

文章编号: 1006-1355(2014)04-0115-04

驻波管中声学材料隔声性能的修正计算方法

陶 猛^{1,2}, 赵 阳², 王广玮²

(1. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;

2. 贵州大学 机械工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 用驻波管四传声器法, 分析了透射管中多次透射反射波对隔声量测试结果的影响, 在考虑所有多次透射反射波的因素后推导了修正计算公式。通过对不同样品的测试, 比较了考虑所有透射反射波的修正方法与仅考虑第一次透射反射波的修正方法的区别。实验结果表明: 采用吸声性能优良的透射管声学末端, 考虑一次透射反射波的修正方法可以得到正确的测量结果; 而如果采用吸声性能较差的透射管声学末端, 则应该考虑到所有高次透射反射波的影响。

关键词: 声学; 驻波管; 声学材料; 隔声性能; 修正方法

中图分类号: O42; TU112.2¹

文献标识码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2014.04.025

Algorithm for Modification of Measurement Data for Sound Transmission Loss of Acoustical Materials in Standing-wave Pipes

TAO Meng^{1,2}, ZHAO Yang², WANG Guang-wei²

(1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration,

Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Based on the four-microphone method of the standing-wave pipe, the effect of the multi-transmitted-and-reflected waves in the transmission pipe on the sound transmission performance is discussed. The modification formula associated with the multi-transmitted-and-reflected waves is derived. By measuring several samples in the standing-wave pipe, the difference between the overall multi-transmitted-and-reflected modification and only the first transmitted-reflected modification is compared. Experimental results show that if the sound absorption performance of the acoustical terminal is perfect, the first transmitted-reflected modification is good enough to obtain the accurate sound transmission loss; while the sound absorption performance of the terminal is not perfect as the expected, the overall multi-transmitted-reflected modification should be taken into account.

Key words: acoustics; standing-wave pipe; acoustical material; sound transmission loss; modification method

在驻波管中, 驻波比法和传递函数法可以用来测试声学材料的吸声系数和声阻抗, 这些方法已经成为标准的测试方法^[1,2]。驻波管中声学材料的

隔声量测试方法是在这些基础上发展而来, 例如现在四传声器测试方法^[3,4]就是在吸声系数测试装置^[5]的基础上增加透射管和吸声末端, 利用入射管中的两个传声器分离入射波和反射波, 而透射管中的两个传声器可以分离透射波和透射反射波。

若透射管中的声学末端是理想的完全吸声末端时, 在声学末端处没有透射反射波即透射管中满足行波传播条件, 此时采用三传声器法^[6]即可方便地测量样品的声学性能; 但若声学末端的吸声性能不是很理想时, 利用四传声器法测量会带来较大的误差, 文献^[4]指出当声学末端的吸声系数为0.99以上时, 透射声压的最大误差可达 $\pm 10\%$, 而吸声系数为0.96时, 透射声压的最大误差可达 $\pm 20\%$ 。

收稿日期: 2013-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(11304050; 51365007); 高等学校博士学科点专项科研基金新教师类课题(20135201120007); 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室开放课题(MSV-2013-01); 上海交通大学舰船设备噪声与振动控制技术重点学科实验室开放课题(VSN201301)

作者简介: 陶 猛(1980-), 男, 贵州贵阳人, 副教授, 目前从事阻尼材料声振特性研究,
E-mail: tomn.in@gmail.com

但是声学末端难以满足在所有频率范围的完全吸声;因此,透射反射波会在样品后表面产生反射波,继续在透射管中传播,以及产生透射波继续在入射管中传播,这样的过程还会在透射管和入射管中继续。文献^[7]将第一次的透射反射波对测试结果的影响作了修正计算,而对二次甚至高次透射反射波的作用忽略不计。本文介绍一种考虑所有高次透射反射波的修正计算方法,它可以有效提高驻波管中隔声量测试的精度,特别是在声学末端吸声性能不够理想的条件下的测试精度。

1 理论分析

图1所示为驻波管中均匀材料复透射系数测量示意图,整个测试系统从左至右包括声源、入射管、待测样品、透射管和声学末端组成,其中(1)~(4)为4个传声器: S_1 和 L_1 为入射管中(1)和(2)传声器分别与样品前表面的距离; L_2 和 S_2 为透射管中(3)和(4)传声器分别与样品后表面的距离, D_1 和 D_2 分别时入射管和透射管的长度,而样品的厚度为 d 。

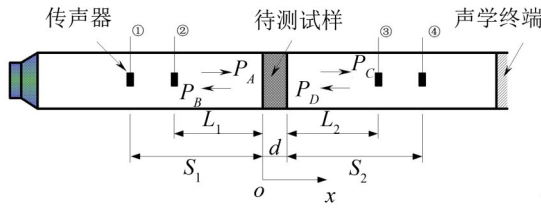


图1 驻波管中四传声器法的测量系统示意图

考虑入射管中的声源表面和样品前表面的多次反射,其中声源表面的反射系数为 r_s ,样品前表面的反射系数为 r_f ,因此入射管中沿 x 正向传播波的声压可以写成(忽略时间因子 $e^{j\omega t}$)

$$p_u^a(x) = Ae^{-jk_0x} \left(1 + r_f r_s e^{2j\theta_1} + (r_f r_s)^2 e^{4j\theta_1} + \dots \right) = \frac{Ae^{-jk_0x}}{1 - r_f r_s e^{2j\theta_1}} \quad (1)$$

其中 $\theta_1 = k_0 D_1$ 表示在入射管中传播相位的改变,第一项对应声源发出的正向传播波,第二项对应经过样品前表面和声源表面各一次反射后的正向传播波,第三项对应经过样品前表面和声源表面各二次反射后的正向传播波,以此类推。需要指出的是,此时样品前表面反射系数的背衬条件是以透射管和声学末端组成的复合系统。

同样地,入射管中沿 x 负向传播波的声压可以写成

$$p_u^b(x) = Ar_f e^{jk_0x} \left(1 + r_f r_s e^{2j\theta_1} + (r_f r_s)^2 e^{4j\theta_1} + \dots \right) = \frac{Ar_f e^{jk_0x}}{1 - r_f r_s e^{2j\theta_1}} \quad (2)$$

结合式和式,可以得到入射管中的声场

$$p_u(x) = \frac{A}{1 - r_f r_s e^{2j\theta_1}} \left(e^{-jk_0x} + r_f e^{jk_0x} \right) \quad (3)$$

将(1)和(2)传声器所处坐标 $x_1 = -S_1$ 和 $x_2 = -L_1$ 代入上式可以得到相应位置的声压 p_1 和 p_2 ,定义传递函数 $H_{12} = p_1/p_2$,可以得到样品前表面的反射系数

$$r_f = \frac{H_{12} e^{jk_0 L_1} - e^{jk_0 S_1}}{e^{-jk_0 S_1} - H_{12} e^{-jk_0 L_1}} \quad (4)$$

声源发出的入射波入射到样品前表面($x=0$)的声压为 $p_{x=0} = A / (1 - r_f r_s e^{2j\theta_1})$,假设样品的透射系数为 τ ,因此透过样品传播后在后表面($x=d$)的声压为 $p_{x=d} = A\tau / (1 - r_f r_s e^{2j\theta_1})$ 。对于透射管中传播的高次反射波和高次透射波也做相似的处理,可以得到透射管中的声场

$$p_d(x) = \frac{A\tau}{(1 - r_f r_s e^{2j\theta_1})(1 - r_b r_t e^{2j\theta_2})} \left(e^{-jk_0(x-d)} + r_t e^{jk_0(x-d)} \right) \quad (5)$$

其中 $\theta_2 = k_0 D_2$ 表示在透射管中传播相位的改变, r_b 是透射管中反向传播波在样品后反面的反射系数, r_t 为透射管中声学末端的反射系数。需要指出的是,由于样品前表面距离声源表面和样品后表面距离声学末端的距离 D_1 和 D_2 不一定相等,而且声源表面的反射系数 r_s 和声学末端的反射系数 r_t 也不一定相同,也即是说以透射管和声学末端组成的背衬条件与以入射管和声源表面组成的背衬条件是不同的,因此即使是均匀对称的样品置于驻波管中,其前、后表面的反射系数 r_f 和 r_b 也是不相等的。

将(3)和(4)传声器所处坐标 $x_3 = L_2$ 和 $x_4 = S_2$ 代入上式可以得到相应位置的声压 p_3 和 p_4 ,定义传递函数 $H_{43} = p_4/p_3$,同样可以得到声学末端的反射系数

$$r_t = \frac{H_{43} e^{-jk_0 L_2} - e^{-jk_0 S_2}}{e^{jk_0 S_2} - H_{43} e^{jk_0 L_2}} \quad (6)$$

进一步地定义(3)和(2)号传声器之间的传递函数

$$H_{32} = \frac{p_3}{p_2} = \frac{\tau}{1 - r_b r_t e^{2j\theta_2}} \cdot \frac{e^{-jk_0 L_2} + r_t e^{jk_0 L_2}}{e^{-jk_0 L_1} + r_f e^{jk_0 L_1}} \quad (7)$$

注意到上式中透射系数 τ 和样品后表面的反射系数 r_b 是未知的。因此要获得透射系数,需要改变透射管中的声学末端,这样可以得到另外一组传递函数。事实上,不同的声学末端条件会导致不同的样品前表面反射系数 r'_f ,但是样品后表面的反射系数 r_b 是不变的,这是因为样品后表面反射系数的背

衬条件是入射管和声源组成的复合系统,该背衬条件不变的话,相应的后表面反射系数是不变的。

对于第二种声学末端,相应的样品前表面反射系数 r'_f 、声学末端反射系数 r'_t 和传递函数 H'_{32} 分别为

$$r'_f = \frac{H'_{12}e^{jk_0L_1} - e^{jk_0S_1}}{e^{-jk_0S_1} - H'_{12}e^{-jk_0L_1}} \quad (8)$$

$$r'_t = \frac{H'_{43}e^{-jk_0L_2} - e^{jk_0S_2}}{e^{jk_0S_2} - H'_{43}e^{jk_0L_2}} \quad (9)$$

$$H'_{32} = \frac{\tau}{1 - r'_b r'_t} \cdot \frac{e^{-jk_0L_2} + r'_t e^{jk_0L_2}}{e^{jk_0L_1} + r'_f e^{-jk_0L_1}} \quad (10)$$

其中 H'_{12} 、 H'_{43} 分别是第二种声学末端条件下的(1)和(2)号传声器之间和(4)和(3)号传声器之间的传递函数。

结合两次的测量结果,并定义以下中间变量

$$\alpha = \frac{H'_{32}}{H_{32}} \quad (11)$$

及

$$\beta = \frac{(e^{jk_0L_1} + r'_f e^{-jk_0L_1})(e^{-jk_0L_2} + r'_t e^{jk_0L_2})}{(e^{jk_0L_1} + r'_f e^{-jk_0L_1})(e^{-jk_0L_2} + r'_t e^{jk_0L_2})} \quad (12)$$

从式和式可以得到样品后表面的反射系数

$$r_b = \frac{\alpha - \beta}{\alpha r'_t - \beta r'_f} e^{-2jk_0D_2} \quad (13)$$

及透射系数

$$\tau = H_{32} (1 - r_b r'_t) \cdot \frac{e^{jk_0L_1} + r'_f e^{-jk_0L_1}}{e^{-jk_0L_2} + r'_t e^{jk_0L_2}} \quad (14)$$

而六个传递函数 H_{12} 、 H_{43} 、 H_{32} 和 H'_{12} 、 H'_{43} 、 H'_{32} 在测试过程中可以方便地计算得到。

材料的隔声量为

$$TL = -20 \lg \tau \quad (15)$$

2 实验结果及讨论

为了验证修正方法的正确性,我们在空气驻波管中进行了圆形小尺寸样品的测量。待测材料加工成直径 100 mm 的圆形样品,对于多层复合材料,则将制作好的各层样品按照顺序粘接而成。按照标准 ISO 10534-2-1998^[2]的指导进行试验,测试系统采用北京声望公司 SW422 阻抗管测试系统,其中入射管和透射管分别有三个传声器安装位置,通过选用不同间距的传声器组合可以有效地拓宽测试频率。为提高信噪比,测试过程中采用单频信号。

图2是“2 mm PVC板-10 mm海绵”两层复合材料样品的隔声量曲线,图3是25 mm棉与热塑纤维复合材料样品的隔声量曲线,图中粗实线表示计

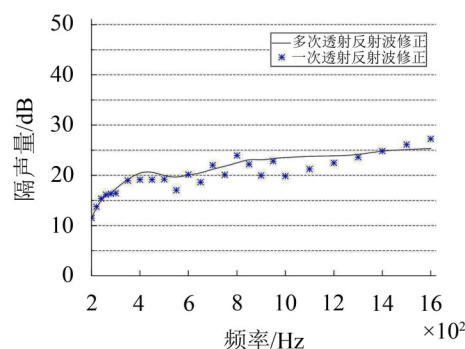


图2 2 mm PVC板-10 mm海绵复合材料的隔声量曲线

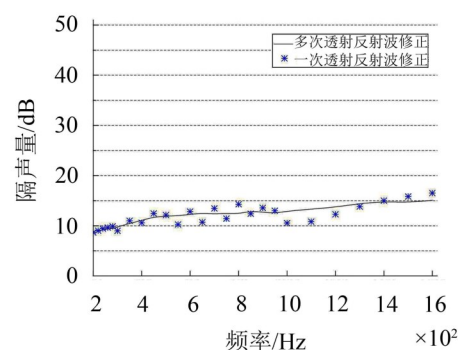


图3 25 mm棉与热塑纤维复合材料的隔声量曲线

及了所有高次透射反射波的修正计算结果,而星号则表示了仅考虑第一次透射反射波的修正计算结果。理论分析中^[3,7]指出对于多层复合材料,无论声波从哪面入射,得到的透射系数均是相同的,因此复合材料的安装方向不同对隔声量的测试结果理论上没有区别。从图中可以看出,虽然两种修正计算结果的趋势基本一致,但是计及多次反射透射波与仅考虑一次透射反射波的修正计算结果差别仍然较为明显,并且仅考虑一次透射反射波的修正结果起伏较为强烈,这是因为测试过程中透射管声学末端为厚度 50 mm 的海绵,而海绵在测试频段的吸声性能较差。说明如果采用吸声性能较差的透射管声学末端,在对测试结果作修正计算时,应该考虑透射管中多次透射反射波的影响。

图4是25 mm棉与热塑纤维复合材料样品的隔声量曲线,此时采用了吸声尖劈作为透射管的声学末端。从图中来看,计及了所有高次透射反射波影响以后与仅考虑一次透射反射波的修正结果基本没有差异,这是因为吸声尖劈的吸声性能在 200 Hz 以上达到 0.99(即反射系数 0.1),所以高次透射反射波相对于一次透射反射波来说幅度很小,可以忽略不计。也即是说,采用吸声性能优良的吸声尖劈作为空气驻波管的声学末端,根据一次透射反射波修正计算的数据处理方法,我们便可得到正确可信的测试结果。

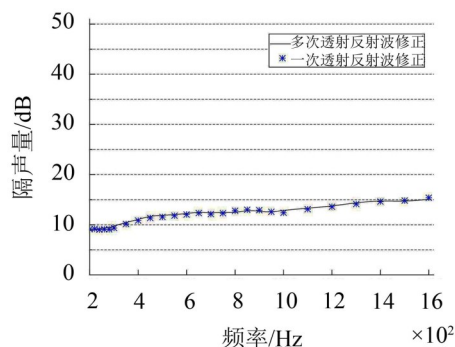


图4 25 mm棉与热塑纤维复合材料的隔声量曲线

3 结语

驻波管中用四传声器法测量声学材料的隔声量时,由于透射管声学末端的透射反射波使得测量结果不准确,因此本文研究了透射管中多次透射反射波对隔声量测试结果的影响。通过驻波管中的实验表明:如果透射管声学末端的吸声性能较差,应该计及所有高次透射反射波对隔声量测试结果的影响;但是若声学末端的吸声性能优良,则仅需考虑第一次透射反射波对测量结果的影响。

参考文献:

- [1] ISO 10534- 1- 1996, Acoustics- determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 1: Method using standing wave ratio [S].
- [2] ISO 10534- 2- 1998, Acoustics- determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer-function method [S].
- [3] Song B. H , Bolton J. S. A transfer matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000, 107: 1131-1152.
- [4] 曲 波, 朱蓓丽. 驻波管中隔声量的四传感器测量法[J]. *噪声与振动控制*, 2002, 22(6): 44-46.
- [5] Seybert A. F, Ross D. F. Experimental determination of acoustic properties using a two- microphone random excitation technique[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1977, 61(5): 1362-70.
- [6] 朱蓓丽, 罗晓辉. 驻波管中的隔声量测试方法[J]. *噪声与振动控制*, 2000, 20(6): 41-43.
- [7] 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.

(上接第103页)

参考文献:

- [1] 孙文军, 芮国胜, 张 嵩, 张 洋. 微弱信号混沌检测方法的抗噪性能研究[J]. *无线电通信技术*, 2012, 1: 59-62.
- [2] 韩 敏, 刘玉花, 史志伟, 项 牧. 改进局部投影算法的混沌降噪研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(2): 364-368.
- [3] 刘元峰, 赵 玫. 基于奇异谱分析的降噪方法及其在计算最大 Lyapunov 指数中的应用[J]. *应用数学和力学*, 2005, 26(2): 163-168.
- [4] 代海波, 单 锐, 王换鹏, 张 雁. 基于改进阈值函数的小波去噪算法研究[J]. *噪声与振动控制*, 2012, 32(6): 189-193.
- [5] 赵瑞珍, 宋国乡. 一种基于小波变换的白噪声消噪方法的改进[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2000, 27(5): 619-622.
- [6] 韩 敏, 刘玉花, 史剑辉, 史志伟. 基于小波变换阈值决策的混沌信号去噪研究[J]. *信息与控制*, 2005, 34(5): 543-547.
- [7] 刘艳霞, 刘建军, 曹燕燕. 一种改进的小波阈值去噪方法[J]. *河北北方学院学报(自然科学版)*, 2012, 28(1): 30-33.
- [8] JIA Yun-feng, WU Jian-hua, XU Hong-kun. Analysis of bifurcation and stability on solutions of a Lotka-Volterra ecological system with cubic functional responses and diffusion[J]. *Communications in Mathematical Research*, 2012, 28(2): 127-136.
- [9] YU Yong-cai, WANG Shang-xu, YUAN San-yi, QI Peng-fei. Phase spectrum estimation of the seismic wavelet based on a criterion function[J]. *Petroleum Science*, 2012, 9: 170-181.
- [10] 韩贵丞, 李 锋. 一种改进的混沌序列去噪方法[J]. *信息与电子工程*, 2011, 9(5): 586-590.