

实用噪声控制技术

SHIYONG ZAOSHENG KONGZHI JISHU

张沛商 编著

北京经济学院安全工程系

1988 · 5 ·



实用噪声控制技术

张沛商 编著

前 言

随着工业和交通运输事业的迅速发展，噪声污染日趋严重。噪声危害人体的健康，影响人们的正常工作、学习和休息，同空气污染、水污染一起，被公认为当今的三大公害。噪声污染面非常广泛，污染的程度往往超过人们所能容忍的程度。据不完全统计，近年来一些城市居民向环境保护部门写信或控告的各类污染事件中噪声事件已上升到第一位。如何采取有效的措施来加以控制，将噪声降低到无害的程度，为人们创造一个安宁、舒适的声学环境，乃是环境保护和劳动保护工作者的一项重大课题。

控制噪声，消除噪声污染，这是一项艰巨而又复杂的任务。目前噪声控制工作已引起社会各界与各产业部门的广泛重视。控制噪声法规（标准、法令、条例）的制订与颁布，以及有关噪声防治的宣传、教育和专职人员的培训工作，近年来都有可观的发展。我们出于教学上和在职干部培训上的需要，根据多年从事噪声控制工程的经验和取得的科研成果，并收集到国内的有关资料汇编成此书。本书简要介绍了声学的基础知识，较系统地介绍了噪声的危害、噪声的允许标准和噪声的测量方法，还较详细地介绍了目前噪声控制技术的主要措施。

由于编写时间仓促和本人水平有限，错误在所难免，欢迎读者批评指正。

张沛商

于北京经济学院安全工程系

1988年3月

11/11/18/01

目 录

第一章 噪声控制概论.....	(1)
第一节 声音的产生、传播与接受.....	(1)
第二节 噪声的主要物理参量.....	(5)
第三节 噪声的主观量度和主要评价量.....	(14)
第四节 噪声的传播特性.....	(29)
第五节 噪声的危害与噪声的允许标准.....	(37)
第六节 噪声防治的基本原则.....	(44)
第二章 噪声测量.....	(50)
第一节 噪声测量仪器.....	(50)
第二节 工厂噪声测量.....	(56)
第三章 吸声降噪.....	(60)
第一节 吸声系数.....	(60)
第二节 多孔性吸声材料.....	(61)
第三节 吸声结构.....	(69)
第四节 吸声降噪的设计.....	(78)
第四章 隔声技术.....	(85)
第一节 隔声结构的特性.....	(85)
第二节 隔声墙板的设计.....	(95)
第三节 隔声门和隔声窗.....	(99)
第四节 隔声罩.....	(102)
第五节 隔声屏.....	(111)
第五章 隔振技术.....	(116)
第一节 振动的危害与评价.....	(116)
第二节 隔振设计.....	(120)
第三节 隔振器和隔振垫.....	(124)
第四节 阻尼材料.....	(134)
第六章 消声器.....	(140)
第一节 概述.....	(140)
第二节 阻性消声器.....	(141)
第三节 抗性消声器.....	(155)
第四节 宽频带型消声器.....	(159)
第五节 排气喷流消声器.....	(163)
附录 I 中华人民共和国《工业企业噪声卫生标准(试行草案)》.....	(168)
附录 II 中华人民共和国《工业噪声检测规范》(草案).....	(169)
附录 III 中华人民共和国《噪声性耳聋调查方法》.....	(171)

第一章 噪声控制概论

人们的生活离不开声音，人的一生都是在声音的海洋中度过，各种声音在人们的生活和工作中起着非常重要的作用。声音是帮助人们沟通信息的重要媒介，是人们传情达意的重要手段。笑声有强烈的感染力，悲啼令人掬一掬同情之泪。悦耳动听的乐声，使人心情愉快；震耳欲聋的噪声，则使人心烦意乱。一首好的歌曲给人以美的享受，而强烈的噪声不但使人烦躁不安，长时期生活或工作在这种环境中，还会严重地损害着人们的健康。尽管是悦耳动听的乐声，但对于要入睡的人们来说，可能是一种干扰，是不需要的声音。可见在日常生活中，有时有的声音是人们所需要的，而另一些声音则是人们所不需要的，甚至是厌恶的。从生理学的观点讲，凡是使人烦躁不安，为人们所不需要的声音都属于噪声。噪声控制就是把那些对人有害的噪声予以消除或降低，为人们创造一个较为安静的生活和工作环境。

第一节 声音的产生、传播与接受

一、声音的产生

我们仔细观察日常生活中所能接触到的各种发声物体，就会发现声音来源于物体的振动。为了说明这个问题，我们做如下试验：当你用鼓锤去敲鼓时，就会听到鼓声，这时用手去摸鼓面，就会感到鼓面在迅速地振动着。如果用手掌压住鼓面使其停止振动，鼓声就会立即消失。事实告诉我们，由于鼓面的振动产生了鼓声。当然声源不一定非固体不可，液体、气体振动同样会发声。高压输液管道的阀门噪声就是由于液体振动而产生的。高压锅炉排气放空的排气噪声，就是高速气流与周围静止空气相互作用引起的空气振动的结果。总之，物体的振动是产生声音的根源。发出声音的物体称为声源。声源发出的声音必须通过中间介质才能传播到人耳。这种介质通常指的是空气，除空气外，所有液体和固体都能够传播声音。

那末，声音是怎样通过介质传播出去的呢？

如图1-1所示，音叉在它原来静止位置附近来回振动时，带动了同它相邻近的空气层的质点，使它们产生压缩和膨胀的运动。当音叉向前推动时，它把附近一层空气压缩，空气层压力增高，大于平均压力，当音叉向回振动时，它前面的空气顿时膨胀，变得稀薄，这就使得它的局部压力小于大气压力。由于空气分子间具有一定的弹性，这一局部范围的压缩和膨胀又会影响并促使下一邻近空气层质点发生压缩和膨胀的运动。从而由近及远地导致其它部分的介质陆续引起振动，形成一疏一密空气

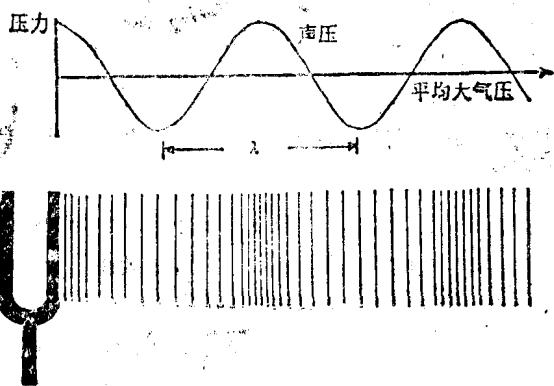


图1-1 音叉产生声波

层，这一层层疏密相间的空气层就构成了声波。当这种由音叉振动而产生的声波传到我们的

耳朵，引起耳中鼓膜的振动，便感觉为声音。

在这里需要说明的是，声波在介质中传向四面八方时，介质质点并不跟随声波一起传播出去，它只是在其平衡位置附近做往返振动。可见所谓声音的传播指的是物体振动的传播。即传播出去的是介质运动的能量，而不是介质的本身。因此，声音在本质上是一种波动，所以声音又叫做声波。

根据噪声源的种类不同，工业噪声大体可以分为空气动力性噪声、机械性噪声和电磁性噪声三大类。

气体在外力的作用下将产生涡流或压力的突变，从而产生扰动，这种由于气体的扰动而产生的噪声就是空气动力性噪声。通风机、鼓风机、空气压缩机等运转时发出的声音其主要成分都是这一类噪声。

机械设备在运转时，各另部件之间将相互撞击、摩擦，机器本身也将出现振动，这些都会产生交变的机械作用力，在这些力的作用下，设备的金属板、轴承、齿轮或其它的运动部分，将发出很强的噪声，它们都属于机械性噪声。

一些利用电磁工作的元件，由于磁场脉动、磁致伸缩、电磁涡流等将使这些电气元件发生振动而发出的噪声，属于电磁性噪声。发电机、变压器等电器设备开动时的噪声都属于这一类。

二、声音的传播

声音在介质中是以波动的形式传播出去的。根据传播介质质点的振动与声波本身运动两者的关系可以区分为横波和纵波两种。如果介质质点的振动方向与波动传播方向相垂直称为横波；如果介质质点的振动方向与波的传播方向一致称为纵波。气体和液体，由于只有体积弹性，所以声波在气体和液体中只能以纵波的形式传播。固体除具有体积弹性外，还有伸长弹性、弯曲弹性、扭转弹性等，所以声波在固体中传播，可以是纵波也可以是横波。

波长、频率和声速是描述声波的三个重要物理量。

声波中两个相邻的压缩区或膨胀区之间的距离称为波长，换句话说，振动经过一个周期声波传播的距离叫做波长。通常用希腊字母 λ 表示。声波通过一个波长的距离所用的时间称为周期，一般用 T 表示。

物体在1秒钟内振动的次数称为频率。通常用 f 表示，单位为赫兹，简称赫，一般用 Hz 表示。频率1赫等于1秒钟内作1次振动。每秒钟振动的次数愈多，其频率就愈高，人耳听到的声音就愈尖，或者说音调就愈高。每秒钟振动的次数愈少，听到的声音就愈低沉，或者说音调就愈低。在正常的情况下，一般人所能听到的声波频率范围为20~20000赫。低于20赫的称为次声，高于20000赫的称为超声。次声和超声人耳都感觉不到，但是一些动物却能听到，蝙蝠能感觉到超声，老鼠能感觉到次声。

通常在噪声控制这门学科中，把声波的频率分为三个频段：300赫以下的叫低频声，300~1000赫的叫中频声，1000赫以上的叫高频声。声波频率的概念是非常重要的，因为控制高频噪声和控制低频噪声的技术措施存在着很大的差别。

在常温和标准大气压下，当频率 $f = 20$ 赫时，相应的波长 $\lambda = 17.2$ 米，当频率 $f = 20000$ 赫时，相应的波长 $\lambda = 0.0172$ 米。因此人们听到的声音的波长一般在1.72厘米到17.2米之间。声波频率与波长的关系见图1-2所示。

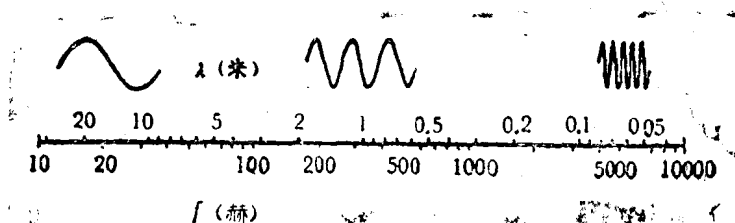


图1-2 频率与波长的关系

振动在介质中传播的速度叫声速。在任何一种介质中的声速随介质的弹性和密度不同而改变。声音在空气中的传播速度还随空气温度的升高而增加,随空气温度的下降而减小。空气的温度每变化1℃,声速约变化0.6米/秒。在20℃的气温下,空气中的声速约为344米/秒。

空气中的声速一般是按照下式计算的:

$$C = 331.4 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} = 331.4 + 0.607t \text{ (米/秒)} \quad (1-1)$$

式中 t ——空气的温度(℃)

在不同的介质中,声速是不相同的,而且往往相差很大。在表1-1中,列出常温下不同介质的声速。

表1-1 常温下(20℃)不同介质的声速

介 质 或 材 料	声 速(米/秒)	介 质 或 材 料	声 速(米/秒)
氧	326.5	铝	5100
氢	1307.6	银	2600
水蒸汽	432①	铜	3900
氮	349	铅	1320
水	1483	花岗岩	6400
甲 醇	1121	玻 璃	5000~6000
乙 醇	1168	砖	4300
甘 油	1923	砖 墙	2000
花生油	1472	混凝土	4000
0°柴油	1385	松 木	3320②
80°汽油	1139	软 木	430~530③
铁	4710~5100	橡 胶	30~50④

①27℃测量值; ②、③、④均为0℃测量值。

声波的波长 λ 、频率 f 或周期 T 与声速 C 之间存在如下的关系:

$$C = \lambda f \text{ (米/秒)} \quad (1-2)$$

或 $C = \lambda / T \text{ (米/秒)} \quad (1-3)$

以上两式是波长、频率(或周期)与声速之间的基本关系式,它们具有普遍的意义,对任何一类波都是适用的。

〔例〕:在常温下,已知空气中的声速 $C = 344$ 米/秒,水中的声速 $C = 1483$ 米/秒,求频率为500赫的声波在空气和水中的波长;

由式(1-2)可得 $\lambda = c/f$, 故

在空气中的波长 $\lambda = 344/500 = 0.688$ 米

在水中的波长 $\lambda = 1483/500 = 2.966$ 米

可见, 同一频率的声波, 在水中的波长比在空气中的波长要长得多; 在同一介质中, 频率高的声波比频率低的声波的波长要短得多。

三、声音的接受

客观世界里的声音传到人耳感觉为声音, 这是一个非常复杂的过程。声音作为一种客观物理现象, 它的主要特征是由声压和频率决定的。客观上的声压和频率, 经人耳反映到人们的主观心理上, 两者往往不相一致, 因此人们应如何来评定和度量客观存在的声音, 这是一个比较复杂的问题。为了解答这一问题, 应首先从人耳的构造和听觉特性谈起。

人耳分外耳、中耳和内耳三个部分, 见图1-3。

外耳包括耳廓和外耳道。耳廓有收捕声音的功能, 由于它的尺寸比人们听到的声音的主要声波要小, 所以它对来自听者正面的声音比来自后面的声音仅能产生一个较小的增强作用。外耳道是一根长2.5~2.7厘米, 平均直径为0.7厘米有特殊弯曲的小管。在它的底部介于外耳和中耳之间有一称之为“鼓膜”的薄膜, 面积约为0.9厘米²。结尾于鼓膜的外耳道, 形成了一个对大约3000赫听觉中段频率的共鸣腔。这个共鸣或接近共鸣的条件使外耳道有一个几乎无反射的终端, 从而使鼓膜与传播声波的空气有一个良好的阻抗匹配。由于它的共鸣特性, 使响应最灵敏的频率大约在2000~5000赫之间。

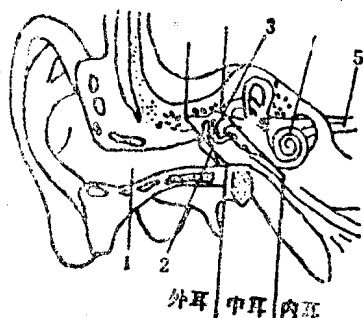


图1-3 人耳的构造

1—耳道; 2—鼓膜; 3—听骨; 4—耳蜗; 5—神经纤维

中耳由鼓膜、鼓室、耳咽管和乳突组成。其中鼓室为一不规则含空气的空腔, 形如一小箱子, 五面为骨面, 外面借鼓膜与外耳道分隔。整个鼓室的容积为1~2毫升, 室内含有听骨、韧带、肌肉及神经, 听骨由锤骨、砧骨和镫骨组成。锤骨附着于鼓膜, 镫骨附着于前庭窗, 锤骨与镫骨中间连接着砧骨。中耳起一个阻抗转换器的作用, 使传播声音的空氣的低阻抗和在前庭窗后边的耳蜗中的淋巴液的高阻抗相匹配。如果没有这样一个阻抗转换将会导致大约30分贝的损失。另外, 通过耳咽管使鼓室与鼻腔咽喉

部连通, 以平衡中耳的气压。

内耳的主要组成部分是耳蜗, 实际上接受声音正是在内耳进行的。耳蜗在耳朵里卷成螺旋状, 约2.75圈, 位于极硬的颞颥骨内, 它的全长几乎都被基底膜分成两个腔。在耳蜗的末端, 这两个腔由蜗顶处的蜗孔连接起来, 这就便于淋巴液在两腔之间流动。约有24000条主听神经末梢的终端与约3厘米长、0.02厘米宽的基底膜上相同数目的毛细胞相连。前庭窗的运动传给基底膜和与其相连的毛细胞, 并经过神经纤维传给大脑, 这个运动被感觉为声音。

内耳的功能很象一个传声器, 基底膜的振动使内层毛细胞产生耳蜗电压, 发出神经脉冲而产生声觉。耳蜗电压的来源似乎是压电效应。

耳蜗起着频率分析的作用。由鼓膜的运动, 通过中耳三块小骨头的杠杆传动, 引起前庭窗运动, 产生一系列电脉冲波, 并沿着基底膜通过淋巴液传输。由于基底膜上的神经纤维长

度沿基底膜由短变长, 因此接收频率由高变低, 即基底膜不同的位置能接收不同频率的声音。

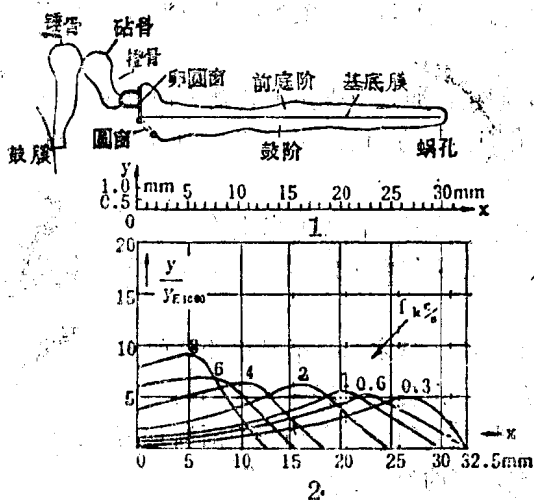


图1-4 展开的耳蜗及其频率响应

1—耳蜗的展开图, 2—基底膜上的频率响应区

人耳是一个非常复杂和精密的声传输机构, 在频率为3000赫时, 人耳可以听到每平方米1沙瓦(1沙瓦= 10^{-12} 瓦/米²)的声音, 这时鼓膜振动的位移稍小于10沙米(1沙米= 10^{-12} 米)。比一个分子的直径还小10倍, 比可见光的波长也小几个数量级(小10万倍), 鼓膜的面积约0.9厘米², 很难想象它为何能做如此超微观的位移。直至今日没有任何能和人耳相比拟的传声器。因此我们应该象爱护眼睛一样来爱护和珍惜自己的听觉器官, 尽力去消除与避免强烈噪声对听觉器官的损伤。

第二节 噪声的主要物理参量

人们平时听到的各种声音, 有的响亮, 有的轻微; 有的调子低沉, 有的调子尖锐, 那么对于这些声音应该如何来衡量呢? 对噪声的衡量, 主要有强弱的度量和频谱分析两个方面。噪声的强弱度量反映声音的大小, 即噪声的轻响程度; 噪声的频谱分析可以看出噪声频率的高低, 即噪声音调高低的程度。

一、声压、声强和声功率

1. 声压

当没有声波存在时, 空气处于静止状态, 这时大气的压强为一个大气压。当有声波存在时, 局部空气被压缩或发生膨胀, 形成疏密相间的空气层向外扩展, 被压缩的地方压强增加, 产生膨胀的地方压强减小, 这样就在大气压上叠加了一个压力变化。这个叠加上去的压力是由声波引起的, 所以称为声压, 常用 P 表示。声压与大气压相比是极微弱的。声压的大小与物体的振动状况有关, 物体振动的幅度愈大, 则压力的变化也愈大, 因而声压也愈大, 我们听起来就愈响, 因此声压的大小表示了声波的强弱。

声压随时间起伏变化, 每秒钟变化的次数很多, 传到人耳时, 由于鼓膜的惯性作用, 辨别不出来声压的起伏变化。对人耳真正起作用的不是某一瞬间的声压, 也不是声压的幅值 P_A , 而是一个稳定的有效声压 P_e 在起作用。在正弦声波的情况下, 有效声压 P_e 与声压幅值 P_A 之间的关系为 $P_e = P_A / \sqrt{2}$ 。

衡量声压大小的单位常采用国际单位制中的帕斯卡, 简称帕,

1 帕 = 1 牛顿/米²

我们知道声压与大气压相比是极其微弱的, 那末究竟微弱到什么程度?

我们生活环境的压强是一个大气压(约等于1公斤/厘米²), 而人耳刚刚能听到最小声压大约为 2×10^{-5} 帕(即 2×10^{-10} 公斤/厘米²), 只有一个大气压的50亿分之一; 而喷气

式飞机附近的声压可高达200帕（即 2×10^{-3} 公斤/厘米²），这是人耳短时间内能够忍受的最大声压，那也不过是一个大气压的千分之二。可见，声压与大气压相比是相当微弱的。

2. 声强

声波的传播伴随着声音能量的传播。在单位时间内，通过垂直声波传播方向单位面积的声能称为声强，常用 I 表示。声强是一个矢量，只有规定了方向后才有意义。通常采用的单位是瓦/米²。

声强的大小和离开声源的距离有关，因为声源在单位时间内辐射出来的声能是一定的，离开声源愈远，声波辐射声能的面积就愈大，因此通过单位面积的声能就愈少，因此声强就愈小。

声强的大小可用来衡量声音的强弱，这和声压一样，只不过一个是用能量的方法，一个是用压力的方法。声强愈大，声音就愈响；声强愈小，声音就愈轻。当我们向一个声源走近的时候，声波辐射面积在减小，声强增大，我们听起来就很响；而当我们渐渐远离声源时，声音便渐渐变弱，是因为辐射面积在增大，声强变小了的缘故。

3. 声功率

声源在单位时间内辐射出来的总声能量称为声功率，通常用 W 表示，常采用瓦作为测量声功率的单位。声功率是表示声源特性的重要物理量，它仅仅能反映声源本身的特性，而与声波传播的距离以及声源所处的环境无关。

声强和声源辐射的声功率有关，声功率愈大，在声源周围的声强也愈大。如果声源在没边界的自由场中向四面八方均匀辐射声波，那末在离声源为 r 处的球面上各点的声强是相同的，因而声源的声功率 W 与声强 I 之间有如下关系：

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

从式（1-4）可以知道，若声源辐射的声功率是不变的，那末声场中各点的声强是不相同的，它与距离的平方成反比。如果声源放在地平面上，声波只向半空间辐射，这时声源的声功率 W 与声强 I 之间的关系变为

$$I = \frac{W}{2\pi r^2} \quad (1-5)$$

声功率是衡量声源辐射声能大小的重要参数，它可以用来鉴定或比较各种声源。由于目前直接测量声强和声功率的仪器比较复杂和昂贵，因此常常利用声压的测量值进行计算而得到。当声波以平面波或球面波传播时，声强 I 与声压 p 、声速 c 、空气密度 ρ 之间的关系为

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (1-6)$$

利用公式（1-4）或式（1-5）以及式（1-6）根据声压的测量值就可以计算出声强和声功率。

二、级和声音的叠加

1. 声压级

前面已介绍过，对于1000赫纯音，人耳刚刚能感觉到的声压为 2×10^{-5} 帕，这个声压被称为“听阈”声压；人耳难以忍受的声压为20帕，这个声压被称为“痛阈”声压。两者的比

值为 $1:10^6$ ，即“痛阈”声压是“听阈”声压的一百万倍。很显然，用声压来表示声音的轻响程度太不方便了。同时，人耳对声音的感受不是与声压的绝对值成线性关系，而是与它的对数近似成正比。因此，将两个声压之比用对数的标度来表示声压的大小，即可把声压相差一百万倍的巨大数字变得十分简单，而且也接近人耳的听觉特性。这种用对数标度表示的声压称为声压级，并采用分贝作为单位。某一声音的声压级的定义是：该声音的声压 P 与参考声压 P_0 的比值取以10为底的对数再乘以20，即

$$L_p = 20 \lg \frac{P}{P_0} \quad (\text{分贝}) \quad (1-7)$$

式中： P_0 ——参考声压，取 2×10^{-5} 帕。

这样，“听阈”声压 2×10^{-5} 帕代入式 (1-7) 就可以计算出相应的声压级为 0 分贝，同理“痛阈”声压 20 帕代入式 (1-7)，可以计算出相应的声压级为 120 分贝。由此可以看到，“听阈”声压到“痛阈”声压从原来 100 万倍的巨大变化范围就转换为 0 至 120 分贝的微小变化范围了。这样一来，给我们表示声压的大小带来了很大的方便。

只要我们测量出某一个声源在某一地点的声压，利用式 (1-7) 就可以很方便地计算出相对应的声压级来。一些噪声源或噪声环境的声压和声压级见表 1-2。

表 1-2 一些噪声源或噪声环境的声压和声压级

噪声源或噪声环境	声 压(帕)	声压级(分贝)
喷气式飞机喷口附近	630	150
喷气式飞机附近	200	140
铆钉机附近	63	130
大型磨磨机附近	20	120
8—18 鼓风机进口	6.3	110
织布车间	2	100
地 铁	0.63	90
公共汽车内	0.2	80
繁华街道	0.063	70
普通谈话	0.02	60
微电机附近	0.0063	50
安静房间	0.002	40
轻声耳语	0.00063	30
树叶沙沙声	0.0002	20
农村静夜	0.000063	10
听 阈	0.00002	0

2. 声强级

与声压一样，声强也可以用“级”来表示。一个声音的声强级是这个声音的声强 I 与基准声强 I_0 之比取以10为底的对数再乘以10，即

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (\text{分贝}) \quad (1-8)$$

式中 I_0 ——基准声强, 取 $I_0 = 10^{-12}$ 瓦/米², 它相当于1000赫时人耳能听到最弱声音的强度

对于自由传播的平面波和球面波的情况, 利用式 (1-6), 并注意到 $I_0 = 10^{-12}$ 瓦/米², $P_0 = 2 \times 10^{-5}$ 帕, 有如下结果:

$$\begin{aligned} L_I &= 10 \lg \frac{I}{I_0} \\ &= 10 \lg \frac{P^2 / \rho C}{P_0^2 / \rho_0 C_0} \\ &= L_P + 10 \lg \frac{400}{\rho C} \end{aligned}$$

ρC 值随介质的压力和温度变化而变化。在 20℃ 和标准大气压下, $\rho C = 415$ 瑞利, 这时 $10 \lg \frac{400}{\rho C} = -0.1$ 分贝, 即有 $L_I = L_P - 0.1$ 。因此, 在通常的情况下, 一个声音的声强级实际上比它的声压级小 0.1 分贝。由于两者相差较小, 常粗略认为两者相等。

3. 声功率级

一个声源的声功率用级来表示时称为声功率级, 常用 L_W 表示, 其表达式为

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad (\text{分贝}) \quad (1-9)$$

式中 W_0 ——参考声功率, 取 $W_0 = 10^{-12}$ 瓦

由式 (1-9) 可知, 当声源的声功率是原来的 2 倍时, 声功率级 $L_W = 10 \lg \frac{2W}{W_0} = 10 \lg \frac{W}{W_0} + 10 \lg 2 = 10 \lg \frac{W}{W_0} + 3$ (分贝), 即声功率级增加 3 分贝。同理, 如果声源的声功率是原来的 10 倍, 那么声功率级将增加 10 分贝。

国际和国内一些机械设备以及环境噪声的评价常采用声压级, 但是声压级的测量受测量距离的影响很大, 测量的标准很难统一起来。因此, 近年来国际标准化组织 (ISO) 推荐采用声功率级作为噪声源的评价标准, 并相应制定出一套测量方法。

表 1-3 给出了一些声源的声功率和声功率级。图 1-5 介绍的是声压和声压级, 声强和声强级, 声功率和声功率级的换算列线图。

表1-3 一些声源的声功率和声功率级

声 源	声功率(瓦)	声功率级(贝)
阿波罗登月运载火箭	4×10^7	195
导弹、火箭	10^5	170
波音707飞机	10^4	160
大型锅炉排气放空	10^3	150
螺旋桨飞机	10^2	140
大型球磨机	10^1	130
空气锤、有齿锯	1	120
织布机	10^{-1}	110
空压机	10^{-2}	100
通风扇	10^{-3}	90
大声喊	10^{-4}	80
一般谈话	10^{-5}	70
微电机	10^{-6}	60
安静的空调机	10^{-7}	50
小电钟	10^{-8}	40
耳 语	10^{-9}	30

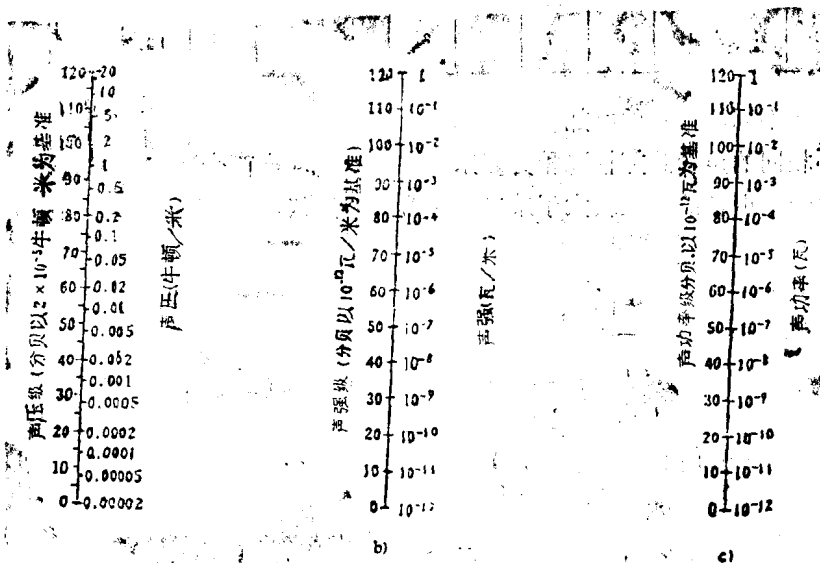


图 1-5 声压、声强、声功率和级的关系

三、声压级计算

1. 声压级相同的声音的叠加

在一个车间里假若有两台车床，站在这两台车床中间先后单独测量它们的声压级，都是100分贝，现在我们问，假若两台车床同时开动声压级应该是多少分贝？是200分贝吗？显然没那么高。我们不能把两个声压级进行简单的代数相加，能进行相加运算的只能是声音的能量。从式(1-6)能够知道，声音能量的相加可以反映为声压平方的相加。

现在已知两台车床的声压级分别为100分贝，即： $L_{p1} = L_{p2} = 100$ 分贝，根据声压级的定义，即式(1-7)，可以得到 $P_1^2 = P_2^2$ 。两声压级叠加后总的声压级 L_p 可以表示为：

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 10 \lg \frac{P_1^2 + P_2^2}{P_0^2} = 10 \lg \frac{2 P_1^2}{P_0^2} = 10 \lg \frac{P_1^2}{P_0^2} + 10 \lg 2$$

$$= L_{p1} + 3 \text{ (分贝)}$$

可见，声压级相同的两个声音叠加，其总的声压级比单个声源的声压级增加 3 分贝。所以两台 100 分贝的车床的总声压级不是 200 分贝，而是 103 分贝。

如果声压级相同的 N 个声音叠加在一起，那么总的声压级可以表示为

$$L_p = L_{p1} + 10 \lg N \text{ (分贝)} \quad (1-10)$$

当 $N = 4$ ，即声压级相同的 4 个声音叠加，总声压级 $L_p = L_{p1} + 10 \lg 4 = L_{p1} + 6$ (分贝)，即声压级相同的 4 个声音叠加，总声压级比单个声音的声压级增大 6 分贝。如果是 10 个的话，将增大 10 分贝，如果是 20 个的话，将增大 13 分贝。相同声压级的声音叠加分贝数的增值可见表 1-4。

表 1-4 相同声压级叠加时分贝增值

声源分数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
分贝增值	0	3	4.8	6	7	7.8	8.5	9	9.5	10	10.8	11.5	12	12.6	13

2. 声压级不同的声音的叠加

声压级不相同的声音叠加情况稍为复杂一些。首先考虑两个不相同声压级的声音的叠加，并假设第一个声音的声压级大于第二个声音的声压级，即 $L_{p1} > L_{p2}$ ，则总的声压级 L_p 可以表示为：

$$L_p = 10 \lg \frac{p_1^2 + p_2^2}{p_0^2}$$

$$= 10 \lg \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \right)$$

$$= 10 \lg \left[10^{\frac{L_{p1}}{10}} \left(1 + 10^{\frac{L_{p2} - L_{p1}}{10}} \right) \right]$$

$$= L_{p1} + 10 \lg \left(1 + 10^{\frac{L_{p2} - L_{p1}}{10}} \right)$$

$$\text{若令 } \Delta = 10 \lg \left(1 + 10^{\frac{L_{p2} - L_{p1}}{10}} \right) \quad (1-11)$$

则总的声压级 L_p 就可以表达为

$$L_p = L_{p1} + \Delta \quad (1-12)$$

由式 (1-11) 和式 (1-12) 可知，总的声压级等于较高的声压级 L_{p1} 加上一个修正项 Δ 。修正项 Δ 与两声压级的差值 $\Delta L_p = L_{p1} - L_{p2}$ 的关系见表 1-5 和图 1-6。

表 1-5 两个不同声压级声音叠加的修正值

单位: 分贝

$L_{p1} - L_{p2}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Δ	3.0	2.5	2.1	1.8	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1

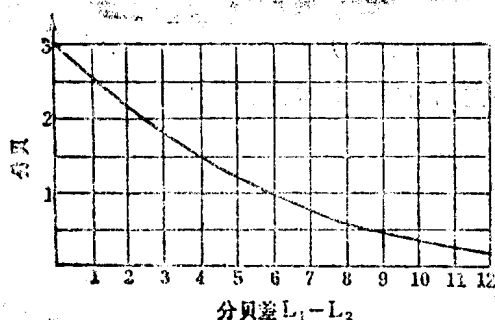


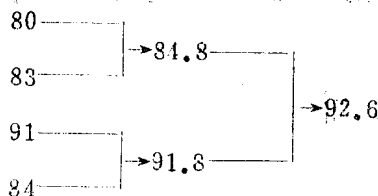
图1-6 不同声压级叠加的修正曲线

(1) 查表法

就是在两个声压级求和的基础上, 连续进行两两相加, 最后求出总声压级。

〔例 2〕 在车间某处分别测量四个噪声源的声压级为 80 分贝、83 分贝、91 分贝和 84 分贝, 问总的声压级是多少分贝?

〔解〕



将 4 个声压级两两编组。第一组由 80 分贝和 83 分贝组成, 第二组由 91 分贝和 84 分贝组成。在第一组里, 两声压级相差 3 分贝, 由表 1-5 查得修正值 $\Delta = 1.8$, 所以 80 分贝和 83 分贝的总声压级为 $83 + 1.8 = 84.8$ 分贝。利用同样的方法, 在第二组里 91 分贝和 84 分贝相差 7 分贝。查表得修正值 $\Delta = 0.8$ 分贝, 所以第二组的总声压级为 $91 + 0.8 = 91.8$ 分贝。4 个声压级的总声压级应该由第一组和第二组分贝的总声压级求得。由 84.8 分贝和 91.8 分贝的差值 $91.8 - 84.8 = 7$ 分贝, 经查表得修正值 $\Delta = 0.8$ 分贝, 故 4 个声压级的总声压级为 $91.8 + 0.8 = 92.6$ 分贝。

通过上面的计算我们知道, 几个声压级叠加的结果主要由其中最大的一个来决定, 其它几个较小的声压级对总声压级贡献不大, 而且随着声压级差值的增大, 这种贡献愈来愈小。例如在例 2 中, 4 个声压级叠加, 起主要作用的是 91 分贝, 总声压级为 92.6 分贝, 仅仅比最

大的声压级91分贝大1.6分贝，所以在声压级进行叠加计算时，往往把数值较小的声压级忽略不计。

(2) 计算法

如果噪声源的个数很多，进行声压级叠加，除了采用两两相加的查表法外，还可以直接利用公式来计算。当有N个噪声源时，它们的声压级分别为 L_{p1} , L_{p2} , ..., L_{pN} 。那末总声压级 L_p 可以用下式进行计算：

$$L_p = 10 \lg \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{pN}}{10}} \right) \quad (1-13)$$

我们将例2中4个声压级叠加用式(1-13)进行计算，运算过程如下：

$$\begin{aligned} L_p &= 10 \lg \left(10^{\frac{80}{10}} + 10^{\frac{83}{10}} + 10^{\frac{91}{10}} + 10^{\frac{84}{10}} \right) \\ &= 10 \lg (10^8 + 10^{8.3} + 10^{9.1} + 10^{8.4}) \\ &= 10 \lg 10^8 (1 + 10^{0.3} + 10^{1.1} + 10^{0.4}) \\ &= 80 + 10 \lg 18.1 \\ &= 92.6 \text{ (分贝)} \end{aligned}$$

可见计算的结果与查表法的结果是一致的。

3. 多个声压级的平均

某一车间若有多个噪声源，分别测量了它们的声压级，那么这些声压级的平均值是多少分贝？还有对于车间某一操作处来说，不同的时间声压级不相同，那末该操作处的噪声如何来评价？这就归结为求声压级的平均值的问题。

假若有N个声压级，分别为 L_{p1} , L_{p2} , ..., L_{pN} ，那么N个声压级的平均值可以用下式计算：

$$\begin{aligned} \overline{L_p} &= 10 \lg \frac{1}{N} \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{pN}}{10}} \right) \\ &= 10 \lg \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{pN}}{10}} \right) - 10 \lg N \quad (1-14) \end{aligned}$$

可见，计算N个声压级的平均值的方法是：首先按式(1-13)求出N个声压级的总声压级，然后减去 $10 \lg N$ 。

〔例〕 若某一车间一指定的操作岗位的声压级在8小时工作时间内变化如下：8点至10点78分贝，10点至12点90分贝，14点至16点88分贝，16点至18点83分贝。问该操作岗位的平均声压级是多少分贝？

$$\text{〔解〕：平均声压级 } \overline{L_p} = 10 \lg \left(10^{\frac{78}{10}} + 10^{\frac{90}{10}} + 10^{\frac{88}{10}} + 10^{\frac{83}{10}} \right) - 10 \lg 4$$

$$\begin{aligned}
&= 10 \lg (10^{7.8} + 10^9 + 10^{8.8} + 10^{8.3}) - 6 \\
&= 10 \lg 10^8 (10^{-0.2} + 10 + 10^{0.8} + 10^{0.3}) - 6 \\
&= 80 + 10 \lg 18.93 - 6 \\
&= 86.8 \text{ (分贝)}
\end{aligned}$$

如果求这4个声压级的算术平均值,则得 $\frac{1}{4} (78 + 90 + 88 + 83) = 84.8$ (分贝)。

平均声压级的计算是从声能平均原理推导得出的,它与人耳对声音的主观感受有较好的一致性。而声压级的算术平均值不能反映这种关系,因此用平均声压级来评价操作岗位的噪声比较合理。

四、噪声的频谱

人们讲话、唱歌以及乐声有高低音之分,同样在工业噪声中电锯声尖锐刺耳,而空压机噪声却低沉闷响,这是什么因素决定的呢?实践证明,声源振动的快慢决定了辐射出来声音的音调有低有高。声源振动的频率愈高,声音的音调就愈高,人耳听起来就尖声刺耳;声源振动的频率愈低,声音的音调就愈低,人耳听起来就低沉隆隆。一般电锯噪声的主要成分在1000赫以上,而空压机噪声主要成分在500赫以下,因此前者听起来刺耳,而后者听起来低沉。

实际上,任何运转的机器辐射出来的噪声绝不会是单一频率或几个频率的噪声,而是由低频到高频无数频率成分的不同声强声音的杂乱组合。有的机器高频成分多一些,我们称这种噪声为高频噪声,有的机器低频成分多一些,我们称这种噪声为低频噪声,也有的机器主要成分分布在300~1000赫的范围内,如高压风机噪声,我们称这种噪声为中频噪声,有的机器较为均匀地辐射从低频到高频的噪声,如纺织噪声,我们称这种噪声为宽频带噪声。

在噪声的研究和控制中,如果对每个频率进行逐个的分析是不必要的,也是不可能的,因此在工程实用中为了使用上的方便,人们把可听声频率范围分成若干段,这就是通常所说的频程或频带。最常用的是1倍频程。1倍频程的分段通常采用10段法,即把可听声频率范围分成10段,每段的上限频率是下限频率的2倍,并且以其几何中心频率来命名。如710~1420赫这一倍频程的中心频率为1000赫 ($f_{\text{中}} = \sqrt{f_{\text{上}} \cdot f_{\text{下}}}$),因此这一段称为1000赫倍频程,其它段以此类推。

在噪声防治中,有时需要进行较详细的频率分析和研究,以便得到精确的噪声频谱,这样就需要把频带规定得更窄一些,实际使用中主要有1/3倍频程和1/10倍频程等几种。1/3倍频程是有一个倍频程再分为3份,各个频带的上下限频率之比为 $\sqrt[3]{2}$;1/10倍频程是有一个倍频程再分成10份,各个频带的上下限频率之比为 $\sqrt[10]{2}$ 。1倍频程和1/3倍频程的频带划分见表1-6。