

声学实验室的设计与使用

馬 大 猷

(中国科学院学部委员)

在声学研究工作中,为了获得进行实验所需的扩散声场、自由声场,或其它特殊声学环境,需要专用的声学实验室。本文将描述中国科学院声学研究所声学实验室的构造特点和使用特性,并且对其中混响室、隔声室和消声室的设计中所遇到的科学问题和解决办法作一综述。这个实验室的设计是1956年开始的,设计中间经过不少修改,施工时间也比较长,有些问题在开始设计时还不能

肯定,几年中通过我们自己的研究和国外的工作,现在已比较明确,也有一些问题是通过实验室的修建和完成后的测试而解决的。因此这个实验室的修建过程本身也就是实验研究工作。

一、实验室的布局和构造

图1是实验室的平面图。其中有混响室、隔声室和消声室三部分。三个部分之间

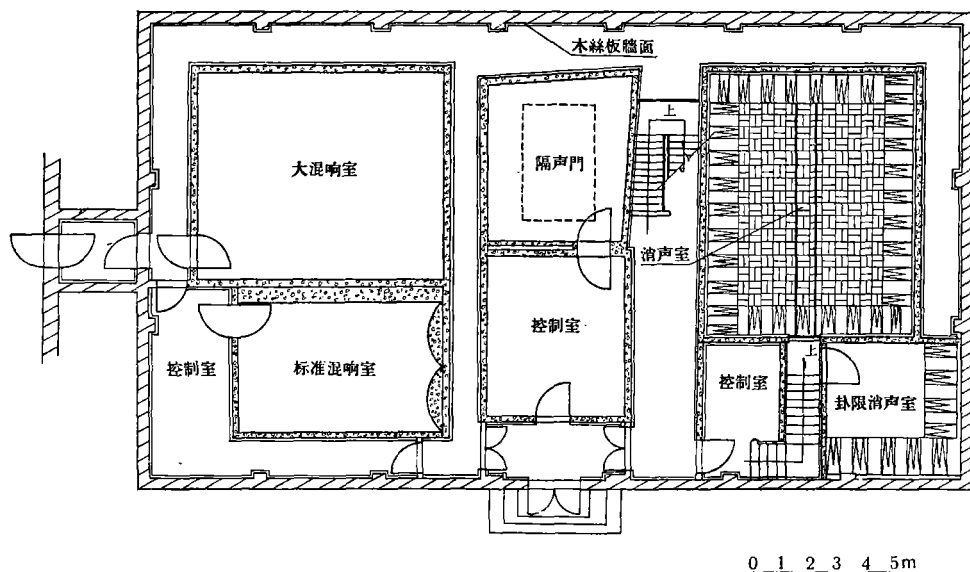


图1 声学实验室平面图

以及它們对周围环境都須要具有良好的隔声和隔振性能，以免实验工作互相干扰或受外面影响。作法是把每个部分做成单独的混凝土盒子(重各約 200 吨)，分別放在弹簧基础上，周围再建起基础和三个盒子的以及研究所大楼的基础都隔离的密闭的围护结构。弹簧基础有很多可能作法(例如用鋼弹簧、空气弹簧、軟木等)，我們用的是直径为 10 微米的玻璃纖維做的垫子。先用弹棉花机把玻璃纖維弹乱，用打包机按規定重量打好包，摆在基础槽內，在玻璃纖維垫子上先放好面积等于混凝土盒子底面积的焊接鋼筋网作为盒子的底，鋪上一层預制混凝土板，再浇混凝土。这样作法，混凝土盒子就不容易傾斜或局部下沉*，也比全部預制容易施工。所用玻璃纖維的重量約等于所載重量的百分之一，这样做成的质量弹簧系統的共振頻率約在 2—3 赫**，在一般測試时(頻率在 60 赫以上)，振动影响要抑制 50 分貝以上；由于玻璃纖維中的阻尼作用，即使遇到共振頻率，传到实验室內振动也不会太大。玻璃纖維周围都做了防潮处理以免水分浸入。实验室建成后，事实証明这种隔振隔声措施是有效的，旁边有普通卡車經過时(实际上这种情况很少，因为实验室不是临街的)，三个部分中的測試都不受影响。混响室和隔声室用双层隔声門，消声室用单层隔声門，門都是用 10 厘米实心企口木板制成，表面用密釘釘上鉄皮(图 2)，可隔声 30—40 分貝以上。外墙是 38 厘米砖墙，外面是水刷石，內面粉刷，以增加隔声本領。

实验室的建筑面积共为 480 平方米，高 10 米。室內采暖用电炉，以避免沿暖气通道传入振动和噪声。三个部分各有一个控制室，放置必需的測試仪器和控制、指示設

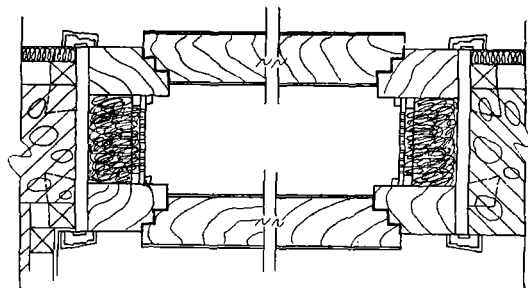


图2 隔声門

备，一切測試都在控制室內操作。設有空气調节設備。

二、混 响 室

混响室測試所根据的是两个公式：

$$T = \frac{0.163V}{A} \quad (1)$$

和

$$D = \frac{4W}{cA} \quad (2)$$

或

$$\bar{p}^2 = \frac{4\rho_0 c W}{A} \quad (2')$$

式中 T = 混响時間(秒)；

V = 房間体积(米³)；

A = 室內总吸收 = $S\bar{\alpha} + mV$ ；

S = 室內总面积(米²)；

$\bar{\alpha}$ = 各表面的平均吸声系数；

m = 空气中声波传播的強度衰減常数(米⁻¹)；

c = 空气中声速(340 米/秒)；

$\rho_0 c$ = 空气中的声阻抗率(420 瑞利)；

W = 声源功率(瓦)；

D = 平均声能密度(焦耳/米³)；

$\bar{p}^2$ = 声压平方的平均值[(牛頓/米²)²]。

* 这个做法是黃旭亞同志建議的。

** 根据曹益民同志的实验結果。

这两个公式虽然很简单，但是用处非常大，利用它们可以在混响室内测定材料的吸声系数^[1]、空气中的声吸收^[2]、声源和机器的声功率和频谱^[3]、做传声器的互易校准^[4]以及测扬声器的效率^[5]等等，还可以对灵敏机件作耐噪声试验（噪声疲劳）^[6]和产生人工混响^[7]等。这些就是修建混响室的目的。

混响室的设计要求是：(1)尽量加长空室的混响时间（减少固有的吸收）；(2)保证室内的声扩散状态，这都是取得扩散声场所必需的。

混响时间的高限，在高频率决定于空气中的分子吸收（水蒸汽分子引起的），在低频率则决定于墙面上的粘滞吸收。根据最近Harris的测量结果^[2]，在相对湿度不太低时（不低于50%），我们可以把空气中声波传播的强度衰减常数近似地写做

$$m = 0.0016f \quad (\text{米}^{-1}) \quad (3)$$

式中 f 为频率（千赫）。把(3)式代入(1)式，略去 $S\alpha$ ，就可以得到高频（大约高于2千赫）混响时间的高限

$$T_g \cong \frac{25}{f} \quad (4)$$

一般可以达到这个值的一半上下。在低频时，空气吸收可以不计，如果室内各表面都是完全刚性的，也没有任何微孔，表面吸收就主要由接近表面的一层空气中的粘滞性和热传导损失决定，根据理论计算^[8]，低频的表面平均吸声系数低限可写做

$$\bar{\alpha}_D \cong \sqrt{f/30000} \quad (5)$$

实际上一般要达到这个值的2—4倍。

在我们的实验室内共有三种混响室。大混响室（I号）体积425立方米，可作专门研究用，标准混响室（II号）体积177立方米，接近国际标准组织的规定，可作经常的吸声

材料测试用，小混响室（III号）共有三间（就是隔声室的三个房间），体积100立方米左右，也可以作一般测试用。所有混响室的四壁、天花板和地板都是用20厘米厚的钢筋混凝土作的，重量和内部阻尼都足够大（声阻抗率在低频60赫，还比空气的声阻抗率大500倍以上）。混响室I的四壁用瓷砖铺面，天花板是在混凝土板上油漆四道，地板是水磨石面打腊，这样作就表面上的微孔减少到最低限度。得到的混响时间是由125赫的29.3秒逐渐光滑地下降到4千赫的4.6秒（图3），低频吸收为(5)式的3.5倍，高频混响时间为(4)式的70%。混响室III的天花板和地板处理和I号同，但四壁也是油漆，混响时间由13.1秒光滑地下降到3.45秒，低频吸收是(5)式的5倍，高频混响为(4)式的55%，都比混响室I差一些，但是也达到优良水平。混响室II的天花板和两面邻墙上做了扩散构造（见下），低频混响时间缩短了。几个混响室的特性和国外重要混响室的比较如表1所示，情况还是令人满意的。西德哥廷根大学的混响室内部表面全用铜箔贴成，所得结果和我们的混响室I相近，其它混响室的混响时间都比我们的短一

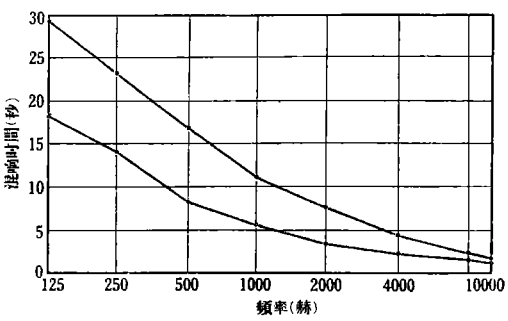


图3 混响室I的混响时间
下曲线——初完工时；
上曲线——干燥、油漆、打腊后

表1 几个重要混响室的特性

名 称	体 积 (米 ³)	总面积 (米 ²)	表 面 处 理	混 响 时 間 (秒)			扩 散 办 法	来 源
				125 赫	500 赫	4000赫		
UCLA (美)	170	186	粉 刷	17	12.5	4.4	12×12 呎 ² 轉扇	Knudsen ^[11]
全国物理研究室 (英)	275	258	硬粉刷	18.8	13.5	3.2	不平行墙	Kaye ^[9]
Riverbank (美)	290	265		6.05	6.75	4.4*	8×10 呎 ² 轉扇 25 个 1 呎直径圆柱	Sabine ^[10]
Torino (意)	307	267		15.5**	9.3†	4.5	不平行墙	Gigli ^[11]
Texas (美)	64	119	磁 漆	10	6.8	3.4	多柱墙面	Botsford 等 ^[12]
全国标准局(美)	405	374	粉 刷	8.9	10.3	4.45	三片轉扇	Waterhouse ^[13]
哥廷根(西德)	342	300	銅 箔	33**	15	3	不平行墙 24 片 2 米 ² 有机玻璃板	Meyer ^[14]
莫斯科大学	217	220	磁 漆	19††	12	3.8	不平行墙	Lebedeva ^[15]
苏联科学院	203	211		8.5	7.1	3.3	不平行墙	Kosten ^[16]
中国科学院 I	425	340	瓷 砖	29.3	18.9	4.6	24 片夹布胶木板	
II	177	192	磁 漆	3.69	5.98	3.49	半柱面	
III	100	130	磁 漆	13.1	7.16	3.45	不平行墙	

* 2048 赫的值; ** 100 赫的值; † 400 赫的值; †† 160 赫的值。

些。因此可見，瓷砖鑲面的办法是成功的，哥廷根用的銅箔也很好，可是比較貴。

扩散問題主要是在室內放置吸声材料进行測試时发生的。只要頻率不是太低，空混响室內的声場在方向上和空間分布上总是扩散的^[17,18,19]。加上吸声材料以后就不同了，由于材料的吸声性質对不同方向入射的声波不同，特别是对掠入射波（入射角接近 90°）的吸收很小，因此声場在衰变过程中，掠入射波的相对强度逐渐增加，有效衰变率也不断改变^[20]。这种改变的情况和混响室的大小、吸声材料的面积和吸声特性都有关系，就是由于这个緣故，同样材料在不同實驗室測試时所得的結果常常出入很大。图 4 是1959年欧洲的三十几个實驗室对同一种材料进行比较測試的結果^[21]。各类實驗室之間測得的結果可以相差 30% 以上，个别實驗室之間相差还要大。这个現象已使声学家煩惱了几十年。表 1 中的各种扩散办法都是針對这个问题提出来的。

在我們的實驗室里首先考虑的是增加稳态声場在低頻的扩散程度，在混响室 II 和 III 中都采取成为調和級数的长寬高比^[18]，II 是 7.00(高)×5.50×4.60 米³；III 是平均 5.35×4.65×4 米³。I 的体积大，在低頻率沒有間

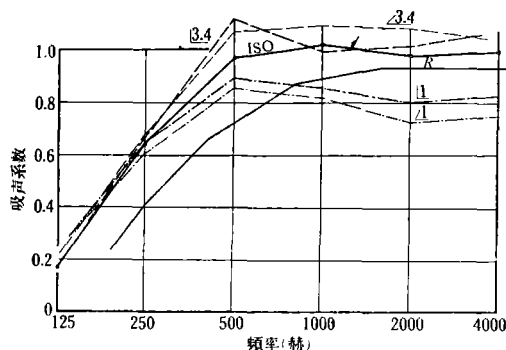


图 4 矿渣棉板在各类混响室的平均測試結果(Kosten)

- R——驻波管測得結果折算的漫入射值；
- 1——矩形室，材料集中在一起；
- 1/1——非矩形室，材料集中在一起；
- 3,4——矩形室，材料分为三、四块，分別裝在不同表面上；
- 3,4/1——非矩形室，材料分为三、四块，分別裝在不同表面上；
- ISO——室內采取扩散措施

題，所以长寬比沒有特別考慮。

为了保持动态扩散（衰变中的扩散），采取了三种措施：第一种是不平行牆（混响室Ⅲ）；第二种是多柱形墙面（混响室Ⅱ）；第三种是掛扩散体（混响室Ⅰ）。不平行牆的办法已有較长的历史（1936年开始出現^[9]），很多人証明它是无效的^[11,12]，但是影响还很大（在苏联甚至盖消声室都用不平行牆）^[37]。因此我們有意識地在Ⅲ的設計中，一間取矩形的，一間牆不平行（图1），一間頂是人字的也与地板不平行（后面图8）。所有測試証明三間没有什么区别，不平行牆作为扩散办法是无效的，只是增加計算和修建工作的困难而已，这也和国际上比較測試的結果^[20]一致。牆上裝半圆柱面（Ⅱ中，弦长2.5米，厚0.5米，在相邻三个表面上互相垂直）对扩散是有效的，在低频率（125赫的波长为2.7米与弦长相差不多）也足够使各方向的簡正振动方式互相耦合，因而維持扩散状态，使測試获得滿意的結果。可惜在施工过程中，对柱面的刚度要求不够（用了抹灰的做法），在250赫发生了共振，使低頻的混响時間下降了，但是作为一般測試还是够的。牆上的柱面扩散体必須注意刚度和尺寸（和波长相比）。矩形室Ⅰ中掛扩散体的办法是最滿意的。扩散体用 1.79×0.97 米²的2毫米夹布胶木絕緣板（吸收很小）弯成90°的弧，在不同方向吊在室內各处。掛扩散体对扩散的影响見图5*，效果很明显，簡單而且有效，可以認为，这是成功的办法。

測試混响室扩散程度有两种方法：一种是比較測得的吸声系数，扩散好时測得的吸声系数大^[21]，但这只能給出定性的概念，不能判断扩散是否足够；另一种方法是用綫列

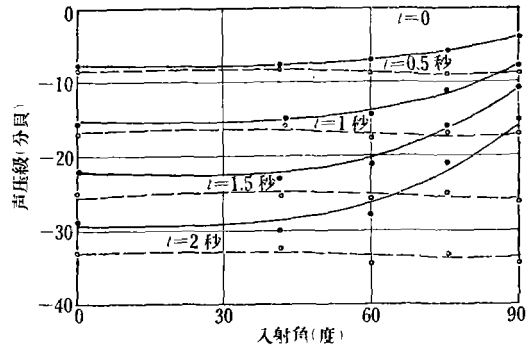


图5 衰变中声場的方向分布

——未加扩散体

.....掛24片扩散体

传声器具体比較声場在衰变过程中方向分布的变化^[22]。图5就是这种測試的結果。我們所用的方法和前人不同之处在于：（1）綫列传声器按切比雪夫陣^[23]安排，使主瓣以外的灵敏度降低20分貝以上，以減少其它方向声波的干扰；（2）綫列沿着混响室的一个棱，由地板直到天花板，长度等于混响室的高度。根据簡正振动方式方向分布的情况^[17]，在接收掠入射波时，这样安排就可以把非掠入射波的影响排除，測試結果对扩散的变化非常灵敏。

混响室測量中的面积效应（在同一混响室中測得的吸声系数和所用材料的面积有关）是一个还未解决的問題，很受到注意。Kosten^[16]提出材料吸收包括一部分边缘吸收的概念：

$$S_0\alpha = S_0\alpha_\infty + \beta E \quad (6)$$

式中 S_0 = 材料面积；

E = 材料边缘长度；

α = 測得的吸声系数；

α_∞, β = 常数。

这个关系大致符合測量結果。图6是根据作

* 測試和图都是呂如榆和张賢齐同志做的。

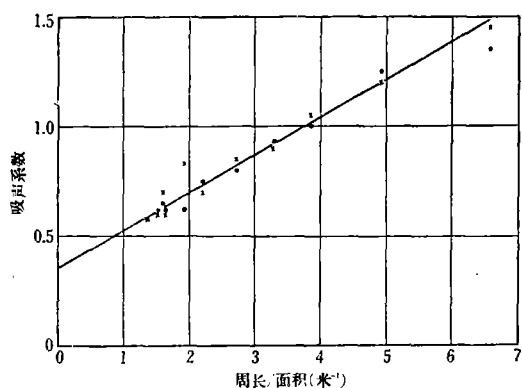


图6 吸声材料的面积效应

× 测得值 (1937 Hunt)

○ 理论值 (1940 作者)

者以前的结果^[24]改画成的，可以看出 α 约与 E/S_0 成直线关系。Daniel^[25] 解释这是由于材料的有效宽度和长度因衍射关系而增加了的缘故。图7是Daniel的测量结果。这个问题还待进一步研究。

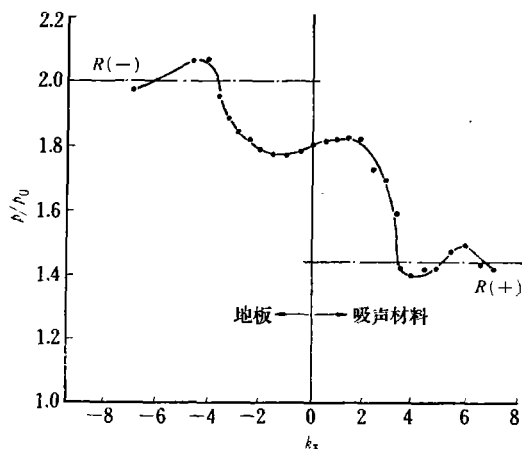


图7 吸声材料边缘附近的声压分布 (Daniel)

三、隔声室

隔声室的用途是测定楼板、墙壁、门、窗等对固体声和空气声的隔声本领，这种测试在现代建筑技术中（大型民用建筑、装配式结构、工业厂房等）是很重要的。隔声室

包括了声源室 I，接收室 II、III 和控制室 IV（图8），体积都接近于 100 立方米。在声源室的地板上和侧墙上各有 2.5×4 米² 的试件孔一个，可以装设待测的构件。墙上的开孔可以用一组隔板关起，做楼板测试时可排除旁边的接收室的影响，隔板都是 10 厘米厚的实心木板，外包铁皮，接缝用企口。隔板关起时，声源室和其旁接收室间的隔声本领是 40 分贝。

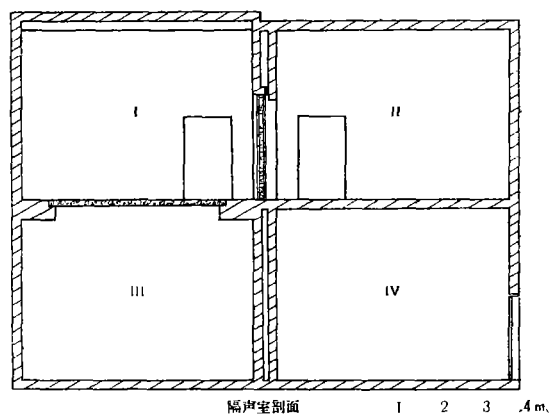


图8 隔声室截面图

我们的隔声室和国外许多设计^[1,9,10,26]不同的地方是楼板开孔上装有固定的 8 厘米厚钢筋混凝土板，在测试时做为结构地板用，在它上面铺设垫层、面地板等，或在它下面做吊顶，以进行测试。在任何情况，结构地板总是有的，而且它的构造出入也不大，用这个固定结构地板的办法不但减少吊装整个地板结构的工作，并且也大大缩短试验的周期。所用的 8 厘米结构地板在结构上是和其它部分不联结的，必要时可以换成其它结构地板。

两个开孔的周围都是 40 厘米厚双层混凝土结构，透射的声音很少，可以忽略不计。

结构地板上用标准撞击器激发时，其下的接收室内测得的平均声压级 L 可折合为标准撞击声压级

$$L_B = L + 10 \log_{10} (A/A_B) \quad (7)$$

式中 A 为接收室内的总吸声量， A_B 为标准吸收量，一般取为 10 赛宾（平方米）。测试在 1/3 倍频程内进行，结果如图 7*。地板处理后的隔声改进值就以 L_B 降低的分贝数（作为频率的函数）表示。

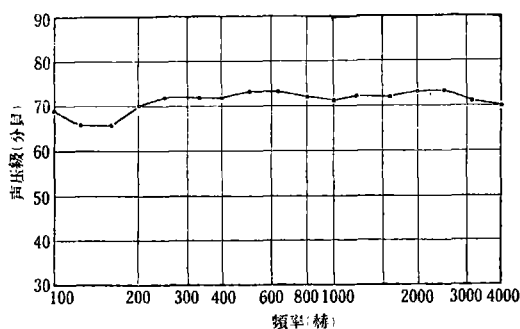


图9 8厘米结构地板的标准撞击声压级

测定空气声隔声本领时，声源室用扬声器供声（白噪声或噪声，经过 1/3 倍频程滤波器），隔声本领为

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} (S_1/A) \quad (8)$$

式中 L_1, L_2 分别为声源室和接收室中测得的平均声压级； S_1 为试件面积（测间壁时就是开口面积，测门、窗将是实际门、窗的面积，单位是米²）； A 为接收室吸声量。

测定总吸声量 A 时可用混响法，但是在测试轻结构时（隔声本领小），声能往返透过试件，这不但影响隔声本领的测试， A 的测试也就有困难了。这时除了对(8)式加以修正^[27]外， A 的测定误差也应加以估计^[28]，误差太大时要在声源室内加必要的吸声材料以减少声能的往返透射。

四、消 声 室

消声室的用途主要是建立可控制的自由声场，以便在里面进行传声器的校准以建立声压测试的标准；电声仪器设备的测试；语言、听觉有关的测试和研究工作^[29]；机器和其它声源的发声特性的测定^[30]；以及其它须避免反射声或外来噪声干扰的工作（例如声波的衍射、干涉等现象的研究）。

为了使室内情况接近自由声场，除了采取必要的隔声措施抑制外来噪声的干扰外，室内六个表面（四壁、地板、天花板）上都要敷以吸声本领特别强的材料。在使用频率范围内，吸声系数应大于 0.99。要达到这个要求，使用整块吸声材料是不行的，因为整块吸声材料的吸声系数只有在厚度大于波长时才有可能这样大^[31]，低频到 100 赫时，这就是三米半！因此从早期起，就有人试用了各种不同的渐变吸收层（吸收本领逐渐加大）而获得成功。表 2 是现有的一些质量好的消声室所用的吸声结构和所得到的结果，也包括我们所用的构造和结果。

从表中可以看出尖劈结构是用得比较普遍的，相对地说来，构造也还比较简单，因此我们也选用了这种结构。但是因为我们的工业条件和国外不同，具体做法是不能照抄的。我们用的尖劈长 1 米，底 20×20 厘米²，每四个做成一个整体，成为双顶尖劈，安装时横直相间（图 1）以避免任何方向性。尖劈底上有 10 厘米高的木框架，上半部用钢筋做成的支架以固定尖劈的形状，底上有三夹板，每一个单元（双尖劈）的底板上等距地钻 36 个直径 1 厘米的孔，底板和后面

* 测试是冯福正同志做的。

表2 几个重要消声室的构造和特性

名 称	未处理前的尺寸(米)	吸 声 结 构	特 性	来 源*
貝尔(美)	6×4.2×2.4	6层法兰綫, 6层棉布, 共占50厘米	250—4000赫士4分貝*	Bedell ^[32]
RCA (美)	14.5×11×11	长2.1米和1.2米的垂直吸声板相間, 板厚2.5厘米, 間隙2.5厘米	40—10000赫士2分貝	Olson ^[33]
哈佛(美)	15×11.5×11.5	1米长玻璃綿砖做的尖劈	70—10000赫士1分貝	Beraneck ^[34]
哥廷根(西德)	14×10×5.5	90厘米长玻璃綿砖尖劈內加石墨粉	70—10000赫士1.5分貝	Meyer ^[35]
波恩(西德)	5×4.4×2.6	60厘米长玻璃綿砖尖劈內加細鋼絲	120—10000赫士2分貝	Eprecht ^[36]
西柏林	16×11×10	三种密度、大小不同的吸声板共厚1米	70—10000赫士2分貝	Rother ^[37]
莫斯科	平均12.65×10.1×6.65	1米长尖劈, 牆壁不平行	70—10000赫士2分貝	Rivin ^[38]
中国科学院 I	9×7.2×7.2	1米长鉄絲网尖劈, 空隙 45 厘米	80—10000赫士2分貝	
II	1/8(8×8×8)	1米长鉄絲网尖劈, 空隙 5 厘米	同 上	

* 用平方反比定律检查时, 在距声源 2 米以内声压出入的分貝数, 下同。

的空腔就形成共振腔, 增加低頻吸收。尖劈的面是在鋼筋框架上蒙以鉄絲窗紗形成的, 可以保持严格的尖劈形状。尖劈內装松乱的玻璃纖維, 密度为每立方米 100 公斤 (每个双尖劈內装 8.8 公斤), 装满后釘上底板, 在窗紗面以噴一薄层清漆以免玻璃纖維飞出劈外。为了安装尖劈, 四壁地板、和天花板上

先按所需空腔厚度装好相距 40 厘米 (等于尖劈底寬) 的木龙骨, 在四壁的龙骨上适当的地方釘上釘子, 天花板上的龙骨上按每个尖劈釘上四块鉄片。装在牆上的尖劈底板上釘上两块带孔的鉄片, 从最低一层起一个一个掛在釘子上, 就装好了。装在天花板上的尖劈底板上釘四块鉄片 (相邻的单元所釘鉄

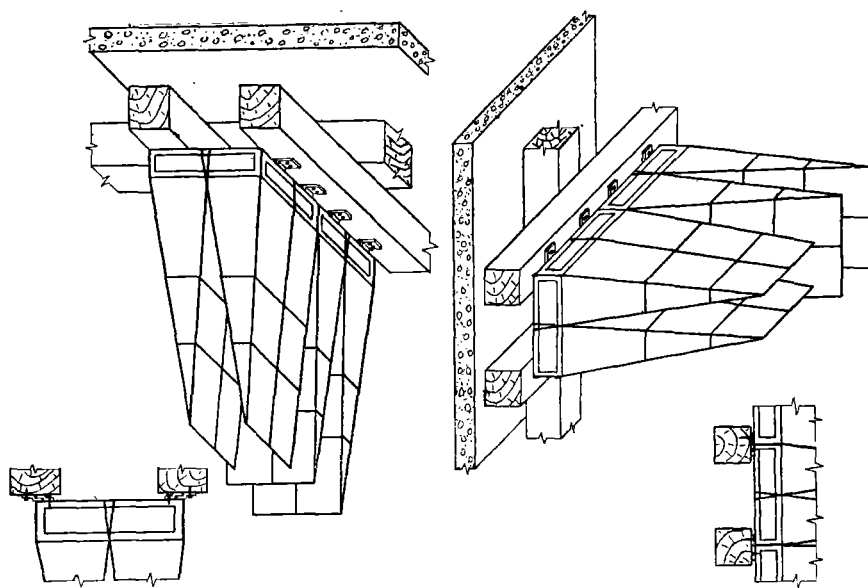


图10 尖 劈 的 安 装 方 法
左: 天花板上 右: 牆壁上

片要錯开以免互相妨碍)，也从一边起一个
一个掛在龙骨的铁片上。尖劈构造和安装方
法如图 10 所示。地板上的尖劈就直接摆到
龙骨上。

尖劈吸收体的使用已有 20 年的历史，
但是还没有严格的设计方法。可以证明^[39]，
任何渐变吸收体内的反射率（声压反射比）
函数 γ 都是下列 Riccati 微分方程式的解：

$$\frac{d\gamma(x)}{dx} = -j \frac{\pi}{2} \{K^*(x)[1 - \gamma(x)]^2 - \rho^*(x)[1 - \gamma(x)]^2\} \quad (9)$$

在边界条件 $x = 0$ 时 $\gamma(x) = 1$ （硬壁）的情
况下， $\gamma(l)$ 就是尖劈的反射率（ l 为尖劈长
度）。上式中 $K^*(x)$ 为吸收体的复数弹性模
量； $\rho^*(x)$ 为复数密度。这个式子还没有一
般解，更不用說給定 $\gamma(l)$ 值（相对于吸收
系数 0.99 为 10%）求 $K^*(x)$ 和 $\rho^*(x)$ 的最
佳分布的问题了。因此尖劈的尺寸、玻璃纖維
的密度等都是用实验方法决定的。测试是在
1 厘米厚大理石板做成的驻波管内进行的，
管的内部截面是 20×20 厘米²，长 2 米，为
了测试尖劈，驻波管头上还加了一个用 3 毫
米钢板做的延长管头，长一米，截面与大理
石管相同，管头有一块侧板可以打开，以便
放入或取出尖劈（测试时用单体，不用四个
一起的双尖劈）。在大量测试中决定了尖劈
的构造如上。图 11 是一个典型的反射率曲
线*，截止频率约在 90 赫（反射率小于 10%
的最低频率）。实际用的尖劈因密度稍大，
吸收性质还更好一些。尖劈底板的穿孔和共
振腔的设计也都经过实验验证，吸收率稍低
于 80 赫，这使整个构造的吸收达到 80 赫以
下。

消声室 I 就是按上面所述方法安装的，
为了便于实验工作，离地面 2 米高处装了锦

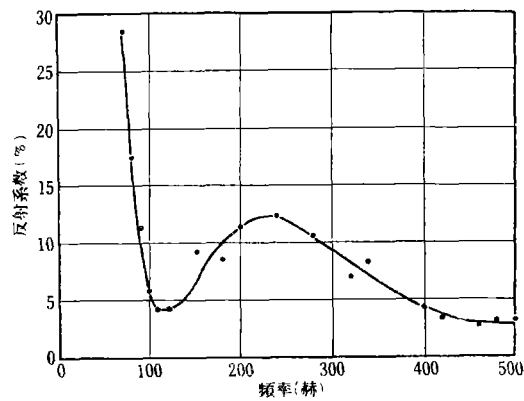


图 11 典型的尖劈反射特性

綸地网，中間沿长度方向設了铁軌，帶吸收
体的門和待測設備都可以在軌道上推动。室
內装吸收体約 500 个，装后室內淨体积为
 $7 \times 4.2 \times 4.2$ 米³，可工作的自由声場空間約
为 $4 \times 2 \times 2$ 米³。

消声室 II 是在一般消声室的基础上，利
用矩形管中用两邻壁做吸声处理使管的有效
尺寸加倍的原理^[40]，提出来的特殊设计。它
的原来尺寸是 $4 \times 4 \times 4$ 米³，只是在三面（天
花板和两邻壁）做尖劈处理，另外两壁和地
板分別用瓷砖和水磨石鋪面，形成三面鏡
子。这个消声室在构造上等于一个 $8 \times 8 \times 8$
米³大消声室的八分之一，因此可以取名为卦
限消声室。如果声源或接收点正在三面鏡子
的交点 O 上，在声源和接收点之間就只有直
达声而没有反射声（或反射声非常弱，决定
于尖劈的吸声本领）和大消声室內完全相
同。卦限消声室的明显优点是构造简单、造
价低廉和使用方便，特別是在测定机器噪声
或电声系统的特性时，把待測設備直接放在
地板上要比放在大消声室的地网或铁軌上方便
得多。它的缺点是测试频率有上限，而一般

* 测试是吕如榆和柯豪同志做的。

六面处理的消声室内在高频方面是沒有多少限制的(消声室 I 內曾用到 100,000 赫)。原因是声源或接收器在实际工作时不能恰好放在 O 点。設实际位置为 (x_0, y_0, z_0) , 另一点 (x, y, z) , 为所产生的声压就是(略去时间因数)

$$p = \sum \frac{Ae^{-jk\sqrt{(x\pm x_0)^2+(y\pm y_0)^2+(z\pm z_0)^2}}}{\sqrt{(x\pm x_0)^2+(y\pm y_0)^2+(z\pm z_0)^2}} \quad (10)$$

式中按加減符号組合共八項, 代表直达声和由三个鏡面反射而形成的七个鏡象所产生的声压。如 x_0, y_0, z_0 都比波长 λ 小得多, 也比距离 $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 小得多, 上式可簡化为

$$|p| \approx \frac{A}{R} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi R}{\lambda} \right)^2 \left[\left(\frac{xx_0}{R^2} \right)^2 + \left(\frac{yy_0}{R^2} \right)^2 + \left(\frac{zz_0}{R^2} \right)^2 \right] \right\} \quad (11)$$

在实际情况中, 声源或传声器是用 1 厘米的管子引入屋角的, 只要距离 R 大于 10 厘米, 在 10,000 赫以內的測試因(11)式右面第二項所引起的誤差就小于 0.01 分貝。把小型传声器直接放到屋角, 誤差也不超过 0.1 分貝。高频限制和屋角所設点的大小有关。

用平方反比定律鉴定卦限消声室内实现自由声场的程度时, 証明在 40 赫以上特性

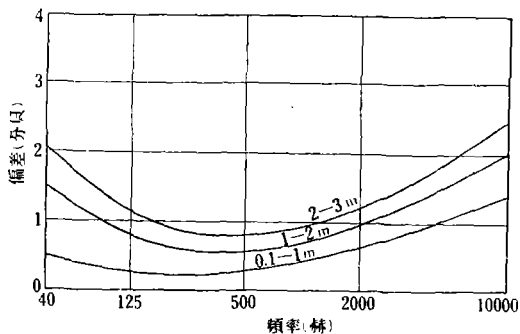


图 12 卦限消声室内对平方反比定律的偏差

是良好的(图 12)*, 这已低于設計的低限频率。在測試中証明保証三个鏡面的平滑是卦限消声室中最重要的条件之一。

五、結 論

在本文中, 叙述了中国科学院声学研究所声学实验室的設计特点和特性以及設計中的考虑。声学实验室的特性是良好的, 滿足現代化实验的要求。在設計和修建过程中, 研究和解决的問題有: (1)混响室的形状和內部裝修問題; (2)混响室內的扩散問題; (3)隔声室中使用固定的結構地板問題; (4)吸声尖劈的設计、制造和安装問題; (5)卦限消声室的原理和設計問題; (6)玻璃纖維垫隔振系統問題。建筑声学、电声学、語音声学、生理声学、噪声控制、超声学(空气中)和物理声学等方面需要特殊环境的实验都可以在这个实验室内进行。

声学中的混响技术、自由場、吸收材料理論等都可以在无綫电技术中利用^[4], 我們在消声室已考虑到对电磁波的吸收問題, 混响室也可加以处理形成对电磁波的混响室, 希望声学实验室以后对电磁波的研究也起一些作用。

志謝: 北京市建筑設計院和第三建筑公司的有关工程师和技术工人在解决声学实验室的設计、施工問題中作了不少貢獻, 謹此致謝。

- [1] Knudsen V. O., Architectural Acoustics, (Wiley, New York, 1932).
- [2] 例如 Knudsen V. O., J. Acoust. Soc. Am., 5, 112—121 (1933); Evens E. J., Bazley E. N., Acustica, 6, 238—245 (1956); Harris C. M., J. Acoust. Soc. Am., 35, 11—17 (1963).
- [3] 例如 Scott H. H., Handbook of Noise Control, Harris C. M. ed., (McGraw-Hill, New York,

* 測試是章汝威同志做的。

- 1957), Chap. 17, 33—36; Wiener F. M., *J. Acoust. Soc. Am.*, **31**, 851(A) (1959).
- [4] Diestel E. G., *J. Acoust. Soc. Am.*, **33**, 514—518 (1961).
- [5] 例如 Hardy H. G., Hall H. H., Ramer L. G., *Proc. Natl. Electronic Conf.*, **8**, 99—107 (1952); Eargle J. M., Larson J. M., *IEEE Trans. on Audio*, AU-11, 34—40 (1963).
- [6] Fiala W. T., Hilliard J. K., *J. Acoust. Soc. Am.*, **31**, 269—272 (1959).
- [7] Gayford M. L., *Acoustical Techniques and Transducers* (MacDonald & Evans, London, 1961). 331.
- [8] Walther K., *J. Acoust. Soc. Am.*, **33**, 127—136 (1961).
- [9] Kaye G. W. C., *J. Acoust. Soc. Am.*, **7**, 167—177 (1936).
- [10] Sabine P. E., *J. Acoust. Soc. Am.*, **10**, 1—5 (1938).
- [11] Gigli A., *J. Acoust. Soc. Am.*, **20**, 839—845 (1948).
- [12] Botsford J. H., Lane R. N., Watson R. B., *J. Acoust. Soc. Am.*, **24**, 742—744 (1952).
- [13] Waterhouse K., *Proc. Third I.C.A.* (Elsevier, Amsterdam, 1961) II, 886—889.
- [14] Meyer E., Kurtze G., Kuttruff H., Tamm K., *Acustica*, **10**, AB 253—264 (1960).
- [15] Lebedeva I. V., *Akust. Zhur.*, **6**, 326—334 (1960).
- [16] Kosten C. W., *Acustica*, **10**, 401 (1960).
- [17] Waterhouse R. V., *J. Acoust. Soc. Am.*, **27**, 247—285 (1955).
- [18] 馬大猷, 科学记录, 新1卷, 367—372 (1957)。
- [19] Venzke G., *Acustica*, **6**, 28 (1956); Doak P. E., *Acustica*, **9**, 1—9 (1959).
- [20] Hunt F. V., Beranek L. L., Maa D. Y., *J. Acoust. Soc. Am.*, **11**, 80—94 (1939).
- [21] Kosten C. W., *Proc. Third I.C.A.* (Elsevier, Amsterdam, 1961) II, 815—836.
- [22] Kuttruff H., Carstensen H. R., *Acustica*, **12**, 302—312 (1962).
- [23] 馬大猷, 中国科学院电子学研究所资料。
- [24] Maa D. Y., *J. Acoust. Soc. Am.*, **12**, 39—52 (1940).
- [25] Daniel E. D., *J. Acoust. Soc. Am.*, **35**, 571—573 (1963).
- [26] Leonard R. W., *Congress Report I, Fourth I.C.A.*, (Copenhagen, 1962), M45.
- [27] 国家科委声学测试基地, 隔声测试规范 (1964)。
- [28] Mariner T., *J. Acoust. Soc. Am.*, **33**, 1131—1139 (1961).
- [29] Beranek L. L., *Acoustical Measurements*, (Wiley, New York, 1949).
- [30] Scott H. H., *Handbook of Noise Control*, Harris C. M. ed. (McGraw-Hill, New York, 1957), Chap. 17, 29—33.
- [31] Richardson E. G. ed., *Technical Aspect of Sound II*, (Elsevier, Amsterdam 1957), 242—243.
- [32] Bedell E. R., *J. Acoust. Soc. Am.*, **8**, 118—125 (1936).
- [33] Olson H. F., *J. Acoust. Soc. Am.*, **15**, 96—102 (1943).
- [34] Beranek L. L., Sleeper Jr. H. P., *J. Acoust. Soc. Am.*, **18**, 140—150 (1946).
- [35] Meyer E., Kurtze G., Severin H., Tamm K., *Acustica*, **3**, AB509 (1953).
- [36] Eprecht G., Kurtze G., Lauber A., *Acustica*, **4**, AB567 (1954).
- [37] Rother P., Nutsch J., *Congress Rep. I, Fourth I.C.A.* (Copenhagen, 1962), M44.
- [38] Rivin A. N., *Akust. Zhur.*, **7**, 324—336 (1961).
- [39] Walther K., *I.R.E. Trans.*, AP-8, 608 (1960).
- [40] Kuhl W., Tamm K., *Acustica*, **3**, 303 (1953).
- [41] Meyer E., *Neuere Analogien Zwischen akustischen und elektromagnetischen Schwingungen und Wellenfeldern*.