

# 对称消声器传递损失测量及误差修正<sup>\*</sup>

谢丽萍<sup>1,2</sup>, 卢焯华<sup>1,2</sup>, 沈健<sup>1,2</sup>, 刘志恩<sup>1,2</sup>, 朱亚伟<sup>1,2</sup>

(1. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室 武汉, 430070)

(2. 汽车零部件技术湖北省协同创新中心 武汉, 430070)

**摘要** 为了提高对称消声器传递损失的测量效率, 基于声学理论分析, 提出了一种单负载法传递损失计算模型。针对反射系数较大的吸声末端, 导致该方法在实际测量中存在较大误差的问题, 推导出了一种能够消除测试管道末端反射声波在上、下游形成多次反射的修正公式。通过自制阻抗管进行试验测试, 结果表明: 在末端声学负载吸声性能良好的情况下, 单负载法传递损失计算模型能够精确计算出对称消声器的传递损失; 修正公式能够有效地消除末端负载所引起的反射波对传递损失计算的影响, 降低对末端声学负载吸声性能的要求, 保证单负载传递损失计算模型的适用性。

**关键词** 消声器; 传递损失; 单负载; 反射系数; 修正公式

**中图分类号** TK4; U464

## 引言

消声器凭借着优良的降噪性能在机械行业内得到广泛的运用, 简单高效的测量方法对消声器的性能研究有着重大意义。脉冲法<sup>[1]</sup>、声波分解法<sup>[2]</sup>、两声源和两负载法<sup>[3-4]</sup>是测量消声器传递损失常用的方法。针对这几种不同的测量方法, Tao 等<sup>[5]</sup>分析了其各自的优劣。Yan 等<sup>[6]</sup>利用 PU 探头测量声压和粒子速度, 通过试验验证 PU 探头测得的传递损失和传统两负载法测定结果吻合, 但 PU 探头价格昂贵。Hua 等<sup>[7]</sup>等针对不同管径的测试管道和消声器, 研究了锥形连接管对测量结果的影响以及参考传感器位置选取对最终计算结果的影响, 改善了两负载法计算传递损失的精度。文献[8-9]探讨了末端结构、负载的吸声系数和反射声波对传统传递损失测量结果的影响, 并利用虚拟测量法消除了管道内上、下游耦合效应, 并针对对称结构消声器声学特性, 提出了一种传递损失测量方法。

笔者基于声学理论分析, 探究不同声源位置上、下游管道内入射声波和反射声波之间的相互关系<sup>[4]</sup>, 提出了一种针对对称消声器的传递损失测量新方法。首先, 针对反射系数较大的吸声末端, 透射声波在上、下游管道内和消声器内部形成多次反射,

从而导致该方法在实际测量中存在较大误差的问题, 推导出一种能够消除反射声波影响的修正公式; 其次, 通过阻抗管对对称消声器进行传递损失测试, 对比传统测量方法与笔者提出的单负载法的试验结果, 验证提出的传递损失计算模型的有效性; 最后, 比较了不同反射系数的声学末端对单负载传递损失计算模型的影响, 论述了对管道内多次反射修正的必要性和修正公式的准确性。

## 1 传递损失理论测量模型

### 1.1 测量原理

笔者提出的单负载法仅利用一种边界条件建立待测消声器上、下游管道内的声压和质点振速的 4 组方程, 求出消声器的传递损失。图 1 为测量装置示意图, 其中:  $d_1$  和  $d_2$  分别为传声器 1, 2 和传声器 3, 4 之间的距离;  $A$  和  $B$  分别为上游管道中的入射波和反射波的幅值;  $C$  和  $D$  分别为下游测试管道的透射波和反射波的幅值。

根据截面间传递矩阵之间的关系<sup>[10]</sup>可得

$$\begin{bmatrix} P_{2a}(f) \\ \frac{1}{b_{12}}(P_{1a}(f) - a_{12}P_{2a}(f)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{23} & b_{23} \\ c_{23} & d_{23} \end{bmatrix} \cdot$$

<sup>\*</sup> 国家重点研究开发计划资助项目(2016YFD0700704B); 国家自然科学基金资助项目(51575410)  
收稿日期: 2019-06-10; 修回日期: 2019-09-23

$$\begin{bmatrix} P_{3a}(f) \\ \frac{d_{34}}{b_{34}}P_{3a}(f) + (c_{34} - \frac{d_{34}a_{34}}{b_{34}})P_{4a}(f) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:下脚标“a”代表图1所示测试结果; $P_{ia}(f)$ 为传声器测点处经过傅里叶变换后的声压和质点振速, $i=1\sim 4$ ;  $a_{12}$ 和  $b_{12}$ 为传声器1和2之间对应截面传递矩阵中的四极参数; $a_{34}$ ,  $c_{34}$ ,  $b_{34}$ 和  $d_{34}$ 为传声器3和4之间对应截面传递矩阵中的4极参数,可根据上、下游的结构得到<sup>[7]</sup>;  $a_{23}$ ,  $b_{23}$ ,  $c_{23}$ 和  $d_{23}$ 为传声器2和3之间,即消声器两端传递矩阵中的四极子参数,均为未知参数。

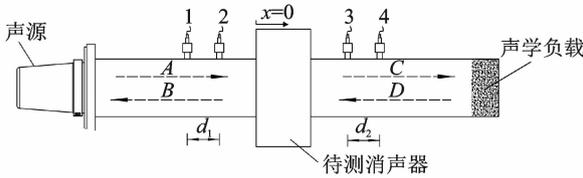


图1 单负载法消声器传递损失测量装置示意图

Fig. 1 The test sketch of muffler transmission loss by single load method

4个未知参数仅有2组方程,无法得到唯一解。因此,笔者根据声源在测试管道左右两端面不同位置时,管道内上、下游入射声波和反射声波之间的相互关系,仅用一种边界条件,反推出另一种边界条件管道内上、下游入射声波和反射声波,构建出另外2组方程使其封闭,求解待测消声器的四极子参数。

如图1所示,声源发生器在测试管道上游的左端面,吸声负载在测试管道上游的右端面时,传声器测点1~4所在位置  $x$  处的声压分别为

$$P_{1a}(f) = Ae^{-jkr_1} + Be^{jkr_1} \quad (2)$$

$$P_{2a}(f) = Ae^{-jkr_2} + Be^{jkr_2} \quad (3)$$

$$P_{3a}(f) = Ce^{-jkr_3} + De^{jkr_3} \quad (4)$$

$$P_{4a}(f) = Ce^{-jkr_4} + De^{jkr_4} \quad (5)$$

同理,假设声源发生器在测试管道下游的右端面,吸声负载在测试管道上游的左端面时,见图2。

因测试管道上、下游对称关系,假设图2所示的声源发生器与图1所示声源发出声能量相同的噪声源并忽略因管壁摩擦引起的声波衰减,图2所示传声器测点1~4所在位置  $x$  处的声压分别记为

$$P_{1b}(f) = Ce^{jkr_1} + De^{-jkr_1} \quad (6)$$

$$P_{2b}(f) = Ce^{jkr_2} + De^{-jkr_2} \quad (7)$$

$$P_{3b}(f) = Ae^{jkr_3} + Be^{-jkr_3} \quad (8)$$

$$P_{4b}(f) = Ae^{jkr_4} + Be^{-jkr_4} \quad (9)$$

其中:下脚标“b”为图2所示测试结果。

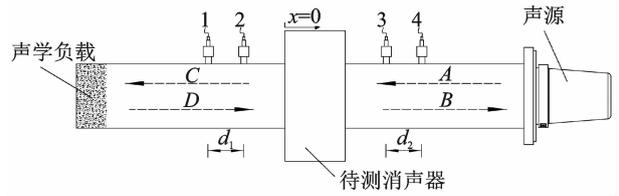


图2 声源在右端面时管道内声波分布示意图

Fig. 2 Scheme of sound wave distribution in pipeline when sound source is on the right

对应上下游管道内的入射声压和反射声压的幅值  $A$ ,  $B$ ,  $C$  和  $D$  可由图1所示传声器1~4采集声压信号利用声波分解法求得<sup>[11]</sup>。

定义图1所示传声器1和3之间的传递函数<sup>[12]</sup>为

$$H_{13a} = \frac{P_{1a}(f)}{P_{3a}(f)} = \frac{Ae^{-jkr_1} + Be^{jkr_1}}{Ce^{-jkr_3} + De^{jkr_3}} \quad (10)$$

根据图2所示试验装置,假设声源发生器在测试管道的右端面,由式(6)~式(9)可得

$$H_{13b} = \frac{P_{1b}(f)}{P_{3b}(f)} = \frac{Ce^{jkr_1} + De^{-jkr_1}}{Ae^{jkr_3} + Be^{-jkr_3}} = \frac{C(e^{jkr_1} + r_2 e^{-jkr_1})}{A(e^{jkr_3} + r_1 e^{-jkr_3})} \quad (11)$$

其中: $r_1$ 和  $r_2$ 分别为图1中消声元件上表面的反射系数和端面负载的反射系数。

根据图1所示试验装置求得  $H_{13a}$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  和  $D$ , 并利用式(11)计算  $H_{13b}$ 。同理可反推出  $H_{23b}$  和  $H_{43b}$ , 最终得到待测消声器的四极子参数

$$a_{23} = \frac{\Delta_{34}(H_{23a}H_{43a} - H_{23b}H_{43a}) + a_{34}(H_{23b} - H_{23a})}{\Delta_{34}(H_{43b} - H_{43a})} \quad (12)$$

$$b_{23} = \frac{a_{34}(H_{23a} - H_{23b})}{\Delta_{34}(H_{43b} - H_{43a})} \quad (13)$$

$$c_{23} = \frac{(H_{13a} - a_{12}H_{23a})(\Delta_{34}H_{43b} - d_{34}) - (H_{13b} - a_{12}H_{23b})(\Delta_{34}H_{43a} - d_{34})}{b_{12}\Delta_{34}(H_{43b} - H_{43a})} \quad (14)$$

$$d_{23} = \frac{b_{34}(H_{13a} - H_{13b}) + a_{12}(H_{23b} - H_{23a})}{b_{12}\Delta_{34}(H_{43b} - H_{43a})} \quad (15)$$

因测试管道是直管道,  $\Delta_{34}$ 取值为1。将求得的四极子参数代入传递损失计算公式得

$$TL = 20\log_{10} \left\{ \frac{1}{2} \left| a_{23} + \frac{b_{23}}{\rho_0 c_0} + \rho_0 c_0 c_{23} + d_{23} \right| \right\} + 10\log_{10} \left\{ \frac{A_1}{A_2} \right\} \quad (16)$$

其中: $A_1$ 和  $A_2$ 为上、下游管道的截面积。

### 1.2 误差修正

根据 1.1 节的理论分析,理论上末端声学负载的反射系数对测量结果不造成影响,但实际上若末端声学负载的反射系数较高,那么从声源发生器发出的声波就会在末端声学负载处形成反射声波。反射声波同样又会在消声元件表面再次被反射回去,同时也会经过消声器在测试管道上游形成透射波,到达声源表面又再一次被反射,最终在测试管道的上、下游形成多次反射,造成测试管道内信噪比较低。多传感器声波分解法并未考虑管道内多次反射的存在,忽略了相关声波的叠加,导致最终分解出的入射声波和反射声波的幅值存在误差,对试验结果造成影响。因此,笔者提出一种考虑声学末端反射系数较高情况下的修正方法,修正原理如图 3 所示。

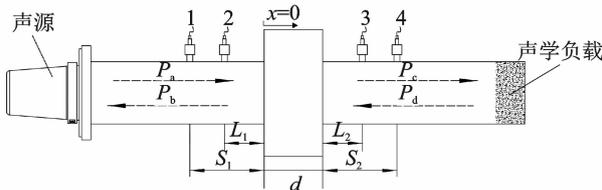


图 3 声波修正示意图

Fig. 3 Scheme of sound wave correction

针对上游测试管道分析,其中: $P_a$  和  $P_b$  分别为上游管道的入射声波和反射声波; $S_1$  和  $L_1$  分别为传感器 1 和 2 到消声元件前表面的距离。定义声源表面的反射系数为  $r_0$ ,消声器上表面对应的反射系数为  $r_1$ <sup>[13]</sup>,假设上游测试管道内存在多次反射,故根据上游测试管道内声波反射规律<sup>[14-15]</sup>可得

$$P_a = A_{\text{real}} e^{-jkx} (1 + r_0 r_1 e^{2jk\beta_1} + (r_0 r_1)^2 e^{4jk\beta_1} + \dots) = \frac{A_{\text{real}} e^{-jkx}}{1 - r_0 r_1 e^{2jk\beta_1}} \quad (17)$$

其中: $k\beta_1$  为上游测试管道内声波传播过程中相位的改变; $\beta_1$  为上游测试管道的长度。

式(17)中的第 1 项代表不经过上游测试管道内消声器前表面反射的入射声波,第 2 项代表经由消声器前表面和声源表面各 1 次反射的入射声波,第 3 项代表经由消声器前表面和声源表面各 2 次反射的入射声波,以此类推。

同理,可得上游管道中的反射声波  $P_b$  和管道内的声压  $P_{\text{up}}$

$$P_b = A_{\text{real}} r_1 e^{jkx} (1 + r_0 r_1 e^{2jk\beta_1} + (r_0 r_1)^2 e^{4jk\beta_1} + \dots) = \frac{A_{\text{real}} r_1 e^{jkx}}{1 - r_0 r_1 e^{2jk\beta_1}} \quad (18)$$

$$P_{\text{up}} = P_a + P_b = \frac{A_{\text{real}}}{1 - r_0 r_1 e^{2jk\beta_1}} (e^{-jkx} + r_1 e^{jkx}) \quad (19)$$

$P_{\text{up}}$  可由上游管道传感器直接采集得到,最终根据式(19)求得上游管道中修正后的入射声波幅值  $A_{\text{real}}$ 。对于测试管道下游中同样存在多次反射,遵循上游管道的分析方式可得,下游管道内的声场为

$$P_{\text{down}} = P_c + P_d = \frac{C_{\text{real}}}{1 - r_2 r_3 e^{2jk\beta_2}} (e^{-jkx} + r_3 e^{jkx}) \quad (20)$$

其中: $k\beta_2$  为下游测试管道内声波传播过程中相位的改变; $\beta_2$  为下游测试管道的长度; $r_3$  为消声器下表面的反射系数。

假设消声元件上、下表面处的截面积相同,令  $r_1 = r_3$ ,式(20)中的反射系数均可由图 1 试验测得,最终求解得到下游测试管道内修正后的入射声波幅值  $C_{\text{real}}$ 。利用所得的  $A_{\text{real}}$  和  $C_{\text{real}}$  计算 1.1 节理论模型中  $H_{13b}$ ,  $H_{23b}$  和  $H_{43b}$ ,最终得到修正后消声器的传递损失<sup>[16]</sup>。

## 2 试验设计

为了验证笔者提出的单负载法传递损失计算模型和误差修正方法的有效性,选用不同结构类型的消声器,通过自制阻抗管进行验证<sup>[17]</sup>,所需试验设备如表 1 所示。

表 1 试验所需设备

Tab. 1 Equipment required for testing

序号	仪器名称	规格型号	主要参数
1	传声器	PCB130A23	灵敏度:10.5~13.4 mV/Pa
2	扬声器	MarkAudio 声源	101 mm, 8 Ω, 20~30 W
3	功率放大器	SA-36A pro	输出功率:20 W
4	噪声测试仪	LMS SCADAS Mobile	12 通道数据采集卡
5	传声器标定器	红声电子 HS6020A	声压级: 94 dB/114 dB
6	数据采集软件	LMS. TEST. LAB	14.0 版本
7	低频扬声器	阿尔法 PSE610E	254 mm, 8 Ω, 250~600 W
8	中频扬声器	佳讯 MTD-35	127 mm, 8 Ω, 80~150 W

### 2.1 消声器传递损失及反射系数的测量

笔者选用扩张腔、插入管和穿孔管 3 种典型消

声器以及四腔体微穿孔消声器进行测试。典型消声器实物如图4所示。

微穿孔消声器的主要参数包括:微穿孔板厚  $t$ 、微孔直径  $d$ 、四腔体微穿孔穿孔率<sup>[18]</sup>  $p_1 \sim p_4$ 、进出口的管径  $D_1$  以及壳体的外径  $D_2$ ,具体尺寸参数见表2。

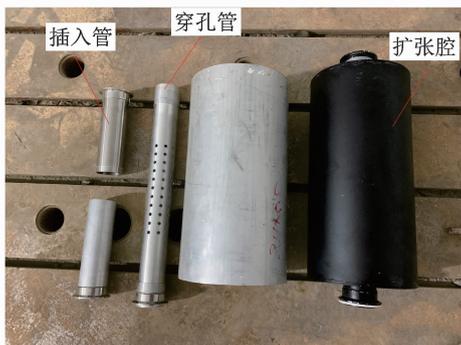


图4 消声器实物图

Fig. 4 Structure of muffler

表2 四腔体微穿孔结构参数

Tab. 2 Parameters of micro-perforated panel

$t/$ mm	$d/$ mm	$p/\%$				$D_1/$ mm	$D_2/$ mm
		$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$		
1	0.5	3.53	28.62	14.93	4.44	50	70

利用笔者提出的单负载法和传统的两负载、两声源法对传递损失进行测量,试验装置如图5所示。

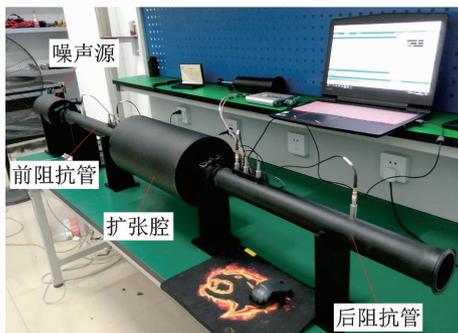


图5 消声器传递损失测试装置

Fig. 5 The test bench of muffler transmission loss

为探究末端声学负载的吸声性能对传递损失测量结果的影响<sup>[9]</sup>,分别选用6种不同吸声性能的声学负载。其中:负载1~4为同一材质不同厚度的吸音棉;负载5为玻璃纤维棉;负载6为直接开口。将吸声负载依次安装在管道末端进行测试,实物如图6所示。

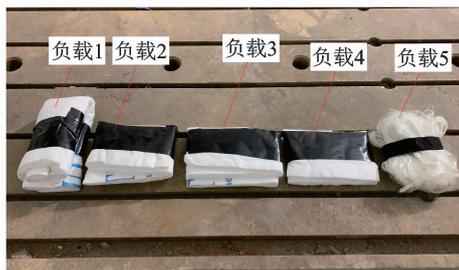


图6 不同类型吸声材料

Fig. 6 Different types of sound absorbing materials

## 2.2 声源表面反射系数测量

基于传递函数法,对声源表面反射系数进行测量<sup>[19]</sup>,计算得到声源表面反射系数,再根据1.2节所述的修正公式对提出的消声器传递损失计算模型进行修正,测量装置如图7所示。

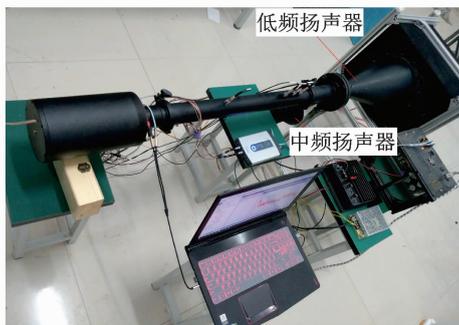


图7 声源表面反射系数测量装置

Fig. 7 The measuring bench of sound source surface reflection coefficient

## 3 试验结果及讨论

### 3.1 单负载法传递损失测量验证

运用笔者提出的单负载法和传统传递损失计算模型对称消声器传递损失进行测量<sup>[20]</sup>。将有限元仿真得到的传递损失和试验数据进行对比<sup>[21]</sup>,结果如图8~图11所示。

由图可知:笔者提出的单负载法能准确地计算出对称消声器的传递损失;和两负载、两声源法计算得到的传递损失曲线对比,其传递损失曲线波动较小,曲线出现的毛刺较少,和仿真值贴合度更高;尤其在低频(500 Hz以内),单负载传递损失曲线光滑,且单负载测量所需试验设备简单,操作方便,试验效率高,测量精度高。

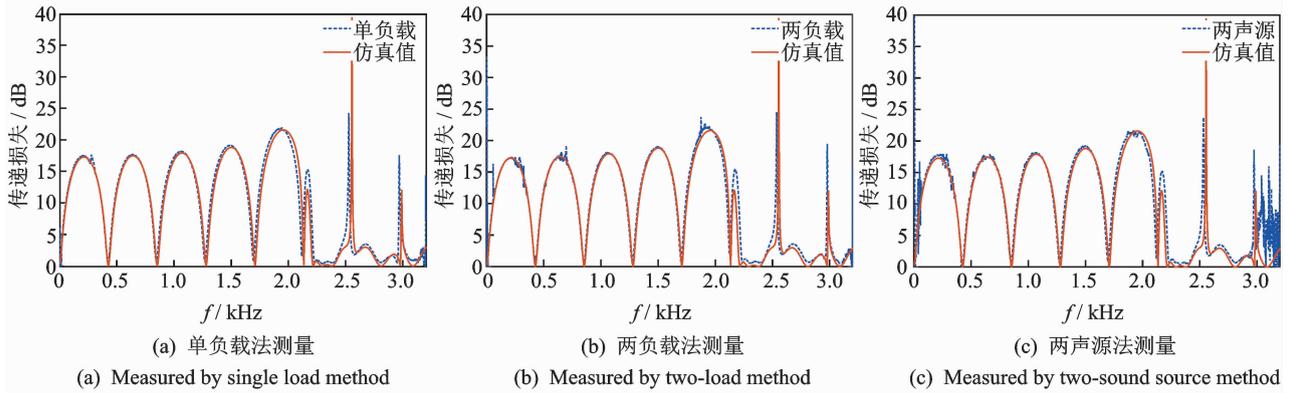


图 8 扩张腔传递损失结果对比图

Fig. 8 Comparison diagram of transmission loss in expansion chamber

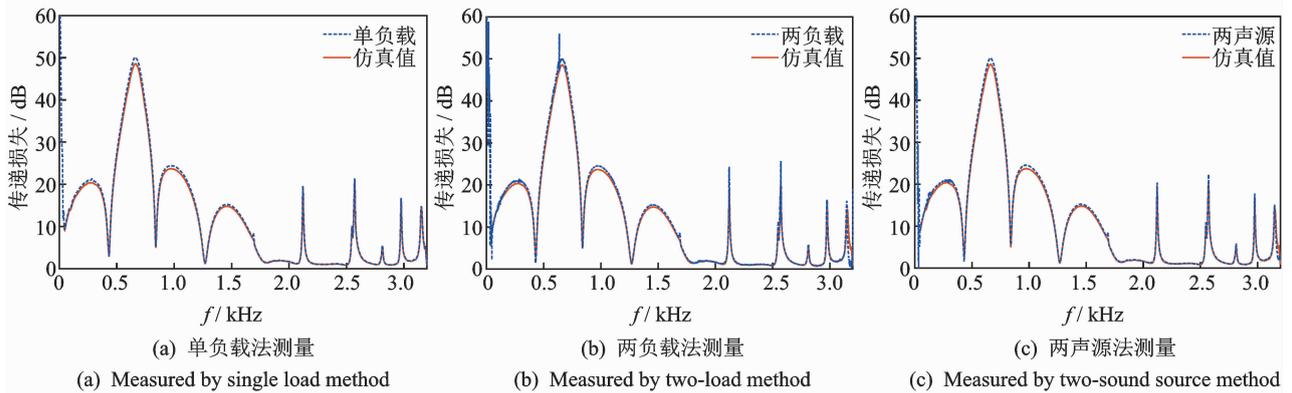


图 9 穿孔管传递损失结果对比图

Fig. 9 Comparison diagram of transmission loss in perforated pipe

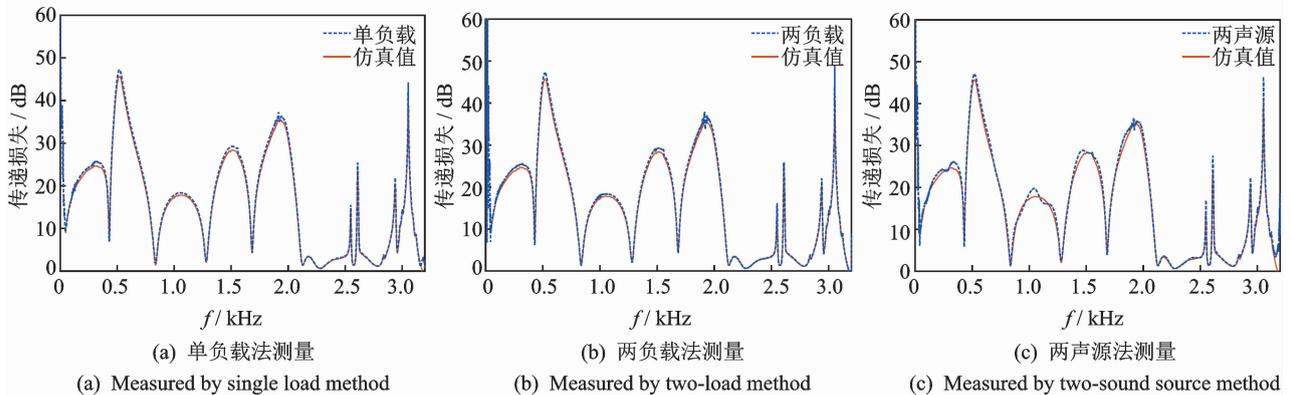


图 10 插入管传递损失结果对比图

Fig. 10 Comparison diagram of transmission loss in insert pipe

### 3.2 声学负载对传递损失测量的影响

通过试验研究了末端声学负载的吸声性能<sup>[22]</sup>对单负载消声器传递损失测量结果的影响和误差修正方法的有效性。图 12 为负载 1~6 反射系数的计算结果。由图可知:负载 1~6 对应的声学性能不同,各自的吸声效果各有差异;负载 6 为末端直接开

口,其反射系数高,吸声性能最差;负载 1~4 的反射系数依次降低,吸声性能依次变优;负载 5 是工业级吸声材料,声学特性最好。

运用笔者提出的单负载法测量对称消声器传递损失,计算不同声学末端负载条件下扩张腔的传递损失,结果如图 13 所示。由图可知:测试管道末端声学负载的吸声性能会对单负载测量传递损失的计

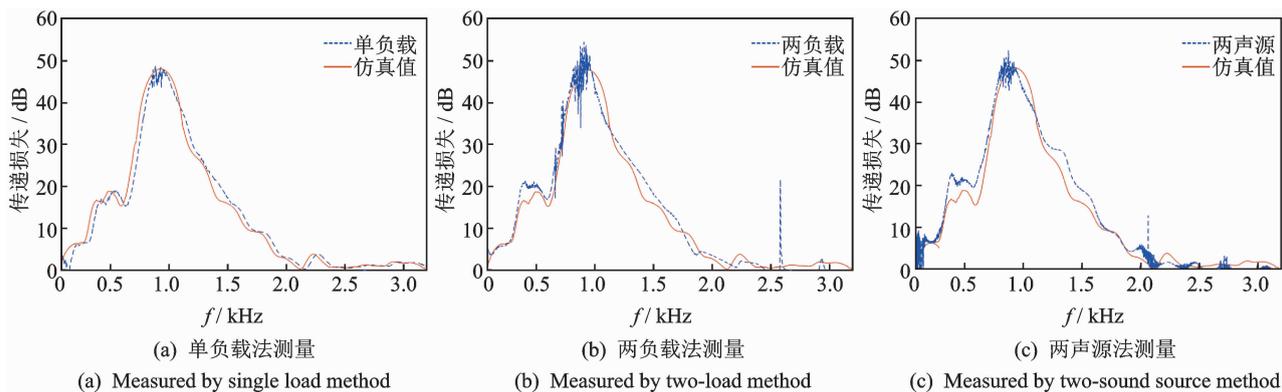


图 11 微穿孔管传递损失结果对比图

Fig. 11 Comparison diagram of transmission loss in micro-perforated

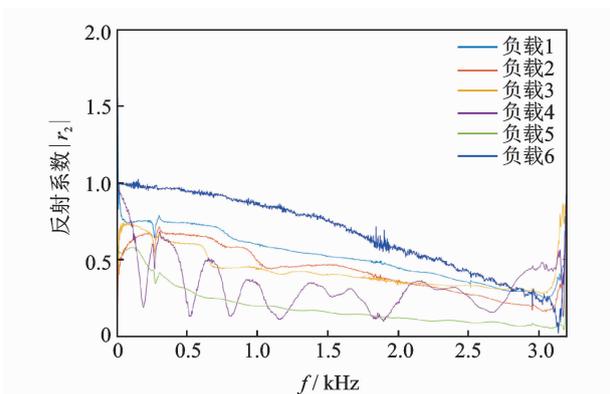


图 12 负载的反射系数测试结果

算结果造成影响;扩张腔传递损失的误差随着末端声学负载反射系数的增大而变大;负载 6 为末端直接开口,反射系数大,所产生的反射波对管道内声波造成较大影响,计算所得的传递损失出现非周期波动,说明管道内出现高次透射反射波的作用,所得试验结果误差最大;对比负载 1~5 的测试结果得知,测试管道末端声学负载的吸声性能越好,对测量结果的影响越小,试验值和理论值越贴合;负载 5 所得的计算结果和理论值基本重合,说明吸声性能优于负载 5 的声学负载,对单负载测量消声元件传递损失的计算模型不造成影响,无需进行修正。

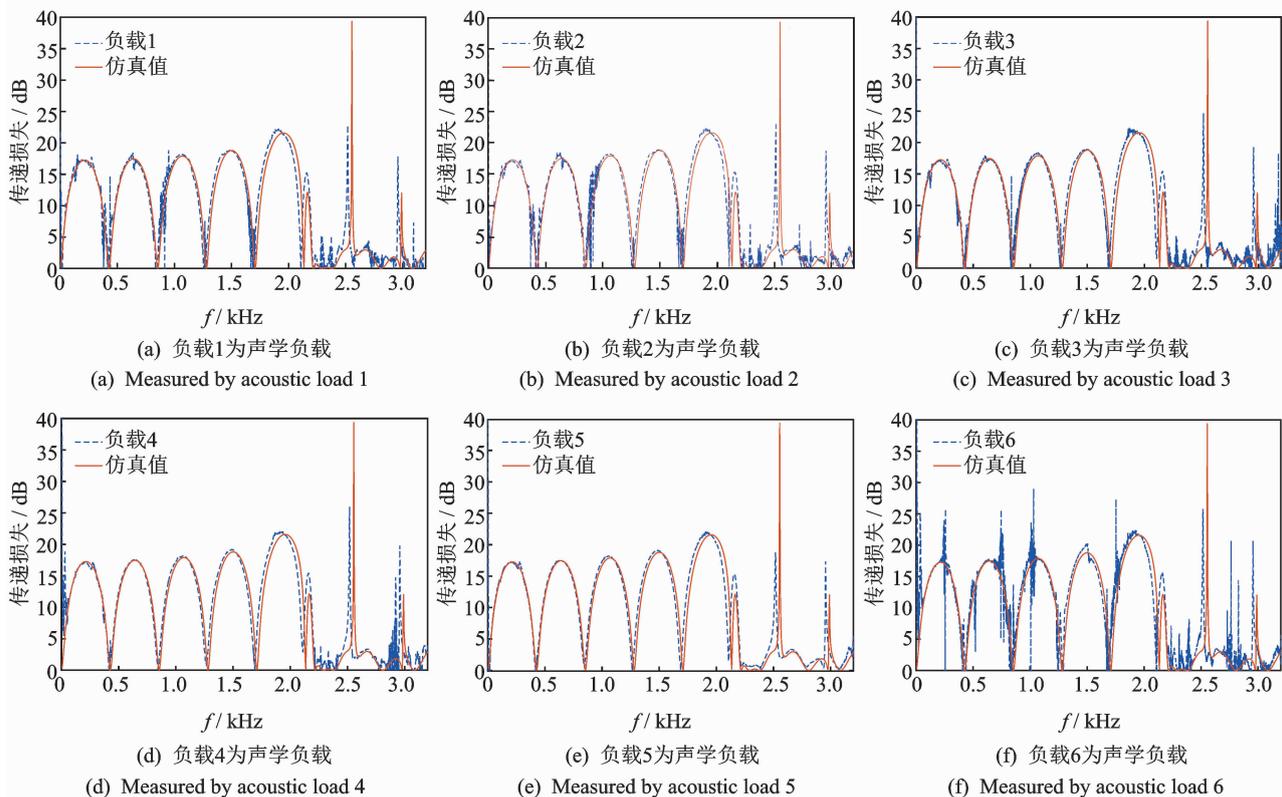


图 13 不同声学负载下扩张腔的传递损失

Fig. 13 Transmission loss of expansion chamber under different acoustic loads

### 3.3 误差修正结果

为验证所提修正公式的准确性,利用声源反射系数的测量结果,通过理论分析对单负载法的计算结果进行修正,修正结果如图14所示。

由图14知:透射反射波修正后的传递损失结果说明了1.2节的修正公式能够很好地修正由较差声学末端负载所引起的误差,传递损失修正后的曲线和理论值的计算结果基本重合;由于负载6

声学末端为直接开口,反射系数较负载1~5都高,修正后的传递损失在低频处出现轻微波动,修正效果比负载1~5的修正结果略差,但整体波动趋势和理论值基本贴合,满足修正要求;对比负载1~5的修正结果,负载的吸声性能越好,对应的修正效果也就越好,但是差别不大,负载5修正前后的曲线基本重合,负载5对传递损失计算结果不造成影响。因此,吸声性能优于负载5的末端声学负载无需修正。

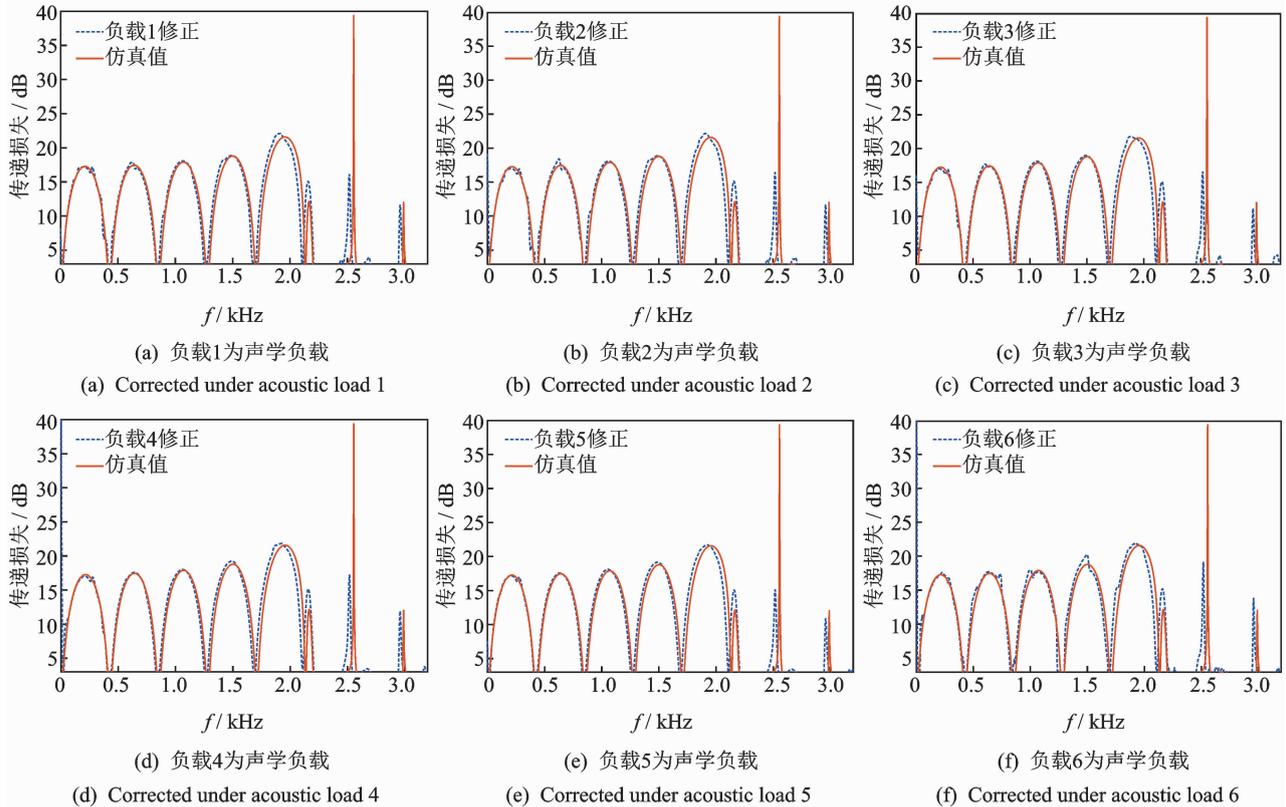


图14 修正后的扩张腔传递损失

Fig. 14 Transmission loss of expansion chamber after correction

## 4 结论

1) 本研究提出的单负载测量对称消声元件传递损失计算模型只需一种边界条件即可求出消声元件的传递损失,有效地解决了传统传递损失计算方法的弊端,改进了试验的效率和精度。

2) 吸声性能较差的末端声学负载会对单负载测量对称消声元件传递损失计算模型的计算结果造成影响。反射系数较大的吸声末端,会在管道内形成多次反射,从而导致该方法在实际测量中存在较大误差。为保证传递损失测量方法的适用性,对于吸声性能较差的吸声末端需进行修正。

3) 鉴于管道内声场的叠加特性,推导了一种能够消除测试管道末端反射声波在上、下游形成多次反射的修正公式,提高了测试精度,同时又降低对声学末端负载吸声性能的要求。试验结果证明,在不同吸声性能的末端声学负载下测量得到的传递损失经修正公式修正后与理论值基本重合,验证了修正公式的准确性。

### 参 考 文 献

- [1] PAYRI F, DESANTES J M, BROATCH A. Modified impulse method for the measurement of the frequency response of acoustic filters to weakly nonlinear transient excitations[J]. Journal of the Acoustical So-

- ciety of America, 2000, 107(2):731-738.
- [2] SEYBERT A F. Two-sensor methods for the measurement of sound intensity and acoustic properties in ducts [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1988, 83(6):2233-2239.
- [3] LUNG T Y. A time-averaging transient testing method for acoustic properties of piping systems and mufflers with flow[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1983, 73(3):867-876.
- [4] MUNJAL M L, DOIGE A G. Theory of a two source-location method for direct experimental evaluation of the four-pole parameters of an aeroacoustic element [J]. Journal of Sound & Vibration, 1990, 141(2):323-333.
- [5] TAO Z, SEYBERT A F. A Review of current techniques for measuring muffler transmission loss[C]//SAE Technical Paper. [S.l.];SAE,2003.
- [6] YAN L, JIANG W. A simple method for measuring muffler transmission loss with PU probes[C]//Asme International Mechanical Engineering Congress & Exposition. [S.l.];ASME,2013.
- [7] 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, 93:75-87.
- [8] 褚志刚, 周亚男, 李瑶, 等. 基于有限元虚拟试验的消声器传声损失测量[J]. 农业工程学报, 2013(1):48-55.  
ZHU Zhigang, ZHOU Yanan, LI Yao, et al. Measurement of sound transmission loss of muffler based on finite element virtual test [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2013(1):48-55. (in Chinese)
- [9] 褚志刚, 蔡鹏飞, 周亚男, 等. 声学对称特性消声器传声损失测量方法[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(10):1433-1436.  
ZHU Zhigang, CAI Pengfei, ZHOU Yanan, et al. Measurement method of sound transmission loss of acoustic symmetric muffler [J]. Mechanical Science and Technology, 2013, 32(10):1433-1436. (in Chinese)
- [10] 王荀. 管道消声器声学性能仿真与实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2017.
- [11] CHUNG J Y, BLASER D A. Transfer function method of measuring acoustic intensity in a duct system with flow[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68(6):1570-1577.
- [12] 范丹丹. 阻抗管吸隔声测量系统的设计与实现[D]. 吉林:吉林大学, 2017.
- [13] TIJKOJA H, LAVRENTJEV J, JÜRI R, et al. Experimental investigations of sound reflection from hot and subsonic flow duct termination [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(3):788-800.
- [14] 陶猛, 赵阳, 王广玮. 驻波管中声学材料隔声性能的修正计算方法[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(4):115-118.  
TAO Meng, ZHAO Yang, WANG Guangwei. Modified calculation method for sound insulation performance of acoustic materials in standing-wave tube [J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(4):115-118. (in Chinese)
- [15] 彭东立, 胡碰, 朱蓓丽. 驻波管中介质板复透射系数的修正计算方法[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(4):649-653.  
PENG Dongli, HU Peng, ZHU Beili. Modified calculation method for complex transmission coefficient of dielectric plate in standing-wave tube [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(4):649-653. (in Chinese)
- [16] TO C W S, DOIGE A G. A transient testing technique for the determination of matrix parameters of acoustic systems, I: theory and principles[J]. Journal of Sound and Vibration, 1979, 62(2):207-222.
- [17] 李政. 消声器综合性能实验台声学设计研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
- [18] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论和设计[J]. 中国科学, 1975, 18(1):38-50.  
MA Dayou. Theory and design of sound absorption structure of microperforated plate [J]. Science in China, 1975, 18(1):38-50. (in Chinese)
- [19] MUNJAL M, DOIGE A. The two-microphone method incorporating the effects of mean flow and acoustic damping[J]. Journal of Sound & Vibration, 1990, 137(1):135-138.
- [20] 舒洋. 海水消声器性能测试方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2014.
- [21] 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, 2013:22-104.
- [22] DOUTRES O, SALISSOU Y, ATALLA N, et al. Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube[J]. Applied Acoustics, 2010, 71(6):506-509.



**第一作者简介:**谢丽萍,女,1994年5月,博士生。主要研究方向为整车 NVH 噪声与振动控制、车内声音设计及相关声品质。曾发表《组合声源测试消声器传递损失的噪声信号修正方法》《声学技术》2019年第38卷第4期等论文。  
E-mail:lpxie@whut.edu.cn

**通信作者简介:**沈健,男,1994年4月生,硕士生。主要研究方向为汽车噪声主动控制及进排气降噪分析。  
E-mail:shenjian@whut.edu.cn

