

近代现场吸声测量技术

侯 宏, 徐士化

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 驻波管法和混响室法是吸声测量技术中常用的方法, 用于现场测量时不满足特殊声场环境假设、样品尺寸、频率限制等。脉冲回波方法和声强测量法对测量环境没有严格要求, 适用于现场测量。这类方法的共同特点是在频域处理数据, 往往需要将反射波与入射波分离, 测量步骤较多, 不利于在线测量。参数反演方法直接利用测量的声压时间序列获得声学阻抗或吸声系数, 是一种时域测量方法, 更适用于在线测量。在声学理论指导下, 借助于计算机与数字信号处理技术的研究成果, 一些新的测量方法不断被提出, 但要成为一种成熟的技术, 还有大量的研究工作去做。

关键词: 驻波管法; 混响室法; 脉冲回波法; 声强测量法; 时域参数反演法; 在线吸声测量

中图分类号: TB527

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2007)-06-1209-05

A review of modern in-situ sound absorption measurement techniques

HOU Hong XU Shi-hua

(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi an 710072, China)

Abstract: Standing wave tube method and reverberation room method, which are two traditional sound absorption measurement methods, are not suitably used for in-situ measurement because of unsatisfying the assumption of perfect sound field, the sample size and frequency limits. Echo-impulse method and sound intensity method are much advantaged for spot measurements due to no strict requirement of measurement conditions. But there are still some disadvantages to restrict the two methods for in-situ use, such as the need of seperating incident and reflect wave and processing data in frequency-domain. An innovative method, time-domain parameter estimation method, is suitable for in-situ sound absorption measurement. Using time series of sound pressure before and after reflection to estimate impedance parameters of the measured sample can avoid many difficulties from these traditional methods. It is believable that some new methods for in-situ sound absorption measurement will be further proposed with the development of computer and signal processing techniques. But much investigation need doing before they become the widely accepted methods.

Key words: standing wave tube method; reverberation room method; echo-impulse method; sound intensity method; time-domain parameter estimation method; in-situ sound absorption measurement

1 引 言

吸声系数反映了吸声结构的宏观声学性能, 是

噪声治理工程中选用声学结构的重要理论依据。吸声系数与材料的特性阻抗以及声学结构(厚度、被衬等)密切相关, 是入射波频率和入射角度函数。在局部反映条件下, 它取决于端面的法向声阻抗率。

长期以来, 吸声系数的测量始终是一项重要的基础性工作。常用的主要有阻抗管法和混响法。

阻抗管法包括驻波比法(SWR)和传递函数法(TTF)。前者利用阻抗管中平面波形成的驻波波幅比值, 确定样品的法向吸声系数、反射系数、表面声

收稿日期: 2006-01-20; 修回日期: 2006-06-25;

基金项目: 国家自然科学基金资助(10674111)和西北工业大学研究生创业种子基金资助(Z200505)

作者简介: 侯宏(1966-), 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 噪声控制技术, 声学测量技术, 声探测技术等

通信作者: 侯宏, E-mail:houghong@nwpu.edu.cn

阻抗率或声导纳率。该方法测量精度较高,但它要求以纯音为测量信号,测量步骤较为烦琐和费时。传递函数法采用具有平稳性和各态遍历性的宽带随机信号激励,通过测量驻波管壁上两双传声器位置处声压时域信号,对采样信号经过傅立叶变换以获得传递函数,进而计算吸声系数等参数。该方法理论推导严密,测量速度快,但有两个主要缺陷:一是要求双传声器通道的相位匹配,二是对测量频率有所限制。针对第一个问题,Chu 提出采用伪随机噪声作为激励信号,用单传声器顺序测量,保证了前后两次测量时声场一致^[1]。俞悟周等进一步提出三点测量方法^[2],其要点是借助第三点所得额外数据提高计算精度,特别当两测量点间距接近半波长整数倍时,效果更明显。由于驻波管管长和管径的限制,测量频率总是有一定范围。另外,阻抗管法只能测量小样品垂直入射吸声系数,无法正确观察和研究吸声系数依赖于吸声结构尺寸及边界条件的影响。

混响室法测量有无样品时房间的混响时间,通过计算吸声量确定样品在扩散声场中的吸声系数。它能测量声波无规入射时的平均吸声系数,可以是大样品和非均匀材料。然而,它需要专门的测量房间。另外,由于混响声场扩散程度以及材料边缘效应的影响,各混响室对同一材料吸声系数的测量结果有时差别很大,而且吸声系数随材料面积及测量位置的变化也很大,在中高频段得到的吸声系数有时会大于 1。Pellam 首次尝试从散射理论出发,推导了有限宽度的无限长条材料的吸声系数^[3]。Daniel 给出了有限大材料与无限大材料吸声系数的关系^[4]。贺加添分析了声场扩散对吸声系数的影响关系,提出了一些解决扩散问题的可能途径^[5]。

显然,阻抗管法和混响室法都属于实验室方法,因为需要为“测量”创造一种特殊的“声环境”,如驻波、扩散声场等,其理论依据是吸声系数定义中的简谐信号和平面波的假设条件。虽然这两种方法已获得广泛的应用,也有相应的测量标准,但是,我们往往更需要对吸声系数进行现场测量,因为现场测量数据更加真实地反映了声学结构使用时的效果。其原因是:(1)实际应用条件通常不满足实验室测量所要求的特殊声环境;(2)在有些应用环境,如有流、加压或高声强等条件下,实验室不能方便准确地测量声学结构的吸声系数;(3)实验室测量通常在低频时误差较大。

因此,发展现场及在线吸声测量技术成为一个非常重要的研究课题。本文将对这方面的研究进展

和发展趋势进行评述。

2 脉冲回波方法

在空间声反射实验中,具有 340m/s 速度的声波在短时间内可以到达包括待测样本和周围环境在内的所有区域并形成多次反射,因此,待测表面的反射信号很容易被其它反射波污染,且往往难于从入射信号中分离出来。所以,现场测量大多选择时间与空间延续短暂、便于信号记录的脉冲信号。而且,短脉冲包含着丰富的频率成份,可以同时获得较宽频带范围的待测物理量。正由于此,近代吸声测量技术主要采用脉冲回波方法(Echo-impulse Method),根据所采用的声脉冲和所采取的信号处理方法不同,形成了以下几种技术方案:

2.1 MLS 序列的波形相减技术(Subtraction technique)

该技术最早可追溯到上世纪三十年代,现代的基于 MLS 序列的测量装置从上世纪九十年代开始出现^[6-9]。其假设条件是平面波法向入射或斜入射,有两个测量步骤:首先在自由场测量入射波(包括可能的环境反射)作为参考信号;其次在反射面附近(愈近愈利于斜入射情况)布放单传声器测量反射前后的声信号。利用“时间窗”并将两次测量信号相减获得反射波时间序列。将入射与反射信号做傅立叶变换,计算复频域的反射系数和吸声系数。从文献[7,8]可以看到:对垂直入射,有效频率范围是 250Hz~8kHz。目前,此方法已成为某些测量标准(如 European Standard Pr ENV 1793-5)的理论基础,同时有商业软件(完成自动“加窗”处理以及反射系数/吸声系数计算等)可以在测量中使用。显然,这种方法需要一个用于 LMS 序列的声源发射与数据采集系统,这在技术实现上并没有很大困难。然而,在数据处理时,必须将反射波与入射波分离,为此,需要进行自由场测量获得参考信号。同时,需要采用“时间窗”去除边缘或环境等附加反射信号。最后,吸声系数的计算在频域完成,涉及时频转换时的信号处理与补偿问题。

2.2 传递函数法(Transfer function method)

在这种测量系统中,使用 MLS 序列作为脉冲声源,通过测量脉冲响应而获得传递函数,再计算吸声系数^[10-12]。其假设条件是球面波掠入射,有两个测量步骤:一是远离反射面测量从扬声器到传声器的脉冲响应,并做加窗处理作为参考信号;二是在反射面

附近布放传声器再次测量脉冲响应, 并做加窗处理。将两次脉冲响应做 FFT 并相除, 获得从扬声器到传声器的传递函数, 利用球面波传播规律, 可以计算反射系数和吸声系数。测量时要注意声源不能靠近反射面。可以看到, 该方法与 2.1 的原理有所不同, 但测量步骤基本一致, 所以存在的问题也是类似的。文献^[13]对以上这两种方法有详细的介绍对比。

2.3 扩展脉冲技术(Stretched pulse technique)

为了改善单一脉冲测量时的信噪比问题, Kimura 等提出利用一种扩展脉冲技术^[14-16]。其测量步骤是: 用扩展波分别入射参考硬壁和待测反射面, 测量反射前后的扩展脉冲信号。该脉冲经过一个逆滤波器压缩后就成为一个短脉冲, 经加窗处理获得反射信号。对硬、软两种表面的反射信号做频谱分析, 利用功率谱之比计算出该入射角时不同频率的吸声系数。该技术除要解决好用于扩展脉冲声源发射和数据采集问题, 以及反射波与入射波的分离问题外, 涉及的主要问题是逆滤波器设计与时频域信号处理。

3 声强测量方法

近十几年来, 在声学测量领域内最引人注目的一个发展就是声强测量技术的出现及实用化。它的应用领域非常广泛, 其中也包括在吸声测量技术方面的应用。其原理是利用声强探头测量得到双传声器的自功率谱和互功率谱, 计算归一化的声阻抗率, 然后计算获得某入射角度下的吸声系数^[17]。已有的研究表明^[18]: 该方法在低频范围较精确, 而声强探头与材料表面的距离对测量结果没有影响。该方法固有的误差来源主要是双传声器的有限间距和两通道的相位失配。要减小双传声器间距对测量结果的影响, 要求间距乘入射角的余弦应远小于入射声波最高频率所对应的波长, 由此决定了测量的频率范围不能太高。作为专用仪器, 声强探头相位失配可以控制在最小的范围内, 而且近年来发展了许多行之有效的误差补偿方法^[19], 所以两通道的相位匹配一般是满足要求的。

此外, 随着计算机与数字信号处理技术的不断发展, 一些新的方法不断被应用于吸声测量技术中。如朱从云等提出了一种基于倒频谱分析的吸声系数测量方法。该方法采用稳态随机声源, 单传声器测量反射前后的声压信号, 通过求采样信号的倒功率谱计算被测材料的吸声系数^[20]。

综上所述, 与阻抗管法和混响法等传统实验室方法相比, 脉冲回波法和声强测量法等不需要特殊的声场环境, 所用入射声波通常是带宽信号, 所以适用于现场测量。但可以看到, 这些方法在计算吸声系数时都需要在频域处理数据, 因此, 不可避免地涉及信号的时-频域变换、加窗等, 由此可能引起信息泄漏等一系列问题。而且, 数据处理时需要将反射波与入射波分离, 这往往也不是一件容易的事情。另外, 如果使用双传声器, 还涉及相位和幅度匹配问题。

4 参数反演方法

显然, 要实现在线测量, 不仅要求数据测量能够在现场进行, 而且数据处理最好直接在时域完成。另外, 对入射声波不要有较多的假设条件, 以避免与实际应用条件相差太远。然而, 在现有条件下, 有许多因素阻碍了该项工作的发展, 主要表现为: 首先, 传统的声阻抗是针对平面简谐波假设、在频域定义的声学量, 能否将传统的声阻抗频域模型转化为适用于宽带的时域阻抗边界条件呢? 其次, 实验中测量的声学量都是时、空分布, 并没有频谱特征, 如果要避开对数据的频域变换而直接处理时域数据, 就需要能够计算任意声波对阻抗表面反射声场的数值解。最后, 需要研制性能良好的脉冲声源以进行反射实验。

近年来, Fung 和 Ju^[21-23]提出了一种满足因果性的时域阻抗边界条件。他们证明, 当声阻抗采用阻尼谐振子模型时, 对应的时域反射系数是稳定的、并满足宽带要求。研究表明: 常用的局部反应材料表面阻抗可由数目不多的几个阻尼谐振子近似表示^[24], 而一般时域反射系数可以由一系列阻尼谐振子的组合表示, 当获得这些谐振子模型参数后, 反射系数就确定了, 相应也可以换算出吸声系数和表面声阻抗。在此基础上, 他们发展了一种用于声学计算的时域有限差分方法, 可以计算任意声波通过阻抗面后的反射声场。随后, Jing 和 Fung^[25]又成功地研制了一种脉冲声源, 它可以产生短脉冲并具有较好的重复性。

如果将反射面作为一个声学系统, 反射前后的声脉冲是系统的输入与输出, 由入射波和反射面阻抗条件计算反射后的声场是一个正向计算问题。那么, 利用输入和输出数据求反射面的声阻抗模型参数就成为一个反问题。阻抗参数反演的原理是: 一个有限长度的脉冲声反射信号包含着反射面的声

阻抗信息,如果使正向计算得到的声压时间序列与相应的测量值接近,或者使其在测量的一段时间达到均方最小,由此确定了一个最优模型参数,它能够正确地描述实际反射面的声阻抗特征。

最近, Hou 和 Fung 等对声阻抗参数反演的技术方案做了初步探索^[26]:他们利用 Levenberg-Marquardt 算法进行参数估计,声场的正向计算采用 Fung 所建立的时域声阻抗模型和时域有限差分方法,对一个微穿孔板结构进行了脉冲声反射的实际测量,经过对样本数据的处理和误差分析,利用实验测量数据估计得到的声阻抗参数与理论设计值是一致的。

与传统实验室方法和已有的现场测量方法相比,参数反演方法直接处理现场测量的声压时间序列,不需做傅立叶变换,所以,它是一种时域方法。而且,这种方法也不需要反射波与入射波进行分离。目前,该方法的研究才刚开始起步,所涉及的技术问题主要有:一般条件下的时域声阻抗模型与声场数值计算方法研究;各种快速稳健的参数估计算法(包括各参数的敏感性、脉冲特性、信号记录长度、声源强度、背景噪声等对参数估计的影响规律)的研究;重复性能好及波形可控的脉冲声源研制等。

5 小 结

驻波管法和混响室法是吸声测量技术中传统并常用的方法,大量的研究工作对这些方法不断进行改进,使得它们已经成为成熟的技术并有了国际和国家标准。但仅属于实验室方法,用于现场测量时存在许多问题,如不满足特殊声场环境假设、样品尺寸、频率限制等,因此现场测量技术是一个长期以来人们感兴趣的研究课题。脉冲回波方法和声强测量法对测量环境没有严格要求,适用于现场测量。根据所采用的脉冲波以及所采取的信号处理方法不同,该方法也有不同的技术方案。这类方法的共同特点是在频域处理数据,可归结为频域方法。而且往往需要将反射波与入射波分离,测量步骤较多。这些都不利于在线测量。参数反演方法直接利用测量的声压时间序列获得声学阻抗或吸声系数,是一种时域测量方法,更适用于在线测量。近年来,吸声测量技术的研究不断发展,在声学理论指导下,借助于计算机与数字信号处理技术的研究成果,一些新的测量方法不断被

提出,但要成为一种成熟的技术,还有大量的研究工作去做。

参 考 文 献

- [1] CHU W T, Transfer function technique for impedance and absorption measurement in an impedance tube using a single microphone[J]. J. Acoust. Soc. Am. 1986, 80(2): 550-560.
- [2] 俞悟周, 王佐民, 采用伪随机信号激励的驻波管三点测量法[J]. 声学学报, 1996, 21(4): 352-361.
YU Wuzhou, WANG Zuomin. Three-point method for measurement in a impedance tube using pseudorandom signal excitation, ACTA ACUSTICA, 1996, 21(4): 352-361.
- [3] Pellam J R, Sound diffraction and absorption by a strip of absorbing material[J]. J. Acoust. Soc. Am. 1940, 12(2): 396-401.
- [4] Daniel E D. Effective absorption coefficient of rectangular areas of absorbent material[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1957, 29(1): 178-183.
- [5] 贺加添, 混响室法测量材料吸声系数的有效性[J]. 烟台大学学报, 1995, 3: 65-72.
HE Jiadian. The validity for measurement of sound absorption in a reverberation room[J]. Journal of Yantai University, 1995, 3: 65-72.
- [6] Garai M. Measurement of the absorption coefficient in situ: the reflection method using periodic pseudorandom sequences of maximum length[J]. Appl. Acoustics, 1993, 39(2): 119-139.
- [7] E Mommertz, S Muller. Measuring impulse responses with digitally pre-emphasized pseudorandom noise derived from maximum-length sequences[J]. Appl. Acoustics 1995, 44(3): 195-214.
- [8] E Mommertz. Angle-dependent in-situ measurements of reflection coefficients using a subtraction technique[J]. Appl. Acoustics, 1995, 46(3): 251-263.
- [9] L De Geetere, G Vermeir, W Lauriks. In situ measurement of the absorption coefficient at normal incidence using MLS-sequences and 1 or 2 microphone techniques[A]. Proceedings of Inter-Noise 2000[C]. Nice, France.
- [10] Nocke C, Mellert V, Waters-Fuller T, Attenborough K, Li K M. Acustica/acta acustica[J]. 1997, 83(6): 1085-1090.
- [11] S Taherzadeh, K Attenborough. Deduction of ground impedance from measurements of excessattenuation spectra[J]. J. Acoust. Soc. Am. 1999, 105(3): 2039-2042.
- [12] Nocke C. In-situ acoustic impedance measurement using a freefield transfer function method[J]. Appl. Acoustics 2000, 59(3): 253-264.
- [13] Volker Mellert¹, Christian Nocke. Applications of in-situ measurement techniques of absorption[J]. Proceedings of ICA2004: 1975-1976.
- [14] Kimura K, Yamamoto K. A method for measuring oblique incidence absorption coefficient of absorptive panels by stretched pulse technique[J]. Appl. Acoustics, 2001, 62(6): 617-632.
- [15] Kimura K, Yamamoto K. The required sample size in measuring oblique incidence absorption coefficient experimental study[J]. Appl. Acoustics, 2002, 63(5): 567-578.
- [16] Kimura K., Yamamoto K. A method for measuring oblique incidence absorption coefficient of absorptive panels by stretched pulse technique[A]. 17th Int. Cong. Acous[C].

- Rome, 2001.
- [17] Champoux Y, Nicolas J, Allard J F. Measurement of acoustic impedance in a free field at low frequencies[J]. *Journal of Sound and Vib*, 1988, 125(2): 313-323.
- [18] 陈克安, 曾向阳. 双传声器法测量斜入射吸声系数研究[J]. *应用声学*, 1999, 18(4): 28-32.
CHEN Kean, ZENG Xiangyang. A study on the measurement of sound absorption coefficient at oblique incidence by the use of two-microphone technique[J]. *APPLIED ACOUSTICS*, 1999, 18(4): 28-32.
- [19] REN M Z, F Jacobsen. A simple technique for improving the performance of intensity probes[J]. *Noise Control Engineering Journal*, 1992, 38: 17-25.
- [20] 朱从云, 黄其柏, 赵明. 基于倒频谱分析的吸声系数测量的一种新方法[J]. *华中科技大学学报*, 2004, 32(4): 19-20.
ZHU Congyun, HUANG Qibai, ZHAO Ming. A measurement of the absorption coefficient based on cepstrum analysis[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2004, 32(4): 19-20.
- [21] Fung K Y, JU Hongbin, Tallapragada B. Impedance and its time-domain extensions[J]. *AIAA J*, 2000, 38(1): 30-38.
- [22] FUNG K Y, JU H B. Broadband time-domain impedance models[J]. *AIAA J*, 2001, 39(8): 1449-1454.
- [23] JU H B, FUNG K Y. Time-domain simulation of acoustic sources over an impedance plane[J]. *J. Comp. Acoust*, 2002, 10(3): 311-329.
- [24] FUNG K Y, JING X. Measurement and characterization of acoustic impedance by the impulse response of harmonic oscillators[A]. 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference[C]. 2004: 2840-2847.
- [25] JING X, FUNG K Y. A digitally-controlled pointsource generator of desired sound impulse[R]. *PolyU Research Report* 2004.
- [26] HOU Hong, FUNG K Y. Direct in-situ time-domain impedance characterization[R]. *PolyU Research Report* 2004.

简 讯

上海戏剧学院实验剧场改建后音质获得好评

由章奎生声学设计研究所承担建声设计的上海戏剧学院实验剧场改扩建工程日前竣工, 室内音质获得好评。

上海戏剧学院实验剧场为 908 座以话剧演出为主的专业剧场。观众厅平面为矩形, 长约 30m, 宽约 24m, 最高处约 10m。观众厅后部设一层楼座, 池座中部为全台阶起坡 18 排坐席, 总高差 1.7m。两侧座席也全台阶起坡, 直至与后部楼座连通。实验剧场是戏剧学院设备最完备的演出实习基地, 也是上海各种大型活动和国际性文艺交流演出的主要演出场所之一, 刚闭幕的第九届中国上海国际艺术节的一些剧目就在该剧场演出。实验剧场始建于上世纪八十年代中期, 经过 20 多年的使用, 业主及听众反映, 观众厅前中区听音效果不佳, 2006 年特委托章奎生声学设计研究所进行建声改造设计。

2007 年 10 月 26 日实验剧场举行了竣工后的首演, 由俄罗斯圣彼得堡年轻人剧团演出契诃夫的传世名剧《姐妹》。演出获得巨大成功, 剧场室内音质也获得了专家及听众的一致好评。

2007 年 11 月 7 日章奎生声学设计研究所对实验剧场进行了厅堂音质现场测量, 测试结果表明改建后剧场音质有显著改善。中频混响时间比改建前缩短 0.19s, 当声源位于台口处, 空场混响为 1.25s, 非常适合以话剧演出为主的剧场; 室内听音清晰度很高, D_{50} 达到 0.60 以上; 同时侧向声反射系数 LF 达到 0.27, 比改建前的 0.14 提高近一倍, 丰富的侧向反射声对于改善前中区音质效果作用也十分明显。

实验剧场改建工程是声学所承接并在 2007 年内竣工的六个建声工程中又一个成功的项目, 进一步增强了声学所在建筑声学领域的影响力。

上海现代建筑设计(集团)有限公司
现代都市院章奎生声学设计研究所
宋拥民、章奎生