

引用格式: 刘志恩, 沈健, 卢焱华, 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, SHEN Jian, LU Chihua, et al. Design and optimization of micro-perforated tube muffler in intake system[J]. Technical Acoustics, 39(6): 715-720.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.06.011

进气系统微穿孔管消声器设计与优化

刘志恩^{1,2}, 沈 健¹, 卢焱华¹, 陈 弯¹

(1. 武汉理工大学汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 湖北武汉 430070;
2. 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)

摘要: 针对某车型进气系统在高转速时的宽频带进气噪声问题, 提出了一种多腔微穿孔管消声器结构。根据传递矩阵法, 建立了有流条件下多腔微穿孔管消声器传递损失计算模型; 针对研究车型进气口噪声的频谱特性, 采用多种群遗传算法对多腔微穿孔管消声器的结构参数进行优化设计, 通过阻抗管台架和实车测试验证了消声器消声效果。结果表明, 优化的多腔微穿孔管消声器能够有效拓宽降噪频带, 消声器传递损失预测结果与实验测试结果一致, 验证了所提出的传递损失计算模型的准确性及优化算法的有效性; 在实车进气系统中采用该微穿孔管消声器后, 进气噪声在 600~1 800 Hz 中高宽频段以及 200~400 Hz 低频段均有明显降低, 证实了所提出的多腔微穿孔管消声器的实际宽频消声特性。

关键词: 进气系统; 多腔微穿孔管消声器; 传递矩阵法; 多种群遗传算法

中图分类号: TB535

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-06-0715-06

Design and optimization of micro-perforated tube muffler in intake system

LIU Zhi'en^{1,2}, SHEN Jian¹, LU Chihua¹, CHEN Wan¹

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

Abstract: A multi-cavity micro-perforated pipe muffler structure is proposed to solve the wide-band air intake noise problem for a vehicle air intake system at high speeds. Based on the transfer matrix method, a transmission loss calculation model for a multi-cavity micro-perforated tube muffler under flow condition is established. In order to study the spectral characteristics of the air intake noise of vehicle, a multi-group genetic algorithm is used to optimize the structural parameters of the multi-cavity micro-perforated tube muffler, and the muffling effect of the optimized muffler design is verified by the tests of impedance tube bench and actual vehicle. The results show that the optimized multi-cavity micro-perforated tube muffler can effectively widen the noise reduction band, and the prediction result of the transmission loss of the muffler is consistent with the test result, which verifies the accuracy of the proposed transmission loss calculation model and the effectiveness of the optimization algorithm. After the micro-perforated pipe muffler is used in the air intake system of the vehicle, the intake noise is significantly reduced in the mid-high frequency band of 600–1 800 Hz and the low frequency band of 200–400 Hz, so the actual wideband muffling performance of the proposed multi-cavity micro-perforated pipe muffler is confirmed.

Key words: intake system; multi-cavity micro-perforated tube muffler; transfer matrix method; multi-group genetic algorithm

0 引 言

进气噪声是汽车驾驶舱的主要噪声源之一, 对其进行研究及控制具有重要理论及工程价值^[1]。进气噪声主要包括由进气脉动产生的低频噪声和由

高速气流引起的中高频宽带噪声。常规的进气消声器一般可以较好地衰减低频进气噪声^[2]。而对于中高频宽带进气噪声, 常规的进气消声器则无法有效地消除。在该情况下, 微穿孔管消声器成为一种好的选择。

微穿孔板是一种具有高吸声系数、宽吸声带宽的新型吸声材料, 由马大猷院士^[3]首次提出。目前这种材料作为微穿孔管消声器已经被广泛用于管道消声中^[4]。然而, 由于亥姆赫兹共振机制, 传统的单腔微穿孔管消声器仍只在共振频率附近的窄

收稿日期: 2020-06-24; 修回日期: 2020-07-20

作者简介: 刘志恩(1977—), 男, 浙江建德人, 副教授, 研究方向为汽车发动机 CAD/CAE、汽车噪声与振动控制。

通讯作者: 沈健, E-mail: shenjian@whut.edu.cn

带内有效,对宽带噪声降噪效果较差。在另一方面,考虑到进气系统中的元件一般为塑料制件,因而常规采用激光打孔的金属材质的微穿孔管消声器在此已不适用。

针对上述问题,本文提出一种采用多腔耦合模式的微穿孔管消声器,在保证低压力损失的同时,实现进气噪声的宽频带降噪。本文推导了有流条件下多腔微穿孔管消声器的传递损失计算模型,采用多种群遗传算法进行消声器结构参数的优化设计,在目标频率范围内获得结构参数的最佳组合,最后加工优化的样件,在双负载法阻抗管测试台架上测量的传递损失较大,并在实车上验证其在进气系统中的实际消声效果。

1 理论分析

1.1 微穿孔板传递阻抗

微穿孔板是一种穿有许多丝米级微孔的薄板。图 1 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。

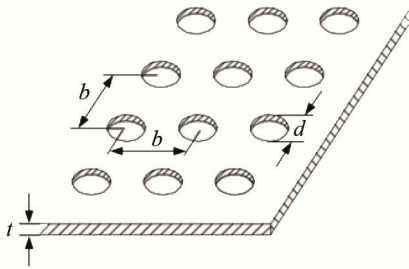


图 1 微穿孔板结构示意图

Fig.1 Structural diagram of micro-perforated plate

根据文献[5],微孔可视为短管,其阻抗率为

$$Z_1 = R + j\omega M \quad (1)$$

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

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

$$K = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\omega \rho_0}{\eta}} \quad (4)$$

其中: R 和 ωM 分别是微孔的声阻率和声抗率; η 是动力粘滞系数; ρ_0 是空气密度; $\omega = 2\pi f$ 是角频率(f 是入射声波的频率)。

微穿孔板可视为微孔的并联连接,其相对声阻抗可表示为

$$\zeta = Z_1 / (\rho_0 c \sigma) \quad (5)$$

式中, c 是空气中的声速; σ 是微穿孔板的穿孔率,当微穿孔板的穿孔呈正方形排列时,穿孔率为 $\sigma = \pi d^2 / (4b^2)$ 。

1.2 微穿孔管消声单元传递矩阵

微穿孔管消声器单元示意图如图 2 所示。单腔微穿孔管消声单元由内微穿孔管和外管构成,其中 D_1 为微穿孔管直径, D_2 为外管直径, L 为外管轴向长度。微穿孔管分为了三个部分,包括入口轴向长度为 l_i 的无穿孔段,中间轴向长度为 l 的微穿孔段以及出口轴向长度为 l_o 的无穿孔段。

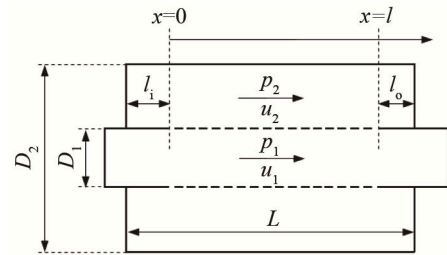


图 2 微穿孔管消声器单元示意图

Fig.2 Schematic diagram of micro-perforated tube muffler unit

对于内微穿孔管和外管,质量连续性方程和动量守恒方程可写为^[6-7]

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + U_i \frac{\partial \rho_i}{\partial x} + \rho_0 \frac{\partial u_i}{\partial x} + \rho_0 f_i = 0, \quad i=1, 2 \quad (6)$$

$$\rho_0 \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho_0 U_i \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial p_i}{\partial x} = 0, \quad i=1, 2 \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{4}{D_1} v_{12} \\ f_2 = -\frac{4D_1}{D_2^2 - D_1^2} v_{12} \\ v_{12} = \frac{p_1 - p_2}{\rho_0 c \zeta_{12}} \end{cases} \quad (8)$$

式(6)、(7)中: $i=1$ 表示内微穿孔管, $i=2$ 表示外管; U_i 表示内微穿孔管和外管中的轴向流速; ρ_i 、 u_i 和 p_i 分别表示内微穿孔管和外管中的轴向密度、质点振速和声压的波动; v_{12} 为通过穿孔界面的质点振速, ζ_{12} 是内微穿孔管和外管的穿孔界面的相对声阻抗,可以根据式(1)~(5)计算得到。

假设传播过程是等熵的,且式(6)、(7)中所有变量随时间变化的关系为简谐关系,则结合式(6)和(7)消除 ρ_i 、 u_i 和 v_{12} ,得出以下耦合微分方程,即波动方程为

$$\begin{bmatrix} D^2 + \alpha_1 D + \alpha_2 & \alpha_3 D + \alpha_4 \\ \alpha_5 D + \alpha_6 & D^2 + \alpha_7 D + \alpha_8 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1(x) \\ p_2(x) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

其中:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{-2M_1}{1-M_1^2} \left(jk + \frac{2}{D_1 \zeta_{12}} \right), \\ \alpha_2 &= \frac{1}{1-M_1^2} \left(k^2 - \frac{4jk}{D_1 \zeta_{12}} \right), \\ \alpha_3 &= \frac{M_1}{1-M_1^2} \cdot \frac{4}{D_1 \zeta_{12}}, \\ \alpha_4 &= \frac{1}{1-M_1^2} \cdot \frac{4jk}{D_1 \zeta_{12}}, \\ \alpha_5 &= \frac{M_2}{1-M_2^2} \cdot \frac{4D_1}{(D_2^2 - D_1^2) \zeta_{12}}, \\ \alpha_6 &= \frac{1}{1-M_2^2} \cdot \frac{4jkD_1}{(D_2^2 - D_1^2) \zeta_{12}}, \\ \alpha_7 &= -\frac{2M_2}{1-M_2^2} \left[jk + \frac{2D_1}{(D_2^2 - D_1^2) \zeta_{12}} \right], \\ \alpha_8 &= \frac{1}{1-M_2^2} \left[k^2 - \frac{4jkD_1}{(D_2^2 - D_1^2) \zeta_{12}} \right].\end{aligned}$$

边界条件为

$$\rho_0 c u_2(0) = -j \tan(k l_i) p_2(0) \quad (10a)$$

$$\rho_0 c u_2(l) = j \tan(k l_o) p_2(l) \quad (10b)$$

得到微穿孔管消声单元的传递矩阵关系为^[8]

$$\begin{bmatrix} p_1(0) \\ \rho_0 c u_1(0) \end{bmatrix} = [T_i]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} p_1(l) \\ \rho_0 c u_1(l) \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned}T_i(m, n) &= R(m, n) - [R(m, 3) + jR(m, 4) \tan(k l_o)] [R(4, n) + \\ &\quad jR(3, n) \tan(k l_i)] / \{R(4, 3) + jR(4, 4) \tan(k l_o) + \\ &\quad j \tan(k l_i) [R(3, 3) + jR(3, 4) \tan(k l_o)]\}, \\ m, n &= 1, 2\end{aligned} \quad (12)$$

入口无穿孔段和出口无穿孔段为简单的直管单元，故其传递矩阵分别为

$$\begin{cases} [T_i] = e^{-jk_c M_{1i}} \begin{bmatrix} \cos(k_c l_i) & j \sin(k_c l_i) \\ j \sin(k_c l_i) & \cos(k_c l_i) \end{bmatrix} \\ [T_o] = e^{-jk_c M_{1o}} \begin{bmatrix} \cos(k_c l_o) & j \sin(k_c l_o) \\ j \sin(k_c l_o) & \cos(k_c l_o) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

其中： $k_c = k / (1 - M_1^2)$ 。

最终，得到整个单腔微穿孔管消声单元的传递矩阵为

$$[T] = [T_i] [T_i] [T_o] \quad (14)$$

1.3 多腔微穿孔管消声器传递损失

由两个及以上的微穿孔管消声单元采用多腔耦合的方式可组成多腔微穿孔管消声器，如图3所示。其总的传递矩阵 $[T_{\text{total}}]$ 为^[9-10]

$$[T_{\text{total}}] = [T_1] [T_2] \cdots [T_n] \quad (15)$$

从而多腔微穿孔管消声器的传递损失为

$$L_T = 20 \lg \left(\frac{1}{2} |T_{\text{total}}(1, 1) + T_{\text{total}}(1, 2) + T_{\text{total}}(2, 1) + T_{\text{total}}(2, 2)| \right) \quad (16)$$

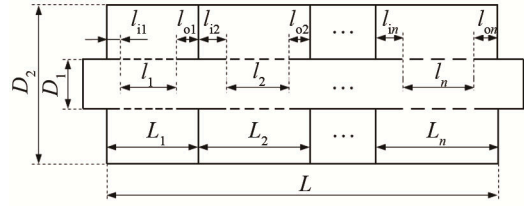


图3 多腔微穿孔元件结构

Fig.3 Structure of multi-chamber micro-perforated element

2 多腔微穿孔管消声器优化设计

2.1 优化目标确立

图4和图5为某汽车在三挡全油门工况下从1000 r·min⁻¹加速到5000 r·min⁻¹时测得的无消声器和有消声器时的进气噪声频谱图，其中图4为在无任何消声元件的原进气系统情况下测得的噪声频谱图，图5为在原进气系统中加入5个频率分别为73、90、183、320、360 Hz的亥姆赫兹共振器的情况下测得的噪声频谱图。

可以看出，采用常规的进气消声元件后，600~1800 Hz频段内的中高频宽带进气噪声无法有效消

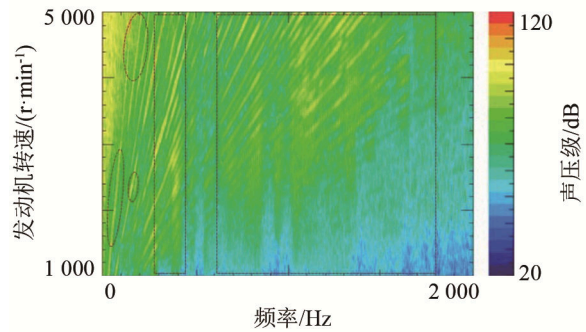


图4 无消声器的进气噪声的“频谱-转速”分布云图

Fig.4 “Spectrum-rpm” nephogram of intake noise without muffler

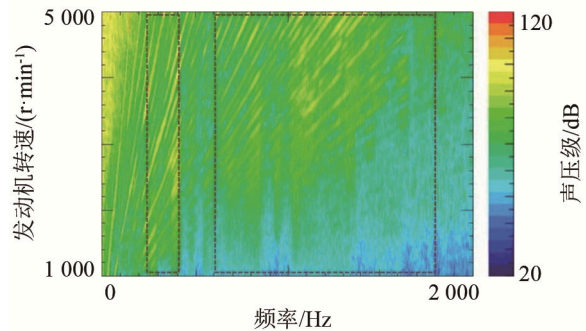


图5 带亥姆赫兹共振器的进气噪声“频谱-转速”分布云图

Fig.5 “Spectrum-rpm” nephogram of intake noise with Helmholtz resonator

除,甚至在 200~400 Hz 频段内的低频进气噪声仍有较多残余噪声。为此,本文以消除 600~1 800 Hz 的宽带进气噪声为主要目标,同时兼顾进一步降低 200~400 Hz 的低频进气噪声,制定了相应的传递损失目标曲线,如图 6 所示。目标函数定义为

$$\text{OBJ} = \overline{\text{obj}_a(f)}^2 + \overline{\text{obj}_b(f)}^2 \quad (17)$$

其中

$$\begin{cases} \text{obj}_a(f) = L_T(f), & L_T(f) < L_{\text{tar}}(f) \\ \text{obj}_b(f) = L_T(f), & L_T(f) \geq L_{\text{tar}}(f) \end{cases}$$

其中: $L_{\text{tar}}(f)$ 和 $L_T(f)$ 分别为对应频率 f 的目标传递损失和计算出的传递损失值, $L_T(f)$ 根据第 2 节中建立的传递损失计算模型得到; $\overline{\text{obj}_a(f)}$ 和 $\overline{\text{obj}_b(f)}$ 分别表示 $\text{obj}_a(f)$ 和 $\text{obj}_b(f)$ 的平均值;为了避免在谷值和低频处的传递损失值太小, $\overline{\text{obj}_a(f)}$ 的指数设为 2。

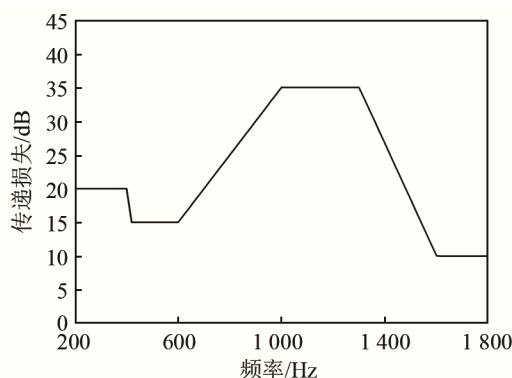


图 6 传递损失的目标曲线
Fig.6 Target curve of transmission loss

2.2 基于多种群遗传算法微穿孔管消声器优化设计

多种群遗传算法是一种全局优化方法,具有比传统遗传算法更好的全局优化能力^[11-12]。因此,本文使用多种群遗传算法来优化多腔微穿孔管消声器的传递损失,在给定的变化范围内获得结构参数的最佳组合。子种群大小、子种群个数、进化代数分别设置为 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。

由于发动机室安装空间的限制,本文选择了三腔和四腔微穿孔管消声器作为优化对象。消声器内管的直径 D_1 和外管的直径 D_2 分别设置为 54 mm 和 132 mm。内管中的流速 U_1 为 $31.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。微穿孔管壁厚设置为 2 mm。对于三腔微穿孔管消声器,轴向长度设置为 $L_1 = L_2 = L_3 = 56 \text{ mm}$,故三腔微穿孔管消声器的优化向量 $\mathbf{X}_{\text{III}}$ 包含 12 个参数,分别是微孔直径 d_1 、 d_2 和 d_3 、穿孔率 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 以及轴向长度 l_{11} 、 l_{12} 、 l_{13} 、 l_{01} 、 l_{02} 和 l_{03} 。 $\mathbf{X}_{\text{III}}$ 可以写为^[13]

$$\mathbf{X}_{\text{III}} = \{d_1, d_2, d_3, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, l_{11}, l_{12}, l_{13}, l_{01}, l_{02}, l_{03}\} \quad (18)$$

向量 $\mathbf{X}_{\text{III}}$ 中参数的约束范围设置为

$$\begin{cases} d_1, d_2, d_3 \in [0.5 \text{ mm}, 1 \text{ mm}] \\ \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \in [0.5\%, 12\%] \\ l_{11}, l_{12}, l_{13}, l_{01}, l_{02}, l_{03} \in [0, 15 \text{ mm}] \end{cases} \quad (19)$$

通过优化计算得到三腔微穿孔管消声器的结构参数优化结果,如表 1 所示。

表 1 三腔微穿孔管消声器的最优结构参数
Table 1 Optimal structural parameters of three cavity micro-perforated tube muffler components

d_1/mm	d_2/mm	d_3/mm	$\sigma_1/\%$	$\sigma_2/\%$	$\sigma_3/\%$
1	0.41	1	1.18	6.27	10.7
l_{11}/mm	l_{12}/mm	l_{13}/mm	l_{01}/mm	l_{02}/mm	l_{03}/mm
0	15.0	15.0	0	9.23	11.59

对于四腔微穿孔管消声器,轴向长度设置 $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 42 \text{ mm}$ 。因此,其包括 16 个参数的优化向量 $\mathbf{X}_{\text{IV}}$ 可写为

$$\mathbf{X}_{\text{IV}} = \{d_1, d_2, d_3, d_4, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, l_{11}, l_{12}, l_{13}, l_{14}, l_{01}, l_{02}, l_{03}, l_{04}\} \quad (20)$$

向量 $\mathbf{X}_{\text{IV}}$ 中参数的约束范围设置为

$$\begin{cases} d_1, d_2, d_3, d_4 \in [0.5 \text{ mm}, 1 \text{ mm}] \\ \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4 \in [0.5\%, 12\%] \\ l_{11}, l_{12}, l_{13}, l_{14}, l_{01}, l_{02}, l_{03}, l_{04} \in [0, 10 \text{ mm}] \end{cases} \quad (21)$$

通过优化计算得到四腔微穿孔管消声器的结构参数优化结果,如表 2 所示。

表 2 四腔微穿孔管消声器的最优结构参数
Table 2 Optimum structural parameters of four cavity micro-perforated tube muffler components

d_1/mm	d_2/mm	d_3/mm	d_4/mm	$\sigma_1/\%$	$\sigma_2/\%$	$\sigma_3/\%$	$\sigma_4/\%$
1	1	0.5	1	1.45	11.46	5.94	1.8
l_{11}/mm	l_{12}/mm	l_{13}/mm	l_{14}/mm	l_{01}/mm	l_{02}/mm	l_{03}/mm	l_{04}/mm
0	15	1.47	10.93	11.21	0	15	0

目标和优化后的传递损失曲线对比结果如图 7 所示。

由图 7 可知,四腔微穿孔管消声器的传递损失

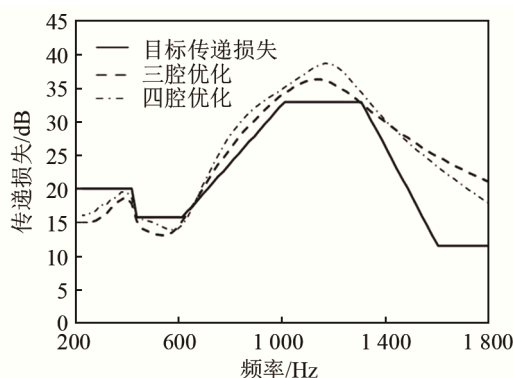


图 7 目标和优化后传递损失曲线对比
Fig.7 Comparison of targeted and optimized transmission loss curves

优化结果在低频段比三腔微穿孔管消声器更接近于目标传递损失曲线, 且在中高频段四腔微穿孔管消声器的传递损失值比三腔微穿孔管消声器的传递损失值更大。因此采用四腔微穿孔管消声器来消除 250~400 Hz 及 600~1800 Hz 频段内的进气噪声。

3 实验结果与分析

本文采用两负载法测量传递损失^[14-15], 如图 8 所示, 该方法通过改变两种不同的出口边界条件来建立描述待测消声器上游和下游间关系的两组方程, 进而求出消声器的四极参数和传递损失。 Z_a 和 Z_b 分别为两种不同负载。

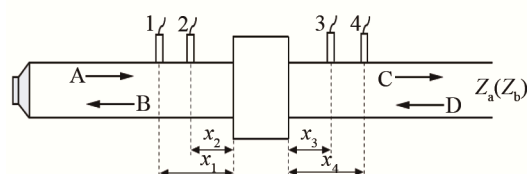


图8 双负载法示意图

Fig.8 Test bench of transmission loss measurement

基于上述的两负载法理论搭建了一套可用于测量各种消声器传递损失的阻抗管台架, 如图 9 所示, 并且可考虑气流的影响。阻抗管内径为 54 mm, 有效测量范围为 50~3 600 Hz。鼓风机提供气流, 且变频器可对流速进行调节。声源由功率放大器驱动的低频扬声器和中高频扬声器组合产生。最后根据两负载公式即可计算得到消声器的传递损失。



图9 传递损失测量试验台架

Fig.9 Transmission loss measurement test bench

为了验证基于传递矩阵的多腔微穿孔管消声器声学模型的准确性, 通过 3D 打印技术加工出优化后四腔微穿孔管消声器样件, 通过台架进行有流传递损失试验, 得到理论预测与实验结果对照曲线, 如图 10 所示。由图 10 可见, 预测结果与实测结果具有较好的一致性, 所提出的传递损失计算模型是准确的。

为进一步验证优化的四腔微穿孔管消声器在进气系统中的实际消声效果, 将其装配到 2.1 节中

的带有 5 个亥姆赫兹共振器的进气系统中, 再次测得进气噪声频谱图, 如图 11 所示。由图 11 可知, 600~1 800 Hz 频段内的中高频宽带进气噪声被明显消除了, 并且 200~400 Hz 频段内的低频进气噪声也被进一步消除, 从而验证了多种群遗传算法的优化效果及四腔微穿孔管消声器的宽频消声特性。

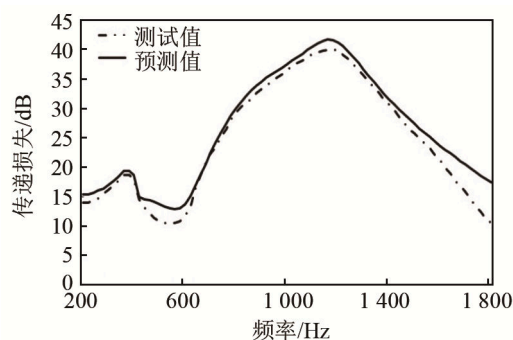


图10 传递损失的预测结果与测量结果对照

Fig.10 Comparison of predicted and measured transmission losses

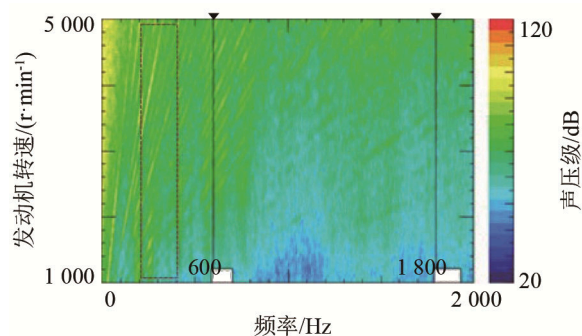


图11 加装多腔微穿孔管消声器的进气噪声“频谱-转速”分布云图

Fig.11 “Spectrum-rpm” nephogram of intake noise with multi-cavity micro-perforated tube muffler

4 结论

为了降低某汽车高转速下进气系统产生的中高频宽带噪声及低频噪声, 提出了一种多腔微穿孔管消声器, 并基于传递矩阵理论, 建立了有流条件下的多腔微穿孔管消声器的传递损失计算模型。进一步采用多种群遗传算法对多腔微穿孔管消声器的结构参数进行了优化设计。最后对四腔微穿孔管消声器在阻抗管试验台架和实车上分别进行了试验验证。结果表明优化后的四腔微穿孔管消声器对 600~1 800 Hz 中高频段以及 250~400 Hz 低频段的进气噪声都具有良好的降噪效果。

参考文献

- [1] 赵廷保. 浅析汽车车辆噪声污染的危害与控制[J]. 资源节约与环保, 2008, 24(1): 36-37.

- ZHAO Tingbao. Analysis on the harm and control of noise pollution of automobiles[J]. Resource Conservation and Environmental Protection, 2008, **24**(1): 36-37.
- [2] 杨诚, 邓兆祥, 阮登芳. 进气噪声产生机理分析及其降噪[J]. 汽车工程, 2005, **27**(1): 70-73.
- YANG Cheng, DENG Zhaoxiang, RUAN Dengfang. Analysis of intake noise generation mechanism and noise reduction[J]. Automotive Engineering, 2005, **27**(1): 70-73.
- [3] 马大猷. 噪声控制学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 188-191.
- [4] 刘俊杰, 王亚伟. 基于小孔消声器的研究[J]. 工业汽轮机, 2015(3): 20-25.
- LIU Junjie, WANG Yawei. Research on muffler based on small hole [J]. Industrial Steam Turbine, 2015(3): 20-25.
- [5] MAA D Y. Theory and design of microperforated panel sound absorbing constructions[J]. Institute of Physics, 1975, **63**(18): 55-71.
- [6] 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.
- [7] LU C, CHEN WAN, LIU Z. Pilot study on compact wideband micro-perforated muffler with a serial-parallel coupling mode[J]. Applied Acoustics, 2019, **148**(5): 141-150.
- [8] KAR T, MUNJAR. Generalized analysis of a muffler with any number of interacting ducts[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, **285**(3): 585-596.
- [9] 季振林. 消声器声学理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- JI Zhenlin. Acoustic theory and design of muffler[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [10] 赵松龄. 噪声的降低与隔离[M]. 上海: 同济大学出版社, 1989.
- ZHAO Songling. Noise reduction and isolation[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1989.
- [11] QIAN Y J, CUI K, LIU S M. Optimization of multi-size micro-perforated panel absorbers using multi-population genetic algorithm[J]. Noise Control Engineering Journal, 2014, **62**(1): 37-46.
- [12] 吕卉. 基于多种群进化的遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2006, **46**(28): 57-60.
- LYU Hui. Genetic algorithm based on multiple population evolution[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, **46**(28): 57-60.
- [13] TAO Z, SEYBERT. A review of current techniques for measuring muffler transmission loss[C]//America: SAE Technical Paper 2003; 2003-01-1653.
- [14] HUA X, ZHANG Y, HERRIN D W. The effect of conical adapters and choice of reference microphone when using the two-load method for measuring muffler transmission loss[J]. Applied Acoustics, 2015, **93**(1): 75-87.
- [15] 陈敏, 郭辉, 徐驰. 复杂穿孔板结构消声器传递损失研究[J]. 噪声与振动控制, 2015, **35**(5): 185-188.
- CHEN Min, GUO Hui, XU Chi. Research on transmission loss of muffler with complex perforated plate structure[J]. Noise and Vibration Control, 2015, **35**(5): 185-188.