

第一篇 建筑声学基础

第1章 绪 论

1.1 概 述

声学的领域很广，它几乎触及到人类生活实践的各个方面（见图1-1）。而建筑声学则是声学的的一个分支，是一门边缘的学科。它不仅与建筑技术密切相关，同时还与生理、心理、音乐、语言、电子、机械、自动控制、计算机学科等有着密切的关系。因此，建筑声学方面的成就都是各学科综合发展的结果。

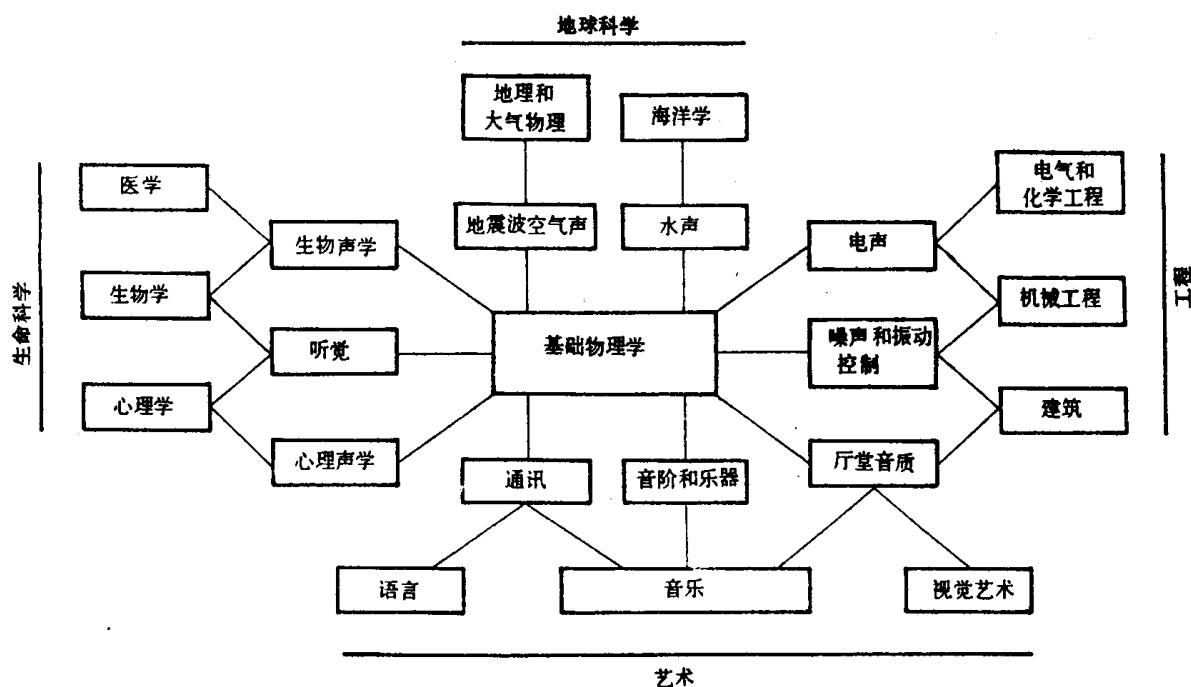


图 1-1 声学与艺术和科学的关系

随着科学技术的发展，人们生活水准的提高。对创造良好声环境的要求更加迫切，而对音乐厅、剧院、会堂、影院和体育馆提出更多的使用要求和更高的听闻条件；对住宅、医院、旅馆、办公楼等建筑则要求有更为舒适、安静的环境。与此同时，建筑却趋向于采用轻而薄的结构，以代替原来笨重的房屋结构。建筑物内工程设备的增多和交通工具的发展，使室内外噪声强度在不断增加，从而产生着严重、甚至有害的后果。所有这些因素，使建筑声学面临着新的挑战，同时也使它成为控制室内外声环境的一门重要学科。

现代高科技能在建筑物内创造出复杂的人工环境，并在很多方面有时比自然环境好：室外大气环境不能与有空调和湿度控制的房间相比；目前使用的照明灯具不仅能模拟日照，而且能造成某些活动所必需的无影光照环境；一座可以调节音质条件的厅堂或录音、播音室，以及一座六声道杜比系统的立体声影院等的声环境，是自然环境所不能比拟的。

显然，一个建筑师不可能具备能创造高度复杂环境条件的才能。但必须与结构、电气、设备、照明、声学等各个专业相结合。对此，就要求建筑师了解环境控制的内容，以便衡量各专业的建议是否合理和有效地把各种适用的意见结合到建筑设计和建筑规范中去。

建筑声学包括音质设计和噪声控制两方面。前者是为各种听音场所建立最佳的语言或音乐的听闻条件；后者则为减低噪声和振动的干扰。

室内音质设计和噪声控制既相互独立，又密切联系而不可分离。在厅堂音质设计中，噪声控制非常重要，它是室内音质设计的重要指标之一。

1.2 声音的产生和传播

在固体、液体和气体介质中传播的机械波均称声波。与听觉有关的声音，主要是指在空气介质中传播的纵波。它是由于振动着的物体同周围空气相互作用而产生的。这在我国宋代学者张载已有论述：“声者形气相轧而成也”，他说的“形”就是振动着的物体，“气”即是空气介质，“相轧”就是两者相互作用，这同现代声辐射的理解是一致的。

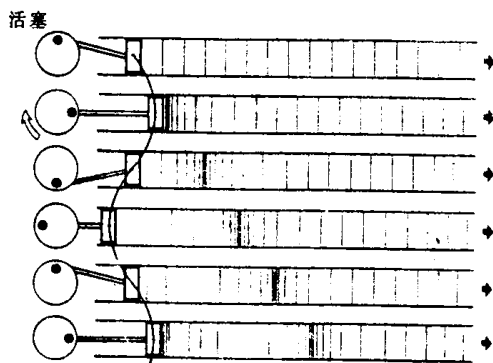
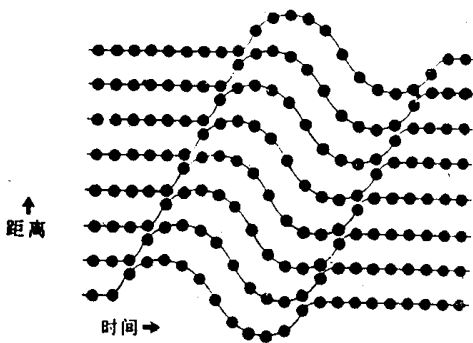


图 1-2 用一无限长的圆管内的活塞模拟声波的产生和传播

物体的振动会带动着紧靠物体的一些空气质点振动，这些空气质点的振动是与物体的振动一致的。现在我们只讨论振动体右边的空气。当振动体向右运动时，紧贴振动体右边的空气受到压缩，密度增大。当振动体向左运动时，紧贴振动体右边的空气就扩张、密度减小。因此，当振动体左右振动时，紧靠振动体右边的空气层就会有疏密相间的变化。它的传播是由于空气是“弹性”体，当它被振动体压缩时，必然要产生向外恢复的弹性力，其中向右的弹性力将推动离振动体较远并与压缩层相邻的静止空气向右运动。当静止的空气层受弹性力作用向右运动以后，由于“惯性”，空气就要继续向右运动，直到更右边的空气层受压缩而产生向左的弹性恢复力使运动着的空气层减速到静止时为止。而压缩层的向右的弹性恢复力又推动离振动体更远的、新的静止空气层向右运动……，依此类推。所以压缩层就会一直向着右方传播。同理，稀疏层也会一直向着右方传播，不同之

处在于稀疏层的弹性恢复力与压缩层的方向相反，疏密相间的波（即声波）就这样在空气中传播。图1-2以活塞的振动形象地表明了声波产生和传播的过程。

声波传播的速度称为声速 c ，它只取决于空气介质本身的弹性（空气的压缩系数 k ）和惯性（空气的密度 ρ ），与声波强度、声波形式等无关。

声速 c 与空气压缩系数 k 和密度 ρ 的关系式如下：

$$c = \sqrt{\frac{1}{k\rho}} \quad \text{m/s} \quad (1-1)$$

在大气压为 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 和常温条件下， $k = 7.14 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{N}$ ， $\rho = 1.2 \text{kg}/\text{m}^3$ ，所以声速 c 在常温情况下为 $340 \text{m}/\text{s}$ 。

振动物体来回振动一周的时间称为周期 T (s)， T 的倒数为频率 f (Hz)；声波在一个周期的时间内传播的距离称为波长 λ (m)；波长 λ 与频率 f (或周期 T) 和声速 c 的关系，如图 1-3 和式 (1-2) 所示。

$$\lambda = \frac{c}{f} = cT \quad \text{m} \quad (1-2)$$

声波在传播过程中，遇到障碍物，就会出现反射、衍射和散射的现象。这同光波是相似的，是波所共有的性质，差别只是可听声的波长比光的波长要长得多。可见光的波长约为 $0.4 \sim 0.7$ 微米 (μm) 的数量级。而可听声的波长约在 $1.5 \text{cm} \sim 17 \text{m}$ 之间。因此光波波长与建筑物的介面相比总是小得多。但声波波长则有可能大于或小于和接近界面(障碍物)的尺寸。因此，声波有时表现出明显的波动性；有时又能看作几何声线；有时又不得不认为

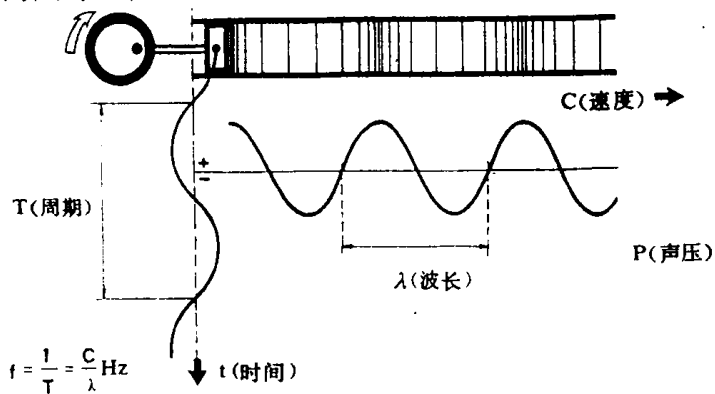


图 1-3 波长 λ 与频率 f 和声速 c 的关系

两者兼而有之。这对建筑声学设计是一个很重要的问题。判别的关键在于障碍物(建筑界面)的尺寸 l 与波长 λ 的比值：当 $l < \lambda$ 时，波动性为主；当 $l > \lambda$ 时，声线性质为主；而在 $l \approx \lambda$ 时，两种性质在一定情况下都会表现出来，情况比较复杂。它可用一平板障碍物与声波相遇时的几种情况，形象地加以说明。

当 $l \gg \lambda$ 时，障碍物的尺寸比波长大很多，障碍物可看作很大的反射板，声波完全可看成几何声线。入射到反射板上的声线，按反射规律反射，声的波动性（衍射）除边缘局部区域外，可忽略不计。反射板后部呈现出明显的声影区，见图 1-4A 所示；

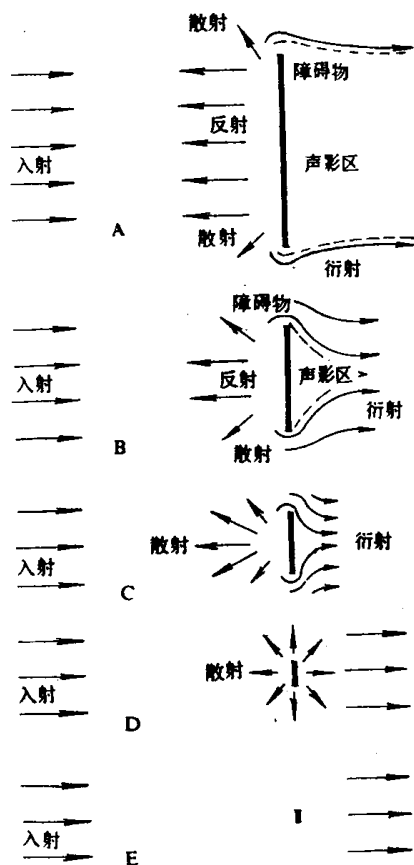


图 1-4 障碍物对法向入射的平面行波在不同情况下表现出的不同影响

当 $l > \lambda$ 时, 障碍物尺寸稍大于波长时, 按反射规律反射的区域缩小到只在板前方的中央区, 板前的两边表现出向各方向的散射, 而边缘区出现相当明显的衍射, 障碍物后部的声影区相应地压缩。见图1-4B所示;

当 $l \sim \lambda$ 时, 有规则的反射消失, 障碍物的前部只表现出散射, 而在其后部是衍射波, 声影区消失, 如图1-4C;

当 $l < \lambda$ 时, 衍射和散射已无法区分, 障碍物对声波产生均匀的散射, 见图1-4D;

当 $l \ll \lambda$ 时, 障碍物尺寸远比波长小, 声波可以无视障碍物的存在按照原来方向传播, 也即障碍物对声波完全失去作用, 没有任何影响, 见图1-4E。

由此可见, 所谓物体的大小、长短等, 都是而且必须是与波长的比较相对而言的。这对厅堂设计中确定反射面、扩散体的尺寸是非常重要的依据。

1.3 声音的计量

1.3.1 声压、声强、声功率

表述声音在空气介质中传播时的客观量有声压、声强和声功率。

由声波引起的压强变化称为声压, 记作 P , 单位 N/m^2 , 也称Pa ($1.013 \times 10^5 Pa = 1$ 标准大气压), 声压的大小决定声音的强弱。声压 P 实际上是随时间而迅速起伏变化的, 但人耳感觉不出声压的这种起伏。声音强弱只同迅速变化的声压 (又称瞬时声压) 的某种时间平均值有关。这种声压的平均值称之为有效声压。通常说的声压即指有效声压而言。

声压与大气压相比, 一般是很小的。人们正常说话时的声压相当于大气压的百万分之一左右。人耳能听到的最低与极限声压之间的范围相差一百万倍。

声源在单位时间内向外辐射出的总声能称为声功率, 记作 W , 单位是W、mW或 μW ($1 W = 1000 mW = 10^6 \mu W$)。

声强是指垂直于传播方向每单位面积上所通过的平均声功率, 记作 I , 单位是 W/m^2 , 声源均匀地向四周辐射声能时, 称球面辐射, 围绕声源半径 r (m)处的球面上 (球面积 $S = 4\pi r^2$)的声强 I 为:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad W/m^2 \quad (1-3)$$

因此球面声源的声强 I 和声源的声功率 W 成正比, 而与离开声源的距离平方成反比, 即距离加倍时, 强度 I 就减至原来的 $1/4$ 。声强随离声源距离的增加按平方反比的规律减小称之为“平方反比定律”。

1.3.2 级和分贝

在声学工程中, 通信和广播技术中, 有一个常用单位一分贝 (dB), 用它来表示声音和电信号的相对强弱, 例如声压和电压、声功率和电功率的放大 (增益) 或减小 (衰减) 的倍数等, 以使运算变得更方便些。在特定条件下分贝 (dB) 又具有绝对值的意义。分贝是贝 [尔] (Bel) 的十分之一, 贝是一种级的单位。

1.3.3 声强级、声压级、声功率级

人耳从能听到的最低声强 (可听阈) $10^{-12} W/m^2$ (声压为 $2 \times 10^{-5} Pa$) 到感觉耳痛的最大声强 (痛阈) $1 W/m^2$ (声压为 $20 Pa$) 之间相差一万亿倍 (声压相差一百万倍), 量程

如此之大，直接用声强或声压来量度很不方便。此外，人耳对声音大小的感觉，并不与声强或声压值成正比，而是近似地与它们的对数值成正比。因此通常用对数的标度来表示。如果以10倍（即相对比值为10）为一“级”，这样，声强级的定义便是这声音的强度 I 和基准声强 I_0 之比值的常用对数值，单位为贝尔（Bel），声强级表示为：

$$L_I = \lg \frac{I}{I_0} \quad \text{Bel} \quad (1-4)$$

但一般不用贝尔，而是取它的十分之一作单位，即分贝耳，简称分贝（dB），即：

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (1-5)$$

式中 I_0 ——为基准声强， $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 。基准声强即人耳对1000Hz声音的可听下限，相应的声强级为0 dB。

利用“级”的概念就可大大压缩量程的数量级，从而提高计算的简明程度。

同样可以用分贝（dB）单位定义声压级，由于声强与声压的平方成正比，因此以分贝为单位的声压级可以下式表示：

$$L_p = 20 \lg \frac{P}{P_0} \quad \text{dB} \quad (1-6)$$

式中 P_0 ——为基准声压， $P_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ （或 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ ）。

表1-1列举了声强、声压值和它们所对应的声强级、声压级，以及相应的声环境。

同理，声功率以级的形式所表示的声功率级如下式所示：

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad \text{dB} \quad (1-7)$$

式中 W_0 ——基准声功率级， $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$ 。

应该指出：声强级、声压级和声功率级与声强、声压和声功率是不同的概念，以分贝为单位的各种“级”，只有相对的意义，它们无量纲，其数值的大小与所规定的基准值有关。因此，当用分贝单位的各种“级”，都应同时标明所用的基准值。

声强、声压与对应的声强级、声压级以及相应的环境

表 1-1

声 强 (W/m^2)	声 压 (N/m^2)或(Pa)	声强级或声压级 (dB)	相 应 的 环 境
10^2	200	140	喷气飞机起飞时
10^0	20	120	锅炉车间、钢铁厂(疼痛阈)
10^{-1}	$2 \times \sqrt{10}$	110	风动铆钉机旁
10^{-2}	2	100	织布机旁
10^{-4}	2×10^{-1}	80	城市干道旁、公共汽车内
10^{-6}	2×10^{-2}	60	相距 1 m 处交谈
10^{-8}	2×10^{-3}	40	安静的室内
10^{-10}	2×10^{-4}	20	轻声耳语
10^{-12}	2×10^{-5}	0	人耳最低可闻阈

1.3.4 声压级的叠加

当几个性质相同的声音叠加时，它的总声压仍是各个声压的均方根值，即：

$$\text{总声压} \quad P = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + \dots + P_n^2} \quad (1-8)$$

声压级的叠加不是简单地算术值相加，须按照对数运算的规律进行。例如 n 个声压相

等的声音，每个声压级为 $20 \lg \frac{P}{P_0}$ ，总声压则为 $\sqrt{nP^2}$ ，其总声压级则为：

$$L_p = 20 \lg \frac{\sqrt{nP^2}}{P_0} = 20 \lg \frac{P}{P_0} + 10 \lg n \quad \text{dB} \quad (1-9)$$

由式 (1-9) 可见，如两个 ($n=2$) 相等声压级叠加时，只增加 3 dB。同样，10 个相同的声压级相加时，也仅增加了 10 dB ($10 \lg 10$)，而不是 10 倍。

此外，可以证明，两个声压级分别为 L_{p_1} 和 L_{p_2} (设 $L_{p_1} > L_{p_2}$)，其总声压级为：

$$L_p = L_{p_1} + 10 \lg \left(1 + 10^{-\frac{L_{p_1} - L_{p_2}}{10}} \right) \quad \text{dB} \quad (1-10)$$

同样可以证明，两个声强级或两个声功率级的叠加公式与式 (1-10) 完全相同，即：

$$L_I = L_{I_1} + 10 \lg \left(1 + 10^{-\frac{L_{I_1} - L_{I_2}}{10}} \right) \quad \text{dB} \quad (1-11)$$

$$L_w = L_{w_1} + 10 \lg \left(1 + 10^{-\frac{L_{w_1} - L_{w_2}}{10}} \right) \quad \text{dB} \quad (1-12)$$

当式 (1-10) 中， $L_{p_1} = L_{p_2}$ 时， $L_p = L_{p_1} + 10 \lg(1 + 1) = L_{p_1} + 10 \lg 2 = L_{p_1} + 3 \text{ dB}$ 。由此可见式 (1-9) 是式 (1-10) 的一种特定的情况。

为了便于运算，可采用对线图 1-5，先求两声压级差 $\Delta L (L_{p_1} - L_{p_2})$ 所对应之附加值，将此值加在原来较高的声压级值上 (即加在 L_{p_1} 上)，即为所求之总声压级值。如两者相差在 10 dB 以上时，附加值很小，可以忽略不计。多个声压级相加时，亦可采用这一方法，先按声压级的大小顺次排列，然后从最大的两个开始，得出其总声压级，再与第三个相加，直至两者相差 10 dB 以上时不再相加，这时的总声压级即为最后叠加的总声压级。

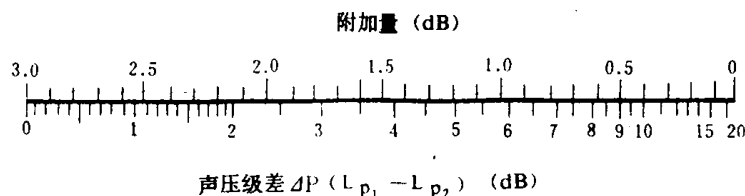


图 1-5 声压级叠加对线图

1.4 人耳的听觉特性

1.4.1 频率、音调和音色

频率、音调和音色常称为声音的三要素，它是声音的重要属性。

质点在一秒钟内位移或振动的次数称为频率。单位为赫 (Hz)，正常的人耳对声音的反

应是在20~20000 Hz的音频范围内。这个范围与各种声源（乐器与演唱）的频率范围示于图1-6。可听频率范围随不同的人 and 年龄而异。年龄越大，可听频率上限越下降。高于10000 Hz的频率对语言的易懂度和欣赏音乐无重大影响。因此在建筑声学设计中，常以具有代表性的下述频率为标准，即：

125, 250, 500, 1000, 2000和4000 Hz。

对于音乐厅和音乐录音棚建筑，则需在上述标准频率的下限和上限各延伸一个倍频程。即增加63 Hz和8000 Hz。

频率的高、低的听觉属性是音调，这是主观生理上的等效频率。频率越高，音调越高。

具有某种音调的声音称为音。纯音（或单音）是单频的声音，它的特点是单一音调。敲击音叉或吹奏柔和的低音长笛都可产生单一音调。很多音乐的声音不会只产生一些纯音，乐声包括某些附加的频率，称为复音。在复音中的最低频率称为基音。比基音音调高的成分称为泛音。不同的乐器有不同的泛音。某些乐器比另一些乐器产生更多的泛音。泛音对音调增加了有特色的音质，即为音色。如果我们在钢琴上弹奏基音G时，除了听到基音外，即使不弹奏其它键板，仍能听到其它几个键板的泛音。泛音的数目、突出高峰、音调和强度，汇合成钢琴声的音色。不同的乐器具有不同的音色。人的声带发声，其音色也各不相同。这是我们辨别不同人和乐器的听觉依据。

1.4.2 响度

响度是声音强度这一物理量（客观量）给人的主观感觉。声音响度与声压（声强）有关，声压越大，响度也就越大。但是人耳对不同频率的声音的响度感觉（灵敏度）是不同的，频率越低，灵敏度越差，而频率很高时，则又会降低。

声压级为40 dB对人耳的响度感觉大致如图1-7 (a)所示的曲线。

为了模仿人耳的这一灵敏度特性，在测量声压级的仪器中加入对各种频率具有“计权”性质的网络，由此，可直接读出接近人耳响度感觉的计权声压级，又称A档dB值或A声级dB。

此外，人耳所判断的声音响度，同声压级和频率两者都有关系。例如一个40 dB的1000 Hz纯音，要比声压级相同的100 Hz纯音响得多。要使100 Hz声音听起来和40 dB的1000 Hz声音有同样响度，必须把声压级提高到51 dB；反之，要使1000 Hz声音听起来和40 dB的100 Hz声音有同样的响度，则必须把声压级降低到25 dB。

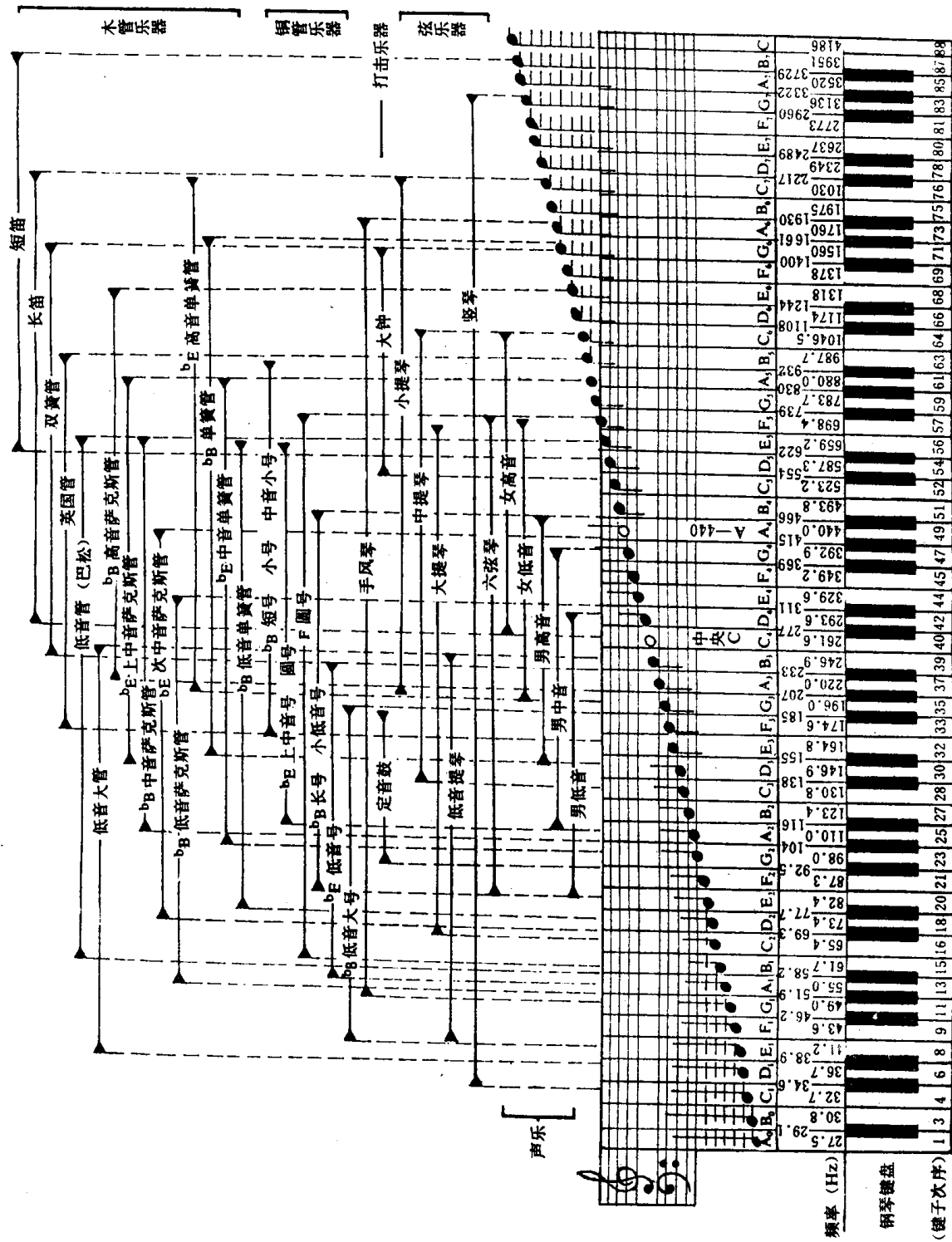
用这种对比试验的方法，可得出如图1-7(b)所示的一组等响曲线，每条曲线代表不同频率和声压级的纯音听起来有相同的响度。为了便于说明和区别各等响曲线，分别加上一个编号，如图中1000 Hz垂直线旁所注明的从0到130所示。在声学上用“响级”表示各个编号，并给出一个单位称为“方”。

由图还可以看出，频率为1000 Hz时，20方和60方等响曲线之间相差40 dB的声压级。在100 Hz时两条曲线只相差30 dB。也就是说，1000 Hz时有40 dB变化引起的响度差别，在100 Hz时只要30 dB的声压级变化便可引起同样的响度差别。

1.4.3 听觉的几个效应

· 双耳听闻效应

人耳在头部的两侧，约距20 cm，由于到达双耳的声音有微小的时间差、强度差和相位



各种乐器和歌声的频率范围图表
图 1-6 各种乐器和歌声的频率范围

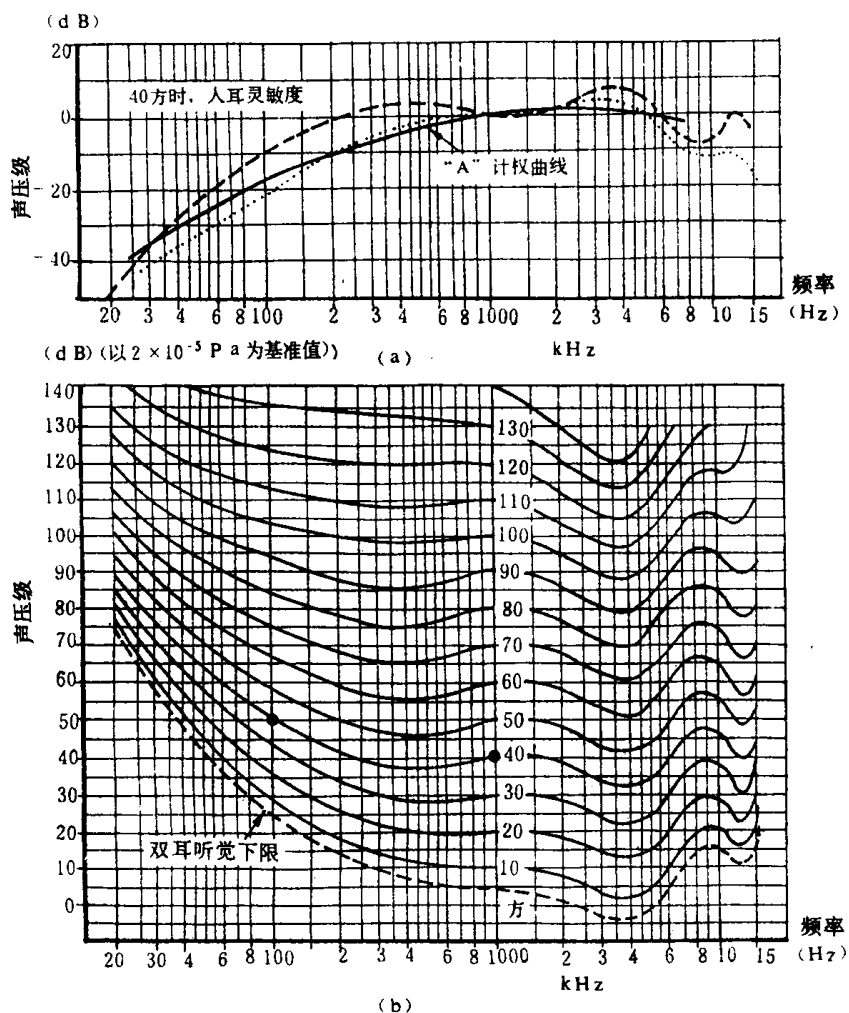


图 1-7 (a) 人耳对不同频率声音的灵敏度
(b) 纯音的等响曲线

差，人们就能辨别声音的方向，确定声源的位置。特别是左右水平方向的分辨方位能力要比上下垂直方向强得多，因而声源左右移动时在两耳处引起的声压、时间和相位的差别比较明显，通常可以分辨出水平方向 5° 到 15° 的变动。但在垂直方向，有时要大到 60° 才能分辨出来。

听觉上具有方位感这一特性，使人们有可能在嘈杂的噪声环境中分辨出来自某个方向的一个比较特殊的声音。单耳听闻就不易辨别声音的方位。

双耳效应在大厅声学设计中占有重要的地位，特别是在录音和广播建筑中，很多声学参数需要考虑这一因素。例如录音棚、播音室的混响时间，由于传声器是单耳听闻。对此，应短于同体积、同用途的大厅（音乐录音棚应短于同体积音乐厅的混响时间；对白录音棚应短于同体积的报告厅的混响时间……等）；噪声标准也是如此，在录音建筑中噪声的允许值应低于同类型的大厅。

目前，剧场观众厅扩声系统中的扬声器倾向于配置在台口上方，也是考虑到人耳左右水平方向的分辨能力远大于上下垂直方向而确定的，从而克服了过去把扬声器组配置在台

口两侧所造成的声音来自侧向的缺陷。

立体声系统也是根据人的双耳效应而发展起来的。

• 掩蔽效应

观众厅中的噪声对语言清晰度的干扰是必须考虑的。

人耳具有一种不寻常的能力，能在噪声环境下有选择性地分出他所感兴趣的某些“信号”，而目前的精密仪器还做不到这一点，这是因为人耳对声音除了有方位感外，还有注意力集中的心理因素。例如我们坐在播放着较响音乐的收音机旁，仍可用不大的声音交谈。当然，这时要求注意力集中才能听清对方的讲话，并且还容易疲劳。这种排除部分噪声干扰（这里把音乐看作干扰噪声）的能力还和噪声的特性有关。

噪声对语言的妨害程度，在声学上称为“掩蔽效应”，它不仅取决于噪声的总声压级大小，而且还取决于它的频率成份和频谱分布，通过实验，我们得到下述规律：

(1) 低音调的声，特别当响度相当大时，会对高音调的声产生较显著的掩蔽作用；

(2) 高音调的声对低音调的声只产生很小的掩蔽作用；

(3) 掩蔽和被掩蔽音的频率越接近，掩蔽作用越大；当它们的频率相同时，一个声对另一个声的掩蔽作用最大。

上述这些规律可用来解释我们日常的经验。例如，很强烈的低频声或杂音（例如通风机噪声或扩音机的交流声），是听报告或音乐时特别令人讨厌的干扰噪声源，因为它几乎对全部可听频率范围的声音都起掩蔽作用。又如观众厅内听众的交谈声，由于频谱和台上报告人的语言频谱有较大的一致性，交谈声所起的掩蔽作用也就很大，成为听报告时最大干扰之一。

• 哈斯效应——回声感觉

从声源直接传来的声音和经一次反射回来的声音，相继到达人耳，其延迟时间小于30ms时，一般人耳不能区分出来，仅能觉察到音色和响度的变化。但当两个相继到达的声音时差超过50ms时（相当于直达声与反射声之间的声程差小于17m），人耳就能判别出

它们来自不同方向的两个独立的声音。这后一个来自反射面的声音，有可能成为回声。回声的感觉会妨碍语言和音乐的良好听闻。因此必须加以控制。

人耳对回声感觉的规律，首先是由哈斯提出的，故称哈斯效应(Haas Effect)。他通过大量的主观评价实验提出了反射声延迟时间与感觉到回声百分率之间的关系。见图1-8所示。图内纵坐标为感觉到回声的百分率(%)，横坐标为直达声与反射声之间的时间差(ms)。曲线上所标的参量为直达声与反射声之间声级差(dB)。

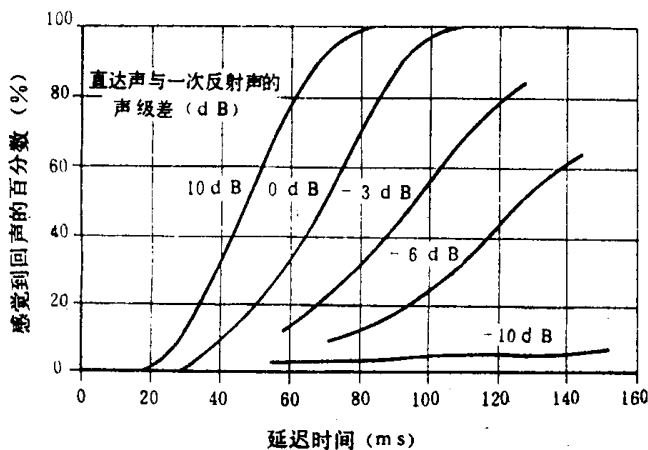


图 1-8 哈斯效应曲线 (根据H.Haas发表的实验结果绘制)

首先分析反射声与直达声具有相同声压级的情况(即0dB曲线)。当延迟时间小于30ms时,几乎没有人能感觉到回声;延迟时间大于70ms,差不多有一半人会感觉出有回声;延迟时间超过100ms时,几乎所有人都能察觉到回声。当反射声强度减弱到直达声以下10dB时,即使延迟时间很长,也几乎没有人能感觉到有回声;如果把两者的延迟时间压缩得很短,则反射声即使声压级高出直达声10dB,也不会有回声的感觉。

1.5 语言和音乐

1.5.1 语言

汉语是单音节的语言,一字一个音节,每个音节由元音(母音)和辅音(子音)组成。元音比辅音容易辨别,因为元音的能量比辅音大得多,持续时间也长得多,频谱特性有明显的特征。平常听报告时主要影响听懂的因素是辅音听错,所以辅音对听懂语言有非常重要的作用。对此,了解有关语言和讲话的知识,对观众厅的声学设计是必不可少的。

· 语言清晰度

语言听闻条件的评定指标是对语言能够听清的程度,即语言清晰度。

在观众厅内的语言清晰度,可用预先规定的字表念出一系列无连贯意义的单音节语言,然后由许多听者将其听到的语音尽可能正确地记下,其听得的正确音节的百分数即称为音节清晰度百分率,可用下式表示:

$$\text{音节清晰度} = \frac{\text{听众正确听到的音节数}}{\text{测定用全部音节数}} \times 100\% \quad (1-13)$$

通常音节清晰度在85%以上可以认为满意;60%以下感到费力、难懂;在60~80%之间,听众需要注意力集中才能听清。

· 语言功率

讲话发出的声能大小用语言功率表示,单位为微瓦(μW)。语言功率通常是指某一时刻的瞬时峰值。对于决定清晰易懂的辅音来说,它比平均值或瞬时峰值低得多。

一般人讲话时发出的能量极为微小,长时间平均的语言功率约为30~50 μW ,其中有1%的时间可达500~750 μW 左右。至于轻声耳语的功率仅有0.01 μW 。

讲话中从最低到最高的语言功率的变动范围称为动态范围。根据统计分析,在一段时间内讲话的动态范围约比“平均语言声级”高出12dB,其最弱音节约在平均语言声级以下18dB。

根据一些测量资料得出,在讲话者头部正前方1m处长时间间隔的平均声压级的统计结果是:

用正常嗓子讲话时为66dB;

提高嗓门讲话时为72dB;

尽量提高嗓门而又不致于声嘶力竭时为78dB;

喊叫时达到84dB。

距离增加一倍(或减少一半),声压级减小(或增加)约6dB。

受过专业训练的演员,对白时的声级通常高于一般人讲话时的声级。男女声对白时的平均声功率可参考表1-2所提供的值。

演员对白时的声功率

表 1-2

类别	对白时声功率 (μW) 的统计值	
	短时间 [(1/8)s] 平均声功率	长时间 (60s) 平均声功率
男 声	$>230\mu\text{W}$	$34\mu\text{W}$ (共 5 人, $10\sim 91\mu\text{W}$)
女 声	$>150\mu\text{W}$	$18\mu\text{W}$ (共 6 人, $8\sim 55\mu\text{W}$)

• 语言的频率范围

语声主要由声带振动所产生。男子声带长而厚，发声频率较低，基音约为150Hz。女声的基音约为230Hz。对于歌唱家，男低音的基频可低至55Hz；女高音的基音（频）可高至1000Hz。同时，发出的许多泛音（谐波）也要高得多，有的甚至超出6000Hz。

由于语言的频率范围并不很宽。因此，在剧场观众厅建筑中，用于语言的扩声设备只要有300~4000Hz的平直的频响范围，原则上已经可以满足要求。但考虑到作为以语言清晰度为主的大厅中有时也要放送一些音乐节目（如转播广播电台、放唱片、录音之类的节目），适当放宽频率范围便可以兼顾音乐的效果。实际上，100~4000Hz这样宽的频带的扩声设备是很普通的，因此是容易实施的。

• 语言的方向性

人在讲话时，并不是均匀地向四周辐射声音的，而是正面最响，背后最轻，也即沿着嘴唇前面有一定的方向性，频率愈高，这种方向性愈明显。因此，站在讲话者后面或侧面的人，由于直射声中缺少很重要的高频成份，很难听清听懂。如果适当地在讲话者的周围加设反射面，可以提高讲话者后面的清晰度，但高频声比低频声更容易被墙面材料和空气所吸收，所以在讲话者后面时听起来总是比较差些。

演员在舞台上的对白或演唱，随频率的高低都带有方向性。图1-9即为演员发声时嘴的水平面指向性图案。

1.5.2 音乐

作为音乐、戏曲演出的观众厅在音质要求上显然与以语言清晰度为主的观众厅不同，因为语言与音乐的声学特性和评价标准有较大的差别。因此，在进行设计以音乐演出为主的大厅时，首先要了解有关音乐的声学特性。

• 音乐的物理特性

从物理特性分析，音乐（包括声乐）和语言有下述差别：

（1）音乐的频率范围比语言要宽得多，大约从40Hz到15000Hz；各种乐器也有较大的差别，见图1-6所示；

（2）音乐的泛音（谐波）成份和结构比语言复杂，音色也丰富得多；

（3）音乐的节奏变化比语言大得多；

（4）乐器产生的声功率一般比讲话大，演唱时能产生较大的声功率；

（5）音乐的音量动态范围比语言大，通常有50dB左右，交响乐的动态范围则更大，有时可达70dB。

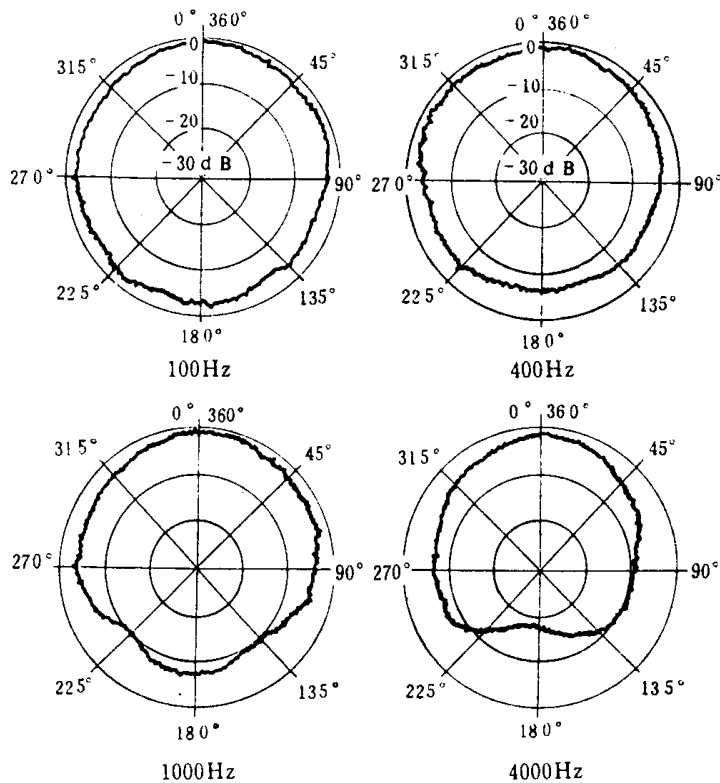


图 1-9 演员讲话时，4 个频率的水平面指向性图案

• 乐器和演唱的声压级

乐器演奏或演唱时的声级高低，对确定音乐厅、剧场、录音棚、音乐排练厅和练琴室等建筑的围护结构所需的隔声量，以及室内吸声处理都是必不可少的数据，对确定大厅和音乐录音棚内的允许噪声级也是重要的参考资料。

确定乐器的声级是很复杂和困难的问题。原因在于乐器声级的高低不仅与乐器本身和演奏（吹、弹、拨和打击）的力度、速度、和弦与节奏有关，同时还与被演奏的曲调密切相关。因此，如何确定和表达乐器声级是值得探讨的问题。我们为了工程设计上的需要，在一个比较接近实际的特定条件下进行了测定，这些条件是：

(1) 测试房间为一不规则室形的琴室，有效容积 35 m^3 ，中频混响时间为 1.0 s ，具有接近平直的混响频率特性曲线；房间的频率不均匀度 F 为：声源（乐器）位置 $\bar{F} = 1.35\text{ dB/Hz}$ ，传声器（接收点）位置 $\bar{F} = 1.5\text{ dB/Hz}$ ；

(2) 测定时，均用中等力度、速度， C 调演奏同一乐曲；

(3) 传声器离声源（乐器或演唱者） 1.0 m （直线距离），高 1.6 m ；声源置于房间钝角的位置，离墙角 1.2 m ；

(4) 乐器（或演唱）在演奏（唱）过程中，声级随时间而变化，因此，在演奏（唱）的全过程中用统计分析仪记录声级出现的几率，然后求得其统计值；

(5) 测试仪器均采用丹麦B&K公司生产的仪器。

测定的结果分列于表1-3、表1-4和表1-5。

西乐声级统计值

表 1-3

乐器名称	乐器声级 (dB)		乐器名称	乐器声级 (dB)	
	Lin	A		Lin	A
小号	101.3	101.0	低音提琴	82.0	74.8
拉管	94.3	93.7	大提琴	87.0	86.4
圆号	94.1	90.7	中音提琴	84.5	82.1
大管	89.1	88.5	小提琴	78.4	77.3
单簧管	86.1	84.0	钢琴	92.0	87.4
双簧管	83.8	82.5	定音鼓	107.4	—
长笛	85.6	87.9	小军鼓	94.3	94.2

民乐声级的统计值

表 1-4

乐器名称	乐器声级 (dB)		乐器名称	乐器声级 (dB)	
	Lin	A		Lin	A
扬琴	90.7	92.7	琵琶	83.1	84.0
筝	89.4	85.1	笛子	87.4	86.2
板胡	83.8	86.4	笙	90.8	89.5
二胡	85.1	79.0	管子	90.2	90.4
三弦	93.9	92.7	锣	108.1	108.6

演唱声级的统计值

表 1-5

类别	演唱歌曲	演唱声级 (dB)	
		Lin	A
女中音	“我们是革命的新一代”	79.4	79.3
女高音	“北京颂歌”	85.0	85.9
男低音	“草原上升起不落的太阳”	90.3	89.8
男高音	“草原上升起不落的太阳”	88.6	89.3

• 乐器和演唱声级的动态范围

乐器和演唱声级的动态范围，在剧场观众厅的声学设计中是很重要的数据。它的下限

是确定大厅（以音乐演奏为主）允许噪声级的根据，而它的上限则是选择围护结构隔声量和控制噪声的依据。此外，动态范围在录音和广播技术中也是很需要的数据。

现将测得的乐器和演唱声级动态范围列于表1-6内。

乐器和演唱声级的动态范围^①

表 1-6

乐器名称	动态范围 (dB)	乐器名称	动态范围 (dB)
西乐: 小号	60~104	民乐: 杨琴	80~102
拉管	64~108	箏	65~95
圆号	62~106	板胡	48~100
大管	54~95	二胡	50~98
单簧管	58~92	三弦	60~101
双簧管	50~98	琵琶	46~93
长笛	49~98	笛子	59~100
低音提琴	48~90	笙	60~103
大提琴	60~94	管子	60~100
中音提琴	50~95	锣	95~110
小提琴	49~90	演唱: 女中音	60~90
钢琴	70~100	女高音	58~100
定音鼓	60~110	男低音	60~102
小军鼓	75~85	男高音	60~100

① 声源离传声器1.0m, 中等力度。

· 演员演唱和乐器演奏时的声功率

为计算观众厅内的声级，确定厅内声场分布的状况，就需具备演唱和乐器演奏时的声功率值。表1-7、表1-8提供了歌唱和京剧演员及乐器演奏时的声功率。

演员演唱时的最大声功率

表 1-7

歌唱演员	演唱时的声功率 (μW)	京剧演员	演唱时的声功率 (μW)
女中音	200~1100	青衣	200~20000
女高音	100~20000	老旦	80~50000
男低音	50~5000	小生	700~80000
男中音	80~40000	老生	280~7000
男高音	200~30000	花脸	700~50000

乐器演奏时的声功率

表 1-8

乐 器	演奏时的声功率 (W)	乐 器	演奏时的声功率 (W)
75名乐师乐团	70	小 号	0.3
低 音 鼓	25	大 号	0.2
管 风 琴	13	低音大提琴	0.16
小 鼓	12	短 笛	80mW
拉 管	6	单 簧 管	50mW
钢 琴	0.4	长 笛	30mW

1.6 室内声学

声波在封闭空间中的传播及其特性比在露天的场合更为复杂。声源在室内发声与传播，界面的反射、吸收、扩散和透射，形成室内声学的特点。

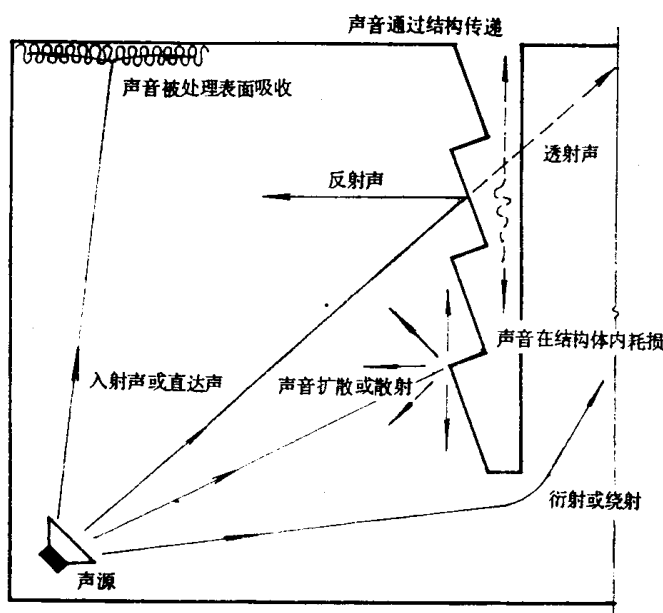


图 1-10 在封闭空间内的声学特性

于反射角（反射定律），这种声反射现象与光反射十分相似。然而，应当指出：声波的波长远大于光波，只有声波波长小于反射面的尺寸时，声反射定律才成立。这意味着应用此定律时，必须认真考虑对低频声波的作用。

在室内，凸弧形反射面使声波散射；凹弧形反射面产生声聚焦。见图 1-11 所示。

在大、中型厅堂内，于适当位置装设大型声反射面，可以有效地改善听闻条件（参见第 6 章）。

如果用垂直于波阵面的假想声线代替向外扩散的压缩和稀疏层，并假设这些声线象光束一样向各个方向直线传播，则可简化室内声波特性的研究工作。这种把声波的特性视同光线一样的方法，在建筑声学中称为几何声学。图 1-10 形象地说明，当声波入射到室内声学特性不同的各界面时，一部分声能被反射、吸收、散射、衍射和透射到邻近空间的状况。

1.6.1 声反射

当声波在前进的方向上碰到坚硬的壁面时，几乎把所有的入射声能反射出来。由于声线的入射与反射都在同一个平面上，而且声波的入射角等

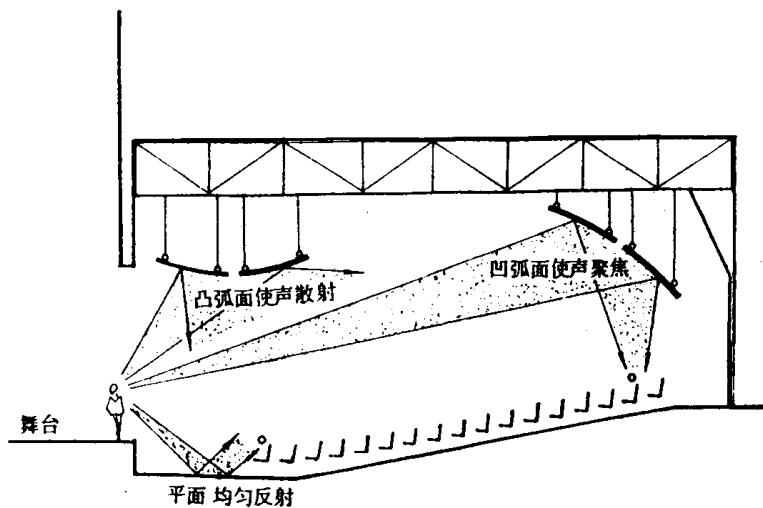


图 1-11 会堂内不同形状表面的声反射

1.6.2 室内声场与声压级计算

当一声源在室内发声时，声波由声源到室内各部位形成了复杂的声场。对于任一部位所接收到的声音可以简单地看做由直达声、近次（早期）反射声和混响声三部分组成。如果室内各部位的声压相同，且室内声波是无规则地在各个方向传播，这种声场可以说是均匀的，也可称室内达到声扩散。对某些建筑来说，例如音乐厅、录音和播音建筑等，从音质特性来说，需要均匀的声场分布，这对加强音乐和语言声本身的音色，以及避免出现某些音质缺陷是十分重要的。

为使室内达到扩散声场，可用图1-12内所示的三种方法即：

- A. 把厅堂内表面处理成不规则形体，或设置扩散体；
- B. 在墙面上交替地作声反射与声吸收处理；
- C. 无规则地配置吸声材料或结构。

在室内声场充分扩散的条件下，已知声源功率，则可利用下述稳态声压级公式计算离开声源不同距离处的声压级，即：

$$L_p = 10 \lg W + 10 \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) + 120 \text{ dB} \quad (1-14)$$

- 式中 W —— 为声源的声功率 (W , $1 W = 10^6 \mu W$);
- r —— 离开声源的距离 (m);
- R —— 房间常数, $R = \frac{S\bar{a}}{1 - \bar{a}}$ (m^2, sab);
- \bar{a} —— 室内平均吸声系数;
- S —— 室内总表面积 (m^2);

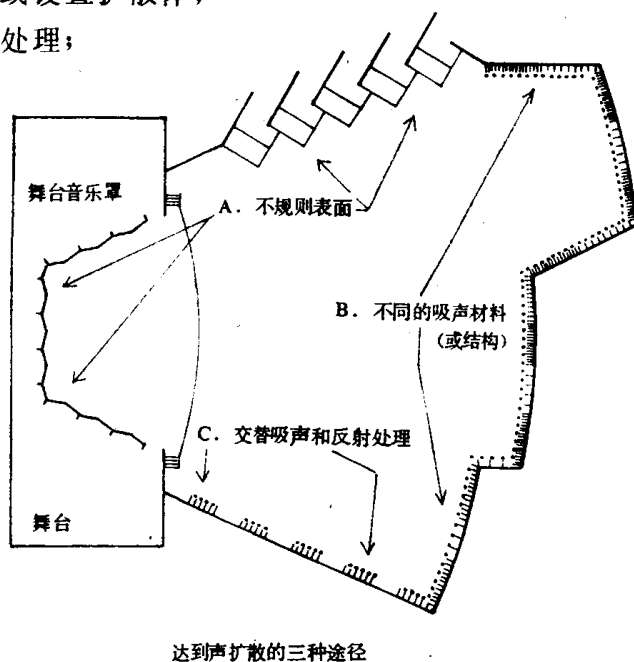


图 1-12 厅堂声扩散的处理方法