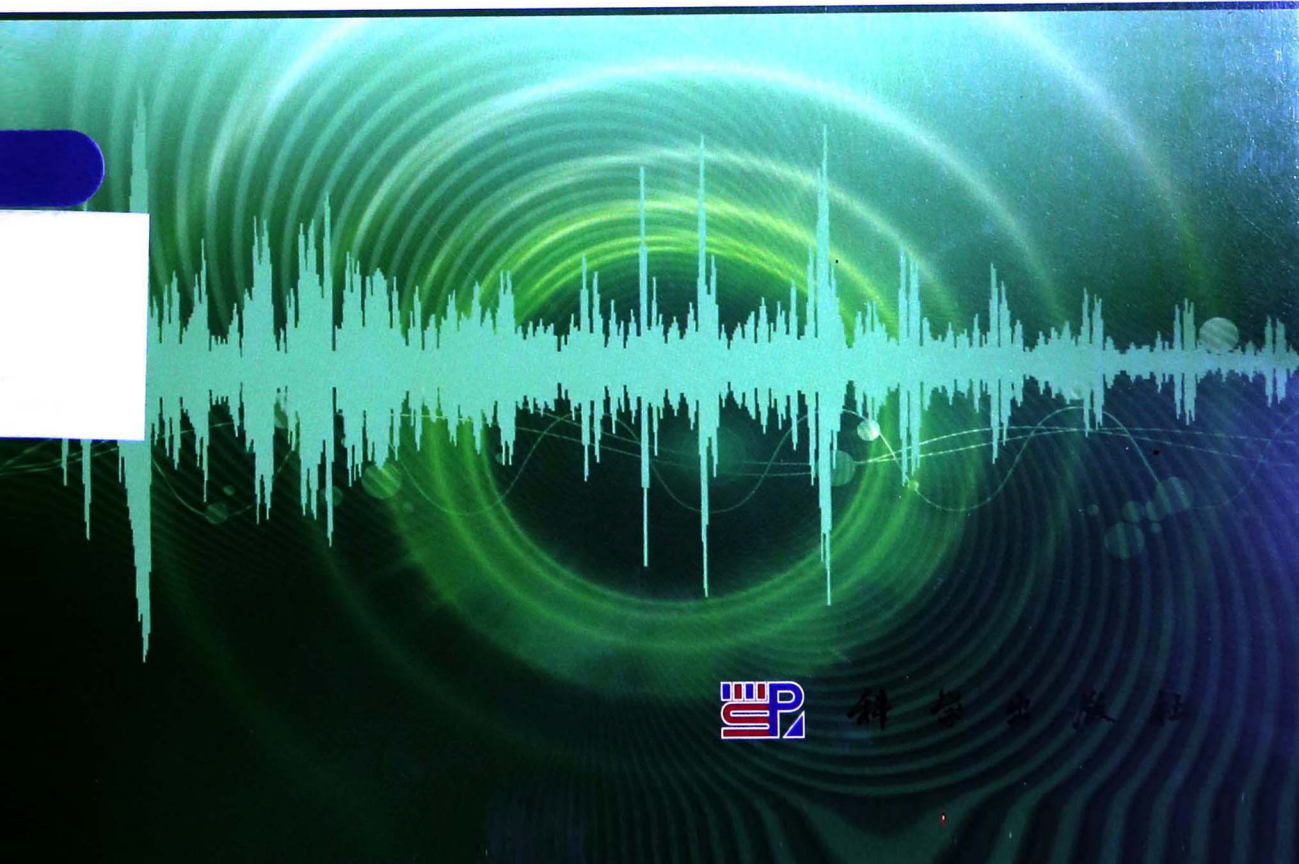


“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代声学科学与技术丛书

声学测量原理与方法

吴胜举 张明铎 编著



“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代声学科学与技术丛书

声学测量原理与方法

吴胜举 张明铎 编著

陕西师范大学出版基金
国家自然科学基金项目(11074158) 资助出版

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了应用声学领域中所涉及的声学测量基本问题的原理和方法,主要包括声学测量信号与环境、测量传声器的校准、水听器的校准、换能器特性的测量、噪声与振动测量及评价、声学材料特性与建筑声环境的测量、声源声功率的测量,以及与声信号分析处理有关的基础知识。本书内容广泛、系统性强,既强调基础,又注重应用,并将近年来有关声学测量的新原理和方法以及相关国家标准和计量检定规程进行简要介绍。

本书可作为高等学校相关专业的研究生与高年级本科生教材,也可供专业与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

声学测量原理与方法 / 吴胜举,张明铎编著. —北京:科学出版社,2014.1
(现代声学科学与技术丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-039341-8

I. ①声… II. ①吴… ②张… III. ①声学测量 IV. ①TB52

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第304541号

责任编辑:刘凤娟 责任校对:刘小梅
责任印制:赵德静 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2014年1月第一次印刷 印张:17 1/4

字数:329 000

定价:89.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《现代声学科学与技术丛书》编委会

主 编：田 静

执行主编：程建春

编 委：（按姓氏拼音排序）

陈伟中	陈 宇	邓明晰	侯朝焕
李晓东	林书玉	刘晓峻	吕亚东
马远良	钱梦騄	邱小军	孙 超
王威琪	谢菠荪	杨德森	杨士莪
张海澜	张仁和	张守著	

前 言

声学是研究弹性介质中声波的产生、传播、接收、效应及其应用的学科。声学作为一门经典的学科,在近代已经取得很大的发展,不但广泛应用于工业、农业、医疗卫生、环境保护和人们的日常生活等各个方面,而且也广泛应用于国防建设事业。

声学测量作为声学学科的重要组成部分,又是声学理论和声学技术应用与发展的基础。在现有的国家计量分类中,声学计量是十大体系之一。而在目前的声学测量应用中,还缺乏一本“宽口径、厚基础”,并以声学理论基础为基点,以应用为目标,阐述声学测量原理和方法的参考书。为此,作者根据数十年从事声学测量科研工作与教学的实践和经验编写了《声学测量原理与方法》一书。

本书涵盖了应用声学中的大部分基本测量内容,全书共8章。第1章介绍声学基础理论知识,对于此后各章内容中涉及的基础理论内容,相连接贯,无需再查找更多的声学基础理论书籍。第2章介绍声学测量所用的基本声信号和声学环境。第3章介绍音频声学测量的中心——传声器校准的原理和方法以及相关的校准仪器。第4章至第7章分别介绍噪声测量的仪器及其检测、噪声的主要评价方法和评价量、噪声源的测量、振动测量方法、建筑声学材料和厅堂声学测量,超声应用中的水听器校准、声功率、换能器特性、衰减和非线性参量等参数测量的原理和方法。第8章介绍与声信号分析处理有关的基础知识和方法。

本书在参考和总结前人有关声学测量书籍的基础上,结合近年来声学测量技术的新发展,并参考国际上和我国以声学测量技术和方法为主的标准、规程和方法,结合声学计量测试中的实践,力求体现基本概念清晰、内容新颖,并反映最新发展动向,在易于掌握且加深对声学测量知识理解的同时,达到举一反三的目的。

在本书的编写过程中曾得到中国计量科学研究院陈剑林研究员、张美娥高级工程师、边文萍高级工程师和中国船舶重工集团公司第701所刘方雄高级工程师提供的部分参考资料;中国科学院声学研究所朱厚卿研究员给予许多有益的指导;陕西师范大学的领导和同事也给予了诸多关心和帮助,在此一并表示诚挚的感谢。

感谢陕西师范大学出版基金、国家自然科学基金(项目编号:11074158)给予的出版资助。

本书可作为相关科研和工程技术人员的参考书籍,以及声学、应用物理、噪声控制和建筑声环境等相关专业研究生和高年级本科生的教学参考书。编著者虽然竭尽全力,但是不足之处在所难免,敬请读者指正,以便进一步修改和完善。

作 者

2013年5月

目 录

前言

第 1 章 声学基础概述	1
1.1 声波的产生和表述	1
1.1.1 声波的产生	1
1.1.2 描述声波的基本物理量	2
1.2 声波方程	7
1.2.1 流体介质的三个基本方程	7
1.2.2 一维声波波动方程	7
1.2.3 三维声波波动方程	8
1.2.4 声波传播速度	8
1.3 声学量的级与分贝	9
1.3.1 使用级与分贝的原因	9
1.3.2 声压级、声强级和声功率级	10
1.4 声波的传播	12
1.4.1 平面声波的传播	12
1.4.2 球面声波的传播	12
1.4.3 柱面声波的传播	13
1.5 声波的反射、折射、散射和衍射	14
1.5.1 声学边界条件	15
1.5.2 声波的反射和折射	15
1.5.3 声波的散射和衍射	17
1.6 声波的叠加与干涉	18
1.6.1 叠加原理	19
1.6.2 驻波	19
1.6.3 声波的相干性	20
1.6.4 无规相位的声波叠加	21
1.7 声波导管与管中的声波	23
1.7.1 矩形声波导管	23
1.7.2 圆柱形声波导管	26
1.8 室内声场	28

1.8.1 室内声学的波动理论	28
1.8.2 室内统计声学	32
第2章 测量信号与声学环境	39
2.1 声学测量常用的信号	39
2.1.1 纯音信号	39
2.1.2 啁啾信号	39
2.1.3 猝发音信号	40
2.1.4 噪声信号	40
2.2 声学测试声场	42
2.2.1 自由声场	42
2.2.2 扩散声场	46
思考题	48
第3章 测量传声器的校准	49
3.1 测量传声器的工作原理	49
3.1.1 传声器的分类	49
3.1.2 电容传声器的工作原理	49
3.2 传声器校准的目的和意义	51
3.3 传声器灵敏度	52
3.3.1 传声器灵敏度的定义	52
3.3.2 不同灵敏度的比较和使用	54
3.4 互易原理	55
3.4.1 线性网络互易原理	55
3.4.2 声场中的互易原理	56
3.4.3 电声互易原理	57
3.5 自由场灵敏度的互易校准	58
3.5.1 三只互易传声器校准方法	58
3.5.2 辅助声源法	60
3.5.3 插入电压技术与电转移阻抗测量	61
3.5.4 影响自由声场灵敏度校准的因素	62
3.6 自由场灵敏度的比较法校准	66
3.7 声压灵敏度的耦合腔互易校准	67
3.7.1 耦合腔互易校准方法	68
3.7.2 耦合腔互易校准的修正	70
3.8 声压灵敏度的比较法校准	71
3.8.1 同时激励比较法	72

3.8.2 替代比较法	72
3.8.3 比较法校准中注意的问题	73
3.9 声校准器校准	74
3.9.1 活塞发声器	74
3.9.2 声级校准器	76
3.10 传声器灵敏度的修正值	77
3.10.1 修正值 K_0 的来源	77
3.10.2 K_0 值的使用	78
3.11 静电激励器测量声压灵敏度频率响应	78
思考题	80
第4章 噪声测量	81
4.1 声级计的原理及其性能测量	81
4.1.1 声级计的工作原理	81
4.1.2 声级计的主要性能及其测量	83
4.1.3 声级计的整机校准	92
4.2 滤波器与频率分析仪	93
4.3 声强测量系统	96
4.3.1 声强测量原理	96
4.3.2 声强测量仪器	97
4.3.3 声强测量探头	100
4.4 噪声的评价方法和评价量	101
4.4.1 响度级与响度	102
4.4.2 噪度和感觉噪声级	103
4.4.3 A 声级	105
4.4.4 D 声级	106
4.4.5 等效连续声级 L_{Aeq}	106
4.4.6 昼夜等效声级	107
4.4.7 统计声级(累积百分声级) L_N	107
4.4.8 交通噪声指数 TNI	108
4.4.9 噪声污染级	108
4.4.10 语言干扰级	109
4.4.11 噪声评价标准	109
4.4.12 噪声评价数	110
4.5 噪声标准的限值与适用范围	111
4.5.1 环境噪声限值标准	112

4.5.2	交通运输噪声限值标准	114
4.5.3	噪声控制限制标准	115
4.6	噪声级的测量	116
4.6.1	稳态噪声测量	116
4.6.2	非稳态噪声测量	117
4.7	噪声源声功率测量	118
4.7.1	声压法测量噪声源声功率	119
4.7.2	声强法	123
4.7.3	标准声源比较法	125
4.7.4	振速法测量噪声源声功率	126
4.8	噪声源识别与定位	127
4.8.1	声学测量分析法	127
4.8.2	信号分析法	129
4.9	环境噪声测量方法	130
4.9.1	测量基本要求	130
4.9.2	声环境质量的测量	131
4.9.3	边界排放噪声测量	132
4.10	工业企业噪声测量	135
4.10.1	机器设备噪声测量	135
4.10.2	生产环境(车间)噪声测量	136
思考题		137
第5章 振动测量		138
5.1	概述	138
5.2	振动传感器	139
5.2.1	振动传感器的分类与特点	139
5.2.2	压电加速度计的工作原理	139
5.2.3	振动传感器的选择与安装	141
5.3	振动前置放大器	143
5.3.1	电荷放大器	143
5.3.2	电压放大器	144
5.4	加速度计校准	145
5.4.1	激光干涉技术的绝对校准	145
5.4.2	比较法校准	146
5.4.3	应用振动激励器校准	147
5.4.4	频率响应测量	147

5.5	振动测量仪	148
5.6	环境振动标准限值及其测量	149
5.6.1	环境振动标准	149
5.6.2	环境振动测量方法与评价量	151
5.7	机器振动的测量	151
	思考题	153
第6章	建筑声学测量	154
6.1	阻抗管驻波比法测量法向吸声系数和声阻抗率	154
6.1.1	测量装置的描述	154
6.1.2	平面波产生的条件	154
6.1.3	吸声系数测量原理	155
6.1.4	法向声阻抗率比的测量	158
6.1.5	测量工作频率范围	160
6.1.6	探管声中心和管内声波衰减的校正	160
6.2	阻抗管双传声器传递函数法测量吸声系数	162
6.2.1	测量原理和方法	163
6.2.2	传声器失配的校正	164
6.3	混响室法测量材料的无规入射吸声系数	166
6.3.1	测量原理	166
6.3.2	测量装置与方法	167
6.3.3	测量设备的要求	168
6.4	隔声测量	169
6.4.1	隔声量	169
6.4.2	实验室法测量隔声	169
6.4.3	现场测量方法	173
6.5	厅堂声学测量	175
6.5.1	厅堂的建筑声学特性测量	175
6.5.2	扩声特性测量	179
	思考题	181
第7章	超声测量	183
7.1	水听器校准	183
7.1.1	超声水听器的类型及其性能	184
7.1.2	灵敏度与相关电声参数的定义	186
7.1.3	自由场三换能器互易法校准	187
7.1.4	两换能器互易法	195

7.1.5	激光干涉法校准	198
7.1.6	水听器的自由场比较法校准	200
7.2	超声场声压测量	201
7.2.1	连续正弦声压测量	201
7.2.2	脉冲正弦声压测量	202
7.2.3	声场中的噪声测量	204
7.3	超声功率测量	204
7.3.1	辐射压力法	204
7.3.2	量热法	206
7.3.3	电测法	207
7.3.4	声光法	209
7.4	超声换能器电声参数测量	210
7.4.1	换能器阻抗特性测量	211
7.4.2	换能器输入电功率测量	213
7.4.3	换能器辐射声功率的测量	215
7.4.4	换能器电声效率的测量	217
7.5	介质中的超声声速和衰减测量	218
7.5.1	声速的测量	218
7.5.2	超声衰减测量	220
7.6	非线性参数测量	221
7.6.1	非线性物态方程与非线性参量	222
7.6.2	非线性参数的热力学测量方法	222
7.6.3	非线性参数的有限振幅声波测量法	223
7.6.4	非线性参数的混合规则	224
	思考题	225
第8章	声信号分析和处理基础	226
8.1	信号的分类及描述	226
8.1.1	信号的分类	226
8.1.2	确定性信号	227
8.1.3	随机信号	229
8.2	声信号的模拟分析	236
8.2.1	滤波器及其特性	236
8.2.2	检波器	239
8.2.3	频谱分析	241
8.2.4	模拟信号的实时分析	242

8.3 声信号的数字处理分析	244
8.3.1 采样定理和频率混叠	245
8.3.2 量化与动态范围	247
8.3.3 快速傅里叶变换	248
8.3.4 FFT 对信号进行谱分析	249
8.3.5 数字滤波器	253
主要参考文献	257
索引	259

第 1 章 声学基础概述

声学是研究声音的产生、传播、接收和效应的科学。现代声学的研究范围不断扩大,已经不局限于可听声,传播的介质也不限于空气。但是,作为认识声学本质、声学实验现象和声学研究过程的定量测量,声学测量原理和方法占据了举足轻重的地位,也已经构成声学研究的一个分支。对声波及相关的声学现象进行测量和定量研究,必须对声波的概念和基本特性有深入了解。

本章首先介绍声波的产生和描述声波的基本量,通过阐述声波运动规律的波动方程,分别阐述声波的分类及声学测量中需要关注的典型声学现象,如声波的反射、透射、折射与衍射、声波的干涉和叠加等;随后讲述管中声波传播与室内声场的基本特性。

1.1 声波的产生和表述

1.1.1 声波的产生

振动产生声波。仔细考察和分析就可以发现,尽管它们的形式各异,但它们的共同特点就是所有这些声音都来源于物体的振动。例如,讲话的声音是来源于人喉内的声带振动,扬声器发声来源于纸盆的振动,机械噪声来源于机器部件的振动。凡是发出声音的振动体称为声源。声源不一定是固体,液体和气体同样会由于振动而发声,如浪涛声来源于水振荡,而汽笛声是由高压、高速气体产生的振动。

声源发出的声音必须通过中间介质才能传播。例如,在空气中我们可以听到声音,在真空中却听不到。那么声音是如何在空气中传入我们耳朵呢?

设想在空气中某个局部区域,由于某个声源(如扬声器纸盆)振动的激发,这一局部区域的介质体积元离开平衡位置运动,继而推动相邻的介质体积元运动,如图 1.1.1 所示。由于空气是连续的介质,我们将连续的空气介质划分为相连的 $A, B, C, D, \dots$ 一个个小体积元,相邻体积元之间都存在着弹性。当体积元 A 向体积元 B 运动时,压缩了相邻的体积元 B 这部分空气介质,由于介质的弹性,体积元 B 的局部介质在被压缩时产生一个反抗力,这个反抗力又反过来作用于体积元 A ,使它向原来的平衡位置运动。由于体积元 A 具有质量,因而其惯性力使体积元 A 超过平衡位置后继续向另一侧运动,又压缩了另一侧的相邻介质,该相邻介质也会产生一个反抗压缩的弹性力,使体积元 A 又反过来趋向平衡位置运动。这样,由于

介质的弹性和惯性作用,这个最初被扰动的空气介质体积元 A 在平衡位置附近来回地振动。同样的原因使体积元 A 的邻近部分的体积元 B ,以至于更远处的体积元 C 、 D 等也在各自的平衡位置附近相继振动起来,但是在时间上是依次滞后的。这样介质质点的机械振动便由近及远地传播出去,当传入人耳时,使耳内鼓膜作相应的振动,便是我们感觉到的声音。

弹性介质里的振动传播过程,类似于多个质量-弹簧振子相互耦合形成的链形系统,一个振子的运动会影响其他振子也跟着一起运动。图 1.1.1(b)给出了振子 A 的质量在四个不同时间的位置,其余振子的质量也都在平衡位置附近作类似的振动,并依次有时间滞后。

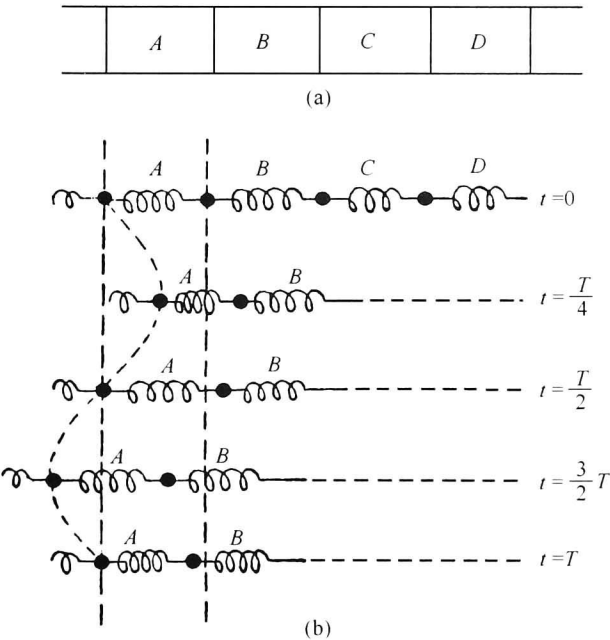


图 1.1.1 质量-弹簧振子耦合模型

声波在介质中的传播,只是介质振动状态的传播,介质本身并没有向前运动,它只是在其平衡位置附近来回振动,所传播出去的是物质的运动形态,这种运动形式称为波动。声音是机械振动状态的传播,这种传播过程是一种机械性质的波动,故称为声波。

1.1.2 描述声波的基本物理量

声波不仅可以在空气中传播,而且在液体、固体等一切弹性介质中都可以传播。根据传播介质的不同,可分为气体声、液体声、固体声等类型。气体和液体是流体,声在流体中传播时,只有体积的弹性恢复力,而没有切向恢复力,因此介质质点的振动方向与声波的传播方向一致,只有纵波。固体中除了有纵波传播之外,

还有横波,横波的介质质点的振动方向与传播方向垂直。

声波的频率为 $10^{-4} \sim 10^{12}$ Hz,按照频率范围可以划分为次声($10^{-4} \sim 20$ Hz)、可听声($20 \sim 2 \times 10^4$ Hz)、超声($2 \times 10^4 \sim 5 \times 10^8$ Hz)和特超声($5 \times 10^8 \sim 10^{12}$ Hz)。

最简单的周期性声波是纯音,由简谐振动产生的频率固定、并按正弦或余弦规律变化的声波,又称为简谐声波。复杂声波是由多个频率不同的简单声波组成。对于周期性声波,其谐波频率是基频的倍数。由傅里叶分析方法可以将任意周期性声波分解成一系列谐波。对于简谐声波,其物理量随时间按正弦形式或余弦规律变化,即

$$p(t) = p_a \sin(\omega t + \theta) \quad (1.1.1)$$

式中, p_a 为幅值; θ 为初始相位; ω 为角频率,

$$\omega = 2\pi f \quad (1.1.2)$$

式中, f 为频率,是 1s 内重复出现的完整振动的个数。如果自变量是时间,通常用 T 表示周期,即完成一周振动所需要的时间。因此,频率是周期的倒数,单位为赫兹(Hz),

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.1.3)$$

周期声波中两个相邻同相位点之间的距离称为波长,通常用 λ 表示,波长等于声速和频率之比,即

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \quad (1.1.4)$$

由于正弦函数是周期函数,因此其数量每增加 2π 弧度,函数值就重复。根据周期条件可得

$$k\lambda = 2\pi$$

式中, k 表示每 2π 长度内波动重复的次数,称为波数,即

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c_0} \quad (1.1.5)$$

除了上面所述之外,描述声波的基本物理量有以下几个。

1. 声压基本概念及其量度

声波在传播时,声压较容易测量,因此描述声波的物理量最常用的是声压,也可以用质点振动的位移、质点振动速度或其他的相关物理量。

以空气介质为例,无声波作用时,空气是静止的,其压强称为静压强 P_0 。声源的振动使周围的空气形成周期性的疏密相间的状态,形成声波。在声波作用下,空间各点压强变为 P ,由于声波扰动产生的压强增量

$$p = P - P_0 \quad (1.1.6)$$

就称为声压。声压的大小反映了声波的强弱,单位是帕斯卡(Pa): $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ 。

当声波在传播过程中,同一时刻,不同体积元内的声压 p 不同,对于同一体积元,声压 p 又随时间而变化,所以声压一般是空间和时间的函数,即 $p = p(x, y, z, t)$ 。由于声波的扰动,引起的密度变化量 $\rho' = \rho - \rho_0$,也是空间和时间的函数,即 $\rho' = \rho'(x, y, z, t)$ 。

此外,由于介质质点振动位移、振动速度与压强之间是密切相关的,其中一个量的变化将导致其他量的变化,也可以作为描述声波的物理量。但是,由于人耳对声音的感觉直接与声压有关,而一般声学仪器容易直接测量的量是声压,因此声压已成为目前人们最为普遍采用的描述声波的一个基本物理量。

声波波及的空间称为声场。声场中某一点的某一瞬时声压值称为瞬时声压,而在一定时间间隔中最大的瞬时声压称为峰值声压。在一定时间间隔内瞬时声压的平方对时间取平均后的平方根值,也就是瞬时声压对时间的方均根值,称为有效值声压,简称有效声压,其数学表达式为

$$p_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt} \quad (1.1.7)$$

式中,下角符号“e”代表有效值; T 表示取平均的时间间隔。对于按正弦规律随时间变化的简谐波声压有下面的关系,即

$$p_e = \frac{p_a}{\sqrt{2}} \quad (1.1.8)$$

本书中,除了特指,一般所述的声压均为有效声压,在书写时省去下角符号“e”。一般使用电子(或声学)仪器测得的声压值都是有效声压。

为了使读者对声压的大小有一个数量概念,下面举出一些声压大小的典型例子:

人耳对 1000Hz 声音的可听阈(刚刚能觉察到它存在时的声压)约 $2 \times 10^{-5} \text{Pa}$;

微风轻轻吹动树叶的声音约 $2 \times 10^{-4} \text{Pa}$;

在房间中的高声谈话声(相距 1m 处) $0.05 \sim 0.1 \text{Pa}$;

交响乐演奏声(相距 5~10m 处)约 0.3Pa ;

一般鼓风机房声音约 2Pa ;

喷气飞机起飞时约 200Pa 。

2. 质点振动位移

声波的质点振动位移是介质中的质点因声波通过而引起的相对于平衡位置的位移。振动质点的最大位移称为振动的振幅。空气中声波振动的幅度非常小,在 $10^{-7} \sim 1 \text{mm}$ 。低限相应于听阈,高限相应于痛阈。

3. 质点振动速度

声波的质点振动速度是在一定时刻,介质中某一无穷小部分由于声波存在而

引起的相对于整个介质的速度,即

$$v = -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial p}{\partial x} dt = v_a e^{j(\omega t - kx)} \quad (1.1.9)$$

瞬时质点速度、峰值质点速度和有效质点速度的意义和声压中所用有关名词相似。

4. 声阻抗与声阻抗率

介质在一定表面上的声阻抗是该表面上的平均有效声压 p 与通过该表面上的有效体积速度 U 的比值,即

$$Z_a = \frac{p}{U} \quad (1.1.10)$$

声阻抗为复数,其实数部分为声阻,虚数部分为声抗。而声阻抗也可以用力阻抗表示,这时它等于力阻抗除以有关面积的平方。

在研究空间声场时,体积速度 U 的含义是不明确的,在这种情况下,通常使用质点速度 v ,因此就有了声阻抗率。声阻抗率是介质中某一点的有效声压与该点的有效质点速度 v 的比值,即

$$Z_s = \frac{p}{v} \quad (1.1.11)$$

在自由平面声波中,某点的有效声压 p 与该点的有效质点速度 v 的比值称为特性阻抗。它等于介质密度 ρ_0 和介质中声速 c_0 的乘积,即

$$Z_s = \frac{p}{v} = \rho_0 c_0 \quad (1.1.12)$$

在温度为 20°C 和标准大气压时, $\rho_0 = 1.21\text{kg/m}^3$, $c_0 = 344\text{m/s}$, 空气的特性阻抗 $\rho_0 c_0$ 大约为 $415\text{Pa} \cdot \text{s/m}$ 。对于水,当温度为 20°C 时, $\rho_0 = 998\text{kg/m}^3$, $c_0 = 1480\text{m/s}$, 水的特性阻抗 $\rho_0 c_0$ 大约为 $1.48 \times 10^6 \text{Pa} \cdot \text{s/m}$ 。

5. 声能密度

声波传播到原来静止的介质中,一方面使介质质点在平衡位置附近来回振动起来,另一方面在介质中产生了压缩和膨胀的过程。前者使介质具有了振动动能,后者使介质具有了形变位能,两部分之和就是由于声扰动使介质得到的声能量,以声的波动形式传递出去。因此,可以说声波的传播过程实质上就是声振动能量的传递过程。

声能密度是声场中单位体积的声能量。声能密度的瞬时值、最大值、峰值分别称为瞬时声能密度、最大声能密度和峰值声能密度。对于平面声波,声场中某点的平均声能密度为