

变参数分空腔单层微穿孔板低频降噪性能研究*

杨 菲, 沈新民, 王 强, 张蕉蕉

(陆军工程大学野战工程学院 南京, 210007)

摘要 由于微穿孔板结构在低频噪声下无法实现高效宽带的吸声效果,为了提高低频吸声性能,需要优化吸声器的结构参数以达到需要的降噪水平。本研究优化和测试了变参数分空腔单层微穿孔板结构,该结构在低频的吸声系数高且吸声频带宽。首先,通过声电类比法建立变参数分空腔单层微穿孔板结构理论模型,分析吸声系数与结构参数之间的关系;其次,确定优化变量和约束条件,利用布谷鸟算法优化理论模型,得到最佳吸声系数的结构参数;最后,对微穿孔板结构的吸声系数进行有限元仿真,加工微穿孔板结构样品,在驻波管中进行了吸声性能测试。结果表明,3组结构参数分空腔单层微穿孔板结构和4组结构参数分空腔单层微穿孔板结构能够在400~2 000 Hz的频率范围内保证高吸收(恒定超过80%)。

关键词 变参数分空腔单层微穿孔板;低频降噪性能;布谷鸟搜索算法;有限元仿真;驻波管测试
中图分类号 TH122

引 言

随着声学侦测技术的高速发展,军用装备的战场生存能力受到威胁^[1]。低频噪声因其具有较强的绕射性和透射性,容易穿越障碍物,在传播过程中随着距离的增加不会明显衰减,增加了被敌方武器侦测和袭击的危险^[2]。因此,弱化军用装备的低频噪声,可以降低被敌方发现和打击的可能性。由于军事装备种类和型号的多样性,存在的低频噪声频带带宽也不尽相同,为节约制作成本,选取常见的100~500 Hz,100~1 000 Hz,100~1 500 Hz和100~2 000 Hz进行研究,针对不同的带宽设计相匹配的吸声器,为军用装备低频降噪控制技术的实际应用提供理论指导。

微穿孔板(microperforated panel,简称MPP)吸声结构是一种防水防潮、表面强度高及无二次污染的共振吸声结构,可以胜任极端的工况环境,能够很好地适应复杂多变的战场环境^[3]。微穿孔板吸声结构的吸声性能主要取决于自身的4个结构参数(孔径 d 、板厚 t 、孔间距 b 、空腔深度 D)。在前人的研究中,大多数是理论上的分析而未将现实约束条件和目标频率范围考虑在内。笔者所研究的变参数分空腔单层微穿孔板结构是对4个结构参数进行设计与优化,以获得最佳的吸声效果。

通过优化算法搜索得到最优的结构参数组合可以使变参数分空腔单层微穿孔板结构的吸声性能最大化。布谷鸟搜索算法具有利用参数少、操作简单、易于实现、优良的随机搜索路径以及出色的优化能力等优点,已被用于优化声学结构参数^[4-5]。Duan等^[4]通过布谷鸟搜索算法优化了MPP和多孔金属复合结构的参数,在2 000~6 000 Hz的频率范围内获得的平均声音吸收系数为0.976 5。Yang等^[5]通过布谷鸟搜索算法优化了具有有限尺寸的标准化多层MPP的结构参数,层数为1~4的标准化多层MPP在频率范围100~6 000 Hz内平均吸声系数分别为0.574 5,0.708 5,0.719 9和0.722 8。所以,笔者选取布谷鸟搜索算法作为工具,对变参数分空腔单层微穿孔板的结构参数进行优化。

首先,基于微穿孔板理论^[6]构建了变参数分空腔单层微穿孔板结构的理论吸声模型,分析结构参数与吸声系数的关系;其次,确定优化目标和约束条件,通过布谷鸟搜索算法对变参数分空腔单层微穿孔板的结构参数进行优化,为后续样品的制备和吸声性能的评估提供了有效指导;然后,利用有限元仿真初步评估了最佳变参数分空腔单层微穿孔板结构的吸声性能,并通过驻波管测试验证有限元仿真的准确性和有效性;最后,对于每个最佳的变参数分空腔单层微穿孔板结构吸声性能进行了比较,为不同

* 江苏省自然科学基金面上资助项目(BK20201336)
收稿日期:2020-07-12;修回日期:2020-12-04

频率范围找到最佳的吸声器,这为装备吸声降噪提供了理论指导,具有重要的军事意义和应用价值。

1 变参数分空腔单层微穿孔板结构

微穿孔板的结构参数包括板的厚度、微孔的直径、相邻孔间距离以及空腔长度,这些参数影响其吸声性能。笔者研究的变参数分空腔单层微穿孔板结构是由多组结构参数不相同的微穿孔板并联拼接而成,其基本结构如图1所示(以4组结构参数微穿孔板为例)。微孔为圆形、呈线性等距排列,并且不同微孔的板后空腔需要用隔板隔开,使各不同孔径微孔独立的吸声特性有效地结合起来^[7]。焦风雷等^[8]已经证明,不同孔径组成的单层变孔径微穿孔板结构可以拓宽吸声频带。

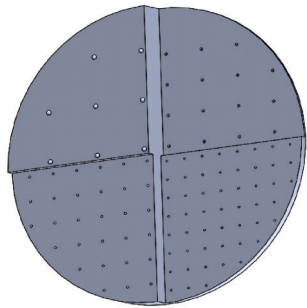


图1 变参数分空腔单层微穿孔板结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of a single-layer microperforated panel structure with variable parameters and separated cavities

笔者所研究的变参数分空腔单层微穿孔板结构中不同结构参数的组数为1~4,优化目标是在100~500 Hz,100~1 000 Hz,100~1 500 Hz和100~2 000 Hz的频率范围内获得最佳的吸声性能。变参数分空腔单层微穿孔板结构的理论模型可以通过声电类比法构建。在声学研究领域,很多研究已经通过简化的电路图对吸声结构的吸声特性进行分析,此方法被称为声电类比法。因此,图1的结构可以理解为微穿孔板上不同结构参数的部分微穿孔板的声阻抗与各自的板后空腔串联再相互并联,由此可以得出等效电路如图2所示。

对于笔者研究的变参数分空腔单层微穿孔板结构,其第*i*组结构参数的声阻抗率 Z_{S_i} 可以根据微穿孔板理论^[6]通过式(1)计算得到

$$Z_{S_i} = R_i + j\omega M_i \quad (1)$$

其中: R_i 为微穿孔板的声阻; ω 为声波角频率; M_i 为微穿孔板的声质量。

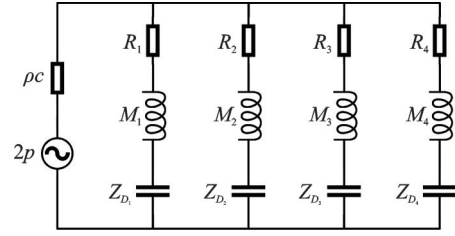


图2 变参数分空腔单层微穿孔板结构等效电路图

Fig.2 The equivalent circuit diagram of a single-layer microperforated panel structure with variable parameters and separated cavities

R_i 和 M_i 可以分别由式(2)和(3)计算得到

$$R_i = \frac{32(\mu + \nu)\rho}{\epsilon_i} \frac{t_i}{d_i^2} \left(\sqrt{1 + \frac{k_i^2}{32}} + \frac{\sqrt{2} k_i d_i}{8 t_i} \right) \quad (2)$$

$$M_i = \frac{t_i \rho}{\epsilon_i} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{k_i^2}{2}}} + 0.85 \frac{d_i}{t_i} \right) \quad (3)$$

其中: ρ 为空气密度; μ 为空气的黏度系数; ν 为金属板的导热系数; ϵ_i 为穿孔率; t_i 和 d_i 分别为微穿孔板的厚度和微孔的直径; k_i 为穿孔板常数。

$$\epsilon_i = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_i}{b_i} \right)^2 \quad (4)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (5)$$

$$k_i = \sqrt{\frac{\omega}{\mu + \nu}} \frac{d_i}{2} \quad (6)$$

其中: d_i 和 b_i 分别为微孔的直径和相邻微孔之间的距离; f 为声波频率。

根据微穿孔板理论^[6],可以推导出变参数分空腔单层微穿孔板结构的总声阻抗率 z_{total} 为

$$z_{total} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Z_{S_i}}{\rho c} - j \cot\left(\frac{\omega}{c} D_i\right) \right)^{-1}} \quad (7)$$

其中: D_i 为板后空腔长度。

由此可得变参数分空腔单层微穿孔板结构的吸声系数为

$$\alpha = 1 - \left| \frac{z_{total} - 1}{z_{total} + 1} \right|^2 \quad (8)$$

2 布谷鸟搜索优化算法

根据第1节中理论吸声模型,选取布谷鸟搜索优化算法,优化获得变参数分空腔单层微穿孔板结构的最佳结构参数。

2.1 优化流程

对于变参数分空腔单层微穿孔板结构,其吸声性能由各组微穿孔板的结构参数共同决定。基于布谷鸟搜索算法的变参数分空腔单层微穿孔板结构的优化设计步骤如下。

1) 建立优化模型。以变参数分空腔单层微穿孔板结构在给定的频率范围 $[f_{min}, f_{max}]$ 平均吸声系数最大为目标,建立目标函数,即

$$\langle \alpha \rangle = \max(\text{average}(\alpha(f))) \quad (9)$$

2) 确定决策变量和约束条件。考虑实际加工工艺条件限制,对各结构参数设定如下约束条件(数值单位为 m)

$$\begin{cases} 2 \times 10^{-4} \leq d_i \leq 2 \times 10^{-3} \\ 10^{-3} \leq b_i \leq 20 \times 10^{-3} \\ 0.1 \times 10^{-3} \leq t_i \leq 1 \times 10^{-3} \\ D_i + t_i = 20 \times 10^{-3} \end{cases} \quad (10)$$

3) 确定布谷鸟搜索算法的运算参数。宿主鸟窝种群数量 $n = 20$,最大发现概率 $p_a = 0.25$,步长控制因子的最大值 $\beta_{max} \leq 1$,最小值 $\beta_{min} \geq 0$,步长控制因子通过式(11)计算得到。设置种群进化最大迭代次数为 10 000,生成初始的随机种群,并令迭代次数初始值为 1。随机生成符合条件的自变量,计算每一个宿主鸟窝的目标函数值并记录,不断迭代直至满足结束条件,输出最优解。

$$\beta(z) = \frac{\beta_{min}}{1 + (\frac{\beta_{min}}{\beta_{max}} - 1) \exp(-az)} \quad (11)$$

其中: z 为迭代的次数; a 为 β 的衰减率的初始值。

2.2 优化结果

布谷鸟搜索优化得到的最佳结构参数以及相应的平均吸声系数理论值分别如表 1~4 所示。优化结果表明,对于每个目标频率范围,变参数分空腔单层微穿孔板结构的平均吸声系数随着结构参数组数从 1~4 的增加而增长。从变参数分空腔单层微穿孔板结构的最佳平均吸声系数可以看出,通过优化结构参数可以改善其吸声性能。

尽管通过布谷鸟搜索算法获得了目标频率范围的变参数分空腔单层微穿孔板结构的理论最佳结构参数,但仍需通过有限元仿真和驻波管测试,检验理论模型与布谷鸟搜索算法的有效性和可靠性。

表 1 目标频率范围为 100~500 Hz 时的最佳结构参数

Tab.1 The optimal structural parameters for the target frequency range of 100~500 Hz

结构参数组数	孔径/mm	孔间距/mm	板厚/mm	空腔长度/mm	平均吸声系数
1	1.07	20.00	0.78	19.22	0.354 5
2	1.04	20.00	0.57	19.43	0.512 2
	0.88	20.00	1.00	19.00	
3	1.07	19.90	0.55	19.45	0.611 4
	0.82	19.98	1.00	19.00	
	0.82	20.00	1.00	19.00	
	0.79	19.96	0.96	19.04	
4	0.78	20.00	1.00	19.00	0.679 9
	1.13	19.25	0.72	19.28	
	0.78	19.97	1.00	19.00	

表 2 目标频率范围为 100~1 000 Hz 时的最佳结构参数

Tab.2 The optimal structural parameters for the target frequency range of 100~1 000 Hz

结构参数组数	孔径/mm	孔间距/mm	板厚/mm	空腔长度/mm	平均吸声系数
1	0.59	8.34	0.35	19.65	0.462 6
2	0.60	7.40	0.41	19.59	0.633 5
	0.86	19.10	0.24	19.76	
3	0.59	6.62	0.48	19.52	0.722 9
	0.76	14.26	0.37	19.63	
	0.95	19.97	0.98	19.02	
4	0.61	6.34	0.56	19.44	0.778 5
	0.75	12.58	0.51	19.49	
	0.79	19.91	0.66	19.34	
	0.84	19.68	0.83	19.17	

表 3 目标频率范围为 100~1 500 Hz 时的最佳结构参数

Tab.3 The optimal structural parameters for the target frequency range of 100~1 500 Hz

结构参数组数	孔径/mm	孔间距/mm	板厚/mm	空腔长度/mm	平均吸声系数
1	0.41	4.23	0.37	19.63	0.534 8
2	0.39	3.53	0.42	19.58	0.698 2
	0.66	11.73	0.30	19.70	
3	0.38	3.05	0.50	19.50	0.780 3
	0.59	9.00	0.38	19.62	
	0.93	19.98	0.51	19.49	
4	0.38	2.85	0.55	19.45	0.827 3
	0.59	8.5	0.38	19.62	
	0.89	19.99	0.89	19.11	
	0.81	16.35	0.54	19.46	

表 4 目标频率范围为 100~2 000 Hz 时的最佳结构参数
Tab.4 The optimal structural parameters for the target frequency range of 100~2 000 Hz

结构参数组数	孔径/mm	孔间距/mm	板厚/mm	空腔长度/mm	平均吸声系数
1	0.31	2.58	0.35	19.65	0.588 1
2	0.29	2.04	0.41	19.59	0.742 6
	0.55	8.52	0.32	19.68	
3	0.50	6.40	0.41	19.59	0.816 4
	0.88	18.54	0.33	19.67	
4	0.28	1.70	0.5	19.50	0.858 0
	0.27	1.67	0.43	19.55	
	0.47	5.38	0.55	19.33	
	0.73	12.67	0.55	19.44	
	0.91	19.75	0.85	19.12	

3 有限元仿真

为了提高验证效率并降低实验成本,采用有限元仿真对目标频率范围可变的变参数分空腔单层微穿孔板结构的吸声性能进行了初步验证。在虚拟声学实验室^[9]中建立如图 3 所示的有限元仿真模型,驻波管的尺寸设置为 60 mm × 60 mm × 300 mm,将其划分为 5 mm 的三角形网格。传声器 1 到微穿孔板的距离为 90 mm,传声器 2 到微穿孔板的距离为 40 mm。将驻波管模型的左侧面定义为声波入射面,微穿孔板为一层与表 1~4 中微穿孔板板厚相同的空气层。由于微穿孔板小孔的存在,使得划分有限元的网格变得非常困难,而且网格质量很差,网格的数量和计算量非常巨大。为了解决小孔的问题,在建立声学有限元网格时,通常忽略小孔,在声学计算的时候,在微穿孔两边的网格之间通过定义一种传递导纳关系,间接模拟这些小孔。所以,本次仿真根据表 1~4 中的最佳结构参数计算出微穿孔板两侧的传递导纳关系来模拟微穿孔板吸声机理^[10-12]。

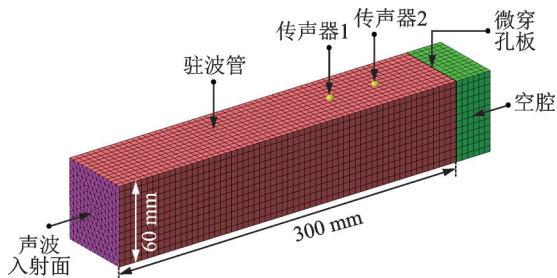


图 3 单层变孔径微穿孔板结构的有限元仿真模型
Fig.3 Finite element simulation model of the single-layer microperforated panel structure with variable parameters and separated cavities

将变参数分空腔单层微穿孔板结构平均吸声系数理论值和仿真值进行比较,可以评估最佳结构参数的准确性和布谷鸟搜索优化算法的有效性。

4 驻波管测试

为检验有限元仿真的有效性和准确性,根据表 1~4 中的最佳结构参数,利用精密激光束加工技术制备出不同频率范围内优化后的变参数分空腔单层微穿孔板结构,通过驻波管测量样品的垂直入射吸声系数^[13-16]。实验中使用的是 AWA6128A 型驻波管测试仪,结构如图 4 所示。将测试样品安装在被测材料管中,调整刚性活塞获得板后空腔长度,驻波管的另一端连接扬声器,将正弦波信号通过扬声器放大垂直射向待测样品,通过变参数分空腔单层微穿孔板结构反射的回波则由安装在滑车上的测试探头接收,通过调节滑车在滑道上的位置,可以获得一定频率的峰值声级和相应的谷值声级,根据驻波比可以测出样品的吸声系数。

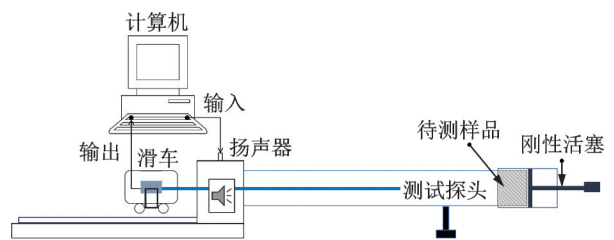


图 4 AWA6128A 型驻波管测试仪结构示意图
Fig.4 Structure diagram of AWA6128A standing wave tube tester

变参数分空腔单层微穿孔板结构的实际吸声系数可以通过计算机中的控制软件计算得到^[13-16]。通过这种方式,获得具有可变目标频率范围的变参数分空腔单层微穿孔板结构的实际吸声系数,可以为构建的理论吸声模型、选择的布谷鸟搜索优化算法以及利用的有限元仿真方法提供实验验证。

5 结果与讨论

图 5 中展示了这些最佳变参数分空腔单层微穿孔板结构在可变目标频率范围内的吸声系数理论值、仿真值和实验值。为避免多组数据之间出现重叠和混淆,图 5 根据结构参数组数来划分。优化变参数分空腔单层微穿孔板结构的平均吸声系数理论值、仿真值和实验值对比如表 5 所示。

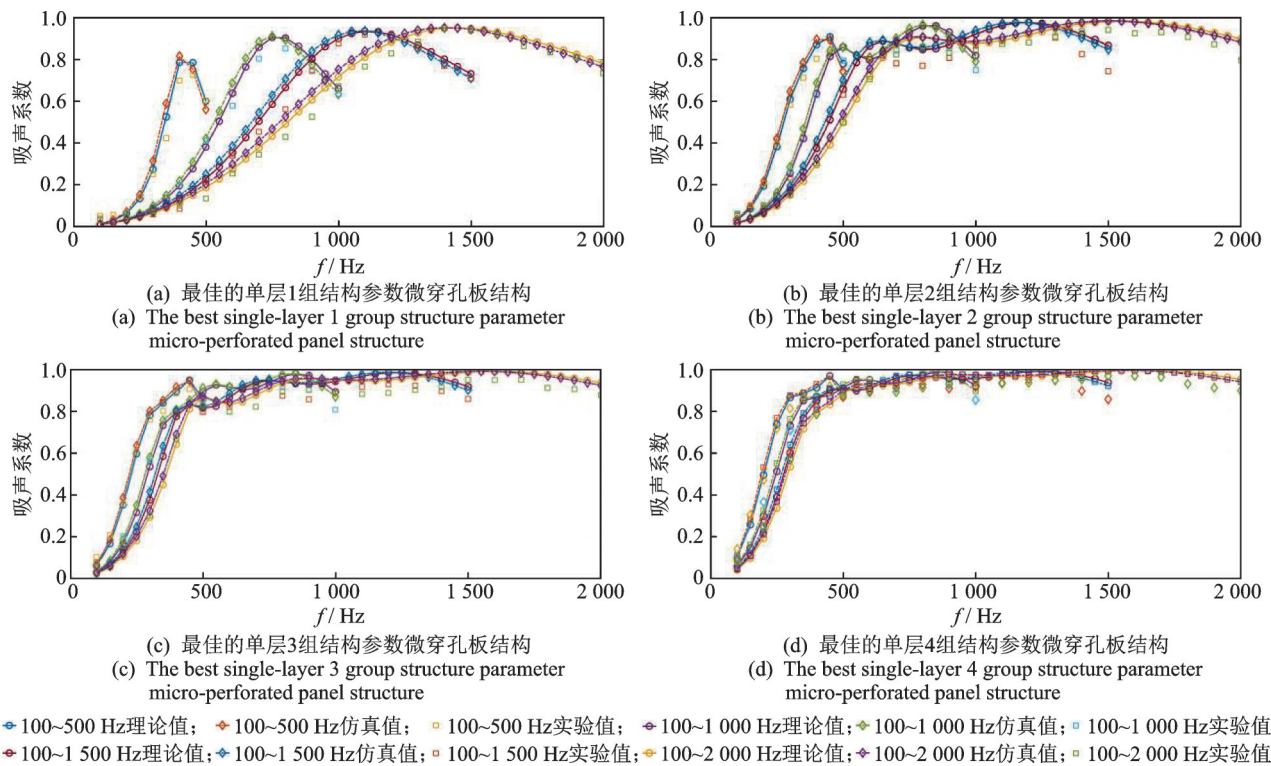


图5 最佳变参数分空腔单层微穿孔板结构的吸声系数

Fig.5 The sound absorption coefficient of the optimal single-layer microperforated panel structure with variable parameters and separated cavities

表5 优化变参数分空腔单层微穿孔板结构平均吸声系数对比

Tab.5 Comparison of average sound absorption coefficient of single-layer microperforated panel structure with optimized variable parameters and separated cavities

目标频率范围/Hz	组数	平均吸声系数		
		理论值	仿真值	实验值
100~500	1	0.354 5	0.364 7	0.333 7
	2	0.512 2	0.524 4	0.485 5
	3	0.611 4	0.623 7	0.602 8
	4	0.679 9	0.691 6	0.662 6
100~1 000	1	0.462 6	0.472 6	0.437 0
	2	0.633 5	0.643 4	0.594 4
	3	0.722 9	0.732 4	0.684 0
	4	0.778 5	0.786 9	0.745 6
100~1 500	1	0.534 8	0.545 0	0.502 8
	2	0.698 2	0.707 4	0.647 1
	3	0.780 3	0.788 3	0.734 7
	4	0.827 3	0.834 2	0.787 5
100~2 000	1	0.588 1	0.598 1	0.555 6
	2	0.742 6	0.751 0	0.706 9
	3	0.816 4	0.823 4	0.773 6
	4	0.858 0	0.863 9	0.826 7

由图5可以看出,对于不同的组数和频率范围,优化后的吸声系数理论值、仿真值和实验值的一致性高,证明了本研究所建立的理论吸声模型、选择的布谷鸟搜索优化算法和使用的有限元仿真方法是准确的。由表5可以看出,4种结构参数微穿孔板吸声结构的平均吸声系数更优于2种以及3种结构参数微穿孔板吸声结构,这说明变参数分空腔单层微穿孔板结构的吸声性能与不同结构参数的组数多少密切相关。

6 结论

1) 理论数据、仿真数据和实验数据之间的一致性高,证明了理论吸声模型、布谷鸟搜索优化算法和有限元仿真的准确性。

2) 在总厚度为 20 mm 的限制条件下,对于目标频率范围 100~500 Hz, 100~1 000 Hz, 100~1 500 Hz 和 100~2 000 Hz, 相应的变参数分空腔单层微穿孔板结构的最佳实际平均吸声系数分别为 0.662 6, 0.745 6, 0.787 5 和 0.826 7, 表现出了出色的低频吸声性能。

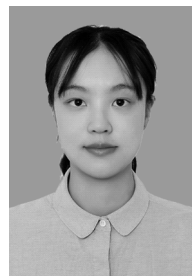
3) 随着结构参数种类的增加,变参数分空腔单层微穿孔板结构的吸声频带变宽,3组结构参数分

空腔单层微穿孔板结构和4组结构参数分空腔单层微穿孔板结构在400~2 000 Hz的频率范围内的吸声系数超过0.8。

4) 与传统微穿孔板吸声结构相比,优化变参数分空腔单层微穿孔板结构的低频吸收性能显著提高,吸声频带宽,因而在装备吸声降噪领域具有很大的实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] 张浩. 压电分流型声学超材料的隔声特性研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2016.
- [2] BUCCIARELLI F, MALFENSE-FIERRO G P, MEO M. A multilayer microperforated panel prototype for broadband sound absorption at low frequencies [J]. *Applied Acoustics*, 2019, 146:134-144.
- [3] SHI S X, JIN G Y, XIAO B, et al. Acoustic modeling and eigenanalysis of coupled rooms with a transparent coupling aperture of variable size [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 419:352-366.
- [4] DUAN H Q, SHEN X M, YANG F, et al. Parameter optimization for composite structures of microperforated panel and porous metal for optimal sound absorption performance [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(22):4798.
- [5] YANG X C, CHEN L, SHEN X M, et al. Optimization of geometric parameters of the standardized multilayer microperforated panel with finite dimension [J]. *Noise Control Engineering Journal*, 2019, 67(3):197-209.
- [6] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京:科学出版社, 2004:210-230.
- [7] 钱玉洁. 宽频带单层微穿孔板吸声体的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2014.
- [8] 焦风雷, 杨传成, 杨建军, 等. 微穿孔板吸声体的准确理论和计算机辅助设计[J]. *噪声与振动控制*, 2000(1):18-23.
JIAO Fenglei, YANG Chuancheng, YANG Jianjun, et al. Accurate theory and computer aided design of micro-perforated sound absorber [J]. *Noise and Vibration Control*, 2000(1):18-23. (in Chinese)
- [9] YANG X C, SHEN X M, DUAN H Q, et al. Improving and optimizing sound absorption performance of polyurethane foam by prepositive microperforated polymethyl methacrylate panel [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(6):2103.
- [10] YANG X C, BAI P F, SHEN X M, et al. Optimal design and experimental validation of sound absorbing multilayer microperforated panel with constraint conditions [J]. *Applied Acoustics*, 2019, 146: 334-344.
- [11] YANG X C, PENG K, SHEN X M, et al. Geometrical and dimensional optimization of sound absorbing porous copper with cavity [J]. *Materials & Design*, 2017, 131: 297-306.
- [12] BAI P F, YANG X C, SHEN X M, et al. Sound absorption performance of the acoustic absorber fabricated by compression and microperforation of the porous metal [J]. *Materials & Design*. 2019, 167: 107637.
- [13] SHEN X M, BAI P F, YANG X C, et al. Low-frequency sound absorption by optimal combination structure of porous metal and microperforated panel [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(7):1507.
- [14] YANG F, SHEN X M, BAI P F, et al. Optimization and validation of sound absorption performance of 10-layer gradient compressed porous metal [J]. *Metals*, 2019, 9(5):588.
- [15] LI X, WU Q Q, KANG L D, et al. Design of multiple parallel-arranged perforated panel absorbers for low frequency sound absorption [J]. *Materials*, 2019, 12(13): 2099.
- [16] QIAN Y J, KONG D Y, FEI J T. A note on the fabrication methods of flexible ultra microperforated panels [J]. *Applied Acoustics*, 2015, 90:138-142.



第一作者简介:杨菲,女,1995年10月生,硕士生。主要研究方向为军用机械工程装备噪声控制结构设计与优化。
E-mail:19962061916@163.com

通信作者简介:沈新民,男,1985年10月生,副教授。主要研究方向为装备噪声控制。
E-mail:shenxmj@jlgdx2014@163.com