

# 材料吸声系数双传声器测量的参数识别方法

胡 恒 郑四发<sup>†</sup> 郝 鹏 连小珉

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

**摘要** 本文提出了在普通房间中利用双传声器对多孔性和纤维性吸声材料吸声系数测量时的参数识别方法。利用 Delany & Bazley 经验模型对测量数据进行了参数识别,建立了材料的阻抗模型,并计算出材料全频带的吸声系数。与驻波管方法得到的吸声系数相比,在 0 ~ 3000Hz 范围内,二者都能较好地吻合。通过在不同的环境中进行对比测试,说明该方法具有较好的重复性和准确性。

**关键词** 吸声系数, 参数识别, 双传声器法, 普通房间

## Parametric identification method in the measurement of material absorption coefficients using two microphones

HU Heng ZHENG Si-fa HAO Peng LIAN Xiao-min

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy Conservation, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** A parameter identification method to measure absorption coefficients of porous and fibrous materials using two microphones in an ordinary room is proposed. The Delany & Bazley model was used for parameter identification. The impedance of the material was established and absorption coefficient in the whole frequency domain was calculated. In the range of 0 ~ 3000Hz, the measured results of this method for two real materials agree well with the absorption coefficients measured in impedance tube. The repeatability and accuracy of the method are proved by comparing measurements in different environments.

**Key words** Absorption coefficient, Parametric identification, Two microphones, Ordinary room

2007-01-18 收稿; 2008-04-28 定稿

作者简介:胡恒(1982 - ),男,重庆市人,硕士研究生,研究方向:汽车噪声与振动控制。

郑四发(1970 - ),男,副教授,博士,硕士生导师。

郝鹏(1984 - ),男,博士研究生。

连小珉(1955 - ),男,教授,博士,博士生导师。

<sup>†</sup> 通信联系人 E-mail: zaf@tsinghua.edu.cn

## 1 引言

近年来,吸声材料在工业、建筑业中的应用越来越多,而评价吸声材料好坏的一个很重要的指标就是材料的吸声系数。因此,如何准确、快速地测量材料的吸声系数,对于合理选择吸声材料有重要意义。

在科学研究和工程实际中,学者们提出了多种测量材料的吸声系数的方法,并得到了很好的应用。如传统的混响室法<sup>[1,2]</sup>和驻波管法<sup>[2,3]</sup>,其中驻波管法又分为驻波比法<sup>[4]</sup>和传递函数法<sup>[5]</sup>。混响室法测量的是无规入射的吸声系数,在实际中也相对更具有参考价值。但是,混响室的建造是相当昂贵的。驻波管法测量的是垂直入射的吸声系数和吸声材料的表面法向声阻抗。但驻波管只能对小型试件进行测量,得到的吸声系数往往不能和应用情况相吻合<sup>[6]</sup>。针对传统测量方法的不足,学者们逐渐开始研究吸声系数的现场测量方法。例如,有从测量路面吸声系数的ISO标准ISO 13472-1:2002中发展而来的瞬时法<sup>[3,7]</sup>,以及从阻抗管方法发展而来的稳态法<sup>[8]</sup>等。

法国学者 J. F. Allard<sup>[8]</sup>在半消声室中利用点声源和细长管形成平面波,进行垂直入射测量材料声阻抗,在2000Hz以内与经验模型相比,有比较好的结果,但实验需要在半消声室内进行,而且实验装置复杂;日本学者 Y. Takahashi<sup>[6]</sup>在食堂、实验室等地利用环境背景噪声作为声源,在1500Hz以内与经验模型相比,有比较好的结果。但由于环境噪声的不稳定性,实验需要进行多次测试平均,而且环境噪声中1500Hz以上的频率分量较少,因此测量的频率范围局限于1500Hz以内。

本文利用双传声器在模拟混响声场测量材料吸声系数,并利用 Delany & Bazley 吸声材料阻抗特性经验模型<sup>[9]</sup>进行参数识别。该方法在普通的房间中就可以进行测量,利用白噪声作为噪声信号,用吸声材料阻抗模型对吸声系数进行非线性最小二乘拟合。结果显示,在

3000Hz以下与驻波管法测得的吸声系数有很好的-致性,在不同的测试地点有很好的重复性和稳定性。文中介绍了该方法的基本原理,确定了试验配置参数,提出了新的测试流程及数据处理方法,并通过实验验证了方法的有效性。

## 2 方法概述

双传声器测量的参数识别方法,是在传统的双传声器现场测量材料吸声系数方法的基础上,在普通的房间中利用多个声源形成模拟混响声场,求得材料的表面声阻抗。然后,对得到的材料表面声阻抗  $Z_N(\omega)$ ,利用 Delany & Bazley 吸声材料阻抗特性经验模型<sup>[9-11]</sup>以材料流阻  $\sigma$  为自由变量进行参数识别,建立测试材料的阻抗模型,得到参数识别后的表面声阻抗  $Z_N^{\text{Model}}(\omega)$ 。材料的吸声系数  $\alpha(\omega)$  可以通过下式(1)计算得到,其中  $r$  为材料表面的反射因数。

$$r(\omega) = \frac{Z_N^{\text{Model}}(\omega) - \rho_0 c_0}{Z_N^{\text{Model}}(\omega) + \rho_0 c_0} \quad (1)$$

$$\alpha(\omega) = 1 - |r(\omega)|^2$$

## 3 方法步骤

### 3.1 数据采集

实验在一个长、宽、高分别为8m、7.5m及4m的普通实验室大厅中进行,应用20kHz白噪声信号发生器(QW1660),通过功率放大器(QW3860)驱动放在大厅四个角上的扬声器发声,声波在大厅中来回反射混合均匀后形成模拟混响声场。扬声器对着墙面或是天花板入射,让声波在房间内尽量反射混合均匀后,再垂直入射到材料表面。

被测试件放在实验室大厅中央地板上,两个1/2英寸的传声器如图1安放。两个传声器的灵敏度系数需要比较接近,相位差要尽可能小。本次实验选用的是一对声强传声器(BSWA MP201)。考虑到如果两个传声器离

测试材料表面太远,传声器采集信号容易受环境的影响,所以传声器应该考虑尽量靠近测试材料表面,本次实验中两个传声器按照  $l = 20\text{mm}, d = 7.5\text{mm}$  的位置进行安放。

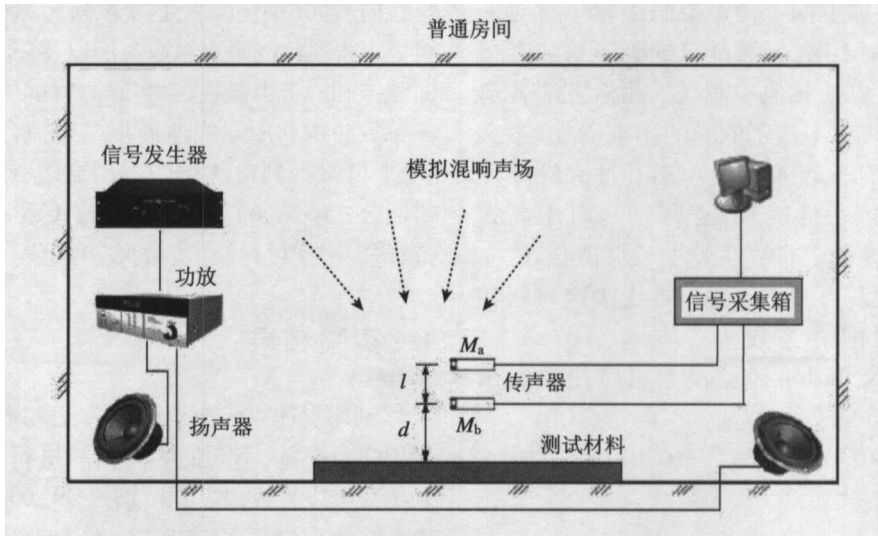


图1 测量环境与装置示意图 (共四个扬声器)

打开扬声器待大厅中的声场稳定后,利用计算机同时采集记录图 1 中两个传声器所在位置 a、b 两点的声压时域信号  $p_a^{(1)}(t)$  和  $p_b^{(1)}(t)$ , 采样频率 8192Hz, 每次采样时间 20s 以上; 然后, 再交换两个传声器之间的位置, 再进行测量, 得到位置 a、b 两点的声压时域信号  $p_a^{(2)}(t)$  和  $p_b^{(2)}(t)$ 。

### 3.2 计算频率响应函数和表面声阻抗

a 点到 b 点的频率响应函数可表示为下式(2):

$$H_{ab}(\omega) = \sqrt{\frac{G_{ab}(\omega)G_{bb}(\omega)}{G_{aa}(\omega)G_{ba}(\omega)}} \quad (2)$$

其中  $G_{aa}(\omega), G_{bb}(\omega), G_{ab}(\omega), G_{ba}(\omega)$  分别为 a 点声压信号自谱, b 点声压信号自谱, a 点与 b 点的互谱, 以及 b 点与 a 点的互谱。利用测得的  $p^{(1)}a(t), p^{(1)}b(t)$ , 计算  $G_{aa}(\omega), G_{bb}(\omega), G_{ab}(\omega), G_{ba}(\omega)$ 。然后代入式(2)得到 a 点到 b 点的频率响应函数  $H_{ab}^{(1)}(\omega)$ 。然后利用交换传声器位置之后得到的  $p_a^{(2)}(t), p_b^{(2)}(t)$ , 同样计算  $G_{aa}(\omega), G_{bb}(\omega), G_{ab}(\omega), G_{ba}(\omega)$ , 再代入式(2)得到 a 点到 b 点的频率响应函数  $H_{ab}^{(2)}(\omega)$ 。进行自谱互谱计算的时候将时域

信号截断分段, 利用 Hanning 窗对时域信号进行处理, 最后进行 20 次以上的平均处理。对于计算得到的  $H_{ab}^{(1)}(\omega), H_{ab}^{(2)}(\omega)$ , a 到 b 的估计频率响应函数为  $H_{ab}^{(e)}(\omega)$ 。

$$H_{ab}^{(e)}(\omega) = \sqrt{H_{ab}^{(1)}(\omega)H_{ab}^{(2)}(\omega)} \quad (3)$$

运用公式(3)的目的是最大可能地消除两个传声器之间的相位差异所引起的误差。为减小  $H_{ab}^{(e)}(\omega)$  中由于干扰噪声引起的局部波动, 对  $H_{ab}^{(e)}(\omega)$  在每一频率点按照左右各 50Hz 的带宽进行线性平均, 得到  $H_{ab}^{(avg)}(\omega)$ 。

在平面波垂直入射的条件下, 材料表面的声阻抗可表示为<sup>[6]</sup>:

$$Z_N(\omega) = \rho c \frac{H_{ab}(\omega)(1 - e^{2jk(l+d)}) - e^{jk l}(1 - e^{2jkd})}{H_{ab}(\omega)(1 + e^{2jk(l+d)}) - e^{jk l}(1 - e^{2jkd})} \quad (4)$$

其中,  $\rho$  和  $c$  分别为空气的密度和空气中的声速,  $H_{ab}(\omega)$  为 a 点到 b 点的频率响应函数  $p_b(\omega)/p_a(\omega)$ 。将  $H_{ab}^{(avg)}(\omega)$  代入公式(4), 即可求出吸声材料的表面声阻抗。

### 3.3 经验模型的参数识别

通过以上的测量和处理步骤已经得到了

材料的表面声阻抗,也就能通过公式(1)得到材料的吸声系数了,但是,由于入射声波低频分量较弱,再加上两个传声器间距较小时对低频分量分辨率不够,低频部分的吸声系数有很大的波动,这也是其他一些现场测量方法普遍存在的问题。为了修正低频的不准确性,本文进一步运用 Delany & Bazley 多孔性和纤维性吸声材料阻抗特性经验模型<sup>[9-11]</sup>,对中高频的吸声系数进行了非线性最小二乘拟合,建立最优阻抗模型,再利用该模型推出吸声材料在整个频段上的吸声系数。

Delany & Bazley 经验模型可以简单表示为公式(5)(6):

$$Z_c = \rho_0 c_0 [1 + 0.0571B^{-0.754} - j0.087B^{-0.732}] \quad (5)$$

$$\gamma = j \frac{2\pi f}{c_0} [1 + 0.0978B^{-0.7} - j0.189B^{-0.595}] \quad (6)$$

其中,  $B = \frac{\rho_0 f}{\sigma}$ ,  $\sigma$  为材料的流阻,  $Z_c$  为材料的特征阻抗,  $\gamma$  为传播系数。公式(5)、(6)表示的模型适用于单层纤维性材料,对于另一类重要的泡沫型材料不适用。如果将吸声材料放置在刚性壁面上,并假设刚性壁面的特征阻抗为无限大,即  $Z_{wall} = \infty$ ,那么吸声材料的表面声阻抗可表示为公式(7),  $x$  为吸声材料的厚度:

$$Z(x) = Z_c \coth(\gamma x) \quad (7)$$

当吸声材料的厚度已知的时候,只要知道材料的流阻  $\sigma$ ,就可以通过公式(5)、(6)、(7)得到材料的表面声阻抗。将这个阻抗带入公式(1)就可以求得材料的吸声系数。所以,将流阻  $\sigma$  作为曲线拟和的自由参数,对实际测得的中高频的吸声系数曲线利用非线性最小二乘拟合进行参数识别,可以得到最优化的模型流阻  $\sigma_{opt}$ 。将  $\sigma_{opt}$  带回公式(5)、(6)、(7)可得到修正后的表面声阻抗,进而得到材料修正后的吸声系数。

#### 4 实验结果

利用上述双传声器测量方法和数据处理流程,实验对两块不同的吸声材料进行了测量,得到了其吸声系数,并与驻波管(SW 002S)所测吸声系数数据进行了对比。实验中1号材料为无纺布+废仿毡(面积1.9m×1.4m,厚度0.02m),2号材料为麻毡板+阻尼板+PU泡沫+无纺布(面积1.9m×1.4m,厚度0.03m)。

考虑到在阻抗管中用传递函数法测量吸声系数<sup>[2]</sup>,传感器的间距应该大于感兴趣频率相应波长的5%,所以,本实验中20mm的间距对应的频率下限是850Hz,也就是说低于850Hz的吸声系数是不可靠的。因此,处理中利用850Hz至2500Hz的吸声系数进行了吸声材料阻抗特性经验模型的参数识别。

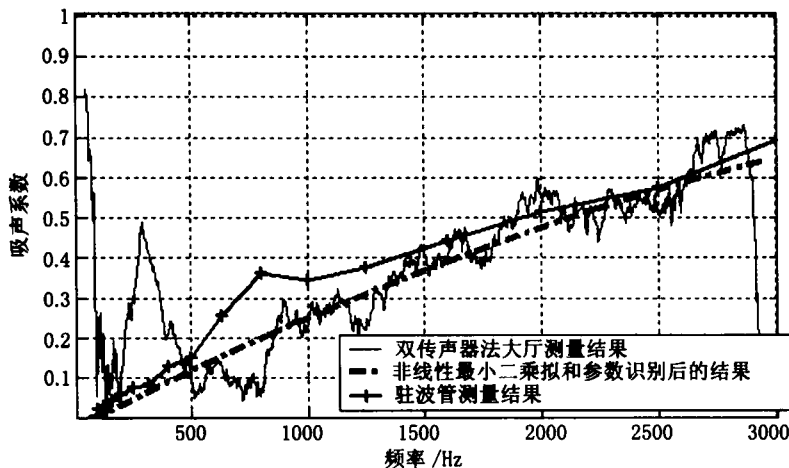


图2 1号材料大厅测量结果与驻波管法结果对比

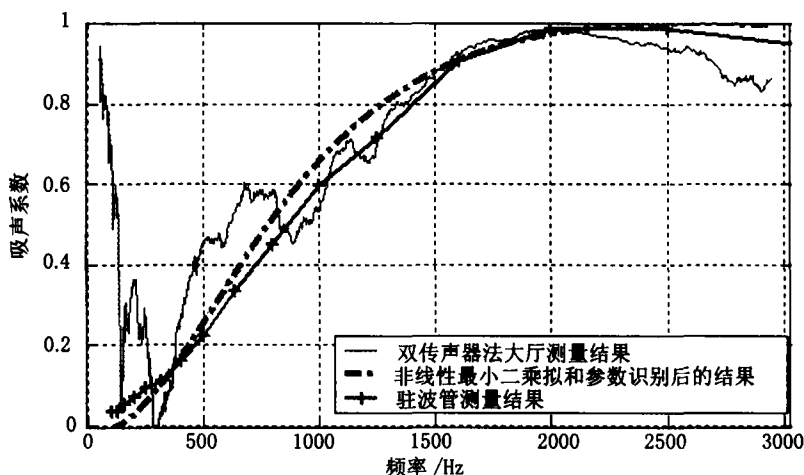


图 3 2 号材料大厅测量结果与驻波管法结果对比

图 2、3 是利用上述测量处理流程对材料吸声系数的测量结果。从结果来看,直接利用双传声器法测得的吸声系数,在 800Hz 至 2500Hz 与驻波管法测得的吸声系数相比,还能很好吻合。但在低频部分,由于前面所分析的原因,低频部分的吸声系数有很大的波动并出现了很大的吸声系数,这与实际情况是不相符合的。但是,对材料经验阻抗模型进行参数识别后,吸声系数曲线不仅消除了低频部分的大幅波动和不准确性,而且与驻波管法测得的吸声系数曲线相比,在 0~3000Hz 的频段范围内,除 1 号废仿毡材料在 1000Hz 以下有比较大的差距,其他部分误差都在 30% 以内,特别是 2 号材料在全频

带上的误差都在 10% 以内。

### 5 方法的适用性

以上的实验都是在长、宽、高分别为 8m、7.5m 及 4m 的实验室大厅中进行的,在这样的大房间中,形成的模拟混响场更加的均匀。为了验证该测试方法的适用性,在另一个长、宽、高分别为 3.6m、3.2m 及 3.1m 的小房间用 20kHz 白噪声信号发生器,通过功率放大器驱动放在房间两个对角上的音箱发声,在房间中央地板上对 1 号和 2 号材料进行相同的实验,实验结果如图 4 和 5 所示。

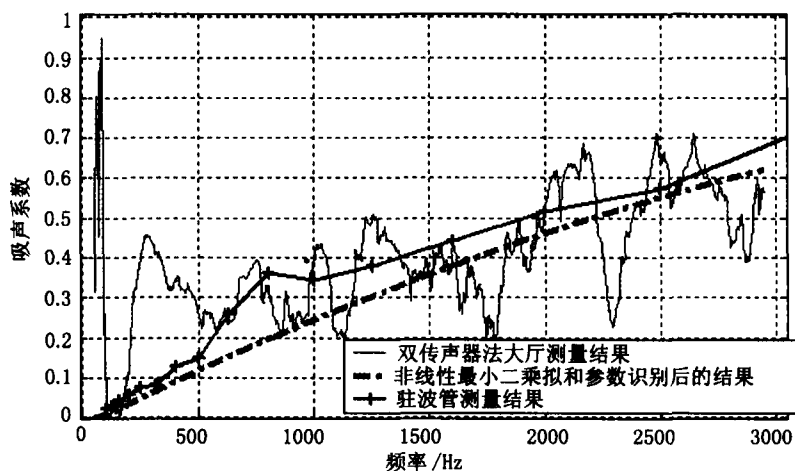


图 4 1 号材料在小房间测量结果与驻波管法结果对比

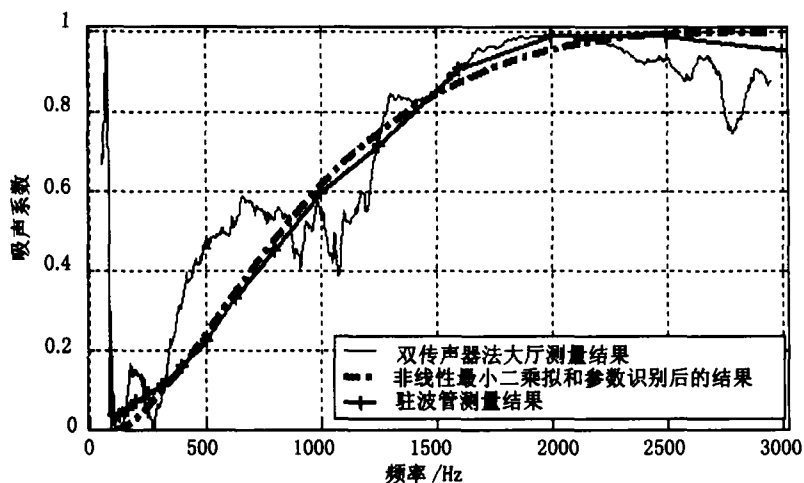


图5 2号材料在小房间测量结果与驻波管法结果对比

从结果看出,在小房间用两个扬声器形成模拟混响场,对材料吸声系数进行现场测量的时候,吸声性能相对较弱的1号材料的测量结果围绕驻波管法测量的吸声系数上下有了很大的波动,吸声性能较强的2号材料的波动则小得多,说明吸声性能好的材料对不同环境的适应性更好。经过参数识别后,测试的结果则还是很好地与驻波管法测量的吸声系数相吻合,这说明进行非线性最小二乘拟合后的双传声器测量,具有很好的适用性。

## 6 结论

本文给出了在模拟混响声场中利用双传声器对多孔性和纤维性吸声材料的吸声系数进行测量的参数识别方法,详细说明了试验步骤及数据处理方法。

通过实验对两种吸声材料的吸声系数进行了实际测量,并对测量结果按照 Delany & Bazley 经验模型进行了非线性最小二乘拟合,与驻波管方法得到的吸声系数相比,在 0 ~ 3000Hz 范围内,二者都能很好的吻合。通过在不同的环境中进行对比测试,该方法具有很好的可重复性和准确性。

在实际工程应用中,本文中给出的现场测量材料的吸声系数的方法对于不同吸声材料的选择是相当重要的,该方法较之驻波管法和混响室法,更经济、简单、方便。

## 参 考 文 献

- [1] Acoustics — Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room, International Standard ISO354: 2003 (International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2003).
- [2] GBJ47-83. 1983《混响室法吸声系数的测量规范》
- [3] Acoustics — Measurement of Sound Absorption Properties of Road Surfaces in situ — Part 1: Extended Surface Measurement, International Standard ISO 13472-1: 2002 (International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2002).
- [4] GB/T 18696.1-2004. 阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第1部分:驻波比法
- [5] GB/T 18696.2-2002. 阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第2部分:传递函数法
- [6] Y. Takahashi, T. Otsuru, R. Tomiku. In situ measurements of surface impedance and absorption coefficients of porous materials using two microphones and ambient noise. *Applied Acoustics*, 2005, 66:845-865.
- [7] Andrew R. Barnard, Mohan D. Rao. A comparison of acoustic absorption coefficient measurements from the In-Situ method with traditional methods. 2004, NOISE-CONFERENCE
- [8] Allard J. F., Champoux Y. In situ two-microphone technique for the measurement of the acoustic surface impedance of materials. *Noise Contr. Eng. J.* 1989, 32(1):15-23.
- [9] M. A. Delany, E. N. Bazley. Acoustic properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, 1970, 3: 105-116.
- [10] Allard J. F., Champoux Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *J. Acoust. Soc. Am.* 1992, 91(6):3346-3353.
- [11] Yasushi Miki. Acoustical properties of porous materials-Modifications of Delany-Bazley models. *J. Acoust. Soc. Jpn.* 1990, 11:19-24.