

## 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

密 疏 密 疏

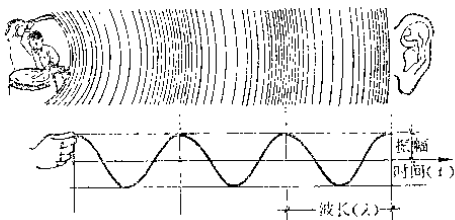


图 1-1 声波的产生

这样一疏一密地随着发声体的振动而振动，同时又使较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。

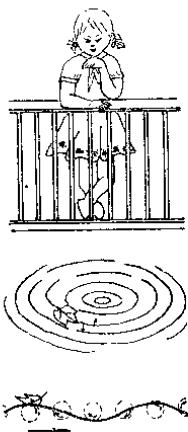


图 1-2 水面波示意图

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

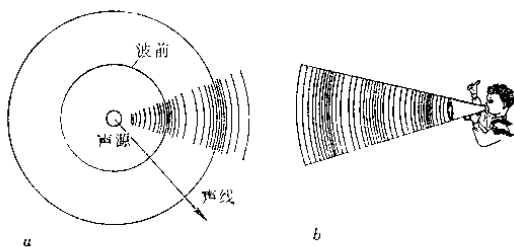


图 1-3 声波的传播

向性，可以将声音传送得很远。

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

$$1\text{Hz} = 1\text{次/s}$$

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20~20000Hz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20~20000Hz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20000Hz的叫做超声波，频率低于20Hz的叫做次声波。在建筑声学中，一般把频率在200~300Hz以下的称为低频；500~1000Hz称为中频；2000~4000Hz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256Hz，而高八度的“1”频率是512Hz。男子平均基频约为150Hz，女子平均基频约为230Hz。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

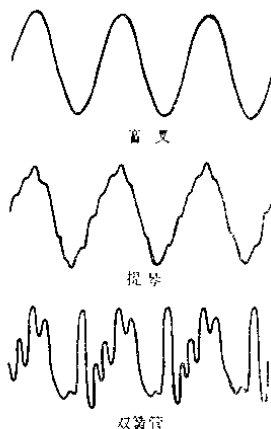


图 1-4 具有相同基频音的音叉、提琴、双簧管的波形

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20~20000Hz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 $f_+$ 和 $f_-$ ，则

$$f_* = \sqrt{f_+ \cdot f_-}, f_+ = 2f_-$$

目前通用的倍频程中心频率为31.5、63、125、250、500、1000、2000、4000、8000、16000Hz。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63~8000Hz八个或125~4000Hz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(m)。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125Hz时,波长约为2.72m;当频率为500Hz时,波长约为0.68m;当频率为2000Hz时,波长只有0.17m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(m/s)。

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°C的空气中,声音的速度是331.4m/s。空气的温度越高,声速越大,温度每增加1°C,声速增加0.607m/s。如15°C时空气中的声速等于 $331.4 + 15 \times 0.607 = 340.505$ (m/s)。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1450m/s;在钢铁中约为5000m/s。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30~50m/s。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

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

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

### 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，单位是帕(Pa)或牛顿/米<sup>2</sup>(N/m<sup>2</sup>)或微巴( $\mu\text{b}$ )， $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2 = 10\mu\text{b}$ ，一个大气压约等于 $1.013 \times 10^5\text{Pa}$ 。



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，则取共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1000Hz，声压约为 $2 \times 10^{-5}$ Pa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1000Hz，声压约为20Pa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0.02~0.03Pa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 $2 \times 10^{-5}$ Pa到20Pa，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分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 ( $20 \times 10^{-5} \text{Pa}$ ) 定为0dB，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0m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

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

式中  $L_p$ ——声压级，dB；

$p$ ——声压，Pa或 $\text{N/m}^2$ 或 $\mu\text{b}$ ；

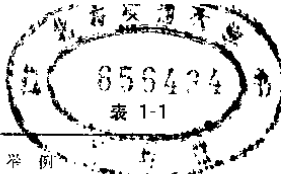
$p_0$ ——参考基准声压，为 $2 \times 10^{-5} \text{Pa}$

于是从人耳听闻低限的 $2 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 到感觉疼痛的20Pa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0dB到120dB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1dB，约相当于声压变化12%，声压级每变化6dB，约相当于声压变化1倍，声压级每变化20dB或40dB，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20dB或40dB，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



声压 (Pa)	声压级 (dB)	各种声源举例
200	>150	火箭、导弹、飞船
	140	喷气式飞机(距离5m)
20	130	大炮, 低音鼓(峰值)
	120	可听上限(痛阈)、汽锤
2	110	汽车喇叭(距离1m)大型鼓风机、迪斯科舞厅
	100	普通发电站、通风机房、球磨机、织布车间
0.2	90	载重汽车(速度40km/h)、六角机床
	80	一般工厂车间
0.02	70	对话(距离1m)
	60	大百货商店环境噪声
0.002	50	有收音机的住宅环境噪声
	40	影剧院演出时的观众噪声
0.0002	30	安静的郊区、轻声耳语
	20	消声室内、手表摆动声
0.00002	10	自己呼吸声
	0	可听下限(阈阈)

### 三、声功率级和声强级

声波作为一种波动形式, 当然具有一定的能量, 人们也常用能量的大小来表示声音的强弱。如在声学工程中常碰到的声功率, 就是指声源在单位时间内向外辐射出来的总声能, 是声源本身的一种特性用符号 $W$ 来表示, 单位是瓦。它与声压的区别在于一个是能量关系, 一个是压力关系。声功率与声压一样, 它的范围也很广。如轻声耳语的声功率只有 $0.001\mu W$  ( $10^{-9} W$ ), 而喷气式飞机的声功率则大于 $10000W$ , 二者相

差数十亿倍。为表达方便起见,与声压一样,声功率也用级来表示,这就是声功率级 $L_w$ ,单位也是分贝,它的数学表达式为

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0} \text{ dB} \quad (1-3)$$

式中  $L_w$ ——声功率级, dB;

$W$ ——声功率, W;

$W_0 = 10^{-12} W$ , 参考基准声功率。

声压级 $L_p$ 与声功率级 $L_w$ 有如下关系:

对于球面扩散的声源,当距离声源 $r$ m时

$$L_p = L_w - 20 \lg r - 10.9 \text{ dB} \quad (1-4)$$

对于半球面(如声源靠近地面时),当距离声源 $r$ m时

$$L_p = L_w - 20 \lg r - 7.9 \text{ dB} \quad (1-5)$$

同样道理,声强是指在垂直于声传播方向上,单位时间通过单位面积的声能的多少,通常用符号 $I$ 表示,单位是瓦/米<sup>2</sup>(W/m<sup>2</sup>)。在自由场中,点声源声强与声功率为: $I = W/4\pi r^2$ ,远场的声强与声压为: $I = P^2/\rho c$ 。

同理,声强用级来表示时,称为声强级 $L_I$ 。单位也是分贝,它的数学表达式为

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ dB} \quad (1-6)$$

式中  $L_I$ ——声强级, dB;

$I$ ——声强, W/m<sup>2</sup>;

$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ , 基准声强。

声压级( $L_p$ )与声强级( $L_I$ )亦有如下关系:

$$L_I = L_p + 10 \lg \frac{400}{\rho_0 c} \text{ dB} \quad (1-7)$$

式中  $\rho_0$ ——空气密度;

$c$ ——空气中的声速。

#### 四、响度和响度级

通常人们还用声音的响或轻来表示其大小和差别。量度一个声音比另一个声音响多少的量称为响度，单位是宋，用符号 sone 表示。响度是人们对声音大小反应的主观量，而声压是反应声音大小的客观量。一般来说，声压越大，声音越响。但声压与响度不是正比关系，声压加大一倍，声音不一定加倍的响。声压级的变化与响度之间有如下的近似关系（表1-2）：

表 1-2

声 压 级 变 化	响 度 感 觉
1dB	几乎觉察不出
3dB	刚可觉察
5dB	明显改变
10dB	加倍地响（或轻一半）

同时还应注意到，人耳对不同频率的声音的灵敏度是不一样的。因此不能单纯地用声压级大小来衡量声音的轻或响。例如有两个频率分别是1000Hz和100Hz的声音，声压级都是40dB，但人们听起来响度却完全不同，1000Hz的声音就比100Hz的声音响得多。如果要使100Hz声音和1000Hz的声音同样响，就得把声压级提高到51dB。用这种对比试验方法得出了如图1-5所示的一组曲线，图中每条曲线上各点所代表的声音对人耳听起来都是一样响的，所以称为等响曲线。

为了便于说明和区别各条等响曲线，同样采用分级的办

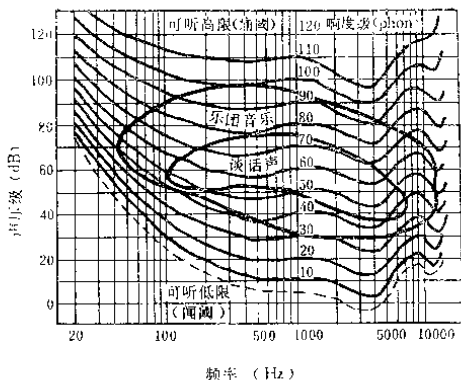


图 1-5 纯音等响曲线

法,取图中参考音调1000Hz的垂直线与等响曲线相交点的声压级为各等响曲线的级别,叫做响度级,单位是方,用符号phon表示。也就是说,任何一根曲线上的响度级就等于1000Hz时同样响的声音的声压级。例如在20phon的等响曲线上,一个声压级为20dB的1000Hz声音,与一个声压级为37dB的100Hz的声音是一样响的,它们的响度级都是20phon。

从等响曲线上还可以看出:

1. 在低声压级时,同样大的声压级的变化在低频引起响度变化比高频大;中、高频声较低频声显得更响些。
2. 在高声压级时,曲线较平直,反映了声压级相同的各频率声音显得差不多一样响,而与频率关系不大。

所以,为什么当收音机音量开得小时,即使节目中已有

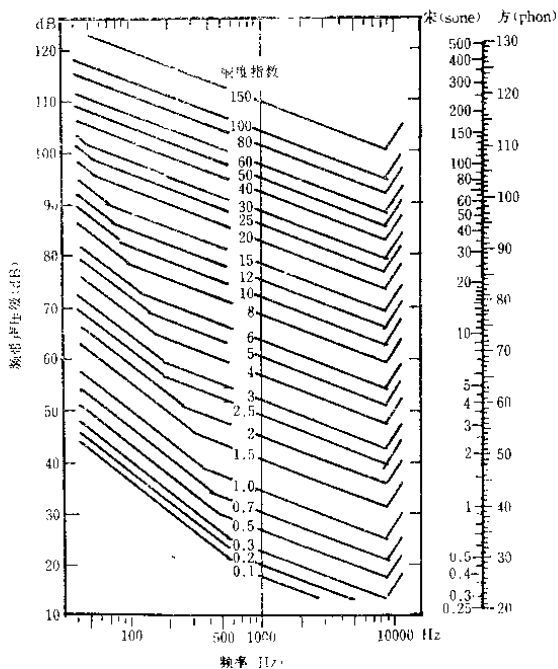


图 1-6 等响指数曲线

较多低音成分，但听来总感到缺乏低音，但将音量适当开大后，就能感到低音比较丰富了。其原因就是上面讲的这个道理。

响度级 ( $L_s$ ) 方和响度 ( $S$ ) 宋的关系：

$$L_s = 40 + 33.33 \lg S \quad (1-8)$$

按定义可见，1sone的响度相当于40phon，即以40phon为1sone，响度级每增加10phon，近似地等于响度改变一倍，也就是说人们主观上感到声音听起来要响一倍。例如当响度级由120phon（响度为250sone）降到90phon

（响度为32sone），则总响度降低了  $\frac{250-32}{250} = 87\%$ 。显然

这种表示方法是很直观的。

但由于听觉机构的复杂性，至今还没有测量主观响度的仪器，所以计算响度的方法都是近似的。国际上（ISO532-1975）规定了复合声音（一般噪声）响度的两种计算方法，都是在实测噪声的频谱（1/3或1倍频程）的基础上经过计算得到的，即利用图1-6将噪声的频带声级转化为响度指数 $S_i$ ，再按以下两式求出它们的总响度。

如果是1/3倍频程，则：

$$S = S_m + 0.15(\sum S_i - S_m) \quad (\text{sone})$$

如果是倍频程，则：

$$S = S_m + 0.3(\sum S_i - S_m) \quad (\text{sone})$$

式中 $S_m$ 为响度指数中最大的一个数值，然后利用式（1-8） $L_s = 40 + 33.33 \lg S$ 计算总响度级，也可以利用图1-6中右边转换标尺。

具体计算步骤如表1-3所示。



表 1-3

频 率	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
已知倍频带声级 (dB)	42	40	47	54	60	58	69	72
响度指数 $S_i$ (sone)	0.16	0.37	1.44	2.34	4.8	5.2	7.0	17.5
最大响度指数 $S_m$	$S_m = 17.5$							
	$\Sigma S_i = 0.16 + 0.37 + 1.44 + 2.34 + 4.8 + 5.2 + 7.0 + 17.5 = 38.81$							
	$\text{总响度 } S = S_m + 0.3(\Sigma S_i - S_m) = 17.5 + 0.3(38.81 - 17.5) = 24 \text{ sone}$							
	$\text{响度级 } L_S = 40 + 33.33 \lg S = 40 + 46 = 86 \text{ (phon)}$							

### 五、A声级与等效连续A声级

由于人耳并非对所有频率一样敏感，所以为了得到比声压级能更好地与人耳响度判别密切相关的级，目前较广泛地使用A声级作为评价噪声的标准。A声级可从声学测量仪器声级计上直接读得，记作dB(A)或dB(A)。A声级是单一的数值，是噪声的所有频率成分的综合反映。用它来评价由宽频带噪声引起的语言干扰，对环境吵闹程度以及所造成听觉危害程度的评价等方面都有较好的相关性。此外它还可以同其它多种评价方法进行换算，如A声级与响度级相比总是低约12dB左右。

由于A声级只反映了噪声影响与频率的关系，而噪声影响还与持续时间有关，特别对于间断的或随时间变化的噪声，应该以“等效A声级”进行评价。所谓“等效A声级”就是按分贝运算规则，把A声级对时间进行平均后所得到的结果。例如对于稳定连续不断的噪声，则该噪声的等效A声