

轻结构隔声测量的新方法*

冯瑀正 蔡秀兰 郑大瑞 刘长海

(中国科学院物理研究所)

提 要

本文提出了小试件轻结构隔声测量的一种新方法。这种方法,声源放在一个混响室内,而接收室是一个小的消音箱,详细地描述了测量的装置。测量了几个试件,结果与“质量定律”很好地一致。在需要测量具有高隔声量的小试件时,这个方法更加有用。另外还讨论了装置的限制与精度。

一、引 言

某些轻结构,在实际使用上尺寸较小,具有均匀的隔声性质,并且在实验上组装大的试件比较困难,因此常要求用小的试件。但现在通用的隔声测量方法,要求较大的试件。试件大小与隔声间关系比较复杂,也还存在着边界阻尼的影响^[1],但多采用与实际相近的尺寸进行隔声的实验室测量。

现在采用的隔声测量方法是国际上通用的方法。我国也制定了这种方法的测试规范。规范规定的试件面积为 10 米²。但也见有用小试件的测量结果^[2]。另外还有一种垂直入射的测量隔声方法^[3]还未普遍采用,也未规范化。但对于试件隔声的研究,常需要这两种方法(无规入射声与垂直入射声)的测量结果。

本文所提出的新的隔声测量方法,采用小型隔声、消音箱的方法,并采用 1 × 1 米²的小试件。较现用的方法有许多优点,特别是它可以使小试件隔声测量的高限提高 20 分贝以上,并且将垂直与无规入射声的隔声测量的两个独立装置统一为一个测量系统,在试件不用重新按装的情况下,将这两个参数同时测量出来。便于它们在同样条件下进行比较,并且完满地解决了一般垂直入射系统中的漏声问题,扩大了测量高隔声的范围。

二、测 量 原 理

结构模型见图1。声源室是一间混响室,在一面墙上开有一个一平方米的方孔,在开口上按装试件。试件后面是一个高声吸收的小室。混响室内扬声器发出窄带的白噪声,形成稳态的均匀声场。混响声能密度 D_1 为

$$D_1 = \frac{4W}{cr_1} \quad \text{瓦} \cdot \text{秒/米}^3, \quad (1)$$

* 1978 年 1 月 13 日收到。

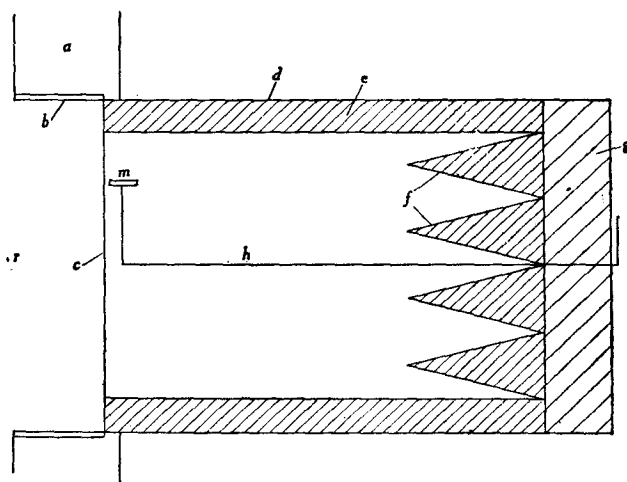


图1 消音箱法测隔声装置简图

a ——墙; b ——木框架; c ——试件; d ——2毫米钢板; e ——10厘米超细玻璃棉;
 f ——吸声尖劈; g ——泡沫塑料; h ——支架; m ——传声器; r ——混响室

式中 W 为声源的声功率(瓦), c 为空气中的声速(米/秒), r_1 为混响室中的房间常数。入射到面积为 S_1 的试件上的声功率为 W_1 , 由计算知

$$W_1 = \frac{1}{4} D_1 c S_1. \quad (2)$$

假设试件的透射系数为 τ , 按照定义得

$$\tau = \frac{\text{透射声能}}{\text{入射声能}},$$

则相应的隔声量 R (或透射损失 T. L.) 值为

$$R = 10 \log_{10} 1/\tau \quad (\text{分贝}). \quad (3)$$

透过试件的声功率 W_2 为

$$W_2 = \tau W_1 = \frac{1}{4} \tau D_1 c S_1, \quad (4)$$

试件后面的吸声小室内的声能密度 D_2 由两部分组成, 即直达声能密度及混响声能密度, 表示为

$$D_2 = \frac{W_2}{c} \left(\frac{1}{S_1} + \frac{4}{r_2} \right), \quad (5)$$

r_2 为接收室内的房间常数, 利用声能密度与声压有效值 p 之间的关系

$$D = \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (\rho \text{ 是空气的密度})$$

代入(3—5)式, 并利用声压级与声压的关系, 化简后得

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4} + \frac{S_1}{r_2} \right) \quad (\text{分贝}), \quad (6)$$

式中 L_1 为混响室内混响区的平均有效声压级(分贝), L_2 为声吸收小室内沿试件表面的平均有效声压级(分贝), S_1 是试件的面积(米²), r_2 是吸收小室内的房间常数,

$$r_2 = \frac{A_2}{1 - \bar{\alpha}_2} = \frac{\bar{\alpha}_2 S}{1 - \bar{\alpha}_2} \quad (\text{米}^2), \quad (7)$$

A_2 为声吸收小室内的总吸声量, $\bar{\alpha}_2$ 为小室的平均吸声系数, S 为小室的内表面积. (6)和(7)式是我们测量装置结构设计的基础.

现在讨论吸声修正项的问题.

由(7)式可以看出,只要测出了 L_1 及 L_2 , 余下的问题是求出 r_2 , 亦即 $\bar{\alpha}_2$ 的数值. 对于试件两边都是混响室的情况, (6)式中的吸声修正项

$$\delta = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4} + \frac{S_1}{r_2} \right) \quad (\text{分贝}) \quad (8)$$

简化为 $10 \log_{10} \frac{S_1}{A_2}$ 的形式, 而 A_2 可以从测量接收室的混响时间计算出来. 对于小的试件, 这一修正项的形式仍不变. 但对于现在的情况, 如果在消音箱设计中使 $\frac{S_1}{r_2} \ll \frac{1}{4}$, (8)式可简化为 $\delta = -6$ 形式, 但一般情况可以考虑用以下几种方法得到这一吸声修正值.

(1) 测量混响时间 T , 计算出 $\bar{\alpha}_2$ 值. 但由于小室的体积很小 (0.65 米^3), 而平均吸声系数又高, T 值约在 0.01 到 0.1 秒之间, 一般用声级记录器的方法是测不出来的. 原则上可以用示波器或其它方法测出 T 值, 然后计算出 $\bar{\alpha}_2$, 代入(8)式求出 δ 值. 在测量 T 时, 需要在试件处加一个高隔声的试件, 防止混响室内声音的反馈.

(2) 参考试件或标准试件方法. 这与测设备噪声的声功率所常用的标准声源相似, 原则上可以用一已知各频率隔声量的单层试件的 R_0 值, 通过实际混响室的精确测量或从经验公式中计算得到, 用来从(7)式中计算出 δ 值或吸声系数. 或直接应用 R_0 值求未知试件的隔声量 R .

(3) 直接测量吸声小室各部分(侧壁吸声层及尖劈)的吸声系数, 计算出 $\bar{\alpha}_2$ 值, 代入(8)式求出修正值. 这种方法比较简单, 引入的误差也较小. 这是现在所采用的方法. 当使吸声室的吸声量尽量增大的情况下, 这一修正值比全吸收负 6 分贝来说在低频约高 3 分贝, 在高频约高 1 分贝. 因此由此引入的误差是不大的.

三、实验装置的设计与性能的测量

主要的装置是在原有的隔声实验室的两混响室间的公共墙上, 开一个 1 米^2 的窗口, 后边按装一个用 2 毫米的钢板制成的消音箱, 详细的结构见图 1. 钢板的外壳长 1.1 米, 间隔墙的厚度为 40 厘米, 总长为 1.5 米, 由上下两半组成, 便于安装与移动. 箱的断面尺寸为 1 米^2 . 侧壁安装厚约 10 厘米的超细玻璃棉及矿渣棉, 外包泡沫塑料的吸声层. 正对试件作有 8 个尖劈, 高 40 厘米, 底面积为 $20 \times 40 \text{ 厘米}^2$, 后面装有 20 厘米的泡沫塑料的吸收层, 尖劈内填超细玻璃棉, 容重约为 30 公斤/米^3 . 希望小室的声吸收尽量作得大些. 由于试件一般多为反射表面, 因此在六个面中总有一个面是反射的(吸声系数很小), 它不可能达到消声室的情况. 并且由于声波主要是沿试件透入的, 因此侧壁不需要加置尖劈. 试件后边的传声器, 固定在一个 U 形的支架上, 正对试件, 由消音箱外边支架的位置来改变传声器在试件后的位置. 在箱与墙洞之间及箱体本身两半个之间, 都经过良好的密封,

保证对外界有很好的隔声。在箱的前边有一个 27 厘米深的木框, 嵌在隔墙的开口周围, 这是用来安装试件的。双层或多层的试件的最大间隙可以测到 25 厘米。箱体由一个支架支起, 有约 5 厘米伸入到墙洞内。所安装的试件一律为 1 米^2 , 但实际的透声面积为 $0.8 \times 0.8 \text{ 米}^2$ 。小室内净空间则为 $0.9 \times 0.8 \times 0.8 \text{ 米}^3$ 。试件后面传声器的位置在一个距中心 25 厘米的圆周上转动。实际测量侧壁及尖劈的吸声系数见表 1。用所测吸声系数计算吸声修正值, 100 到 160 赫为负 3 分贝, 200 赫以上到 4000 赫为负 5 分贝。与全吸收情况比较, 在中、高频只相差 1 分贝。

表 1 结构的吸声系数表(管测法)

吸 声 结 构	频 率 (赫)					
	125	250	500	1000	2000	4000
10厘米厚超细玻璃棉	0.25	0.78	0.84	0.91	0.95	0.95
40 厘米长尖劈后 20 厘米泡沫塑料	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

结构声学性能的测量。所使用的仪器设备, 发声部分为白噪声源经 1/3 倍频程滤波器后, 输入到 20 瓦声频功率放大器, 然后接到扬声器。接收部分, 用电容传声器接收后, 输入到 1/3 倍频程带宽的声频频谱仪及声级记录器。消音箱本身对外界的隔声(减噪量)见表 2。由于两混响室间, 间隔墙已有较好的隔声, 这一附加减噪量, 正好是消音箱方法比原混响室接收法所测量的隔声量高限的提高值。

表 2 消音箱的减噪量(分贝)

频 率 (赫)	125	250	500	1000	2000	4000
减噪量(分贝)	30	32	40	46	53	59

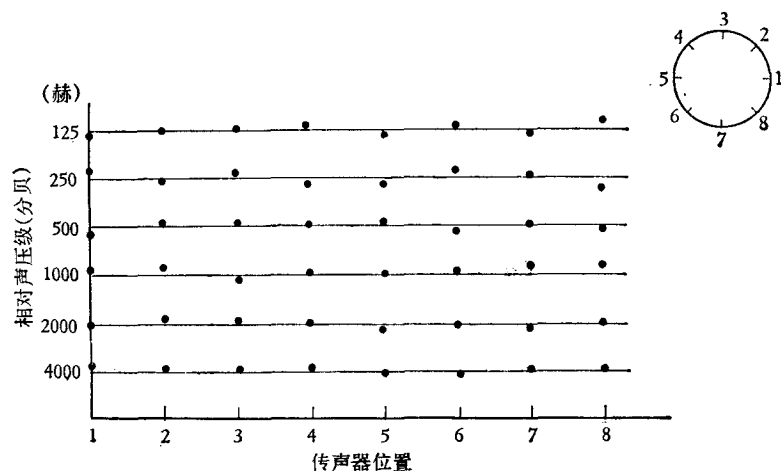


图 2 试件后沿试件表面的声场分布

圆半径 25 厘米; 纵坐标 1 毫米代表 1 分贝; 实线代表零分贝的线

试件后沿试件表面的声场。使传声器在试件后面,沿 25 厘米半径的圆周上转动,每转动 45° 测一个数值。传声器距试件距离约 1 厘米。各频带的起伏见图 2。低频 250 赫以下约为 4 分贝,比混响室的 6 分贝略低。中、高频小于 3 分贝,与混响室是相近的。计算表明,当取 4 个测量位置时,在 125 赫测试误差小于 1 分贝,250 赫及以上频率小于 0.5 分贝。在声场分布上无明显驻波存在,说明了侧壁的吸收已够大。

垂直于试件的声场。在试件后沿垂直于试件移动传声器,每次移动 1 厘米,测试结果见图 3。在 125 赫基本上是均匀的,有约 1 分贝的起伏。在 250 赫以上则随距试件距离的增加而略有衰减。当传声器距试件从 1 厘米改变到 2 厘米时,衰减在 1 分贝以内。由此可估计传声器位置的影响。这种衰减是由于直达声与混响声成分的变化引起的。不出现驻波现象,也说明尖劈的吸声已够大。从以上测试结果可知,消音箱的性能较好,满足测量要求。有关混响室的测量情况,这里不再详述。值得指出的是,低频时显然消音箱的测试误差要小得多。

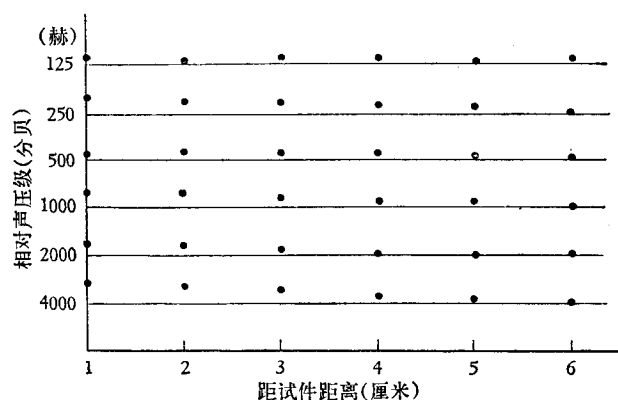


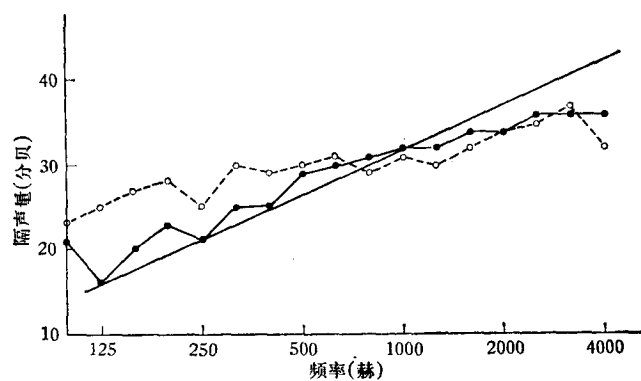
图 3 试件后沿试件垂向距离的声场分布
纵坐标 1 毫米代表 1 分贝;实线代表零分贝的线

四、几个典型试件的测量结果

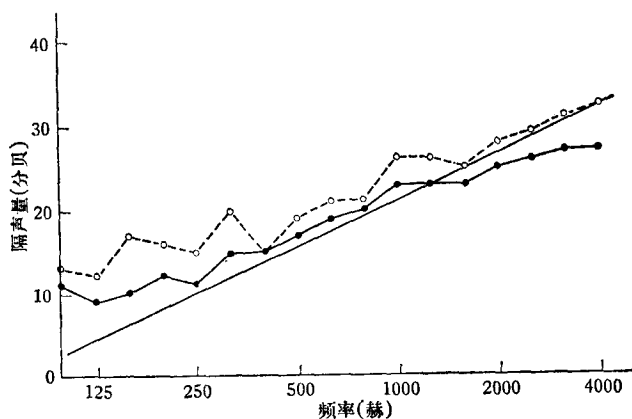
用新的测量方法与装置进行了隔声测量,举三种典型试件为例,一个是 2 毫米钢板,一个是 1.5 毫米铝板,另一个是 1.0 毫米铝板加 50 毫米空腔加 0.5 毫米铝板。代表了单双层及不同轻重情况。这些结果分别见图 4—6。在图上也将混响室方法接收测量的结果,以及对大试件比较接近的常用的“质量定律”的计算值一并列入,以资比较。质量定律的公式为

$$R = 18 \log_{10} m + 18 \log_{10} f - 44 \quad (\text{分贝}),$$

式中 m 为试件的面密度(公斤/米²), f 为频率(赫)。可以看出,对于单层板情况,低、中频时消音箱方法都较混响室接收方法更接近质量定律。而在高频,两种方法相差不多。对于双层铝板情况(见图 6),在双层共振频率(计算为 280 赫),有一个隔声低谷,明显低于同质单层板。在二倍共振频率以上,隔声较同质单层板有明显提高。这与理论上的结果,及

图4 2毫米钢板的隔声量(面密度16公斤/米²)

○—○ 为混响室接收; ●—● 为消声箱接收; — 为质量定律

图5 1.5毫米铝板的隔声量(面密度4公斤/米²)

○—○ 为混响室接收; ●—● 为消声箱接收; — 为质量定律

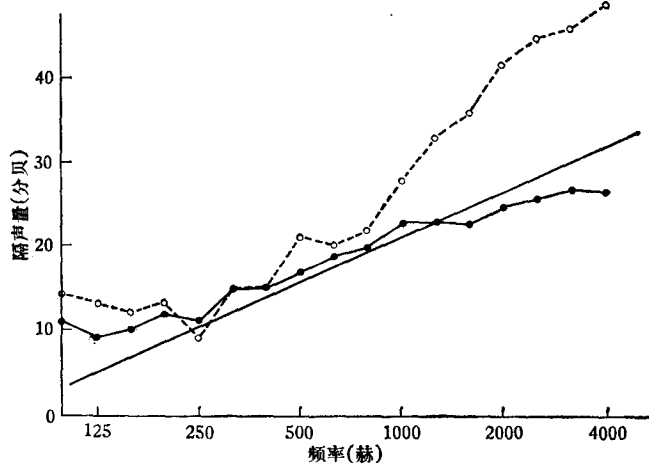


图6 单双层结构隔声的对比(消声箱接收)

○—○ 为1.0毫米铝板加50毫米空腔加0.5毫米铝板; ●—● 为1.5毫米铝板; — 为质量定律

一般的实验结果,很好地符合。

五、新测量方法的讨论

综上所述,新方法与装置的初步测量结果表明,该方法可用于单、双层结构的隔声测量,并且得到了较好的结果。小试件消声箱的测量方法,较原混响室方法有以下优点:

(1) 节省了一间混响室,在一般测量吸声材料用的混响室上,开留一个窗口,外加一个消声箱,就可以进行测量。

(2) 更适用于测量小试件高隔声的情况,较现有测隔声的混响室方法,可提高隔声量测量的高限 20 分贝以上。在一般隔声实验室,采用一双层砖墙,中间空腔 15 厘米,隔声值已不算低。但是在低频 125 赫,最长达 60 分贝,中频 500 赫,达 70 分贝,高频 4000 赫,达 80 分贝,如果用来测一平方米以下的窗或试件,它的最高可测的隔声量,在低、中、高频分别只达到 40, 50 及 60 分贝。对于测某些小窗时,问题更为严重。在高频,多层轻结构的隔声,常比重结构高。实验室间,固体声的传递问题比以上所提的要严重。新方法由于具有二次隔声,因此可大为提高隔声的限度。为测量小试件低频隔声量 60 分贝,及高频 100 分贝,提供了可能性。

(3) 测量低于 15 分贝甚至 10 分贝以下的隔声,多发生在低频,薄膜或板,及单双层共振频率。这样要用实测的全吸收 $H = A_2 + \tau s_1$ 代替 $A_1^{[4]}$ 。这不但要求对每个试件单独进行吸声测量,而且对声源室的混响时间有一定要求,测量比较复杂。在小试件情况,由于两混响室间固有声压级差的存在,使这种测量事实上不易进行。而在消声箱方法中,不存在这类问题,一般可忽略这种吸收。此外,由于低频混响室简正方式少,小试件更不易激发起声场,因此引入较大的误差,而消声箱法,显然误差要小。因此用消声箱法,可望测量低隔声构件及低频隔声。

(4) 在消声箱前加一个扬声器箱,就可以测量垂直入射声的隔声量。因此将无规入射与垂直入射声两套测量装置统一为一套,不仅节省了设备,更有利的是,在不改变试件大小与边界条件下,同时测量了这两个参量,从而更精确地比较这两个参量。由于混响室间固有隔声,扬声器箱可作得很轻薄,并且与试件间不用密封。简化了设备与测量手续,较好地解决了垂直入射装置中经常遇到的漏声问题,提高了测量的高限。初步实验已得到较好的效果。

用新方法所进行的测量与对比还不够多,也还未测高隔声与重构件,边界与面积的影响还有待进一步的研究。这一方法还需要进一步完善。

它不能代替现有的混响室方法测量重结构与大试件,特别是较大幅度的不均匀结构。

消声箱可作得更大一些,如两平方米开口,侧壁吸收可更高一些,可能有更广泛的用途。

对具有高吸收的试件(在接收室一边),应将吸收引起的附加值估计在内,否则会引入

误差。对接收室一侧为强反射的试件,在(8)式中应用 $\frac{2S_1}{r_2}$ 代替 $\frac{S_1}{r_2}$, 以估计壁面反射声能的增压效果。

在研究工作中,得到了马大猷教授的指导与帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 冯珣正、姜在善,声学学报, **3** (1966), 161.
- [2] A. Cops, H. Myncke and G. Vermeir, *Acustica*, **33**(1975), 257.
- [3] E. Brosio, *Acustica*, **10** (1960), 173.
- [4] T. Mariner, *J. Acoust. Soc. Am.*, **33** (1961) 1131.

A NEW METHOD FOR MEASURING SOUND INSULATION OF LIGHT STRUCTURES

FENG YU-ZHENG CAI XIU-LAN ZHENG DA-RUI LIU CHANG-HAI

(Institute of Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

In this paper, a new method is proposed for the measurements of sound insulation of light structures using small samples. The sound source is placed in a reverberation room, and the receiving room is a small anechoic box. The arrangement of the measurement is described in detail. Several samples are measured and the results agree well with the mass law. The method does provide a useful alternative where the measurements for the samples of small dimensions with high transmission loss are required. Limitations of the equipment and evaluation of accuracy are also discussed.