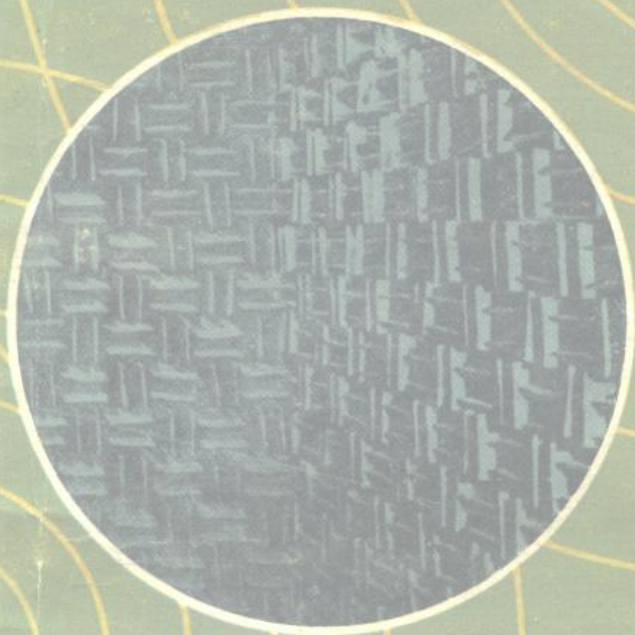




消声室和混响室的 声学设计原理

孙广荣 胡春年 吴启学



消声室和混响室的声学 设计原理

孙广荣 胡春年 吴启学

科学出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍消声室和混响室的声学设计原理,包括对实验室的大小、体形、吸收、扩散等方面的要求。此外,结合实验室设计,对吸声、隔声、隔振的基本原理也作了介绍。书中还叙述了鉴定这两种实验室的方法。

本书可供音频声学工作者和声学实验室的设计、使用人员参考。

消声室和混响室的声学设计原理

孙广荣 胡春年 吴启学

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981年4月第一版 开本:787×1092 1/32

1981年4月第一次印刷 印张:2 7/8

印数:0001—5,520 字数:62,000

统一书号:13031·1543

本社书号:2115·13—3

定价: 0.48 元

序

本世纪初,美国物理学家 W. C. 赛宾就对室内混响有过创造性的研究。以后,由于文化生活的需要,厅堂音质问题越来越受到重视。二十年代开始,有关这方面的论文、专著日益增多,象 P. M. 莫尔斯著的《振动与声》这样的理论著作,实际上其重点也是论述室内声场问题。到了四十年代,建筑声学进入以厅堂音质为主的全盛时期,而消声室与混响室也成为建筑声学研究中的有用工具,并为研究可听声传播规律提供了方便条件。

六十年代,随着工业生产的发展和科学技术的提高,噪声控制成为与环境保护、产品质量鉴定和抗噪声通信等直接有关的重要声学分支。各种设备、机器、部件的噪声的精密测试,都必须在消声室或混响室内进行;强噪声和振动对器材的影响,特别对人体的危害等等,有时也需要在混响室或消声室内进行直接试验或模拟实验;电声产品如传声器、扬声器及其组合和用到这些器件的整机产品如收音机、电视机等的声学性能,噪声对语言通信的干扰等等,也常要用到这类实验室。因此,无论在建筑声学、噪声学、电声学、语言声学、音乐声学、心理和生理声学、生物声学、……中,凡属于音频声学范畴的许多研究课题,都必须广泛应用混响室或消声室。

目前国外新建的高质量消声室和特殊用途(如火箭噪声测试)的混响室,都是从实际需要出发,精心设计的;一般工业上生产和研究用的消声室,多数采用简单的吸声结构,但实验设备先进,使用效率很高。

我国从五十年代开始建立了一些混响室和消声室，但尚多不足之处。如混响室主要用于测量建筑材料的吸声系数，适用于测定机件噪声功率的还很少。在消声室的设计方面，虽已积累了不少经验，但有些单位的消声室不恰当地选用了超过测试需要的高指标；有的消声室利用率很低，以致造成人力物力的浪费，这一方面是因为相互协作较差，没有统筹安排，另一方面也与缺乏经验、缺少交流有关。

目前国内外还没有一本专门讨论消声室和混响室的专著。孙广荣、胡春年、吴启学三位同志根据多年的实践经验，参考国内外有关资料，编写了本书，这对有关声学工作者将是一本很有价值的参考书，并对我国更好地设计、建造和使用这类实验室，为实现四化服务起有益作用。

魏荣爵

1979年12月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 自由声场和消声室	2
§ 1.2 扩散声场和混响室	3
§ 1.3 正确选用消声室与混响室	5
第二章 消声室的设计原理	7
§ 2.1 消声室的类型	7
§ 2.2 消声室的大小和形状	9
§ 2.3 消声室的吸声结构	15
§ 2.3.1 多孔性吸声材料	15
§ 2.3.2 薄层多孔性材料的共振吸声	16
§ 2.3.3 尖劈状吸声结构	18
§ 2.3.4 其它吸声层设计	24
§ 2.4 隔声和隔振设计	25
§ 2.4.1 隔声设计	25
§ 2.4.2 隔声门的设计	39
§ 2.4.3 隔振设计	41
§ 2.5 对消声室的其它要求	45
§ 2.6 消声室的鉴定	46
§ 2.6.1 本底噪声的测定	46
§ 2.6.2 自由声场的鉴定	48
第三章 混响室的设计原理	55
§ 3.1 封闭空间声学特性简介	56
§ 3.2 混响室的大小	59
§ 3.3 混响室的形状	61
§ 3.4 混响室内的吸收	63
§ 3.5 改进扩散的方法	65

§ 3.6 混响室的其它要求	67
§ 3.7 扩散声场的鉴定	68
§ 3.8 高噪声室的设计	71
附录一 吸声尖劈的驻波管测量法.....	76
附录二 机件噪声的混响室测量法.....	80

第一章 绪 论

消声室和混响室是音频声学测量的基本实验室。随着我国工业、国防和科学技术的迅速发展,消声室或混响室的使用范围将越来越广。例如各种类型的扬声器(俗称喇叭)和扬声器箱的声学性能的测试和鉴定,传声器(俗称话筒)和其它接收或放送声音的电声器件的声学测试和鉴定,都要在消声室或混响室中进行。收音机、电视机等整机的声学性能也要在消声室中测试。

噪声对环境的污染日益严重。为了有效地控制噪声,必须比较精确地测定机器或部件的噪声水平,这也需要在消声室或混响室中进行。现在对喷气噪声的研究也使用了这类实验室。强噪声对器件或材料的影响(声疲劳)的实验,有些也必须在混响室中进行。像各种发动机、电机、齿轮、小型变压器、缝纫机、电风扇等等许多产品,其噪声级的大小往往是鉴定其制造质量的一项重要指标。

其它如建筑中的声学设计,要用混响室和消声室测定其建筑材料的吸声特性和隔声特性;语言和乐音的声波分析以及各种生物声的频谱分析,都要先在消声室或混响室中录音;听觉特性的测试和其它生理、心理声学方面的实验,要在消声室或类似消声室的“沉寂室”中进行。录制音乐节目时也可用混响室来增加人工混响,以美化音质,或获得特殊的声响效果。当然,一些声波传播规律的基本研究,更需要用消声室和混响室了。

需要使用消声室或混响室的学科和行业是很广的,因此,

对这类实验室的正确选用和合理设计，是一项极为重要的工作。本书重点是介绍消声室和混响室的声学设计原理。

§ 1.1 自由声场和消声室

如果在普通房间里测量扬声器的声学性能，由于房间各壁面和室内物体的反射而测不准确，因为接收传声器除了接收到直接从扬声器传来的声波外，同时还接收到反射声波以及从室外传来的别的干扰声。（如果采用脉冲声技术，则在一定条件下可以在普通房间中把反射声与直达声在时间上分开。但这种方法的测试设备较复杂，目前尚不普及，而且并非所有频率都能实现。此外，脉冲声与一般稳态声的物理特性也有不同。）

为了准确地测量出声源的特性，应把声源放在一个没有干扰的理想空间中。在这个空间中，传播声波的介质均匀地向各个方向无限延伸，使声源辐射的声波能“自由”地传播，既无障碍物的反射，也无环境噪声的干扰。这样的空间，称为“自由声场”。这种理想空间当然无法完全实现。例如在地面的反射声和噪声可忽略的高空，在气象条件适宜，没有飞行噪声等干扰的情况下，可以被认为是自由声场。但这样的高空在实际中是难以使用的。有时人们利用屋顶上的空间，或广场上的半空间，进行近似自由声场条件下的测量，但也要选择良好的气候条件和避开环境噪声的干扰，因此也是比较麻烦的。

为了创造一个良好而方便的测试条件，人们设法在室内建立近似的自由声场，这就是“消声室”¹⁾。

为了消除室内的反射声，消声室内除了没有障碍物外，室

1) 也有人称为“无回声室”或“无反射声室”。从物理意义上说，应称为“自由声场室”，现在国内已习惯称为“消声室”。

内各面(墙壁、天花板、地面)上都要铺设高效能的吸声材料,使入射于界面上的声波,在一定频率范围内几乎完全被吸收。为了消除外界的干扰,消声室必须有良好的隔声和隔振设计。这些是消声室的基本要求。

消声室内的各面要铺上宽频带、高效能的吸声结构,这是设计中一个最重要的环节。消声室最早出现在本世纪30年代,最初的吸声结构为多层吸声材料。有的与壁面平行地悬挂,并与壁面相隔一定距离,有的与壁面垂直地悬挂。1940年,梅耶等人^[1]首先提出并采用了逐渐过渡形式的棱锥形吸声体。这是吸声结构设计上的重大革新。此后,凡是高质量消声室的吸声体设计,从棱锥体到圆锥体直到尖劈体,都是基于逐渐过渡的原理。以后的改进,主要在于吸声体底部与壁面间留有一定空间,使产生适宜的共振,以改进低频吸声特性。

吸声体的材料很多,如棉、麻、毛等纤维以及石棉、矿渣棉、玻璃纤维、超细玻璃纤维以及泡沫塑料和人造纤维等。还有为了同时作为电磁波的无反射室,在吸声材料中掺入石墨粉或钢棉以吸收厘米波或分米波。

随着大量噪声测试工作的增加,出现了造价低、施工简单,而测试误差允许稍大的简易消声室,有的则是一个面或两个相邻面是反射面的半消声室,这些消声室的吸声体有的采用胶合玻璃棉或泡沫塑料的边角料,做成不十分整齐的阶梯形或宝塔形,也有重新采用多层布幕的结构,这就满足了一般机器噪声功率测试的需要。

§ 1.2 扩散声场和混响室

与消声室的壁面材料相反,混响室的各个壁面都是吸声系数很小的建筑材料。经常使用的材料有大理石、瓷砖、水磨石、水泥粉刷后多层油漆、金属板等。声波在混响室内传布

时,因壁面反射系数很大,所以要来回反射许多次才逐渐衰减掉。

如果一个声源在混响室内连续稳定地辐射一定频谱的声波,它就激发起室内许多个不同的固有振动方式,声波按不同方式在许多方向来回反射地传布。在先的声波逐渐衰减,在后的声波不断补充,达到动态平衡状态。这时,除紧靠壁面处和邻近声源处外,室内声场有可能达到: 1. 各点的平均能量密度相等; 2. 各点从各方向来的平均能量流相等; 3. 到达某点的各波束间的相位是无规的。符合这三个条件的声场,即称为扩散声场或无规声场,有时也称为混响声场。¹⁾

必须指出,单独“各点声能均匀”这样一个条件,是不能构成扩散声场的概念的。例如在均匀管中传布的平面行波,管中各点的声能密度是相等的,但这样的声场显然不是扩散声场。

需要扩散声场条件的情况有: 1. 有些电声换能器需要知道它的扩散场灵敏度特性; 2. 声源输出功率的混响室测法中,需有扩散声场的假定,使声源功率级与室内声压平方平均值和房间体积、室内吸收发生关系; 3. 在混响室测材料吸声系数实验中,在声级衰减前和衰减过程中需要扩散声场的假定; 4. 在隔层的透射损失的混响室法测量中,隔层两边都要满足扩散声场的假定; 5. 某些高噪声环境下的实验研究。因此,建造混响室来获得扩散声场条件也是声学实验测试中的

- 1) 在室内声学中,有时“混响声场”只是相对于“直达声场”而言,不一定完全符合这里所述的三个条件。例如下面消声室声场讨论中提到的“混响声场”,就是如此。又如在厅堂、剧院中的座位,大部份情况是处于所谓的“混响声场”中,我们要求场内各座位的声压级比较均匀,这就要正确设计房间的体形和扬声器系统的恰当布置,使达到良好的“扩散”。这个“扩散”的要求,也并不是指座位处于“扩散声场”中了。因为场内听众希望感到声音是从主席台或舞台上传来的,有时还需达到立体声的效果。若处在严格定义的“扩散声场”中,那就不可能有良好音质所要求的方向感了。

一个重要手段。

赛宾最初是在教室里进行了一系列的实验,建立了著名的混响公式,并在1929年提出了“混响室法测量吸声系数”的论文。早期的混响室,不少是利用地下室、储藏室等改装而成,主要用来测量建筑材料的吸声系数。近二十年来,则越来越多地利用混响室来测定机器的噪声功率。很早就已发现,同一建筑材料在不同混响室中测得的吸声系数相差很大^[2]。在50—60年代,国际标准协会组织了吸声材料的巡回测试,制订了在混响室中测量吸声系数的国际规范,规定了测试样品的大小和混响室的体积范围,并要求混响室内安装扩散体以改进室内的声场扩散。在有关机器噪声测试的国际规范中,对于测量包含离散频率成分的声源功率的混响室,还指出了需要安装活动扩散体,以改善室内声场的均匀性。从实际应用来说,符合规范要求的混响室,所得实验数据的离散程度可以控制在一定范围内,并对不同的混响室,彼此可以相互比较;但从声场扩散这个理论问题来说,虽然混响室已被研究了半个世纪,但仍有不少有趣的问题可继续深入,以至本来是测量工具的混响室,却成了声学研究的对象。

§ 1.3 正确选用消声室与混响室

对于严格避免反射声干扰的实验,如传声器的自由场互易校正,电声器件和声源的指向性测量,某些听力测试等等,都必须在消声室内进行。有些实验在消声室或混响室中均可进行,如声源(包括扬声器、各种噪声源、乐器等等)的输出功率及其平均频谱等。若声源辐射指向性比较复杂,则声功率的消声室测试方法就很繁复。因此,一般只要求测出声源输出功率和频谱,而不需要知道声源指向性的测试,则应用混响室是既快又好的方法。(甚至在混响室中以直达声为主的临

界距离内,也可粗略地测出声源的指向性。)一般安装在地面上使用的机器设备,可用半消声室来测它的噪声。有些必须有大的支承或连接轴等机械,若在消声室中测它的噪声,则其辅助装置会破坏自由声场,不可能有高的测量精度,倒不如用混响室法为好。此外,消声室的造价比较昂贵,所以在可以用混响室代替消声室进行测量的情况下,应尽量选用混响室。

建造消声室必须根据实际使用要求,本着勤俭节约、就地取材的精神来设计,而不应盲目追求体积大、吸声尖劈长、本底噪声低等高质量指标。如作听力测试和心理声学实验的房间,要求本底噪声非常低,但对壁面的吸声层的要求则不一定非常高。又如测定噪声级较高的机器噪声,容许本底噪声较高,但对壁面吸声层的要求不一定非常高,尤其对于宽频带噪声源的测试,壁面吸声系数完全不需要很高。当然,具体指标是根据容许测量误差来确定的。小型机器如微电机的噪声测定,消声室的体积就不必过大,甚至做成消音箱就可以了。吸声层越厚,低频吸声性能越好,但再厚也总有个极限。因此也不能为追求低频效果而片面地增加吸声层厚度,致使造价高,结构不合理而并不实用。像橡皮轆环扬声器等测试频率需要低到20赫左右,有时很难在一般消声室中实现,这就需要寻找别的测试方法来补充消声室低频之不足。例如利用大场地的半空间或用“近场法”^[3]进行扬声器的低频测试;传声器的比较法校正,在低频段可在行波管中进行。

第二章 消声室的设计原理

设计一个消声室,首先要明确它的使用要求,即主要进行怎样的声学测试工作,从而确定测试的频率范围、工作空间(自由声场范围)和允许测量误差。根据这些要求来设计消声室的大小、形状、壁面的吸声结构,并根据周围环境条件进行消声室的隔声、隔振设计。此外,根据不同的测试需要,还要妥善设计好各种辅助装置,使便于测试而又不破坏自由声场。

§ 2.1 消声室的类型

消声室分全消声室、半消声室和卦限消声室三种类型。

房间的六个面全铺设吸声层的,称为全消声室,一般就称消声室。凡要求测量误差比较小,如要求在 ± 1 分贝以内,或者有测量声源的方向特性等要求的,一般都设计全消声室。

房间的六个面中只在五个面或四个面铺吸声层的,称为

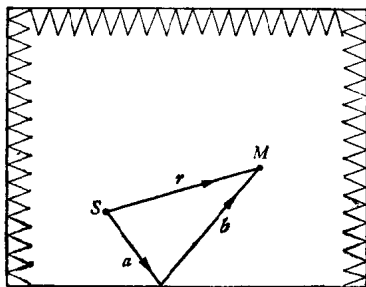


图1 半消声室中的直达声和一次反射声

半消声室.当被测噪声的机器很笨重,难以在全消声室中安放,而测量误差允许较大时,就设计半消声室来完成其测试工作.

例如地面不铺吸声层而是磨光水泥等对音频声波几乎是全反射的材料,其余五面都铺高吸声材料的半消声室(如图1).声源 S 放在离地面一定高度处,传声器在 M 处接收,则除了接收到直达声外,还接收到地面的一次反射声.直达声与一次反射声的声程差为 $r - (a + b)$.如果声源尺寸不很大(相对于波长而言),放在地面上,或者接收传声器放在地面上,则 r 与 $(a + b)$ 接近相等,或者说只要有

$$r - (a + b) \ll \lambda$$

的条件(λ 是波长),这时传声器接收到的直达声和反射声大小相等,相位相同,互相叠加,所以测得的声压值为在全消声室中同样距离下的2倍,即声压级增加6分贝.如果声源和传声器没有一个接近地面,则直达声与反射声之间的位相差,与声程差 $r - (a + b)$ 和测试频率的波长有关.因此对于单频率声波,在这种情况下在不同位置上测得的声压值比在全消声室中同样位置上的数值可大可小;在同一位置上测量时,对于不同频率的声波,与全消声室相比也可能大可能小.而对于一定频宽的噪声源,不同频率的直达声与反射声之间产生的相位差不同,所有频率成份无规地叠加的结果,在离地面四分之一波长(对应于此频带的中心频率)以上,大约比全消声室的测量值增加不到3分贝.

如果相邻两面(一般是地面和一个壁面)是全反射面,其余四面铺吸声层,则应将被测声源安放在紧靠这两个面的棱线上来测量声源辐射的声功率或声压级.

在一面反射的半消声室中测试时,只有声源比较小,放在地面上时,或者声源指向性比较均匀,传声器可以在接近地面处测试,这时所得的声压级比全消声室约大6分贝外,一般情

况下的测试误差比较大。要提高测试的准确度,测点数目也要比较多,但对于使用时放在地上或墙边的设备,则在半消声室中测试其噪声,也比较符合实际情况。对于不同类型机器或产品的噪声测试,测量时具体的测点布置以及测试方法,应在消声室中对不同被测对象有专门规定,并制订专门的测试规范。

如果相邻三个互相垂直的面是全反射的,则根据镜面反射原理,这好像是一个完整消声室的八分之一的空间,因此称为卦限消声室。使用卦限消声室时,必须将声源或接收器放在三个反射面交接的顶角上,其尺寸要比波长小。例如将声源放在卦限消声室外,通过在其三个反射面相交的顶角上开一小口向室内辐射声波。在这种条件下可以进行比较法校正小型传声器等实验。卦限消声室因受声源或接收器尺寸的限制,一般只在特定用途下才使用。

不同类型消声室的设计原则基本上是相同的。下面以全消声室为主,讨论其设计原理。

§ 2.2 消声室的大小和形状

消声室的体积主要决定于被测物的大小和测试距离,此外,与允许测试误差的大小和测试的最低频率、壁面吸声系数亦有关。

我们先观察一下一般房间中的声场情况。如果一个声源在房间内稳定地以声功率 W_s (单位为瓦) 辐射声波,则室内各点的声压是由直达声和各面的多次反射声(即混响声)叠加而成。如果声源对各方向的辐射强度相等,则室内离声源 r 处的声压级^[4] L_p 为

$$L_p = 10 \log_{10} W_s + 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) + 120, \quad (1)$$

式中长度的单位用米; $R = S\bar{\alpha}/(1 - \bar{\alpha})$ 称为房间常数; S 是室内总面积; $\bar{\alpha}$ 是室内表面的平均吸声系数。(严格说来, 此关系在 $\bar{\alpha} < 0.2$ 时才适用。) 式(1)括号中的第一项与直达声能的贡献有关, 离声源的距离 r 增大一倍, 直达声压级下降 6 分贝。括号中的第二项与混响声能的贡献有关, 它不随距离变化, 只取决于房间常数。图 2 表示直达声压级 L_d 、混响声压级 L_r 和总声压级 L_p (图中粗线) 随距离的相对变化。在靠近声源处, 直达声大于混响声, 总声压级基本上符合距离增加一倍、衰减 6 分贝的规律, 在这区域内即可认为是自由声场范围。随着离声源距离的增加, 直达声压级逐渐减低, 总声压级中混响声的贡献逐渐占优势, 声压级值遂趋于不变。在这区域内可认为是混响声场的范围。本节中首先考虑的是在一定的允许误差要求下, 自由声场的范围有多大? (混响声场的情况将在下一章中讨论。)

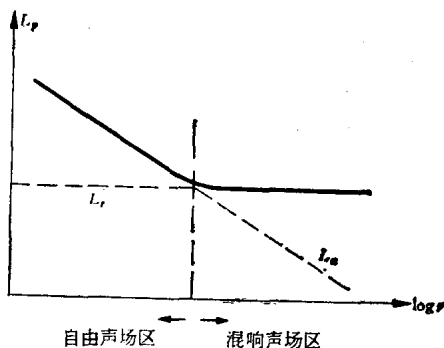


图 2 室内直达声和混响声的声压级随声源距离的变化

式(1)括弧中第一、第二项之比即为直达声能 E_d 和混响声能 E_r 之比:

$$\frac{E_d}{E_r} = \frac{1}{4\pi r^2} \bigg/ \frac{4}{R} = \frac{1}{16\pi r^2} \cdot \frac{S\bar{\alpha}}{(1 - \bar{\alpha})} \quad (2)$$