

引用格式: 刘志恩, 袁金呈, 陈弯, 等. 复合微穿孔板吸声结构吸声特性分析及优化[J]. 声学技术, 2021, 40(4): 515-520. [LIU Zhi'en, YUAN Jincheng, CHEN Wan, et al. Analysis and optimization of acoustic absorption characteristics for composite micro-perforated panel absorbers[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(4): 515-520.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.04.012

复合微穿孔板吸声结构吸声特性分析及优化

刘志恩^{1,2}, 袁金呈¹, 陈弯¹, 沈健¹

(1. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北武汉 430070;
2. 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 湖北武汉 430070)

摘要: 针对传统微穿孔板吸声结构(Micro-Perforated Panel Absorber, MPPA)吸声带宽较窄的问题, 基于微穿孔板串并联耦合机制, 提出了三种不同结构形式的复合 MPPA 结构。首先, 依据声电类比法推导出了复合 MPPA 法向入射吸声系数的解析计算模型; 然后, 通过初步设计结构尺寸参数, 探究了该类吸声结构的宽带吸声特性; 针对 500~3 600 Hz 的目标吸声频段, 采用多种群遗传算法对复合 MPPA 以及传统简单 MPPA、串联 MPPA、并联 MPPA 分别进行优化, 对比分析了其最优吸声带宽; 最后, 利用有限元法对优化后吸声性能最佳的复合 MPPA 进行了吸声系数仿真测试以及对应的阻抗管实验测试。测试结果表明, 所提出的复合 MPPA 的宽带吸声性能优于传统简单 MPPA、串联 MPPA 和并联 MPPA 的吸声性能; 在 500~3 600 Hz 频段内, 优化后吸声性能最佳的复合 MPPA 能够实现优异的宽带吸声, 平均吸声系数高达 0.92。该类吸声结构为宽带噪声控制提供了一定的参考。

关键词: 复合微穿孔板吸声结构; 宽带吸声; 声电类比法; 多种群遗传算法

中图分类号: TB535

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-04-0515-06

Analysis and optimization of acoustic absorption characteristics for composite micro-perforated panel absorbers

LIU Zhi'en^{1,2}, YUAN Jincheng¹, CHEN Wan¹, SHEN Jian¹

(1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;
2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: To increase the acoustic absorption bandwidth of traditional micro-perforated panel absorber (MPPA), three composite MPPAs with different series-parallel combination structures are proposed in this paper. Firstly, according to the acoustoelectric analogy method, the analytical calculation models of normal incident acoustic absorption coefficient for composite MPPAs are established. Then, by preliminarily designing the structural parameters of different kinds of MPPAs, their broadband acoustic absorption characteristics are analyzed and the multi-population genetic algorithm is used to optimize their average acoustic absorption coefficients within 500~3 600 Hz. Finally, the finite element method is used to perform the simulation experiment of acoustic absorption coefficient for the composite MPPA with optimal acoustic absorption performance. The results show that the broadband acoustic absorption performance of the proposed composite MPPAs is superior to that of the traditional simple MPPA, serial coupled MPPA and parallel coupled MPPA; the optimized composite MPPA has excellent broadband acoustic absorption performance in the frequency range of 500~3 600 Hz, and its average acoustic absorption coefficient is up to 0.92, which can provide a good solution to broadband noise control.

Key words: composite micro-perforated panel absorber (MPPA); broadband acoustic absorption; the acoustoelectric analogy method; the multi-population genetic algorithm; simulation experiment

0 引言

微穿孔板(Micro-Perforated Panel, MPP)是一种

具有高声阻、低声质量的新型吸声材料。单层微穿孔板、板后空腔及刚性壁可构成传统的微穿孔板吸声结构(Micro-Perforated Panel Absorber, MPPA), 由马大猷^[1]首次提出并研究。这种吸声结构的吸声频带一般比单纯共振类型吸声结构的吸声频带宽, 然而, 由于亥姆霍兹共振机制, 其吸声特性仍然表现出单一共振峰, 且只在共振峰附近较窄的频率范围内能够有效吸声。为此, 许多学者相继对串联 MPPA 和并联 MPPA 进行了研究。

收稿日期: 2020-12-20; 修回日期: 2021-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51575410)。

作者简介: 刘志恩(1977-), 男, 湖北武汉人, 博士, 副教授, 研究方向为整车 NVH 噪声与振动控制。

通信作者: 袁金呈, E-mail: 497599550@qq.com

串联 MPPA 由多层微穿孔板和空腔以串联方式交替排列组成。在马大猷^[1]首次提出了如图 1(a)所示的双层串联 MPPA 后,便吸引了不少学者对串联 MPPA 进行研究。栾海霞等^[2]基于声电类比法建立了双层串联 MPPA 的理论分析模型,并提出了该类吸声结构的一种设计思路。Tan 等^[3]对双层串联 MPPA 的吸声系数进行了优化,并考虑了微穿孔板声振耦合效应的影响。Bravo 等^[4]对柔性的多层串联 MPPA 进行了研究,由此获得了具有较好声学吸收和传递损失的吸声结构。所有这些对串联 MPPA 的研究均已表明微穿孔板串联耦合机制具有吸声频带扩宽效应。

并联 MPPA 可分为两类。一类并联 MPPA 由两个或两个以上具有不同吸声频率特性的简单 MPPA 并联排列组成。Sakagami 等^[5]和 Yairi 等^[6]对由两个具有不同表面声阻抗的简单 MPPA 并联排列组成的 MPPA 进行了研究,并推导出了该并联 MPPA 总的表面声阻抗;文献[7-10]提出了具有并联不等深度子背腔序列的 MPPA,并对其吸声特性进行了分析。另一类并联 MPPA 的特征在于板后空腔被分为许多相邻的子背腔^[11-12],该类并联 MPPA 最典型的例子为蜂窝背腔结构^[13]。微穿孔板两子部分并联的 MPPA 如图 1(b)所示。同样,所有对并联 MPPA 的研究均已表明微穿孔板并联耦合机制能够有效扩宽吸声频带。

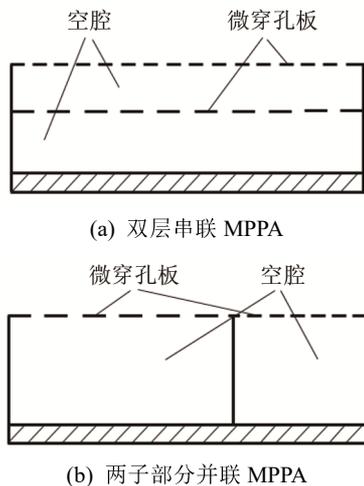


图 1 串联和并联组合的 MPPA 结构示意图
Fig.1 Structure diagrams of MPPA with series and parallel combinations

综上所述,之前的研究均已证明 MPPA 无论采用微穿孔板串联耦合机制还是采用并联耦合机制都可以改善传统简单 MPPA 的吸声性能。然而,却很少有学者对微穿孔板串并联耦合机制的声学效应进行研究。另外,也少有研究将传统简单 MPPA、串联 MPPA、并联 MPPA 以及串并联复合 MPPA 等

各类吸声结构的吸声特性进行比较分析。为此,本文首先提出三种不同结构形式的复合 MPPA 结构,利用声电类比法分别推导出其法向入射吸声系数的数学模型;然后分析该类吸声结构的宽带吸声特性;之后采用多种群遗传算法对复合 MPPA 以及传统简单 MPPA、串联 MPPA、并联 MPPA 分别进行优化,对比分析其最优吸声性能;最后通过仿真实验对优化后吸声性能最佳的复合 MPPA 进行实验验证。

1 复合 MPPA 法向入射吸声系数

1.1 微穿孔板声阻抗率

微穿孔板实质为一层穿有许多微米级微孔的薄板。图 2 为微穿孔板的示意图,其中 t 为板厚, d 为微孔直径, b 为相邻两个微孔之间的孔心间距。

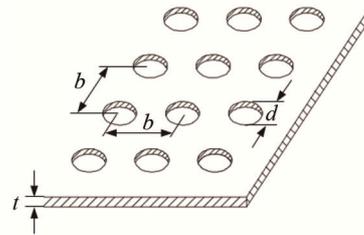


图 2 微穿孔板结构示意图
Fig.2 Structure diagram of micro-perforated panel absorber

根据马大猷的微穿孔板吸声结构理论^[1],微穿孔板可视为由大量微孔并联而成,故其声阻抗率可表示为

$$Z_{MPP} = R + j\omega M \quad (1)$$

式中:

$$R = \frac{32\eta t}{d^2} \left[\sqrt{1 + \frac{K^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}K}{8} \frac{d}{t} \right] \quad (2)$$

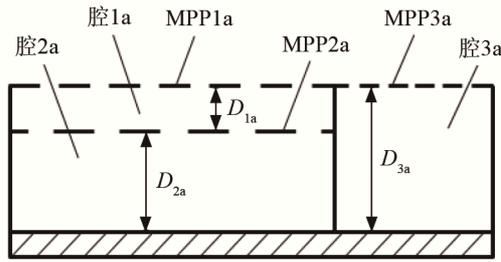
$$\omega M = \frac{\omega \rho_0 t}{\sigma} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{K^2}{2}}} + 0.85 \frac{d}{t} \right] \quad (3)$$

式中: R 和 ωM 分别为微穿孔板的声阻率和声抗率; η 为空气的动力黏滞系数; K 为微穿孔板常数; ρ_0 为空气密度; c 为声速; $\omega = 2\pi f$ 为角频率(f 为入射声波频率); σ 为微穿孔板的穿孔率(微穿孔板穿孔的面积与微穿孔板总表面积之比),当穿孔为圆形孔且方形排列时, $\sigma = \pi d^2 / (4b^2)$ 。

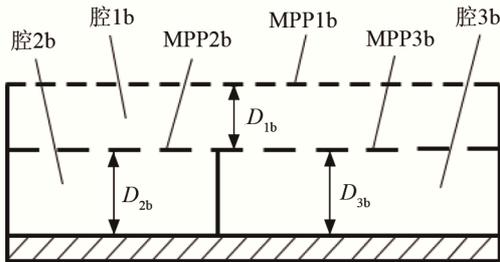
1.2 复合 MPPA 结构

根据微穿孔板串并联耦合机制,本文提出了如图 3 所示的三种不同结构形式的复合 MPPA 结构。考虑到结构的复杂性,三种复合 MPPA 只综合了微

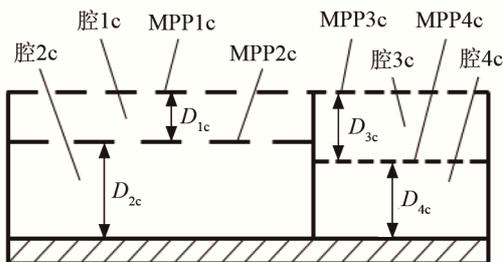
穿孔板两层串联和两子部分并联的耦合机制。图 3(a)所示的复合 MPPAa 中, MPP1a 与 MPP2a 串联, MPP1a 与 MPP3a 并联, MPP1a、MPP2a 和 MPP3a 的微孔直径和穿孔率分别为 d_{1a} 和 σ_{1a} 、 d_{2a} 和 σ_{2a} 以及 d_{3a} 和 σ_{3a} , MPP1a 和 MPP3a 与该复合 MPPA 的面积比分别为 φ_{1a} 和 φ_{2a} , 腔 1a、腔 2a 和腔 3a 的深度分别为 D_{1a} 、 D_{2a} 和 D_{3a} ; 图 3(b)所示的复合 MPPAb 中, MPP2b 与 MPP3b 并联, MPP2b 和 MPP3b 整体与 MPP1b 串联, MPP1b、MPP2b 和 MPP3b 的微孔直径和穿孔率分别为 d_{1b} 和 σ_{1b} 、 d_{2b} 和 σ_{2b} 以及 d_{3b} 和 σ_{3b} , MPP2b 和 MPP3b 与该复合 MPPA 的面积比分别为 φ_{1b} 和 φ_{2b} , 腔 1b、腔 2b 和腔 3b 的深度分别为 D_{1b} 、 D_{2b} 和 D_{3b} ; 图 3(c)所示的复合 MPPAc 中, MPP1c 与 MPP2c 串联, MPP3c 与 MPP4c 串联, MPP1c 与 MPP3c 并联, MPP1c、MPP2c、MPP3c 和 MPP4c 的微孔直径和穿孔率分别为 d_{1c} 和 σ_{1c} 、 d_{2c} 和 σ_{2c} 、 d_{3c} 和 σ_{3c} 以及 d_{4c} 和 σ_{4c} ,



(a) 复合 MPPAa



(b) 复合 MPPAb



(c) 复合 MPPAc

图 3 三种不同复合 MPPA 的结构示意图

Fig.3 Structure diagrams of three different composite MPPAs

MPP1c 和 MPP3c 与该复合 MPPA 的面积比分别为 φ_{1c} 和 φ_{2c} , 腔 1c、腔 2c、腔 3c 和腔 4c 的深度分别为 D_{1c} 、 D_{2c} 、 D_{3c} 和 D_{4c} 。

1.3 法向入射吸声系数计算

由声电类比法和文献[6]中的方法,可推导得到图 3 中三种复合 MPPA 的总的表面声阻抗率分别为

$$Z_a = \left[\frac{\varphi_{1a}}{Z_{MPP1a} + Z_{D_{1a}} // (Z_{MPP2a} + Z_{D_{2a}})} + \frac{\varphi_{2a}}{Z_{MPP3a} + Z_{D_{3a}}} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$Z_b = Z_{MPP1b} + Z_{D_{1b}} // \left[\frac{\varphi_{1b}}{Z_{MPP2b} + Z_{D_{2b}}} + \frac{\varphi_{2b}}{Z_{MPP3b} + Z_{D_{3b}}} \right]^{-1} \quad (5)$$

$$Z_c = \left[\frac{\varphi_{1c}}{Z_{MPP1c} + Z_{D_{1c}} // (Z_{MPP2c} + Z_{D_{2c}})} + \frac{\varphi_{2c}}{Z_{MPP3c} + Z_{D_{3c}} // (Z_{MPP4c} + Z_{D_{4c}})} \right]^{-1} \quad (6)$$

式中,符号//表示等效电路中的并联计算; Z_{MPPi} 和 Z_{Di} (i 为 1a、2a、3a、1b、2b、3b、1c、2c、3c 和 4c) 分别表示微穿孔板 MPP*i* 的声阻抗率和腔 i 的声阻抗率, 且有 $Z_{Di} = -j\rho_0 c \cot(\omega D_i / c)$ 。

最后, 将各复合 MPPA 的总的表面声阻抗率代入式(7):

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z - \rho_0 c}{Z + \rho_0 c} \right|^2 \quad (7)$$

可分别得到对应的法向入射吸声系数 α_a 、 α_b 和 α_c 。

2 复合 MPPA 宽带吸声特性分析

为了探究所提出的复合 MPPA 的吸声特性, 设定各复合 MPPA 总体深度为 40 mm, 表面积相同, 各微穿孔板厚度为 0.5 mm, 初步设计其他结构参数如表 1 所示, 进而可根据 1.3 节中的吸声系数计算模型得到复合 MPPA 的吸声系数曲线, 如图 4 所示。同时, 为了比较分析传统简单 MPPA、串联 MPPA、并联 MPPA 和串并联复合 MPPA 的吸声特性, 前三者的吸声系数曲线也在图 4 中显示出来(由于传统简单 MPPA、串联 MPPA、并联 MPPA 读者较为熟悉, 因此本文未对其进行详述, 同下文)。

从图 4 可以看出, 传统简单 MPPA 具有一个共振频率, 串联 MPPA 和并联 MPPA 均具有两个共振频率, 复合 MPPAa 和复合 MPPAb 均具有三个共振频率, 复合 MPPAc 则具有四个共振频率。共振频率个数越多, 表明其具有越大的宽带吸声能力。

表 1 三种不同复合 MPPA 的结构参数初始值
Table 1 Initial values of structural parameters of the three different composite MPPAs

吸声结构	孔径/mm	穿孔率/%	腔深/mm	面积比
复合 MPPAa	$d_{1a}=0.5$	$\sigma_{1a}=0.6$	$D_{1a}=10.0$	$\varphi_{1a}=0.5$
	$d_{2a}=0.5$	$\sigma_{2a}=0.6$	$D_{2a}=29.5$	
	$d_{3a}=0.5$	$\sigma_{3a}=2.5$	$D_{3a}=40.0$	$\varphi_{2a}=0.5$
复合 MPPAb	$d_{1b}=0.5$	$\sigma_{1b}=0.6$	$D_{1b}=10.0$	$\varphi_{1b}=0.5$
	$d_{2b}=0.5$	$\sigma_{2b}=0.6$	$D_{2b}=29.5$	
	$d_{3b}=0.5$	$\sigma_{3b}=2.5$	$D_{3b}=29.5$	$\varphi_{2b}=0.5$
复合 MPPAc	$d_{1c}=0.5$	$\sigma_{1c}=0.6$	$D_{1c}=10.0$	$\varphi_{1c}=0.5$
	$d_{2c}=0.5$	$\sigma_{2c}=0.6$	$D_{2c}=29.5$	
	$d_{3c}=0.5$	$\sigma_{3c}=2.5$	$D_{3c}=10.0$	$\varphi_{2c}=0.5$
	$d_{4c}=0.5$	$\sigma_{4c}=2.5$	$D_{4c}=29.5$	

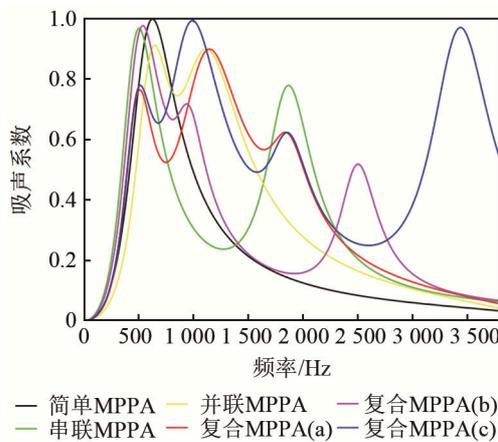


图 4 不同 MPPA 的吸声系数曲线
Fig.4 The acoustic absorption coefficient curves of different MPPAs

3 基于多种群遗传算法优化

在 1.3 节吸声系数计算模型的基础上，本文采用具有较好全局优化能力的多种群遗传算法^[14]对复合 MPPA 进行优化，从而能够进一步定量地分析并比较各 MPPA 的宽带吸声特性。优化过程中，子种群规模、种群个数和传代次数分别设置为 10、10 和 200，交叉率、变异率和迁移率分别设置为 0.8、0.05 和 0.01。目标函数定义为平均吸声系数，表达式为

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} \alpha(f_i), \quad i=1, 2, 3, \dots, N_0 \quad (8)$$

式中： $\alpha(f_i)$ 表示对应于频率 f_i 的吸声系数； N_0 表示上下限频率之差与频率步长的比值。

为体现 MPPA 的宽带吸声能力，优化的目标频率范围设置为 500~3 600 Hz，且频率步长设置为 1 Hz。优化变量设置为表 1 中的结构参数值。考虑到加工手段和实际应用，各优化变量的约束范围

如下：

- 0.3 mm ≤ 孔径 d ≤ 1 mm；
- 0.5% ≤ 穿孔率 σ ≤ 6%；
- 5 mm ≤ D_{1a} 、 D_{1b} 、 D_{1c} 、 D_{3c} ≤ 35 mm；
- 0.1 ≤ φ_{1a} 、 φ_{1b} 、 φ_{1c} ≤ 0.9；

且有：

$$D_{2a} = 39.5 \text{ mm} - D_{1a}, \quad D_{2b} = D_{3b} = 39.5 \text{ mm} - D_{1b}, \\ D_{2c} = 39.5 \text{ mm} - D_{1c}, \quad D_{4c} = 39.5 \text{ mm} - D_{3c}; \\ \varphi_{2a} = 1 - \varphi_{1a}, \quad \varphi_{2b} = 1 - \varphi_{1b}, \quad \varphi_{2c} = 1 - \varphi_{1c}.$$

最终得到复合 MPPA 结构参数的优化结果如表 2 所示，吸声系数的优化结果如图 5 所示。由图 5 可以看出，在 500~3 600 Hz 的频率范围内，与传统简单 MPPA、串联 MPPA 和并联 MPPA 相比，所提出的复合 MPPA 具有更宽的吸声频带，这一点与第 2 节中由共振频率个数分析得到的结论相符；当具有相同共振频率个数时，串联 MPPA 比并联 MPPA 具有更宽的吸声频带，复合 MPPAb 比复合 MPPAa 具有更连续优异的宽带吸声性能；在 500~3 600 Hz 频段内，复合 MPPAc 可实现最佳的连续宽带吸声，其平均吸声系数达到 0.92。

表 2 三种不同复合 MPPA 结构参数的优化结果
Table 2 Optimized results of structure parameters of the three different composite MPPAs

吸声结构	孔径/mm	穿孔率%	腔深/mm	面积比
复合 MPPAa	$d_{1a}=0.3$	$\sigma_{1a}=2.93$	$D_{1a}=12.8$	$\varphi_{1a}=0.83$
	$d_{2a}=0.3$	$\sigma_{2a}=0.93$	$D_{2a}=26.7$	
	$d_{3a}=0.3$	$\sigma_{3a}=6.00$	$D_{3a}=40$	$\varphi_{2a}=0.17$
复合 MPPAb	$d_{1b}=0.3$	$\sigma_{1b}=3.50$	$D_{1b}=14.9$	$\varphi_{1b}=0.19$
	$d_{2b}=0.3$	$\sigma_{2b}=6.00$	$D_{2b}=24.6$	
	$d_{3b}=0.3$	$\sigma_{3b}=1.01$	$D_{3b}=24.6$	$\varphi_{2b}=0.81$
复合 MPPAc	$d_{1c}=0.3$	$\sigma_{1c}=3.19$	$D_{1c}=10.4$	$\varphi_{1c}=0.68$
	$d_{2c}=0.3$	$\sigma_{2c}=0.99$	$D_{2c}=29.1$	
	$d_{3c}=0.3$	$\sigma_{3c}=6.00$	$D_{3c}=25.4$	$\varphi_{2c}=0.32$
	$d_{4c}=0.3$	$\sigma_{4c}=1.68$	$D_{4c}=14.1$	

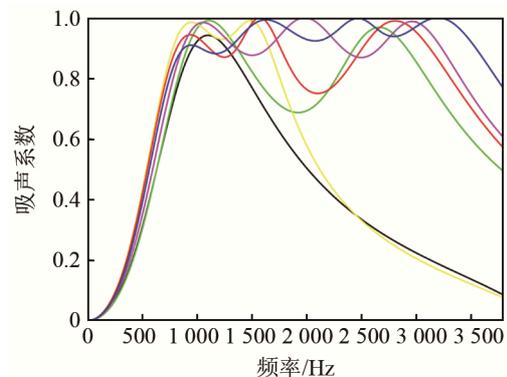


图 5 不同 MPPA 优化后的吸声系数曲线
Fig.5 The acoustic absorption coefficient curves of different MPPAs after optimization

4 仿真及实验验证

为验证优化结果的准确性，本文采用有限元法对优化后吸声性能最佳的复合 MPPAc 进行吸声系数仿真实验^[15-16]。该仿真实验模拟了用阻抗管测量吸声系数的过程，有限元模型如图 6 所示，其中网格单元最大长度为 4 mm，虚拟阻抗管长度为 250 mm，内径为 54 mm。优化后的复合 MPPAc 置于阻抗管末端，阻抗管另一端定义单位速度边界条件。忽略板面振动，微穿孔板可通过定义传递导纳属性来表示^[17-18]。在进行谐振响应后(频率步长为 20 Hz)，通过直接提取节点 1 和节点 2 处的声压值来模拟实际传声器测量声压的过程，再根据传递函数法即可得到所测吸声结构的吸声系数。

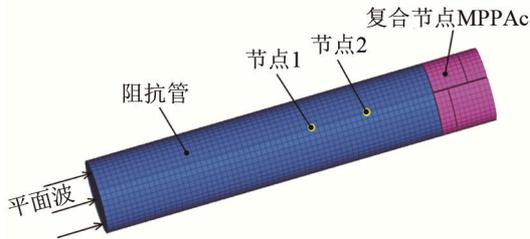


图 6 优化的复合 MPPAc 吸声系数仿真实验有限元模型
Fig.6 The finite element model for simulation experiment of acoustic absorption coefficient of the optimized composite MPPAc

为了验证实际优化的效果，根据表 2 中的数据，制作了优化后吸声性能最佳的复合 MPPAc 样件。基于双传声器传递函数法，利用阻抗管测量出 MPPAc 样件的吸声系数^[9]，测量试验台架如图 7 所示。本文所使用的阻抗管内径为 54 mm，壁厚为 3 mm，两个传声器(PCB 型号 3708B02)测量管内的声压值，根据 500~3 600 Hz 的目标频率范围，两

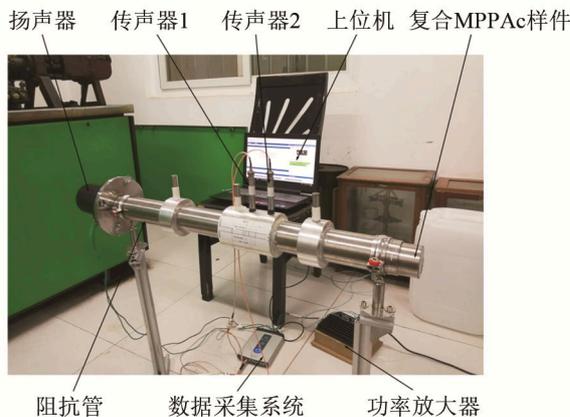


图 7 优化的复合 MPPAc 吸声系数测量试验台架
Fig.7 The test bench for measuring acoustic absorption coefficients of the optimized composite MPPAc

传声器之间的距离选择 45 mm。由功率放大器驱动的扬声器连接在阻抗管的一端作为激励源，优化后的复合 MPPAc 置于阻抗管的另一端。测试仪器采用 LMS SCADAS 数据采集系统，LMS SCADAS 硬件可与 LMS Test.Lab 软件无缝集成，可以进行传声器处声压的采集，根据传递函数法即可得到所测吸声结构的吸声系数。

图 8 为优化后的复合 MPPAc 吸声系数的理论预测结果、仿真测试结果及实验测试结果的对比如。由图 8 可以看出，理论预测得到的吸声系数相较于仿真测试和实验测试得到的吸声系数虽然在第二个峰值频率处频率向高频有所偏移，第三个峰值频率附近吸声系数幅值略偏大，但是这三条吸声系数曲线总体趋势比较一致，验证了所提出的复合 MPPA 吸声系数计算模型的准确性以及优化程序的有效性，进一步证明了复合 MPPA 连续优异的宽频吸声特性。

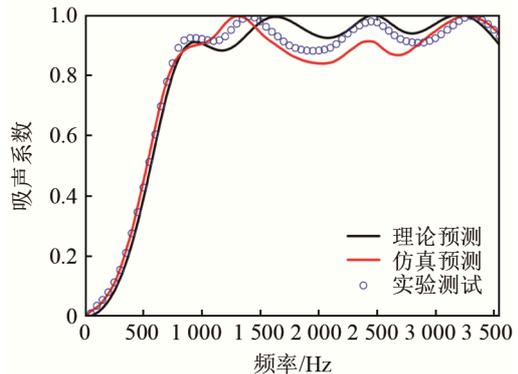


图 8 优化后的复合 MPPAc 吸声系数理论预测结果与仿真实验结果对比
Fig.8 Comparison of the acoustic absorption coefficient curves of the composite MPPAc obtained by theoretical prediction, simulation experiment and actual measurement

5 结论

本文根据微穿孔板串并联耦合机制提出了三种复合 MPPA 结构，并采用声电类比法推导出了各复合 MPPA 法向入射吸声系数的数学模型。基于此模型，初步探究了该类吸声结构的宽带吸声特性，并进一步利用多种群遗传算法对复合 MPPA 以及传统简单 MPPA、串联 MPPA、并联 MPPA 分别进行了优化，对比分析了其在 500~3 600 Hz 目标频段内的宽带吸声性能。最后通过有限元法进行了吸声系数仿真测试以及对应的阻抗管实验测试，对优化结果进行了验证。结果表明，与传统简单 MPPA、串联 MPPA、并联 MPPA 相比，复合 MPPA 具有更好的宽带吸声能力，且优化后吸声性能最佳的复合

MPPA 能够在 500~3 600 Hz 频段内实现连续优异的宽带吸声, 平均吸声系数高达 0.92。基于其优越的性能, 该复合 MPPA 为宽带噪声控制提供一种高效的解决方法, 可广泛应用于如大型通风机、压缩机等工业领域。

参 考 文 献

- [1] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论和设计[J]. 中国科学, 1975, **5**(1): 38-50.
- [2] 栾海霞, 盛美萍, 刘志宏. 双层串联微穿孔板吸声体设计理论及应用研究[J]. 机械科学与技术, 2008, **27**(11): 1343-1345, 1350. LUAN Haixia, SHENG Meiping, LIU Zhihong. On design of a double microperforated panel absorber[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, **27**(11): 1343-1345, 1350.
- [3] TAN W H, RIPIN Z M. Optimization of double-layered micro-perforated panels with vibro-acoustic effect[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2016, **38**(3): 745-760.
- [4] BRAVO T, MAURY C, PINHÈDE C. Enhancing sound absorption and transmission through flexible multi-layer micro-perforated structures[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, **134**(5): 3663-3673.
- [5] SAKAGAMI K, NAGAYAMA Y, MORIMOTO M, et al. Pilot study on wideband sound absorber obtained by combination of two different microperforated panel (MPP) absorbers[J]. Acoustical Science and Technology, 2009, **30**(2): 154-156.
- [6] YAIRI M, SAKAGAMI K, TAKEBAYASHI K, et al. Excess sound absorption at normal incidence by two microperforated panel absorbers with different impedance[J]. Acoustical Science and Technology, 2011, **32**(5): 194-200.
- [7] WANG C Q, HUANG L X, ZHANG Y M. Oblique incidence sound absorption of parallel arrangement of multiple micro-perforated panel absorbers in a periodic pattern[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, **333**(25): 6828-6842.
- [8] GUO W C, MIN H Q. A compound micro-perforated panel sound absorber with partitioned cavities of different depths[J]. Energy Procedia, 2015, **78**: 1617-1622.
- [9] GUO W C, MIN H Q. Micro-perforated panel sound absorbers with an array of partitioned cavities of different dimensions[C]//2015 International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF). Xi'an, China. IEEE, 2015: 1-4.
- [10] 闵鹤群, 郭文成. 具有并联不等深度子背腔序列的微穿孔板吸声体吸声特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, **47**(1): 177-183. MIN Hequn, GUO Wencheng. Absorption characteristics of micro-perforated panel sound absorbers with array of parallel-arranged sub-cavities with different depths[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, **47**(1): 177-183.
- [11] LIU J, HERRIN D W. Enhancing micro-perforated panel attenuation by partitioning the adjoining cavity[J]. Applied Acoustics, 2010, **71**(2): 120-127.
- [12] LIU W Y, HERRIN D W, BIANCHINI E. Diffuse field sound absorption of microperforated panels with special backings[J]. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 2017, **1**(2): 464-470.
- [13] YANG C, CHENG L. Sound absorption of microperforated panels inside compact acoustic enclosures[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, **360**: 140-155.
- [14] QIAN Y J, CUI K, LIU S M, et al. Optimization of multi-size micro-perforated panel absorbers using multi-population genetic algorithm[J]. Noise Control Engineering Journal, 2014, **62**(1): 37-46.
- [15] 曾鑫, 范鑫, 李昱. 多腔穿孔管消声器传递损失参数灵敏度分析[J]. 声学技术, 2017, **36**(1): 64-68. ZENG Xin, FAN Xin, LI Yu. Parameter sensitivity analysis of the transmission loss of multi-chamber perforated tube muffler[J]. Technical Acoustics, 2017, **36**(1): 64-68.
- [16] 詹福良, 徐俊伟. Virtual.Lab Acoustics 声学仿真计算从入门到精通[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.
- [17] 卢焯华, 陈弯, 刘志恩, 等. 微穿孔板简化仿真方法在双层微穿孔结构中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2019, **39**(1): 1-6. Lu Chihua, Chen Wan, Liu Zhien, et al. A simplified simulation method for micro-perforated panel with double layer micro-perforated structure[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, **39**(1): 1-6.
- [18] GERDES R, ALEXANDER J, HERDTLE T. Acoustic performance prediction of micro-perforated panels using computational fluid dynamics and finite element analysis[C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2013.
- [19] CHUNG J Y. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1980, **68**(3): 907-907.