引用格式：刘志恩，袁金呈，陈弯，等. 隔膜抽气泵用复合微穿孔管消声器优化设计[J]. 声学技术, 2021, **40**(2): 222-227. [LIU Zhi'en, YUAN Jincheng, CHEN Wan, et al. Optimization design of composite microperforated tube muffler for diaphragm air pump[J]. Technical Acoustics, 2021, **40**(2): 222-227.] **DOI**: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.02.012

隔膜抽气泵用复合微穿孔管消声器优化设计

刘志恩[1,2]，袁金呈[1]，陈 弯[1]，魏浩钦[1]

(1. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室，武汉理工大学，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：针对某隔膜抽气泵的排气噪声频谱特性，提出了一种高效宽频的串并联复合微穿孔管消声器。推导了复合微穿孔管消声器传递损失的数值计算模型，并基于此模型利用 Isight 软件集成 Actran 和 Matlab 软件，采用多种群遗传算法对复合微穿孔管消声器的平均传递损失进行优化，来扩宽消声频带提高消声性能。对优化的消声器进行试验测试，结果表明，采用优化后的串并联复合微穿孔管消声器，其隔膜抽气泵排气噪声在全频段内都有明显下降，总声压级下降 10 dB(A)，在最关心的 1 000～5 000 Hz 频段内，消声量最高达到了 22 dB(A)。试验研究证明，所提出的复合微穿孔管消声器及其优化设计程序为控制宽频带噪声提供了一种高效可行的方法。

关键词：隔膜抽气泵；复合微穿孔管消声器；数值计算；优化设计；试验验证

中图分类号：TB 535.2 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-3630(2021)-02-0222-06

Optimization design of composite microperforated tube muffler for diaphragm air pump

LIU Zhi'en[1,2], YUAN Jincheng[1], CHEN Wan[1], WEI Haoqin[1]

(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: According to the spectrum characteristics of exhaust noise of a diaphragm pump, an efficient broadband series-parallel composite microperforated tube muffler is proposed. A numerical model for the transmission loss of composite microperforated tube muffler is derived. Based on this model, the average transmission loss of composite microperforated tube muffler is optimized by using Isight software integrated with Actran and Matlab software, and a variety of group genetic algorithms are used to widen the frequency band of muffling and improve the performance of muffling. The test results of the optimized muffler show that the exhaust noise of the diaphragm pump decreases obviously in the whole frequency band, the total sound pressure level is decreased by 10 dB(A), and the maximum noise reduction is 22 dB(A) in the most concerned frequency band of 1 000～5 000 Hz. The experimental results show that the composite microperforated tube muffler and its optimal design program provide an efficient and feasible method for broadband noise control.

Key words: diaphragm air pump; composite microperforated tube muffler; numerical calculation; optimal design; test verification

0 引 言

隔膜抽气泵是一种真空泵，具有免维护和高可靠性的特点，因此广泛应用于医疗设备、自动化设备、环保分析、生化分析、军用领域等。隔膜抽气泵最主要的噪声源是工作时的排气噪声，其中高频宽带噪声对排气噪声的贡献量较大[1]。消声器是降低隔膜抽气泵排气噪声的有效途径，本文利用微穿孔管消声器清洁、消声频带宽的特性，将其应用在隔膜抽气泵的排气降噪中。

微穿孔板(Micro-Perforated Panel, MPP)是一种新型的宽频带高吸声材料，由马大猷院士[2]在 1975 年首次研究并提出了微穿孔板吸声结构理论。随后，这种材料由于不需添加任何多孔吸声材料就能获得较好吸声效果，而被广泛用于管道消声[3-5]。通常单腔微穿孔管消声器的消声频带比共振型消声器的消声带宽更宽[6]。然而，由于亥姆霍兹共振机制，单腔微穿孔管消声器的消声特性仍表现为单共振峰，并且只在共振峰附近的窄带范围内能够有效消声。

收稿日期：2019-12-18；**修回日期**：2020-04-26
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：刘志恩，E-mail: lzen@whut.edu.cn

大量研究表明，通过采用微穿孔管串联[3,7]或并联[8-9]的结构形式从而引入额外的共振峰，可以显著扩宽单腔微穿孔管消声器的消声频带并增加其消声量。此外，本课题组团队最近的一项研究[10]表明，采用串并联复合结构模式的微穿孔管消声器具有更宽频的消声特性。

本文在已有研究的基础上，针对隔膜抽气泵排气噪声的中高频噪声高且频带宽的特点，提出了一种新型的复合微穿孔管消声器，推导了该消声器传递损失的数值计算方法，基于多种群遗传算法对该消声器进行了优化设计，最后通过实验测试验证了其消声效果。

1　隔膜抽气泵排气噪声特性测试

为分析隔膜抽气泵排气噪声频谱特性，建立了排气噪声测试台架。测试时，抽气泵置于空旷安静的环境中，并在最大流量的工况下运行，背景噪声为 43 dB(A)。抽气泵进气口接了一段长塑料管，以屏蔽进气噪声的影响。依据泵的排气噪声测试标准《GB/T 29529-2013 泵的噪声测量与评价方法》[11]，传声器距离抽气泵排气口 0.5 m，且传声器轴线与气流方向成 45°夹角，距离地面约 1 m 高。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，可以进行倍频程和 1/3 倍频程测量。图 1 为试验装置示意图。

图 2 为测得的排气噪声频谱图，根据频谱图可知，抽气泵排气噪声主要集中在中高频宽频带范围内，总声压级为 80 dB(A)。本文主要考虑消除 70 dB(A)及以上的噪声频段，因此下文中将目标消声频段设置为了 1 000～5 000 Hz。

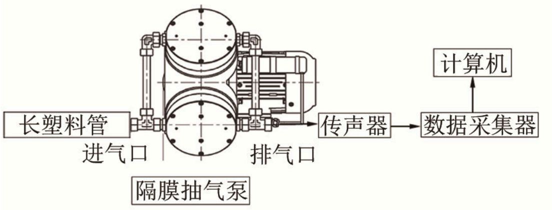

图 1　试验装置示意图

Fig.1　Diagram of the test device

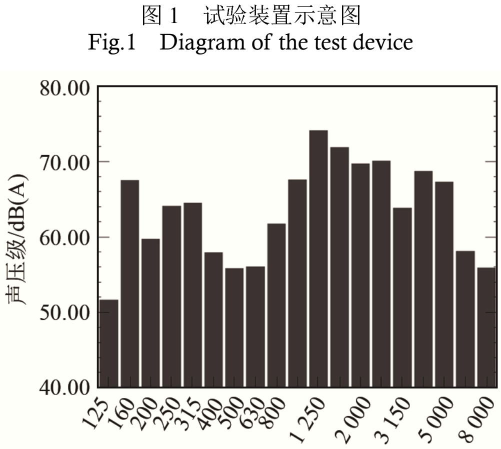

图 2　隔膜抽气泵排气噪声频谱

Fig.2　Exhaust noise spectrum of diaphragm pump

2　串并联复合微穿孔管消声器

2.1　结构形式

微穿孔板是一种吸声系数高、吸声频带宽的新型吸声材料。图 3 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。

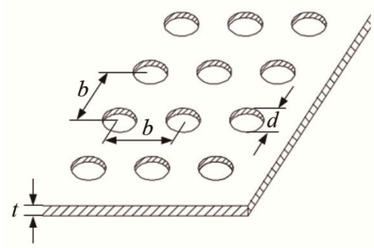

图 3　微穿孔板结构示意图

Fig.3　Structural diagram of microperforated plate

串并联复合微穿孔管消声器是由两个双层串联的微穿孔管再通过并联的方式组成的，因而该消声器包括四个管状的微穿孔板，其结构如图 4 所示。此消声器整体为圆柱形，其直通管内径为 R_0，微穿孔板 1(MPP1)和微穿孔板 2(MPP2)为串联耦合，同样，微穿孔板 3 (MPP3)和微穿孔板 4 (MPP4)也为串联耦合，最终 MPP1 和 MPP2 组成的串联耦合单元与 MPP3 和 MPP4 组成的串联耦合单元形成并联耦合。MPP1 与 MPP2、MPP2 与壳体、MPP3 与 MPP4 以及 MPP4 与壳体的径向间距分别为 D_1、D_2、D_3 和 D_4。MPP1 和 MPP3 的轴向长度分别为 L_1 和 L_2，本文仅研究 $L_1 = L_2$ 的这种情况。所提出的这种具有低排气背压的消声器结合了微穿孔板串联和并联结构模式的优点，因此与普通的单腔微穿孔管消声器相比，在拓宽消声带宽和提高降噪量方面具有较大的优势。

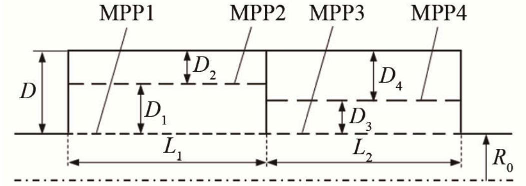

图 4　串并联复合微穿孔管消声器示意图

Fig.4　Schematic diagram of series-parallel composite microperforated plate muffler

2.2 传递损失数值计算

串并联复合微穿孔管消声器的传递损失可以通过有限元方法(Finite element method, FEM)计算得出[12]。在计算过程中，当消声器的外形结构尺寸一定时，其传递损失则主要由微穿孔管的声阻抗率决定。根据马大猷院士的理论[2]，可以将微穿孔视为短管，而短管的声阻抗率表示为

$$Z_1=\mathrm{R}+\mathrm{j}\omega M \tag{1}$$

式中：

$$\mathrm{R}=\frac{32\eta t}{d^2}\left(\sqrt{1+\frac{k^2}{32}}+\frac{\sqrt{2}k}{8}\frac{d}{t}\right) \tag{2}$$

$$\omega M=\omega\rho t\left(1+\frac{1}{\sqrt{9+\dfrac{k^2}{2}}}+0.85\frac{d}{t}\right) \tag{3}$$

$$k=\frac{d}{2}\sqrt{\frac{\omega\rho}{\eta}} \tag{4}$$

式中，R 和 ωM 分别是穿孔的声阻率和声抗率；η 是动态黏度；ρ 是空气密度；$\omega=2\pi f$ 是角频率(f 是入射声波的频率)。

将微穿孔管视为大量微穿孔的并联，从而得到微穿孔管的传递阻抗率为

$$Z_{\mathrm{MPP}}=Z_1/\sigma \tag{5}$$

式中：σ 为微穿孔管的穿孔率(微穿孔管穿孔的面积与微穿孔管总表面积之比)，当微穿孔管穿孔的形状为圆形时，$\sigma=\pi d^2/(4b^2)$。

在进行仿真计算时，假定微穿孔管具有足够的刚度，可以忽略其在任何声载荷下的振动效应。图 5 为串并联复合微穿孔管消声器的有限元模型，其中耦合面 1 和 2、耦合面 3 和 4、耦合面 5 和 6 以及耦合面 7 和 8 分别形成四个不同的传递阻抗界面，从而分别定义了四个微穿孔管两侧的声压和质点振速的关系[13]。进行传递阻抗属性定义时，所代入计算的传递阻抗由式(1)～(5)计算而得，在进行谐振响应后，即可以得到消声器的传递损失值。

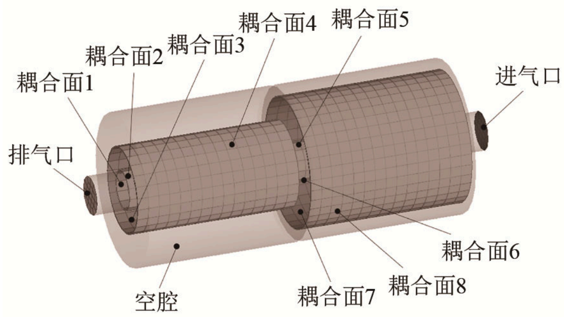

图 5 串并联复合微穿孔管消声器有限元模型

Fig.5 Finite element model of series-parallel composite microperforated plate muffler

3 串并联复合微穿孔管消声器的优化设计

采用串并联复合的方式可以实现一种具有优良消声特性潜能且体积较小的微穿孔管消声器。然而针对特定的目标消声频率范围，其具体结构参数不易直接确定，因此，需要对其平均传递损失进行优化，以获得在给定参数范围内结构参数的最优值，得到消声器最佳设计方案。

3.1 基础优化模型和优化参数

为了降低排气背压，串并联复合微穿孔管消声器的直通管半径 R_0 应与抽气泵的排气管半径相同，因而将其设为 8.75 mm。受隔膜抽气泵使用空间的限制，将空腔深度 D 设为 25.5 mm，轴向长度 L_1 与 L_2 均设为 75 mm。此外，考虑到加工工艺和实际应用，微穿孔板厚度设为 0.5 mm。因此，对于此串并联复合微穿孔管消声器来说，共有 10 个需要进行优化的结构参数：穿孔直径 d_1、d_2、d_3 和 d_4；穿孔间距 b_1、b_2、b_3 和 b_4；空腔深度 D_1 和 D_3。MPP 的穿孔直径和孔心间距设定范围为

$$0.3\ \mathrm{mm}\leqslant d_1, d_2, d_3, d_4\leqslant 0.8\ \mathrm{mm} \tag{6}$$

$$1.5\ \mathrm{mm}\leqslant b_1, b_2, b_3, b_4\leqslant 8\ \mathrm{mm} \tag{7}$$

为保证一定优化效果同时使优化过程更容易实现，本文去除空腔深度 D_1 和 D_3 作为优化变量，取 D_1 以及 D_3 为 5、10、15 和 20 mm。由于空腔深度 D 的值是固定的，故 D_2 和 D_4 的值可以通过空腔深度 D、D_1 和 D_3 得出，有：

$$D_2=D-D_1;\ D_4=D-D_3 \tag{8}$$

根据 D_1 和 D_3 的取值以及消声器结构的对称性，得到如表 1 所示的 10 个基础优化模型，从而整个优化过程转变为分别对这 10 个基础优化模型进行优化，从中选择的最优结果即为优化的最终结果。针对每一个基础优化模型，优化的结构参数变为 d_i 和 b_i (i=1,2,3,4)。

在优化之前，建立每个复合微穿孔管消声器基础优化模型的有限元模型，有限元模型的最大单元

表 1 优化模型

Table 1 Optimization model

模型	D_1/mm	D_3/mm	模型	D_1/mm	D_3/mm
M1	5	5	M6	15	15
M2	10	5	M7	20	5
M3	10	10	M8	20	10
M4	15	5	M9	20	15
M5	15	10	M10	20	20

尺寸设置为 5 mm，并设定优化变量初始值(d_1、d_2、d_3和d_4的初始值被设为 0.8 mm，b_1、b_2、b_3和b_4的初始值设为 5 mm)。

3.2　基于多种群遗传算法的结构优化

在 2.2 节传递损失数值计算的基础上，利用 Isight 软件对 Actran 和 Matlab 软件进行集成，以对每个复合微穿孔管消声器基础优化模型的平均传递损失进行优化，其优化过程如图 6 所示。

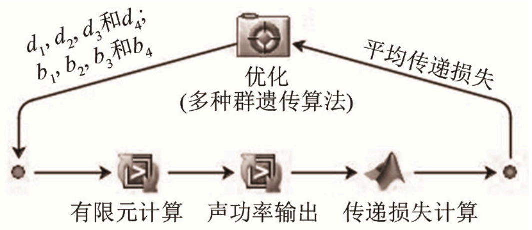

图 6　优化过程
Fig.6　Optimization process

本文所采用的优化算法是多种群遗传算法，多种群遗传算法是一种全局优化算法，其比传统的遗传算法具有更好的全局优化能力，已成功应用于微孔管吸声结构的优化[14-15]。定义的优化参数如表 2 所示。

表 2　定义的优化参数
Table 2　Defined optimization parameters

计算方法	参数名称	数值
有限元数值计算	空气密度/(kg·m^{-3})	1.225
	声速/(m·s^{-1})	340
	动态黏度/(kg·ms^{-1})	1.82×10^{-5}
	下限频率/Hz	1 000
	上限频率/Hz	5 000
	频率步长/Hz	40
计算方法	**参数名称**	**数值**
多种群遗传算法优化	子种群规模	10
	种群个数	10
	传代次数	30
	交叉概率	0.8
	变异概率	0.01
	迁移概率	0.01

优化变量设置为d_i和b_i (i=1,2,3,4)，目标函数设置为平均传递损失的最大值，如式(9)所示：

$$\bar{L}_{\mathrm{T}}=\frac{1}{N_0}\sum_{i=1}^{N_0} L_{\mathrm{T}}(f_i),\ \ i=1,\ 2,\ 3,\cdots,N_0 \tag{9}$$

式中：$\bar{L}_{\mathrm{T}}(f_i)$表示在频率$f_i$下所对应的传递损失值；$N_0$表示上下限频率之差与频率步长的比值。

优化的频率范围为 1 000～5 000 Hz。此外，为了缩短优化时间，频率步长设置为 40 Hz。通过对表 1 中的 10 个复合微穿孔管消声器基础优化模型进行仿真优化，得到对应 10 组消声器结构参数优化结果，如表 3 所示。

表 3　10 组串并联复合微穿孔管消声器模型的优化结果
Table 3　Optimization results of ten series-parallel composite microperforated plate muffler models

模型	d_1/mm	b_1/mm	d_2/mm	b_2/mm	d_3/mm	b_3/mm	d_4/mm	b_4/mm	$\bar{L}_{\mathrm{T}}$/dB
M1	0.476	2.224	0.782	1.573	0.499	1.936	0.792	1.515	34.588
M2	0.346	1.568	0.553	1.504	0.365	1.761	0.727	1.514	35.473
M3	0.356	1.660	0.779	1.758	0.302	1.501	0.712	2.150	34.418
M4	0.507	2.842	0.601	5.417	0.339	1.559	0.794	1.715	35.742
M5	0.494	2.187	0.796	2.111	0.337	1.510	0.649	1.710	34.187
M6	0.302	1.792	0.441	4.345	0.582	2.322	0.766	1.640	36.194
M7	0.682	3.489	0.410	4.155	0.594	1.877	0.795	1.598	35.665
M8	0.438	2.371	0.305	2.442	0.481	3.158	0.369	3.101	36.431
M9	0.318	1.790	0.313	3.032	0.333	1.944	0.496	4.396	40.612
M10	0.530	2.764	0.602	5.932	0.316	1.760	0.308	2.677	40.231

通过对比分析表 3 中平均传递损失结果可知，模型 M9 所对应的基础优化模型的优化结果优于其他模型，其传递损失优化结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出，基于模型 M9 优化的消声器除在 2 280 Hz 和 4 560 Hz 处存在低谷外，在其他频段内均有较高的传递损失，其平均传递损失达到 40.6 dB，且在整个频段内传递损失均在 10 dB 以上。因此最终选择此消声器作为复合微穿孔管消声器优化的最终方案。

4　试验验证

根据基础优化模型(M9)的优化结果，制作串并联复合微穿孔管消声器样件，如图 8 所示。

为了进一步验证串并联复合微穿孔管消声器的实际消声效果，将消声器样件安装在抽气泵排气口上，再次进行排气噪声测试，其测试环境和工况与图 1 完全相同。

图 9 为装有优化的复合微穿孔管消声器和无消声器时排气噪声总声压级(简称 OA)曲线对比图。从图 9 中可知，安装优化的复合微穿孔管消声器后，

抽气泵的排气噪声 OA 值有了明显的降低，排气噪声 OA 值下降约 10 dB(A)。

图 10 为有无串并联复合微穿孔管消声器时排气噪声频谱对比图。从图 10 中看出，安装优化的复合微穿孔管消声器后，排气噪声在大多数频段内都有明显下降，尤其在所关心的 1 000～5 000 Hz 频段内，消声量最高达到了 22 dB(A)，验证了所提出的串并联复合微穿孔管消声器的高效宽频消声特性。

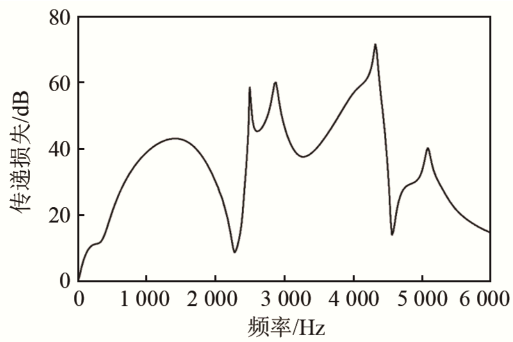

图 7 最优模型的传递损失优化结果
Fig.7 Optimization results of the transmission loss of optimal model

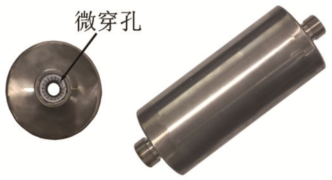

图 8 串并联复合微穿孔管消音器样件
Fig.8 A sample of series-parallel composite microperforated plate muffler

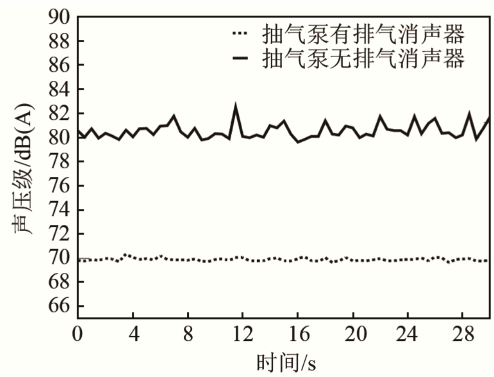

图 9 有、无消声器的隔膜抽气泵排气噪声 OA 曲线对比
Fig.9 Comparison of exhaust noise OA curves of the diaphragm pump with and without muffler

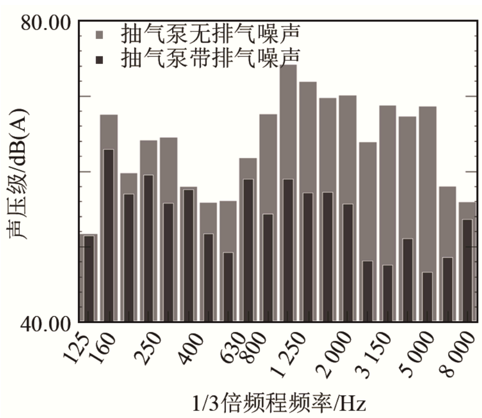

图 10 有、无消声器的隔膜抽气泵排气噪声频谱对比
Fig.10 Spectrum comparison of exhaust noise of the diaphragm pump with and without muffler

5 结 论

为了降低隔膜抽气泵工作时的中高频宽带排气噪声，本文提出了一种串并联复合微穿孔管消声器，推导了其传递损失数值计算模型，利用 Isight 软件集成相关的仿真软件，采用多种群遗传算法对消声器的结构参数进行了优化，并通过实验验证了其实际消声效果。结果表明，优化后的串并联复合微穿孔管消声器可以满足隔膜抽气泵中高频的降噪目标，排气噪声在大多数频段内都有明显下降，尤其在所关心的 1 000～5 000 Hz 频段内，消声量最高达到了 22 dB(A)，证明了所提出的串并联复合微穿孔管消声器具有高效宽频消声特性，同时证明其优化设计是切实有效的。该结构的微穿孔消声器具有体积小、频带宽、无污染、适应性强且可靠性强等优点，在汽车等其他领域也有很好的应用前景和潜力。

参 考 文 献

[1] 唐耀阳，刘志恩，李兵，等. 隔膜抽气泵排气噪声控制研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, **33**(9): 135-138,149.
TANG Yaoyang, LIU Zhi'en, LI Bing, et al. Study on exhaust noise control of the diaphragm air pump[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, **33**(9): 135-138,149.

[2] 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.

[3] WANG X N, CHOY Y S, CHENG L. Hybrid noise control in a duct using a light micro-perforated plate[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2012, **132**(6): 3778-3787.

[4] 刘志恩，沈健，卢炽华，等. 进气系统微穿孔管消声器设计与优化[J]. 声学技术, 2020, **39**(6): 715-720.
LIU Zhi'en, SHENG Jian, LU Chihua, et al. Design and optimization of micro-perforated tube muffler in intake system[J]. Technical Acoustics, 2020, **39**(6):715-720.

[5] 谢丽萍，卢炽华，刘志恩，等. 组合声源测试消声器传递损失的噪声信号修正方法[J]. 声学技术, 2019, **38**(4): 440-445.
XIE Liping, LU Chihua, LIU Zhi'en, et al. A noise signal correction method for muffler transmission 1oss measurement with combined sound source[J]. Technical Acoustics, 2019, **38**(4): 440-445.

[6] 侯九霄，朱海潮，毛荣富. 渐变截面背腔微穿孔管消声器声传递特性分析[J]. 振动与冲击, 2019, **38**(14): 189-194.
HOU Jiuxiao, ZHU Haichao, MAO Rongfu. Theoretical analysis on the transmission loss of a micro-perforated tube muffler with gradually changed back cavity[J]. Journal of Vibration and Shock,

2019, **38**(14): 189-194.
[7] 张孟浩，左曙光，相龙洋，等. 双层微穿孔管消声器传声损失理论计算与分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, **46**(2): 505-511.
ZHANG Menghao, ZUO Shuguang, XIANG Longyang, et al. Transmission loss theoretical calculation and analysis of double-layer micro-perforated muffler[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, **46**(2): 505-511.
[8] 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.
[9] 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.
[10] LU C H, CHEN W, ZHU Y W, et al. Comparison analysis and optimization of composite micro-perforated absorbers in sound absorption bandwidth[J]. Acoustics Australia, 2018, **46**(3): 305-315.
[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会.《泵的噪声测量与评价方法》: GB/T 29529-2013. 北京: 中国标准出版社, 2013.
[12] 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.
[13] 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.
[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] 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.
QIAN Yujie. Research on broadband single-layer micro-perforated panel absorber[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.