为 3.5 mm, 7.25 mm, 14.5 mm 时, 产生了不同的声音传输损耗。随着进声口宽度的减小, 声音传输损耗峰值逐渐降低, 第二个峰值对应的频率也逐渐降低, 但“平台曲线”基本保持不变。



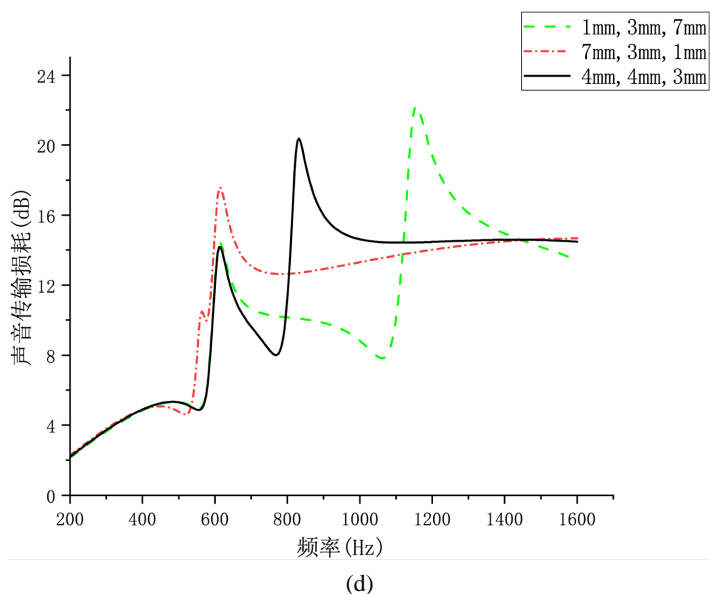


Figure 8. Schematic diagrams for widths of three channels being (a) 1 mm, 3 mm, 7 mm; (b) 7 mm, 3 mm, 1 mm; (c) 4 mm, 4 mm, 3 mm; (d) sound transmission loss results for the three cases
图 8. 三道隔板间隙尺寸分别为(a) 1 mm,3 mm,7 mm;(b) 7 mm,3 mm,1 mm;(c) 4 mm,4 mm,3 mm; (d) 三种情况下的声音传输损耗仿真结果图

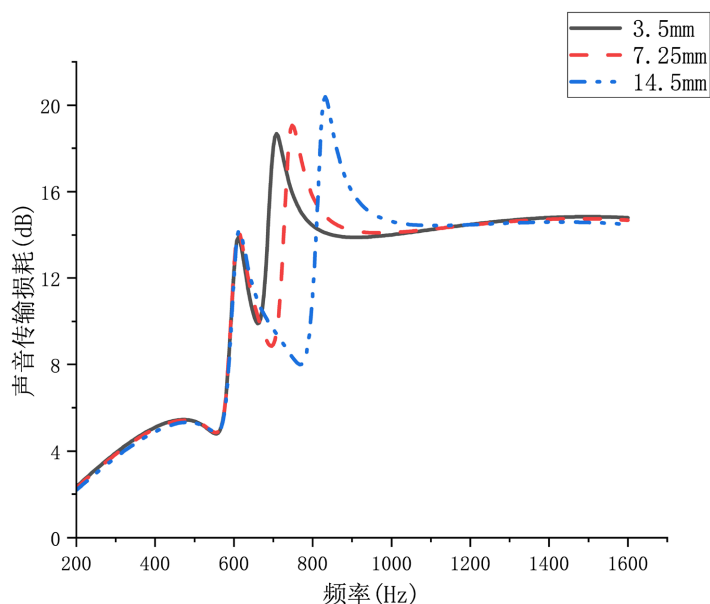


Figure 9. Sound transmission loss results at different width of opening area
图 9. 不同进声口宽度下的传输损耗仿真结果图

4. 遗传算法优化

遗传算法模拟了自然选择和遗传中发生的复制、交叉和变异等现象，从任一初始种群出发，通过随机选择、交叉和变异操作，产生一群更适应环境的个体，使群体进化到搜索空间中越来越好的区域，这样一代一代不断繁衍进化，最后收敛到一群最适应环境的个体，从而求得问题的最优解[20]。该算法基本思路如图 10 所示。

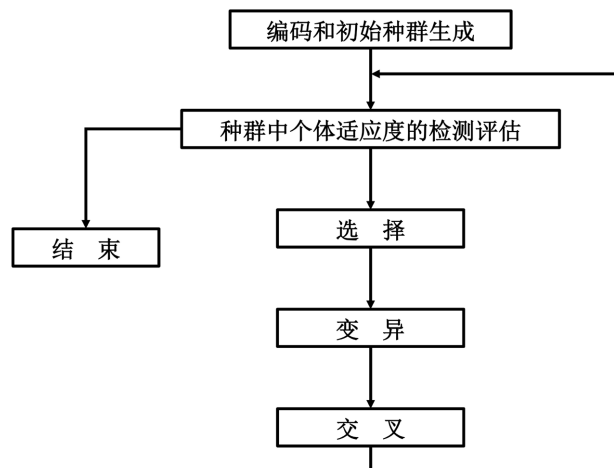


Figure 10. Basic flow chart of the genetic algorithm
图 10. 遗传算法基本流程图

据前所述，改变隔音通风超结构的几何参数可以影响声音传输损耗值以及频率。因此，可以将声音传输损耗和频率作为遗传算法的优化目标。在 COMSOL Multiphysics with MATLAB 实现遗传算法的优化。选取颈部开口边长 a ，颈部长度 L ，进声口宽度 h 三个参数作为自变量，设计自变量取值范围为：

$$\begin{cases} 4 \text{ mm} \leq a \leq 12 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} \leq L \leq 10 \text{ mm} \\ 4 \text{ mm} \leq h \leq 14.5 \text{ mm} \end{cases} \quad (8)$$

经过遗传算法 100 次迭代取优，得到了一组最优的参数值：颈部开口边长 $a = 4.20 \text{ mm}$ ，颈部长度 $L = 8.05 \text{ mm}$ ，进声口宽度 $h = 11.02 \text{ mm}$ 。根据该组数值进行三维建模及数值仿真，结果如下图 11 红色虚曲线所示。第一个峰值在 484 Hz 时声音传输损耗达到 13.79 dB，第二个峰值在 696 Hz 时声音传输损耗达到 21.15 dB。优化后在频率下降的同时保证了声音传输损耗有所提升，隔声量大于 10 dB 的平均带宽比优化前提高了 10.58%。

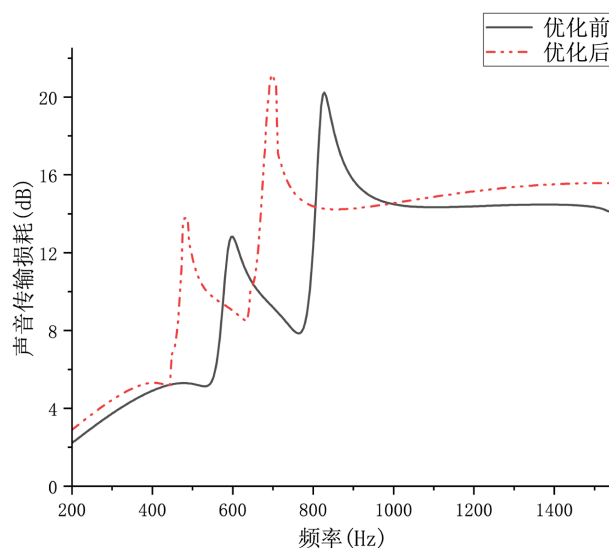


Figure 11. The optimization of sound transmission loss
图 11. 组合型隔音通风超结构的声声音传输损耗优化结果

5. 总结

本文提出的基于亥姆霍兹共振和空间盘绕相结合的隔音通风超结构, 在保持高通风率 25% 条件下实现了超宽带隔音, 最大隔声量可达到 20 dB。通过研究结构几何参数对隔音性能的影响, 利用遗传算法对声音传输损耗和频率两个目标进行优化, 在 200 Hz~1600 Hz 范围内, 可以实现平均声音传输损耗提升 20%, 声音传输损耗大于 10 dB 的平均频带拓宽 10.58%, 两个传输损耗峰值对应的频率分别降低 19.33%, 15.9%, 在低频段达到了更好的隔音效果。优化使得该组合型隔音通风超结构的应用前景更为宽广。

参考文献

- [1] 2020 年中国环境噪声污染防治报告[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2020.
- [2] 冀娜. 噪声对人体的危害与防护控制技术[J]. 中国卫生工程学, 2008, 7(3): 182-183.
- [3] 郭桂梅, 邓欢忠, 韦献革, 等. 噪声对人体健康影响的研究进展[J]. 职业与健康, 2016(5): 713-716.
- [4] Kumar, S. and Lee, H.P. (2020) Recent Advances in Acoustic Meta-Materials for Simultaneous Sound Attenuation and Air Ventilation Performances. *Crystals*, **10**, Article No. 686. <https://doi.org/10.3390/cryst10080686>
- [5] Gao, N., Zhang, Z., Deng, J., Guo, X., Cheng, B. and Hou, H. (2022) Acoustic Meta-Materials for Noise Reduction: A Review. *Advanced Materials Technologies*, **7**, Article ID: 2100698. <https://doi.org/10.1002/admt.202100698>
- [6] Huang, H., Cao, E., Zhao, M., Alamri, S. and Li, B. (2021) Spider Web-Inspired Lightweight Membrane-Type Acoustic Meta-Materials for Broadband Low-Frequency Sound Isolation. *Polymers*, **13**, Article No. 1146. <https://doi.org/10.3390/polym13071146>
- [7] Langfeldt, F., Kemsies, H., Gleine, W. and Von Estorff, O. (2017) Perforated Membrane-Type Acoustic Meta-Materials. *Physics Letters A*, **381**, 1457-1462. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2017.02.036>
- [8] Nguyen, H., Wu, Q., Chen, J., Yu, Y., Chen, H. and Tracy, S. (2021) A Broadband Acoustic Panel Based on Double-Layer Membrane-Type Meta-Materials. *Applied Physics Letters*, **118**, Article ID: 184101. <https://doi.org/10.1063/5.0042584>
- [9] Li, L.J., Zheng, B., Zhong, L.M., Yang, J., Liang, B. and Cheng, J.C. (2018) Broadband Compact Acoustic Absorber with High-Efficiency Ventilation Performance. *Applied Physics Letters*, **113**, Article ID: 103501. <https://doi.org/10.1063/1.5038184>
- [10] Gao, Y., Li, Z., Liang, B., et al. (2020) Improving Sound Absorption via Coupling Modulation of Resonance Energy Leakage and Loss in Ventilated Meta-Materials. *Applied Physics Letters*, **120**, Article ID: 261701. <https://doi.org/10.1063/5.0097671>
- [11] Nguyen, H., Wu, Q., Xu, X., et al. (2020) Broadband Acoustic Silencer with Ventilation-Based on Slit-Type Helmholtz Resonators. *Applied Physics Letters*, **117**, Article ID: 134103. <https://doi.org/10.1063/5.0024018>
- [12] Liu, X., Li, X. and Ren, Z. (2020) Miniaturized Spiral Meta-Material Array for a Ventilated Broadband Acoustic Absorber. *Shock and Vibration*, **2020**, Article ID: 8887571. <https://doi.org/10.1155/2020/8887571>
- [13] Chang, L., Jiang, A., Rao, M., et al. (2021) Progress of Low-Frequency Sound Absorption Research Utilizing Intelligent Materials and Acoustic Meta-Materials. *RSC Advances*, **11**, 37784-37800. <https://doi.org/10.1039/D1RA06493B>
- [14] Kim, H., Kwon, Y., Lee, S., et al. (2022) Development of a Meta-Silencer Considering Flow in HVAC Systems. *Applied Sciences*, **12**, Article No. 11322. <https://doi.org/10.3390/app122211322>
- [15] 时磊, 甄妮. 隔音通风结构设计及参数优化研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2023.
- [16] 杜功焕, 朱哲民, 等. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001.
- [17] Wang, T.T., Wang, Y.F., Deng, Z.C., et al. (2022) Reconfigurable Waveguides Defined by Selective Fluid Filling in Two-Dimensional Phononic Meta-Plates. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **165**, Article ID: 108392. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108392>
- [18] Kumar, S., Xiang, T.B. and Lee, H.P. (2020) Ventilated Acoustic Meta-Material Window Panels for Simultaneous Noise Shielding and Air Circulation. *Applied Acoustics*, **159**, Article ID: 107088. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.10.007>
- [19] 刘怡然, 李丽君, 等. 镶嵌薄膜结构的 Helmholtz 共振腔吸声特性分析[J]. 声学技术, 2017, 36(4): 2.
- [20] 雷英杰, 张善文, 等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 电子科技大学出版社, 2005.