

王文奇 编著

噪声控制技术 及其应用

辽宁科学技术出版社

· 225565

噪声控制技术及其应用

王文奇 编著



辽宁科学技术出版社

一九八五年·沈阳

046.63

噪声控制技术及其应用

Zaosheng Kongzhi Jishu Jiqi Yingyong

王文奇 编著

辽宁科学技术出版社出版 (沈阳市南京街6段1里2号)

辽宁省新华书店发行 朝阳新华印刷厂印刷

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张: $16 \frac{1}{4}$ 字数: 360,000

1985年7月第1版

1985年7月第1次印刷

责任编辑: 陈慈良 刘 红 责任校对: 丁东戈

封面设计: 邹君文

印数: 1—4,400

统一书号: 15288·127 定价: 3.15元

前 言

噪声污染同空气污染、水污染等一样，也是一种公害。随着工业和交通运输业的发展，噪声污染及其对人体健康的危害，已日益引起人们的关注。噪声影响人们正常的工作和休息，可以引起听觉器官、心血系统、神经系统等方面的疾病。噪声分散人们注意力，掩蔽安全信号，所以它又常常是导致一些伤亡事故的根源。因此，如何控制噪声，将噪声降低到无害的程度，为人们创造舒适的声学环境，乃是现代化建设的不可缺少的一个方面，是环境保护和劳动保护的一项重要课题。也是生活在现代文明社会的人们的共同责任。有鉴于此，本人根据自己多年从事噪声控制的研究和设计所取得的成果和经验，以及参考国内外有关资料，整理成此书。

本书的取材着重在解决噪声控制的实际问题，避免过多地作公式的数学推导，而较多地介绍一些设计实例和控制噪声卓有成效的应用实例，以供从事噪声治理工作的人员参考。全书共分五章，第一、二章介绍噪声基础知识、噪声测量与评价方法及噪声防治的一般方法；第三章讲述吸声体、隔声罩（间）、消声器、减振器、阻尼措施的降噪原理和设计方法；第四章介绍风机、压缩机、管道阀门、破碎机械以及电锯、电刨、冲床等设备的噪声控制措施；第五章介绍几种常用的声学材料和消声元件的性能试验数据资料。

本书承清华大学建筑系车世光教授和北京市劳动保护科学研究所方丹群副研究员的细心审阅，提出许多宝贵意见。北京市劳动保护科研所何友静、张玉敏等同志给了有益的帮助，何友静工程师还参加编写了部分章节。在此一并致以谢忱。

编著者

一九八四年于北京

目 录

第一章 噪声的基础知识	(1)
第一节 声音的产生、传播与接收	(1)
第二节 噪声的物理量度	(8)
第三节 噪声的主观量度	(24)
第四节 噪声在传播中的一些特性	(44)
第五节 噪声测量技术与评价方法	(62)
第六节 噪声的危害与允许标准	(78)
第二章 噪声控制概述	(99)
第一节 从声源上根治噪声	(99)
第二节 在噪声传播途径上降低噪声	(105)
第三节 在噪声接受点进行防护	(112)
第四节 噪声控制工作的程序和方法	(119)
第三章 减噪设备的设计与应用	(126)
第一节 吸声减噪设计与吸声体的应用	(126)
第二节 隔声罩、隔声间和隔声屏	(156)
第三节 消声器	(219)
第四节 隔振与减振器	(281)
第五节 阻尼与阻尼材料	(321)
第四章 常用机器设备的噪声控制	(334)

第一节	风机噪声控制	(334)
第二节	压缩机噪声控制	(355)
第三节	电动机噪声及其控制	(370)
第四节	排气放空噪声控制	(388)
第五节	柴油机、机动车辆噪声控制	(406)
第六节	破碎机械的噪声控制	(422)
第七节	管道阀门噪声控制	(432)
第八节	加热炉噪声控制	(443)
第九节	圆锯和平刨的噪声控制	(453)
第十节	冲床和鼓泡噪声控制	(463)
第五章 噪声控制资料		(471)
第一节	声学材料	(471)
第二节	消声元件试验数据	(488)
第三节	国内降噪设备生产简况	(505)
参考文献		(511)

第一章 噪声的基础知识

什么是噪声？噪声是指人们不需要的声音，或者是指那些让人感到厌烦，对正常工作、休息和学习有干扰，对身体健康有危害的声音。要控制噪声，首先就需要搞清噪声的基本性质，这样才能使采取的措施做到对症下药。噪声也是一种声音，因此，声音所具有的一些属性，声波所应遵循的规律，对噪声同样也是适合的。声音对于我们每个人来说，都是比较熟悉的。在日常生活中，无论在什么地方，每时每刻都会有各种各样的声音传入我们的耳内：工厂里的机器运转声，街道上的车辆行驶声，田野里风吹禾苗簌簌声，小溪流水潺潺声，以及人的说话声，收音机发出的广播节目声……。但是，声音究竟是什么？它是怎样形成的？怎样度量它？它有哪些特性等，这些问题我们是应该弄清楚的。在讨论各种噪声控制技术之前，我们先就有关声音和噪声的基础知识做必要的介绍。

第一节 声音的产生、传播与接收

声音是什么？声音是由物体振动，通过介质传播，引起听觉器官或其他接受器的反应。这就是说，构成一个声系统需要有三要素：声源→介质→接受器。即需要有振动发声的声源，传播声音的介质和接受声音的接受器。这三个要

素是形成声音的充分必要条件。为了对声音的本质有个较为清楚的了解，下面我们从形成声音这三要素谈起。

一、声音的产生

溯本求源，你会发现声音是由物体振动产生的。比如，当你敲锣时，会听到锣的声响，这时，如果你用手轻轻触及锣面，会感触到它在迅速地振动。如果你用手掌按住锣面不使它振动，则锣声也就立即消失了。又如我们讲话声来自喉管内声带的振动，喇叭发声来源于纸盆或音膜的振动，机器声来源于机器部件的振动等。所有这些都说明，声音是由物体振动产生的，我们把振动发声的物体叫做声源。

振动发声的声源，可以是固体（如锣面、机器零件），也可以是气体（如风声、管道排气噪声）或液体（如水浪声）。但不论是呈什么状态的物体，引起声的都是机械性的振动，即振动位置做周期性的变化。最简单的周期振动是简谐运动。描述振动位移的函数是正弦曲线：

$$X = A \sin(2\pi ft + \theta) \quad (1-1)$$

式中 A ——振幅，米；

f ——频率，赫兹；

t ——时间，秒；

$2\pi f$ ——相位，弧度；

θ ——初相，当时间 $t = 0$ 时的相位。

也就是说，一个周期性机械振动可以用振幅、频率和相位三个量来描述。振幅是振动物体离开平衡位置的最大偏离，它与振动能量有直接的关系（振动能量与振幅的平方成正比）。频率表示单位时间内振动的次数，它与声音的音调有着直接的关系。相位表示某一时刻物体在振动过程中所处的

位置。应该指出，描述振动的这三个物理量是彼此独立的。那种认为振动越快（即频率高），则振动幅度也越大的想法，是错误的。

频率通常用符号 f 表示，单位是赫兹，或简称赫，用字母 Hz 表示。1 赫表示每秒钟振动一次。声音是由物体振动产生的，但不是所有的振动都能使人听得见。正常人耳听到的频率范围是 $20 \sim 20,000$ 赫，叫做声频振动（或简称声频）。低于 20 赫的叫做次声，高于 20,000 赫的叫做超声。超声和次声人耳是听不见的。

二、声音的传播

仅有声源，没有介质传播，也不能构成声音。例如，把钟放在抽成真空的玻璃罩内，你是听不到钟摆的滴嗒声的。如果使罩内逐渐放入空气，钟摆的滴嗒声便由弱渐强。当罩内充满空气后，钟摆的滴嗒声便清晰可闻了。这说明声音只有在介质中才能传播，这里传播的介质就是空气。除了气体外，液体或固体也能传播声音。比如，我们把耳朵贴近铁轨，可以听到远方驶来的火车声，河里的鱼通过水面能听到岸边行人的脚步声，而会急速地逃走。我们把能够传播声音的物质，叫做传声介质。

声音在介质中是怎样传播的呢？是以波动形式传播开来的。我们以空气这种最广泛的传声介质为例来说明。如图 1—1 所示，当锣面被敲击振动时，便压缩其邻近的空气，使这部分空气变密。当锣面向左振动时，这部分空气又变稀疏。邻近锣面的空气就这样一密一疏地随着锣面的振动而振动。由于空气具有弹性和惯性这两种特性，所以邻近空气会带动较远的空气做同样的振动。这样锣面的振动便通过空气一密

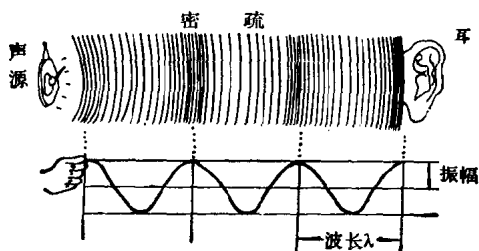


图1—1 声音在空气中的传播

一疏地由近向远扩散开来。

应该指出，声音在介质中传播的只是运动的形式，而介质本身并不传走，它只是在原地振动。这如同我们向平静的水面扔下一小块石子时，在水面激起了一圈圈向外扩展的水波情形一样，水面上漂浮的落叶只是在原地上下振动，而并不随着水波传开。所以，声音的传播乃是物体振动形式的传播，我们把这种振动的传播形式叫做波动。因此，有时把声音也称为声波。

声波在气体和液体中传播，传声介质的质点振动方向和声波传播方向相同，这称为纵波。声波在固体中传播，质点振动方向和声波传播方向可能相同，即为纵波，也可能垂直，则为横波（也称为切变波）。声波在两种介质的界面处传播，质点做椭圆形运动（即质点振动和声波传播由垂直分量和水平分量组成），这称为表面波。我们常见的水波就是一种表面波。

声波振动一次（即1赫）传播的距离，叫做波长。在纵波中（如图1—1示），两个相邻密部或两个相邻疏部之间的距离，就是一个波长。波长通常用字母 λ 表示，单位是米。

声波每秒钟传播的距离叫做声速，用字母 c 表示，单位

是米/秒。在标准大气压下，温度为0℃的空气中，声速为331.4米/秒。温度越高，声速越大。在通常的温度范围内，温度增加1℃，声速增加0.607米/秒。比如在15℃的温度下，声速 $c = 331.4 + 0.607 \times 15 = 340$ 米/秒。

在温度高于30℃或低于-30℃时，需用下式来计算声速：

$$c = 20.05\sqrt{T} \quad (1-2)$$

式中， T 为绝对温度， $T = t(^{\circ}\text{C}) + 273^{\circ}\text{C}$ ， t 为摄氏温度。

在不同的介质中，声速是不一样的。如在20℃温度下，空气中声速为344米/秒，在水中是1450米/秒，在钢铁中是5000米/秒。这就是为什么我们把耳朵紧贴在铁轨上听火车驶来的声音，比从空气中听到的要早些的原因。

应该指出，声速的大小取决于传声介质的性质。对于确定状态下的某种介质来说，声速是个常数，而与声源振动频率和强度无关。

表1—1给出了某些常见的传声介质的密度、声速和声阻抗率。声阻抗率也称为声特性阻抗，它等于介质的密度和声速的乘积，单位是瑞利。声阻的大小决定着声波从一种介质传入另一种介质时的反射程度以及材料的隔声性能。

在声学中，波长 λ 、频率 f 和声速 c 是三个非常重要的物理量，它们之间有如下的关系：

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{或} \quad c = \lambda \cdot f \quad (1-3)$$

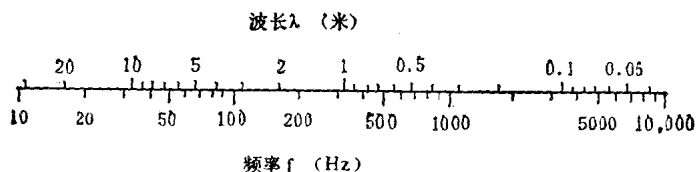
这个公式是波长、频率和声速之间的基本关系式，具有普遍意义，对任何一类波都是适用的。

由公式(1—3)可以看出，波长、频率和声速三个量

表1—1 某些介质的声速、密度和声阻抗率

介质名称	温度 t ($^{\circ}\text{C}$)	密度 ρ_0 (公斤/米 ³)	声速 C (米/秒)	特性阻抗 $\rho_0 C$ (瑞利)
空 气	20 $^{\circ}\text{C}$	1.205	343	410
水	20 $^{\circ}\text{C}$	1×10^3	1450	1.45×10^6
玻 璃	20 $^{\circ}\text{C}$	2.5×10^3	5200	1.33×10^7
铝	20 $^{\circ}\text{C}$	2.7×10^3	5100	1.30×10^7
钢	20 $^{\circ}\text{C}$	7.8×10^3	5000	3.90×10^7
铅	20 $^{\circ}\text{C}$	11.4×10^3	1200	1.37×10^7
木 材		0.5×10^3	2400	1.20×10^6
橡 皮		$1 \sim 2 \times 10^3$	40~150	
混凝土		2.6×10^3	4000~5000	1.3×10^7
砖		1.8×10^3	2000~4300	6.5×10^6
石 油		70	1330	9.3×10^5

中，知道两个便可求出第三个。由于对确定的传声介质来说，声速 c 是个常数，所以根据公式 (1—3) 可知，频率高，波长短；频率低，则波长长。在常温的空气中，当频率由100赫变化到4000赫，其波长变化范围在3.4米~8.5厘米。了解这点是很重要的，因为一种控制措施对波长长的声波与波长短的声波，其效果是相差很大的。图1—2表示了空气中

图1—2 波长 λ 与频率 f 的关系 (在20 $^{\circ}\text{C}$ ，正常大气压下)

声波的波长与频率的关系。

三、声音的接受与人耳的机能

自然界里存在着许多声波，但却不能称为声音，在介质中传播的声波，只有被接受器所接收并引起反应才能构成声音。最普通的声接受器是人耳和传声器（话筒）。耳朵是人体感受声音的器官，传声器是声学测量系统中的声传感器。后者我们将在以后的噪声测量中讲到，这里我们谈谈人耳的机能。

人耳是由外耳、中耳、内耳构成，如图1—3所示。平常我们看到的耳朵是外耳，它起着收集声波的作用。在外耳和中耳之间有一层薄膜，叫做鼓膜。声波由耳道进来，使鼓膜产生相应的振动。鼓膜振动由一组听骨通过卵形窗进入内耳，刺激分布在基底膜上的听觉神经末梢并传给大脑，我们就听到了声音。

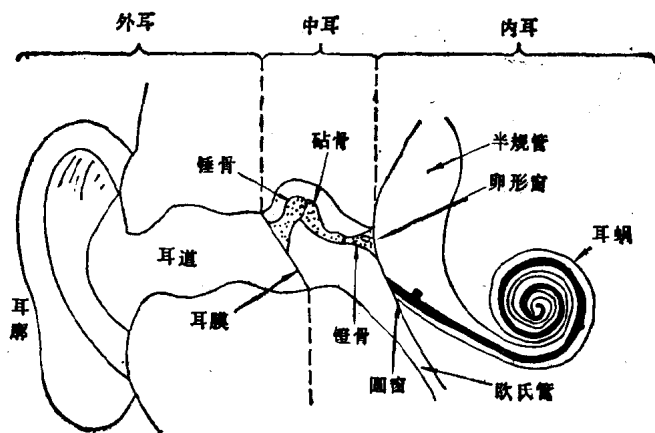


图1—3 人耳的构造

人耳是非常灵敏的声音感受器，世界上还没有任何一种小的物理仪器能做到象人耳那样灵敏精密。在内耳的基底膜表面上约分布有25,000条主听觉神经末梢。对每一频率的声音，基底膜上都有一个最大振动点。人耳不但能够经受得起自然界里较强的声音，其声压达 10^3 帕，而且可以感觉到极小的声压，最小声压弱至 10^{-5} 帕。这样微小的压强，在1000赫左右，鼓膜上只产生数量级为 10^{-9} 厘米的位移，比氢分子的直径的十分之一还要小。小小的耳朵竟有如此惊异的机能，这对我们人来说，真可谓得天独厚。

人耳不仅是一个极其灵敏的传声器，而且还可以起分析器的作用，并且这种分析器具有相当大的选择本领。比如，在有干扰的本底噪声下，人们可以从中分辨出某些特殊频率的声音。细心的母亲，可以在一片嘈杂环境中听出她的小孩的哭叫声。卧在床上的盲人，凭借脚步声或呼吸声，可以判别出他所熟悉的朋友的到来。此外，令人惊奇的是，人的听觉还具有判别响度、音调和音色等项机能。人耳如此灵敏精密，我们应该加倍地珍爱和保护它，不能让它遭受噪声和其他因素的危害。

综上所述，构成声音需要有声源、传声介质和接受器这三要素。正因为如此，在噪声控制中，也往往从这三方面着手解决，这在以后各章将要详细介绍。

第二节 噪声的物理量度

声音主要有强弱和高低两个方面的衡量。强弱指的是声音的大小，是震耳欲聋，还是弱如蚊声；高低指的是声音的调子粗细，是低沉轰鸣，还是尖叫刺耳。当然声音的强弱或

高低，除与声音客观量有关外，还与人的主观感受有关。关于噪声的主观量度我们放到下一节（第三节）讨论，本节着重谈谈噪声的客观的物理量度。

表示噪声强弱的客观物理量度主要有声压、声强、声功率以及它们的“级”；表示噪声高低客观量度主要有频率、频程。而噪声频谱则是噪声强弱与高低的二者结合。

一、声压与声压级

（一）声压

如前所述，声音在介质中是以波动方式传播的。比如，在空气中，当没有声波时，空气中的压强即为大气压。当有声波传播时，某处的空气作时疏时密地变化，便使压强在原来大气压上下起伏，因此相当于在原来大气压上叠加一个变化的压强，声压就是指介质中的压强相对于无声波时的压强的改变量，通常用符号 P 表示，其单位是牛顿/米²或帕斯卡（简称帕），有时也称作微巴（ μb ）。

1 大气压 = 1 巴 = 10^6 微巴 = 10^5 牛顿/米² = 10^5 帕。

声音的声压大，该声音就强。而声压的大小是由声源振动的振幅决定的（声源振幅大，空气被压缩才大），它与声源的振动频率没有关系。声压只有大小，没有方向。同时，由于声压是随时间作疏密相间不断变化的，所以，通常用一段时间内的有效声压表示，称为有效声压，它是瞬时声压的均方根值(rms)，其数学表达式为：

$$P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (1-4)$$

式中 $p(t)$ 为瞬时声压； t 为时间； T 为声波完成一个周期所用的时间。

对于正弦波，有效声压等于声压的最大值除以 $\sqrt{2}$ 。通常资料中所提到的声压如未加说明，则就是指有效声压。

声压是表示声音强弱最常用的物理量，大多数声接受器（包括人耳和传声器）都是响应于声压的。多大的声压能使耳具有声音的感觉呢？对听力正常的人来说，当1000赫纯音的声压为 2×10^{-5} 帕时，则刚刚可听到，这叫听阈声压。而声压达20帕时，会感到震耳欲聋，这叫痛阈声压。人们一般说话的声压约为0.02~0.03帕，是大气压的千万分之二、三左右。可见，声压与大气压相比，是很小的，就好象海面上的小波浪与大海深度相比一样。

（二）声压级

人耳的听觉范围，从刚能听到的落叶之类的轻声，到震耳欲聋的大炮巨响，声压变化范围从 2×10^{-5} 到20帕，相差一百万倍。所以，用声压表示声音的强弱是很不方便的。为此，人们便采用称为声压级的对数刻度来表示，单位是分贝。引入“级”来表示声音的强弱，就如同用级表示风的大小和地震的强弱是一样的（日常我们说几级风或几级地震，而很少说风速是每秒多少米或地震的能量有多少尔格），这不仅表达方便，避免了计算中数位冗长的麻烦，同时也符合人耳听觉分辨能力的灵敏度要求。因为人对声音大小的感觉不是与声压绝对数值成正比的关系，而是成对数关系。

引入“级”表示声音强弱，就需要规定个基准值作比较标准。国际上统一规定，把正常人耳刚刚能听到的声压（ 2×10^{-5} 帕）作为基准声压 P_0 ，定为0分贝。这与我们把海平面定为0米标高来衡量山峰和大地的高度一样。

声压级的数学表达式为：