

远程教育“十二五”规划教材

噪声控制原理与技术

苑春苗 栾昌才 李 畅 主编

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 苑春苗 栾昌才 李 畅 2014

图书在版编目 (CIP) 数据

噪声控制原理与技术 / 苑春苗, 栾昌才, 李畅主编. — 沈阳: 东北大学出版社, 2014. 11
ISBN 978 - 7 - 5517 - 0839 - 5

I. ①噪… II. ①苑… ②栾… ③李… III. ①噪声控制 IV. ①TB535

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 266093 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024 - 83687331(市场部) 83680267(社务室)

传真: 024 - 83680180(市场部) 83680265(社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

http: //www.neupress.com

印 刷 者: 抚顺光辉彩色广告印刷有限公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 12.75

字 数: 312 千字

出版时间: 2014 年 11 月第 1 版

印刷时间: 2014 年 11 月第 1 次印刷

责任编辑: 汪彤彤

封面设计: 刘江旻

责任校对: 潘佳宁

责任出版: 唐敏志

ISBN 978 - 7 - 5517 - 0839 - 5

定 价: 24.00 元

远程教育“十二五”规划教材建设指导委员会

主 任 姜茂发

常务副主任 卢俊杰 刘常升

委 员 (以姓氏笔画为序)

于天彪 马 明 吕文慧 孙新波

巩亚东 宋叔尼 李鸿儒 李 晶

杜宝贵 陈国秋 周成利 赵 文

徐文清 栗 志 黄卫祖 蒋 敏

总 序

2010年，党中央、国务院召开了新世纪第一次全国教育工作会议，发布了《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020年）》。纲要中明确指出：“加快发展继续教育。更新继续教育观念，加大投入力度，加快各类学习型组织建设，基本形成全民学习、终身学习的学习型社会。”“大力发展现代远程教育……为学习者提供方便、灵活、个性化的学习条件。”指明了教育事业科学发展的方向，描绘了教育改革发展的宏伟蓝图。

2012年6月，教育部颁布《国家教育事业第十二个五年规划》，对我国未来五年继续教育体系建设做出了科学规划。强调要发挥现代信息技术在继续教育中的作用，把发展现代远程教育作为建设学习型社会的重要战略举措。

自教育部1999年3月批准现代远程教育第一批试点高校以来，已有68所高校开展远程教育的试点工作。到2010年底，远程教育在校本专科学生数达到453万人，占当年全国继续教育人数的35%（数据来源：教育部网站）。远程教育已经成为继续教育体系中的重要组成部分。

教材是与远程学习者关系最为密切的一个要素，是资源建设的一个重要组成部分。随着试点工作的不断深入，各高校在人才培养模式、资源建设、学习支持服务等方面开展了积极的探索与实践，远程教育教材建设工作越来越为各试点高校重视。开发建设适合远程教育学习的教材，直接影响学习者的学习成效，关系到远程教育的质量。

在十几年来远程教育试点工作经验基础上，针对远程教育的特点及学生的实际情况，我们开发了“远程教育‘十二五’规划教材”。在教材开发过程中，从教材建设指导委员会到每一位编著者，

都对远程教育的现状与特点做了认真研究；教材编著者都是远程教育的课程主讲教师，熟悉远程教育教学模式，了解学生实际情况及需求，保证了教材具有较强的先进性、针对性和实用性。

教材是远程教育资源的重要组成部分，教材建设工作是一项长期而艰巨的任务。符合远程教育实际，能够满足学生实际需求的教材，对于提高学生学习效率，构建学生自主学习环境具有重要意义。我们希望通过“远程教育‘十二五’规划教材”的建设工作，探索出一条教材建设工作的新思路、新方法，为我国远程教育事业的发展起到积极的推动作用。

(东北大学) 远程教育“十二五”规划教材建设指导委员会

2012年11月18日

前 言

《噪声控制原理与技术》主要讲述工业生产及社会生活过程中的噪声危害及其控制问题。随着近代工业的发展，由环境污染导致的职业危害也随之产生。噪声作为环境污染的一种，已经成为对人类的一大危害，与水污染、大气污染被看成世界范围内的三个主要环境问题。了解并掌握噪声控制的原理与技术，对于噪声污染控制、噪声性耳聋职业病的预防具有重要意义。

本书是在《工业噪声与振动控制技术》（栾昌才等编著，东北大学出版社，1993）一书的基础上，结合编者近十年的授课经验，进一步修改完善编写而成的。其中，增加了噪声控制的基础知识、噪声危害评价、噪声控制标准等相关内容，删除了振动部分的章节，并对相关章节的顺序进行了调整。

本书的适用对象是安全工程、环境工程专业的本科生、大专生和噪声控制的工程技术人员。每章后面的习题具有思考性和实用性，以便读者更好地掌握噪声控制技术相关知识。

本书共由7章组成。第1, 2章主要讲述噪声的基础知识；第3章讲述噪声量度、标准、危害及评价；第4, 5章的主要内容为噪声在大气、管道及室内的传播；第6, 7章为常用的噪声控制技术措施，如吸声、隔声等。第1, 3, 6, 7章主要由东北大学苑春苗编写，第2, 4, 5章主要由沈阳建筑大学李畅编写。研究生陈攀做了大量文字编写工作。本书在编写的过程中得到了东北大学栾昌才老师的大力支持，并参阅了国内许多专家学者的编著和资料，借此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和错误，敬请读者批评指正。

编 者

2014年7月1日

目 录

第1章 绪 论	1
习 题	2
第2章 噪声控制的声学基础	3
2.1 声波的产生	3
2.2 声音的形成	4
2.3 声的传播方程	6
2.4 理想流体媒质的三个基本方程	9
2.5 声波传播速度	14
2.6 声场中的能量关系	15
2.7 声波的反射、折射及指向性	18
习 题	22
第3章 噪声的量度、危害及标准	25
3.1 级和分贝	25
3.2 分贝的计算	28
3.3 噪声频谱	33
3.4 人耳对声音的主观响应	36
3.5 噪声的测量	38
3.6 噪声评价曲线	41
3.7 噪声的危害	42
3.8 噪声危害评价量	48
3.9 噪声标准	53
习 题	63
第4章 声波在大气与管道中的传播	69
4.1 声波在大气中的传播	69
4.2 声波在管道中的传播	75
习 题	79

第5章 室内声学原理	81
5.1 室内声学的特点	81
5.2 混响时间的计算	83
5.3 稳态声场	87
5.4 声源指向性对室内声场的影响	91
5.5 隔墙的噪声降低	91
5.6 房间设计的声学要求	94
习 题	96
第6章 吸 声	100
6.1 吸声系数	100
6.2 吸声材料	103
6.3 吸声处理减噪效果的计算	127
6.4 吸声减噪设计	129
习 题	132
第7章 隔 声	136
7.1 隔声构件的隔声原理	137
7.2 隔声间	147
7.3 隔声罩	156
7.4 隔声屏	167
7.5 管道隔声	169
7.6 隔声工程的设计	171
习 题	177
习题答案	181

第1章 绪论

人们的生活、工作都离不开声音，说明声音对于人类的社会实践是非常有用的。它可以向人们提供各种听觉信息，以熟悉周围环境；它可以让人们相互交流思想；借助它，医生能诊断一些病症；它可以为操作工人提供机器运转是否正常的根据。但是，在生产生活中总有一些声音会使人感到烦躁不安，影响人们的正常工作和身体健康，这种声音就是噪声。

随着我国综合国力和人民生活水平的不断提高，人们对生产及居住环境中的声音质量水平有了更高的要求。噪声污染控制日益成为改善生产与生活环境质量的重要环节，成为一个健康安全的生产生活环境必不可少的条件。

在人们的日常生活中，经常用到或听到“噪音”与“噪声”这两个词语。这两个词原本是全等义词，但过去通用“噪音”而一般不用“噪声”，即使是现在，人们在日常生活用语中仍然习惯使用“噪音”而不使用“噪声”。但是，随着我国社会生活水平的飞速发展，人们对生产及生活环境越来越关注，对科技术语的规范愈加重视，使“噪音”与“噪声”分别承担不同的语义，二者有了明确的、严格的分工。

噪音，是物理学的声学术语，与“乐音”相对，是指由物体不规则的振动而产生的声音，即音高和音强变化混乱、听起来不和谐的声音(图 1-1)，如碰门声、刮风声、划玻璃声等都是噪音；语音中辅音的构成，以噪音成分为基础(乐音，是指由物体有规则的振动而产生的声音，即有一定频率、听起来比较和谐悦耳的声音，这些频率都具有一定的周期性和节奏性，它的波形是有规律的周期性的曲线，如钢琴、胡琴、笛子等发出的声音与语音中的元音都是乐音)。《现代汉语词典》(第6版)中对噪音的定义为：①音高和音强变化混乱、听起来不和谐的声音。是由发音体不规则的振动而产生的(区别于“乐音”)。②噪声①的旧称。

噪声包括两层含义。一是环境及职业卫生科学术语，也是现在人们日常生活中高频度使用的普通名词，指使人厌烦的声音，即干扰人们休息、学习和工作的声音。如工业生产、交通、施工等产生的声音(乐音也可以成为噪声，如夜半的歌唱声、钢琴声等扰人不得入睡，这时歌唱声、钢琴声之类的乐音就成了噪声)。二是通信(旧称通讯)技术术语，指一切有干扰性的信号。如由于外部原因(如工业干扰等)或内部原因(如元件、器件内部

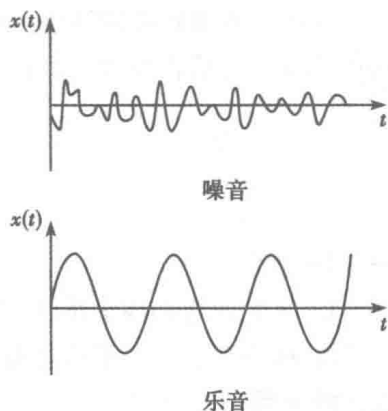


图 1-1 噪音与乐音

的热骚动等)引起的妨碍电信接收的电干扰。《现代汉语词典》(第6版)中对噪声的定义为:①在一定环境中不应有而有的声音,泛指嘈杂、刺耳的声音。旧称噪音。②电路或通信系统中除有用信号以外所有干扰的总称。同时,《现代汉语词典》(第6版)还增加了“噪声污染”的定义,即干扰人们休息、学习和工作的声音所造成的污染,多由机械振动或流体运动引起。安静环境中,约30dB的声音就是噪声;超过50dB,会影响睡眠和休息;90dB以上,会损伤人的听觉,影响工作效率,严重的可致耳聋或诱发其他疾病。

根据上述关于噪声与噪音的描述可以看出,两者的含义基本等同,略有侧重,噪音侧重于物理学角度,而噪声更侧重于心理生理的角度。鉴于噪声更侧重于描述声音对人们工作、学习和休息的直接影响,以下本书统称噪声,并给出其以下两个角度的定义。

①从生理与心理学角度:凡是不希望听到的声音。

由该定义可知,一切可听声都可能被判断为噪声,其中也包括干扰休息的音乐声。所以,心理学的观点认为噪声和乐声是很难区分的,它们会随着人们主观判别的差异而改变,噪声与好听的声音是没有绝对界限的。

②从物理学上:由不同声强与不同频率的声波无规则组成的声音,如汽车的轰隆声、工厂里机器的尖叫声,它们的波形图是无规律的非周期的曲线。

鉴于噪声对人们生产生活长期的普遍性的影响,一直以来人们不断采用最新的技术手段和科学理念控制噪声所带来的负面影响。如英国索尔福德大学声学工程教授考克斯,试图从本质安全的角度控制生产生活中的噪声。正如他所言:“我们实在不明白,为什么有些声音那么让人厌恶。但对这些声音的反应恰恰是我们人性的一部分。我们希望了解人们最讨厌什么声音,这样我们就可以在设计(产品等)时将这些声音消除,或者至少降低它们的影响。”由此可以看出,掌握噪声控制的基本原理,是实现良好噪声治理效果的重要前提。

因此,本书首先阐述噪声产生及传播过程中的基本概念与原理,然后在此基础上介绍噪声的量度、危害与评价,最后提出噪声控制的主要技术手段。

习 题

一、判断题

1. 从生理与心理学角度,凡是不希望听到的声音,即为噪声。 ()
2. 从物理学上,噪声是由不同声强与不同频率的声波无规则组成的声音。 ()

二、简答题

1. 简述噪声的两个方面的定义。
2. 噪声与乐声在物理本质上有何不同?
3. 噪声与噪音在声音描述角度上各有何侧重?

第2章 噪声控制的声学基础

2.1 声波的产生

如果仔细观察日常生活所接触到的各种发声物体，就会发现声音来源于物体的振动。当用鼓槌去敲鼓，就会听到鼓声，这时用手去摸鼓面，就会感到鼓面迅速地振动着。如果用手掌压住鼓面使它停止振动，鼓声就会立即消失。这个现象说明，声音来源于鼓面的振动。工厂中使用铁锤敲打钢板，引起钢板振动发声，织布机飞梭不断撞击打板的振动发声等，都是由振动的物体发出来的。当然，在生产生活中能够振动的物体，不仅包括固体，也包括液体和气体，它们的振动同样也会发声。如化工厂中输液管道阀门的噪声就是液体振动发声；高压容器排气放空时的排气声，就是高速气流与周围静止空气相互作用引起空气振动产生的。通常将上述发生振动的物体称为声源。正是由于声源的振动，才导致了声音的产生。

声源的振动必将引起周围媒质的振动。人们日常听到的声音，多数是来自声源振动引起的空气振动。下面具体研究一下声音在媒质中是如何振动并最终被人耳感觉到的。

从宏观上说空气可以看作连续媒质，因此可将空气划分成相连的媒质体积元 A , B , C , D (如图 2-1 所示)。每一个小的体积元内都含有一定质量的空气，且相邻体积之间都存在弹性作用。声源的振动将引起其临近的体积元 A 离开平衡位置开始运动， A 点的运动推动质点 B 运动。由于媒质的弹性，当质点 A 压缩质点 B 时，质点 B 所处媒质会产生一个反抗压缩的力而又推动质点 A 回到平衡位置。质点有质量，即有惯性，会冲过平衡位置压缩另一侧的媒质，另一侧的媒质也会产生一个反力，又把质点 A 推了回来。可见由于媒质的弹性和惯性作用，最初得到扰动的质点 A 就在平衡位置附近振动起来。由于同样的原因，被质点 A 推动的质点 B 以至更远的质点 C , D 也都在其平衡位置附近振动起来，只是依次滞后一些时间。把这种机械振动在弹性媒质中的传播过程称为声波。声波传到入耳，人们就感受到声音，如图 2-2 所示。

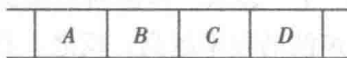


图 2-1 连续的空气介质

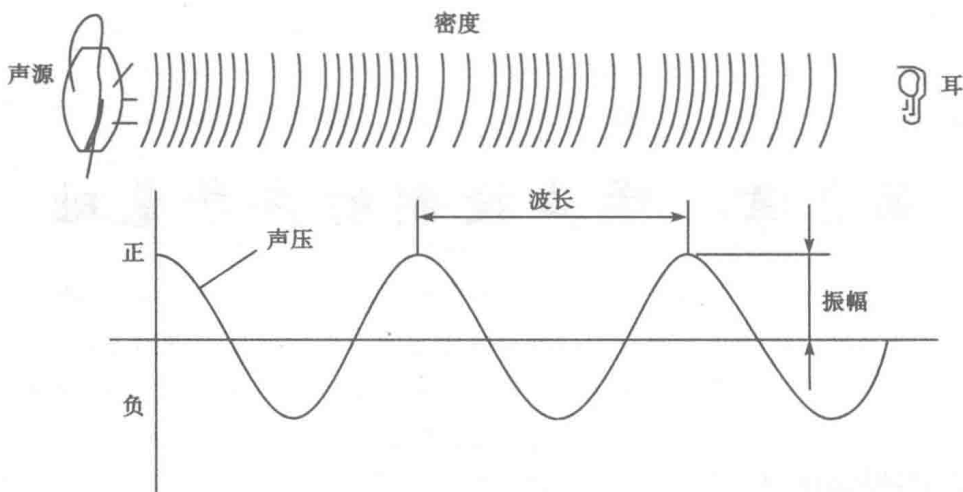


图 2-2 声波的传播

在声波的传播过程中,各质点仅在它们各自的平衡位置附近振动,并没有在传播方向上流动或继续前进。这就是说,一个振子在弹性介质中振动时,仅影响周围的介质,使它们陆续地产生振动。因此,声波的传播指的是物体振动形式的传播,传播出去的是物体的运动形式而不是物质本身,这说明声波是物质的一种运动形式。振动是声波产生的根源,声波是振动的传播过程。

根据声波的传播过程,声波的传播离不开媒质,更不可能在真空中传播。例如把电铃放在玻璃罩中,抽去其中作为媒质的空气,结果只能看到电铃中的小锤在振动,却听不到由它发出的电铃声。通常把声波存在的弹性媒质空间称为声场。因此,声波的形成需要两个条件:声源和声场。

2.2 声音的形成

人们生活的空间中存在各种形式的声波,但由于人耳感知的局限性,并不是所有的声波人们都能够感受到。通常把人耳能感受到的那部分声波称为声音。因此,声音是人的主观感受。结合声波产生的条件可知,声音(包括噪声)的形成必须具备三个要素:首先要有产生振动的物体,即声源;其次要有能够传播声波的媒介;最后还要有声波的接受器或感知器,如人耳的听觉器官、传声器等。

2.2.1 可听声的频率

每秒内声源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,所产生的声波的频率也不一样。振动速度越快,声波的频率越高;反之,越低。根据声波频率的不同,人们将声波分为三个区域,即次声波、可听声和超声波,如图 2-3 所示。

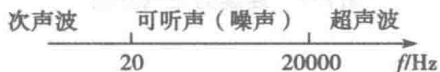


图 2-3 声音的分类

频率低于 20Hz 的声波称为次声波, 频率在 20 ~ 20000Hz 之间的声波称为可听声, 频率高于 20000Hz 的声波称为超声波。听觉器官是一个声音传感器, 一般来讲, 人的听觉器官只能感受到可听声, 次声波和超声波人耳都听不见。上述听觉范围是根据一般人的情况而选定的。由于动物的听觉器官与人不同, 故具有不同于人类的听觉范围。根据生物学试验结果, 动物的频率听觉范围如表 2-1 所示。

表 2-1 不同动物的频率听觉范围

动物名称	频率听觉范围/Hz	动物名称	频率听觉范围/Hz
猫	45 ~ 64000	马	55 ~ 33500
狗	67 ~ 45000	羊	100 ~ 91000
蚂蚱	95 ~ 1100	田鼠	20 ~ 76000
苍蝇	20 ~ 55000	家鼠	100 ~ 91000
鱼	20 ~ 3000	牛蛙	100 ~ 3000

除可听声可以供人类传达信息外, 超声波和次声波在生产生活中也都有所应用, 如蝙蝠能够感受高达 20000Hz 的超声波, 利用超声波进行夜间飞行和捕捉食物; 人类利用超声波探测水中的目标、医学影像、测速、超声清洗与焊接等。同时, 人们也利用次声波研究自然和气象现象, 进行自然灾害的预测预报。

2.2.2 人耳能够接受的音量

人耳作为一个声音传感器, 不仅能够感受的频率有限, 而且能够感知和承受的音量也是有范围的。这里所谓的音量可以用声压来表示, 下面对声压的定义进行解释。

传播声波的连续介质可看作由许多紧密相连的微小体积元 dV 组成的物质系统, 而体积元内的媒质可以认为集中在一点, 用质量等于 ρdV 的“质点”作为代表进行研究。其中, ρ 是媒质的密度, 随时间和空间位置的变化而变化。

当物质系统处于平衡状态时, 这个系统的状态可以用体积 V (或密度 ρ)、压强 P 和温度 T 来描述。在这种平衡状态下, 组成媒质的分子虽然不断地运动着, 但就任一空间体积元, 在时间 t 内流出和流入的质量一定是相等的。当有声波作用, 也就是向体积元附加了一个有规律的运动时, 体积元内流入与流出的质量不相等, 导致体积元内的媒质一会儿稠密, 一会儿稀疏。因此, 声波的传播过程实际上就是体积元内媒质稠密和稀疏交替变化的过程, 并且这个变化过程可以用体积元内的压强、密度、温度及质点的振动速度等参量的变化来描述。

体积元未受到扰动前, 其内的压强与大气压强相同, 即为 P_0 。体积元受声波扰动后, 压强由 P_0 变为 P , 则由声扰动而引起的体积元内压强的变化量为

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

式中, p ——声压, 即大气压力的变化量。

在声传播过程中, 在同一时刻, 不同位置处体积元内的压强是不同的; 对于同一位置处的体积元, 其压强 P 也随时间而变化。所以声压通常是空间和时间的函数, 即 $p = p(x, y, z, t)$ 。与声压类似, 其他变量如密度也会由于声扰动而引起变化, 密度的变化量 $\rho' = \rho - \rho_0$, 也是空间和时间的函数, 即 $\rho' = \rho'(x, y, z, t)$ 。

另外, 由于声波是媒质质点振动形式的传播, 因此质点的振动速度也是描述声波的物理量之一。鉴于声压比较容易测定, 且通过测定的声压可间接地求出质点的振动速度及其他物理量, 所以目前人们多用声压来描述声波的物理性质。

声波传播的空间, 也就是声压存在的空间。声场中某一瞬间的声压值称为瞬时声压。声压随时间起伏变化, 每秒钟内变化的次数很多, 传入到人耳时, 由于耳膜的惯性作用, 因此辨别不出声压的瞬时起伏。即人耳听声音时感受到的音量大小, 并不是声压的最大值起作用, 而是一个相对稳定的有效声压起作用。有效声压 p_e 是一段时间内瞬时声压的均方根值, 这段时间为声波振动周期的整数倍。声学研究及实际应用中多用有效声压, 因为其数值的大小与人耳的主观响应特性较为一致。有效声压可用数学式表示, 即

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

式中: T ——周期;

$p(t)$ ——瞬时声压;

t ——时间。

对于正余弦声波, 有

$$p_e = p_A / \sqrt{2} \quad (2-3)$$

其中, p_A ——声压幅值。

声压的单位与压强的单位相同, 为帕斯卡(Pa)。在国际标准(ISO)中, 备用单位为巴(bar), 为非法定计量单位, 它们之间存在以下换算关系:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 10^{-5} \text{ bar} \quad (2-4)$$

声压越大, 人耳听起来就愈响, 反之则愈小, 但人耳作为一个声波传感器, 具有一定的量程。人们通常把能听到的声音的最低声压界限叫闻阈声压或听阈声压, 正常人对 1000Hz 声音的闻阈声压约为 2×10^{-5} Pa。能使人耳产生疼痛感觉的声压界限称为痛阈声压。正常人对 1000Hz 声音的痛阈声压为 20Pa。如果声压提高到 20Pa 以上, 人耳鼓膜就会破裂出血, 造成耳聋。闻阈声压与痛阈声压的比值为 $20: (2 \times 10^{-5}) = 10^6: 1$, 这说明人耳的听觉范围是非常宽广的。

在日常生活中, 人们周围声场的声压并不是很大, 多数情况下很难感受到导致大气压力变化的空气振动, 如织布机产生的声压为 2Pa, 普通谈话声为 2×10^{-2} Pa, 轻轻吹动树叶的声音是 2×10^{-4} Pa, 这些数值的量级与一个大气压(10^5 Pa)相比非常小。因此, 可听声的声波引起大气压力的变化量很小, 很难由听觉器官以外的其他感觉器官感知到。同时也表明人耳作为一个听觉传感器, 其灵敏度是非常高的。

2.3 声的传播方程

声的传播过程就是介质疏密交替变化的过程。在这个过程中, 介质体积元内的压强、速度、密度及温度等参数都会发生相应的变化。因此, 声的传播过程可用这些参量随着时间与空间的变化来描述。

当用这些参量描述声的传播方程时, 为了使问题简化, 必须对媒质及声传播过程做出

一些假定, 这些假定是:

① 媒质为理想流体, 即媒质中不存在黏滞性, 声波在这种理想媒质中传播时没有能量的消耗;

② 没有声扰动时, 媒质在宏观上是静止的, 同时媒质是均匀的;

③ 声波传播时, 媒质中稠密和稀疏的交替过程是绝热的, 即声波的传播过程是绝热过程;

④ 媒质中传播的是小振幅声波, 声压 p 远小于媒质的静态压强 P_0 , 即 $p \ll P_0$; 质点速度 v 远小于声速 c_0 , 即 $v \ll c_0$; 质点的位移 ξ 远小于声波的波长 λ , 即 $\xi \ll \lambda$; 媒质密度的增量 ρ' 远小于静态密度 ρ_0 , 即 $\rho' \ll \rho_0$, 或密度的相对增量 $s_\rho = \frac{\rho'}{\rho_0}$ 远小于 1, 即 $s_\rho \ll 1$ 。

为研究问题方便, 首先以平面波为例, 研究声波传播过程中质点偏离平衡位置的位移这个参量随时间和空间的变化规律。设有一刚性活塞声源, 以圆频率 ω 在气缸内做简谐振动。假设流体介质与缸壁之间没有摩擦阻力, 则在缸体的轴线方向上可产生平面波, 如图 2-4 所示。

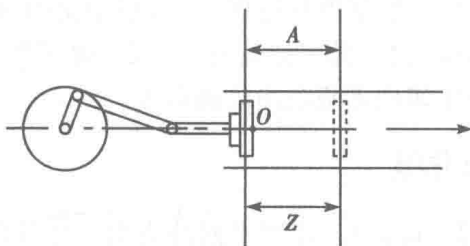


图 2-4 活塞产生平面波

刚性活塞在气缸内振动时, 首先引起气缸内临近活塞空气质点(设为 O 点)的振动, 然后 O 点振动引起其他空气质点的振动, 从而使气缸内介质交替产生疏密变化, 实现声波的传播。在图 2-4 中, O 点介质的轴向运动是与活塞的运动完全一致的, 即在某时刻 t , 质点离开平衡位置的位移为

$$\xi_o = A \sin \omega t \quad (2-5)$$

式中, ω ——活塞的圆频率;

A ——活塞振动的幅值。

在距离活塞右侧面 x 处, 声波传播到的时间比 O 点滞后了 $\frac{x}{c_0}$, 式中 c_0 为平面声波的传播速度。由于声波仅为振动形式的传播, 所以在 x 处的质点偏离平衡位置的位移表示形式与 O 点相同, 即振幅为 A 、服从正弦变化规律等, 不同之处在于声波在 x 处振动的时间比 O 点滞后 $\frac{x}{c_0}$ 时间。若在 O 点振动了 t 时间, 则在 x 处的振动时间为 $t - \frac{x}{c_0}$ 。因此, x 处的质点偏离平衡位置的位移表示形式为

$$\xi = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c_0} \right) \quad (2-6)$$

根据式(2-6), x 处空气质点的振动速度与加速度分别为

$$v = \frac{\partial \xi}{\partial t} = A \omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{c_0} \right) = A \omega \sin \omega \left(t - \frac{x}{c_0} + \frac{\pi}{2} \right) \quad (2-7)$$

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} = -A\omega^2 \sin\omega\left(t - \frac{x}{c_0}\right) \quad (2-8)$$

频率与振动周期的关系为

$$f = \frac{1}{T} \quad (2-9)$$

根据式(2-9), 声波的圆频率可表示为

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (2-10)$$

声波的传播速度 c_0 与波长 λ 的关系式为

$$c_0 = \frac{\lambda}{T} \quad (2-11)$$

将式(2-10)、式(2-11)代入式(2-6)得

$$\xi = A\sin 2\pi\left(ft - \frac{x}{\lambda}\right) = A\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \quad (2-12)$$

由式(2-12)可以看出, 声波传播过程中, 空间介质中参变量(如位移 ξ)确实为时间 t 和空间(如一维空间) x 的函数。根据推导过程, 可知上面讨论的波动方程仅适用于波形在传播过程中不随距离和时间而变化(即等幅波)的情况。要实现等幅条件, 声波必须以平面形式传播, 并且在传播过程中媒质不吸收声波的声能。

2.3.1 平面声波的波动方程

在推导式(2-6)或式(2-12)时, 是以平面波为例, 并且设刚性活塞在气缸内做简谐振动这一特定条件下进行讨论的。根据式(2-6), 可以分别获得位移 ξ 对时间 t 和空间 x 的二阶导数, 即

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -A\omega^2 \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{c_0}\right)\right] \quad (2-13)$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = -A\frac{\omega^2}{c_0^2} \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{c_0}\right)\right] \quad (2-14)$$

比较以上两式, 可得

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (2-15)$$

对于一切在波速 c_0 相等的均匀介质中传播的无衰减正弦平面声波, 式(2-15)所示的偏微分方程都能使用。通常将该方程称为平面声波的波动方程。

在生产生活中存在的声波具有多样性, 但是根据傅里叶级数表达式, 实际中的任何非正弦平面声波都可以表示为许多平面正弦声波的叠加, 只要各个不同频率的正弦波成分均以同一速度 f 传播。因此, 任何非正弦平面声波的波动方程均可表示为

$$\xi = F\left(t - \frac{x}{c_0}\right) + E\left(t - \frac{x}{c_0}\right) \quad (2-16)$$

F 和 E 代表任意两个函数, 其形式取决于扰动源的性质; x 是波阵面离声源的距离。上式右边两项分别代表沿 x 轴正向和沿 x 轴负向传播的平面声波。

2.3.2 空间声波的波动方程

如果媒质是各向同性的, 而且无衰减, 各个不同频率的波成分则无衰减, 正弦声波在