



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

环 境 噪 声 控 制 工 程

洪宗辉 主 编
潘仲麟 副主编



高 等 教 育 出 版 社
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

环境噪声 控制工程

洪宗辉 主 编
潘仲麟 副主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材和教育部环境类学科的“九五”规划教材。本书详细地论述了环境噪声评价和控制的基本原理和措施,突出应用性,尤其注重学生综合能力的培养,并尽可能反映近几年国内外环境噪声控制中取得的最新成果。全书共分十二章。第一章至第四章介绍环境噪声的基本知识,第五章阐述环境噪声影响评价的方法,第六章至第十章详细论述了噪声和振动控制的原理和实用技术,第十一章介绍典型的环境噪声综合治理实例,第十二章介绍有关声学实验。

本书是高等院校环境科学与环境工程专业的教材,也可供从事环境保护、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

环境噪声控制工程/洪宗辉主编. —北京:高等教育出版社,2002 8
高等院校环境类专业教材
ISBN 7-04-010425-3

I. 环... II. 洪... III. 环境噪声-噪声控制-高等学校-教材 IV. TB53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 078381 号

环境噪声控制工程

洪宗辉 主编

潘仲麟 副主编

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号
邮政编码 100009
传 真 010-64014048

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 16
字 数 290 000

版 次 2002 年 6 月第 1 版
印 次 2002 年 8 月第 2 次印刷
定 价 18.70 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

随着现代工业、交通运输业和城市建设的发展,环境噪声污染已成为国内外影响最大的公害之一。为适应环境保护事业发展的需要,我国许多高等学校设立了环境科学和环境工程专业,并开设了环境噪声控制课程。鉴于近十余年来我国环境声学学科的发展,尤其是交通噪声预测、治理技术取得较大进展,建设项目环境影响评价申报制度的实施,各类环境噪声标准系列的建立,原《环境噪声控制工程》教材因出版时间较早,内容已显陈旧,为了满足 21 世纪的教学需要,同济大学和浙江大学在原有教材的基础上,集多年教学和科研的经验,及近年来国内外的最新成就编写成此书。

编写本书的指导思想是以工程实用为主,并给以必要的理论基础知识,力图使学生通过本课程学习,具有一定的实际工作能力,对环境噪声控制工程不拘泥于套用公式和图表,而能够视工程实际情况,根据噪声控制原则,举一反三地进行思考和设计。

本书列出了一些常用的数据,对一些复杂的计算公式还给出了图表,以便于工程设计时查阅。书中所列工程设计实例、声学标准、环境影响评价方法,可供设计时参考。

为适应各院校授课时数的不同,书中前后章节虽有相互联系,但各章节具有一定的独立性,在教学中可根据实际教学时数适当取舍。建议教师在注重课堂讲授的同时,开设一些声学实验和课程设计。

本书的编者有:王佐民(第一、二、四章)、毛东兴(第三、十二章)、洪宗辉(第五、十一章)、潘仲麟(第六章)、张邦俊(第七、八、十章)、翟国庆(第九章)。

我们诚恳地欢迎使用本书的师生和其他读者对本书的不妥和错误之处提出宝贵意见。

作者

2000 年 12 月



目 录

第一章 绪论	1
1.1 噪声及其危害	1
1.2 环境声学的研究内容	3
第二章 声波的基本性质及其传播规律	7
2.1 声波的产生及描述方法	7
2.2 声波的基本类型	9
2.3 声波的叠加	14
2.4 声波的反射、透射、折射和衍射	17
2.5 级的概念	21
2.6 声波在传播中的衰减	25
2.7 声源的辐射	29
习题	36
第三章 噪声的评价和标准	38
3.1 噪声的评价量	38
3.2 环境噪声评价标准和法规	56
习题	64
第四章 噪声测试和监测	65
4.1 测量仪器	65
4.2 声强及声功率测量	73
4.3 环境噪声监测方法	76
4.4 工业企业噪声测量	80
4.5 振动及其测量方法	83
习题	85
第五章 环境噪声影响评价	87
5.1 环境噪声影响评价的目的和意义	87
5.2 环境噪声影响评价工作程序和内容	87
5.3 噪声预测	91
5.4 公路噪声预测	100
5.5 铁路噪声预测	102
5.6 机场飞机噪声预测	105
5.7 工业噪声预测	105
习题	107

第六章 噪声控制技术概述	108
6.1 噪声控制基本原理与原则	108
6.2 噪声源分析	109
6.3 城市环境噪声控制	110
习题	117
第七章 吸声和室内声场	118
7.1 材料的声学分类和吸声特性	118
7.2 多孔吸声材料	123
7.3 共振吸声结构	127
7.4 室内声场和吸声降噪	135
习题	145
第八章 隔声技术	146
8.1 隔声的评价	146
8.2 单层匀质密实墙的隔声	148
8.3 双层隔声结构	154
8.4 隔声间	158
8.5 隔声罩	165
8.6 声屏障	166
习题	168
第九章 消声器	170
9.1 消声器的分类、评价和设计程序	170
9.2 阻性消声器	175
9.3 抗性消声器	180
9.4 阻抗复合式消声器	189
9.5 微穿孔板消声器	191
9.6 扩散消声器	193
9.7 应用实例	198
习题	200
第十章 隔振技术及阻尼减振	202
10.1 振动对人体的影响和评价	202
10.2 振动控制的基本方法	206
10.3 隔振原理	207
10.4 隔振元件	212
10.5 阻尼减振	218
习题	221
第十一章 环境噪声控制应用实例	223
11.1 柴油发电机房噪声控制工程设计	223
11.2 高架道路声屏障设计	227

11.3 低噪声渗水性沥青路面试验工程	230
11.4 民用建筑隔声窗的设计	232
第十二章 声学实验	234
12.1 驻波管法吸声材料垂直入射吸声系数的测量	234
12.2 混响室法吸声材料无规入射吸声系数的测量	237
12.3 道路交通噪声的测量	240
12.4 道路声屏障插入损失的测量	242
参考文献	246

第一章 绪 论

环境声学是研究噪声对人们日常生活和社会活动产生各种影响的科学。自第二次世界大战结束以来,随着工业和交通事业的迅速发展,环境噪声日趋严重。在我国一些大城市的环境污染投诉中,噪声占了60%~70%,已经成为广泛的社会公害。

1.1 噪声及其危害

1.1.1 噪声

噪声是指人们不需要的声音。噪声可能是由自然现象产生的,也可能是由人们活动形成的。噪声可以是杂乱无序的宽带声音,也可以是节奏和谐的音乐。当声音超过人们生活和社会活动所允许的程度时就成为噪声污染。

1.1.2 噪声的危害

噪声的危害是多方面的。比如损伤听力、影响睡眠、诱发疾病、干扰语言交谈;特别强的噪声还会影响设备正常运转,损坏建筑结构等。下面分别加以简要阐述。

1. 噪声对听力的损伤

大量的调查研究表明,由于人们长期在强噪声环境下工作,会使内耳听觉组织受到损伤,造成耳聋。国际标准化组织规定,听力损失用500 Hz、1 000 Hz和2 000 Hz三个频率上的听力损失的平均值来表示。听力损失在15 dB以下属正常,15~25 dB属接近正常,25~40 dB属轻度耳聋,40~65 dB属中度耳聋,65 dB以上属重度耳聋。一般讲噪声性耳聋是指平均听力损失超过25 dB。在这种情况下,人与人相互间进行1.5 m外的正常交谈会有困难,句子的可懂度下降13%,句子加单音节词的混合可懂度降低38%。

大量的统计资料表明,噪声级在80 dB以下,方能保证人们长期工作不致耳聋。在90 dB以下,只能保护80%的人工作40年后不会耳聋。即使是85 dB,仍会有10%的人可能产生噪声性耳聋。

衡量听力损失的量是听力阈级。听力阈级是指耳朵可以觉察到的纯音声压级。它与频率有关,可用专用的听力计测定。阈级越高,说明听力损失或部分耳

聋的程度越大。由噪声引起的阈级提高,称噪声性迁移。当噪声暴露终止后,经过一段时间的休息,听力如能逐渐恢复原状,称暂时性阈移。如果在强噪声环境下暴露时间过长,虽经休息仍有部分阈移不能恢复,这部分阈移称为永久性阈移。

上面所述的噪声性耳聋是慢性的,即指听力损失是由于强噪声环境的影响日积月累缓慢发展形成的。另外还有一种急性的噪声性耳聋,称为暴振性耳聋。当突然暴露在极其强烈的噪声环境中,例如 150 dB 以上的爆炸声,会使人的听觉器官发生急性外伤,出现鼓膜破裂、内耳出血、基底膜的表皮组织剥离等症状。这种声外伤可使人耳即刻失聪。

2. 噪声对睡眠的干扰

睡眠对人体是极重要的,它能使人们新陈代谢得到调节,人的大脑通过睡眠得到充分休息,消除体力和脑力疲劳。人的睡眠一般以朦胧—半睡—熟睡—沉睡等几个阶段为一个周期。每个周期大约 90 min,周而复始。年纪越大,半睡状态增加,熟睡阶段缩短。连续噪声可以加快熟睡到半睡的回转,会使人多梦、熟睡的时间缩短。突发的噪声使人惊醒。一般来说,40 dB 的连续噪声可使 10% 的人睡眠受影响,70 dB 可使 50% 的人受影响,而突发性噪声在 40 dB 时可使 10% 的人惊醒,到 60 dB 时,可使 70% 的人惊醒。

3. 噪声对人体的生理影响

噪声除了损伤人耳的听力外,对人体的生理机能也会引起不良反应。长期暴露在强噪声环境中,会使人体的健康水平下降,诱发各种慢性疾病。例如,噪声会引起人体的紧张反应,使肾上腺素分泌增加,引起心率加快,血压升高。一些工业噪声调查资料显示,在高噪声条件下工作的人们,患高血压病、动脉硬化和冠心病的发病率比低噪声条件下工作的人要高 2~3 倍。对小学生的调查发现,经常暴露于飞机噪声下的儿童比安静环境下的儿童血压要高。

噪声也会引起消化系统方面的疾病。有关调查报导,在某些吵闹的工业行业中,消化性溃疡的发病率比低噪声条件下要高 5 倍。通过人和动物实验都表明,在 80 dB 环境下,肠蠕动要减少 37%,随之而来的是胀气和肠胃不适。当外加噪声停止后,肠蠕动由于过量的补偿,节奏加快,幅度增大,结果引起消化不良。长期的消化不良将诱发胃肠粘膜溃疡。在神经系统方面,噪声会造成失眠、疲劳、头晕及记忆力衰退,诱发神经衰弱症。

当然,引发各种慢性疾病的原因是多方面的。噪声的危害程度究竟多大,还难以得到明确的定量结论。

4. 噪声对语言交谈和通讯联络的干扰

通常情况下,人们相对交谈距离 1 m 时,平均声级大约是 65 dB。但是,环境噪声会掩蔽语言声,使语言清晰度降低。语言清晰度是指被听懂的语言单位

百分数。噪声级比语言声级低很多时,噪声对语言交谈几乎没有影响。噪声级与语言声级相当时,正常交谈受到干扰。噪声级高于语言声级 10 dB 时,谈话声就会被完全掩蔽,当噪声级大于 90 dB 时,即使大声叫喊也难以进行正常交谈。在噪声环境下,发话人会不自觉地提高发话声级或缩短谈话者之间的距离。通常,噪声每提高 10 dB,发话声级约增加 7 dB。虽然,清晰度的降低可由嗓音的提高而得到部分补偿,但是发话人极易疲劳甚至声嘶力竭。

由于噪声容易使人疲劳,因此会使相关人员难以集中精力、从而使工作效率降低,这对于脑力劳动者尤为明显。

此外,由于噪声的掩蔽效应,会使人不易察觉一些危险信号,从而容易造成工伤事故。

5. 特强噪声对仪器设备和建筑结构的危害

噪声对仪器设备的危害与噪声的强度、频谱以及仪器设备本身的结构特性密切相关。当噪声级超过 135 dB 时电子仪器的连接部位会出现错动,引线产生抖动,微调元件发生偏移,使仪器发生故障而失效。当噪声级超过 150 dB 时,仪器的元器件可能失效或损坏。在特强噪声作用下,由于声频交变负载的反复作用,会使机械结构或固体材料产生声疲劳现象而出现裂痕或断裂。在冲击波的影响下,建筑物会出现门窗变形、墙面开裂、屋顶掀起、烟囱倒塌等破坏。当噪声级达到 140 dB 时,轻型建筑物就会遭受损伤。此外剧烈振动的震动筛、空气锤、冲床、建筑工地的打桩和爆破等,也会使振源周围的建筑物受到损害。

1.2 环境声学的研究内容

让每一个人能在理想的声学环境中工作、学习和生活,是多年来声学工作者不断努力的奋斗目标。自 1974 年在第八届国际声学会议上采用“环境声学”这个术语以来,环境声学已经发展到比较成熟的阶段。环境声学的研究范畴大致可以概括为噪声污染的规律、噪声评价方法和标准,噪声控制技术、噪声测试技术和仪器,噪声对人体的影响和危害等方面。

1.2.1 噪声污染规律

环境噪声污染是指被测试环境的噪声级超过国家或地方规定的噪声标准限值,并影响人们的正常生活、工作或学习的声音。城市环境的主要噪声按其产生源可分为工业噪声、交通噪声、建筑施工噪声和社会生活噪声;按其产生的机理又可分为机械噪声、气流噪声和电磁噪声。

传播途径指由声源所发出的声波传播到某个区域(或接受者)所经过的路线。声波在传播过程中由于传播距离、地形变化、建筑物、树丛草坪、围墙等的影

响使声能量明显衰减或者改变传播方向。

污染规律的研究包括噪声辐射和传播过程中的声衰减与各有关参量的关系、噪声的时间分布和空间分布等。其研究方法有现场类比测量、理论研究、数学分析、计算机模拟和实验室缩尺声模型试验等。

1.2.2 噪声评价方法和标准

世界各国的声学工作者对噪声的危害和影响进行长期的多方面的调查研究。提出了各种评价指标和方法,希望得到能确切反映主观响应的客观(物理)评价量和相应的计算方法,以及适宜的控制值,制定保护人体健康和保障人们正常活动的有关标准和法规。历年来提出的评价量数量众多。不同的评价量适用于不同类别的噪声源、使用场合和时段。目前,基本上得到公认的有评价人耳对不同频率和强度的声音的响度级,各种计权声级、描述噪声干扰程度的噪声指数等。其中采用最为普遍的评价量是 A 计权声级。

噪声的影响范围广、危害大、必须加以防治。这就需要对其加以控制。降低噪声使它对任何人不会产生损伤,在技术上是可能达到的,但是在经济上可能不能承受。究竟应当把噪声限制在什么程度,制定何种噪声标准,就需要在“危害”与“经济”之间进行综合考虑,确定一种合理的标准。在这种标准条件下,噪声对于人体有害影响仍是存在的,只是不会产生明显的不良后果。所以这类标准实际上是一些噪声容许标准。目前,经常引用的噪声标准有工业企业噪声卫生标准、城市区域环境噪声标准和工业产品噪声标准等。

1.2.3 噪声控制技术

环境噪声污染由声源、传声途径和受主三个基本环节组成。因此,噪声污染的控制必须把这三个环节作为一个系统进行研究。

国际噪声控制协会曾经提出自 20 世纪 80 年代起是“从声源控制噪声”的年代。降低声源的噪声辐射是控制噪声的根本途径。通过对声源发声机理和机器设备运行功能的深入研究,研制新型的低噪声设备;改进加工工艺;以及加强行政管理均能显著降低环境噪声。

声传播途径中的控制仍是常用的降噪手段:在噪声传递的路径上,设置障碍以阻止声波的传播,铺置吸声材料增加声能损耗,或者通过反射、折射改变声波的传播方向。在噪声控制工程中经常采用的有效技术有吸声、隔声、阻尼和隔振等。常见的吸声墙面(吊顶)、声屏障、隔声门(窗)、消声器和隔振地板等,则是这些治理(控制)技术的具体应用。

受主控制就是采用护耳器、控制室等个人防护措施来保护工作人员的健康。这类措施适宜应用在噪声级较强,受影响的人员较少的场合。

控制措施的选择可以是单项的,也可以是综合的。既要考虑声学效果,根据相关的标准确定合理的降噪指标,也要考虑实际施工条件和治理经费。力求经济合理、切实可行。

科学技术的发展,特别是数字信号处理技术的快速发展,为噪声控制提供许多新技术、新方法、新材料和新结构。噪声和振动的有源控制,经过 20 世纪 70 年代的原理研究,现已进入工程应用阶段,并已向产品化方向发展。声强技术开始于 80 年代,现在已有便携式声强测量系统的市售产品。声强技术可广泛应用于现场声功率测量、振动能流传递、振源定位、声源鉴别等方面。在理论分析方面的有限元法、边界元法、统计能量分析;以及功率流、声线跟踪法等数值分析日趋完善,普遍采用。

1.2.4 噪声测试技术

为了客观评价噪声的强弱,必须进行噪声测量。噪声测量系统,不管其如何复杂和先进,都可以归纳成三个部分:接受部分、分析部分和显示(记录)部分。这三部分可以汇集成一台仪器,也可以由几台仪器连接组成。

接受部分是指传声器和前置放大器。传声器将接受到的声信号转换成电信号,要求具有动态范围宽、频率响应平坦、灵敏度高、稳定性好、电噪声低等特性。通常采用电容传声器。由于电容传声器的输出阻抗很高,为了使其后面能连接较长电缆,在电容传声器输出端紧配前置放大器,起阻抗变换的作用。

分析部分可以分成两种不同的方式。对于采用模拟分析技术的装置,一般由输入放大器(附衰减器)、滤波器(计权网络)和输出放大器(附衰减器)三种电路组成。对于采用数字信号分析技术的装置,在信号采样后由数字运算(程序)来完成各种分析功能。

最简单的显示方式是将分析部分的输出信号经检波后由电表指示。近期大多采用液晶数字显示,或在显示屏上给出频谱图、表显示。记录的方式有磁带记录、电平记录和数字信号的贮存等。

声学测量中最常用的基本仪器是声级计。它是一种按一定频率计权和时间计权测量声音声压的仪器。声级计通常需要较长的分析时间,适用于相对稳定的连续信号。实时分析仪,特别是 20 世纪 70 年代中期发展起来的全数字式实时分析仪,具有快速分析的特点,可用于瞬态信号或迅变信号的分析。

测量方法的选定取决于噪声测量的目的和现有的仪器条件。声级计模式分析是指常用声级计可提供的分析功能。主要有各种计权声级、统计声级和频谱分析。利用数字信号处理技术,特别是采用双通道输入,就能对信号进行 FFT 分析、相关分析、相干分析、声强分析和倒频分析,求得被测系统的频率响应或脉冲响应,从而获得更为深刻全面的信息。

1.2.5 对人体的影响和危害

这方面的研究包括噪声的生理效应和心理效应两部分。噪声的生理效应涉及噪声对人的听觉系统、心血管系统、消化系统、神经系统和其他脏器的影响及危害。

噪声引起的心理影响主要是烦躁,包括对短时作用噪声的主观评价和影响,对低频的听觉响应和评价,以及探索能够明确反映不同主观评价的客观参量。

由于人们的生理效应和心理效应往往是由多种因素共同作用或长期积累产生的。因此,对于噪声的生理效应和心理效应的研究,一般需要坚持不懈地长期跟踪、调查、积累足够多的数据,再经反复论证、统计分析,才可能得出可靠的研究结论。

总之,环境声学是一门以声学知识为核心,涉及生理学、心理学、社会学、经济学和管理学等内容的综合学科。研究环境声学问题既要求有高度的科学性,也要求有高度艺术性;既要关心研究成果的经济效益,更应注重研究成果的社会效益。

第二章 声波的基本性质及其传播规律

在日常生活中存在各种各样的声音。例如,人们的交谈声、汽车喇叭声、机器运转声、演奏乐器的乐声等等。在所有各种声音中,凡是有人感到不需要的声音,对这些人来说,就是噪声。简单地讲,噪声就是指不需要的声音。为了对噪声进行测量、分析、研究和控制,就需要了解声音的基本特性。本章主要介绍声波的基本性质及其传播规律。

2.1 声波的产生及描述方法

2.1.1 声波的产生

1. 声源

各种各样的声音都起始于物体的振动。凡能产生声音的振动物体统称为声源。从物体的形态来分,声源可分成固体声源、液体声源和气体声源等。例如,锣鼓的敲击声、大海的波涛声和汽车的排气声都是常见的声源。如果你用手指轻轻触及被敲击的鼓面,就能感觉到鼓膜的振动。所谓声源的振动就是物体(或质点)在其平衡位置附近进行的往复运动。

2. 声波的形成

当声源振动时,就会引起声源周围弹性媒质——空气分子的振动。这些振动的分子又会使其周围的空气分子产生振动。这样,声源产生的振动就以声波的形式向外传播。声波不仅可以在空气中传播,也可以在液体和固体中传播。但是,声波不能在真空中传播,因为在真空中不存在能够产生振动的弹性媒质。根据传播媒质的不同,可以将声分成空气声、水声和固体(结构)声等类型。在噪声控制工程中主要涉及空气媒质中的空气声。

在空气中,声波是一种纵波,这时媒质质点的振动方向是与声波的传播方向相一致的。反之,将质点振动方向与声波传播方向相互垂直的波称为横波。在固体和液体中既可能存在声波的纵波,也可能存在横波。

需要注意的是,纵波或横波都是通过相邻质点间的动量传递来传播能量的,而不是由物质的迁移来传播能量的。例如,若向水池中投掷小石块,就会引起水面的起伏变化,一圈一圈地向外传播,但是水质点(或水中的飘浮物)只是在原位置处上下运动,并不向外移动。

2.1.2 描述声波的基本物理量

当声源振动时,其邻近的空气分子受到交替的压缩和扩张,形成疏密相间的状态,空气分子时疏时密,依次向外传播如图 2-1 所示。

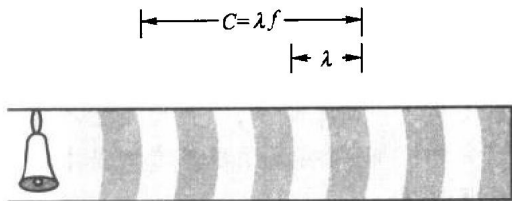


图 2-1 空气中的声波

当某一部分空气变密时,这部分空气的压强 P 变得比平衡状态下的大气压强(静态压强) P_0 大;当某一部分的空气变疏时,这部分空气的压强 P 变得比静态大气压强 P_0 小。这样,在声波传播过程中会使空间各处的空气压强产生起伏变化。通常用 p 来表示压强的起伏变化量,即与静态压强的差 $p = (P - P_0)$,称为声压。声压的单位是帕(斯卡)(Pa), $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。

如果声源的振动是按一定的时间间隔重复进行的,也就是说振动是具有周期性的,那么就会在声源周围媒质中产生周期性的疏密变化。在同一时刻,从某一个最稠密(或最稀疏)的地点到相邻的另一个最稠密(或最稀疏)的地点之间的距离称为声波的波长,记为 λ ,单位为米(m)。振动重复 1 次的最短时间间隔称为周期,记为 T ,单位为秒(s)。周期的倒数,即单位时间内的振动次数,称为频率,记为 f ,单位赫兹(Hz), $1\text{Hz} = 1\text{s}^{-1}$ 。

如前所述,媒质中的振动状态由声源向外传播。这种传播是需要时间的,即传播的速度是有限的,这种振动状态在媒质中的传播速度称为声速,记为 c ,单位为米每秒(m/s)。

$$\text{在空气中声速: } c = 331.45 + 0.61 t \quad (2-1)$$

式中: t ——空气的摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

可见,声速 c 随温度会有一些变化,但是一般情况下,这个变化不大,实际计算时常取 c 为 340 m/s 。

显然,在这些物理量之间存在着如下的相互关系:

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

$$f = 1/T \quad (2-3)$$

声波传播时,媒质中各点的振动频率都是相同的,但是,在同一时刻各点的

相位不一定相同。同一质点在不同时刻也会具有不同的相位。所谓相位是指在时刻 t 某一质点的振动状态,包括质点振动的位移大小和运动方向,或者压强的变化。在图 2-2 中,质点 A、B 以相同频率振动,但是 B 比 A 在运动时间上有一定的滞后, C、D... 等质点在时间上依次滞后,当 A 质点处于最大压缩状态,即压强增大最大时, B、C、D 质点处的压强依次减弱。这就是说质点间在振动相位上依次落后,存在相位差。正是由于各个质点的振动在时间上有超前和滞后,才在媒质中形成波的传播。可以看出,距离为波长 λ 的两质点间的振动状态是完全相同的,只不过后者在时间上延迟了一个周期。

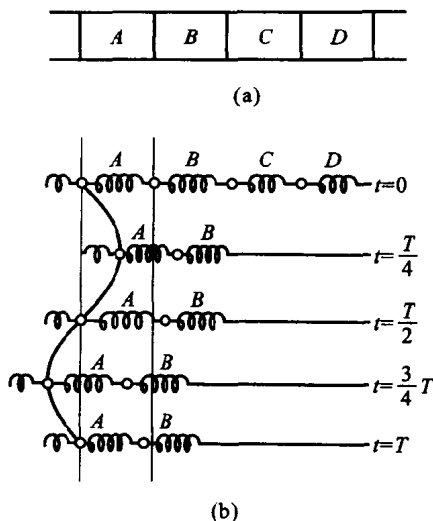


图 2-2 声波传播的物理过程

2.2 声波的基本类型

一般常用声压 p 来描述声波,在均匀的理想流体媒质中的小振幅声波的波动方程是:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2-4a)$$

或记为

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2-4b)$$

式中: ∇ ——拉普拉斯算符,在直角坐标系中 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$;

c ——声速;

t ——时间。

式(2-4)表明,声压 p 是空间 (x, y, z) 和时间 t 的函数,记为 $p(x, y, z, t)$,描述不同地点在不同时刻的声压变化规律。

根据声波传播时波阵面的形状不同可以将声波分成平面声波、球面声波和柱面声波等类型。

2.2.1 平面声波

当声波的波阵面是垂直于传播方向的一系列平面时,就称其为平面声波。所谓波阵面是指空间同一时刻相位相同的各点的轨迹曲线。若将振动活塞置于均匀直管的始端,管道的另一端伸向无穷。当活塞在平衡位置附近作小振幅的往复运动时,在管内同一截面上各质点将同时受到压缩或扩张,具有相同的振幅和相位。这就是平面声波。声波传播时处于最前沿的波阵面也称为波前。通常,可以将各种远离声源的声波近似地看成平面声波。平面声波在数学上的处理比较简单,是一维问题。通过对平面声波的详细分析,可以了解声波的许多基本性质。

如果管道始端的活塞以正(余)弦函数的规律往复运动,则称为简谐振动。活塞偏离平衡位置的距离 ξ 称为位移。对简谐振动有:

$$\xi = \xi_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (2-5)$$

式中: ξ_0 ——活塞离开平衡处的最大位移,称为振幅;

$\omega = 2\pi f$ 称为角频率;

t ——时间; $(\omega t + \varphi)$ ——时刻 t 的相位;

φ ——初相位。

在均匀理想流体媒质中,小振幅平面声波的波动方程是:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2-6)$$

对于简谐振动,沿 x 正方向传播的平面声波为:

$$p(x, t) = P_0 \cos(\omega t - kx + \varphi)$$

为了表述简洁,适当选取时间的起始值,或适当选取 x 轴的坐标原点,使 $\varphi = 0$,则有

$$p(x, t) = P_0 \cos(\omega t - kx) \quad (2-7)$$

式中: P_0 ——振幅;

$k = \omega/c$, 称为波数。

如果观察在某一确定时刻 $t = t_0$ 时声波在空间沿 x 方向分布的情况,其波形如图 2-3(a) 所示。如果要观察在空间定点位置 $x = x_0$ 处声波随时间的变化情况,其波形如图 2-3(b) 所示。

假定在 $t = t_0$ 时刻,空间 $x = x_0$ 位置处于某种物理状态(例如声压极大),由于声波的传播经过 t 时间后,这种状态将传播到 $x_0 + \Delta x$ 位置,由式(2-7)