

基于传递函数法的阻抗管吸声系数测量系统研究

朱有剑 张勇 熊文波

(杭州爱华仪器有限公司, 杭州, 310000)

摘要 首先对传递函数及阻抗管中两传声器之间测得的传递函数进行理论研究。分别用特定频率的信号和白噪声为声源, 设计阻抗管模型, 在算法仿真完成后, 开发了基于传递函数法的吸声系数测量系统。通过具体的实验, 对某种海绵进行了吸声系数测量, 并与传统的驻波比法进行对比, 提出了测量时应注意的事项。本系统的测量方法不仅简单, 而且较传统的驻波比法减少了人为操作带来的误差, 这对快速精确测量材料吸声系数具有重要的意义。

关键词 声学; 吸声系数; 传递函数; 双传声器; 阻抗管

噪声污染已与水污染、大气污染被列为全球三大污染^[1]。对于环境噪声的控制主要从声音的产生、传播和接收等方面来着手。目前对噪声防治的措施主要是控制声压和采用吸声材料^[2]。而采用吸声材料达到降噪的效果是最有效的噪声治理方法^[3]。目前测量材料吸声的方法主要有混响室法和驻波比法。混响室法测得是无规入射吸声系数, 测试方法较简单, 但要求较大的测试样品面积和一个昂贵的混响室。对于驻波比法测得的是法向入射吸声系数, 虽然测试样品的面积不需要很大, 开发成本低, 但是需要控制传声器与材料的距离, 人为操作带来的误差比较大。传递函数法作为一种新的测量方法, 可以弥补混响室法和驻波比法的缺点, 对材料的吸声测量具有重要意义。

1 理论分析

1.1 传递函数

传递函数的基本思想是通过系统的输入量和输出量之间的关系来描述系统的固有特性, 即以系统的外部特性来揭示系统的内部特性。在 s 域下, 系统的传递函数^[4]为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (1)$$

由输入输出函数 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的拉普拉斯变换得到。如果令 $s = j\omega$, 则变成频率响应法, 传递函数可以表示为

$$H(f) = Y(f) / X(f) \quad (2)$$

1.2 传递函数法测量的理论背景

传递函数测量法的理论基础是通过测量测试样品前两个传声器位置上的声压, 然后计算两个传声器声压的复传递函数来确定法向入射声反射因

数, 从而计算得到测试样品材料的法向入射吸声系数^[5], 原理示意图见图1。

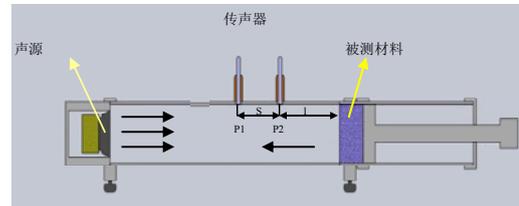


图1 传递函数法测试原理示意图

入射声压 P_i 和反射声压 P_r 分别可以写为

$$P_i = P_i e^{jk_0 x} \quad P_r = P_r e^{-jk_0 x} \quad (3)$$

式中: P_i 为基准面 ($x=0$) 上 P_i 的幅值; P_r 为基准面 ($x=0$) 上 P_r 的幅值; k_0 是复波数。

设两个传声器到材料的距离为 x_1 和 x_2 , 则两个传声器位置上的声压 P_1 和 P_2 分别为

$$\begin{aligned} P_1 &= P_i e^{jk_0 x_1} + P_r e^{-jk_0 x_1} \\ P_2 &= P_i e^{jk_0 x_2} + P_r e^{-jk_0 x_2} \end{aligned} \quad (4)$$

入射波的传递函数 H_i 为:

$$H_i = \frac{P_1}{P_2} = e^{jk_0 (x_1 - x_2)} \quad (5)$$

与入射波的传递函数一样, 反射波的传递函数 H_r 为:

$$H_r = \frac{P_{1R}}{P_{2R}} = e^{-jk_0 (x_1 - x_2)} \quad (6)$$

由于 $P_r = rP_i$ (r 是法向反射因数), 因此总声场的传递函数

$$H_{12} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{e^{jk_0 x_2} + r e^{-jk_0 x_2}}{e^{jk_0 x_1} + r e^{-jk_0 x_1}} \quad (7)$$

根据 H_{12} 、 H_r 和 H_i 的表达式, 可以求出 r 的

表达式, 即

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \quad (8)$$

通过求得式中的变量 H_{12} 、 x_1 和 k_0 , 就可以求出声反射因数 r 。

根据吸声系数的定义, 法向入射吸声系数 α 为入射平面波进入试件表面的声功率与入射声功率的比值, 而法向反射因数 r 为法向入射平面波的基准面上反射波振幅与入射波振幅的复数比值。从而求得法向入射吸声系数的表达式为

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (9)$$

2 算法验证

本文的传递函数法吸声系数测量仿真真是基于 Matlab 工程应用软件。首先建立数学模型, 设采样频率为 4096 Hz, 两个传声器距吸声材料的距离分别为 170 mm 和 100 mm, 驻波管直径为 100 mm, 通过软件自带函数产生一组随机噪声信号。白噪声采用系统自带的函数 `randn()` 产生。仿真时, 在仿真信号中加入一定幅度的白噪声, 并通过 200 次的测量平均, 平均的意义在于提高信噪比, 起到降噪的作用。

2.1 白噪声仿真

通过软件自带函数产生一组随机噪声信号, 即白噪声。第一次采用强反射, 反射系数为 0.96, 第二次采用强吸声, 反射系数为 0.4。模拟结果如图 2 和图 3 所示。从图中可以发现, 不管是强吸声还是强反射, 得到的传递函数曲线形状大致相同, 不同的只是峰值点的幅值变化, 强反射幅值大, 强吸声幅值小。两次模拟的吸声系数测量值与预先设定的值基本一致。说明采用白噪声作为驻波管的声源比采用驻波比法具有很大的优势。驻波比法每次只能发送一个频率值, 如果测量频率宽, 所需要的测量次数就越多, 而采用白噪声发声的传递函数法测量次数大大减少。

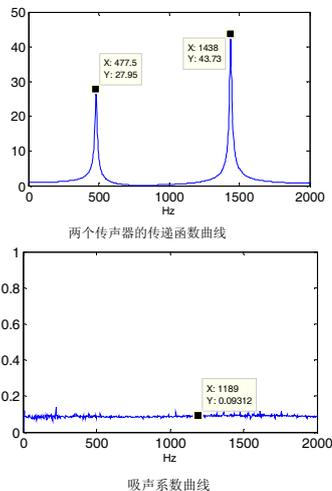


图 2 强反射吸声测量模拟

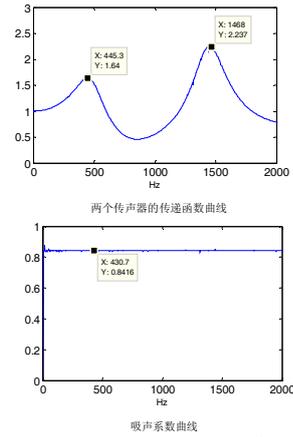
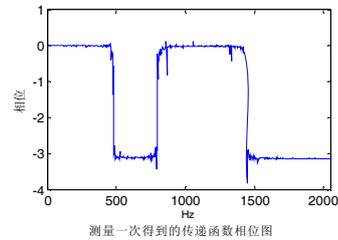


图 3 强吸收吸声测量模拟

2.2 传递函数的相位畸变问题

由于测一次得到的传递函数噪声干扰大, 如图 4 所示, 所以采用多次平均, 而每次测得传递函数是一个复数, 所以采用矢量平均模式, 即多次测量 H_{12} 或 H_{21} , 然后将所测得的值相加。在平均过程中会出现相位畸变问题^[8], 如图 5 右所示 (通过模拟测量强反射材料的吸声系数), 起初传递函数的相位在 0 和 $-\pi$ 附近波动, 相位转换后, 相位畸变, 所测结果将是错误的, 因为对于阻抗管所测得传递函数、传递函数相位理论上为负值^[8]。因此在相位转换后须将传递函数的相位修正到 0 和 $-\pi$ 。相位畸变消除后, 得到的传递函数相位应与起初的传递函数相位图一致。从而保证所测量传递函数的准确性和吸声系数测量的准确性。其中相位转换为两个传声器交换位置前后测得的传递函数之积的开根号。



测量一次得到的传递函数相位图

图 4 传递函数相位(测量一次)

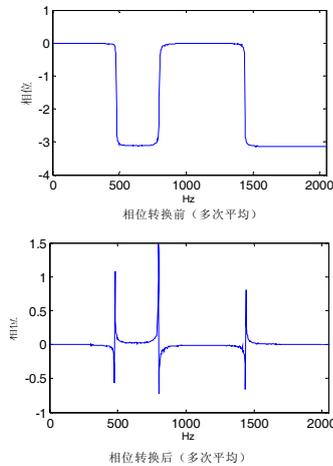


图 5 传递函数相位转换前后的相位图

3 实验研究

3.1 阻抗管设计

通过软件仿真结果, 自主开发了一款阻抗管, 阻抗管分为大管、中管和小管, 直径分别为 $\Phi 100$ mm, $\Phi 63$ mm 和 $\Phi 29$ mm。其中大管的装置如图 6 所示。大管中传声器 C 距测试样品的距离 l 为 100 mm, 相邻两传声器间距 s 为 70 mm。小管两传声器的间距 s 为 20 mm, 传声器 C 距测试样品的距离 l 为 30 mm。阻抗管测量范围由以下两点决定:

(1) 根据避免出现非平面波简正波模式的原则, 测量上限频率满足^[6]

$$d < 0.58\lambda_u; f_u d < 0.58C_0 \quad (10)$$

(2) 两个传声器之间的间距 $s(m)$ 满足不等式^[6]

$$f_u s < 0.45C_0 \quad (11)$$

其中 d 为阻抗管直径, λ_u 为测量上限波长, f_u 为测量上限, C_0 为声速, s 为两个传声器的间距。

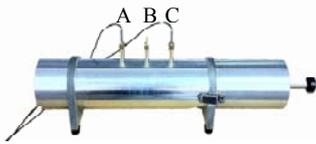


图 6 阻抗管（大管）

同时, 工作频率的下限与两个传声器之间的间距和分析系统的准确度有关^[6]。传声器间距应大于感兴趣的低频相应波长的 5%。

根据以上几个要求, 可以得到阻抗管大中小三个管子的测量范围。大管测量范围为 50 Hz~1 kHz, 小管的测量范围为 500 Hz~6.4 kHz。

为了防止声信号激发引起振动, 在工作频段内不出现共振, 设计阻抗管时, 管壁尽可能的保持平滑、刚硬、且足够密实。为了在声源和试件之间产生平面波, 阻抗管的管长设计比较长, 至少大于一倍的管径。为了防止漏声和声反射, 在大管和小管的连接处装有吸声棉。声源喇叭的选择采用能覆盖阻抗管管径的扬声器, 并且振膜与阻抗管横截面平行。

3.2 阻抗管传递函数法初测量

阻抗管传递函数法测量采用两个 AWA14435 型 1/4 传声器接收声压信号, AWA1650 型信号发生器与阻抗管的扬声器相连产生白噪声, 阻抗管的两个传声器通过前置极与 AWA6290B 型多通道信号分析仪相连, 硬件连接如图 7 所示。

上位机软件采用 AWA6290M 软件, 该软件不仅附带了大部分声学分析功能, 如 FFT 分析、oct 分析、吸声系数测量等功能。在吸声系数模块中, 用户不仅可以调阅传递函数、吸声系数、声反射因数、声阻抗率和声导纳率等的曲线, 还可以复制图

形和数据及校准因数, 界面友好、操作简单。

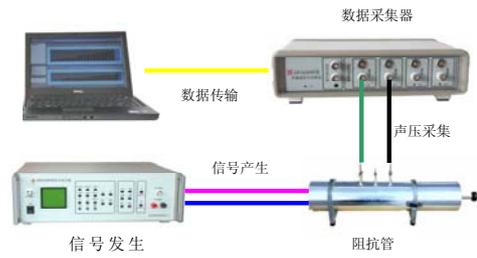


图 7 测量系统硬件连接图

在测量之前, 首先保证两个传声器之间的频响特性尽可能一致(出厂之前就配对好), 然后校准两个传声器, 在 1/3 oct 分析窗下, 使其 1 kHz 下的声压之差在 ± 0.3 dB 之内。按图 7 连接硬件, 打开信号发生器发白噪声, 管内声压值比本底高 20 dB 以上。在测量吸声系数之前, 保证阻抗管各接头和缝隙用油脂密封, 防止漏声。将测试样品分别放入大管和小管中, 并通过 AWA6290M 软件的吸声系数测量模块分析测试数据。实验中发现, 低频段的吸声系数与传声器的位置有很大的关系。例如, 测试大管的吸声系数时, 传声器 1 和 2 分别安装到 A 和 C 位置时的吸声系数曲线与其分别安装到 C 和 A 时吸声系数曲线在低频段有很大的不同, 如图 8 所示。其中, 测试样品为黑色海绵, 厚度为 30 mm, 直径与阻抗管大管的内径相同, 为 100 mm。从图 8 中明显发现, 相位差对测量影响极大, 特别是在低频段。上图 50 Hz 的吸声系数超过 0.4, 而在下图只有 0.014。

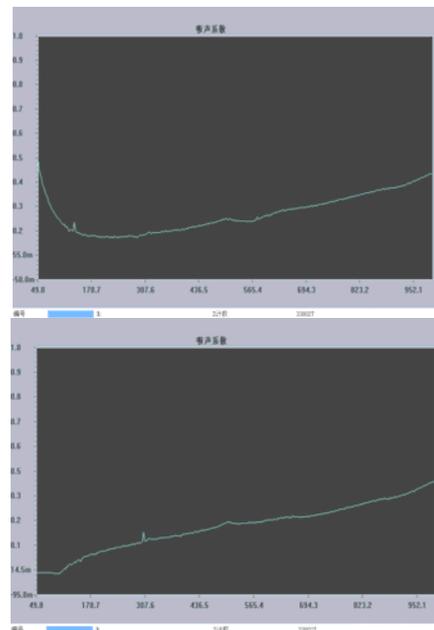


图 8 两传声器安装位置相反得到的吸声系数曲线

3.3 低频段仿真

根据上节实验得到的吸声系数曲线, 对低频段进行仿真, 实验仿真频率采用 20 Hz 和 180 Hz, 频

率仿真信号采用 $x = A \sin(2\pi ft)$ ，其中 A 为信号幅值， f 为频率点， t 为时间；吸声系数为 0.75，在两个传声器之间加入 0.6° 的相位差（第一个位置的传声器比第二个位置的传声器超前 0.6° 的相位差），仿真得到的传递函数和吸声系数如图 9 所示，得 20 Hz 和 180 Hz 的吸声系数分别为 0.7842 和 0.7527；图 10 在两个传声器之间加入 0.6° 的相位差（第一个位置的传声器比第二个位置的传声器延后 0.6° 的相位差），得到 20 Hz 和 180 Hz 的吸声系数分别为 0.7113 和 0.7473；由以上仿真可知，交换传声器，即交换两个传声器位置，由于两传声器之间存在相位差，两次得到的传递函数和吸声系数都不同，根据文献[6]介绍，采用 $H = \sqrt{H_{12} \cdot H_{21}}$ 校准相位差，其中 H_{12} 为第一次测得传递函数， H_{21} 为交换传声器后测得的传递函数， H 为校准后的传递函数。得到吸声系数值如图 11 所示，与目标值相同。说明交换通道可以有效的去除由于传声器之间存在的相位差对材料吸声系数的影响。

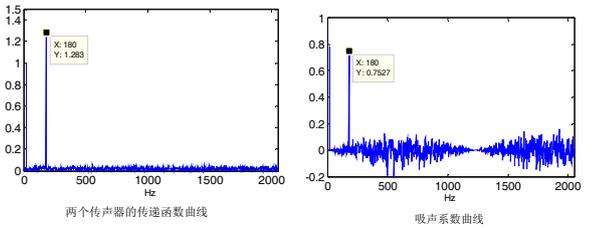


图 9 有相位差

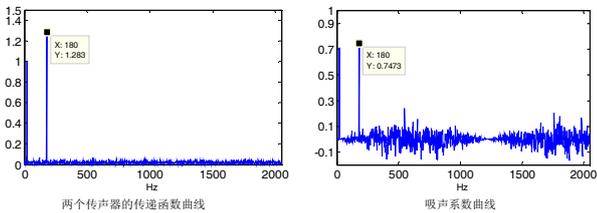


图 10 有相位差

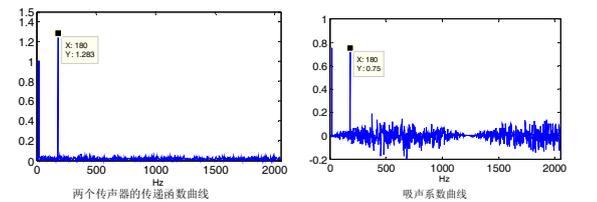


图 11 经过相位校准

3.4 阻抗管传递函数法测量

通过上面的仿真，本实验采用交换通道的方法继续实验。测试样品为黑色海绵，厚度为 30 mm，直径与阻抗管的内径相同，分别为 100 mm 和 29 mm。第一次测量传递函数时，两个传声器的位置如图 6 所示，测量完后，交换两个传声器，即 A、C 两处的传声器互换。测完两次传递函数，软件根据 3.2 节提到的方法自动计算材料的吸声系数，大小管测得结果如图 12 和图 13 所示，并在表 1 中记

录了详细结果。从表 1 可以看出，在高频段，吸声系数在对数和线性坐标上得到的值比较接近，而在低频段误差比较大。对数坐标时吸声系数为中心频率附近的平均值，建议低频段的取值采用对数。

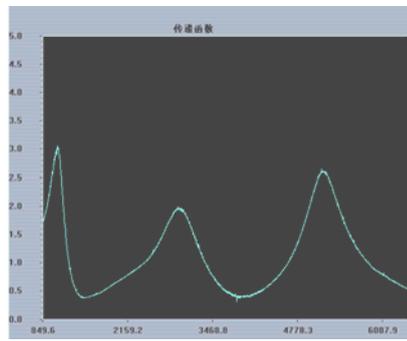
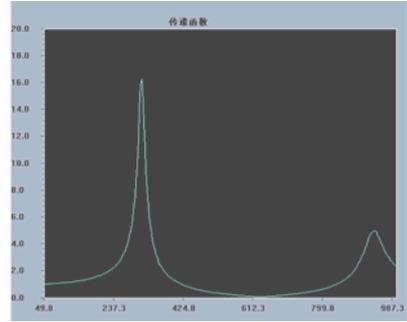


图 12 传递函数曲线（上为大管，下为小管）
（横坐标为频率，纵坐标为吸声系数幅值）

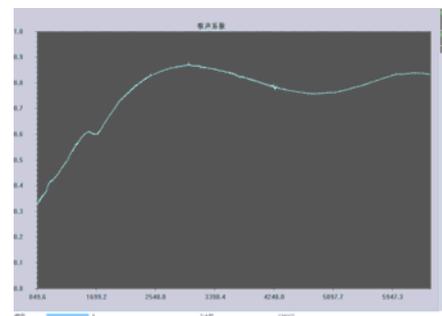
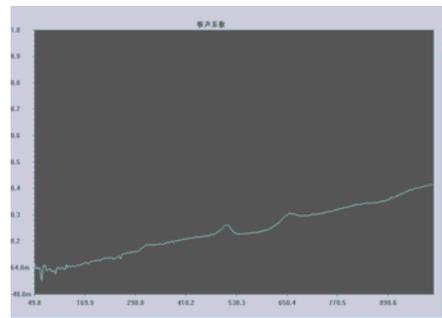


图 13 样品的吸声系数（上为大管，下为小管）
（横坐标为频率，纵坐标为吸声系数幅值）

表1 阻抗管传递函数法吸声测量结果

大管			小管		
测试频率 (Hz)	吸声系数		测试频率 (Hz)	吸声系数	
	对数坐标	线性坐标		对数	线性
50	0.086	0.070	1000	0.405	0.403
63	0.07	0.046	1250	0.481	0.488
80	0.062	0.102	1600	0.612	0.610
100	0.052	0.062	2000	0.725	0.720
125	0.060	0.064	2500	0.836	0.831
160	0.057	0.058	3150	0.864	0.865
200	0.082	0.092	4000	0.801	0.805
250	0.101	0.109	5000	0.764	0.761
315	0.136	0.132	6300	0.840	0.838
400	0.141	0.148			
500	0.205	0.200			
630	0.230	0.233			
800	0.304	0.303			
1000	0.372	0.390			

注：大管两传声器间距：140 mm（测量范围：50 Hz~1 kHz）
小管两传声器间距：20 mm（测量范围：500 Hz~6.4 kHz）
对数坐标：表示折算到三分之一倍频程，线性坐标：
表示线性带宽分析结果

3.5 阻抗管驻波比法测量

为了验证传递函数法测得的准确性，与AWA6122A型驻波管吸声系数测试仪进行对比试验。由驻波比法测得的吸声系数如表2所示。

表2 驻波比法测得的吸声系数

大管		小管	
测试频率 (Hz)	吸声系数	测试频率 (Hz)	吸声系数
100	0.051	1600	0.716
200	0.074	2000	0.655
315	0.115	2500	0.732
400	0.147	3150	0.862
500	0.182	4000	0.876
630	0.239	5000	0.805
800	0.361	6300	0.815
1000	0.379		
1250	0.535		

注：大管测量范围：90 Hz~1.8 kHz
小管测量范围：1.5 kHz~6.5 kHz

根据表1和表2对比得出，两种方法得到的结果比较接近，如：3150 Hz和1000 Hz几乎相同，但也存在差值比较大的频率点如2500 Hz，传递函数法测得的值达到0.831，而驻波比法只有0.732，相差0.1。这些误差产生的原因可能是跟两个阻抗管的结构有关，还有人操作误差。采用驻波比法时，需要移动测试传声器或声源得到谷峰值，在移动传声器时，人为因素的存在，不可能完全准确的得到谷峰值。由于谷值和峰值都有误差，得到的吸声系数值也存在误差。采用传递函数法，如果求传递函数时采用先求校准因素，就不用多次安装传声器。因此采用传递函数法可以有效地减少操作误差，从而提高了测量的准确性。

4 结论

本文通过对传递函数及传递函数法测量吸声

系数的理论研究，并通过数据仿真，得到算法的准确性。并通过具体的实验研究，开发了一款基于传递函数法的阻抗管吸声系数测量系统。通过比较，比传统的驻波比法的测量方法简便，完全可以满足一般建筑吸声材料、装饰品及路面的吸声系数测量要求。但在测量时需要注意以下10项：（1）传声器的校准。如果两传声器的灵敏度不一致，对测量传递函数有一定的影响，本系统在校准时，将两传声器在1 kHz的声压控制在 ± 0.3 dB。（2）声源信号幅值的选取。测量时，信噪比不能太低，所有感兴趣的频率点声压幅值至少比背景噪声高10 dB。

（3）阻抗管结构。为了防止漏声，在管件连接处需用油脂密封；为了防止环境振动对低频测量的影响，阻抗管底座最好加入隔振处理，如橡胶垫；为了防止传声器位置对低频测量的影响，传声器保护罩与声源平面波垂直，并且两个传声器的保护罩在同一平面上。（4）声源扬声器的选择。扬声器对声源的影响比较大，需严格测试。（5）测试精度。平均数的选择对抗噪声能力有一定的影响，原则上次数越多越好，但是次数越多，计算时间长，建议测量材料时，平均200次即可。（6）数据采集设备。在实验中发现，如果数据采集仪的两通道存在相位差，即采集同步性差，会出现测量错误。（7）避免非平面波简正模式，主要跟结构设计有关。（8）两传声器的频响。传声器校准一般是在1 kHz下进行校准的，但具体频率点的频响是有差异的，出厂时需严格配对。（9）数据采集长度。每次数据采集的长度不能太短，采样频率和数据长度直接决定了传递函数的计算。（10）测量时尽量不要触摸阻抗管壁，以免产生振动，从而影响测量结果。

参考文献：

- [1] 张彦, 周心艳, 李旭祥. 发泡聚合物-无机物复合吸声材料的研究[J]. 噪声振动与控制, 1996,(3):33-35.
- [2] 李海涛, 朱锡, 石勇, 等. 多孔性吸声材料的研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2004,22(6):934-938.
- [3] 高玲, 尚福亮. 吸声材料的研究与应用[J]. 化工时刊, 2007,21(2):63-69.
- [4] 朱维彰. 传递函数与脉冲传递函数的直接换算方法[J]. 控制理论与应用, 1990,7(2):40-46.
- [5] ISO TC 43/SC 2. ISO 10534-2-1998 Acoustics-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2 Transfer-function method[S]. Multiple, 2007.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18696.2-2002 声学阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第二部分 传递函数法[S]. 2002.
- [7] 朱倍丽, 肖今新. 声管测量双水听器法中传递函数的研究[C]. 第四届水下噪声学术讨论论文集, 1991.
- [8] 庞业珍. 基于传递函数的吸声隔声测量方法与应用研究[D]. 大连理工大学, 2006.