

# 吸声系数的先进现场测试技术发展概述

李东旭<sup>1</sup>, 张霞<sup>2</sup>, 聂嘉兴<sup>3</sup>, 黄安畏<sup>3</sup>, 吴永鹏<sup>3</sup>,  
孙彩云<sup>3</sup>, 董玲抒<sup>3</sup>, 郭峰<sup>3</sup>

(1.海装广州局驻重庆地区第三军事代表室, 重庆 400000; 2.山西柴油机工业有限责任公司,  
山西 大同 037000; 3.西南技术工程研究所, 重庆 400039)

**摘要:** 首先介绍了最常用的测试吸声系数的驻波管法与混响室法并阐述了两种方法优缺点。驻波管法测试的是法向吸声系数, 混响室法得到的是各个入射方向的平均吸声系数, 两种方法测试时均与实际安装情况存在一定差异, 难以完成现场复杂环境下吸声系数的准确测试。而很多情况下, 需要测试得到的是实际工作环境中的吸声系数, 于是总结了传递函数法、PU 矢量法、参量阵列扬声器法、脉冲响应法、倒频谱法、最长序列数法以及减法技术等吸声系数的现场测试方法的原理与研究进展, 分析了各测试方法的优缺点。

**关键词:** 吸声系数; 驻波管; 混响室; 现场测试

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.12.007

**中图分类号:** TU112.2+11 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)12-0037-10

## Development of Advanced In-situ Measurement Technology for Sound Absorption Coefficient

LI Dong-xu<sup>1</sup>, ZHANG Xia<sup>2</sup>, NIE Jia-xing<sup>3</sup>, HUANG An-wei<sup>3</sup>, WU Yong-peng<sup>3</sup>,  
SUN Cai-yun<sup>3</sup>, DONG Ling-shu<sup>3</sup>, GUO Feng<sup>3</sup>

(1. The Third Military Representative Office of Navy Equipment Guangzhou Bureau in Chongqing, Chongqing 400000, China;  
2. Shanxi Diesel Engine Industry Co. Ltd., Datong 037000, China;  
3. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** Firstly, the work introduced the most commonly used standing wave tube method and reverberation chamber method for testing sound absorption coefficient and expounded the advantages and disadvantages of the two methods. The standing wave tube method tested the normal sound absorption coefficient, and the reverberation chamber method obtained the average sound absorption coefficient in each incident direction. There were certain differences between the two methods and the actual installation conditions. It was difficult to complete the measurement of sound absorption coefficient accurately in the complex environment. In many cases, sound absorption coefficient in the actual working environment should be tested. Thus the principle and research progress of in-situ measurement methods for sound absorption coefficient include the transfer function method, PU vector method, parametric array speaker method, impulse response method, cepstrum method, longest sequence number method and subtraction technique were summarized. And the advantages and disadvantages of each test method were analyzed.

**KEY WORDS:** sound absorption coefficient; standing wave tube; reverberation chamber; in-situ measurement

收稿日期: 2020-11-07; 修订日期: 2020-11-29

Received: 2020-11-07; Revised: 2020-11-29

作者简介: 李东旭(1979—), 男, 工程师, 主要研究方向为装备监造。

**Biography:** LI Dong-xu (1979—), Male, Engineer, Research focus: equipment manufacturing supervision.

噪声在生活中随处可见,并且强烈的噪声环境会给人带来心烦、易怒等负面情绪,从而可能对人们的身体和心理都产生不良的影响<sup>[1]</sup>。随着科学技术的发展以及人们健康意识的增强,声学材料在汽车、船舶、轨道交通以及建筑等各个领域都受到了广泛应用。吸声系数是评价材料声学性能优劣的重要的参数之一,其表示声波经过声学材料时,被材料所吸收的部分声功率与入射总声功率的比值。声学材料吸声系数的准确测试对于材料声学性能优化、声学仿真计算等有着重要作用,常用的实验室测试吸声系数的方法有驻波管法<sup>[2]</sup>与混响室法<sup>[3]</sup>,如图1和图2所示。



图1 驻波管法测试仪器<sup>[2]</sup>  
Fig.1 Standing wave tube test instrument<sup>[2]</sup>



图2 混响室<sup>[3]</sup>  
Fig.2 Reverberation chamber<sup>[3]</sup>

## 1 测试方法简介

利用驻波管法进行声学材料的吸声系数测试就需要用到驻波管,声源与测试样件材料分别放置在驻波管两端,中间有一只可移动传声器。由于管内是密闭结构,声源发声后,管内将逐渐形成驻波,通过找到声波的极大(小)值,以此来求得相应的吸声系数。另外,该方法存在一些缺陷<sup>[4-5]</sup>:测试样件必须切割为固定的形状,只能测试小件样品,不可以测试沙子等松散材料;测试结果为垂直入射吸声系数;声波的极大(小)值由人为判断,可能导致误差;每次只可以测试单频吸声系数;测试时间较长,每次测试都需

要对应的移动传声器位置。

混响室法得到的吸声系数不同于驻波管法,为无规则入射吸声系数。首先需要准确测试声学材料样件放入混响室前后的混响时间,然后由赛宾公式可计算出吸声系数<sup>[6]</sup>。因此混响室法中混响时间的测试十分重要,一般有脉冲响应积分法与中断声源法两种混响时间测试方法。该方法同样也存在一些不足之处<sup>[7-11]</sup>:测试环境要求高,所需混响室建造成本高昂;不同的混响室测试同一样件的结果差别可能很大;样件材料的大小对测试结果有较大的影响;测试准备过程繁琐,耗时较长;中高频时,测试所得吸声系数可能会大于1。

上述两种吸声系数的传统测试方法,已经有了较为完整的测试体系与相应的标准,也成为了业界公认的吸声系数评定方法。但是其仅仅适用于实验条件下的吸声系数测试,测试条件以及环境要求都相对较高。同时,驻波管法测试的是法向吸声系数,混响室法基于混响场得到的是各个入射方向的平均吸声系数,两种方法均与实际安装情况存在一定的区别,难以完成现场复杂环境下吸声系数的准确测试。很多情况下,需要测试得到的是实际工作环境中的吸声系数,因此迫切需要现场吸声系数测试技术的发展<sup>[12-17]</sup>。

现场试验中对吸声系数进行测试,就需要得到声波的入射声功率与反射声功率。其主要存在两个方面的问题:一是复杂环境中有效信息的获取会受到部分外部噪声的影响;二是声源发出的信号经过周围环境反射,干扰信号获取的准确度。为实现吸声系数有效、准确的现场测试,较多的学者对新测试技术进行不断研究。目前,吸声系数的现场测试方法<sup>[18-20]</sup>主要包括:传递函数法、PU 矢量法、参量阵扬声器法、脉冲响应法、倒频谱法、最长序列数法以及减法技术等。

## 2 现场测试技术

### 2.1 传递函数法

1980年,Chung等<sup>[21]</sup>基于双传声器理论,提出了测试材料吸声系数的传递函数法。此后,Guillaum<sup>[22]</sup>等又对该方法的应用提出了改进方案。同时,在此基础上,较多的学者针对该方法展开了相关的研究。Allard等<sup>[23]</sup>将声强探头用于材料吸声系数的测试,首先通过传声器测试得到材料表面声压,从而计算声强探头处声压之间的互功率谱以及自功率谱,得到声阻抗率,由此求得材料的反射系数与吸声系数。Cops等<sup>[24]</sup>对使用双传声器测试吸声系数的误差原因进行了分析,低频时,主要是传声器间相位可能不匹配而导致误差;高频时,则是因为在获取质点振动速度时未考虑二阶无穷小量。Minten等<sup>[25]</sup>探究了入射角度与频率对测试误差的影响,频率越小,入射角度越大,

则由有限差分导致的误差就会越大。Li 等<sup>[26]</sup>提出了利用传声器间传递函数来避免有限差分所导致的误差。Takahashi 等<sup>[27]</sup>以周围环境随机产生噪声作为声源，进行了办公室、咖啡厅等地方的现场吸声系数测试。王毅刚等<sup>[28]</sup>在双传声器的基础上，提出了可以解决之前半波长整数倍问题的三传声器法。陈克安等<sup>[29]</sup>分析了在测试斜入射吸声系数时，双传声器法受到的

各因素的影响，如材料表面积、传声器间距以及传声器与材料表面距离。

传递函数法的测试设备与驻波管法相同，但有着不同的基本原理。此方法是在频域中进行数据分析，所以需要利用频谱计算技术进行信号处理，分析传声器所测信号之间的传递函数关系，从而计算求得吸声系数，测试系统原理如图 3 所示。

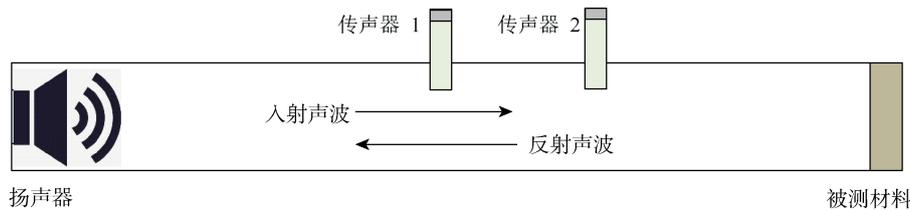


图 3 测试系统原理  
Fig.3 Principle of test system

两个传声器位置处测得的声压可由入射声压  $P_i(x) = P_i \cdot e^{jkx}$  和反射声压  $P_r(x) = P_r \cdot e^{-jkx}$  表示：

$$P(x_1) = P_i \cdot e^{jkx_1} + P_r \cdot e^{-jkx_1} \quad (6)$$

$$P(x_2) = P_i \cdot e^{jkx_2} + P_r \cdot e^{-jkx_2} \quad (7)$$

得到入射波与反射波的传递函数分别为：

$$H_i = \frac{P_i(x_2)}{P_i(x_1)} = e^{-jk(x_1-x_2)} \quad (8)$$

$$H_r = \frac{P_r(x_2)}{P_r(x_1)} = e^{jk(x_1-x_2)} \quad (9)$$

阻抗管内的传递函数为：

$$H_{12} = \frac{P(x_2)}{P(x_1)} = \frac{e^{jkx_2} + r \cdot e^{-jkx_2}}{e^{jkx_1} + r \cdot e^{-jkx_1}} \quad (10)$$

式中： $r$  为正反射系数， $r = P_r/P_i$ ，计算公式为：

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} \cdot e^{2jkx_1} \quad (11)$$

因此，由反射系数与吸声系数之间的关系可得到吸声系数  $\alpha$  为：

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (12)$$

相比于传统驻波管法，用传递函数法进行吸声系数测试，具有速度快、精度高等优点。同时能够一次测试出某频率范围内的吸声系数，通过吸声系数随频率变化曲线，可以较为明显地看出两者之间的关系。该方法也存在局限性，必须要满足声波是以平面波或类似平面波的形式传递，所以吸声系数测试必须在腔体内进行。

## 2.2 PU 矢量探头法

PU 探头最早为荷兰朗德科技在 20 世纪 90 年代开发的一款材料吸声系数测试仪器，此探头可根据两根金属丝间的温差来进行质点声压与振动速度的获取，通过 PU 矢量探头法能够在较短的时间内进行多

个方向的吸声系数测试<sup>[30-31]</sup>。该方法测试的基本原理接近于双传声器理论，但双传声器法中还需要利用测试的信号进行计算才能获得需要的声压与振动速度，而 PU 矢量探头法可以直接获取所需质点声压与振动速度，相当于简化了双传声器法。Torud 等<sup>[32]</sup>结合集合平均技术与 PU 探头提出了随机入射条件下表面法向阻抗和吸声系数的测试方法，并且对该测试方法进行了理论与试验验证，证明了该方法的有效性。

PU 探头测试材料的吸声系数时同样也是先获得反射系数，再计算求出材料的吸声系数。采用该方法测试时，其声路比较简单，只需将 PU 探头接近所测材料表面，并与声源在同一直线上，此时更加容易反应出材料自身吸声特性。PU 矢量探头法的测试原理如图 4 所示。

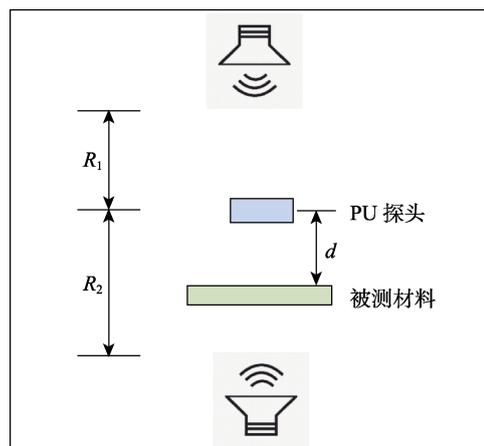


图 4 PU 探头测试原理  
Fig.4 Testing principle of PU probe

如图 4 所示，将 PU 探头放置在扬声器与吸声材料中间并且三者处于同一直线上， $d$  为探头与测试材料表面之间距离， $R_1$  为扬声器与探头之间距离， $R_2$  为镜像虚声源与探头之间距离。PU 矢量探头法测试

吸声系数与双传声器基本原理相似,但减少了一个探头,其测试装置相对简便,但是该方法所需PU探头的造价十分昂贵,并且需要在特定的声学管中校准后才能使用,因此PU矢量探头法在工程中得到普遍应用还需要得到进一步的发展。

### 2.3 参量阵扬声器法

Estervelt等<sup>[33]</sup>在20世纪60年代提出了声参量阵的理论,之后南安普敦大学Humphrey等<sup>[34]</sup>将参量阵扬声器用于材料在水下的吸声系数测试,中科院声学所又在此基础上对该方法进行改进,并应用到空气中吸声系数的测试。参量阵扬声器法最显著的优势在于对吸声系数所需的测试环境要求较低,因为参量阵扬声器可以作为高指向性声源,在测试环境空间不大的情况下,声源发出的声波可以当作平面波进行处理。因此参量阵扬声器法改进的是测试中声源的发射形式,改变了测试时的部分环境限制问题<sup>[35]</sup>。参量阵扬声器声波的发射原理以及参量阵如图5和图6所示。

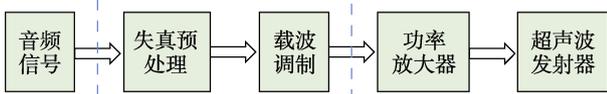


图5 参量阵扬声器原理

Fig.5 Principle of parametric array loudspeaker

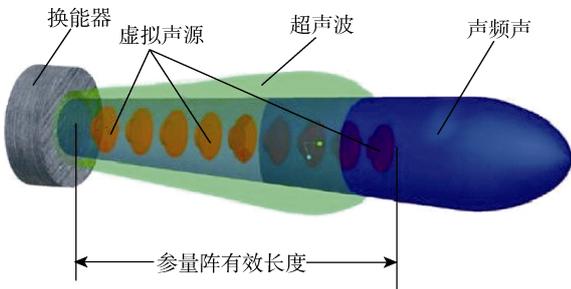


图6 参量阵<sup>[36]</sup>

Fig.6 Parametric array<sup>[36]</sup>

由换能器向周围发射超声波信号,与周围的空气介质相互作用自解调出可听声,从而在传播轴中心处会产生一个端射式虚拟声源阵列,也就是参量声学阵。参量阵扬声器首先对声波信号处理、失真预处理后振幅调制,然后通过功率放大器将信号放大后利用

超声波发射器向外部发射,并且在空气中发射信号重新形成所需的音频信号<sup>[37]</sup>。对于详细的测试原理,该方法可参考传递函数法的基本原理进行吸声系数测试。经过一系列的研究,参量阵扬声器法对测试环境条件的要求相对较低,稳定性好,并且有较强的抗干扰能力,不但可以测试小尺寸样件的吸声系数,而且在小空间复杂声学环境内也可以实现较为准确的测试,同时,不同的测试环境中吸声系数的结果也不会相差很大。该方法也存在一定的缺陷,主要是参量阵扬声器自身的设计还存在部分问题,其测试频率不能够低于500 Hz<sup>[20]</sup>。

### 2.4 脉冲响应法

由于在空气中高速传播的声波可以在发射之后的极短时间内入射到材料表面,并在其周围区域进行若干次反射,所以在声反射实验时,样品材料表面反射信号往往会受到干扰,从而难以获得真实准确的反射信号。因此,通常会选择时间延续较短、且容易进行记录的脉冲信号进行现场声学测试。不仅如此,脉冲信号中可包含较多的频率成分,比较容易得到待测物理量的宽频带结果,所以脉冲响应法在吸声系数测试技术中得到了广泛应用。脉冲响应法基于声波的镜面反射理论,需要入射声波和反射声波关于材料表面的法线完全对称才能够成立。谢荣基等<sup>[18]</sup>与LabView平台合作,共同开发了基于脉冲响应法的现场吸声系数测试系统。之后,蒋伟康等<sup>[38]</sup>又提出采用多传声器脉冲响应法进行材料吸声系数的现场测试。

使用脉冲响应法进行吸声系数测试的优势在于现场测试时产生的声波会被周围环境反射而导致所需信号受到干扰,而如果声源发出信号的时间足够短,以至于声波还未形成反射,则此时测试得到的就是真实有效的信号数据,为单纯的入射声波以及反射声波,因此能够比较容易直接求得材料的吸声系数<sup>[5]</sup>。脉冲响应法的测试吸声系数主要可分为两部分,分别是在未放置样品材料时与放置样品材料后,测试得到反射方向上单个传声器的声强或多个传声器的平均声强,根据此结果便可计算出样品材料在各个频率下的吸声系数。脉冲响应法的测试原理如图7所示。

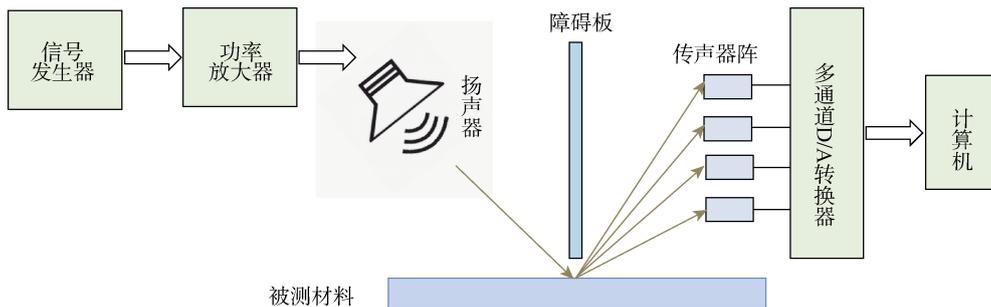


图7 脉冲响应法的测试原理

Fig.7 Test principle of impulse response method

脉冲响应法进行现场吸声系数测试的基本原理相对简单，也易于操作，能够测试非平整材料的吸声系数。该方法也有一些弊端：需要严格保证脉冲声波的发声时间；需要满足脉冲波长远小于传声器、样品材料、声源以及障碍板几者之间的距离，但实际上此条件难以实现；吸声系数低频段精度较差，更加适合中高频段吸声系数测试；实际测试中难以达到声波完全镜面反射的假设。

谢荣基等<sup>[14]</sup>以脉冲响应与反射原理为基础，结合波形消除与时选窗技术，设计了一套吸声系数的测量装置，如图 8 所示。将该装置的吸声系数测试结果与驻波管测试结果对比，验证了该装置测试功能的有效性。该装置的组成部分主要包括功率放大器、计算机、信号采集系统、扬声器以及传声器等。测试时传声器安装在被测样件与声源中间，则由扬声器产生的脉冲声信号首先通过传声器处，再传递至样件表面，被测样件吸收部分声波信号，并反射至传声器，于是传声器对直达声、反射声的脉冲信号都进行了采集。最后利用信号采集处理控制器获取的信号在计算机上进行处理，得到吸声系数。

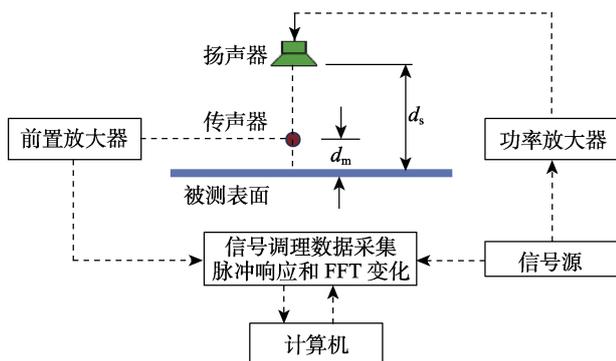


图 8 测试装置<sup>[14]</sup>  
Fig.8 Test setup<sup>[14]</sup>

### 2.5 倒频谱法

华中科技大学的朱从云等<sup>[15]</sup>于 2004 年提出了一种基于倒频谱分析的现场吸声系数测试方法，低频范围内，其吸声系数测试结果与驻波管法基本相同。2012 年，黄帅<sup>[39]</sup>将倒频谱法用于海洋环境模拟水池吸声系数的测试，发现该方法需要较好的信噪比才能保证结果的准确性。倒频谱法其实就是在原有的吸声系数测试方法基础上运用倒频谱分析这个新的计算方法，计算出与反射系数相关的脉冲项，利用材料吸声系数和所求得脉冲项之间的数学关系，从而得到吸声系数。倒频谱分析时会涉及到傅里叶变换的应用，对于声波信号，先计算其自然对数，然后进行相应的转换以及傅立叶变换，通过这样的处理后相关公式中包含与反射系数相关的脉冲项。倒频谱方法的测试系

统如图 9 所示。

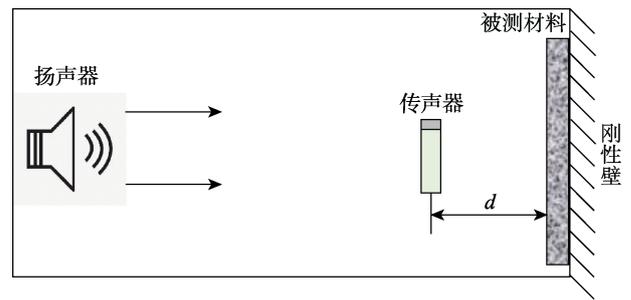


图 9 倒频谱法装备示意  
Fig.9 Equipment diagram of cepstrum method

传声器处接收的声压信号  $P(t)$  为入射声波  $P(i)$  和反射声波  $R \cdot P(t - \tau)$  的叠加，可表示为：

$$P(t) = P(i) + RP(t - \tau) \tag{13}$$

式中： $R$  为反射系数； $\tau = 2d/c$ ， $c$  为声波在空气中传播的速度。

若是在测试时将所测材料移走，则传声器处所测得的声压信号有： $P(i) = P(t)$ 。对式（13）进行倒频谱分析对比就能够得到所测材料的反射系数，从而求得材料的吸声系数。该方法最大的优势就是其测试设备十分简单，仅需要一个可接收外界声波信号的仪器，然后将这接收信号进行倒频谱分析便可求取材料的吸声系数。相对而言，该方法仅通过一个信号接收，获取的信息也会相应地有一定的局限，所以会对最终吸声系数的计算结果精度产生一定的影响。

### 2.6 最长序列数法

经大量实验验证，最长序列数（Maximum Length Sequence, MLS）测试方法能够在具有功率放大器与扬声器的情况下对全频段进行准确测试，同时还有很高的信噪比<sup>[40]</sup>。对于目前的扬声器技术而言，因其在 100 Hz 以下时，发声效率低，且背景噪声较大，难以实现低频段的准确测试<sup>[41]</sup>，而 MLS 测试方法可以较好地解决此问题。MLS 方法为复杂环境下吸声系数的测试提供了更多的可能性：第一，可将宽带白噪声转化为红激发噪声，可以更好地处理低频  $S/N$  比率较大的问题；第二，MLS 方法可被分为多个频率范围进行处理，然后通过 AVR 寄存器求取平均值。通过这种方法可以帮助人们在背景噪声较大条件下进行数据的准确测试<sup>[42]</sup>。

MLS 方法是由脉冲激励激发被测样件，具有时域拖尾现象以及通过重复激励去除背景噪声的影响等特点。因此 MLS 的激励信号不同于一般的激励信号，其包含了多个振幅相同的脉冲信号。MLS 激励信号的频谱特性与白噪声的十分接近，但不符合高斯分布，并且不具备统计特性。同时，激励信号的自相关是零时刻的一个脉冲信号，这与白噪声十分相近。比如进行隔声测试时，脉冲激励会被传送到声源室的

扬声器中,在实际中,往往所在房间对脉冲形状的影响比扬声器更大,故利用扬声器改善激励脉冲性状的效果并不明显。

MLS 对于测试吸声系数与混响时间都有着很大的应用价值,国内对于此方法的应用相对较少。挪威 Norsonic 公司开发的 RTA480 对 MLS 方法进行了一定的推广,但此仪器还未在国内得到广泛应用,故后续对于该方法的研究与应用在国内具有较好的前景。

## 2.7 减法技术

Garai 等<sup>[43]</sup>在 1993 年把最长序列码作为激励,并测试其响应函数,再利用相应的计算公式推导出样件材料的吸声系数。利用此方法进行测试主要可分为三步:样件材料放置前,先测试入射、反射以及干扰声波;样件材料放置后,同样地测试出入射、反射以及干扰声波;在时域内对反射、入射声波进行傅里叶变换,得到其相应的频域数值,即可通过计算公式求出样件材料的吸声系数。此处,可以利用反射声波与干扰声波之间在传声器处接受的时间差,从而过滤掉干扰声波,再将处理后的两次声波相减,便可得到入射声波与反射声波的时域数值。

Kimura 等<sup>[44]</sup>提出利用时延脉冲扩展技术发出激

励信号,改进了单一脉冲的信噪比。Londhe 等<sup>[45]</sup>基于 ISO 13472-1,以 MLS 作为激励源,通过傅里叶变换和哈特莱变换计算出被测材料的吸声系数,同时减少了数据采集系统的测试时间。由于测试时难以保证放置被测材料与未放置被测材料下的激励信号在时间、频率以及功率上能够完全相同,因此可能导致结果发生较大的偏差,故减法技术的实现存在很大的困难。

## 2.8 其他测试技术

林春丹等<sup>[46]</sup>利用计算机软件 Audition 生成噪声源,并采用 Matlab 软件替代声谱仪,自制了一款可测试吸声系数的简易装置,装置设计如图 10 所示。该装置设计的两段传声管道的夹角可在一定范围内调节,管道夹角处为被测样件安装位置。通常,声源由左端进入管道内部,沿管道指向性传播,经过被测样件后则从管道右端传出至录音装置,于是对经过被测样件材料后的噪声进行频谱分析便可得到声谱图。另外,当两段管道为 180°时,还可测试材料的隔声性能。通过该装置还研究了水泥板、金属板、泡沫板等多种常见材料的透射和反射特性,其结果表明,该测试装置可以测量材料的降噪特性,并且具有低成本、高灵活性的特点。

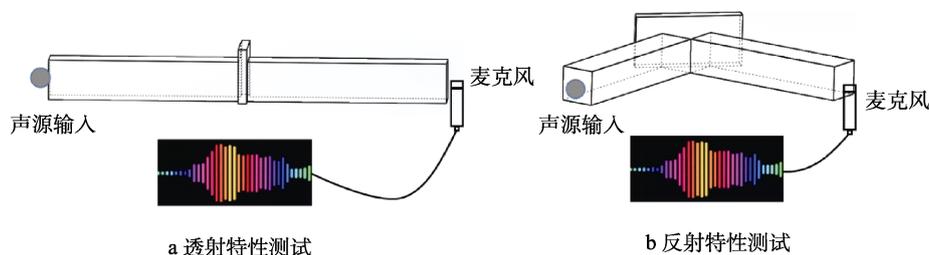


图 10 装置设计

Fig.10 Device design: a) transmission characteristic test; b) reflection characteristic test

易燕等<sup>[47]</sup>提出了一种板件材料在水下任意入射角度测试吸声系数的方法。首先,采用傅立叶变换将材料表面的复声压分解为各个方向的平面波分量。然后基于平面波理论,分离出材料表面的透射分量、入射分量以及反射分量,于是可得出各个方向下的材料声学特性。该方法的测试装置组成与布置如图 11 所示,具有以下几个特点:被测板件竖直吊挂,板件中心与发射换能器处于同一高度,场地为大于 2 kHz 的消声水池;测量水听器间距排列,并形成垂直线阵列,利用定位扫描装置采集板件表面  $z_1$ 、 $z_2$  和  $z_3$  面上的复声压分布;为了采集的同步性,在发射换能器正下方布置一个参考水听器,同时确定出不同时刻下测量水听器阵列的相位。

B&K 公司<sup>[48]</sup>基于驻波管法开发了一款手持式驻波管,该装置可测试装备局部的吸声系数,但其无法

表征整个装备内部的吸声性能。张晋源等<sup>[49]</sup>为测试装备内部平均吸声系数,将车辆内部看作混响场,并布置声源与传声器测试内部混响时间,从而基于赛宾原理得到了平均吸声系数。其中,吸声系数的计算关键在于混响时间的测量。为得到准确的混响时间,采用多组传声器配置(每组配置中传声器相对位置不同)重复测试。配置布局如图 12 所示,车辆内部试验布置如图 13 所示。

首先,对各个配置下多次重复测量的各个传声器信号进行滤波,并得到频域下的平均衰减曲线,据此可计算得到各个频率下的混响时间,如图 14 所示。然后,将所有配置下的混响时间谱进行平均,得平均混响时间谱。最后基于赛宾原理,计算得到各频率下的吸声系数。

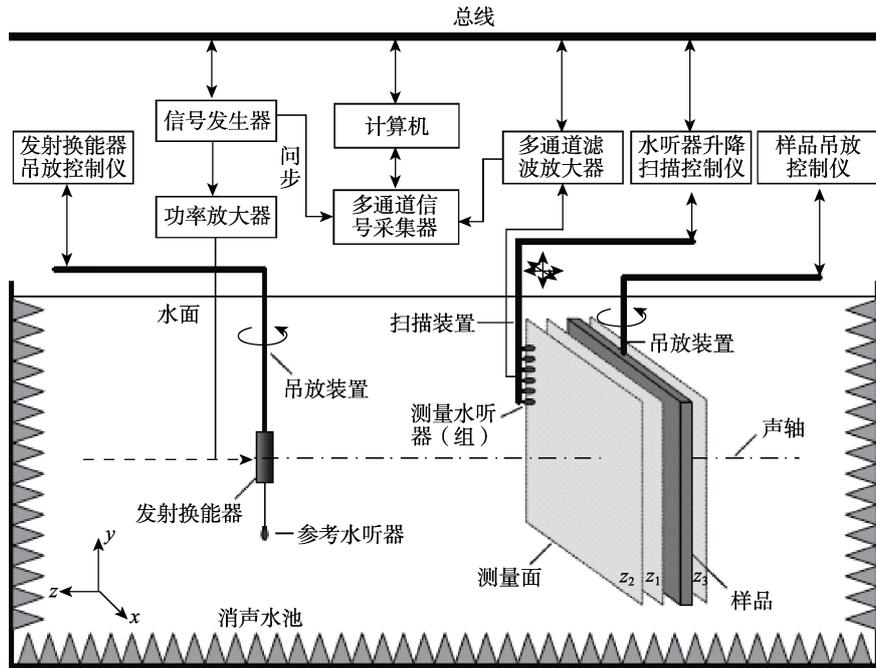


图 11 测试装置组成与布置<sup>[47]</sup>  
Fig.11 Composition and arrangement of test device<sup>[47]</sup>

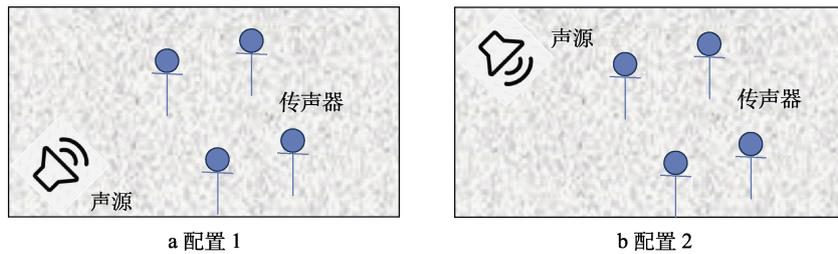


图 12 配置布局  
Fig.12 Configuration layout: a) configuration 1; b) configuration 2

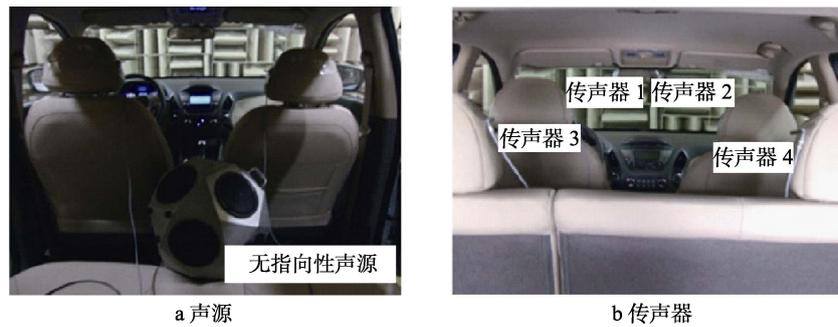


图 13 试验布置  
Fig.13 Test arrangement: a) sound source; b) microphone

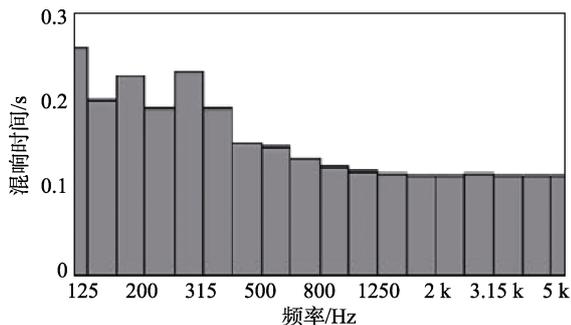


图 14 平均混响时间谱  
Fig.14 Average reverberation time spectrum

### 3 结语

综上所述,学者们对于吸声系数测试技术或方法的研究相对较多。目前,主要的测试技术或方法包括传递函数法、PU 矢量法、参量阵扬声器法、脉冲响应法、倒频谱法、最长序列数法以及减法技术,这些技术在工程应用中也在不断进步、完善。同样,不同的技术或方法也各有优势。

传递函数法具有速度快、精度高的优点,但是该方法必须要满足声波是以平面波或类似平面波的形

式传递。PU 探头法对样件材料要求较低, 测试相对简单, 可以测试各个入射方向的吸声系数, 但受其价格、维护等方面限制, 不具备通用性, 且在复杂环境下的准确测试也存在一定难度。参量阵扬声器属于新一代高科技扬声器, 涉及超声换能、信号处理等多个技术领域, 其对测试环境要求较低, 稳定性好, 但对于低频信号的测试性能还有待提升。脉冲响应法是测试材料斜入射吸声系数的常用方法, 操作简单, 且易于实现。由于其基于声线假设, 更加适用于中高频性能测试。倒频谱分析法对信噪比有较高要求, 噪声过大会影响数据处理的结果, 其测试精度有待提高。最长序列数法具有全频段、高信噪比的特点, 但在国内还未得到广泛应用。减法技术将最长序列码作为激励并测试其响应函数, 通过理论计算得到吸声系数, 但其试验实施难度较大。

随着我国车辆、飞机、船舶等各类装备性能的不断提升, 同时对装备舱内噪声控制也提出了更为严苛的要求, 对于材料吸声系数的测试需要更加高效、准确以适应新的要求。今后, 步骤简单、结果准确的测试技术也必将是研究的重点。文中对吸声系数的现场测试技术的研究进行了总结, 为后续吸声系数现场测试技术在工程中的应用提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 吴铭权. 室内噪声的危害与控制[J]. 环境与健康, 2006, 23(2): 189-192.  
WU Ming-quan. Adverse Effects of Indoor Noise on Human Health and Noise Control. Environment and Health, 2006, 23(2): 189-192.
- [2] ISO 10534-1: Acoustics-Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes (Part 1): Method Using Standing Wave Ratio[S].
- [3] ISO 10534-2: Acoustics-Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes (Part 2): Transfer-Function Method[S].
- [4] 赵启元, 林杰, 闫国军. 边缘效应对混响室法测试吸声系数影响的研究[J]. 建筑科学, 2016(6): 129-132.  
ZHAO Qi-yuan, LIN Jie, YAN Guo-jun. Research on the Influence of Edge Effect on Absorption Coefficient Measurement by Reverberation Chamber Method[J]. Building Science, 2016(6): 129-132.
- [5] 张承斌. 材料吸声系数现场测试方法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.  
ZHANG Cheng-bin. Study on Method of in-Situ Measurement of Sound Absorbing Coefficient of Acoustic Materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.
- [6] 王远. 混响室和阻抗管法测试材料吸声系数关系研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2014.  
WANG Yuan. Study on Relationship of Material's Absorption Coefficient between Reverberation Chamber Method and Impedance Tube Method[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2014.
- [7] 贺加添. 混响室法测试材料吸声系数的有效性[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 1995(3): 65-72.  
HE Jia-tian. The Validity for Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 1995(3): 65-72.
- [8] 程静静. 混响室法吸声系数测试系统改进[D]. 大连: 大连交通大学, 2017.  
CHENG Jing-jing. Improve Sound Absorption Coefficient Test System of Reverberation Chamber Method. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2017.
- [9] 任超. 基于混响法测试水声材料吸声系数[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.  
REN Chao. Measurement of Sound Absorption Coefficient of Underwater Acoustic Materials based on Reverberation Method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [10] MARTELLOTTA F, PON L. On-site Acoustical Characterization of Baroque Tapestries: The Barberini Collection at St. John the Divine Cathedral[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 144(3): 1615-1626.
- [11] LOUENA S, ANDREA P. Towards a Sustainable Approach for Sound Absorption Assessment of Building Materials: Validation of Small-scale Reverberation Room Measurements[J]. Applied Acoustics, 2020, 165: 107-223.
- [12] 王红卫, 高艺帆, 於秀. 基于三维声强法的吸声系数测试研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(7): 134-142.  
WANG Hong-wei, GAO Yi-fan, YU Xiu. Sound Absorption Coefficient Measurement Based on Three-Dimensional Sound Intensity Method[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 48(7): 134-142.
- [13] 朱有剑, 张勇, 熊文波. 基于传递函数法的阻抗管吸声系数测试系统研究[J]. 声学与电子工程, 2012(4): 27-31.  
ZHU You-jian, ZHANG Yong, XIONG Wen-bo. Research on Measurement System of Sound Absorption Coefficient of Impedance Tube Based on Transfer Function Method[J]. Acoustics and Electronic Engineering, 2012(4): 27-31.
- [14] 谢荣基, 万宇鹏, 桂桂. 反射法现场吸声系数测量装置[J]. 中国测试, 2016, 42(3): 77-80.  
XIE Rong-ji, WANG Yu-peng, GUI Gui. On-site Sound Absorption Coefficient Measuring Device by Reflection Method[J]. China Test, 2016, 42(3): 77-80.
- [15] 朱从云, 黄其柏, 赵明. 基于倒频谱分析的吸声系数测试的一种新方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004(4): 19-20.  
ZHU Cong-yun, HUANG Qi-bo, ZHAO Ming. A Measurement of the Absorption Coefficient Based on Cepstrum Analysis[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2004(4):

- 19-20.
- [16] 黄瑞湖. 便携式吸声系数测试仪[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.  
HUANG Rui-hu. A Thesis Submitted in Partial of Fulfillment of the Requirements For the Degree of Master of Engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [17] 陈养建. 材料吸声系数测试系统设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.  
CHEN Yang-jian. Design of a Measurement System for Material Absorption Coefficient[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [18] 谢荣基. 吸声系数现场测试系统研制与开发[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.  
XIE Rong-ji. A Master Thesis Submitted to University of Electronic Science and Technology of China[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2015.
- [19] 欧阳超. 现场吸声系数测试系统[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.  
OU Yang-chao. In Situ Measurement System of the Sound Absorption Coefficient[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [20] 匡正, 杨军. 现场测试吸声系数方法概述[J]. 电声技术, 2011, 35(1): 8-9.  
KUANG Zheng, YANG Jun. Review of the Measurement of Sound Absorption Coefficients in Situ[J]. Electroacoustic Technology, 2011, 35(1): 8-9.
- [21] CHUNG J Y, BLASER D A. Transfer Function Method of Measuring In-Duct Acoustic Properties[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68(3): 907-913.
- [22] GUILLAUME D, TOR E V, ULF R, et al. An In Situ Transfer Function Technique for the Assessment of the Acoustic Absorption of Materials in Buildings[J]. Applied Acoustics, 2001, 62(5): 555-572.
- [23] ALLARD F J. In Situ Two-Microphone Technique for the Measurement of the Acoustic Surface Impedance of Materials[J]. Journal of Sound and Vibration, 1985, 101(1): 130-132.
- [24] COPS A, LAURIKS W. Application of New Two-microphone Techniques to Measure Sound Absorption Characteristics of Acoustic Materials[C]// Proceedings of the 2nd International Congress on Acoustic Intensity. Senlis: [s. n.], 1985: 511-518.
- [25] MINTEN M, COPS A, LAURIKS W. Absorption Characteristics of an Acoustic Material at Oblique Incidence Measured with the Two-Microphone Technique[J]. Journal of Sound and Vibration, 1988, 120(3): 499-510.
- [26] LI Jing-fang, HODQSON M, PASCAL J C. Errors Caused by the Finite-Difference Approximation in the Estimation of the Surface Impedances of Materials[C]// INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. Seattle: Institute of Noise Control Engineering, 1996: 723-728.
- [27] TAKAHASHI T, OTSURU T, TOMIKU R. In Situ Measurements of Absorption Characteristics Using Two Microphones and Environmental Anonymous Noise[J]. Applied Acoustics, 2005, 66(7): 845-865.
- [28] 王毅刚, 俞梧周, 盛胜我. 阻抗管中采用为随机信号的三点测试技术[J]. 声学技术, 1995, 14(4): 158-161.  
WANG Yi-gang, YU Wu-zhou, SHENG Sheng-wo. Three-point Measurement Technique Using Random Signal in Impedance Tube[J]. Acoustic Technology, 1995, 14(4): 158-161.
- [29] 陈克安, 曾向安. 双传声器测试斜入射吸声系数研究[J]. 应用声学, 1998, 18(4): 28-32.  
CHEN Ke-an, ZENG Xiang-an. Study on the Measurement of Oblique Incidence Sound Absorption Coefficient with Two Microphones[J]. Applied Acoustics, 1998, 18(4): 28-32.
- [30] 李凌志, 程攻, 刘英杰, 等. 基于声压-质点速度声强探头的材料吸声系数的测试[J]. 应用声学, 2012, 31(3): 202-208.  
LI Ling-zhi, CHENG Gong, LIU Ying-jie, et al. Measurements of the Absorption Coefficients with A Combined Particle Velocity-Pressure Sound Intensity Probe[J]. Applied Acoustics, 2012, 31(3): 202-208.
- [31] LANOYE R, VERMEIR G, LAURIKS W. Measuring the Free Field Acoustic Impedance and Absorption Coefficient of Sound Absorbing Materials with A Combined Particle Velocity-Pressure Sensor[J]. J Acoust Soc Am, 2006, 119(5): 2826-2831.
- [32] TORU O, REIJI T, SIWAT L, et al. Sound Absorption Measurement Method Using Ensemble Averaging Technique—A Robust Method for Surface Impedance Including In-situ Applications[C]// Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustic. Germany. 2019: 1350-1357.
- [33] ESTERVELT P J. Parametric Acoustic Array[J]. J. Acoust Soc Am, 1963, 35(4): 535-537.
- [34] HUMPHREY V F, ROBINSON S P, SMITH J D, et al. Acoustic Characterization of Panel Materials under Simulated Ocean Conditions Using A Parametric Array Source[J]. J Acoust Soc Am, 2008, 124(2): 803-814.
- [35] GARAI M, GUIDORZI P. Experimental Verification of the European Methodology for Testing Noise Barriers in Situ: Sound Reflection[C]// Proceedings of Inter Noise 2000 (Invited Paper). Nice, 2000.
- [36] 李鑫. 参量阵扬声器信号预失真处理及调制方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.  
LI Xin. Research on Signal Predistortion Processing and Modulation Methods for Parametric Loudspeaker[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2015.
- [37] 周荣冠. 参量阵扬声器的原理及应用[J]. 电声技术, 2008(1): 29-33.  
ZHOU Rong-guan. Principle and Application of Parametric Array Loudspeaker[J]. Electroacoustic Technology,

- 2008(1): 29-33.
- [38] 蒋伟康, 张继萍, 吴宗光, 等. 测试吸声系数的多传声器脉冲响应方法[J]. 声学技术, 2000(4): 208-211.  
JIANG Wei-kang, ZHANG Ji-ping, WU Zong-guang, et al. An Impulse Response Method with Multi-microphones for Investigating the Absorption Coefficient[J]. Acoustic Technology, 2000(4): 208-211.
- [39] 黄帅. 海洋环境模拟水池吸声系数的测试技术研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.  
HUANG Shuai. Research on Measurement Technology of Sound Absorption Coefficient of Marine Environment Simulated Pool[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012.
- [40] MOMMERTZ E, MULLER S. Measuring Impulse Responses with Digitally Pre-Emphasized Pseudorandom Noise Derived From Maximum-Length Sequences[J]. Appl. Acoustics, 1995, 44(3): 195-214.
- [41] NOCKE C. In-Situ Acoustic Impedance Measurement Using A Free-Field Transfer Function Method[J]. Appl Acoustics, 2000, 59(3): 253-264.
- [42] MUEHLEISEN R T, BEAMER C W. Four-Microphone Methods Used in the Measurement "Comparison of Errors in the Three-and of the Acoustic Properties of Porous Materials"[J]. Acoustic Research Letters Online, 2002, 3(4): 112-117.
- [43] GARAI M. Measurement of the Sound-Absorption Coefficient in Situ: The Reaction Method Using Periodic Pseudorandom Sequences of Maximum Length[J]. Applied Acoustics, 1993, 39: 119-139.
- [44] KIMURA K, KOHEI Y. A Method for Measuring Oblique Incidence Absorption Coefficient of Absorptive Panels by Stretched Pulse Technique[J]. Applied Acoustics, 2001, 62(6): 617-632.
- [45] LONDHE N, MOHAN R D, JASON R. Application of the ISO 13472-1 In-Situ Technique for Measuring the Acoustic Absorption Coefficient of Grass and Artificial Turf Surfaces[J]. Applied Acoustics, 2009, 70(1): 129-141.
- [46] 林春丹, 李秋真, 黄欣鹏, 等. 材料降噪特性测试装置的研制与实验[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2020, 33. 139(2): 120-125.  
LIN Chun-dan, LI Qiu-zhen, HUANG Xin-peng, et al. Development and Experiment of Testing Equipment for Noise Reduction Characteristic of Materials[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2020, 33. 139(2): 120-125.
- [47] 易燕, 李水, 肖妍, 等. 水下平板试样的斜入射声参数测试[C]// 2020'中国西部声学学术交流会议论文集. 酒泉, 2020.  
YI Yan, LI Shui, XIAO Yan, et al. Measurement of acoustic properties of panel materials at oblique incidence [C]// Proceedings of the Western China Acoustics Academic Exchange Conference. JIUQUAN, 2020.
- [48] PAUL B, FLEM S. Development of a High SPL State-of-the-art Portable flanged Impedance Tube[C]// Noise and Vibration: Emerging Methods NOVEM 2012. Sorrento, Italia, 2012.
- [49] 张晋源, 袁苗达, 杨洋, 等. 基于赛宾原理的车内平均吸声系数现场测量[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(1): 201-204.  
ZHANG Jin-yuan, YUAN Miao-da, YANG Yang, et al. In-situ Measurement of Average Sound Absorption Coefficients in Cars Based on Sabine Principle[J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(1): 201-204.