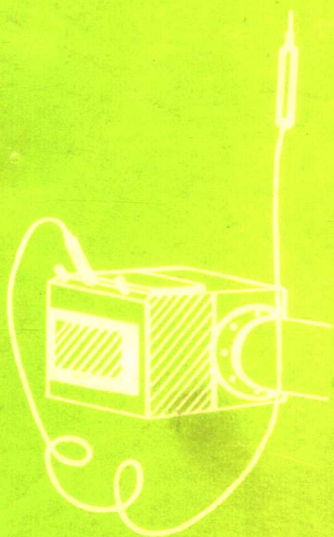


沈 壕 编著

声学测量



科学出版社

声 学 测 量

沈 喙 编著

科 学 出 版 社

1 9 8 6

内 容 简 介

本书在总结声学测量技术应用经验的基础上,比较详细而系统地讨论了空气媒质中的声学测量技术。前五章讨论目前广泛使用的声学测量原理和基本方法,包括测量传声器及其校准,频率和相位的测量,声信号的测量和分析。也介绍了由于数字技术发展而出现的新的声学测量技术,例如实时分析,声强测量,声源鉴别,快速傅里叶变换和相关技术等。以后五章分别叙述与近代声学中最先发展起来的建筑声学有关的室内声学测量,与环境污染有关的噪声和振动测量,与通信和广播有关的电声测量,与生理和心理声学有关的主观声学测量。最后一章讨论了测量误差和它的分析。附录中给出了声学测量标准。

本书可供从事声学设计、科研和噪声控制有关的科技工作者、高等院校声学专业师生参考。也可供从事物理学、力学、机械工程、交通运输、航空、建筑、电子技术和医学等而希望了解与使用声学测量技术和仪器的专业人员参考。

声 学 测 量

沈 贻 编著

责任编辑 赵惠芝

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1986 年 8 月第 一 次印刷 印张: 9 5/8

印数: 0001—3,700 字数: 215,000

统一书号: 13031·3240

本社书号: 4195·13—3

定价: 2.25 元

序 言

声学大约是从十七世纪初分析物体的振动开始的,但直到十九世纪末,接收声波还只能用人耳。1877年出版了瑞利的《声学理论》,此书对经典声学的内容进行了总结。二十世纪初,贝尔发明了用于电话机的碳粒传声器,首次把声波转换为电信号,从而使声学进入了一个新的阶段。电子学的发展,大大地促进了声学测量技术。不久,人们已经能够测量各种频率、波形和强度的声波,从而奠定了近代声学的基础。声学测量技术有广泛应用,例如,用于改进房间的音质和放声系统的高保真度;用于测量噪声并加以控制,以改善人们的生活环境等。近代声学中的测量技术发展得很迅速,测量和分析声波的电子仪器,准确度已相当好。由于数字技术和大规模集成电路的发展,微处理机进入了声学测量系统,使声学测量方法、准确度和速度都得到提高,随之又出现了一些新的声学测量技术,例如实时频率分析、声强测量、声源鉴别、快速傅里叶变换、相关分析等。

近代声学已经渗透到许多边缘学科中。随着我国社会主义建设事业的迅速发展,国防、工农业生产、交通、卫生、教育和科学研究等部门需要进行声学测量的工作也日益增多。因此,声学测量技术的使用不再局限于声学工作者本身,许多从事物理学、力学、机械工程、交通运输、航空、建筑、电子技术和医学等专业人员也都希望了解和使用声学测量技术与仪器。国内外已经出版的声学测量书籍不多;伯拉尼克的《声学测量》^[1]出版已经近30年,布拉克的《振动和声学测量手册》^[2]

只适用于物理学工作者参考。五十年代以来,由于环境噪声污染日益严重,《噪声测量》等书籍^[3-5]受到了读者的普遍欢迎。

声学是研究各种媒质中声波的产生、传播、接收和作用等问题的一门学科。传播声波的媒质有气体、固体和液体,相应的分支学科分别称为空气声学、超声学和水声学;其中空气声学涉及人们的听觉,因此,与人们的文化生活和社会活动关系非常密切。由于媒质不同,声学测量方法和所用测量仪器也不同。本书讨论的声学测量,按照习惯只包括可听声部分,即只涉及近代声学中最先发展起来的建筑声学 and 电声学;与听觉有关的生理声学和心理声学;与通讯、广播有关的语言声学和音乐声学;与环境污染有关的噪声控制和机械振动等。

本书力图在总结测量技术应用经验的基础上,系统地讨论空气媒质中的声学测量技术,介绍目前广泛使用的声学测量原理和基本方法。对已经很少使用的经典测量方法则仅作综合性叙述。对一些新的声学测量技术则作简单介绍,来反映国内、外最新声学实验技术水平,以有助于建立现代化的声学实验手段。本书在编写过程中得到了马大猷先生的支持和指导;赵其昌同志仔细审阅了全稿,提出了许多有益的意见,特此致谢。由于作者从事声学工作范围的局限性,书中难免有不妥之处,欢迎读者提出宝贵意见。

沈 嵘

1984年6月

常用声学量和单位

周期 (T); 秒 (s)

频率 (f); 赫[兹] (Hz)

角频率 (ω); 弧度每秒 (rad/s)

波长 (λ); 米 (m)

密度 (ρ); 千克每立方米 (kg/m³)

质点速度 (v); 米每秒 (m/s)

体积速度 (U); 立方米每秒 (m³/s)

声速 (c); 米每秒 (m/s)

声压 (p); 帕[斯卡] (Pa)

力 (F); 牛[顿] (N)

质点位移 (d); 米 (m)

振动加速度 (a); 米每二次方秒 (m/s²)

声能密度 (D); 焦耳每立方米 (J/m³)

声功率 (W_A); 瓦[特] (W)

声强 (I); 瓦每平方米 (W/m²)

级差 (L); 分贝 (dB)

声阻抗 (Z_A); 帕秒每立方米 (Pa · s/m³)

声阻抗率 (Z_S); 帕秒每米 (Pa · s/m)

力阻抗 (Z_M); 牛秒每米 (N · s/m)

声质量 (m_A); 千克每四次方米 (kg/m⁴)

声劲 (S_A); 牛每五次方米 (N/m⁵)

声顺 (C_A); 五次方米每牛 (m⁵/N)

流阻 (R_I); 帕秒每米 (Pa · s/m)

声吸收 (A); 二次米 (m^2)

响度级 (L_N); 方 (phon)

响度 (N); 宋 (sone)

音调 (P); 美 (mel)

频程 (Δf); 倍频程 (oct.)

灵敏度 (M); 伏每帕 (V/Pa)

灵敏度级 (S); 分贝 (dB)

目 录

序言

常用声学量和单位

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 振动与声	3
1.3 空气的物理特性	8
1.4 声波的基本物理量	10
1.5 声波的传播特性	13
1.6 声学量的级和基准值	19
1.7 消声室和混响室	23
第二章 传声器的测量和校准	27
2.1 引言	27
2.2 声波的接收原理	28
2.3 测量传声器	30
2.4 测量传声器的校准	43
2.5 测量传声器的附件	51
第三章 频率和相位的测量	54
3.1 引言	54
3.2 频率标准	54
3.3 频率测量	55
3.4 相位测量	61
第四章 声信号的测量和分析	66
4.1 引言	66
4.2 声信号的类型和特性	67

4.3	信号幅值特性的测量	79
4.4	频率分析	83
4.5	脉冲信号分析	92
4.6	统计分析	92
4.7	显示和记录	94
第五章	实时分析技术	97
5.1	引言	97
5.2	数字信号	98
5.3	数字测量技术	101
5.4	快速傅里叶分析	104
5.5	功率倒频谱和复倒频谱	110
5.6	褶积和脉冲响应法	112
5.7	数字滤波	114
5.8	相关分析	118
5.9	声强测量	122
5.10	实时分析系统	125
第六章	噪声测量	130
6.1	引言	130
6.2	噪声级的测量	134
6.3	隔声测量	140
6.4	噪声剂量测量	145
6.5	噪声源声功率的测量	147
6.6	噪声源和引起噪声原因的识别	155
6.7	噪声评价	159
第七章	室内声学测量	170
7.1	引言	170
7.2	厅堂音质的测量	172
7.3	吸声材料特性的测量	188
7.4	扩声系统测量	202
第八章	电声测量	207

8.1	引言	207
8.2	传声器的测量	208
8.3	扬声器的测量	214
8.4	用数字技术测量扬声器的特性	227
8.5	耳机和送话器测量	231
8.6	拾声器测量	234
第九章 主观声学测量		237
9.1	引言	237
9.2	清晰度测量	238
9.3	响度测量	242
9.4	听力测量	248
9.5	音质评价方法	250
第十章 振动测量		254
10.1	引言	254
10.2	振动测量仪器	256
10.3	加速度计校准	262
10.4	加速度计的选择和安装	265
10.5	激光测振方法	267
第十一章 测量误差和它的分析		270
11.1	引言	270
11.2	误差和误差分类	271
11.3	测量误差理论	275
11.4	测量数据的统计分析	279
11.5	实验结果的统计检验	283
11.6	减小测量误差的讨论	284
参考文献		286
附录 声学测量标准		287
索引		291

第一章 绪 论

1.1 引言

声学测量和分析是人们认识声学问题本质的一种手段。通过必要的测量和分析可以对声学有定量概念,从而了解其规律性。声学测量通常是指先用电声(或机电)换能器把声波(或振动)转换成相应的电信号,然后用电子仪表放大到一定的电压,再进行测量与分析的技术以及有关声学仪器的工作原理。由于振动和声波密切相关,机械振动常常引起声辐射。有些噪声控制工作就是减弱物体的机械振动以及它在周围环境形成的噪声污染,因此,声学测量中常常也简单扼要地讨论直接测量某些机械振动的方法。早期在声学测量中曾使用过非电子仪器,但是目前除了激光测振外,基本上已不再使用其他非电子仪器了。二十世纪以来,声学测量技术发展很快。目前,声学仪器有较大发展,并具有高保真度,如宽的频率范围和动态范围,小的非线性畸变和良好的瞬态响应等。

声学的发展有赖于所采用测量设备的先进性。声学测量仪器是电子测量仪器的一个分支,它与电子测量仪器一样,也经历了电子管、晶体管和集成电路三个发展时期。过去,测量声波和振动的仪表都是模拟式电子仪表,测量的速度和准确度受到一定的限制。六十年代初,出现了数字式仪表,直接采用数字显示,提高了测量时读数的准确度。由于计算技术和高质量、低功耗的大规模集成电路的发展,人们已能用由微处理器控制的自动测量代替逐点测量,使许多需要事后计算的声学测量和分析工作可以用微计算机实时运算。以微处理机

为中心的测量仪表不但实现了小型化、多功能,而且由于采用了快速傅里叶变换算法而实现了实时分析。并且出现了一些新的声学测量和分析方法,例如实时频谱分析,声强测量,声源鉴别,瞬态信号分析,相关分析等。所以今后声学测量的任务是采用新的测量技术,提出新的测量方法,使用自动化数字式仪器,以提高测量的准确度和速度。

在声学测量中,测试环境对测量结果的影响很大。通常需要一些专用的声学实验环境,例如消声室和混响室;也需要如行波管、驻波管等以提供测量需要的典型声场。测量用的声源可以是普通的或专用的电动扬声器,或者由它们所组成的无指向性声源。也可用火花发生器或机械声源。测量用的信号可以是纯音、脉冲声、啁声、白噪声和窄带噪声等。

在许多声学测量中,经常使用磁带录音机,将现场所测的声信号完整地记录下来,以便进一步分析和处理。例如在现场测量中,可以采用测量传声器和传声器放大器的组合,或者使用精密声级计与磁带录音机配合,将现场的声信号记录下来,然后在实验室重放,用仪器分析。当然,在测量时,某些测试声信号也可以用磁带录音机重放。

在进行声学测量以前,应该查阅适用的国家标准或国际标准的有关测量方法的建议。在这些标准中,详细地叙述了测量技术和所用设备的规格,还给出明确的测量程序。应该注意我国国家标准总局颁布的国家标准(GB),国际标准化组织制定的ISO标准,以及国际电工委员会制定的IEC标准。此外,还可以参考美国的ANSI标准,英国的BS标准,日本的JIS标准,西德的DIN标准,苏联的ГОСТ标准等。

回顾历史,可以看到,在发展经典声学过程中,许多研究工作是直接用人耳来听声音的。直到本世纪,发展了无线

电电子学,才使声波的测量采用了电声换能器和电子测量仪器。高性能的测量传声器、频谱分析仪和声级记录器实现了声信号的声压级测量,频谱分析和声信号特性的自动记录;从而可以测量各种不同频率、不同强度和波形的声波,扩展了声学的研究范围,促进了近代声学的发展。可以期望,计算技术和大规模集成电路的发展,微计算机和微处理机在声学工作中的应用,必将促使近代声学进一步发展。

声学测量技术及其应用所涉及的面都很广,例如声学技术,电子电路,微电子学,仪器设计,概率论和随机过程以及信息处理技术等都有助于了解、掌握和发展声学测量技术。详细讨论有关这些问题将使本书篇幅过多,因此,本书只从声学测量角度作简单介绍和讨论,以反映声学测量技术的丰富内容,进一步深入了解请参看有关专著。

最后要说明一点,由于国产声学仪器还没有系列化,因此本书引用了一些国外新的测量技术和声学测量仪器,借以反映其全貌和目前的国际水平。

1.2 振动与声

振动与声是紧密相联的,机械振动常常引起声辐射。物体振动时激励着它周围的空气质点振动。由于空气具有可压缩性,在质点的相互作用下,振动物体四周的空气就交替地产生压缩与膨胀,并且逐渐向外传播而形成声[波]。声也指作用到人耳所引起的感觉。为了区别,前者称为声波,后者称为声音。人耳能否听到声音决定于声波的频率和强度。可听声的频率范围大约为 $20-20,000\text{Hz}$,其强度大约为 $0-130\text{dB}$ 。

(1) 振动

机械振动(简称振动)是指力学系统在观察时间内的一些

物理量(例如位移,速度或加速度)往复经过极大值和极小值变化的现象。每经过相同的时间间隔,其物理量能够重复出现的振动称为周期振动。完成一次振动所需的时间称为周期,每秒内的振动次数称为频率。不是周期性出现的振动称为非周期性振动。最简单的周期振动是按正弦形规律变化的简谐振动。由频率不同的简谐振动合成的振动,称为复合振动。

振动的特性是指振动的类型和振动量(位移、速度或加速度)的幅值、频率、相位、振动方式和频谱等。任何复杂的振动都可以由许多频率和振幅不同的简谐振动合成。

振动的各个基本量之间存在着简单关系,对于简谐振动,若位移振幅为 A , 则速度振幅为 $A\omega$, 加速度振幅为 $A\omega^2$ 。其中 ω 是振动的角频率。对于多共振系统的随机振动也有类似关系。

(2) 声波

当一个物体振动时,在它的周围就会产生声波。声波通常指弹性媒质中传播的压强、应力、质点位移、质点速度等的变化。一般说来,凡是弹性媒质,例如空气、液体和固体等都能够传播声波。声波在空气中传播时只能发生压缩与膨胀,空气质点的振动方向与波的传播方向一致,所以空气中的声波是纵波。图 1.1 给出平面纵波中的压缩与膨胀。

声波的频率很广,从 10^{-4}Hz 到 10^{12}Hz 。按照频率范围,声波可以分为次声(10^{-4} — 20Hz),可听声(20 — $2\times 10^4\text{Hz}$),超声(2×10^4 — $5\times 10^8\text{Hz}$)和特超声(5×10^8 — 10^{12}Hz)。本书只涉及空气中可听声频率范围以内的声波。

相应于振动,声波也可以区分为周期性声波和非周期性声波。最简单的周期性声波是纯音,它是由简谐振动产生的

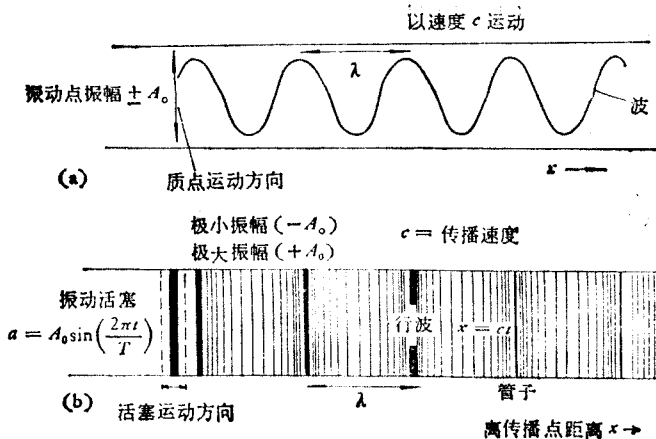


图 1.1 平面纵波中的压缩与膨胀

(a) 正弦形声波的压强变化; (b) 平面声波在管中的传播

频率固定、并按正弦形变化的波。复声是由一些频率不同的简单声组成。对于周期声，其谐波的频率是基频的整数倍。用傅里叶变换方法，可以把任意周期声信号分解成一系列谐波。

当声波作简谐振动时，其物理量随时间按正弦形或余弦形规律变化。简谐振动可以用下述函数描述：

$$A(t) = A_0 \sin(\omega t + \theta), \quad (1.1)$$

其中 A_0 是幅值； ω 是角频率； θ 是初始相位。

式(1.1)中的一些量定义如下：

幅值 振动的物理量偏离平衡位置的最大值称为幅值。

周期 周期是函数值重复出现时自变量的最小增量。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，单位为秒。

频率 频率是周期的倒数,单位为 Hz,

$$f = \frac{1}{T}, \quad (1.2)$$

式中 T 是周期,单位为秒。

可以看到,如果周期量的变量是时间,则周期量的频率是单位时间内的周数。对于人耳,最灵敏的频率大约在 3000—4000Hz 附近。

角频率 ω 等于:

$$\omega = 2\pi f, \quad (1.3)$$

式中角频率的单位是弧度每秒 (rad/s)。

相位 相位也称相角。周期量不同的相位是自变量相对于原始值已变动的量,用周期的分数表示。在简谐振动中,自变量的原始值常常选择在上一次周期量中自负变到正的一点作为零值,这样就使初始相位是周期的分数。若简谐振动按下述规律变化:

$$A(t) = A_0 \sin(\omega t + \theta),$$

式中 $(\omega t + \theta)$ 称为相位,它确定了时间 t 的函数值。 θ 是 $t = 0$ 时的相位,称为初始相位。

波长 声波波长是周期波中两个相邻的等声压点之间的距离,通常用 λ 表示。波长等于声速和声波频率之比,即

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1.4)$$

式中 c 是声速。

波数 因为余弦函数是周期函数,其宗量每增加 2π 弧度,函数值就重复。由波长的定义,可以写出周期的条件为

$$\cos[k(x + \lambda - ct)] = \cos[k(x - ct) + 2\pi],$$

所以 $k\lambda = 2\pi$, 或者说,波数 k

表 1.1 给定频率时的角频率、波长与波数

$$c = 344 \text{ m/s}$$

$f(\text{Hz})$	$\omega(\text{rad/s})$	$\lambda(\text{m})$	$k(\text{m}^{-1})$
25	157	13.76	0.456
31.5	197	10.92	0.575
40	251	8.60	0.730
50	314	6.88	0.912
63	395	5.46	1.150
80	502	4.30	1.460
100	628	3.44	1.825
125	785	2.75	2.283
160	1004	2.15	2.920
200	1256	1.72	3.651
250	1570	1.37	4.560
315	1970	1.09	5.75
400	2510	0.86	7.30
500	3140	0.69	9.12
630	3950	0.55	11.50
800	5020	0.43	14.60
1000	6280	0.34	18.25
1250	7850	0.27	22.83
1600	10,400	0.22	29.20
2000	12,500	0.17	36.51
2500	15,700	0.14	45.6
3150	19,700	0.11	57.5
4000	25,100	0.08	73.0
5000	31,400	0.07	91.2
6300	38,500	0.06	115.0
8000	50,200	0.04	146.0
10000	62,800	0.03	182.5
12500	78,500	0.03	228.5
16000	100,400	0.02	292.0
20000	125,600	0.02	365.1