

提高阻抗管测量频率上限的研究

冯善勇, 莫方朔, 赵跃英, 盛胜我

(同济大学 声学研究所, 上海 200092)

摘要: 提出了一种提高阻抗管测量频率上限的新方法. 该方法针对表面阻抗均匀的材料, 通过对管道内高次模式声波的分解和测量, 拾取对应于法向的入射波与反射波的 $(0, 0)$ 模式, 获得法向吸声系数和法向声阻抗率, 从而使测量不再受管道截止频率的限制, 大幅度提高管道内测量的频率上限. 介绍了利用单传声器轴向传动获取信号, 在同济大学直立式阻抗管内进行材料声学特性的测量. 结果表明, 阻抗管原有的截止频率为 280 Hz, 采用提出的测试方法, 可使测量频率上限提高到 2 000 Hz 及以上.

关键词: 截止频率; 模式分解; 管道; 阻抗管测量; 声学特性

中图分类号: TU112

文献标识码: A

Extended Frequency Range of Impedance Tube Measurement

FENG Shanyong, MO Fangshuo, ZHAO Yueying, SHENG Shengwo

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The paper presents a new method for extending the frequency range of impedance tube measurement. The method is based on decomposing and measuring higher-order mode waves in ducts and picking up $(0, 0)$ mode of the incident- and reflected-wave for the material of uniform surface impedance. Therefore the normal-incidence absorption coefficient and the acoustic impedance can be determined. Compared with previous research, the limit of cut-off frequency in the tube can be avoided and the frequency range of measurement can be increased greatly. Finally, the verification test with the proposed method is carried out by adopting the single-microphone axial transmission system in a large vertical impedance tube. From the test results, the upper limit frequency of the tube is extended from 280 Hz to 2 000 Hz or higher.

Key words: cut-off frequency; modes decomposition; duct;

impedance tube measurement; acoustic properties

采用阻抗管进行材料声学特性的测量已广泛应用于工程实践中. 国内外已有相应的标准^[1-4]. 最常用的是驻波比法和传递函数法. 1953年, Lippert 提出了驻波比法^[5], 通过一个可移动的传声器测量管道中驻波声压极大和极小处的声压振幅, 以及确定驻波声压第一极小值离材料表面的距离, 得到材料的法向反射因数、法向入射吸声系数和声阻抗率. 1977年, Serbert 和 Ross 提出了双传声器传递函数法^[6], 传递函数法是在管道内靠近待测材料的两个合适位置测量声压, 求得两个传声器信号的声传递函数, 用此计算材料的法向入射声学特性. Chung 和 Blaser 完善了传递函数法^[7-8], 简化了两测点之间传递函数计算方式. Fahy^[9]和 Chu^[10]对传递函数法中两测点的位置的选择进行了进一步的研究.

这两种方法均需要避免管道中出现非平面波的简正波模式, 其容许使用的频率上限取决于管道的横截面尺寸. 以常用的圆形阻抗管为例, 一般直径是 10 cm 左右, 容许使用频率的上限为 1 900 Hz. 如需测量更高的频率段, 则要换用直径更小的细管, 使测量变得非常复杂. 这种阻抗管的另一个实用上的缺陷是, 由于管径很小, 因此采用的试件面积非常有限. 同时, 这种管道不能测试一些较大的声学构件. 对应于一般声学材料与结构制品的尺寸, 同济大学曾自行开发一种直立式的大型阻抗管^[11] (也称驻波管), 能够测量 60 cm×60 cm 的试件, 解决了较大试件低频测量的困难. 但是, 这个阻抗管的截止频率是 280 Hz, 即使传声器装置在管轴上, 容许使用频率的上限也仅能扩展至 400 Hz 左右, 远不能满足中高频测量的需要. 因此, 在管道内扩展材料声学性能测量的频率范围显得十分重要.

收稿日期: 2012-01-13

第一作者: 冯善勇(1983—), 男, 博士生, 主要研究方向为建筑声学. E-mail: feng_shanyong@163.com

通讯作者: 盛胜我(1946—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为建筑声学. E-mail: shengsw@tongji.edu.cn

笔者于文献[12]曾提出了在管道内分解与测量高次模式声波的原理和方法. 在此基础上, 本文针对表面阻抗均匀的材料, 提出了一个在管道中测量其法向声学特性的新方法. 相对于传统的驻波比法和传递函数法, 此方法的容许使用的频率范围不再受管道横截面尺寸的限制, 极大地扩展了阻抗管的测量频率上限.

1 基本原理

在阻抗管中, 当声源激发频率超过截止频率时, 管道内存在大量高次模式声波, 通过单传声器在管道内沿轴向传动获取声信号, 能够分解与测量得到管道中的所有高次模式声波的声压幅值与相位^[12]. 本文将此运用于管道内材料声学性能的测量. 对于表面阻抗均匀的材料, 通过拾取管道中入射和反射方向传播的(0,0)次模式的分量, 可以得到待测材料在截止频率以上时的法向声学特性.

1.1 单传声器轴向传动分解与测量管道内高次模式的原理^[12]

利用数字声源信号可完全重复的特点, 精确地同步控制单个传声器在管道中均匀传动, 通过处理在传动过程中获取的声压信号, 使其等效于由一个线形传声器阵列测量所获得的结果. 这种方法也可以叫做 RTS(repeated translation system)系统.

声源为重复激发的伪随机声信号, 重复周期为 T , 重复次数为 M , 总的时间长度为 $M \times T$, 在单个周期 T 中包含有效的声信号以及静音. 传声器沿管道步进传动, 步进周期为 T . 对声源系统和接收系统进行同步控制, 保证传声器在每个测点位置滞留的时间内, 声源刚好激发有效的声信号.

假设在整个测量过程中, 传声器测得的声信号为 $p(t)$, 将其进行连续性分段处理:

$$p_q(t) = p[(q-1)T+t] \quad (1)$$

其中 $q=1, 2, \dots, M$, 并且 $0 < t \leq T$, 即可以得到 M 个持续时间为 T 的声压信号 $p_q(t)$, 所得的结果等效于沿管道均匀分布的 M 个传声器组成的线形阵列实时测量所接收的信号. 利用这 M 个测点的声压信号可以分解管道中存在的高次模式.

当声源激发频率高于截止频率时, 管道中会存在大量的高次模式声波. 此时, 管道内的稳态声场是沿管道正反方向传播的所有模式声波的叠加. 如图 1 所示, 在一个刚性壁面的方形管道中, 管内任意点的声压 $P(x, y, z)$ 可写为

$$P(x, y, z) = \sum_m \sum_n \phi_{nm}(x, y) (A_{nm} e^{jk_z z} + B_{nm} e^{-jk_z z}) \quad (2)$$

其中 $j=\sqrt{-1}$, A_{nm} 和 B_{nm} 分别为 z 轴正方向和反方向传播的各个模式声波的复系数, m 和 n 是相应的模数, k_z 是轴向的波数, $\phi_{nm}(x, y)$ 由边界条件决定. 若坐标原点位于方形截面的一个顶点, 则有:

$$\phi_{nm}(x, y) = \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{a}y\right) \quad (3)$$

式中: a 是管道的边长. 轴向的波数 k_z 相应为

$$k_z = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2} \quad (4)$$

式中: ω 是角频率, c_0 是声传播速度.

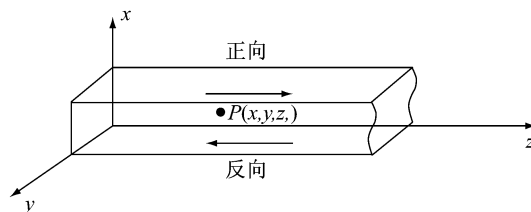


图 1 声波在管道内传播示意图

Fig.1 Schematic diagram of sound propagation in ducts

假设管道中存在的所有稳态的传播模式数为 N , 则式(2)中包含 $2N$ 个未知系数 A_{nm}, B_{nm} . 传声器的测点数为 M , 且 $M \geq 2N$, 应用所有测点的声压值, 可以形成方程组:

$$\begin{cases} P_1 = \sum_m \sum_n \phi_{nm}(x_1, y_1) \cdot (A_{nm} e^{jk_z z_1} + B_{nm} e^{-jk_z z_1}) \\ P_2 = \sum_m \sum_n \phi_{nm}(x_2, y_2) \cdot (A_{nm} e^{jk_z z_2} + B_{nm} e^{-jk_z z_2}) \\ \vdots \\ P_M = \sum_m \sum_n \phi_{nm}(x_M, y_M) \cdot (A_{nm} e^{jk_z z_M} + B_{nm} e^{-jk_z z_M}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_1, P_2, \dots, P_M 对应于传声器在各测点的声压. 通过求解方程组(5), 即可得到管内传播的正向波与反向波的复系数 A_{nm}, B_{nm} ; $Z_i (i=1, 2, \dots, M)$ 为各个测点在 Z 轴上的坐标.

由上述的单传声器模式分解法, 只要满足 $M \geq 2N$, 就可求得管道中存在的各高次模式声波的声压幅值和相位. 其分解高次模式声波的数量与传声器步进传动的测点数量相关. 原则上, 只要增加测点数量就可以测得管道内存在的所有高次模式声波.

1.2 管道内材料声学特性的测量

当管道中一端放置扬声器,另一端放置待测材料时,通过求解方程组(5),可以得到管道中相对于材料表面入射和反射方向的高次模式复系数 A_{mn} 和 B_{mn} ($m, n=0, 1, 2, 3, \dots$),其中 A_{00} 和 B_{00} 对应于 $(0, 0)$ 次模式,即沿材料表面法向入射和反射的平面波,其他都对应于其他方向入射和反射的高次模式声波。

对于表面阻抗均匀的材料, $(0, 0)$ 模式的入射声波只会转化为 $(0, 0)$ 模式的反射声波,不会转化为其他模式的反射波,同时其他模式反射波也不会转化为 $(0, 0)$ 模式的反射声波。通过拾取管道中入射和反射方向传播的 $(0, 0)$ 次模式的分量,可以得到待测材料在截止频率以上的法向声学特性。材料的法向反射系数 r_R 可以表示为

$$r_R = \frac{B_{00}}{A_{00}} \quad (6)$$

进而可以求出材料的法向吸声系数 α 和法向声阻抗率比 ϵ 。

$$\alpha = 1 - |r_R|^2 \quad (7)$$

$$\epsilon = \frac{1 + r_R}{1 - r_R} \quad (8)$$

式中: ϵ 为复数,实部是声阻抗率比,虚部是声抗率比。

在管道中,每一阶高次模式分量都对应于以某个入射角度传播的声波。利用上述的原理,如果拾取管道中其他某阶高次模式分量,即可以得到待测材料在相应入射方向下的声学特性。

2 实验

2.1 实验装置

本文所提出的测试方法能有效地提高阻抗管容许使用频率的上限。为了验证此方法的有效性,选取两个不同口径的管道,对同一种表面阻抗均匀的材料进行测试。在较大口径的管道中采用本文所提出的模式分解法,在较小口径的管道中采用传统的传递函数法。

较大口径的管道为一个刚性壁面的直立式方形管道,横截面的口径为 $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$,管道上端安置扬声器,扬声器背后作全吸声处理。管道下端放置待测材料。管道总长为 10 m ,避开两端近场效应的影响,管道的有效测量距离为 7 m 。管道的截止频率为 280 Hz 。采用驻波比或传递函数法,由于平面波的限制,则所测得频率范围非常有限。利用本文提出的单传声器轴向传动(RTS)模式分解方法,将传声器安置在管道横截面的中点,由精密步进电机驱动控制

其沿轴向缓慢均匀移动,传声器测点步进移动的距离 d 为 4 cm ,实验中沿管道可得到 160 个测点的数据。按目前的装置,可以将频率范围扩展到 2000 Hz 。原则上,只要增加传声器沿轴向移动的距离,或者减小步进的间距,则能够大幅度地拓展其测试频率的范围。

作为比较,采用的标准驻波管测量设备为 BK Type 4206,圆型管道的直径为 10 cm ,测试方法是双传声器传递函数法,其工作的频率范围为 $50 \sim 1600 \text{ Hz}$ 。本文选取了多种材料作为测试对象,下面给出了其中一个典型的实验测试结果。

2.2 实验结果

图2和图3分别示出了两种方法测得的实验结果。由图可见,采用单传声器模式分解法,在存在高次模式的管道中测得的法向吸声系数和法向声阻抗率数据,与采用双传声器传递函数法的结果相比较,两者符合良好。因此,证明了本文所提测试方法的有效性。实际测量中,较低频段的误差来源主要是传声器在管道横截面方向的定位精度尚不够高,可以通过进一步改进装置来提高测量精度。

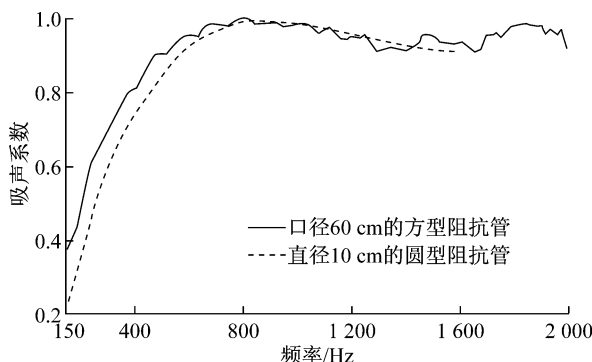


图2 单传声器模式分解法和传统驻波管法测量的法向吸声系数比较

Fig.2 Normal-incidence absorption coefficient by single-microphone modal decomposition method comparing with standard standing wave tube method

3 实际应用

通过上述管道内高次模式波的分解与测量,拾取零阶的入射平面波与反射波,可以使管道内测量材料法向吸声系数与声阻抗不受到管道截止频率的限制。这样,在吸声材料的遴选与比较时,能够采用较大尺寸的试件样本,避免材料不均匀性带来的问题。一般商用的吸声材料与结构都以截面 $60 \text{ cm} \times$

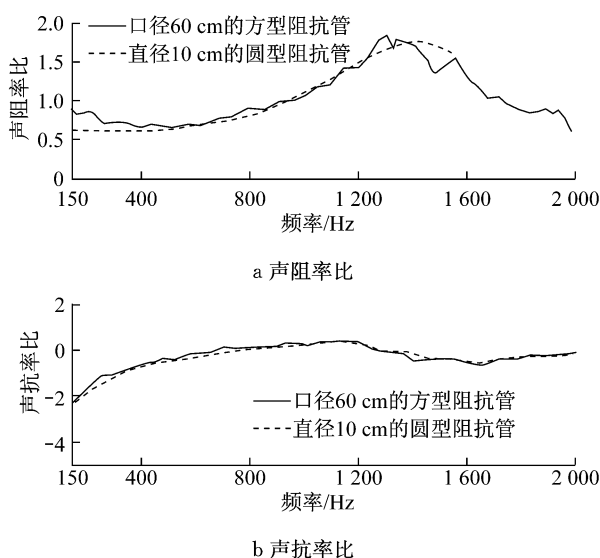


图 3 单传声器模式分解法和传统驻波管法测量的声阻率比和声抗率比的比较

Fig. 3 Acoustic impedance ratio by single-microphone modal decomposition method comparing with standard standing wave tube method

60 cm 为主,因此在边界 60 cm 的方形管道内,作较宽频带的测量具有显著的实用意义。

以下是一典型声学材料与结构的实例.待测产品是厚度为 8 cm 的多层复合结构吸声材料,每一层由相同特性的均匀材料构成,其表面阻抗均匀.应用本文提出的方法,在口径为 60 cm×60 cm 的直立式方形管道中进行法向吸声系数的测量,结果如图 4.由图可见,所测得的频率范围已远超出管道的截止频率,涵盖了常用的全频带范围,基本满足了工程测量的需要。

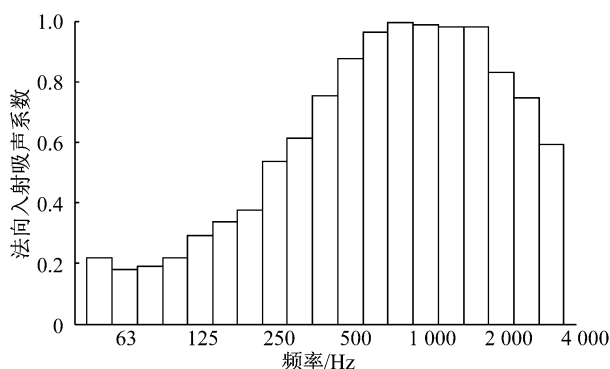


图 4 材料 1/3 倍频程法向吸声系数

Fig. 4 Normal-incidence absorption coefficient of specimen, 1/3 octave

同时对于局部反应材料而言,由测得的法向声阻抗率值可以推算到无规入射的吸声系数 $\bar{\alpha}$,其关系式为^[13]

$$\bar{\alpha} = \frac{8r}{r^2 + x^2} \left\{ 1 - \frac{r}{r^2 + x^2} \ln(r^2 + x^2 + 2r + 1) + \frac{r^2 - x^2}{x(r^2 + x^2)} \tan^{-1} \left(\frac{x}{1+r} \right) \right\} \quad (9)$$

式中: r 是声阻率比; x 是声抗率比.图 5 是根据式(9)计算的无规入射吸声系数。

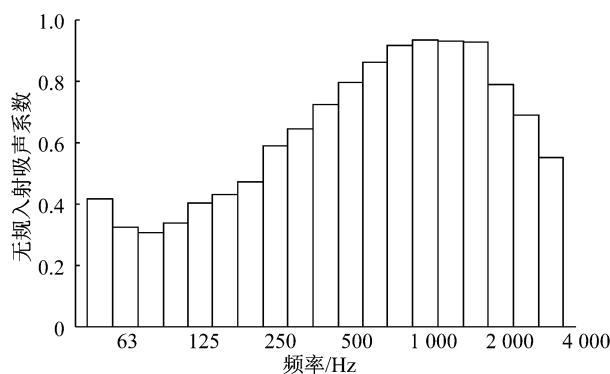


图 5 材料 1/3 倍频程无规入射吸声系数图

Fig. 5 Random-incidence absorption coefficient of specimen, 1/3 octave

众所周知,材料无规入射的吸声系数对于室内混响时间的控制以及噪声控制的工程应用更具参考价值。

值得指出的是,管道中的高次模式数量会随着频率提高而显著增加.例如对于 60 cm×60 cm 的方形管道,当频率为 2 000 Hz 时,管道中存在 24 个模式声波;频率为 4 000 Hz 时,存在 88 个模式声波;而当频率为 8 000 Hz 时,则管道内将存在 330 个模式声波.分解与测量管道内声波的高次模式数量与传声器的步进测点数有关,虽然原则上只要通过增加测点数量就可以不断提高管道的测量频率上限,但从实际应用出发,因受实验装置硬件的限制,对于 60 cm×60 cm 的方形管道,目前容许频率上限取为 4 000 Hz 较为合理。

4 结语

本文针对传统的驻波比法和传递函数法测量频率范围不能超过管道截止频率的限制,运用管道中单传声器轴向传动模式分解法,针对表面阻抗均匀的材料,通过拾取对应于法向入射和反射的零次模式测量值,从而得到材料的法向吸声系数与声阻抗.此方法可以有效地提高管道内容许使用的频率上限.通过对比实验,验证了其有效性.由于此方法可

(下转第 1588 页)