第 24 卷 第 4 期 物 理 学 报 Vol. 24, No. 4
1975 年 7 月 ACTA PHYSICA SINICA July, 1975

南京大学消声室*

南京大学物理系声学实验室

提　　要

南京大学物理系声学实验室的空气声学特殊实验室（包括大消声室、小消声室、混响室和隔声室）总面积为 500 平方米，建成于 1964 年．其中大消声室的体积为 13.70×10.10×9.00 立方米，吸声结构总长 1.15 米，截止频率 70 赫．本文只着重总结大消声室在设计、鉴定以及迄今为止使用过程中的经验、缺点和存在问题．

一、引　　言

供空气声学研究与测试使用的实验室，其应用范围遍及于电声学、建筑声学、噪声控制、生理声学、语言声学，以及声波在空气（包括含水雾或空气污染）中各种传播现象等一些基本规律的研究．国内声学机构已先后建立了一些这类实验室[1]．

南京大学空气声学特殊实验室，在大跃进的年代开始设计和建造，1960 年提出设计方案[2]，1964 年基本建成，1965 年进行了初步鉴定．本实验室包括大消声室、混响室、小消声室各一间，隔声室三间，套建在一个面积约 500 平方米的大房子内，平面图见图 1．

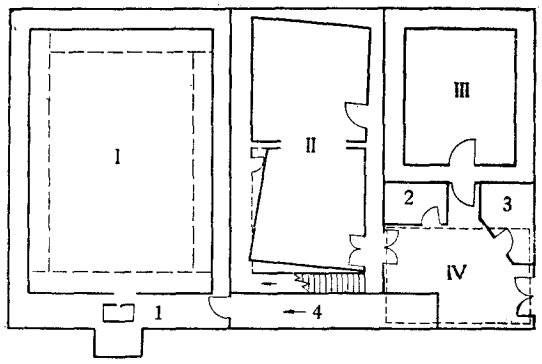

图 1　实验室平面略图

I——大消声室；　1——大消声室控制室；
II——隔声室；　2——隔声室控制室；
III——混响室；　3——混响室控制室；
IV——小消声室（楼上）；　4——进大消声室的斜坡

实验室的设计，特别是消声室的设计，发挥了群众的智慧．除了吸取国内外的有益经验外，特别注意结合本地的实际情况，和工厂协作，试制成吸声性能较好的酚醛胶合玻璃纤维板，完成了质量较高的吸声尖劈的设计．还必须提出的是，吸声尖劈的制作和安装，物理系先后有二百多位师生员工参加劳动，大家发扬自力更生，艰苦奋斗的精神，不怕苦，不怕累，不怕玻璃纤维刺手，从气焊铁丝架，切玻璃纤维，直到制成三千多只大吸声尖劈和一千多只小吸声尖劈，最后安装在大小消声室内．在施工过程中，又随时采纳合理化建议，修改设计，从而节省材料，降低造价，使结构更合理．

随着我国社会主义建设事业的蓬勃发展，需要兴建消声室的单位日益增多．消声室的结构比较特殊，我们通过若干年来的实践初步明确了一些问题．本文着重对大消声室

* 1974 年 6 月 24 日收到．

进行了总结.

二、大消声室的构造

大消声室内壁尺寸为 13.70 × 10.10 × 9.00 立方米，按装吸声尖劈后的净空间为 11.40 × 7.80 × 6.70 立方米. 在离地面 3 米高处张以 6 毫米粗的钢筋网，网孔约 20 × 22 平方厘米. 为行走方便，另外有活动的小孔铅丝网板，可铺在钢筋网上任何地方.

大消声室在一壁面中间有上下两堂门. 上面的门高 2.7 米、宽 1.2米，是主要出入口；下面的门高 1.8 米、宽 0.8 米，供维修钢筋网下的吸声尖劈时用. 门的里面装有与壁面相同的吸声尖劈. 门采用多层隔声结构，门的边框上嵌有两道自行车内胎，必要时可以充气密封，以改善隔声性能. 图 2 是门的照片. 门在轨道上向外滑行. 大消声室的纵剖面见图 3.

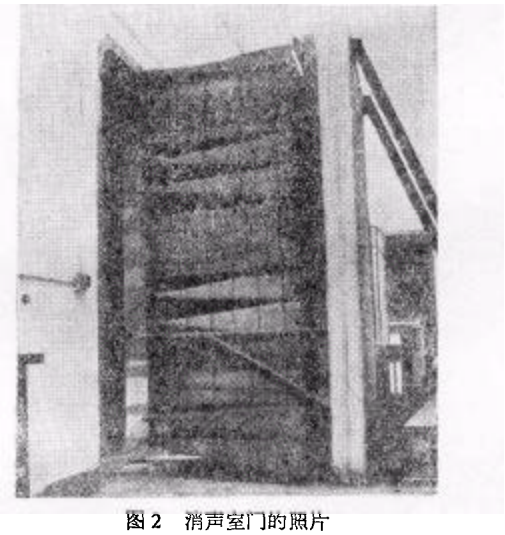

图 2　消声室门的照片

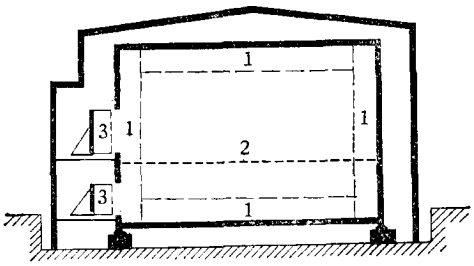

图 3　大消声室纵剖面图

1——吸声尖劈；　　2——行走钢筋网；
3——门

三、吸 声 尖 劈

消声室的吸声结构，发展至今，尽管形状有所差异，但均基于“逐渐过渡”的原理[3].

1940 年开始，有人用多孔性材料做成锥体作为墙面吸声体，建造了一个大型消声室[4]. 1946 年用玻璃纤维做成尖劈形状的吸声结构，建造大型消声室[5]. 1952 年，有人在尖劈后加一穿缝板，使狭缝和尖劈后留出的空腔形成共振，以改善低频段的吸收[6]. 近年来有采用两种密度的材料拼成的尖劈的报道[7]. 如果在尖劈材料中掺入吸收电磁波的材料[8,9]，使房间既是声波又是某一频段电磁波的自由空间. 有人为了安装方便、结构简单，采用阶梯形吸声结构[10,11]；或用毛毯折皱成空心尖劈状结构[12]；也可用多层布幕挂在离壁面一定距离处，我们过去的临时消声室即采用这种方式[13]. 此外，除用玻璃纤维作吸声材料外，也有用泡沫塑料[14,15]、人造树脂和矿棉[16]等多孔性吸声材料，也有用麻丝的，但不利于防火、防霉，一般不采用.

吸声尖劈的性能对于消声室的质量是具有决定性意义的. 因此在 1955 年,声学实验室就试制过酚醛胶合玻璃纤维,并对国内生产的这类吸声材料,用管测法测量其吸声系数[17]及其它声学参量. 以后又建立了低频驻波管,对国产各种吸声材料及尖劈结构进行了数千次的测试. 曾有一种多共振结构吸声尖劈,在总长 110 厘米时,在 60 赫以上垂直吸声系数达 99% 以上[18]. 当时因考虑到在大量施工时,板共振频率难于控制,共振峰不易调整,便放弃了这种设计. 但这种设计思想还值得进一步研究.

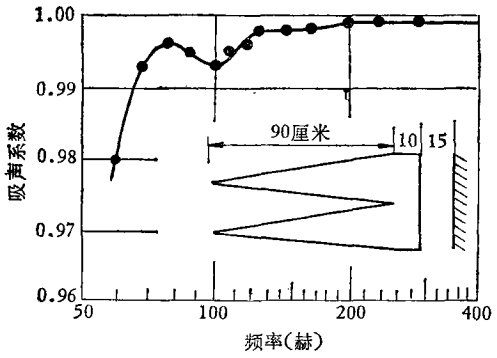

图 4 尖劈的吸声系数

1964 年,我们得到南京新华玻璃纤维厂的协作,试制符合制吸声尖劈要求的酚醛胶合玻璃纤维板. 系统地改变材料密度、尖劈总长度、劈部和基部的比以及尖劈与壁面间空腔等参量,以进行测试[19]. 最后定型,如图 4 所示. 在总长为 1.15 米时,在 70 赫以上,垂直吸声系数高于 99%. 在大量施工中进行了抽测,性能是稳定的[1]. 大消声室内六面共安装三千多只这样的尖劈,安装完成后消声室内的照片见图 5.

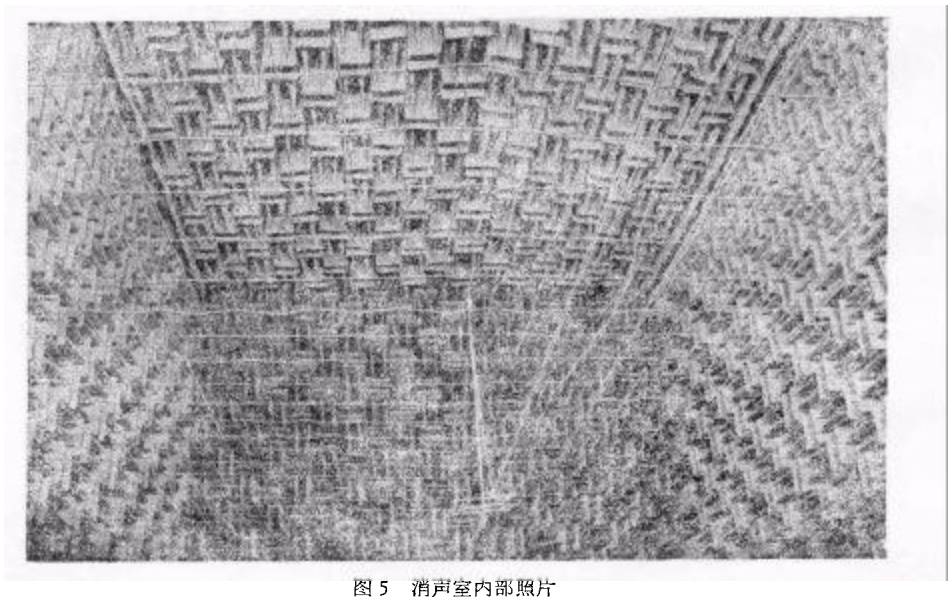
图 5 消声室内部照片
(从钢筋网下向上向前看)

对其它多孔性材料,如玻璃纤维长丝、泡沫塑料、矿渣棉等作成的尖劈,从我们的初步实验结果看,效果都不如胶合玻璃纤维板好. 玻璃纤维长丝只有在切成 3—5 厘米长的短纤维,均匀无规地填到一定密度时,才能达到较好的吸声效果. 用沥青代替酚醛做胶合剂,

1) 1974 年 1 月份,上海工业建筑设计院用这类酚醛胶合玻璃板进行尖劈测试,在总长为 110 厘米时,得到在 60 赫以上垂直吸声系数高于 99% 的更好结果[20].

则成本可大大降低．用胶合玻璃纤维板，不仅有较好的吸声效果，而且在加工时便于控制密度，也便于切割成型安装．施工时纤维在空气中飞扬的程度比不胶合的要轻得多．若用不胶合的超细玻璃棉，则除有不刺手的优点外，却有单价高，易吸潮，使吸声效果大为降低的缺点；如在生产时喷硅油作防潮处理，则材料成本大为提高．

四、尖劈的施工和安装

从工厂生产出来的大小为 110 × 50 × 10 立方厘米、密度为 90 公斤/立方米的玻璃纤维板，用手压机一次切成如图 6 的形状．其中块 1 和 2 直接成尖劈形状，每四块相迭组成一只尖劈；块 3 和 4 相合拼成半个尖劈，可夹在块 1 和 2 之间拼装，这样可使材料毫不浪费．

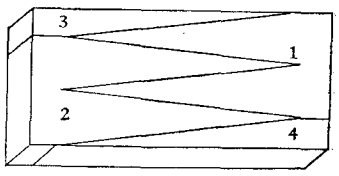

图 6　玻璃纤维板的切割线

玻璃纤维板尖劈外面套以塑料窗纱做的套子，再套上直径为 4 毫米的铁丝做的架子．铁丝架放在窗纱套的外面，原因是避免在制作、搬运、安装过程中把窗纱磨坏．

铁丝架根据安装的具体位置而做成不同的形式．图 7 (a) 是挂在天花板上的，(b) 是放在地上的，(c) 和 (d) 是挂在壁面上的．

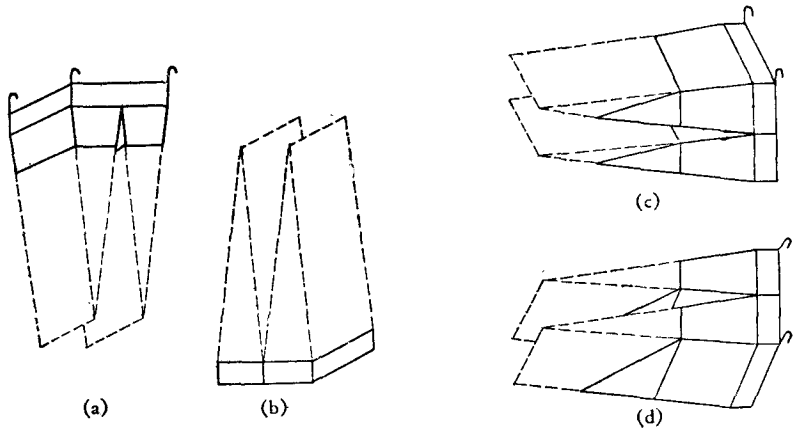

图 7　铁 丝 架 形 状

实线——铁丝架；　　虚线——尖劈

消声室在土建施工时，内壁及天花板上预装好角钢构件，并留出 15 厘米空气层．安装尖劈时，先挂天花板上的尖劈，再装钢筋网以上壁面的尖劈，然后装网以下壁面的尖劈，最后装地面的尖劈．地面上每间隔 40 厘米放三块半块的砖头，即形成 15 厘米厚空气层，然后依次把尖劈摆上即可．

五、隔声和隔振问题

消声室内墙是在混凝土框架结构内填砖，相当于砖墙，天花板和地面都是混凝土结

构,外墙就是砖墙,与相邻实验室间另砌砖墙隔离,使每个实验室都形成双层墙结构. 施工时在砖缝内必须灌满灰浆.

各实验室墙的基础都有各自独立的软木隔振结构. 原来按软木受压后的"静态下沉度"设计的共振频率为 2 赫,但在鉴定时发现有两方面的问题. (1)在消声室竣工后,发现在放软木的水泥槽中滴满了灰浆和混凝土,已难于清理. 在用激震器进行现场隔振测试时,软木基础上下的振动几乎相同,这是施工中没有注意所致. (2)在以后的软木隔振试验中[21]发现: 1)在一定载荷下,直接由动态试验测出的共振频率比由静态压缩量计算出的共振频率为高;2)软木隔振结构的最低共振频率有一极限值,约为 7—10 赫;3) 软木在长时间载荷下,共振频率会有很大提高. 根据试验结果认为,若用软木作为隔振材料,不能简单地从静态压缩量来计算共振频率. 在考虑长时期受压的情况下,对于共振频率要设计在 30—40 赫以下的隔振结构,不宜采用软木作为隔振材料[1].

尽管隔振措施未达到预期效果,但由于周围环境比较安静——没有很大的噪声源或震源; 距离最近的马路约 40 米,很少有汽车经过,因此大消声室内的本底噪声<30 分贝(线性).

六、自由声场的鉴定方法

我们在鉴定时,把准球面声源挂在消声室的中心,传声器沿轴线以匀速离开声源,在记录仪上记下声级衰减曲线,与 $p\propto(1/r)$ 的理论值进行比较. 这里, 声源近似地作为点声源.

1. *声源* 我们对多种声源(各种口径的纸盆扬声器装在小箱内或两只扬声器对合辐射,高音扬声器去掉号筒或加上共振管,球壳形陶瓷钛酸钡换能器等) 进行频响和指向性测试,尽量选用指向性接近球形(与球形偏离小于 ±2.5 分贝)且频响较为平直的部分,而避免用在频响的峰谷处.

2. *传声器* 用丹麦 B&K4131 型电容传声器加 UA0055 型无规入射校正器. 频率在 10 千赫以上,即使加了校正器指向性也较强,这时可把传声器指向朝上,使直达声和主要壁面反射声对传声器而言均呈 90° 入射.

3. *声中心校正* 根据传声器移动速度和记录纸速度作出相应的理论曲线,与记录曲线相比较. 理论曲线上下平移是相对声级的调整,左右平移就是声中心校正. 认为近声源处(但已是远场区)是符合声压与距离成反比的关系. 将曲线开始一段对准(只能平移,不能转动),就可看出随距离增大,与自由声场偏离的大小.

4. *高频空气吸收的校正* 测试时记下温度和相对湿度 (7.8℃, 73%), 按 F. J. Evans 和 E. N. Bazler[23] 的空气吸收值,对频率在 4 千赫以上作了校正.

5. *误差分析* 传声器移动速度为 6.1 厘米/秒,是稳定的,移动时的幌动对测试影响很小. 记录仪用 25 分贝电位计,分辨率为 0.25 分贝,我们用 10 分贝电位计也记录了一段,曲线起伏与 25 分贝电位计所得结果一致,说明精度高于 0.25 分贝. 画理论曲线时可

1) 国内外消声室的隔振材料有的用打包玻璃丝[1], 有的用钢弹簧 (如上海市电器科学研究所和北京乐器研究所等),有的用空气弹簧或橡皮垫的[14,22].

能有 0.1 分贝的误差.

低频、中频、高频的典型曲线见图 8.

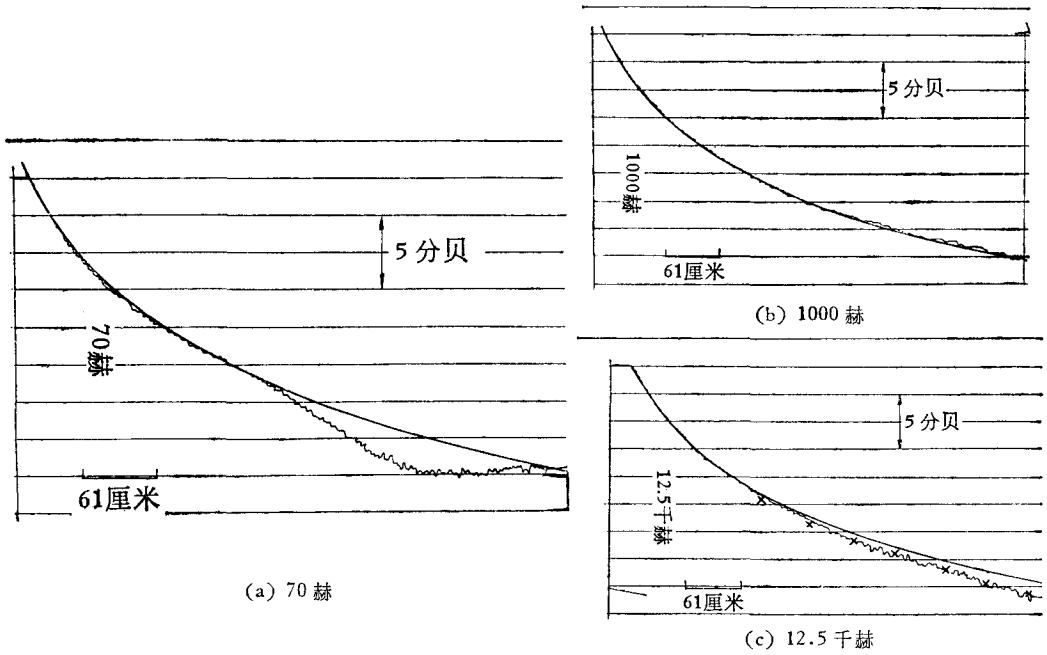

图 8　声压随距离衰减的记录曲线（记录纸速 0.1 厘米/秒）

图中光滑曲线是理论曲线，“×”是加上了空气吸收校正的理论值

七、消声室中原有钢轨等的影响及处理

原在消声室门口至对墙间（在钢筋网上约 30 厘米处）架有一对钢轨，用来放置较重的被测试件等用. 钢轨和架钢轨的槽钢的截面线度分别为 7 和 10 厘米. 在鉴定时发现 1 千赫以上就有影响；在 3.15 千赫，曲线起伏特别大，接近 10 分贝. 当轨道上铺一层玻璃棉后，3.15 千赫的曲线起伏显著变小，但在较低的频率，起伏又明显增大. 经反复试验，并用脉冲声在示波器上观察引起反（散）射波的位置，肯定钢轨和槽钢严重破坏室内自由声场，就决心把它们去掉. 此后进行的测试中，又发现拉紧钢筋网的 4 吋花兰螺丝（螺杆直径 1 厘米）在 6.3 千赫时的影响又特别大，只得把原装在中间的一排花兰螺丝换装到边上. 这样处理后对声场的影响有显著改善. 改装前后 3.15 千赫的声压衰减记录曲线见图 9.

钢轨去掉后，用活动三脚架穿过网直插到地面，被测试件放在三脚架上，轻的可悬呆在上面铁丝上. 传声器装在另一三脚架上，也可悬吊在上部铁丝上.

八、测试结果和讨论

我们测试了消声室中间长方向上一条线的声压衰减特性. 声源约放在室中心，离网高 1.8 米，传声器从离声源 0.5 米处移动至离声源 5 米处（这时离尖劈面 0.7 米），在 40 赫至 16 千赫频段内进行测试. 图 10 是从声源（近似在房间中心）算起，与自由声场理论值偏

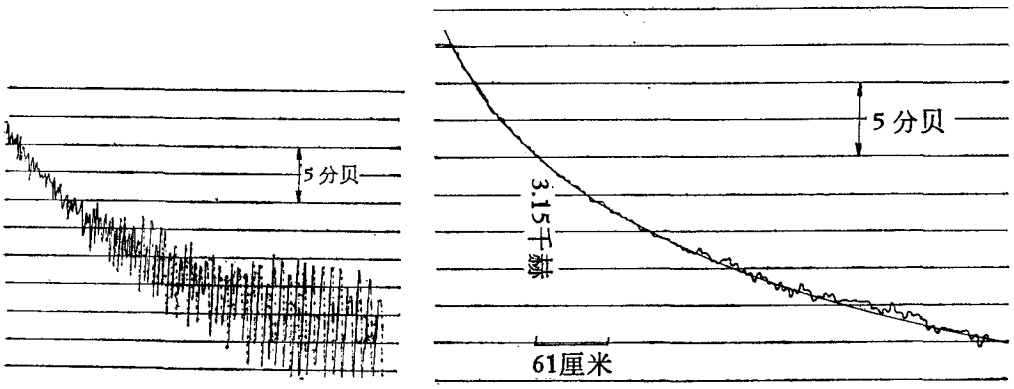

图 9 去掉钢轨前后 3.15 千赫的声压随距离衰减曲线
(a) 有钢轨时； (b) 去掉钢轨后
(传声器以 45° 指向钢轨)

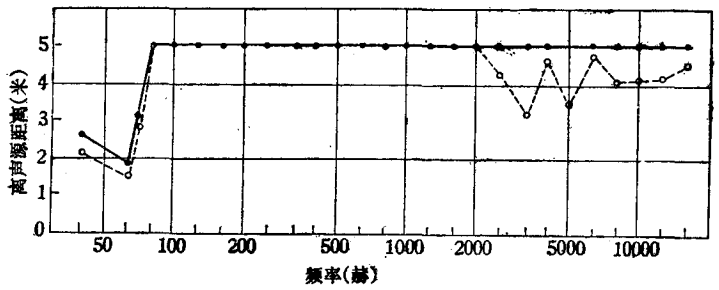

图 10 当声源近似在消声室中心时，各频率下室内声场与自由声场理论值偏离为 ±0.5 分贝(虚线)和± 1.0 分贝(实线)以内的距离(从声源算起)

离 ±0.5 分贝和 ±1.0 分贝的距离. 从测试结果可看到:

1. 在低频段, 70 赫以下, 自由声场范围很快缩小, 这与尖劈的吸声特性是一致的.

一般吸声尖劈的长度决定了截止频率 (吸声系数达 99% 的最低频率), 尖劈长度大约相应于截止频率波长的四分之一. 因此要建造一个截止频率为 40 赫的消声室, 尖劈长度约需 2 米以上, 而且只加长尖劈, 不扩大房间体积也不可能在低频时实现自由声场[16]. 所以若要在室内获得低于 50 赫的较大空间的自由声场, 造价要高很多, 一般情况下似乎并不合算.

2. 我们发现在尖劈截止频率以下, 似乎 40 赫比 60 赫的自由声场范围更大些, 其实这是假象. 这时传声器接收到的直达声与各面反射声的迭加, 由于频率低, 波长长, 位相改变缓慢, 因此总声压直接与直达声和反射声之间的位相差有关[16], 在不同频率时, 可能在不同距离内反映出直达声的衰减. 这方面尚待进一步研究.

3. 频率自 80 赫以上, 记录曲线与理论值的偏离很小, 说明是较为理想的自由声场.

4. 10 千赫以上高频, 当传声器指向朝前、后、左、右、上时, 都可得到较好的衰减曲线, 当传声器指向朝下时, 记录曲线与理论曲线的偏离就显著增大. 这说明传声器支架以及钢筋网有较大的反射或散射. 但这也说明在实际使用中可利用传声器的指向性来避免支架等对声场的影响.

建成十年后, 我们进行了重新鉴定, 证明消声室的性能是稳定的.

九、结　　语

综上所述，我们的消声室经过若干年来的实际使用，暴露出一些设计、建造方面的问题．如施工中，不宜采用软木作为隔振材料，被测试件既要便于出入和安放，又要不使辅助装置严重影响自由声场等等．同时也取得了一定的经验．

消声室是模拟无本底噪声的自由空间，而不是真正的理想自由空间，因尖劈再长，体积再大，总有一定的极限频率，目前消声室一般采用的隔声措施，对低于约 30 赫外来声源也难于有效地隔离．从节约和使用效果考虑，消声室选得过大，尖劈过长，在一般使用情况下都没有必要．必须根据具体使用目的进行设计，而应提倡符合一定要求的简易消声室．

消声室的吸声结构，近三十年来有所改进，但无论是结构、外形或吸声原理——关系到低截止频率与尖劈长度的依赖关系，并没有什么概念上的突破．今后设计的消声室，一方面要总结以往国内外的成功经验，另一方面应努力探索某种新的吸声结构，例如复合多共振结构可否值得进一步深入探讨．

为了寻找吸声结构的规律，除了用低频驻波管测垂直吸声系数外，还要重视其它声学参量（如流阻等）的测量．同时在管测法中要注意尖劈的安装形式和管测法本身的局限性．

我们虽用酚醛胶合玻璃板做吸声尖劈，当受潮时（泼大量水做试验）管测法的吸声系数不变，但从整个消声室建筑考虑，在湿度较大地区必须考虑防潮、通风等措施．特别是某些隔振材料，必须考虑能换取的装置．若消声室建在地下或半地下，这些措施尤为必要．

参　考　文　献

[1] 马大猷，《第一届全国声学学术会议论文摘要》，1964 年，86 页．
[2] 蒋渭鑫，《南京大学声学科学报告会》上报告，1960 年．
[3] A. Schoch, Report of the 1948 South Sym. of Acoustics Group (Noise & Transmission), 167.
[4] E. Meyer, *Akustische zeits*, **5** (1940), 352.
[5] L. L. Beranek, H. P. Sleeper, *J. A. S. A.*, **18** (1946), 140.
[6] G. Kurtze, *Acustica*, **AB2** (1952), 104.
[7] W. Koidan, G. R. Hruska & M. A. Pickott, *J. A. S. A.*, **52** (1972), 1071.
[8] E. Meyer *et al.*, *Acustica*, **AB3** (1953), 409.
[9] G. W. Epprecht, G. Kurtze & A. Lauber, *Acustica*, **AB2** (1954), 567.
[10] B. C. Watters, *Noise control*, **4** (1958), 32.
[11] Vicente Banuls Terol, V. ICA, II. G22.
[12] G. E. Peterson, G. A. Hellwarth & H. K. Dunn, *J. Audio Eng. Soc.*, **15** (1967), 67.
[13] 沙家正，《南京大学"五·二〇"科学讨论会》上报告，1956 年．
[14] К. А. Велижанина, С. Н. Ржевкин, *Акуст. Ж.*, **3** (1957), 23.
[15] P. H. Parkin, E. F. Stacy, *J. Sound Vib.*, **19** (1971), 277.
[16] W. Bausch, R. Schubert, *Frequenz*, **13** (1959), 324.
[17] 魏荣爵、余崇智，物理学报，**13** (1957), 365.
[18] 沙家正、俞铁诚，南京大学学报（自然科学版），1962 年，51．
[19] 吴启学，南京大学学报（自然科学版），1975 年．
[20] 上海工业设计院声学组，《中国唱片厂消声室吸声尖劈性能测定报告》，1974 年，2 月．
[21] 孙广荣，《上海市建筑隔声学术讨论会》上报告，1965 年，12 月．
[22] F. Ingerslev *et al.*, *Acustica*, **19** (1967—1968), 185.
[23] F. J. Evans, E. N. Bazler, *Acustica*, **6** (1956), 242.