

噪声控制理论

王伯良 主编



华中理工大学出版社

噪声控制理论

王伯良主编

责任编辑 刘宣藩

华中理工大学出版社出版发行

(武昌·喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本850×1168 1/32 印张: 10.625字数: 260 000

1990年8月第1版 1990年8月第1次印刷

印数1-2 503

ISBN 7-5609-0458-0/TB·13

定价: 2.12元

内 容 简 介

本书内容主要包括噪声与振动理论基础, 噪声的主、客观评价, 噪声标准及噪声测量, 声源识别方法, 消声器设计, 室内声学及吸声处理, 隔声、隔振及阻尼处理等。对工业中常见的噪声源, 如齿轮、轴承噪声, 电机噪声, 流体动力噪声, 交通噪声, 以及典型高噪声机械的噪声产生机理及其噪声控制方法作了介绍。

本书可作为高等工业院校机械、交通、电子、轻工、冶金、化工、液压与气动、企管和环保等各专业噪声控制课程的试用教材, 也可供从事噪声控制、环境保护和有关工程技术人员参考。

前 言

随着现代工业的不断发展，噪声污染问题越来越突出。为了给人们提供一个安宁、舒适的工作和生活环境，控制噪声已受到人们广泛的关注。目前，国内外对只要能够发声的工业产品，几乎都已制订或正在制订噪声限值法规。因此，人们对噪声控制理论的了解与研究表现出浓厚的兴趣。当前，国内有关院校很多专业已新开设了有关噪声控制的课程，这将对噪声控制科学的发展起到积极的推动作用。

本书是为满足噪声控制理论教学的需要而编写的。书中在详细论述对各行业具有共性的噪声控制理论的基础上，对常见噪声源的噪声控制方法作了具体介绍，以期为其它机器的噪声控制提供有益的启示。因此，本书具有专业覆盖面广的特点，可作为高等工科院校各专业有关噪声控制课程的试用教材。

本书由洛阳工学院王伯良副教授（第一、三、五、六、七、十一章）、关光森副教授（第二、八、十章）、唐才林副教授（第四、九章）编写。由王伯良主编。全书承江苏工学院宫镇教授主审，提出了许多宝贵意见，谨此致谢。

由于编者水平有限，书中错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1988年9月1日

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 噪声及其危害.....	(1)
第二节 噪声的物理度量.....	(5)
第三节 噪声的分类.....	(15)
第四节 噪声控制研究动向.....	(16)
第二章 振动与声学基础	(19)
第一节 振动基本理论.....	(19)
第二节 声波方程.....	(31)
第三节 声源理论.....	(36)
第四节 声波的传播.....	(42)
第五节 电—力—声类比.....	(50)
第三章 人对噪声的主观评价	(54)
第一节 人耳的构造和听觉特性.....	(54)
第二节 频带及频谱分析.....	(56)
第三节 等响曲线与A、B、C声级.....	(60)
第四节 噪声评价数NR.....	(67)
第五节 噪声的其它评价方法.....	(69)
第四章 噪声标准与噪声测量仪器	(76)
第一节 噪声限制标准.....	(76)
第二节 噪声测量.....	(80)
第三节 噪声测量仪器.....	(85)
第五章 噪声控制总论	(93)
第一节 噪声源识别技术.....	(93)
第二节 从声源上根治噪声.....	(111)
第三节 在噪声传播的途径上降低噪声.....	(115)
第四节 噪声的个人防护措施.....	(118)

第六章 室内声学 and 吸声处理	(123)
第一节 室内声学基础	(123)
第二节 混响室与消声室	(131)
第三节 吸声处理及其减噪量计算	(135)
第四节 吸声材料与吸声结构	(139)
第五节 吸声减噪实例	(149)
第七章 隔 声	(153)
第一节 隔声与吸声的区别及其联系	(153)
第二节 材料隔声量的计算	(155)
第三节 隔声室设计	(163)
第四节 隔声罩设计	(167)
第五节 隔声屏	(169)
第六节 隔声工程实例	(172)
第八章 隔振及阻尼处理	(178)
第一节 隔振原理	(178)
第二节 隔振装置设计	(184)
第三节 其它隔振方法	(182)
第四节 阻尼材料及阻尼处理	(197)
第九章 消声器设计	(206)
第一节 消声器分类及其性能评价指标	(206)
第二节 阻性消声器	(211)
第三节 抗性消声器	(217)
第四节 阻抗复合式消声器及微穿孔消声器	(224)
第五节 其它类型的消声器	(226)
第十章 流体动力噪声控制	(233)
第一节 空气动力性噪声的类型	(233)
第二节 风机噪声控制	(239)
第三节 空压机噪声控制	(246)
第四节 液体动力噪声概述	(249)
第五节 泵和管道中的液体噪声	(253)
第六节 液压传动中的机械噪声	(257)

第七节	液压系统噪声控制的一般措施.....	(259)
第十一章	常见噪声源的噪声控制.....	(266)
第一节	齿轮与轴承噪声控制.....	(266)
第二节	汽车、拖拉机噪声控制.....	(276)
第三节	电机噪声控制.....	(293)
第四节	交通噪声控制.....	(302)
第五节	电锯电刨与冲床噪声控制.....	(322)

第一章 绪 论

第一节 噪声及其危害

一、声音能造福，噪声是公害

人们是生活在充满着声音的世界里，不论是白天还是黑夜，不论在城市还是在农村，声音无时无刻不在伴随着我们。同时人们也已经习惯于生活在有一定声音的环境之中，如果处在完全没有声音的环境里时，人们反而会感到很不习惯，甚至产生恐惧。

实践证明，声音对于人类既有利又有害。例如，语言就是一种声音，它可以交流人们之间的思想，表达相互的感情；医生可以借助听诊器听到病人心跳和呼吸的声音来判断病情；汽车、拖拉机驾驶员根据机器的响声，能够判断车辆工作是否正常；音乐、戏剧、电影、广播等，都是利用声音为人类服务。但是，有的声音也常常对人的身体产生不利的影响，使人们感到厌恶和疲倦，这种声音就是噪声。从广义上讲，凡是人们不需要的声音，都统称为噪声。从物理学观点来说，噪声是指声强和频率的变化都无规律，杂乱无章的声音。现在噪声已经成为举世公认的国际公害，并被认为是主要的环境污染之一。

二、噪声的危害

经过多年研究得知，噪声的危害是多方面的，归纳起来有下面几点：

1. 减退听力，甚至引起噪声性耳聋

人耳接受噪声刺激常会出现听力下降，若在安静环境中经过一段时间后，听力能恢复原状，这种现象称为暂时性听阈偏移（亦称听觉疲劳），若听觉不能复原，内耳器官发生了气质性病

变，则称为永久性听阈偏移，也称为听力损失或噪声性耳聋。

从理论上说，听力弱于正常青年人的听力标准（听力零级）的，即应视为听力有了损失。但由于人的个体听力差异很大，听力检查又有一定误差，所以，在一般临床中取 $15 \pm 5\text{dB}$ 作为听力检查的波动范围。听力变化在这一范围内，可视为基本正常；若超出这一范围，叫听力异常。1964年，ISO规定以500、1000、2000Hz听力损失的平均值超过25dB作为噪声聋的起点。一般认为，听力损失在25~40dB之间时，为轻度耳聋；40~55dB时为中度耳聋；55~70dB时为显著耳聋；70~90dB时为严重耳聋；90dB以上时为极端耳聋。

我国《工业企业噪声卫生标准》协作组曾对109个工业企业的10021名职工（包括在无噪声环境中工作的一千多名职工作为对照组）的听力进行测试分析，排除因病、药物及其它非噪声致聋因素后，经统计分析得出表1-1的结果。从表中可以看出：在85dB(A)以下的职业性噪声暴露时，造成噪声耳聋者很少；在85~90dB(A)之间时，会造成少数人噪声耳聋，在90~100dB(A)之间时，有较多的人产生了噪声耳聋；在100dB(A)以上时，患噪声耳聋者人数显著增多。

表1-1 噪声性耳聋情况调查结果

工龄 噪声级 (dB(A))	10年		20年		30年	
	统计人数	耳聋人数	统计人数	耳聋人数	统计人数	耳聋人数
80	276	0	143	0	102	1
85	271	0	142	1	132	2
90	324	0	238	2	111	2
95	173	2	224	5	57	5
100	203	5	116	11	77	15

注：工龄系按实际接触噪声年限计算 每周六天，每天八小时

以上是指噪声长期作用而造成的慢性噪声耳聋。还有一种爆震性噪声耳聋，一次性极强噪声作用（如高达150dB的噪声），则听觉器官出现鼓膜破裂或耳出血等声外伤，会造成双耳完全失听。

2. 造成人体的其他生理危害，

中等强度的噪声已可危害到人的神经系统，常会使人产生头疼、昏晕、耳鸣、多梦、失眠、心慌、记忆力减退和全身乏力等症状，医学上统称为神经衰弱症。我国对纺织女工所作的健康调查（见表1-2）表明，在噪声环境中工作的工人，患神经衰弱症者随噪声的增大而增多。

表1-2 纺织女工神经衰弱症率与噪声级的关系

		噪 声 强 度 (dB)		
		100	90	80
可分析人数		196人	212人	169人
患病人数	易怒感	32人	26人	21人
	头痛	62人	32人	10人
	头晕	27人	35人	2人
	心区痛	12人	11人	13人
	耳鸣	4人	4人	1人
	易倦感	27人	7人	2人
	失眠	18人	21人	7人
患病症者总数		182人	136人	56人
患病率 %		92.9	64.2	33.1

噪声还会使人体的心血管系统受到影响，出现心跳加快，心律不齐，血管痉挛、血压升高或降低等症状。例如对在85~95dB的高频噪声环境中工作的绳索厂和轴承厂的工人调查发现，高血压患者占7.6%，低血压患者占12.3%。

噪声对消化系统亦有影响，可使肠胃机能阻滞，消化液分泌异常，胃酸度降低，造成消化不良，食欲不振，久而久之，易导致胃病及胃溃疡等。

噪声对内分泌系统也有危害，它使肾上腺机能亢进，肾上腺分泌增加，导致女工月经失调，孕妇流产率增高。

噪声对视觉器官也有影响，由于神经传入系统的相互作用，对蓝色、绿色光线视野增大，对金红色光线视野缩小。同时，视觉清晰度下降，长期接触噪声的人，因视觉器官被伤害，常患有眼痛，视力减退，眼花等症。

噪声对人体各系统造成的生理危害有即时性的，当脱离噪声环境后便可慢慢恢复正常；另一种是远期的持久性的慢性伤害，其危害性很大，而且不易被觉察。

3. 干扰人们的学习、工作、休息和睡眠

随着社会工业化程度的提高，机动车辆噪声、工业噪声、航空噪声的综合干扰，已影响到人们的正常活动。例如，据报纸报道，日本首都“七环路”周围的居民受到川流不息的汽车噪声的危害严重，使人们不能正常生活；意大利罗马市是世界上噪声最严重的几个地区之一，该市严重的噪声污染是一部分市民患精神病和内分泌系统疾病的主要原因之一，由于整个罗马市的噪声都超过70dB，致使成千上万人的听觉迟钝。科学家们认为，那些经常处于噪声威胁下的人们，要比其他人早衰八到十年。

我国也是噪声比较严重的国家之一，许多大、中城市的污染越来越厉害，“噪声官司”越来越多。据统计，各地有关环境污染的告状信中，噪声污染方面的告状信往往最多。

4. 强烈噪声能使建筑物遭到破坏

当代超音速喷气式飞机低空或超低空飞行时产生的噪声，可门窗玻璃，摧落灯具及货架上的货物，掀落屋顶瓦片，甚至摧塌烟囱，使墙上灰浆或墙壁开裂。据美国统计的三千件超声速飞机低空飞行时使建筑物受损的情况，其中墙壁抹灰开裂的占43%，

损坏的占32%，墙开裂的占15%，瓦损坏的占6%。强噪声对建筑物破坏的事件，在日本、德国都曾有过报道。

5. 强烈的噪声可以使人致命

在古代，教会曾用钟声惩处异教徒，就是利用巨钟发出的强大声波将人折磨致死。科学家经过试验测得，当噪声达到130dB时，人耳会产生明显的疼痛感觉；当达到150dB时，人就无法忍受；若达到180dB时，能引起金属疲软；而达到190dB时，声波就能将机器上的铆钉震脱。

综上所述，噪声的危害是极严重的。因此，工业、交通、建筑、化工、纺织、环保等各行各业对噪声问题的研究都已普遍开展，噪声控制技术也日臻成熟。

第二节 噪声的物理度量

噪声如何度量，这是一个复杂的问题。由于人的生理与心理特性等的影响，因此对噪声的主观感觉，与客观上噪声的强弱有时不完全相符，这就产生了人们对噪声的主观评价问题（关于噪声的主观评价将在第三章中讨论）。噪声客观上的强弱大小的计量，叫做物理度量（也称客观评价）。本书将从声的产生与传播入手，讨论噪声的物理度量问题。

一、声的产生与传播

从图1-1中所示可以说明声的产生与传播。设想击鼓时鼓面在振动，当鼓膜向右振动时，右面邻近处的空气质点Ⅰ受到挤压而离开平衡位置向右运动。这个质点的运动必然又会推动相邻质点Ⅱ也向右作稍许运动。又由于空气媒质的弹性作用（图中媒质质点间以小弹簧示意），质点Ⅱ会产生一个反抗压缩的力，它迫使质点Ⅰ到达右边某一位置后，反过来向平衡位置移动。因为质点具有质量（即有惯性），故质点Ⅰ在平衡位置不会停住，它将越过平衡位置后，又去挤压左侧的相邻质点，该质点也会产生一

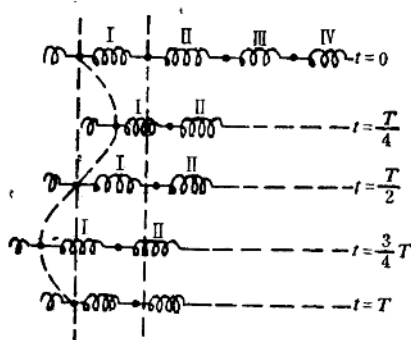


图1-1 声的产生与传播示意图

个反抗其压缩的力，使质点 I 在到达左侧某一位置后，又回过来向右运动。可见，由于空气媒质的弹性和惯性作用，这个最初被鼓膜扰动的空气质点 I 就在平衡位置振动起来。同理可知，被质点 I 推动了的质点 II，以至更远的 III、IV …，也会依次在各自的平衡位置振动起来。这种媒质质点的机械振动由近及远地传播，就称为声波，而扰动媒质产生声波的物体（例如这儿讲到的鼓膜），就称为声源。

应当指出，上述所谓媒质质点，实际上是代表着一个微体积元的媒质。当微体积元被压缩时，形成密部。被放松时，形成疏部，所以，声波是媒质密度变化的波，即疏密波。

我们知道空气变密时，其内部压强增大；空气变疏时，压强就降低。因此，声波的传播过程，实质上又是压力波的传播过程，亦可称为压力波。这种变动的压力波作用于人的听觉器官，就使人们感觉听到了声音。

综上所述可以看出，要形成能为人耳接收的声音，必须具备两个条件：一是要有声源；二是要有传播声的媒质。

从声源来看，不仅固体振动可产生声音，气体和液体振动也

会发出声音。譬如，发动机的排气声，主要是废气压力脉动的结果；江河湖海的波涛声，主要是液体振动的结果。从传声媒质来看，不仅空气可以传声，固体和液体也都可以传声。人在水中可以听到远处潜艇在水下发出的声音；将耳朵贴近钢轨，可以听到远处奔驰而来的火车车轮滚动声。

在声波中，媒质质点每秒振动的次数叫频率 f ，单位是赫兹（Hz）。对人来说，只有20~20000Hz的振动才产生声音的感觉，高于20000Hz的声波叫超声，低于20Hz的叫次声。超声和次声人耳都听不见。

声波在媒质中的传播速度叫声速 c ，单位是m/s，而把媒质质点振动一次时声波所传播的距离，称为波长 λ 。波长、声速、频率三者之间有下列关系：

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

二、噪声的物理度量

噪声的物理度量常用声压、声强、声功率及其“级”（即“分贝”值，记作dB）来表示，下面着重阐明这些单位的概念。

1. 声压与声压级

大气在无声波传播时所具有的压强，称为静压强。当在有噪声传播时，该处的空气在某瞬间即产生了附加压强 Δp 。这个超过（或低于）静压的量 Δp ，称为瞬时声压。由于瞬时声压是不断变化的，而且有正负值之分，不便于用以比较不同声波的声压大小，故常用瞬时声压的均方根值，即有效值 p 来表示， p 称为有效声压。即

$$p = \sqrt{\frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} (\Delta p)^2 dt} \quad (1-2)$$

式中 t_1 ——某段时间的时间量，它应长到不影响计算结果。

声压的单位是帕斯卡（Pa），简称为帕。

$$1 \text{ 大气压} = 1.013 \text{ 巴} = 10^6 \text{ 微巴} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 10^5 \text{ Pa}$$

正常人耳刚刚能听到的声压是 $2 \times 10^{-5} \text{Pa}$ (频率为 1000Hz 时), 称为听阈声压, 而刚刚使人耳产生疼痛感觉的声压是 20Pa , 称为痛阈声压。当声压达到数百帕以上时, 会使人耳鼓膜损伤以至引起耳出血。

可以看出, 从听阈到痛阈, 声压的绝对值之比为 $10^6:1$, 即相差1百万倍。直接用声压的绝对值表示声音的强弱, 其数字变化范围太大, 不便于记忆和使用。因此, 常用一个成倍比关系的对数量——“级”表示声音的大小, 称为声压级, 单位是“分贝”, 记作 dB 。这正如用“级”表示风的大小和地震的强弱一样。

声压级 L_p 与声压 p (以后不特别说明时, 将有效声压简称为声压) 的关系可用下式表示

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (1-3)$$

式中 p_0 ——基准声压, 即为听阈声压, $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 。

人耳适听的声压级范围大致为 $0 \sim 120 \text{dB}$ 。

2. 声强与声强级、声功率与声功率级

声波作为一种波动形式, 当然具有一定的能量, 用声波的能量大小, 也可以表示声辐射的强弱。声能量的大小, 常用声强和声功率表示。

声强是在垂直于声波传播方向上, 单位时间内通过单位面积的声能, 常用 I 表示, 单位是瓦/米² (W/m^2)。

声功率是声源在单位时间内辐射的总声能, 通常用 W 表示, 单位是瓦 (W)。

声功率 W 与声强的关系为:

$$W = \oint I dS \quad (1-4)$$

式中 S ——包围声源的封闭面面积;

I ——在微元面积 dS 法线方向的声强。

在自由声场中 (即声波无反射的自由传播的地方), 点声源

作球面均匀辐射时，按球面平均的声强 $I_{\text{球}}$ 为

$$I_{\text{球}} = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (1-5)$$

式中 r ——球面半径 (m)。

如声源在开阔空间的地面上，声波按半球面平均的声强 $I_{\text{半球}}$ 为

$$I_{\text{半球}} = \frac{W}{2\pi r^2} \quad (1-6)$$

显然，当声源声功率一定时，在声场的不同点处的声强是不同的，它与离开声源距离的平方成反比。

在自由声场中，声强与声压的关系为

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (1-7)$$

式中 ρ ——媒质密度；

c ——声速。两者的乘积 ρc ，称为媒质的特性阻抗，对空气而言，在标准大气压和20℃时， $\rho c = 413$ 瑞利。

在自由声场中，声功率与声压的关系为

$$W = \frac{4\pi r^2 p^2_{\text{球}}}{\rho c} \quad (1-8)$$

在半自由声场中，声功率与声压的关系为

$$W = \frac{2\pi r^2 p^2_{\text{半球}}}{\rho c} \quad (1-9)$$

从听阈到痛阈，声强的变化范围是 $10^{-12} \sim 1 \text{ W/m}^2$ 。可见它们的绝对值之比更大，为 $10^{-12} \sim 1$ ，即相差亿万倍。为了使用上的方便，仿照声压级，也将声强和声功率分“级”，称为声强级和声功率级，单位也是dB。

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

$$\text{声功率级 } L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad (1-11)$$

式中 I_0 ——基准声强, 取 $I_0 = 10^{-12} \text{W/m}^2$;

W_0 ——基准声功率, 取 $W_0 = 10^{-12} \text{W}$ 。

声压级与声强级在数值上近似相等, 两者的关系为

$$L_I = L_p + 10 \lg \frac{400}{\rho c} \quad (1-12)$$

在一般计算中, 因上式第二项很小, 可以略去。

用dB计量噪声强弱, 既简便又符合生理感觉, 因此, 已为世界所公认。

表1-3是一些典型环境中的声压和声压级。

表1-3 一些声源的声压和声压级

噪声源或噪声环境	声 压 (Pa)	声压级 (dB)
普通谈话	0.020	30
繁华街道	0.063	70
公共汽车内	0.200	80
织布车间	2	100
汽车喇叭	7	110
大型柴油机	20	120
喷气式飞机附近	200	140

图1-2是声压、声强、声功率及其级的换算列线, 供相互换算之用。

三、分贝的计算

分贝既然是对数单位, 那么分贝的计算就不能按一般的自然数运算了, 它应当依照对数法则, 即按能量叠加规律进行计算。

1. 分贝的加法 (声级的合成)

分贝相加, 常用算法或查表法计算。

(1) 算法

设相加的声级值为 L_1 、 L_2 、 $\dots$ 、 L_n , 按“级”的定义不难导出 n 个声级值的总声级的计算公式为