

室内设计与建筑装饰专业教学丛书暨高级培训教材

室内环境与设备

浙 江 大 学	吴 硕 贤	葛 坚	张 三 明	编 著
上 海 交 通 大 学	夏 清			
	吴 硕 贤	夏 清		主 编

中 国 建 筑 工 业 出 版 社

编 者 的 话

面向即将来临的 21 世纪,我国将迎来一个经济、信息、科技、文化都高度发展的兴旺时期,社会的物质和精神生活也都会提到一个新的高度,相应地人们对自身所处的生活、生产活动环境的质量,也必将在安全、健康、舒适、美观等方面提出更高的要求。因此设计创造一个既具科学性,又有艺术性;既能满足功能要求,又有文化内涵,以人为本,亦情亦理的现代室内环境,将是我们室内设计师的任务。

这套可供高等院校室内设计和建筑装饰专业教学及高级技术人才培养用的系列丛书首批出版 8 本:《室内设计原理》(上册为基本原理,下册为基本类型)、《室内设计表现图技法》、《人体工程学与室内设计》、《室内环境与设备》、《家具与陈设》、《室内绿化与内庭》、《建筑装饰构造》等;尚有《室内设计发展史》、《建筑室内装饰艺术》、《环境心理学与室内设计》、《室内设计计算机的应用》、《建筑装饰材料》等将于后期陆续出版。

这套系列丛书由我国高等院校中具有丰富教学经验,长期进行工程实践,具有深厚专业理论修养的作者编写,内容力求科学、系统,重视基础知识和基本理论的阐述,还介绍了许多优秀的实例,理论联系实际,并反映和汲取国内外近年来学科发展的新的观念和成就。希望这套系列丛书的出版,能适应我国室内设计与建筑装饰事业深入发展的需要,并能对系统学习室内设计这一新兴学科的院校学生、专业人员和广大读者有所裨益。

本套丛书的出版,还得到了清华大学王炜钰教授、北京市建筑设计研究院刘振宏高级建筑师及中央工艺美术学院罗无逸教授的热情支持,谨此一并致谢。

由于室内设计社会实践的飞速发展,学科理论不断深化,加以编写时间紧迫,书中肯定会存在不少不足之处,真诚希望有关专家学者和广大读者给予批评指正,我们将于今后的版本中不断修改和完善。

编 委 会

室内设计与建筑装饰专业教学丛书暨
高级培训教材编委会成员名单

主任委员：

同济大学 来增祥教授

副主任委员：

重庆建筑大学 万钟英教授

委员（按姓氏笔画排序）：

同济大学 庄荣教授

同济大学 刘盛璜副教授

浙江大学 吴硕贤教授

重庆建筑大学 陆震纬教授

浙江大学 屠兰芬教授

重庆建筑大学 符宗荣副教授

同济大学 韩建新副教授

第一篇 室内声环境

第一章 室内声学原理

第一节 室内声学基本计量

一、室内声学基本物理量

声音是在气体、液体或固体等弹性介质中以波动形式传播的机械振动。在室内声学中，主要涉及声音在空气中的传播。声音在空气中的传播速度当空气为 22℃ 时，等于 344m/s，在常温条件下，空气中的声速为 340m/s。

声音是由声源的振动引起的。声源在 1s 内完成的全振动次数称为频率。它决定了声音的主调，符号为 f ，单位是赫〔兹〕(Hz)。频率的倒数，即声源完成一次全振动的时间称为周期，符号为 T ，单位是秒 (s)。

在声波传播途径上，两相邻同位相质点之间的距离称为波长，符号为 λ ，单位是米 (m)。位相指的是媒质质点的振动状态，如处于压缩或稀疏状态等。

声波的传播速度 c 、波长 λ 及振动频率 f 之间有如下关系：

$$\lambda = c/f \quad (1-1)$$

由此公式不难计算出各频率声音所对应的波长。在室内声学中感兴趣的声频率通常从 63~10000Hz，相应的波长为 5.4~0.034m。

声波沿运动方向传播能量。单位时间通过垂直于声音传播方向上单位面积的平均声能通量称为声强，符号是 I 。声强按下式确定：

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (1-2)$$

式中 I —— 声强 (W/m^2)；

p —— 声压的均方根值 (Pa)；

ρc —— 介质的声阻抗率，又称空气特性阻抗。在空气中， ρc 值大约为 $412 \text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$ 。

单位时间内声源向周围空间所辐射的声能量称为声功率。在自由声场中，点声源发出的球面波均匀地向四周辐射声能，因此，距离声源中心 $r\text{m}$ 的球面上的声强为：

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

式中 I —— 声强 (W/m^2)；

W —— 声源声功率 (W)。

由式 (1-3) 可看出， I 与离开声源的距离 r 的平方成反比地衰减。这称为几何衰减。这种衰减并未考虑空气对声能的吸收，是由于球面波波阵面的扩大所引起的声强的减少。

声强级是声强与基准声强之比的以 10 为底的对数的 10 倍：

$$L_1 = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (1-4)$$

式中 L_1 —— 声强级 (dB)；

I_0 —— 基准声强,在空气声中, I_0 规定为 10^{-12}W/m^2 。它相应于人耳对 1000Hz 声音的可听(闻阈)声强。

声波在空气中传播时,空气媒质某点(体积元)由于受声波扰动后压强超过原先大气静压强的值,称为声压。一般使用时,声压是有效声压的简称,即指对一定时间间隔取瞬时声压的均方根值。人的可闻声压的最小值 p_0 及最大值 $p_{\max}$ 分别称为闻阈和痛阈。在 1000Hz 时,闻阈为 $2\times 10^{-5}\text{Pa}$,痛阈为 $2\times 10^2\text{Pa}$,可见声压痛阈超过闻阈达 10^7 倍。人耳不能仔细区分这样大数值范围的声压,同时计算上也不方便。所以通常采用对数标度,用分贝为单位来评价这个巨大的声压值范围。这就是采用声压级和声强级的原因。

声压级是声压与基准声压之比的以 10 为底的对数的 20 倍：

$$L_p=10\lg \frac{p^2}{p_0^2}=20\lg \frac{p}{p_0} \tag{1-5}$$

式中 L_p —— 声压级 (dB)；

p_0 —— 基准声压。对于空气声,基准声压规定为 $2\times 10^{-5}\text{Pa}$ 。

在自由声场,声压级近似等于声强级：

$$L_p\approx L_1 \tag{1-6}$$

声源的声功率是单位时间内声源辐射的总声能量,单位是瓦 (W)。声功率级是声源声功率与基准声功率之比的以 10 为底的对数的 10 倍：

$$L_w=10\lg \frac{W}{W_0} \tag{1-7}$$

式中 L_w —— 声功率 (dB)；

W_0 —— 基准声功率,规定为 10^{-12}W 。

表 1-1 给出室内一些典型声源的声功率。

典型声源的声功率				表 1-1
声 源	声 功 率	声 源	声 功 率	
75 人乐队	70W	女高音	100~200000μW	
钢琴	0.4W	男高音	200~30000μW	
小号	0.3W	平均语声	20~50μW	
小提琴最轻声	3.8μW	耳语	10 ⁻⁹ W	

几个声源总声级的计算,如果声源相同,则叠加后总声压级为：

$$L=L_1+10\lg n \tag{1-8}$$

式中 L_1 —— 一个声源单独作用时的声级；

n —— 声源数目。

声级为 L_1 及 L_2 ($L_1>L_2$) 的两个声源共同作用时的叠加声级为：

$$L=L_1+\Delta L \tag{1-9}$$

式中 ΔL —— 与声级差有关的修正值,按表 1-2 选用。

与声级差有关的修正值 (dB)											表 1-2
两个声源声级差	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
较大声级 L_1 的附加值 ΔL	3	2.5	2.1	1.8	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4

二、计权网络和频谱

通常用声级计来测量声压级。由于人耳对中高频声音较敏感,对低频声音较不敏感,为了得到比声压级能更好地与人耳响度判别密切相关的声级值,在声级计中加进了“频率计权网络”。这些网络改变了声级计对不同频率声波的敏感性,有 A、B、C、D 计权网络。其中最常用的是 A 计权网络,因为它能较好地模仿人耳

的频率响应特性。用 A 计权测得的声级称为 A 计权声级，简称 A 声级，单位是 dB (A)。各计权网络的频率计权曲线如图 1-1 所示。

通常人们听到的声音可以由组成它的分音的频率和强度所构成的频谱来表示。按不同声音的特性，其频谱可以是线状谱（如乐器发出的声音）或连续谱（如大多数噪声）。

由于人耳可听频率范围大约从 20~20000Hz，实用上不可能测量这个范围中的每一频率的声压级。测量总是在某一频率区间进行的。这个频率区间称为频带，由下限频率 f_1 和上限频率 f_2 规定带宽。 f_1 、 f_2 又称截止频率。声学中常用的频带宽是倍频带，或称倍频程。一个倍频带是上限频率为下限频率两倍的频带，即 $f_2=2f_1$ 。另一常用频带宽是 1/3 倍频程，即 $f_2=\sqrt[3]{2} f_1$ 的频带。通常用中心频率来指称各频率区间。中心频率是截止频率的几何平均：

$$f_m=\sqrt{f_1f_2}$$

(1-10)

在室内声学中常用的倍频程与 1/3 倍频程的中心频率和截止频率见表 1-3、表 1-4。

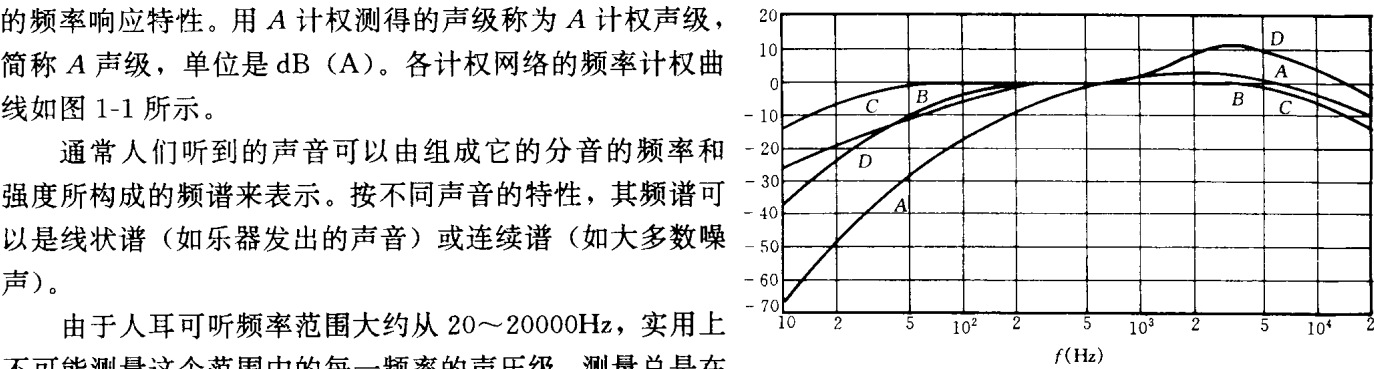


图 1-1 频率计权曲线

倍频程的中心频率与截止频率 (Hz)				表 1-3	
中心频率 f_m	下限频率 f_1	上限频率 f_2	中心频率 f_m	下限频率 f_1	上限频率 f_2
63	45	89	1000	707	1414
125	89	178	2000	1411	2822
250	178	355	4000	2815	5630
500	354	709	8000	5617	11233

1/3 倍频程的中心频率与截止频率 (Hz)				表 1-4	
中心频率 f_m	下限频率 f_1	上限频率 f_2	中心频率 f_m	下限频率 f_1	上限频率 f_2
63	56	71	800	708	892
80	71	89	1000	891	1122
100	89	112	1250	1122	1413
125	112	141	1600	1412	1779
160	141	178	2000	1778	2240
200	178	224	2500	2238	2820
250	224	282	3150	2817	3550
315	282	355	4000	3547	4469
400	355	447	5000	4465	5626
500	447	563	6300	5621	7082
630	562	708	8000	7077	8916

三、等 效 声 级

人们在建筑环境中常遇到两类噪声源：稳定声源和不稳定声源。一些声源稳定地发声，如其发出的噪声级随时间的变化不大于 5dB，即可认为是稳定的。声级随时间变化大于 5dB 的不稳定噪声通常用等效声级 L_{eq} 来评价。等效声级按下式计算：

$$L_{eq} = 10\lg\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1L_{p_i}}\right)$$

(1-11)

式中 L_{eq} ——等效声级 (dB)；
 L_{p_i} ——每次测得的声级值 (dB)；

n —— 读取声级值的总次数。

当 L_p 用 A 计权网络测量时，测得或计算求得的等效声级称为 A 计权等效声级，用 L_{Aeq} 表示。

第二节 听 觉 特 性

一、最小和最大可听声压

人耳可以加以接受的声压变化范围很大。在中频范围，人的最小可听极限大致相当于声压级 0dB。在高声级作用下，人耳会有不舒服以至疼痛的感觉。通常，声压级在 120dB 左右，人就会感到不舒服；130dB 左右会引起耳内发痒；达到 140dB，耳内会感觉疼痛。声压级继续升高，可引起耳内出血，甚至导致听觉器官永久性损伤。

二、最小声压可辨阈

对于频率在 50~10000Hz 之间的纯音，当声压级超过 50dB 时，人耳大致可以鉴别 1dB 的声压级变化。

三、哈斯效应与回声感觉

如有两个声源发出同样的声音，在同一时刻以同样强度到达人耳，则声音呈现的方向大致在两个声源之间。如果其中一个声音略微延迟 5~35ms，则听起来所有声音似乎都来自第一个声源。如果延时在 35~50ms 之间，则延时声源可以被识别，但其方向仍在未经延时的声源方向。只有当延时超过 50ms 时，第二声源才被听到。人耳的这一听觉特性称为哈斯效应。据此，人耳在听到直达声后，如果存在一个延迟时间长于 50ms，又具有足够强度的反射声，就会被感觉到是个回声。这种回声通常引起听闻的干扰，是应该加以避免的。

四、听 觉 定 位

人耳的一个重要特性是能判断声源的方向和远近。人耳辨别声源的方向相当准确，但判别声源远近的准确度则较差。听觉定位是由于双耳听闻引起的，包括声波到达两耳所产生的时间差和强度差。在安静无回声的环境，当声源处于正前方时，人耳对声源方位的辨别，在水平方向上比竖直方向上要好。正常人可辨别 1°~3° 水平方位的变化。在水平方位角 0°~60° 范围内，人耳有良好的方位辨别力，超过 60° 就变差。对竖直方位，可能要在声源变化达 10°~15° 以上时才能辨别。

人耳对声源的定位还常受视觉的影响。如果人能看到声源位置，则只要声象位置偏离视觉声源位置不是很大，感觉上听觉和视觉还是一致的。

五、人耳的频率响应和等响曲线

响度是人对声音强弱的主观评价指标。影响响度感觉的客观物理量是声波的振幅。但响度与振幅并不完全一致，原因是人对不同频率声音的响度感觉（灵敏度）不同。一般说来，人耳对 2000~4000Hz 的声音最敏感，频率越低，灵敏度越差；而频率很高时，灵敏度也会变差。因此，对相同声压级而频率不同的声音，人耳听起来是不一样响的。反之，不同频率的声音听起来要具有同样的响度，就必须具有不同的声压级。图 1-2 是纯音等响曲线。它表明听起来与具有某个声压级的 1000Hz 纯音同样响的其他频率纯音所应具有各自的声压级。

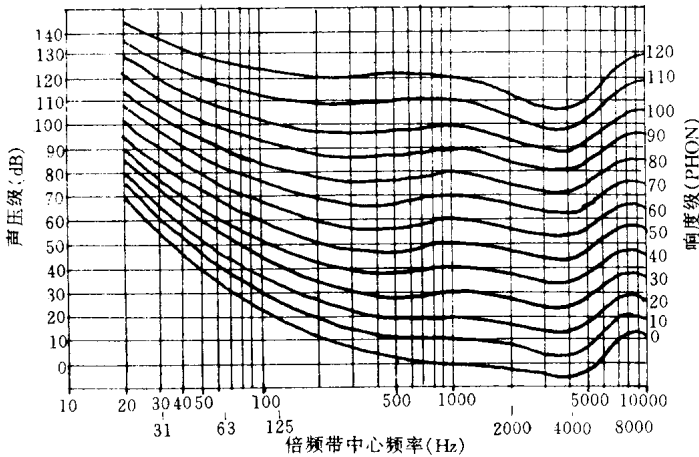


图 1-2 纯音等响曲线

六、掩 蔽 效 应

人耳在倾听一个声音的同时,如果存在另外一个声音(称为掩蔽声),就会影响到人耳对所听声音的听闻效果。这时对所听声音的听阈(即声音的声压级)就要提高。这种由于另一个声音的存在而使人耳的听觉灵敏度降低的现象,称为掩蔽效应。听阈提高的分贝数称为掩蔽量,提高后的听阈称为掩蔽阈。因此,在噪声环境下,一个声音要能被听到,其声压级必须大于掩蔽阈。

一个声音对另一个声音掩蔽量大小,主要取决于两者的频谱和声压级差。一般而言,低音调的声音,当响度相当大时,会对高音调的声音产生较显著的掩蔽作用;而高音调的声音对低音调的声音则只产生很小的掩蔽作用;掩蔽声和被掩蔽声的频率越接近,则掩蔽作用越大。在室内声学中,往往要避免噪声对有用声信号的掩蔽。但有时也可利用背景噪声的掩蔽来保证语言通讯的私密度。

七、人耳的音高和音色感觉

音高又称音调,是人耳对声音调子高低的主观感觉。决定它的客观物理量是声音的频率。频率增加一倍,音调的变化即提高了“八度音”。

有些收录机、扩音机面板上装有“音调控制”旋钮。其作用是把各频段声音的相对声压级进行调整,使得声音听起来有所变化。但声音的频率并无改变,因此音调并无变化,只是音色改变了。因此,称它为“音色控制”旋钮更为恰当。

人耳除对响度(音量)、音高有明显的辨别力外,还能准确地判别音色。演奏相同音高的小提琴和钢琴声听起来所以不同,就是因为其音色不同的缘故。音色主要是由声音的频谱所决定的。乐音中包含着基频(由它决定音调),和与之成整数倍关系的谐频,亦称为泛音。不同乐器和演员发出的声音具有不同的泛音结构,由此决定了音色的差别。

八、听觉疲劳和听力损失

人耳在高声强环境下呆上一段时间,会出现听阈提高的现象,即听力有所下降。如果这种情况持续时间不长,回到安静环境中,听力会慢慢恢复。这种暂时性的听阈提高现象,称为听觉疲劳。如果听阈的提高是不可恢复的,则称为听力损失。如果人耳暴露于极强的噪声中,还会造成内耳器官组织的损害,导致一定程度永久性听力损失,严重的甚至导致耳聋。这称为声损伤。人们由于长期在噪声环境下生活,还会出现随年龄增长听力逐渐衰退的现象。

暂时性听阈提高值随声压级提高和暴露时间增加而增大。不至于产生听阈提高的倍频带噪声,在低频(250~500Hz 倍频带)时,应小于 75dB;在中、高频(1000、2000 和 4000Hz 倍频带)时,应小于 70dB。国际标准化组织建议以 85~90dBA 的等效声级值作为不致产生永久性听力损失的噪声级上限。如果长期处于超过 90dBA 的强噪声环境,听觉疲劳难以消除,就可能造成永久性听力损失。

第三节 室内几何声学

一、声线概念

声源在自由空间(指无任何反射面存在的空间)传播时,人们听到的只有来自声源的直达声。而当声源在室内空间传播时,声波在边界面将经历反射、散射、吸收、干涉等现象。人们在室内听到的除了直达声外,还有来自天花板、墙壁和地板各界面反射一次乃至多次的反射声。这些反射声的总和称为混响声。因此,室内声传播要复杂得多。

描述室内声传播可以采用波动声学、统计声学和几何声学的方法。其中几何声学是对中、高频声波传播规律的近似描述。因为它具有简明直观的优点,故常为室内声学所乐于采用。本书主要介绍几何声学的方法。

在几何声学中常用声线的概念来代替声波的概念。声线代表点声源发出的球面波的一小部分。它具有明确的传播方向，携带有声能，并且以声速前进，沿直线传播。碰到界面时，声能被部分吸收，其余按反射角等于入射角的规则反射（碰到界面凹凸不平时，还有散射的现象发生）。因此，几何声学不考虑声波因位相关系引起的干涉，也不考虑声波的衍射（绕射）。几何声学一般适用于当声波传播的距离和界面尺度远大于波长的场合，在一般室内声学中，它是足够好的近似。

二、虚 声 源 法

几何声线作图法有两种，其本质都是一样的。一种是利用反射角等于入射角，分处于界面法线两侧的规则作图；一种是利用虚声源法，将界面用相应的虚声源来代替。因此，来自界面的反射声线被认为是由虚声源发出的声线。为了阐明这一点，我们先来看看点声源位于一刚性界面的情况。由于界面是理想刚性的，故认为界面不吸收声能（见图 1-3）。

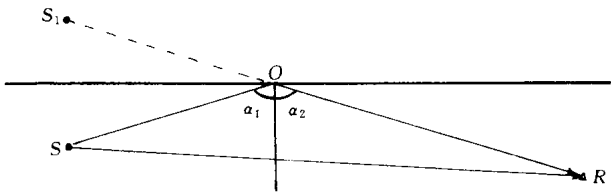


图 1-3 位于刚性界面前的点声源

从图 1-3 可看出，受声者 R 接收到的，除了直达声 SR 外，还有经由墙面的反射声 SOR 。反射角 α_2 与入射角 α_1 分处于墙面法线的两侧，并且 $\alpha_2 = \alpha_1$ 。另外，反射声线 SOR 也可以认为是由声源 S 的虚声源 S_1 发出的。 S_1 位于墙面外侧，与 S 形成镜象对称的关系。引入虚声源 S_1 是由于要满足刚性界面在声压作用下不动的边界条件，所以必须有一对称的虚声源 S_1 ，在另一侧对墙辐射相同的声压，以抵销 S 的作用。换言之，引入虚声源 S_1 ，墙就可以被移走，其作用完全可由 S_1 的作用所等效。

我们再来看看点声源被置于一对平行刚性墙间的情形（见图 1-4）。

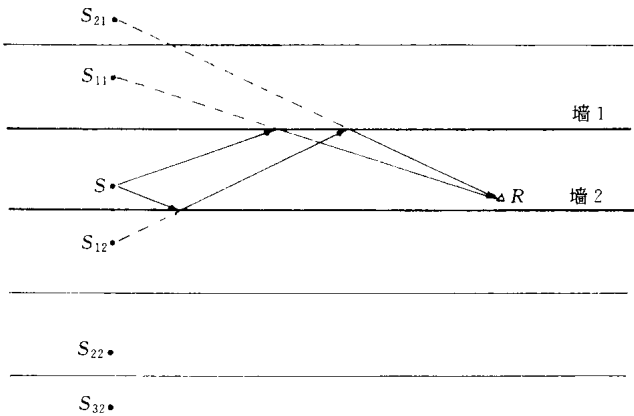


图 1-4 由平行墙生成的虚声源链

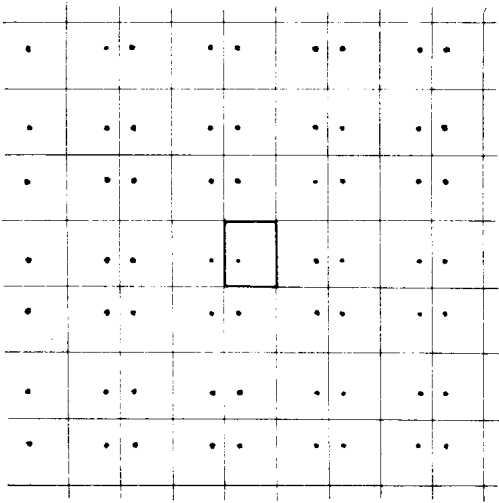


图 1-5 矩形房间的虚声源点阵

由图 1-4 可看出，引入墙 2 以后，声场更为复杂了。这时，不仅增加了与墙 2 相应的另一个一阶虚声源 S_{12} ，而且为了满足墙 1 边界不动的条件，由于墙 1 下方除了声源 S 外，还有虚声源 S_{12} ，而上方只有虚声源 S_{11} ，不构成对称关系，所以尚须补充与 S_{12} 关于墙 1 对称的二阶虚声源 S_{21} 。但这时，墙 2 的边界条件又得不到满足，所以尚须在墙 2 下方补充二阶虚声源 S_{22} 和三阶虚声源 S_{32} ，余类推。继续延长这种虚声源的形成系列，就交替地得到在一个墙上满足边界条件而在另一个墙上不满足边界条件的情形。仅当虚声源系列为无穷多时，两个墙上的边界条件方才都被满足。因此，当声源被置于一对刚硬墙面内部空间时，若引入一无穷多的虚声源链，则这时这对墙就可以被移去，其对声场的作用可由这一虚声源链所等效。当然，随着虚声源阶次的提高，其离开受声者的距离越来越远，由于几何衰减，其对受声者的声能贡献就越来越小。通常对三阶以上虚声源的作用就可以略去不计。从图 1-4 还可看出，二阶虚声源的作用，相当于二次反射声的作用，同样， n 阶虚声源

的作用，相当于 n 次反射声的作用。

类似地，如果在一个由三对平行刚性界面构成的矩形房间中引入一个声源，则矩形房间的作用可被三维的虚声源点阵所代替，见图 1-5。图 1-5 中仅画出二维平面的虚声源点阵。

第四节 室内声增长和声衰变

一、室内声增长

由图 1-5 可看出，室内的听众除了接收到来自声源的直达声外，还接收到来自一阶、二阶乃至高阶虚声源的一次、二次和多次反射声。由于这些虚声源离听众的距离越来越远，其到达听众的时间将迟于直达声，又由于几何衰减的缘故，其相应的声强和声压级也越来越小。将直达声和各次反射声依到达时间（和声压级）排列起来，就构成所谓脉冲响应图，见图 1-6。

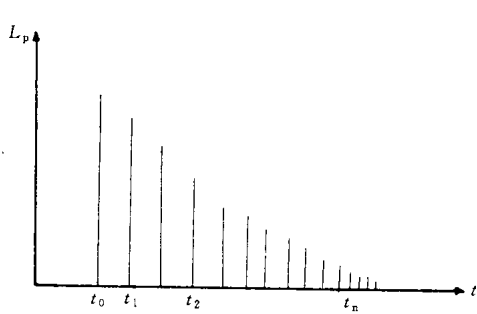


图 1-6 脉冲响应图

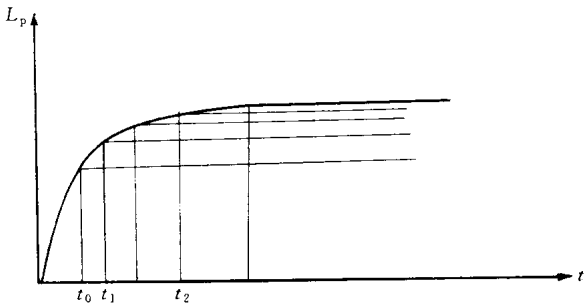


图 1-7 室内稳态声能的增长

图 1-6 中， t_0 表示直达声到达时刻， t_1 、 t_2 …… t_n 依次表示一次、二次及 n 次反射声到达时刻（注意，各同次反射声有时不止一个），纵坐标表示相应的声压级。

如果声源稳定地发声，则自 t_0 时刻起，直达声就一直被听者所接收，从 t_1 时刻起，又叠加上一次反射声的声压级，从 t_2 时刻起，则将叠加上一次反射声的声压级，余类推。到一定时刻，由于来自高阶虚声源的反射声声压级越来越低，其叠加影响可以忽略不计。这时室内声压级就达到一个稳定值，称为稳态声压级。这就是室内声能增长的过程（见图 1-7）。

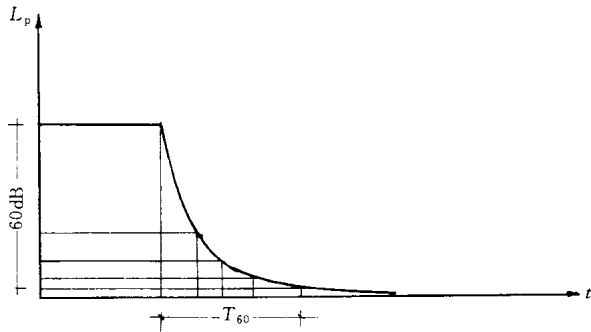


图 1-8 室内声衰变过程

二、室内声衰减

如果自某一时刻起，声源停止发声，则首先消失的是直达声，然后依次消失的是一次、二次直至多次反射声（见图 1-8）。这就形成了声衰变过程。可以看出，它正好是与声能增长过程呈相反互补的关系，呈现指数衰减的规律。我们将声源停止发声后，稳态声压级衰减 60dB 的时间 T_{60} 称为混响时间。它是室内音质的一个重要物理指标。这样，我们就用直观的物理叙述的方法来阐明室内声能增长和衰变的过程，避免了复杂的数学推导。

第五节 驻波与房间共振

一、驻波与颤动回声

为了了解声波在一对平行界面间产生的驻波现象，我们需要暂时离开几何声学，而用波动声学的观点。因

为这时需要考虑由于声波的位相关系引起的干涉现象。

当单频率平面波在两平行界面之间垂直传播时，由于要在两个反射面上都满足声压为极大值（位移为零）的条件，因此只有波长 λ 与反射面间距离 l 满足 $l = \frac{n}{2} \cdot \lambda$ 的那些频率才能形成满足边界条件的驻波。相应的频率是：

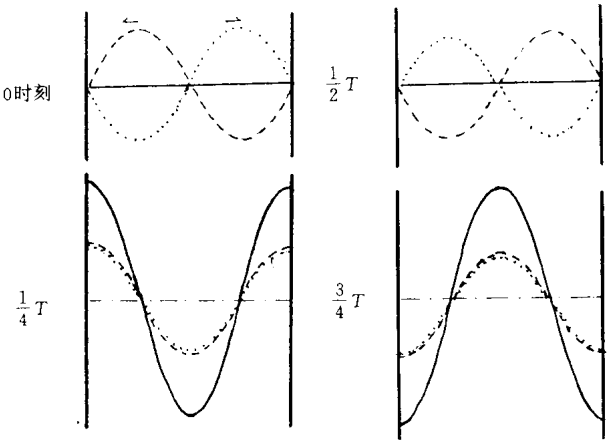


图 1-9 平行界面间驻波的形成

$$f_n = \frac{nc}{2l} \tag{1-12}$$

为了阐明这一点，我们来看看图 1-9。在图 1-9 中，折线代表入射波，虚线代表反射波，实线代表合成声压波形。在 0 时刻，反射波与入射波抵销。这就是声压瞬时消失的情况，1/4 周期后，入射波与反射波叠加达到最大；1/2 周期后，入射波与反射波再次互相抵销；3/4 周期后，入射波与反射波再次叠加达到最大；一周后，声压波形又恢复到 0 时刻的状况。

在这个过程中，在离反射面 1/4 波长的奇数倍位置，反射波的位相与入射波的位相始终相反而抵消，而在离反射面半波长整数倍的位置，位相始终相同而叠加，形成驻波。

当声源频率与式 (1-12) 中某一频率值相同时，就激发该频率声波在一维空间的共振。这种驻波又称为一个简正波。这时，声音强度的变化取决于听者的位置，对于较高频率的声音，听者头部的移动，就可能感到声压的起伏。

在两个靠得较近的坚硬平行壁面间的脚步声、击掌声，听起来有乐音的感觉，就是由于声波在两壁面的往返反射形成颤动回声。它本质上就是驻波现象。人们听到的乐音频率是各简正波的基频。可见颤动回声会引起声压分布不均，还会发生某些频率声音被增强，某些频率声音被减弱的现象，使声音产生失真，所以在室内设计中应加以避免。

二、三维室内空间的简正波与房间共振

一个封闭的室内空间，在声波激发下也会产生驻波。对于如图 1-10 所示的矩形空间，不仅存在上述一维空间在三个方向上的简正波的总和，还有与轴线不平行的简正波，但可以分解为 x 、 y 、 z 三个方向上的分量来考虑，其简正频率可以从式 (1-12) 推广得到：

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \tag{1-13}$$

式中 l_x 、 l_y 、 l_z —— 分别为房间三个边长 (m)；
 n_x 、 n_y 、 n_z —— 分别为任意正整数 (也可以是零，但不能同时为零)。

可以看出，只要 n_x 、 n_y 、 n_z 不同时为零，就可以计算出一种简正频率，代表一种房间共振方式。且不难看出，某些振动方式会有相同的简正频率。尤其是当三个边长有两个相等或全相等时，会有许多简正频率相同，称为简正频率的兼并。其结果，会使那些与简正频率（或称房间的共振频率）相同的声音被大大增强，使得声音失真。尤其当房间尺寸较小时，简正频率的数量少，这种情形更加严重。因此，在设计房间形状时，特别是在小尺度播音室、琴房等房间设计时，应避免房间边长相同或形成简单整数比。当房间体积大于 700m³ 时，房间比例的影响就较小。

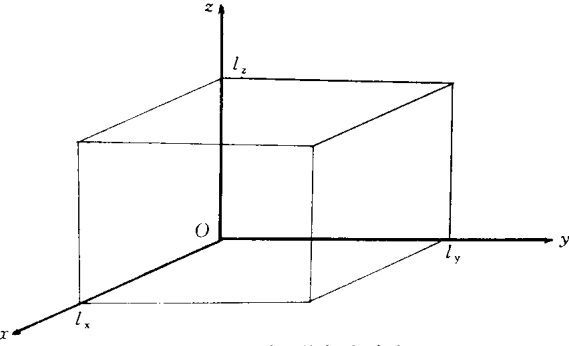


图 1-10 矩形室内空间

第二章 室内声环境评价

第一节 音质主观评价

室内音质评价可分为对语言声听闻的评价和对音乐声听闻的评价两类。对语言声主要是清晰度和可懂度方面的要求，同时应有一定的响度，听起来不费力，也要求频谱的均衡，不失真。对音乐声，除了清晰度（明晰度）和响度的要求外，还有丰满度、平衡感和空间感等方面的要求。

一、语言声音质主观评价

语言的可懂度是指对有字义联系的发音内容，通过房间的传输，能被室内听众正确辨认的百分数。清晰度则指对无字义联系的发音内容，能被听众正确辨认的百分数。由于有字义联系的发音内容，听者可从前后联贯的意义上加以推断，所以可懂度往往高于清晰度。

室内语言清晰度的主观评价测试通常是用 20 个由不同韵母的汉字组成的发音字母，由口齿清楚、发音较准的人念，然后听众在相应的判别字表上（由 20×5 个汉字组成，对应每个韵母有 5 个汉字可供选择，如对应于发音字表上的庄字、有窗、汪、庄、光、双 5 个汉字供听者判断选择）选择打钩。测试完毕，算出每位听者听对字数占 20 个字的百分比，加上猜测修正，即得到每位听者的清晰度百分数。所有听者测听结果的平均值，即代表该室内语言清晰度百分数。猜测修正项为：

$$\frac{1}{N-1} \left(\frac{E}{T} \right) \times 100\% \quad (2-1)$$

式中 T —— 发音字数；

E —— 听错字数；

N —— 测听记录时每个字可供选择的字数，一般 $N=5$ 。

二、音乐声音质主观评价

音乐的清晰度又称明晰度，指的是能听清急速连贯演奏的旋律以及同时能分清不同声部或乐器组演奏的声音，即音乐的透明度和层次感。

音乐的丰满度指的是由于室内各界面的反射声，尤其是 50ms（对音乐还可以放宽至 80ms）以内的早期反射声对直达声所起的增强和烘托的作用。人们在无回声的旷野里听到的只是直达声，因此声音听起来较干涩，而在反射声丰富的室内，如浴室、教堂等场所，听到的声音则显得饱满、浑厚而有力。这种由于室内反射声的支持而获得的有别于在旷野里听闻的音质上的提高程度，称为丰满度。有时还把低频反射声丰富的音质称为具有温暖度，而把中高频反射声丰富的音质称为具有活跃度。

音乐的平衡感指的是各声部之间的平衡协调，有的亦称为融合、整体感等。

音乐的空间感含义较广泛。它可以包括声源的轮廓感、立体感以及声源在横向和纵向的拓宽感、延伸感；还包括音乐的环绕感，即听众被音乐声所包围的感觉以及听众对厅堂的听觉印象等。

第二节 音质评价物理指标

固然音质的好坏最后是由听众的主观评价来判定的，但是为了指导室内音质设计，还必须探讨何种可测

量计算的物理参量与良好的音质有关，以及它们的最佳值和允许值是多少。

一、混 响 时 间

第一个与音质有关的物理指标就是混响时间，即室内稳态声压级衰减 60dB 所经历的时间。它是由美国著名声学家 W. C. Sabine (1868~1919) 于 1898 年确定的。他还由实验确定了计算混响时间的公式，即著名的赛宾公式：

$$T_{60} = \frac{0.161V}{A} \tag{2-2}$$

式中 T_{60} ——混响时间 (s)；
 V ——室内容积 (m^3)；
 A ——室内总吸声量， $A=S\bar{\alpha}$ ， S 为界面总表面积， $\bar{\alpha}$ 为室内各界面平均吸声系数。
混响时间还可利用伊林公式计算：

$$T_{60} = \frac{0.161V}{-S \ln (1-\bar{\alpha}) + 4mV} \tag{2-3}$$

式中 T_{60} ——混响时间 (s)；
 $4m$ ——空气吸声系数，仅对 1000Hz 以上高频计算，且仅当室内体积较大时计算。
上述公式中的平均吸声系数 $\bar{\alpha}$ ，按下式计算：

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \tag{2-4}$$

式中 $S_1、S_2 \dots S_n$ ——室内不同材料的表面积；
 $\alpha_1、\alpha_2 \dots \alpha_n$ ——不同材料的吸声系数。

二、早期侧向反射声能比

60 年代以来，声学家们研究发现早期侧向反射声能与良好的音质空间感有关。此后，人们对侧向反射声开始予以特别注意，据此提出若干评价指标，可以以侧向效率为代表。侧向效率定义为：

$$LE = \frac{\text{早期侧向声能 (25~80ms)}}{\text{早期总声能 (0~80ms)}} \tag{2-5}$$

三、声压级与响度指标

为了使语言和音乐听起来清晰、不费劲，甚至有快感，就必须有一定的响度，即必须有一定的声压级和信噪比。所谓信噪比指的是语言或音乐声信号的声压级高出背景噪声级的值。一般而言，对语言声声压级要求较低，而对音乐声声压级要求高一些，听起来才过瘾。同时共同的要求是背景噪声级要低。

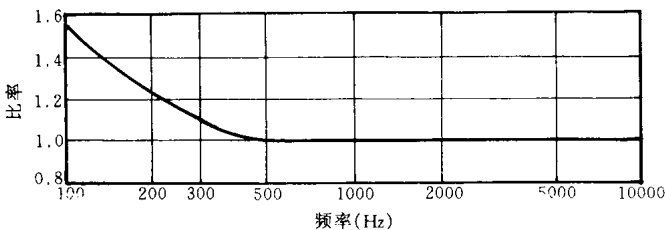


图 2-1 混响时间频率特性

允许有 15%~20% 的提高。因此，房间较理想的混响时间频率特性应符合图 2-1 的要求。

四、混响时间频率特性

为了使音乐各声部声音平衡，音色不失真，还必须照顾到低、中、高频声音的均衡。这就要求混响时间的频率特性要平直。由于人耳对低频声音的宽容度较大，同时室内的装饰材料和构造通常对中、高频声音的吸收较大，所以低频混响时间允

第三节 音质物理指标与主观评价的关系

要搞清楚音质主客观评价参量之间的关系是一项困难的课题。一个世纪以来，声学家为此作了许多研究，

取得了不少成果。但这仍是一个跨世纪的研究

通过一系列研究，现在声学界趋于比较一致的看法是，良好的音质感受主要有以下几个方面：

- (1) 在混响感（丰满度）和清晰度之间有适当的平衡；
- (2) 具有适当的响度；
- (3) 具有一定的空间感；
- (4) 具有良好的音色，即低、中、高音适度平衡，不畸变，不失真。

与第一音质感受密切相关的物理指标为混响时间。这是因为如果房间的混响时间过长，则前面音节的混响声会遮蔽后面的音节，特别是强的音节会遮蔽其后的弱音节，导致清晰度下降。但是混响时间过短，则表明界面反射声过弱，声吸收过大，就会影响丰满度。一般来讲，对以听语言声为主的房间，如教室、演讲厅、话剧院，混响时间不可过长，以 1s 左右为宜，而对听音乐为主的房间，如音乐厅等，则希望混响时间较长些，如达到 1.5~2s。最佳混响时间，还跟音乐的类型和题材有关。比如对古典音乐，以莫扎特的第 41 交响曲为代表，最佳混响时间为 1.54s；对于浪漫音乐，以勃拉姆斯第 4 交响乐为代表，最佳混响时间为 2.07s；而对于现代音乐，以斯特拉文斯基的一些作品为代表，则最佳混响时间为 1.84s。总之，必须针对具体房间的主要用途选择最佳混响时间，就可以达到丰满度和清晰度之间的适当平衡。对不同房间推荐的中频（500Hz 与 1000Hz 倍频程的平均值）混响时间见表 2-1。

混响时间推荐值（500Hz 与 1000Hz 平均值）表 2-1

房间类型	$T_{60}(s)$	房间类型	$T_{60}(s)$
音乐厅	1.5~2.1	强吸声录音室	0.4~0.6
歌剧院	1.2~1.6	电视演播室 语言	0.5~0.7
多功能厅	1.2~1.5	音乐	0.6~1.0
话剧院、会堂	0.9~1.3	电影同期录音棚	0.4~0.8
普通电影院	1.0~1.2	语言录音室、电话会议室	0.3~0.4
立体声电影院	0.65~0.9	琴 室	0.4~0.6
体育馆(多功能)	<2.0	教室、讲演室	0.8~1.0
音乐录音室(自然混响)	1.2~1.6	视听教室 语言	0.4~0.8
		音乐	0.6~1.0

与第二音质感受密切相关的是声压级。对语言声和音乐声可以选择不同的声压级标准。对于语言声，一般要求 50~55dB，信噪比要达到 10dB。如房间大部分座位处的声压级达不到此要求，就要考虑用扩声系统来弥补声压级的不足或提高信噪比。对于音乐声，一般要求声压级在 75~96dB 之间。声压级和信噪比还与可懂度和清晰度有关。当声压级很低时，只有全神贯注地听，才能听懂，比较费劲。但如果声压级过高，也会影响清晰度。图 2-2 表明英语音节清晰度与声压级的关系。

与第三音质感受有关的物理参量主要是早期侧向声能对早期总声能之比以及双耳听闻的相干性指标。对音乐厅音质设计而言，就是要求观众厅的侧墙距离不要过大，侧墙宜修建成坚硬的声反射面或布置专用的反射板。最好使反射声在垂直于听众两耳连线的中面成 ±（55°±20°）的角度范围到达听众。至于在室内聆听立体声的音响效果时，由于这时立体声的空间感是由扬声器组经立体声技术处理后提供的，所以对建筑声学的要求就有所不同。

与第四音质感受有关的物理参量主要是混响时间的频率特性。关于音乐厅的混响时间频率特性要求如图 2-1 所示。

应当指出，客观指标与主观音质感受之间的关系并非一一对应的简单关系。尽管我们可以找出几个相互独立的音质物理指标，但并

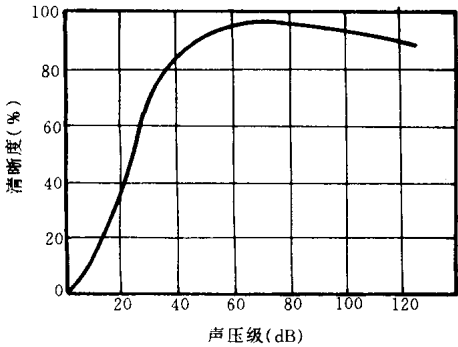


图 2-2 英语音节清晰度与声压级关系

不意味着它们与主观音质感受的作用是单一的。如前所说，声压级同时关系到响度感和清晰度，就是一个例子。同时研究表明，在音乐厅中，要达到良好的空间感，声级要求在 90dB 以上，因此，不仅侧向效率，而且声压级与空间感也有关系。

第四节 室内声环境标准与规范

一、室内允许噪声级

在室内音质设计与噪声控制设计中，常需对背景噪声进行频谱分析。根据人的听觉特性以及噪声对语言声的掩蔽特性，对不同频率的噪声可以限制在不同的声压级水平上。因此，在某些情况下，需要针对不同频率规定不超过某一声压级要求的噪声标准曲线。

1971 年，国际标准化组织（ISO）采用 NR 曲线来评价室内噪声环境（见图 2-3）。根据不同使用要求的房间，可采用不同的 NR 评价数作为背景噪声标准。

求噪声评价数 NR 的方法是：先测量各倍频程背景噪声级，再把所测得的噪声频谱叠合在 NR 曲线图上，以频谱与 NR 曲线在任何地方相切的最高 NR 曲线表示该室内背景噪声的 NR 数。换言之，室内噪声控制设计时，应使各频带噪声值均不超过相应 NR 曲线对相应频带的规定值，由此确定各频带噪声级的控制值。

表 2-2 是我国关于各类主要民用建筑室内允许噪声 NR 评价数（我国广播电影电视部制订的“广播电教中心技术用房”标准中规定广播剧、电视剧录音室的允许噪声为 NR-10）。达到某一 NR 数的噪声，其声级约不超过的相应的 A 声级值，也于表中列出。

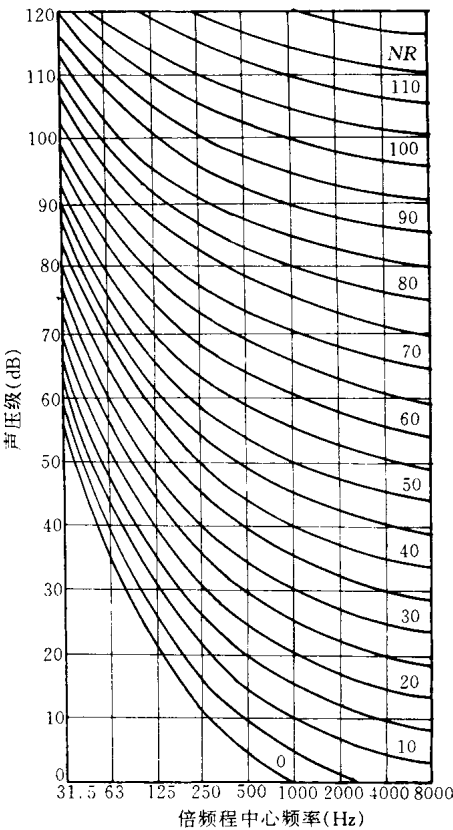


图 2-3 噪声评价 NR 曲线

部分民用建筑的允许噪声级

表 2-2

类 别	NR 评价数	A 声级(dBA)	类 别	NR 评价数	A 声级(dBA)
播音、录音室	15	30	住 宅	30	42
音乐厅	20	34	旅馆客房	30	42
电影院	25	38	办公室	35	46
教 室	25	38	体育馆	35	46
医院病房	25	38	大办公室	40	50
图书馆	30	42	餐 厅	40	50

二、语言干扰级

语言声能集中在 500~1000Hz 频率范围，但频率成分以中、高频为主的辅音对语言清晰度也非常重要，所以在控制室内噪声对通话的干扰时，国际上通常以 500、1000、2000、4000Hz 四个倍频带的背景噪声声压级的平均值定义为语言干扰级 SIL。测量得出 SIL 值后，就可以对照图 2-4 来评价不同语言干扰级下的通话效能。从图 2-4 可看出，当两人相距 1m 以正常语音交谈时，当室内 SIL 声级为 58dB 时，可以彼此听清；若 SIL

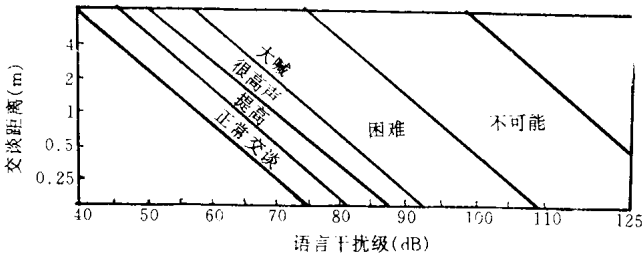


图 2-4 室内不同语言干扰级下的通话效能

为 65dB,则需要提高嗓门交谈。在一般房间,为保证在一定距离范围内,彼此可以轻松地交谈,要求室内 SIL 声级应控制在 35~40dB 以下。

三、保护听力的噪声允许标准

噪声对健康的影响,目前仍主要从听力保护出发加以控制。我国制订的“工业企业卫生标准”,规定每天工作 8h,室内允许等效声级 L_{Aeq} 对新建企业为 85dBA,对老企业为 90dBA。工作时间减半,允许噪声标准提高

3dB。例如在老企业车间里,如每天工作 4h,允许 L_{Aeq} 为 93dB;如每天工作 2h,则允许 96dB,余类推,但最高不超过 115dB。一些国家还规定了脉冲声的峰值声压级不得超过 140dB,但我国尚未对此作出规定。此标准虽然是针对工业企业而言,但对于其他高噪声级的室内环境,如迪斯科舞厅等,也可以参照执行。因为制订该标准是从保护听力的原则出发的。

四、环境噪声允许标准

我国于 1993 年颁布的《城市区域环境噪声标准及其测量方法》(GB 3096—93) 规定了保障城市居民生活声环境质量的城市五类区域环境噪声标准值,如表 2-3 所示。

城市区域环境噪声标准 (L_{Aeq})				表 2-3	
类 别	昼 间(dBA)	夜 间(dBA)	类 别	昼 间(dBA)	夜 间(dBA)
疗养院、高级别墅区、高级宾馆区	50	40	居住、商业、工业混杂区	60	50
			工业 区	65	55
居住、文教区	55	45	交通干线两侧	70	55

表中所列的标准值为户外允许噪声级。测点选在建筑物外,离开建筑物不小于 1m 处。传声器离地面不小于 1.2m。由于室内噪声级与户外噪声级有密切关系。通常住宅开窗时,如室内无附加声源,室内噪声级比室外噪声级可衰减 10dB 左右。因此,室内声环境设计也需要了解环境噪声允许标准。

五、隔 声 标 准

我国已制订《民用建筑隔声设计规范》(GBJ 118—88),规定隔声减噪设计标准等级一般分为三个等级。其中一级为较高标准,二级为一般标准,三级为最低限。对于住宅建筑,规定的空气声隔声标准及撞击声隔声标准,分别见表 2-4 及表 2-5。其它对学校建筑、医院建筑、旅馆建筑,也分别规定了相应的标准。表中关于计权隔声量和计权标准化撞击声压级的规定和评价方法,详见第三章第二节。

空气声隔声标准				表 2-4
围护结构部位	计 权 隔 声 量(dBA)			
	一 级	二 级	三 级	
分户墙及楼板	≥ 50	≥ 45	≥ 40	

撞 击 声 隔 声 标 准				表 2-5
楼板部位	计权标准化撞击声压级(dBA)			
	一 级	二 级	三 级	
分户层间楼板	≤ 65	≤ 75	≤ 75	