

Research of Muffler with Perforated Tube and Its Acoustic Properties Measurement

Haifeng Lv, Yanzhang Geng, Yannan Han, Haixia Liu

School of Mechanics and Power Engineering, North University of China, Taiyuan Shanxi
Email: lhfzjf@163.com

Received: Aug. 31st, 2016; accepted: Sep. 19th, 2016; published: Sep. 22nd, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

The perforated rate is a key parameter for the acoustical properties of muffler. To control the transmission loss of the muffler without replacing the chamber volume, an assembled muffler structure is supposed by inserting perforated tubes with different rate into the chamber. The transmission loss of the designed muffler is solved numerically with the finite element method (FEM). The simulation indicates that the acoustic properties of muffler with perforated tube share both the expansion chamber muffler and Helmholtz resonators. When the perforated rates close to zero, the TL curves exhibited resonated peak and the frequency band of the attenuated noise is limited. Increasing the perforated rate, the TL curves exhibit as arches. The bigger the perforated rate is, the closer to the expansion muffler. An impedance tube testing system is designed for measuring the mufflers. The data acquisition and analyzing program were compelled with LABVIEW. Experiments performed with the designed muffler show that in the low frequency band, the transmission loss can be controlled by the perforated rate of tube, which coincides with the simulation.

Keywords

Perforated Tube, Muffler, Transmission Loss (TL), Measurement

穿孔管拆卸式消声器及其性能测试技术研究

吕海峰, 耿彦章, 韩彦南, 刘海霞

中北大学机械与动力工程学院 山西 太原
Email: lhfzjf@163.com

收稿日期: 2016年8月31日; 录用日期: 2016年9月19日; 发布日期: 2016年9月22日

摘要

穿孔率是决定穿孔管消声器消声性能的重要因素。提出一种穿孔管可拆卸式消声器结构,可以在腔体体积不变的前提下,将穿孔率不同的穿孔管置入消声器内部,完成对消声器传递损失的控制。采用有限元法对其消声性能进行了仿真,结果表明:穿孔管消声器是扩张腔与亥姆霍茨共振消声器的组合,当穿孔率小时,传递损失主要表现为共振峰特性,抑制噪声的带宽受限;当穿孔率增大时,传递损失曲线呈现明显的拱形特征,穿孔率越大越接近扩张腔消声器特性。设计了用于消声器性能测试的阻抗管测试系统,采用LABVIEW编制了相关的采集、分析程序;测试结果表明在低频部分,可以通过穿孔率对消声器的传递损失进行控制,验证了仿真结果的正确性。

关键词

穿孔管, 消声器, 传递损失, 测试

1. 引言

消声器是噪声控制中的常用元件,广泛的应用于动力机械,管道以及生产生活中[1]。评价消声器声学性能主要参数包括:插入损失、降噪量及传递损失。由于传递损失是消声器的固有特性与结构参数有关,而与作用在消声器上的声源无关,因此通常被作为消声器性能分析计算及结构设计的主要评价依据[2]。消声器设计结构一旦确定,其传递损失随之固定不变。因为它具有明显的频率选择特性,所以特别适用于在管道噪声频谱中具有明显峰值特征的情况。而动力机械在不同的工况下,噪声频率会发生偏移,原有消声器的性能将极大衰减。通过改变消声器腔体体积、小孔孔径以及小孔直径可以改变消声器的敏感频率,可以实现对不同频率噪声的抑制作用。

穿孔管消声器是亥姆霍茨消声器的一种形式,改变孔径相当于改变穿孔率,因此可以通过穿孔率的变化对消声器的传递损失进行控制。学者们对穿孔率对消声器性能的影响主要集中在仿真技术研究,然后根据仿真结果制作加工特定的消声器。当动力机械的运行工况发生变化,需要调整穿孔率时,须将整个消声器进行更换,一定程度上增加了测试成本,降低了测试效率。本文提出一种穿孔管可更换式消声器结构,可以通过不同穿孔率的穿孔管对消声器的传递损失进行控制。

2. 穿孔管可拆卸式消声器

抗性消声器是通过管道内声学特性的突变处将部分声波反射回声源方向,通过反射、干涉,从而降低由消声器向外辐射的声能以达到消声目的的消声器,主要适用于主要适合于消除低、中频率的窄带噪声。按照消声原理的不同,抗性消声器可分为扩张式消声器,共振式消声器,干涉式消声器以及穿孔板式消声器等[3]。一般更适用于低、中频段。扩张式消声器对中低频噪声有着较好的抑制,然而随着截面的突变带来较大的压力损失,尤其是流速较高的气流经过多个腔体的复杂扩张式结构时将产生较大的阻力损失,并引起较大的气流噪声,降低了消声器的性能。因此一系列能够改善消声器的阻力特性和气流噪声水平的复合型消声器应运而生,如穿孔管式消声器。穿孔管消声器具有良好的消声性能和较小的阻力损

失[4]。本文以简单扩张腔消声器以及穿孔管消声器为例分析通过改变消声器结构实现控制传递损失的目的。

由于抗性消声器穿孔管的穿孔率，孔长和穿孔区域等参数在加工成型后就固定不变，导致传递损失即消声特性随之确定，本文在研究过程中提出一种穿孔管可拆卸式扩张腔消声器如图 1(a)，消声器壳体两端口加工有法兰盘，每个法兰盘均与一对对开盖连接，对开盖中心加工有通孔，通孔直径等于穿孔管外径。为了进行安装，穿孔管端口处加工有两个卡圈，卡圈的间隙等于对开盖的厚度，因此对开盖可以将穿孔管固定，其余部分通过螺栓进行紧固，形成消声器。接合面均有橡胶垫圈，防止发生声泄露。这样不同穿孔特性的穿孔管可以方便的与扩张腔进行组合如图 1(b)，研究其对消声器传递损失的控制作用。将穿孔管穿孔部分截断后，即形成典型的扩张腔消声器，如图 1(c)。

其基本尺寸如表 1。

3. 传递损失测量原理

对消声器的传递损失测量在阻抗管中进行，当激励频率低于阻抗管的截止频率时，认为阻抗管中传播的是平面波。在该种假设前提下，阻抗管内的声场可以分解为入射波与反射波。图 2 为两负载法[5] [6] 测量消声器传递损失的原理示意图。

声源扬声器发出的平面波 A 向下游传播，当遇到消声器时就有一部分 B 被反射回来，另一部分透过消声器，这样消声器下游有前进波 C 和反射波 D。阻抗管中安装的四支传声器测量得到的复声压可以用公式表达：

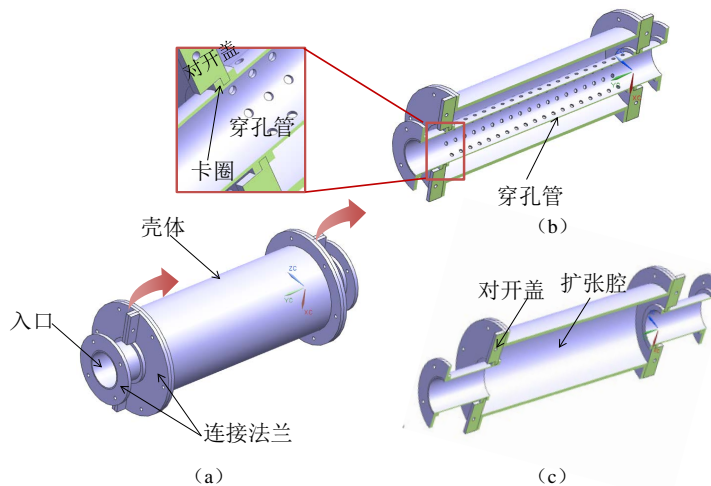


Figure 1. The schematic of disassembled perforated tube muffler
图 1. 穿孔管拆卸式消声器结构

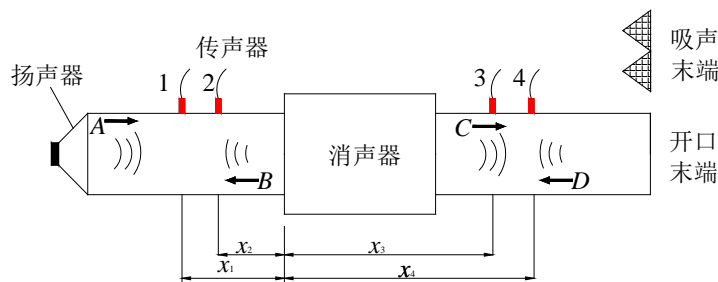


Figure 2. Principle of transmission loss measurement
图 2. 传递损失测试原理

Table 1. Typical parameters of disassembled perforated tube muffler
表 1. 可拆卸式消声器结构典型参数

序号	扩张腔内径	扩张腔长度	穿孔内径	穿孔个数	穿孔率
01	110	300			
02	110	300	3	190	2.83%
03	110	300	5	190	7.86%
04	110	300	5	336	14.17%

$$\begin{cases} P_1 = Ae^{-jkx_1} + Be^{jkx_1} \\ P_2 = Ae^{-jkx_2} + Be^{jkx_2} \\ P_3 = Ce^{-jkx_3} + De^{jkx_3} \\ P_4 = Ce^{-jkx_4} + De^{jkx_4} \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_i 表示的是第 i 支传声器测得的复声压 ($i = 1, 2, 3, 4$), x_i 表示的是第 i 支传声器与消声器入口端面的距离 ($i = 1, 2, 3, 4$), 指数函数中的负号表示沿 x 正方向传播的行波, 正号表示沿 x 负方向传播的行波; k 为声波波数, $k = 2\pi f/c_0$, c_0 为声速, f 为激励声源频率。 A 、 B 、 C 、 D 为复数, 表示复声压的幅值。

将第一式和第二式联立, 约去 B , 可得关于 A 的等式:

$$\frac{P_1 - Ae^{-jkx_1}}{P_2 - Ae^{-jkx_2}} = e^{jk(x_1 - x_2)} \quad (2)$$

解得:

$$A = \frac{P_1 e^{jkx_2} - P_2 e^{jkx_1}}{e^{jk(x_2 - x_1)} - e^{jk(x_1 - x_2)}} \quad (3)$$

根据欧拉公式:

$$e^{jx} = \cos x + j \sin x \quad (4)$$

$$e^{jk(x_2 - x_1)} - e^{jk(x_1 - x_2)} = \cos k(x_2 - x_1) + j \sin k(x_2 - x_1) - \cos k(x_1 - x_2) - j \sin k(x_1 - x_2) \quad (5)$$

得:

$$A = \frac{P_1 e^{-jkx_2} - P_2 e^{jkx_1}}{2j \sin k(x_2 - x_1)} \quad (6)$$

即:

$$A = \frac{j(P_1 e^{jkx_2} - P_2 e^{jkx_1})}{2 \sin k(x_1 - x_2)} \quad (7)$$

同理, 可得 B , C , D :

$$\begin{cases} A = \frac{j(P_1 e^{jkx_2} - P_2 e^{jkx_1})}{2 \sin k(x_1 - x_2)} \\ B = \frac{j(P_2 e^{-jkx_1} - P_1 e^{-jkx_2})}{2 \sin k(x_1 - x_2)} \\ C = \frac{j(P_3 e^{jkx_4} - P_4 e^{jkx_3})}{2 \sin k(x_3 - x_4)} \\ D = \frac{j(P_4 e^{-jkx_3} - P_3 e^{-jkx_4})}{2 \sin k(x_3 - x_4)} \end{cases} \quad (8)$$

假设复声压幅值 A , B , C 和 D 之间的关系是线性的, 那么可以用下面的矩阵方程来表示[3]:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{cases} A = \alpha C + \beta D \\ B = \gamma C + \delta D \end{cases} \quad (10)$$

根据系统的传声损失定义为: 在没有终端反射的情况下, 即 $D = 0$, 声源侧入射到被测试件表面的平面声波幅值 $|A|$ 与透射波幅值之比 $|C|$ 。因此矩阵方程中的 α 即为传递损失, 以分贝的形式表示为:

$$TL = 20 \log |\alpha| \quad (11)$$

而实际中, 无法实现终端无反射边界条件, 即 $D \neq 0$ 。而矩阵方程包括两个方程和四个未知数 α 、 β 、 γ 、 δ , 显然通过一次测试无法求解。因此需要改变末端边界条件再进行一次测试, 两种末端测试得到的矩阵方程分别如下:

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2 \\ D_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

两种不同的边界条件不同的末端分别用下标 1 和 2 来表示。将上述两个矩阵方程联立, 求得 α 的表达式为:

$$\alpha = \frac{A_1 D_2 - A_2 D_1}{C_1 D_2 - C_2 D_1} \quad (14)$$

采用双负载法测量消声器传递损失时要避免出现两种出口阻抗边界条件相似, 以防止测得的数据相近, 造成求解的不稳定, 所以本文试验中采用的第一种出口端为敞口, 第二种出口端为消声末端。

4. 传递损失仿真技术研究

为了研究穿孔管对消声器传递损失的控制作用, 采用 Virtual.Lab 对所设计的消声器进行仿真。采用 Virtual.Lab 根据消声器的结构直接在软件中对声音流体进行建模, 然后采用六面体单元进行网格划分。在 Virtual.Lab 软件中, 对网格划分后, 将网格类型设置为声学网格。然后定义流体材料及流体属性, 选取声速 $c_0 = 340 \text{ m/s}$, 密度 $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 。在前处理操作时形成实体网格的包络。再将消声器模型入口端和出口端分别定义成组, 入口端定义为振动边界条件, 出口端定义吸声属性。在声阻抗中输入实部值为 $416.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}$, 虚部值为 0 [7]。然后进行声场分布计算。频率范围为 40~3500 Hz, 步长取 10 Hz。

如图 3 为所设计的消声器在 40~3500 Hz 的传递损失。从图上可以看出扩张式消声器的传递损失呈宽频拱形分布, 传递损失的最大值与最小值交替出现, 说明扩张腔消声器对噪声的控制具有频率选择性。可以通过安装内插管以及增加扩张腔个数等方法改善消声器的消声性能[8], 而实际使用过程中由于安装尺寸的限制, 采用穿孔管的方式更容易实现。因此采用穿孔管对消声器的消声性能进行控制。如图采用四种穿孔率不同的消声器进行仿真计算, 从图可以看出:

1) 穿孔管消声器在中低频的消声效果比较好, 但在高频发生了明显的轴向共振, 消声器传递损失在高频部分的消声性能得到改善。从图 4 在 310 Hz 和图在 1670 Hz 处的声压分布云图以及速度矢量图中可以看出在低频时, 声波以平面波形式传播, 在消声器扩张腔内整体沿入口至出口轴向传播, 声压级递减。而高频声波在消声器内传播时, 声波不再以平面波形式传播, 声波在不同位置处出现径向共振, 声压级

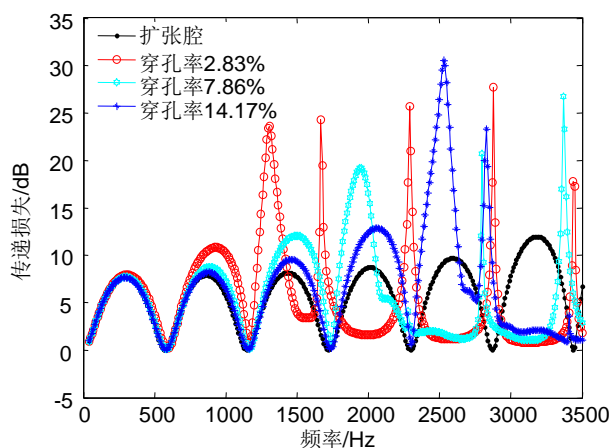


Figure 3. Simulation of transmission loss of mufflers with different perforated rate

图 3. 不同穿孔率消声器传递损失仿真结果

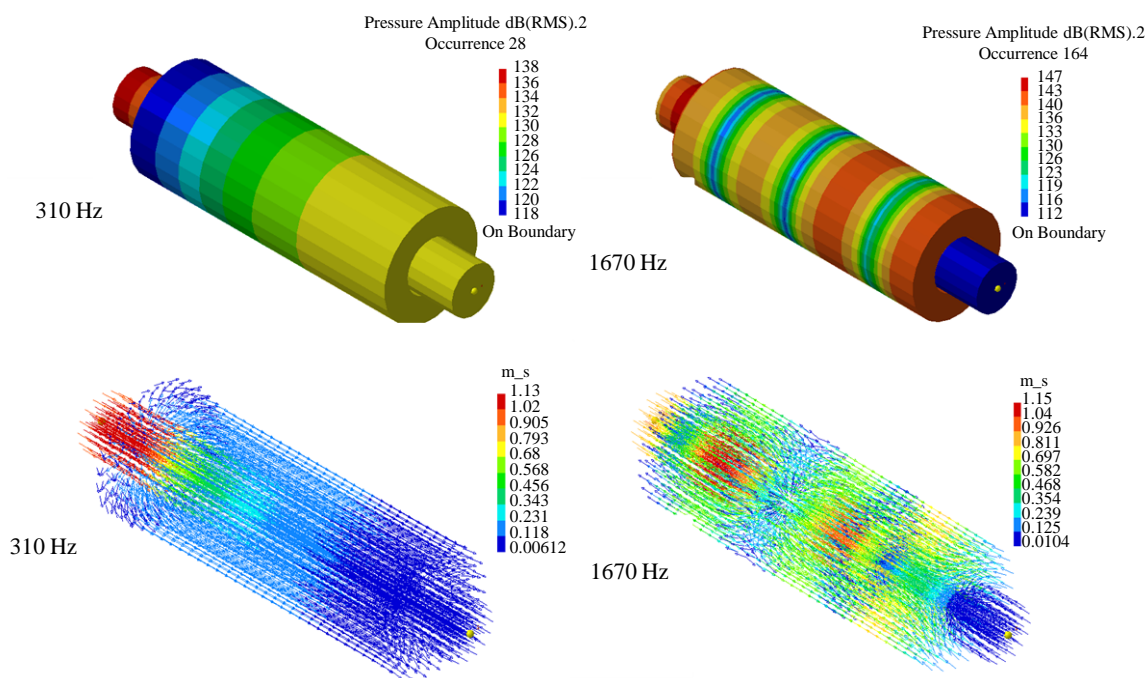


Figure 4. Distribution of sound pressure and velocity of the muffler

图 4. 消声器内部声压、速度分布云图

大小交替出现，气流速度明显增大，将动能转换成热能耗散掉，因而声能降低，达到噪声抑制目的。

2) 采用穿孔管后，低频部分传递损失均比扩张腔消声器有所增加；而高频部分传递损失呈现明显的共振峰特性，即在某一频率处传递损失很大，临近频率处的传递损失数值急剧减小，说明穿孔管消声器对高频噪声的选择性强，要有针对性的对某些频率噪声进行抑制。而超出这些频率范围，消声器降噪效能下降。

通过上述仿真分析可知，在扩张腔体积不变的前提下，穿孔率是控制消声器传递损失的重要因素。穿孔率越大，传递损失曲线中的低频拱形越大，传递损失曲线越来越接近简单扩张腔的特征曲线；穿孔率越小，传递损失曲线呈现共振峰特性，对特定频率的噪声成分具有良好的抑制效果。在此可以将穿孔

管消声器看做是扩张腔消声器和亥姆霍茨共振消声器的组合。当穿孔率增大到极限(100%)时,此时的传递损失曲线与扩张腔消声器性能一样,呈现连续拱形;当穿孔率减小时,主要表现为亥姆霍茨共振器,即通过噪声激励由穿孔管处的空气质量以及腔体内的空气弹簧形成的弹簧-质量系统发生共振,穿孔处的空气与孔壁急剧摩擦产生热量从而将声能消耗。穿孔率在上述范围之间时,传递损失为两种消声原理的组合。因此通过穿孔率可以对消声器的传递损失进行控制,下面通过实验进一步验证穿孔率对传递损失的控制作用。

5. 实验研究

5.1. 简单扩张腔消声器性能测试

消声器传递损失控制实验在自制阻抗管中进行,测量装置示意图如图 5 所示。阻抗管以及消声器采用有机玻璃加工而成,管道内径 51 mm,壁厚 5 mm。声源采用 DQ30TZF-03, 4 Ω 15W, 3 寸全频扬声器,并将其安装在密闭腔体中,扬声器出口端与阻抗管道采用过渡段进行连接,以防止截面突变引起的声波反射。传声器采用 4 支相位匹配的 $\Phi 12.7$ mm (1/2 英寸)预极化测试传声器配合 AWA14604 型 ICP 前置放大器进行阻抗变换与前置放大。采集卡采用 NI92344 通道动态信号采集模块,进行高精度音频测量。使用 SineGen 软件模拟噪声源产生不同频率的正弦信号,通过功率放大器驱动扬声器产生不同频率的正弦波。采集软件采用 LABVIEW 编制,实验过程中为了实现双负载测量,采用末端开口和吸声末端两种边界条件,吸声末端根据国标 GB/T 4760-1995 加工而成,实验测试装置如图 6。

实验过程中,采样频率设置为 12,800 Hz,采用 SineGen 软件发出 40~3500 Hz 的正弦信号,经过功率放大驱动扬声器产生上述频率的声波,步长为 10 Hz。每个噪声频率记录 1 s,在两种边界条件下各测试一组,然后利用公式对传递损失进行测量。

图 7 中为扩张腔消声器的传递损失测量结果与仿真结果对比。两组曲线的拱形部分基本重合,说明了所设计的阻抗管以及声学测试、分析系统可以进行相关声学测试。

5.2. 穿孔管消声器性能测试

分别对表 1 中的三种穿孔管消声器结构进行传递损失的测量实验,穿孔率不同时的消声器的传递损失仿真与实验对比结果如图 8 所示。

由图 8 可知:

1) 这三种穿孔管形式的消声器在低频段其传递损失的测量值与仿真值吻合情况良好,而在高频部分出现偏差。分析原因是由于当声音频率较高时,穿孔管的存在改变了声波在消声器内的传播方式,声波在管道内不再以单一的平面波存在。

2) 当穿孔率增大后,传递损失曲线出现的拱形随之增加;当穿孔率减小时,拱形部分减少,高频部分出现典型的共振峰形式。这与之前的仿真结果是一致的。

穿孔率继续增大后,传递损失在低频部分以拱形为主,而高频部分由于出现球面波,一维平面波理论以及以此为前提的传递损失仿真计算不再适用。

综上,仿真与实验结果表明,通过穿孔率的变化,可以对消声器的传递损失进行控制,即通过增大穿孔率可以扩大消声器的低频敏感频带范围。

6. 结论

1) 提出一种穿孔管可拆卸式消声器结构,可以在腔体体积不变的前提下,将穿孔率不同的穿孔管置入消声器内部,完成对消声器传递损失的控制。

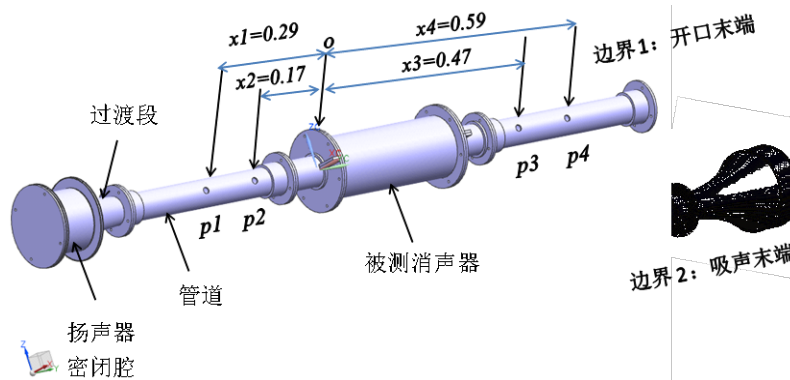


Figure 5. The schematic of transmission loss measurement
图 5. 传递损失测量装置示意图

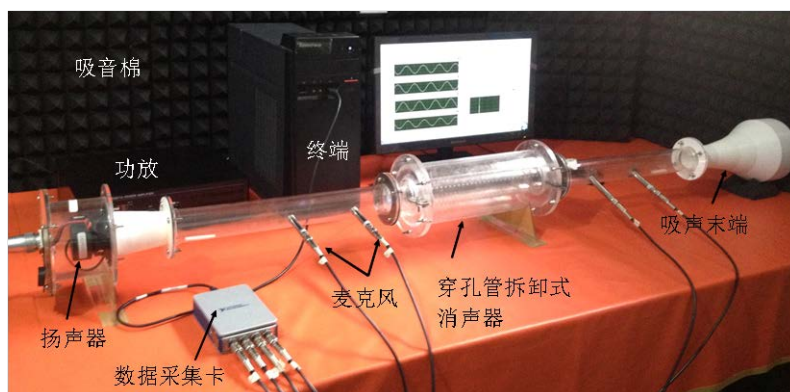


Figure 6. Measurement setup
图 6. 测试装置

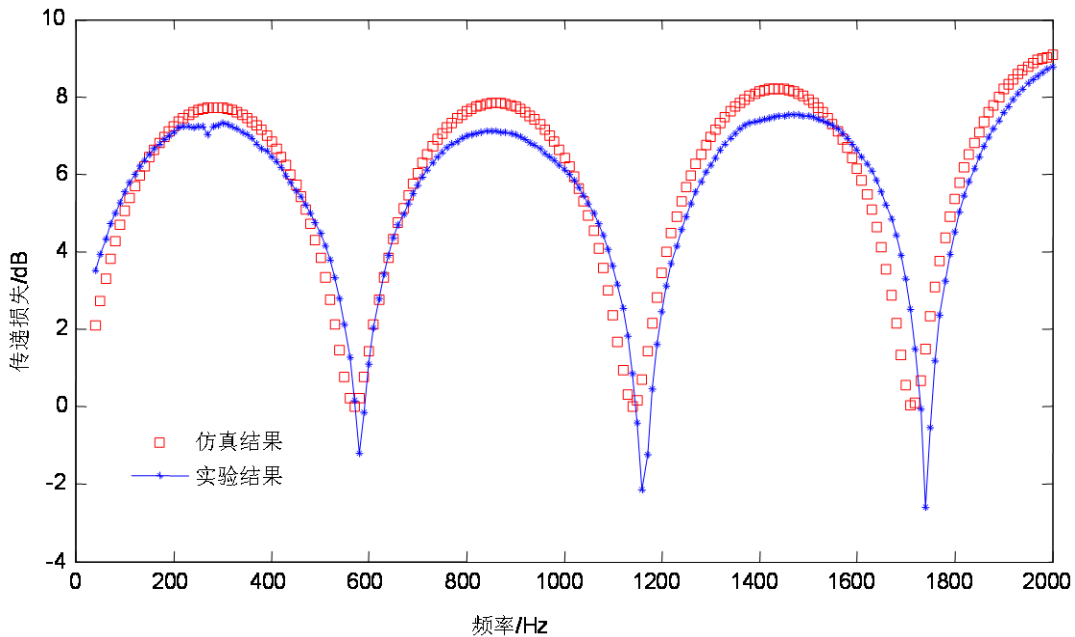


Figure 7. Comparison of experiment and simulation of the expansion chamber muffler
图 7. 扩张腔消声器传递损失仿真与实验结果对比

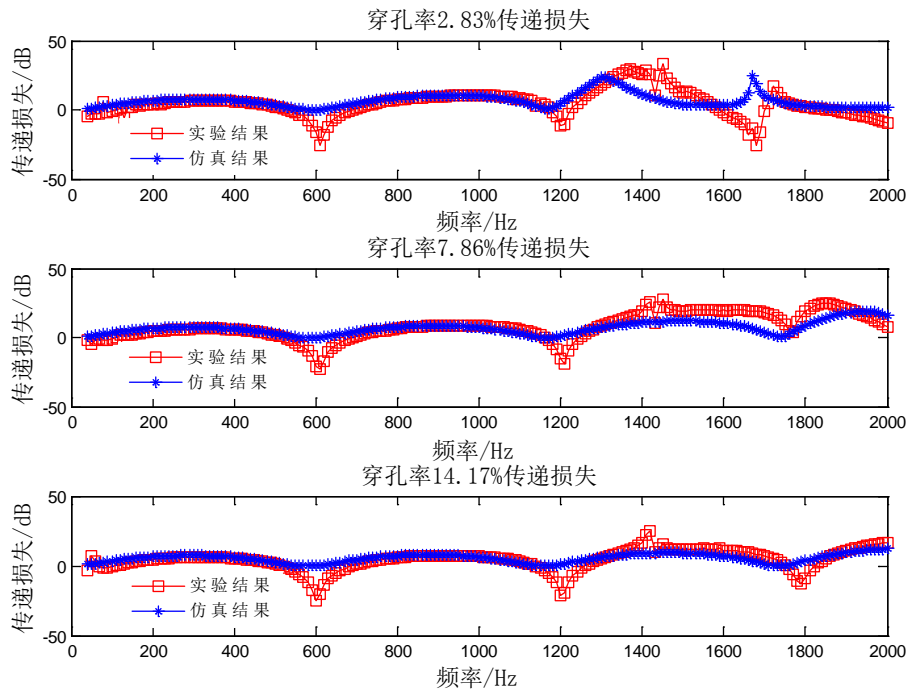


Figure 8. The effect of perforated rate for the transmission loss
图 8. 穿孔率对消声器传递损失的控制效应

2) 对穿孔管消声器消声效果的仿真结果表明：穿孔管消声器是扩张腔与亥姆霍茨共振消声器的组合，当穿孔率小时，传递损失曲线主要表现为共振峰特性，对噪声的抑制具有显著的选择性；当穿孔率增大时，传递损失曲线呈现明显的拱形特征，穿孔率越大越接近扩张腔消声器特性。

3) 采用双负载法对所设计的穿孔管可拆卸式消声器的传递损失进行测量，测量结果表明：在低频部分，可以通过穿孔率对消声器的传递损失进行控制，验证了仿真结果的正确性。

基金项目

国家自然科学基金 MEMS 声衬及分布式阻抗控制技术研究(No. 51305409)，山西省青年科技研究基金(No. 2013021020-2)，山西省高等学校优秀青年学术带头人资助项目。

参考文献 (References)

- [1] Gerges, S.N.Y., Jordan, R., Thieme, F.A., *et al.* (2005) Muffler Modeling by Transfer Matrix Method and Experimental Verification. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **XXVII**, 132-140. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-58782005000200005>
- [2] 褚志刚, 王光建, 贺岩松, 等. 基于修正传递函数的消声器传声损失测量[J]. 内燃机工程, 2009, 30(2): 45-52.
- [3] 高林. 多线谱可调频水消声器仿真设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [4] 刘晨, 季振林, 徐航手, 等. 穿孔管消声器声学性能三维时域计算及分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 7-13.
- [5] Tao, Z. and Seybert, A.F. (2003) A Review of Current Techniques for Measuring Muffler Transmission Loss. SAE International.
- [6] Yousefzadeh, B., Mahjoob, M., Mohammad, N., *et al.* (2008) An Experimental Study of Sound Transmission Loss Measurement Techniques Using an Impedance Tube. *Acoustics 08*, Paris, 29 June-4 July 2008, 964-968.
- [7] 孙路伟, 武秀东, 海智渊, 等. 基于 LMS Virtual.Lab Acoustics 的抗性消声器性能分析研究[J]. 机械, 2014(5): 57-60.
- [8] 毕嵘. 复合式消声器声学特性的分析方法和实验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：met@hanspub.org