

建筑设计基本知识丛书

# 建筑声学设计

孙万钢 编

中国建筑工业出版社

建筑设计基本知识丛书

# 建筑声学设计

孙万钢 编

中国建筑工业出版社

本书从建筑设计中常遇到的声学问题出发，介绍了声音的基本概念，吸声、隔声、隔振、消声、厅堂音质设计、电声扩声设计等基本知识及一般的设计原理和方法。在附录中列举了一些常用吸声材料、隔声结构和噪声源的数据。

本书可供基建部门、设计单位、工矿企业中新从事建筑设计工作的人员自学参考。

建筑设计基本知识丛书  
建筑声学设计  
孙万钢 编

\*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
中国建筑工业出版社印刷厂印刷

\*

开本：787×1092毫米1/32 印张：8 字数：178千字

1979年2月第一版 1979年2月第一次印刷

印数：1—45,120册 定价：0.89元

统一书号：15040·3549

## 前 言

自然界有各种各样的声音，有的声音正被我们所利用，有的声音却要加以消除或控制。在日常生活中，人们利用语言交换思想，利用乐音开展文艺活动；在生产斗争和科学实验中，人们利用声信号进行测定和传递信息，等等。所以声音的用途是非常广泛的。但是除上述语言、乐音和信号等有用声外，嘈杂的声音则成为人们不喜欢的噪声，轻者干扰我们的工作、学习和休息，重者危害我们的身体健康和妨碍生产的正常进行。所以我们在利用声音的同时，必须对有害的噪声加以控制。

在建筑设计中对于声音的利用和控制问题是经常遇到的。例如，设计一个多功能礼堂或影剧院，就要求音乐动听，语言清晰；设计一栋住宅、医院或学校，就要求环境安静、隔声好；设计一个工业厂房，就要求噪声低，保护工人听力不受损害。实现上述这些要求，就是建筑声学设计所要解决的问题。

建筑声学设计主要包括噪声控制设计和厅堂音质设计两大部分。由于建筑声学是一门边缘学科，它与许多学科有密切联系，所以解决建筑中的声学问题往往还需要与其它方面密切配合。如降低机械设备本身的噪声就涉及到机械设计问题；研究噪声对人的危害就涉及到生理学问题；从建筑处理上降低噪声干扰或解决厅堂音质问题，当然主要是与建筑设计密切配合了。

在建筑设计时不注意解决建筑声学问题，以为等盖好房子后发现问题再来解决，这种想法是不正确的。因为这样常常会造成极不合理、极不经济的情况，有时有的声学问题还很难解决。另外，也有些人由于对建筑声学知识缺乏全面了解，往往为了解决某种声学问题，或是片面地盲目地堆置吸声材料，或是不注意材料的声学特性及适用范围，或是对施工质量不提出恰当的要求，结果花费了大量材料和投资，音质仍然不好，隔声问题也没有解决。所以那种把建筑声学设计视为可有可无或把它搞得十分神秘的想法都是片面的。建筑中的声学问题很难解决吗？其实不然。建筑设计工作者只要从设计一开始就注意设计中的声学问题，通过合理的城市规划和建筑平面布置，以及恰当地运用各种声学处理技术措施（如吸声、隔声、消声和减振等），是能够达到良好的声学效果的。我国广大科技人员和工农兵在生产斗争和科学实验中，已经创造和总结了许多建筑声学设计的丰富经验，取得了可喜的成果，为提高设计质量，改善建筑功能，促进建筑工业的现代化，作出了应有的贡献。

为了适应新从事建筑设计人员学习的需要，本书简要地介绍有关建筑声学设计的基本概念、设计原理、简易计算方法、常用数据资料和一些设计实例。全书共分四章，第一章声波的基本概念，介绍声波的产生、传播和各种主要特性。第二章吸声材料，介绍常用吸声材料的吸声原理和吸声特性，以及合理选择和布置吸声材料的原则。第三、四章分别介绍建筑中的噪声控制和厅堂音质设计。附录中列有常用吸声材料的吸声特性、隔声结构的隔声特性和噪声源的声压级资料数据，供设计参考。

本书在编写过程中，曾得到北京市建筑设计院、清华大

学建工系的帮助，对初稿提出了许多宝贵意见并提供了一些科技资料，本书还引用了国家建委建研院建筑物理研究所、同济大学声学研究室、北京市劳动保护研究所、中国科学院物理研究所等单位发表的一些资料，在此谨向上述各单位及有关同志表示感谢。

# 目 录

第一章 声波的基本概念 .....	1
第一节 声波是怎样产生和传播的 .....	1
第二节 频率、波长和声速 .....	4
第三节 声音大小的量度——声压、声压级和响度 .....	7
第四节 声波的反射、吸收、传透和绕射 .....	17
第二章 吸声材料 .....	24
第一节 吸声系数和吸声量 .....	24
第二节 吸声材料的类型、性能及其应用 .....	29
第三节 如何正确选择和布置吸声材料 .....	62
第三章 建筑中的噪声控制 .....	68
第一节 建筑中为什么要进行噪声控制及噪声标准 .....	68
第二节 城市规划与建筑平面布置在噪声控制中的作用 .....	83
第三节 建筑中的吸声减噪设计 .....	89
第四节 建筑中的隔声设计 .....	96
第五节 隔振措施在噪声控制中的应用 .....	126
第六节 通风、空气调节系统的噪声控制及 消声器的应用 .....	139
第七节 射流噪声及排空消声器 .....	173
第四章 厅堂音质设计 .....	179
第一节 为什么要进行厅堂音质设计 .....	179
第二节 响度 .....	181
第三节 体型设计 .....	186
第四节 混响时间 .....	198
第五节 建筑中的扩声设计 .....	216
附录 .....	231

## 第一章 声波的基本概念

为了解决建筑中的声学问题，首先要了解声音是怎样产生和传播的；声音大小是怎样计量的；声波一般用哪些量来反映它的客观特性；人的听觉在判断声音上有哪些主观特性等等。

### 第一节 声波是怎样产生和传播的

人们在生活中，经常听到各种各样的声音，象锣鼓声，谈话声，乐曲声，机器声等等。这些声音尽管它们的具体形式多种多样，但具有一个共同特点，即它们的根源都来自物体的振动。例如，敲打锣鼓发出声音时，我们用手轻轻触及发声的锣鼓面，会感到它们在迅速振动，如果用手掌按住锣鼓面不让它振动，声音就立即消失了。又如讲话声的根源来自于喉管内声带的振动；喇叭发声来源于纸盆或音膜的振动；机器声来源于机械部件的振动等等。可见，声音的产生首先是由于发声体的振动，如果发声体不振动，无论如何也不会产生声音的。通常把正在发出声音的发声体称为声源。

发声体振动怎样会使我们听到声音呢？如图 1-1 所示，发声体振动时，随之也使它邻近的空气振动起来，当发声体向某个方向振动时，便压缩其邻近空气，使这部分空气变密；当发声体向相反方向振动时，这部分空气就变疏。邻近空气这样一疏一密地随着发声体的振动而振动，同时又使较



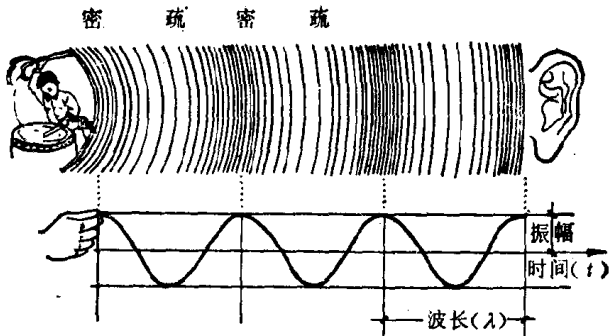


图 1-1 声波的产生

远的空气作同样的振动，空气这种一疏一密地振动传播的波叫做声波。声波以一定速度向四面八方传播开来，当声波传到人耳中，就促使耳膜发生相应的振动，这种振动，通过听觉神经，使我们产生声音的感觉。

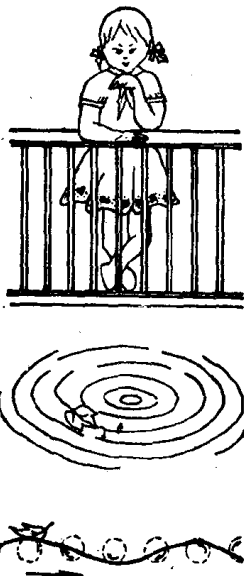


图 1-2 水面波示意图

声波也可以用水面波作形象的比喻。把一块小石头投入平静的水中，水面上便可看到一圈圈的水面波，它由波峰和波谷这样高低起伏交替变化着向外传播，如图1-2。假如我们看定某一个波峰(或波谷)，则可看到这峰(或谷)以一定的速度前进，这个速度就是波速。如果将一片树叶丢到这水面波上，可以看到树叶几乎在原地上下振荡，并没有随着水面波一同前进。这与声波在空气中传播时空气分子只是在自己平衡位置附近振动，并没有随波前进是相似的。所以声音的传播

指的是物体的振动传播，这说明声音是物质的一种运动形式，这种形式叫做波动。振动和波动是互相密切联系的运动形式，振动是波动的产生根源，而波动是振动的传播过程。声音在本质上是一种波动，因此声音也就叫声波。

有声波存在的空间叫做声场。在某一时刻声波到达空间的各点所联成的面称为波阵面（或波前），不同的波阵面就决定了波的不同类型。假如波阵面是平面就称为平面波；波阵面是球面则称为球面波。一般声源在空气中产生的声波是以球面波的形式传播（图1-3a）。声波传播方向可以用声射线来表示，简称声线。球面波的声线是以波源为中心的半径，所以球面波是无方向性的。但大多数声源严格说都是有方向性的，即声波向某一方向辐射得最强的特性。如通过喇叭发声就具有明显的方向性（图1-3b），朝着喇叭口的轴线方向声音听起来就响，而其它方向就弱一些。所以利用喇叭的方向性，可以将声音传送得很远。

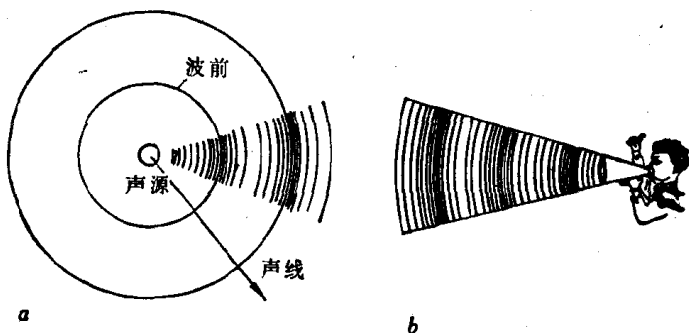


图 1-3 声波的传播

振动体振动的方式不同，产生的波也不同。最简单、最基本的波形有两种：横波和纵波。其它还有弯曲波、纵横波等。

当手拉住绳子的一端上下振动时（图1-1），可以看到绳子的一端先形成一个凸起的状态，然后形成一个凹下的状态，凸凹起伏的波沿着绳子传播出去。这种振动方向与波的传播方向相垂直的波称为横波。

声波的传播方向与疏密相间振动的方向是一致的，所以声波是纵波。

除了空气外，其它气体、液体和固体也能传播声波，这些可以传播声波的物质叫做传声介质。如果只有发声体的振动而无传声介质传播其产生的声波，同样不能使我们听到声音。例如听不到放在真空瓶里的钟的滴答声就是一例。可见，传声介质与发声体的振动同样重要，缺一均不能听到声音。

## 第二节 频率、波长和声速

### 一、频率

发声体每秒振动的次数称为频率，用符号  $f$  表示，频率的单位是赫兹，简称赫，用符号 Hz 表示。当物体每秒振动一次时表示为

$$1 \text{ 赫} = 1 \text{ 次/秒}$$

物体或空气分子每振动一次，即完成一次往复运动或疏密相间的运动所需要的时间称为一周，用符号  $T$  表示，它的单位是秒/次，所以频率又可用每秒周数表示

$$f = \frac{1}{T}$$

发声体振动能产生声波，但不是所有振动产生的声波都能使人们听得见，这是由于人耳耳膜与一切物体一样有一定的惯性，它与发声体的振动次数有关。只有当频率在 20~

20000赫范围内的声波传到入耳，引起耳膜振动，才能产生声音的感觉。所以，通常将频率在20~20000赫范围内的声波叫做可闻声。在这个频率范围以外的声波不能引起听觉，频率超过20000赫的叫做超声波，频率低于20赫的叫做次声波。在建筑声学中，一般把频率在200~300赫以下的称为低频；500~1000赫称为中频；2000~4000赫以上称为高频。

发声体每秒振动次数越多，即频率越高，感觉出声音的音调也越高，一般称之为声音尖锐。反之，频率低的声音，音调低，听起来声音低沉。如c调的“1”频率是256赫，而高八度的“ $\dot{1}$ ”频率是512赫。男子平均基频约为150赫，女子平均基频约为230赫。所以，频率的高低在人们主观听觉上的印象就是音调的高低。

事实上所有发声体的振动都是比较复杂的，它除了一个基频音外，还包括许多与基频成整倍数的较高频率的泛音，也有称之为陪音或谐频音的。泛音的多少和强弱，影响声音的音色，根据这种不同的音色，我们才能分辨出每个人不同的口音和不同的乐器音。例如双簧管与提琴，即使它们的基频音相同，也很容易区别开来，如图1-4，原因就是这两种乐器具有各自不同

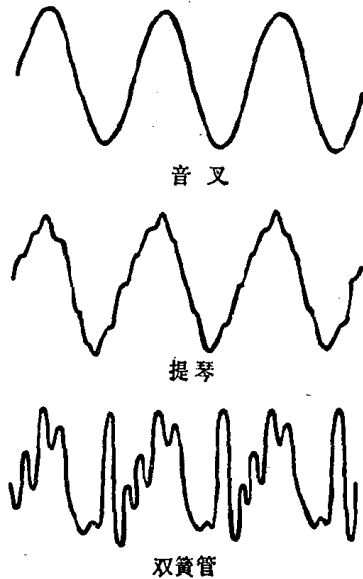


图 1-4 具有相同基频音的音叉、提琴、双簧管的波形

的泛音，因而造成不同的音色。泛音愈多，声音愈感到丰美动听。所以同一把胡琴，为什么初学的人不如熟练者演奏得动听，就是因为熟练者能控制泛音的多少，使琴音柔和饱满，悦耳动听。因此，在建筑声学设计中，如何使声音听起来逼真，尽量保持原来的音色，是很重要的。

音色既然是声音各频率成分分布的综合听觉印象，所以研究声音的频率分布是很重要的。工程中声音的频率分布特性采用声学仪器来测定。常用的有频率分析仪、1/3倍频程和1倍频程频谱分析仪。这些仪器将可闻声的频率从20~20000赫的高低相差达1000倍的变化范围，划分成若干较小的频段，这就是通常所说的频带或频程。工程应用上常用的有1倍频程和1/3倍频程。倍频程是两个频率之比为2:1的频程。设某倍频程的中心频率为 $f_{\#}$ ，上下限频率分别为 $f_{\text{上}}$ 和 $f_{\text{下}}$ ，则

$$f_{\#} = \sqrt{f_{\text{上}} \cdot f_{\text{下}}}, \quad f_{\text{上}} = 2f_{\text{下}}$$

目前通用的倍频程中心频率为31.5、63、125、250、500、1000、2000、4000、8000、16000赫。这十个倍频程把可闻声的全部频率包括进来了，大大简化了测量。实际应用上往往只用63~8000赫八个或125~4000赫六个倍频程就可以了。

我们以频率（频带）为横坐标，以声音大小为纵坐标，作出声音大小的频率分布的特性图，称为声音的频谱分析（见附录三）。声音的频谱分析有助于我们了解声源的特性，为进行声学设计提供依据。

## 二、波长

物体或空气分子每完成一次往复运动或疏密相间的运动所经过的距离称为波长（参见图1-1），用符号 $\lambda$ 来表示，单位是米。下面我们将会知道，波长是由声波的频率所决定的，频率高，波长短；频率低，波长长。例如在常温的空气中，当

频率为125赫时，波长约为2.72米；当频率为500赫时，波长约为0.68米；当波长为2000赫时，波长只有0.17米左右了。

### 三、声速

声波每秒钟传播的距离叫做声波传播速度，简称声速，用符号  $c$  表示，单位是米/秒。

声音在不同的介质中的传播速度是不同的，在标准大气压下， $0^{\circ}\text{C}$ 的空气中，声音的速度是331.4米/秒。空气的温度越高，声速越大，温度每增加 $1^{\circ}\text{C}$ ，声速增加0.607米/秒。如 $15^{\circ}\text{C}$ 时空气中的声速等于 $331.4 + 15 \times 0.607 = 340.505$ （米/秒）。声音在固体中传播速度最快，其次是液体，再次是气体。如水中一般是1450米/秒；在钢铁中约为5000米/秒。所以将耳朵贴近铁轨能听到较远处开动着的火车声。但也有例外的，如在橡胶中却只有30~50米/秒。可见声速决定于传声介质的性质，而与声源频率及强度无关。但是象原子能爆炸等特别强烈的声音则是例外的，它在空气中声速可达每秒几千米。

根据频率、波长和声速的定义，它们三者之间有如下关系，即

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ 米} \quad (1-1)$$

例如常温下（ $15^{\circ}\text{C}$ ），在空气中声波频率为100赫时，它的波长 $\lambda = c/f \approx 340/100 = 3.4$ 米，而在水中声波频率为100赫时的波长则为 $\lambda = 1450/100 = 14.5$ 米。

### 第三节 声音大小的量度——声压、声压级和响度

我们能够听到声音，除了与发声体的频率有关外，还与

声音的强弱有关。声音太轻，人耳听不到；声音太响，则引起人耳不舒服乃至疼痛的感觉，过强的声音可以使耳朵震聋。声音的强弱可用声压、声压级、响度以及声强、声强级、声功率、声功率级等来表示。

### 一、声压

我们知道，声波是由于空气分子的振动形成疏密波而传播的。当空气中没有声波时，空气中的压强即为大气压。当声波传播时，某处的空气时疏时密地变化，使压强在原来大气压附近上下变化，相当于在原来大气压强上迭加了一个变化的压强，这个迭加上去的压强就叫做声压，用符号  $p$  表示，单位是微巴 ( $\mu b$ )， $1 \text{ 微巴} = 1 \text{ 达因/厘米}^2 = 0.1 \text{ 牛顿/米}^2$ 。一个大气压约等于  $10^6$  微巴。

迭加上去的声压大，表示空气分子被压缩大，因而声波对耳膜的压力也大，我们听到的声音就响。而只有当发声体的振幅大时，空气被压缩才大。所以声压与发声体振动的振幅有关，而与它的波长是无关的。

声压只有大小，没有方向。同时，声压作用的力不是恒定的，而是随时间疏密相间不断变化的。所以通常用一段时间内的有效声压来表示。当声压变化为周期性时，则取其在该周期内压力的均方根值（即声压的最大值除以  $\sqrt{2}$ ）表示，称为有效声压。一般如未加说明，声压均指均方根值即有效声压。

多大的声压能使人耳有声音的感觉呢？对于正常人耳，当频率为1000赫，声压约为0.0002微巴时，即可听到声音。这个刚刚能引起人耳听觉的声压叫做声音的可听低限（闻阈）。当频率为1000赫，声压约为200微巴时，产生震耳欲聋的声音，超过这一数值将使耳朵感到疼痛，这个数值叫做

声音的可听高限（痛阈）。人们正常说话时的声压约为0.2~0.3微巴左右，是大气压的千万分之二、三左右。

## 二、声压级

从上述可知，人耳的听觉范围从微风吹动树叶之类的最轻声，到震耳欲聋的火箭大炮声，声压的变化范围从0.0002到200微巴，相差达一百万倍。所以如果用声压来表示声音的强弱，数字冗长，极不方便。因此采用一种按对数方式分等级的办法作为声音大小的常用单位，这就是声压级。人们还把这个分级单位起了个专门名词叫分贝，用符号dB表示。

把百万倍变化范围的声压值按对数方式划分成一定的等级——声压级，不仅说明方便，避免了计算中数学位数冗长的麻烦，也符合人耳听觉分辨能力的灵敏度要求。因为人的听觉与声压不是正比关系。在声压低时，空气压力的稍许变化人耳就可区别，在声压高时，空气压力的变化却必须很大时才能区别。

国际上统一规定把人耳刚能听到的声压（0.0002微巴）定为0分贝，也就是把这个声压作为参考基准声压 $p_0$ ，这如同我们把海平面定为0米标高来衡量山峰或大地的高度一样。

声压级的数学表达式为

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \text{分贝} \quad (1-2)$$

式中  $L_p$  —— 声压级，分贝；

$p$  —— 声压，微巴；

$p_0$  —— 参考基准声压，为0.0002微巴。

于是从人耳听闻低限的0.0002微巴到感觉疼痛的200微



巴这样一种声压相差百万倍的变化范围，用声压级表示时，就变为从 0 分贝到 120 分贝的变化范围，因而也就方便明瞭得多了。各种声学测量仪器都已用分贝刻度，从仪器中可以直接读出声压级。

从式 (1-2) 可知，声压级每变化 1 分贝，约相当于声压变化 12%，声压级每变化 6 分贝，约相当于声压变化 1 倍，声压级每变化 20 分贝或 40 分贝，就相当于声压变化 10 倍或 100 倍。因此，在建筑声学设计中，如果使声音增加或降低 20 分贝或 40 分贝，那就是个相当大的变化了。

表 1-1 列出了一般环境和几种常见声源的声压级。

常见声源声压级举例

表 1-1

声 压 ( $\mu\text{b}$ )	声压级 (dB)	各 种 声 源 举 例
2000	>150	火箭、导弹、飞船
	140	喷气式飞机(距离 5 米)
200	130	大炮、低音鼓(峰值)
	120	可听高限(痛阈)
20	110	汽车喇叭(距离 1 米)
	100	普通发电站、通风机房、球磨机
2	90	载重汽车(速度 40 公里/小时)、六角机床
	80	一般工厂车间
0.2	70	对话(距离 1 米)
	60	大百货商店环境噪声
0.02	50	有收音机的住宅环境噪声
	40	影剧院演出时的观众噪声
0.002	30	安静的郊区、轻声耳语
	20	消声室内、手表摆动声
0.0002	10	自己呼吸声
	0	可听低限(闻阈)

由于分贝是以对数比值表示的一种“级”的单位，所以以分贝为单位的几个声音的声压级相加时，它的总声压级就