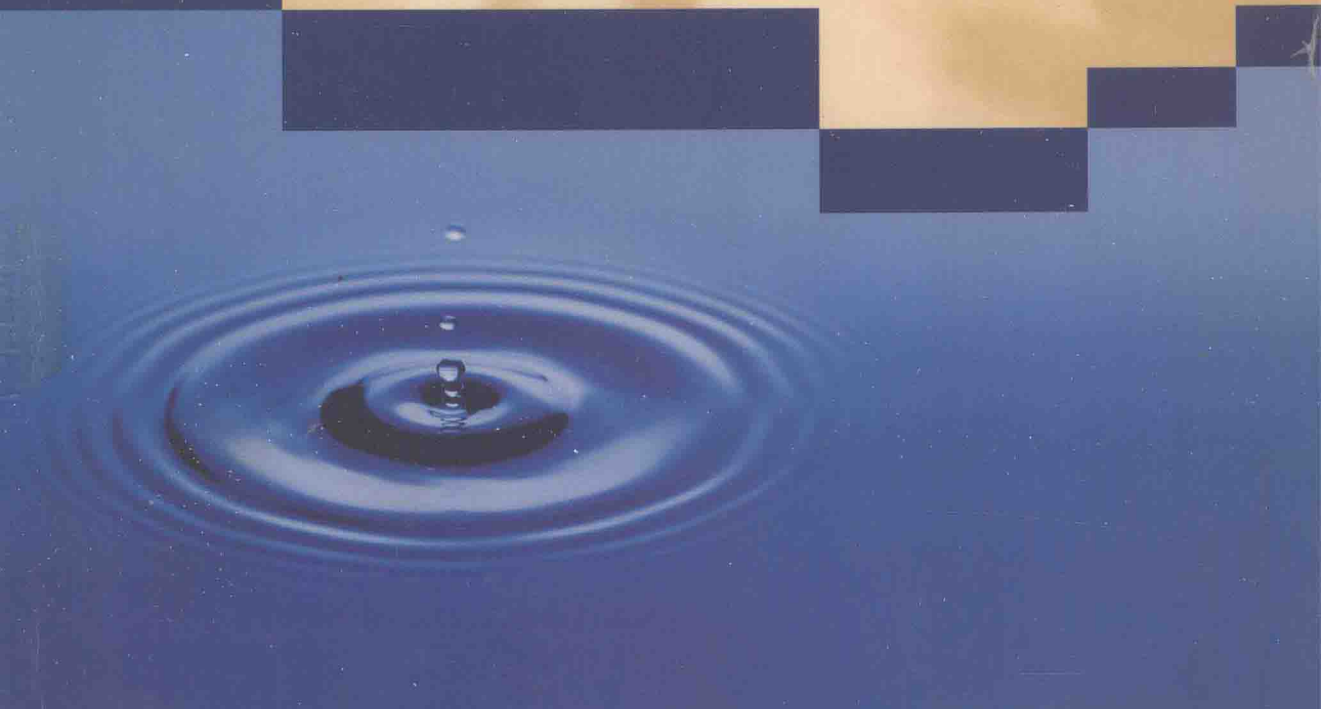


主编 刘惠玲

环境噪声控制

哈尔滨工业大学出版社

市政与环境工程系列丛书



环境噪声控制

刘惠玲 主编

哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨

内 容 提 要

本书阐述了噪声控制的基础知识、基本理论、方法及工程应用。全书共分八章,内容包括环境噪声概述、噪声控制中的声学基础、噪声的测量评价与影响预测、吸声降噪、隔声技术、消声器、隔振与阻尼、噪声的主动控制等。

本书注重理论与工程实际相结合,可作为高等学校环境工程以及有关专业的噪声控制课程教材,也可以供从事环境保护、城市规划、建筑设计等工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境噪声控制/刘惠玲主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002.10

ISBN 7-5603-1798-7

I . 环… II . 刘… III . 环境噪声 - 噪声控制
IV . TB535

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 080177 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006

传 真 0451—6414749

印 刷 地矿部黑龙江测绘印制中心印刷厂

开 本 787×960 1/16 印张 15 字数 300 千字

版 次 2002 年 10 月第 1 版 2002 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5603-1798-7/X·9

印 数 1~3 000

定 价 19.80 元

前 言

随着现代化工业生产、交通运输和城市建设的发展,噪声已成为继水污染、空气污染、固体废物污染的第四大环境公害。噪声属于物理污染,它不仅通过听觉危害人的身心健康,而且也是降低工作人员的劳动效率,导致各种事故发生的重要原因。目前,噪声控制已成为环境工程领域最为关注的研究课题之一。

环境工程是一门综合性和边缘性较强的学科,噪声污染控制作为环境工程专业一门重要的专业课程,其内容既涉及物理学的基本概念、基本理论,又涉及机械、材料、化工等许多学科的理论 and 过程。本书力求物理概念清晰、内容广泛,并注重其工程实用性。通过对本课程的学习,不仅能够使学生扎实地掌握噪声控制的理论知识,具备运用现有知识解决实际问题的能力,而且能够启发学生在该技术领域开拓思想和培养他们的创新能力。

本书将声学基础知识加以浓缩,详细介绍了噪声的各种控制技术及相关工程应用实例,并在最后一章引入噪声的主动控制这一相对较新的方法,旨在促进这一新方法与传统的噪声控制方法的有机结合,加速噪声控制技术的快速发展。书中大量引用了许多作者的论著,详细的引用情况已在参考文献列出,在此,向他们表示衷心的感谢。

由于时间仓促和作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,切望专家和读者批评指正。

作 者
2002 年 8 月

目 录

第 1 章 环境噪声概述	1
1.1 噪声的基本概念	1
1.2 噪声的危害	4
1.3 环境噪声控制概述	6
第 2 章 噪声控制中的声学基础	8
2.1 声音的基本性质与声的量度	8
2.2 平面声波	10
2.3 声波的能量、声功率和声强	12
2.4 声波的传播	14
2.5 声级及其运算	19
2.6 声波的衰减	28
习题	29
第 3 章 噪声测量、评价与影响预测	31
3.1 噪声测量	31
3.2 噪声评价	50
3.3 环境噪声预测	65
习题	74
第 4 章 吸声降噪	75
4.1 材料的声学分类和吸声结构	75
4.2 吸声评价方法	76
4.3 多孔吸声材料	80
4.4 共振吸声结构	85
4.5 室内声场	94
4.6 吸声设计	98

4.7 吸声降噪工程应用实例	100
习题	104
第5章 隔声技术	106
5.1 隔声原理	107
5.2 隔声间	121
5.3 隔声罩	124
5.4 隔声屏障	125
5.5 隔声设计	127
5.6 隔声技术工程应用实例	130
习题	139
第6章 消声器	141
6.1 消声器的分类、性能评价和设计程序	141
6.2 阻性消声器	148
6.3 抗性消声器	155
6.4 阻抗复合式消声器	164
6.5 微穿孔板消声器	166
6.6 干涉型消声器	167
6.7 消声器工程应用实例	168
习题	175
第7章 隔振与阻尼	176
7.1 隔振原理及基本方法	176
7.2 隔振元件与隔振设计	184
7.3 阻尼减振	190
7.4 隔振技术工程应用实例	202
习题	211
第8章 噪声的主动控制	213
8.1 噪声主动控制概述	213
8.2 噪声主动控制应用	218
参考文献	231

第 1 章 环境噪声概述

1.1 噪声的基本概念

众所周知,随着现代工业生产、交通运输和城市建设的发展,噪声已成为继水污染、空气污染、固体废物污染的第四大环境公害。噪声属于感觉公害。从物理学的观点看,噪声就是各种频率和声强杂乱无序组合的声音。从生理学和心理学的观点看,令人不愉快、讨厌以致对人们健康有影响或危害的声音都是噪声,即对噪声的判断与个人所处的环境和主观愿望有关。在通常情况下,噪声固然令人厌烦,但有时,噪声也能成为有用的声音或被有效利用。例如,工人可以根据机械噪音的大小来判断设备是否处于正常运行状态;美国科学家则利用高能量噪声可以使尘埃相聚的原理,研制出一种大功率的除尘器,利用噪声能量吸收尘埃,减少大气烟尘污染。要控制和利用噪声,必须首先认识声音的特性及声音与人的听觉之间的关系。

1.1.1 声音及其物理特性

声音是由物体振动引起的。物体振动通过在媒质中传播所引起人耳或其他接受器的反应,就是声。振动的物体是声音的声源,产生噪声的物体或机械设备称为噪声源。声源可以是固体的,也可以是气体或液体的。

振动在弹性介质中以波的形式进行传播,这种弹性波叫声波。人们日常听到的声音,通常来自空气所传播的声波。除了空气以外,其他气体、液体和固体也能传播声音,所以,噪声传播又可以分为空气噪声、固体噪声和水噪声。

1. 声音的频率

声源在每秒内振动的次数称为声音的频率,通常用“ f ”表示,其单位为赫兹(Hz)。完成一次振动的时间称为周期,用“ T ”表示,声源质点振动的速度不同,所产生的声音的频率也不同。声波的频率取决于声源振动的快慢,振动速度越快,声音的频率越高。声波的频率反映的是音调的高低。

声波传入人耳时,引起鼓膜振动,刺激听觉神经,产生听觉,使人听到声音。并不是所有

的振动通过传声媒质都能被人耳接收,人耳可听到的声音(可听声)的频率范围是 20 ~ 20 000 Hz,频率低于 20 Hz 的声波叫次声,超过 20 kHz 的叫超声,次声和超声都是人耳听不到的声波。一般认为,噪声不包括次声和超声,而是可听声范围内的声波。

2. 声音的波长与声速

在介质中,声波振荡一个周期所传播的距离即为波长。波长与频率的关系为

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

式中, λ 为声波波长,单位为 m; c 为声速,单位为 m/s; f 为声波频率,单位为 Hz。

在不同密度的介质中,声波的传播速度不同,如在钢中为 6 300 m/s,在 20℃ 的水中为 1481 m/s,而其波长也随之发生变化。声音传播的速度还与温度有关,随大气温度的升高而增大。声波在空气中的传播速度 c 与温度 t 的关系如下

$$c = 331.4 + 0.6t \quad (1-2)$$

式中, t 为媒质温度,单位为摄氏度(℃)。

0℃ 时的声速是 331.4 m/s,在一般室温 23℃ 时,根据上式可计算出声波在空气中的传播速度为 345 m/s。在通常计算时,如没有特别指明空气温度,则常取室温速度 340 m/s。表 1-1 给出了 20℃ 时几种介质中的声速。

表 1-1 20℃ 时几种介质中的声速

介质名称	空气	水	钢	松木	砖
声速/(m·s ⁻¹)	343	1 500	5 000	2 500 ~ 3 500	3 600

3. 声音的传播

声源发出的声音必须通过中间媒质才能传播。例如,在空气中人们可以听到声音,在真空中却听不到。声音在媒质中向各个方向的传播,只是媒质振动的传播,媒质本身并没有向前运动,它只是在其平衡位置附近来回地振动,而所传播出去的是物质的运动,该运动形式即为波动。声音是机械振动的传播,所以,声波属于机械波。声波波及的空间称为声场,声场既可能无限大,也可能仅限于某个局部空间。

1.1.2 噪声污染

1. 噪声的来源

噪声对环境的污染与工业“三废”一样,是一种危害人类健康的公害。噪声的种类很多,如火山爆发、地震、潮汐、降雨和刮风等自然现象所引起的地声、雷声、水声和风声等,都属于自然噪声。人为活动所产生的噪声主要包括工业噪声、交通噪声、施工噪声和社会噪声等。

(1) 工业噪声

随着现代工业的发展,工业噪声污染的范围越来越大,工业噪声的控制也越来越受到人们重视。工业噪声不仅直接危害工人健康,而且,对附近居民也会造成很大影响。工业噪声主要包括空气动力噪声、机械噪声和电磁噪声三种。

空气动力噪声是由气体振动产生的。如风机内叶片高速旋转或高速气流通过叶片,会使叶片两侧的空气发生压力突变,激发声波。空压机、发动机、燃气轮机和高炉排气等都可以产生空气动力噪声。风铲、大型鼓风机的噪声可达 130 dBA 以上。

机械噪声是由固体振动产生的。机械设备在运行过程中,其金属板、轴承、齿轮等通过撞击、摩擦、交变机械应力等作用而产生机械噪声。如磨机、织机、机床、机车等产生的噪声即属此类,其噪声一般在 80 ~ 120 dBA。

电磁噪声是由电动机、发电机和变压器的交变磁场中交变力相互作用而产生的。

(2) 交通噪声

随着城市化和交通事业的发展,交通噪声在整个噪声污染中所占比重越来越大。如飞机、火车、汽车等交通工具作为活动污染源,不仅污染面广,而且噪声级高,尤其是航空噪声和汽车的喇叭声。

(3) 建筑施工噪声

建筑施工噪声虽然是一种临时性的污染,但其声音强度很高,又属于露天作业,因此,污染也十分严重。有检测结果表明,建筑工地的打桩声能传到数公里以外。

(4) 社会噪声

社会噪声主要是指社会活动和家庭生活所引起的噪声。如电视声、录音机声、乐器的练习声、走步声、门窗关闭的撞击声等,这类噪声虽然声级不高,但却往往给居民生活造成干扰。

2. 噪声污染的特点

噪声污染是一种物理污染。与水、气和固体废物的污染相比,它具有以下特点:①污染面大,噪声源分布广,污染轻重不一。②就某一单一污染源来讲,其污染具有局限性。一般的噪声源只能影响其周围的一定区域,它不会像大气中的飘尘,能扩散到很远的地方。③噪声源停止,污染随即消失。④噪声污染在环境中不会造成积累,声能量最后完全转变成热能散失掉。

1.1.3 我国工业噪声的概况

有关部门曾对北京地区的钢铁、石油化工、机械、建工建材、电子、纺织、印刷、食品、造纸等行业 100 多个工矿企业的车间噪声和典型机器噪声进行过测试,其结果如表 1-2 所示。

表 1-2 各类工业企业噪声的声级范围

工业部门	声级范围/dB	个别情况的声级/dB
钢铁	80 ~ 130	达到 140
机械	80 ~ 120	达到 130
石油化工	80 ~ 100	超过 120
建工建材	80 ~ 120	
电子	65 ~ 100	超过 110
纺织	80 ~ 105	
铁路交通	80 ~ 120	
印刷	70 ~ 95	超过 95
食品、造纸及其他轻工业	70 ~ 90	

1.2 噪声的危害

1.2.1 噪声干扰人们的正常生活

噪声对人们正常生活的影响主要表现在:人们在工作和学习时,精力难以集中;使人的情绪焦躁不安,产生不愉快感;影响睡眠质量;妨碍正常语言交流。

研究表明,在 A 声级 40 ~ 50 dB 的噪声刺激下,睡眠中的人脑电波会出现觉醒反应,即 A 声级 40 dB 的噪声就可以对正常人的睡眠产生影响,而且强度相同的噪声,性质不同,噪声影响的程度也不同。噪声对人们睡眠的干扰程度如表 1-3 所示。

表 1-3 噪声对人们睡眠的干扰程度

噪声程度	连续性噪声	冲击性噪声
40 dBA	有 10% 的人感觉到噪声影响	有 10% 的人突然惊醒
65 dBA	有 40% 的人感觉到噪声影响	有 80% 的人突然惊醒

通常情况下,办公室、计算机房等场所的噪声要求控制在 60 dBA 以下,当噪声超过 60 dBA 时,对人们工作效率就会产生明显影响。在人们休息的场所,噪声应低于 50 dBA。

1.2.2 噪声可诱发疾病

1. 噪声导致听力损伤

早在 19 世纪末,人们就发现持续的强烈噪声会使人耳聋。根据国际标准化组织的规定,暴露在强噪声环境下,对 500 Hz、1 000 Hz 和 2 000 Hz 三个频率的平均听力损失超过

25 dB,称为噪声性耳聋。在这种情况下,进行正常交谈时,句子的可懂度下降 13%,而句子加单音节词的混合可懂度降低 38%。

噪声引起的听力损伤,主要是内耳的接收器官受到损害而产生的。过量的噪声刺激可以造成感觉细胞和接收器官整个破坏。靠近耳蜗顶端对应于低频感觉,该区域感觉细胞必须达到很大面积的损伤,才能反映出听阈的改变。耳蜗底部对应于高频感觉,而这一区域感觉细胞只要有很小面积的损伤,就会反映出听阈的改变。

噪声性耳聋与噪声的强度、噪声的频率及接触的时间有关,噪声强度越大、接触时间越长,耳聋的发病率越高。研究和调查结果表明,在等效 A 声级为 80 dB 以下时,一般不会引起噪声性耳聋;85 dB 时,对于具有 10 年工龄的工人,危险率为 3%,听力损失者为 6%;而具有 15 年工龄的工人,危险率增加为 5%,听力损失者为 10%。通常认为足以引起听力损失的噪声强度必须在 85 dBA 以上,所以,目前国际上大多以 85 dBA 作为制定工业噪声标准的依据。噪声的频率越高,内耳听觉器官越容易发生病变。如低频噪声只有在 100 dBA 时才出现听力损伤,而中频噪声则在 80~96 dBA,高频噪声在 75 dBA 的情况下即可产生听力损伤。

2. 噪声引起人体生理变化

大量研究、调查和统计结果表明,人体多种疾病的发展和恶化与噪声有着密切的关系。噪声会使大脑皮层的兴奋和抑制平衡失调,导致神经系统疾病,患者常出现头痛、耳鸣、多梦、失眠、心慌、记忆力衰退等症状。

噪声还会导致交感神经紧张,代谢或微循环失调,引起心血管系统疾病,使人产生心跳加快、心律不齐、血管痉挛、血压变化等症状。不少人认为,20 世纪生活中的噪声,是造成心脏病的重要原因之一。

噪声作用于人的中枢神经系统时,会影响人的消化系统,导致肠胃机能阻滞、消化液分泌异常、胃酸度降低、胃收缩减退,造成消化不良、食欲不振、胃功能紊乱等症状,从而导致胃病及胃溃疡的发病率增高。

最新的科学研究证实,噪声还会伤害人的眼睛。当噪声作用于人的听觉器官后,由于神经传入系统的相互作用,使视觉器官的功能发生变化,引起视力疲劳和视力减弱,如对蓝色和绿色光线视野增大,对金红色光线视野缩小。

1.2.3 噪声损害设备和建筑物

高强度和特高强度噪声能损害建筑物和发声体本身。航空噪声对建筑物的影响很大,如超音速低空飞行的军用飞机在掠过城市上空时,可导致民房玻璃破碎、烟囱倒塌等损害。美国统计了 3 000 件喷气飞机使建筑物受损的事件,其中,抹灰开裂的占 43%,窗损坏的占 32%,墙开裂的占 15%,瓦损坏的占 6%。

在特高强度的噪声(160 dB 以上)影响下,不仅建筑物受损,发声体本身也可能因声疲劳

而损坏,并使一些自动控制和遥控仪表设备失效。

此外,由于噪声的掩蔽效应,往往使人不易察觉一些危险信号,从而容易造成工伤事故。在我国几个大型钢铁企业,都曾发生过高炉排气放空的强大噪声遮蔽了火车的鸣笛声,造成正在铁轨上工作的工人被火车轧死的惨重事件。

1.3 环境噪声控制概述

1.3.1 环境声学研究的内容

环境声学是研究噪声对人们生活和社会所产生的各种影响的科学。早在 20 世纪初,环境噪声对人们的影响就已引起各方面的关注,纽约市是最早对城市环境噪声进行调查并建立起控制机构的城市。随着现代化工业和交通运输的发展,环境噪声已经成为一种严重的社会公害,同时,也促进了对环境噪声污染规律、控制技术、监测方法和管理措施的研究,以及环境声学这一新兴学科的产生和发展。

环境声学的研究范畴主要包括以下三方面。

(1) 噪声评价方法和污染规律性的研究

噪声的影响和危害不仅与噪声源的特性(如噪声强度、频率和时间特性等)有关,而且与人的听觉特性和人们的主观心理反应有关,因此,在研究如何控制环境噪声之前,首先要解决如何评价噪声的问题。对具有不同噪声特性的各类噪声、不同的噪声暴露场所,以及不同的噪声暴露时间的噪声评价方法的建立,是噪声控制程度的依据。

污染规律的研究主要包括噪声级与各有关影响因素的关系,噪声的时间分布、空间分布(即噪声传播规律的研究)等内容。该研究是评价环境质量、研究环境噪声发展和变化的趋势,以及预测环境噪声影响的重要依据。

(2) 噪声的发生、传播途径和控制措施的研究

噪声产生之后,在其传播过程中再采取一定的补救措施,消除或减弱噪声的影响,虽十分必要,但仍属于污染的被动治理。对噪声源的发声机理及噪声传播规律进行分析,在噪声产生的同时就减弱或消除其影响,则是噪声控制的最积极、主动的治理措施。环境噪声的控制除采取技术措施外,加强行政管理也是既经济又有效的方法之一。

(3) 噪声对人体健康的危害及对人们正常生活、工作和学习干扰的研究

前者属于劳动保护,后者属于一般环境噪声对人们心理的影响。该研究对环境噪声评价方法的建立和噪声污染控制有重要意义。

1.3.2 噪声控制的一般方法

环境噪声只有当声源、声的传播途径和接受者三者同时存在时,才能构成污染问题。因

此,噪声污染控制也必须从这三方面进行考虑。

1. 噪声源控制

控制噪声源是降低噪声的最根本和最有效的方法。噪声源控制,即从声源上降噪,就是通过研制和选择低噪声的设备,采取改进机器设备的结构,改变操作工艺方法,提高加工精度或装配精度等措施,使发声体变为不发声体或降低发声体辐射的声功率,将其噪声控制在所允许的范围内的方法。

噪声源控制的具体措施主要有:①选用内阻尼大、内摩擦大的低噪声材料。一般的金属材料,因其内阻尼、内摩擦都较小,消耗振动能量的能力弱,所以,通常金属材料制成的机械零件和设备,在振动力的作用下,机件会辐射较强的噪声。若采用内阻尼大、内摩擦大的合金或高分子材料,其较大的内摩擦可使振动能转变为热能耗损掉,故这类材料可以大幅度降低噪声辐射。②采用低噪声结构形式。在保证机器功能不变的前提下,通过改变设备的结构形式,可以有效地降低噪声,如皮带传动所辐射的噪声要比齿轮传动小得多。③提高零部件的加工精度和装配精度。提高零部件的加工精度和装配精度,可以降低由于机件间的冲击、摩擦和偏心振动所引起的噪声。④抑制结构共振。

2. 噪声传播途径控制

噪声传播的媒介主要是空气和建筑构件,因此,传播途径的控制也主要是空气声传播和固体声传播的控制。

(1) 空气声传播的主要控制方法

① 采用隔声屏、隔声罩等装置,将噪声源与接受者分离开。该方法可降低噪声 20 ~ 50 dBA。

② 通过在噪声的传播通道上,如墙壁、隔声罩内表面等处铺设吸声材料,使一部分声能在传播过程中被吸声材料吸收并转化成热能,可降低噪声 3 ~ 10 dBA。

③ 在声源与接受者之间通过管道安装消声器,使声能在通过消声器时被耗损,从而达到降噪的目的,使用消声器通常可使噪声降低 15 ~ 30 dBA。

(2) 固体声传播的主要控制方法

① 在机器表面或壳体上涂抹阻尼涂料,或采用高阻尼材料来抑制振动,该方法可降低噪声 5 ~ 10 dBA。

② 采用减振器、橡胶垫等将振源与机器隔离开,减弱外界激励力对机器的影响,降低噪声辐射。此类方法的降噪量为 5 ~ 25 dBA。

3. 听力保护

在上述噪声控制方法暂时无法实现的情况下,在高噪声环境中工作的职工,必须采取个人保护措施。如佩戴耳塞、耳罩、头盔和防声棉等,这些防护用具,主要是利用隔声的原理,使强烈的噪声传不进耳内,从而达到保护人体不受噪声危害的目的。

第 2 章 噪声控制中的声学基础

2.1 声音的基本性质与声的量度

2.1.1 声波的产生

声音是由物体振动产生的。如讲话的声音是来源于人喉内声带的振动,扬声器发声源自纸盆的振动。凡是发出声音的振动体,称为声源。声源可以是固体,也可以是液体或气体,如波涛声、汽笛声就是由液体振动发声的。

声源发出的声音必须通过媒质才能传播。空气、液体和固体物质都可以作为声音传播的媒质。由于在真空中没有物质存在,因而也就听不到声音。当声源在媒质中振动时,必须依靠媒质的弹性和惯性才能将这种振动传播出去,媒质的弹性和惯性是传播声音的必要条件。声音在媒质中向四面八方传播,只是媒质振动的传播,媒质本身并没有向前运动,它始终在其平衡位置附近往复振动。

根据传播媒质的不同,声音可分为空气声、水声、固体声(结构声)。根据媒质质点振动方向与声波传播方向的关系,声波又分为横波和纵波。如果媒质质点的振动方向与波的传播方向垂直,这种波称为横波。如果媒质质点的振动方向与波的传播方向一致,则称为纵波。如在没有切变弹性只有体积弹性的液体和气体媒质中,只能传播纵波,在固体介质中,除体积弹性外,还有伸长弹性、弯曲弹性、扭转弹性等,因此,固体中既能传播纵波,又能传播横波。

2.1.2 声波的描述

1. 声压

媒质在没有声扰动的声学状态下,组成媒质的分子虽然在不断地运动着,但对任意微元体来讲,每一瞬时流入的质量都等于流出的质量,即微元体的质量不随时间变化。当存在声扰动时,由于发声体的振动使周围的媒质形成周期性的疏密相间层状态,导致微元体内的质量流出与流入不再相等。这一变化过程可以用微元体内压力、密度、温度和质点运动速度等的增量来描述。

无声扰动时,媒质中的压强 P_0 称为静压强。设受声扰动后媒质的压强为 P ,则当声波通

过时,由于声扰动所产生的过量压强便称为声压 p ,即

$$p = P - P_0 \quad (2-1)$$

声压的单位是帕斯卡(Pa), $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。

当声波在媒质中传播时,媒质中的压强做周期性的变化,即对于媒质内的同一微元体,其内部声压 p 是空间和时间的函数

$$p = p(x, y, z, t) \quad (2-2)$$

声场中某空间点声压 p 随时间 t 的变化称为瞬时声压 p_t 。当声音传入人耳后,由于鼓膜的惯性作用,人耳实际上辨别不出声压的起伏,即人耳听到的声音不是瞬时声压值作用的结果,而是一个有效声压值。有效声压是一段时间内瞬时声压的均方根值,即

$$p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p_t^2 dt} \quad (2-3)$$

式中, T 为声波的周期。

正常人耳刚刚能听到的声音的声压叫听阈声压,其值为 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$;刚刚使人耳产生疼痛感觉的声压叫痛阈声压,其值为 20 Pa 。声压可以被一般声学仪器直接测量出来,而且人耳对声音的感觉也直接与声压有关,因此,声压是用来描述声波的一个基本物理量。

2. 声波的频率、波长

由于声波的存在,在媒质中形成周期性的疏密变化。在同一时刻,相邻两个声压最大值(或最小值)地点之间的距离叫声波波长,用 λ 表示,单位是 m 。媒质中某一部分的扰动将引起相邻部分以至更远部分的扰动,但各自在时间上分别有所延迟,即振动状态的传播需要一定的时间,这种振动状态或它具有的震动能量在媒质中自由传播的速度叫声速 c ,单位为 m/s 。如果媒质质点振动的频率为 f ,则有

$$c = \lambda f \quad (2-4)$$

频率 f 为每秒钟媒质质点振动的次数,也就是声波的频率,单位为 Hz , $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ 。质点振动是周期性的,每重复一次所需要的时间叫周期 T ,单位为 s ,显然有

$$f = 1/T \quad (2-5)$$

声波的传播速度与温度有关,在空气中,声速与空气温度的关系为

$$c = 331.4 + 0.6 t \quad (2-6)$$

式中, t 的单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。从式(2-6)可见,声速随温度虽有一定变化,但在一般情况下变化值不大,实际计算时常取 c 为 340 m/s 。

人耳可听域的频率范围为 $20 \sim 20\,000 \text{ Hz}$,相应声波的波长为 $17 \sim 0.017 \text{ m}$ 。人耳对声波的频率响应,以及材料的声学性能皆随频率而异,人耳可听域的频率范围越宽,噪声控制的难度越大。

3. 相位

相位是指任意时刻 t 的质点振动状态,包括振动的位移及运动方向或者压强的变化。随

质点与声源距离的增大,质点间在相位上依次落后,存在着相位差。正是由于各个质点振动在时间上有超前和滞后,才在媒质中形成向前传播的行波,故相位也是描述声波的一个重要物理量,在声波的叠加中起着重要的作用。

2.2 平面声波

一般常用声压 p 来描述声波,而表达声压随空间和时间变化的函数关系的方程,即为声波的波动方程。在研究声波的波动方程时,为了使问题简化,必须作如下假定。

① 媒质为理想流体,即无粘性存在,声波在传播过程中没有能量损失。

② 没有声扰动时,媒质在宏观上是静止的,即初速度 v 为零;同时,假设媒质是均匀的,因此,各点的静态压力 P_0 和静态密度 ρ_0 均为常数。

③ 即使在频率较低的情况下,声波传播过程进行得还是比较快的,体积压缩和膨胀过程的周期比热传导需要的时间短得多,因此,在声传播过程中,媒质还来不及与毗邻的部分进行热量交换,声传播过程可以认为是绝热过程。

④ 在声波的振幅比较小时,它的参量都是一阶微量,即声压 p 远小于静态压力 P_0 ,质点速度 v 远小于声速 c_0 ,质点位移远小于声波波长 λ ,媒质密度增量 ρ' 远小于 ρ_0 ,因此,它们的二阶以上的微量均可忽略。

在均匀的理想流体媒质中的小幅声波的波动方程为

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2-7)$$

或记为

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2-8)$$

式中, $\nabla^2 p = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$, 为直角坐标的拉普拉斯计算符号, c 为声速, 式(2-7)、(2-8)表明声压 p 为空间坐标 (x, y, z) 和时间 t 的函数, 记为 $p(x, y, z, t)$, 表示不同的地点在不同时刻 t 的声压变化规律。

声波在空气中传播, 振动声源处于三维空间中, 振动将向四面八方传播, 所以, 空间坐标要用 x, y, z 三个变量来表示。如果声场在空间的两个方向上是均匀的, 则声压 p 只随 x 方向变化, 在垂直 x 轴的平面上不论 y, z 如何, p 都不变, 即在同一 x 的平面上各点相位相等。这时, 三维问题就只有一维了, 可用一维坐标 x 来描述声场, 则式(2-7)变成

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2-9)$$

上式表达的是沿 x 方向传播的声波方程。相位相等的共同面称为波阵面。所以, 平面波的波阵面为垂直于 x 轴的一系列平面。设声源只做单一频率的简谐振动, 位移是时间的正弦

或余弦函数,那么媒质中质点也随着做同一频率的简谐振动。设 $x = 0$ 原点处的声压为

$$p(0, t) = P_0 \cos \omega t$$

$\omega = 2\pi f$ 为振动圆频率, f 为频率,那么声场中任一点 x 处的声压幅值也应当是 P_0 , 因为,在理想媒质中声波无衰减,同样 x 点处的声波频率也是 f , 但 x 点处的相位却比 0 点落后了。 x 点的声波是由 0 点传递来的,若传播所需时间为 t' , 那么在 t 时刻 x 点的声压是 $(t - t')$ 时刻 0 点的声压, 即有

$$p(x, t) = P_0 \cos[\omega(t - t')]$$

而媒质中声波传播速度为 c , 则

$$t' = x/c$$

代入上式则有

$$p(x, t) = P_0 \cos[\omega(t - x/c)]$$

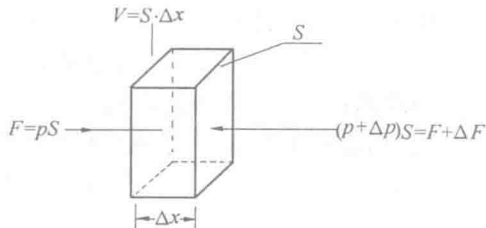
为方便起见,定义(圆)波数为

$$\kappa = \omega/c = 2\pi/\lambda \quad (2-10)$$

其物理意义是长为 2π m 的距离上所含的波长 λ 的数目,于是 $p(x, t)$ 又可以写成

$$p(x, t) = P_0 \cos(\omega t - \kappa x) \quad (2-11)$$

式(2-11)表示沿 x 方向传播的平面波。又因声波只含有单频 ω , 没有其他频率成分, 所以, 叫简谐平面声波, P_0 为声压的幅值, $(\omega t - \kappa x)$ 为其相位, 它描述在不同地点 x 和各个时刻 t 声波的运动状况。



设在存在声波的媒质中取小体积元 ΔV , 如图 2-1 所示。由于受声波的作用, 在 ΔV 的两边所受声压分别为 p 和 $p + \Delta p$, 设 ΔV 的截面积为 S , 则体积元 ΔV 受到的总合力为

$$pS - (p + \Delta p) \cdot S = -S \cdot \Delta p$$

由于该力的作用使体积元 ΔV 产生加速度, 由牛顿第二定律得

$$-S \cdot \Delta p = \rho \cdot \Delta V \frac{\partial u}{\partial t}$$

式中, ρ 为媒质的密度, $\frac{\partial u}{\partial t}$ 为加速度。

又因

$$\Delta V = S \cdot \Delta x$$

故

$$\Delta p / \Delta x = -\rho \frac{\partial u}{\partial t}$$