

◆ 电声技术及其应用丛书 ◆

# 音响师 声学基础

齐娜 孟子厚 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

电声技术及其应用丛书

# 音响师声学基础

齐娜 孟子厚 编著

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

音响师声学基础/齐娜,孟子厚编著. —北京:国防  
工业出版社,2006.10

(电声技术及其应用丛书)

ISBN 7-118-04729-5

I. 音... II. ①齐... ②孟... III. 电声学  
IV. TN912.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 095646 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 11 字数 243 千字

2006 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 22.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

## 出版者的话

进入信息时代,随着移动通信技术、多媒体技术的迅猛发展以及家庭影院、数字化视听终端的不断完善和出新,电声技术也进入了大发展时期。先进的设计、计算机辅助设计的测量软件和设备的引入,使电声技术领域不论是设计水平还是生产能力都取得了前所未有的发展,传统的设计手段、生产工艺、生产设备以及测试仪器不断得到优化;新型的电声器件如数字式、硅集成等产品层出不穷;高保真化、片式化、微型化、薄型化、低功耗、高功率、多功能、组件化成为电声器件新的发展趋势;同时,产品的安全以及是否环保也成为影响其市场前景的重要因素。

为了追踪电声技术领域的新发展,更为了满足该领域从事声频工程、音响技术、录音技术、软件模拟、声像灯光、舞台音响以及电声器件的设计、生产、安装、调试和工作人员的需要,我们组织编写了这套《电声技术及其应用丛书》。

本丛书覆盖面广,图文并茂,资料翔实,将理论阐述和实例分析与操作技巧有机地结合。因此,系统性、实用性和新颖性是本套丛书的突出特点。

在选材上,已收入本套丛书的书目包括:介绍新型电声器件的《电声技术与微型扬声器》;介绍计算机辅助声学设计的《声学设计软件 EASE 及其应用》;介绍数字声频技术及其应用的《数字声频设备与系统工程》;介绍音质设计中的建筑因素及其处理方法的《音质设计与建筑因素》;介绍组合音响中各种设备的原理、调试与维修的《音响设备原理与维修》;介绍多声道录音设备及其操作的《现代录音技术实战》;介绍电声测量知识的《声频测量技术》;介绍音响师必备知识的《音响师声学基础》……

在写法上,本套丛书以实用性、启发性和普及性为出发点,避免艰深的理论探讨和繁复的数学推导;文字叙述通俗易懂,原理阐述深入浅出;借助图和表,使阅读更加轻松、易懂,一目了然。

在写作水平上,本套丛书的作者都是活跃在电声技术领域的教授、专家,科研院所的技术骨干,生产企业的行家里手;既有比较扎实的理论基础,又有丰富的实践经验。所以应该说,本套丛书的每一本都是作者多年教学、科研与实践的概括和总结,希望带给读者的是一本本集原理介绍、案例分析和操作技巧于一体的、使用上得心应手的工具书。

在后续选材上,由于本套丛书意在做成开放式,便于追踪技术发展和市场需要,不断充实和添加新的书目。目前待加入的书目包括“声像灯光技术”、“音响设备测试”、“专业音响调音技巧”和“音响工程的设计与施工”等,希望有识之士、业内专家、学者加盟,以你们的学识和才智,通过编辑和出版社的桥梁,精心打造出受读者欢迎的书籍。

我们衷心希望这套丛书能对从事电声技术的研究、设计、生产、检测的人员和广大的音响爱好者有所帮助,更希望业内专家、学者以及广大的读者朋友对这套丛书提出宝贵意见和建议,让我们做得更好!

## 前 言

音响行业是一个比较特殊的行业,因为音响师的工作对象是声音,而声音却是看不见、摸不着的。音响师和调音员所制作的声音是给人听的,所以如何把握声音的物理本质、如何把握人的听觉生理和听觉心理是音响师制作出好听的声音的必要条件。随着电子技术和信息处理技术的发展,在专业和民用音响领域,各种先进的音响设备和技术与日俱增,专业音响设备和消费类音响产品的功能越来越多,复杂程度越来越高,因而对音响师、调音员等专业音响人员的素质要求也越来越高。

作为一种特殊的职业,音响师除了要懂得音响设备的操作和调控技巧以外,还必须具备室内环境声学、电声技术、基本乐理、音质主观评价知识等多方面的综合知识。当前具有综合专业素质的音响技术人才远远满足不了整个音响行业的发展需求,很多音响师和调音员对声音、对声学问题的理解和认识还只是停留在感性的阶段,甚至是“发烧友”的水平,没有形成一种科学地理解和把握声音、解决声学问题的态度和职业习惯。科学的专业素质的培养离不开对本专业基础理论的学习和研究,音响技术的专业基础理论就是声学基础。

本书以提高音响行业从业人员的专业素质为目的,综合全面地介绍了作为一个专业的音响师和调音员所应该具备的基础声学知识,是面向音响师、调音员等专业人员的一本入门的音响技术的基础理论读物。由于音响技术工作的综合性,本书与其他声学基础的内容有很大的不同。本书的内容全面而广泛,包括振动与波动的基本概念、声波的基本概念和性质、与人的听觉生理和心理相关的人耳的听觉特性、与音色分析相关的声音信号分析基础、作为一个音响师所必须懂得的音律以及声音的谐和性的基础知识、各种乐器的声学原理、声乐和语音的基础知识、在实际音响工程中遇到最多的噪声的评价和基本控制方法、室内音质设计中必须了解和掌握的室内声学的基本原理、基本的主观音质评价术语和科学的主观音质评价方法等。全书除了论述基本原理外,也给出了一些应用实例,有些实例还来自编者所在实验室和学生的实际科研、教学和工程实践。

本书是在编者多年来给非理工类的录音艺术、音乐制作、音响导演等专业学生讲授声学基础以及给调音员、音响技师培训班授课的讲义基础上编写而成的。全书的编写从科普性和实用性出发,力图深入浅出地阐释清楚与音响技术有关的主要声学问题的物理概念和规律,全书没有复杂和深奥的数学推导,侧重物理概念的理解和实用知识的学习。对本书的学习不需要高等数学等大多数音响师所不具备的数理基础,有高中甚至初中以上文化基础的读者都可以阅读和学习本书。

本书的读者对象包括音响师、调音员等专业音响人员,以及各行业中对音响技术和工程感兴趣的人士,也可供其他行业的相关技术人员和大专院校录音艺术、音响导演、音乐

工程等非理工类专业的学生参考。对广大的音响“发烧友”来说,可以将本书作为一本“超级发烧”读物,增加自己对音响设备和声音本质的理解,将盲目的“发烧”转化为理智的思考和科学的态度,把业余兴趣转化为专业知识。本书也许会有助于那些希望把对音响的爱好提升为职业追求的“发烧友”们,因为这是一本真正入门的音响技术理论基础读物。

声学基础是一门数理性、逻辑性、系统性很强的课程,传统上只在大专院校讲授。将如此一门课程以科普的形式编写成面向没有大学理工科数理基础的广大音响师、调音员和音响爱好者,这是一件非常不容易的事情,比编写一部大专教材要难得多。做这样的一件工作我们也没有太多的经验,书中的缺陷和不足之处在所难免,希望广大读者在阅读过程中将发现的问题和阅读体会赐教于我们,在有机会修改此书时进行修改和完善。

感谢中国传媒大学传播声学研究所的研究生赵凤杰、石蓓、戴璐、范玮等同学对本书编写的协助,包括部分章节文字和素材的整理、书稿的录入和制图等工作。

齐娜 孟子厚

二〇〇六年六月

中国传媒大学传播声学研究所

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 人类生活在声音世界 .....	1
1.2 声音 .....	2
1.2.1 声音是什么 .....	2
1.2.2 声音是怎么传播的 .....	3
1.2.3 人是如何说话的 .....	4
1.2.4 声音有哪些性质 .....	4
1.2.5 人的耳朵怎么能听见声音 .....	4
1.2.6 声音是如何接收的 .....	5
1.3 声学的发展史 .....	5
1.4 声学的广延性 .....	6
1.5 声音在视听技术中的地位 .....	7
1.5.1 声音在视听技术中的作用 .....	7
1.5.2 声音和光的争论 .....	8
1.6 关于学习方法、专业特点、素质教育 .....	8
<b>第 2 章 振动与波</b> .....	10
2.1 与振动相关的基本概念及术语 .....	10
2.2 质点的自由振动 .....	11
2.2.1 质点振动系统的概念 .....	11
2.2.2 自由振动 .....	12
2.2.3 自由振动的能量 .....	14
2.3 质点的衰减振动 .....	15
2.3.1 质点衰减振动方程 .....	15
2.3.2 质点衰减振动规律 .....	16
2.4 质点的强迫振动 .....	17
2.4.1 强迫振动 .....	17
2.4.2 质点的强迫振动的规律 .....	17
2.4.3 电声器件的振动控制工作原理 .....	18
<b>第 3 章 声波的基本概念和性质</b> .....	20
3.1 波动的基本概念 .....	20
3.2 与声场波动特性相关的名词与术语 .....	23

3.2.1	声压的基本概念 .....	23
3.2.2	声功率与声强 .....	24
3.2.3	声压级与声强级的概念 .....	25
3.3	声音的传播速度及有关现象 .....	26
3.3.1	声速 .....	26
3.3.2	声速与风速和温度梯度等相关现象 .....	27
3.4	声波的反射与折射定理 .....	29
3.4.1	反射和折射定理 .....	29
3.4.2	与反射和折射相关的基本概念 .....	31
3.4.3	全反射和全透射 .....	31
3.5	声波的绕射和其他波动现象 .....	32
3.5.1	惠更斯原理 .....	32
3.5.2	声波的衍射 .....	32
3.6	运动声源的多普勒效应 .....	34
3.7	声学单位与声级 .....	35
3.7.1	常用的声学单位 .....	35
3.7.2	声级 .....	36
3.7.3	声压级的相加问题 .....	37
3.8	电—力—声类比 .....	38
3.8.1	机电类比 .....	38
3.8.2	电声类比 .....	40
<b>第4章</b>	<b>人耳的听觉特性 .....</b>	<b>44</b>
4.1	听觉生理系统 .....	44
4.1.1	听觉器官及听觉产生机理 .....	44
4.1.2	听觉感受的主观描述参量 .....	46
4.2	响度感分析 .....	47
4.2.1	感觉阈限与韦伯定律 .....	47
4.2.2	响度、响度级 .....	48
4.2.3	等响曲线 .....	48
4.2.4	声音的掩蔽效应 .....	50
4.3	音调感 .....	52
4.4	音色与谐和感 .....	52
4.5	声像感与双耳听觉 .....	53
4.6	听觉的时间效应 .....	54
<b>第5章</b>	<b>声音信号分析 .....</b>	<b>55</b>
5.1	信号的概念及分类描述 .....	55
5.1.1	信号的分类 .....	55
5.1.2	随机信号的描述和特征 .....	57
5.2	声音信号的频谱分析 .....	61



5.2.1	信号的频谱 .....	61
5.2.2	傅里叶级数及傅里叶变换 .....	62
5.2.3	信号的频谱与频带宽度 .....	63
5.3	音色与声谱 .....	65
5.3.1	决定音色的因素 .....	65
5.3.2	一些谐和谱的音色 .....	65
5.4	信号的数字化及处理 .....	68
5.4.1	数据采样 .....	68
5.4.2	量化及编码 .....	70
5.5	数字信号处理的应用 .....	72
<b>第6章</b>	<b>音律分析</b> .....	<b>74</b>
6.1	听觉的谐和性及乐音 .....	74
6.1.1	听觉的谐和性 .....	74
6.1.2	乐音及乐音的基本要素 .....	75
6.2	音高标准 .....	75
6.3	音律算法 .....	76
6.4	十二平均律 .....	77
6.5	五度相生律 .....	78
6.6	纯律 .....	80
6.7	不同律制的比较 .....	80
<b>第7章</b>	<b>乐器声学</b> .....	<b>82</b>
7.1	乐器的基本结构 .....	82
7.2	乐器的分类 .....	82
7.3	乐器的声学参数 .....	83
7.4	弦乐器 .....	84
7.4.1	弦的振动方式和振动频率 .....	84
7.4.2	弦的音高 .....	84
7.4.3	弦的音色 .....	85
7.4.4	弦乐器举例 .....	86
7.5	管乐器 .....	88
7.5.1	边棱音管乐器 .....	88
7.5.2	簧管乐器 .....	89
7.5.3	唇管乐器 .....	90
7.5.4	管内空气柱的振动频率 .....	90
7.5.5	管长修正 .....	91
7.5.6	木管乐器和铜管乐器简介 .....	92
7.5.7	实例分析——埙的声学原理分析 .....	93
7.6	打击乐器 .....	96
7.6.1	膜振动原理 .....	97

7.6.2	棒振动原理 .....	97
7.6.3	板振动原理 .....	98
<b>第8章</b>	<b>声乐和语音分析基础 .....</b>	<b>99</b>
8.1	发声机理 .....	99
8.1.1	发声器官的构造 .....	99
8.1.2	发声器官的声学特性 .....	100
8.2	歌唱发声 .....	102
8.3	汉语语音学 .....	103
8.3.1	汉语语音的特点 .....	103
8.3.2	声调 .....	104
8.3.3	语言频谱 .....	104
8.4	声乐与器乐的音区比较 .....	107
<b>第9章</b>	<b>噪声评价及噪声控制标准 .....</b>	<b>109</b>
9.1	噪声 .....	109
9.1.1	噪声的来源 .....	109
9.1.2	噪声的危害 .....	109
9.2	噪声评价量 .....	109
9.2.1	计权声级 .....	109
9.2.2	噪声评价曲线 .....	111
9.2.3	等效声级 .....	112
9.2.4	噪声渲染级 .....	113
9.2.5	感觉噪声级 .....	113
9.3	噪声控制标准 .....	114
9.3.1	听力保护与健康保护噪声标准 .....	114
9.3.2	环境噪声标准 .....	115
9.3.3	室内噪声标准 .....	115
9.4	吸声以及吸声降噪 .....	117
9.4.1	吸声系数 .....	118
9.4.2	常见的吸声材料 .....	118
9.4.3	吸声降噪 .....	120
9.5	隔声与隔声降噪 .....	120
9.5.1	隔声评价与隔声标准 .....	121
9.5.2	单层均匀介质的隔声 .....	122
9.5.3	双层均匀介质墙的隔声 .....	123
9.5.4	门窗的隔声 .....	124
9.6	振动控制 .....	124
9.6.1	隔振的概念 .....	124
9.6.2	隔振原理 .....	125
9.6.3	隔振装置的设计与应用 .....	126

9.6.4	振动的评价与标准 .....	127
<b>第 10 章</b>	<b>室内声学原理</b> .....	129
10.1	室内声学基本概念 .....	129
10.2	室内声场的分析方法 .....	130
10.2.1	室内声场 .....	130
10.2.2	室内几何声学方法 .....	131
10.3	室内稳态声场 .....	132
10.3.1	室内声的组成 .....	132
10.3.2	室内声场的建立和稳定过程 .....	133
10.3.3	直达声场与混响声场 .....	133
10.4	房间内声场的衰减与混响时间 .....	135
10.5	房间共振 .....	136
10.5.1	房间共振与“声染色” .....	136
10.5.2	驻波的原理 .....	137
10.5.3	房间的共振频率 .....	138
10.5.4	影响房间共振的因素 .....	140
10.6	音质设计的一般要求 .....	141
10.6.1	音质设计的一般要求 .....	141
10.6.2	室内音质设计的一般步骤 .....	142
<b>第 11 章</b>	<b>音质评价</b> .....	144
11.1	音质评价的因素和复杂性 .....	144
11.2	评价术语 .....	145
11.2.1	音质主观评价术语 .....	145
11.2.2	音质客观评价参量 .....	148
11.3	音质的主观评价方法 .....	151
11.3.1	对偶比较法 .....	151
11.3.2	系列范畴法 .....	152
11.4	客观评价与主观评价的关系 .....	156
11.5	影视节目的音质评价问题 .....	156
11.6	电声产品质量的主观评价 .....	160
<b>参考文献</b>	.....	163

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 人类生活在声音世界

人类生活在声音的世界里，声音无所不在。我们周围存在着各种各样的声音，如雷鸣声、山间小溪潺潺的流水声、小鸟唧唧喳喳的叫声、海浪的波涛声、火车轮船的汽笛声、商场闹市的嘈杂声、人们交谈的言语声、音乐厅里悠扬的小提琴声……总体上来说，声音可分为语言声、音乐声、自然声和噪声四大类。声音在人类的生产、生活当中发挥着极其重要的作用。例如，人类利用声音来表达交流思想感情；动物依靠声音来寻找食物、求偶、发出警告等，典型例子是猫头鹰、蝙蝠等。从诞生开始，人类就生活在一个充满各种声音、各种声学现象的环境当中。我们经常用“一片寂静”来形容无生命的活动，这说明声音和我们的生命活动是息息相关的。声音也常常被赋予一定的感情色彩，唐代诗人张继在《枫桥夜泊》中写到：

月落乌啼霜满天，  
江枫渔火对愁眠。  
姑苏城外寒山寺，  
夜半钟声到客船。

这是一首脍炙人口的古诗，我们除了被诗人所描写的这种有些许凄凉、宁静的静态画面所感染之外，仿佛还听到了夜半时分远方寺庙传来的钟声，声声入耳。整首诗动中有静，静中有动，给人以艺术上美的享受。但是很多人都忽略了其中所蕴涵的声学原理，为什么深夜时远处的钟声听起来要比白天清晰得多呢？这是因为声音的传播与温度有关，夜晚空气温度随高度呈现负梯度变化，也就是说地表附近的空气温度低，而地表上方的空气温度高，因而导致声线向地面弯曲，如图 1-1 所示，使声音更易于传播到远方。

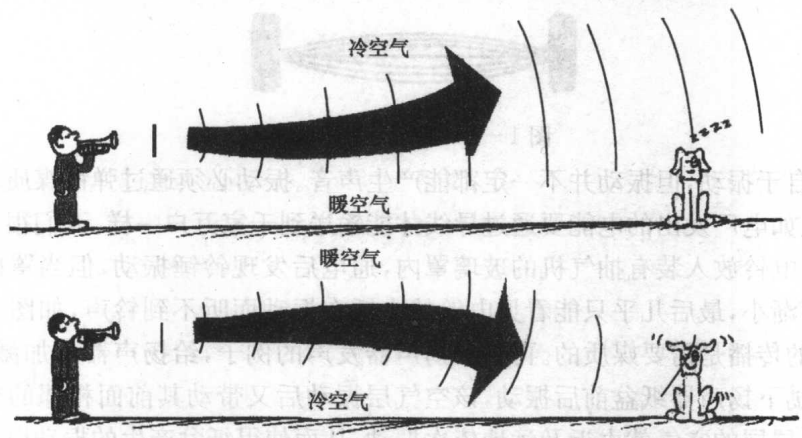


图 1-1 声音传播与温度关系示意图

此外还有两句人们都比较熟悉的歌词“南屏晚钟，随风飘送”，也是隐含着相应的声学原理。为什么感觉钟声是随风飘送的呢？因为声音的传播速度与媒质的相对速度有关，文学和艺术作品中的声音也必须符合物理规律，这样才会有真实感和艺术感染力。

除利用声音进行交流外，还可利用声音为人类服务，例如医用超声诊断、水下利用声波定位导航等。近年来在自然和人工景观的设计中也提出了声音景观设计的理念，而且在生态学范畴内出现了声景生态学的分支。在2008年奥运会的场馆设计和规划中首次引入了声音景观设计的概念，特别是对奥运公园的声音景观设计从物理、人文、科技和文化几个不同的侧面进行了探讨。声音所具有的自然属性和与人类及生命活动息息相关的特点，使得声音在生态学的研究和实践中也越来越受到重视。

## 1.2 声 音

谈到声学——以声音作为工作的对象或媒介，首先要搞清以下几个问题。

### 1.2.1 声音是什么

谈到声学，首先需要讲讲什么是声音。声，实际上有双重的含义，我们一般理解，人的耳朵能够感觉到的空气质点的振动和这种振动在空气中的传播称为声；但是从物理学的角度来讲，声是指在任何弹性介质中传播的扰动，是一种机械波，从这个概念上讲，声的研究领域很广泛。而所谓的扰动是指在空气、固体或液体中密度、压力或者是速度的一个微小变化，这个变化在连续的弹性体中就会传播出去。值得注意的是，传播出去的是能量，弹性物质本身并不会传播，也就是说声音就是能量的传递。从这个概念出发，只要在弹性介质中存在一个扰动，就会产生声，所以声学研究的范畴相当宽。

举个例子，如图1-2所示，我们把一根弦两端固定，用手将弦拉离其原先位置，再放手。可以看见整根弦振动起来，振动的同时发出声音，当弦停止振动后声音停止。由此可得出结论，发声的物体都在振动，声音是由物体的振动产生的。



图 1-2 弦上下振动发声

声音来自于振动，但振动并不一定都能产生声音。振动必须通过弹性媒质才能将声音传播出去，正如电厂发出的电能要通过导线才能输送到千家万户一样。人们很早就做过一个实验：将一电铃放入装有抽气机的玻璃罩内，通电后发现铃锤振动，但当罩内空气逐渐抽出后，铃声渐小，最后几乎只能看见电铃的小锤在振动而听不到铃声，如图1-3所示。这说明声音的传播是需要媒质的。再举个扬声器发声的例子，给扬声器外加激励信号，在电信号的激励下扬声器纸盆前后振动，该空气层振动后又带动其前面相邻的空气层一起振动，这样一层层的空气就由近及远地依次振动，从而使得纸盆产生的振动以一定的速度传播出去。值得注意的是，当声音在媒质中向各个方向传播时，媒质本身并不随着声音一起传播出去，它只是在平衡位置附近来回振动。就好像在水中投一石块，水面上就产生一圈圈向外扩散的水波，观察落在水面上的树叶，可以看到树叶只是在原来位置上下波动，

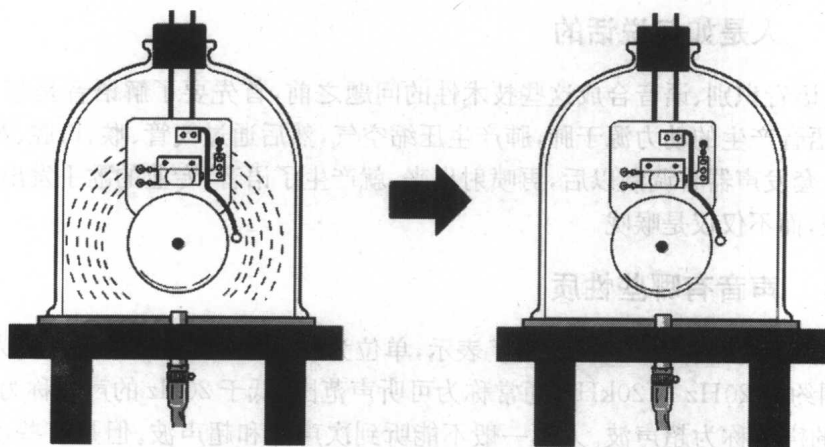


图 1-3 电铃振动

并不会随水波的扩散而向外飘动。

简言之,物体围绕它的平衡位置的往复运动叫做振动,而振动在连续介质中的传播就产生声音。因此声波有两个基本要素:

- (1) 声源,即振动的物体。
- (2) 声波赖以传播的介质,这种介质可以是固体、液体或气体。

声波的振动幅度很小,在介质中引起的扰动也很小。繁华大街上,声音引起的空气粒子的振动速度不过  $0.24\text{cm/s}$ ,如果在水介质中产生同样强的声音,水中声波的振动速度只有  $6.66 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ 。与一般的机械振动相比,声波只是一种微扰。

### 1.2.2 声音是怎么传播的

从一个扬声器或一个人嘴里发出的声音传到另一个人的耳朵的这个过程,并不是仅沿一根直线传播过去这么简单。如图 1-4 所示,它实际上有各种各样的传播路径,从地面、天花板反射过去,从四周的墙反射过去,在四周的墙面之间经过多次反射传到人耳……像这样的一个复杂的环境,声波传到人的耳朵,无论是时域波形还是其频谱结构发生的变化都非常大,因此就需要研究声波经过不同路径的传播到底变成了什么样。如果不能研究清楚,建造了一个音质效果很糟的厅堂,很可能在一边讲话,另一边听到的声音很响,但并不能听懂说话人说的什么意思,传播的效果就无法控制,所以需要先认识声波是怎么传播的,以及声波传播的规律。

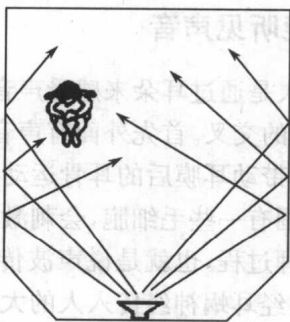


图 1-4 声波传播路径示意图

### 1.2.3 人是如何说话的

在研究语音识别、语音合成这些技术性的问题之前,首先要了解语音是怎么产生的。我们知道,语音产生的动力源于肺,肺产生压缩空气,然后通过气管、喉、口腔、鼻腔、牙齿、嘴唇等这一套发声器官调制以后,再喷射出来,就产生了语音。专业的歌手发出乐音时,还要使用胸腔,而不仅仅是喉咙。

### 1.2.4 声音有哪些性质

频率是声源每秒振动的次数,用  $f$  表示,单位为赫(Hz)。具有正常听力的人耳感觉到的频率范围约为 20Hz ~ 20kHz,通常称为可听声范围。低于 20Hz 的声波称为次声波,高于 20kHz 的声波称为超声波。人耳一般不能听到次声波和超声波。但是有些动物的听觉比人还要灵敏,如老鼠可以听到只有几赫的次声波,蝙蝠能听到 20kHz 以上的超声波。

周期是指声源振动 1 次所需的时间,用  $T$  表示,单位为秒(s)。周期和频率的关系为

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

波长是声源振动一个周期声波传播的距离,用  $\lambda$  表示,单位为米(m)。

声速是指单位时间内声波的传播距离,用  $c$  来表示,单位为米 / 秒(m/s)。它与频率、周期、波长的关系为

$$c = \lambda \cdot f = \lambda/T \quad (1-2)$$

空气中声音的传播速度在标准大气压下是温度的函数。当温度为 20℃ 时,声速为 344 m/s。在空气中通常温度每增加 1℃,声速约增加 0.6 m/s。它与温度的关系为

$$c = 331.4 + 0.607t \quad (1-3)$$

式中, $t$  为摄氏温度(℃)。

由式(1-3)看出,声波在不同的材料和流体中的速度各不相同。

声波在传播过程中遇到障碍物时会发生反射和衍射,障碍物的尺寸与声波波长的相对大小对声波传播的影响很大。例如直径为 25cm 的一根柱子,对 100Hz 声波的传播没什么影响,因为其波长为 3.4m,比柱子的直径大得多,但对 1000Hz 声波的传播影响很大,因为其波长为 34cm,与柱子的直径差得不多,此时衍射效应比较明显。

声波在向前传播的过程中,入射到一定材料的表面时,总会有一部分声能被反射,一部分声能被材料层所吸收,还有一部分能量要透过该材料层,在材料的另一侧继续传播。因此,声波在传播的过程中还会发生折射、透射等现象。

### 1.2.5 人的耳朵怎么能听见声音

人的耳朵怎么能听见声音?人是通过耳朵来感受声音的,有关听觉产生的机理包括物理学、生理学、心理学等几个学科的交叉。首先外面有声音进入到耳朵里来,通过外耳道传到鼓膜,然后在鼓膜上产生响应,带动耳膜后的耳骨运动,这是一个物理过程。耳骨的运动在耳蜗中产生一个响应,耳蜗周围有一些毛细胞,会刺激里面的皮层,然后产生电响应,到了这样的层次,就变成了一个生理过程,也就是说声波传播到了耳蜗,就属于生理声学研究的范畴。声信号变成了电信号,经耳蜗神经传入人的大脑,就会产生听觉响应,这就属于心理声学研究的范畴。所以听觉产生的机制是从物理的到生理的,然后再到心理的一个过

程,是交叉性非常强的一个学科。

### 1.2.6 声音是如何接收的

要研究声波的接收,首先要研究听觉产生的机理,这涉及物理、生理和心理声学三大范畴。此外,在很多场合,声波的接收不是用耳朵,而是用传声器。这就需要了解怎么样把声信号转变成电信号,利用什么样的材料才会产生由声信号到电信号的这种变化,以及采用什么样的结构才能够有效地实现这种变化,这又涉及电声学的内容。

本书内容就是围绕着前面提及的几个核心问题展开的,力图用最通俗的语言阐述相关声学现象的原理以及规律,为从事音响以及相关工作的人员提供必要的声学基础知识。

## 1.3 声学的发展史

声学发展的历史源远流长,声学的系统研究与人类对声音机理的认识是相连的,声音是人类最早研究的物理现象之一。世界上最早的声学研究工作主要在音乐方面。《吕氏春秋》记载,黄帝令伶伦取竹作律,增损长短成十二律;伏羲作琴,三分损益成十三音。三分损益法就是把一个振动体(例如弦)在长度上均分为三段,舍其三分之一,取其三分之二,称为“三分损一”;同样三段,加其三分之一,成为四分之三,称为“三分益一”。振动体三分损一后所发之音比原长所发之音高纯五度,三分益一后所发之音比原长所发之音低纯四度,这样听起来都很和谐,这是最早的声学定律。相传古希腊的毕达哥拉斯(Pythagoras,约公元前 584—公元前 497) 经过铁匠铺,注意到铁锤落到铁砧上发出的音与锤的重量有关,因而提出了乐音谐和性的规律。亚里士多德(Aristotle,约公元前 384—公元前 322) 也曾提出空气的运动构成声音的构想。欧洲一般把亚里士多德当作波动理论的创始人。

古代对声本质的认识与今天的声学理论很接近。在东西方,都认为声音是由物体运动产生的,在空气中以某种方式传到入耳,引起人的听觉。对声学的系统研究是从 17 世纪初意大利的伽利略(Galileo,1564—1642) 研究单摆周期和物体振动开始的。伽利略是近代声学的开创者。他对弦的振动及发声规律进行研究,认为音的高低取决于弦线在每秒钟内的振动次数。

声的传播问题很早就受到了关注,大约在 2000 年前,中国和西方已有人把声的传播与水面波纹相类比。1636 年,默森提出了弦线振动除基音以外还有泛音,并用听到火枪的声音与看到闪光之间的时间间隔测定了声速。后来,许多人都测量了声速。牛顿从理论上推导了声速公式,并测量了声速,对声速的理论进行了研究。

从 19 世纪开始,声学正式成为物理学的一个分支。卡拉尼(Chladni,1756—1827) 被称为“声学之父”,他用实验的方法研究了弦、竿、板的振动,观察到了“卡拉尼图”。并测定了固体及其他介质中的声速。

赫姆霍兹(Helmholtz,1821—1894) 开创了声学历史的新纪元。他在 1863 年出版的《声音的感的理论》中提出了和声的理论,至今仍是声学的基础。他指出:乐音是由空气的周期振荡引起的;乐音可以用音强、音调和音质来区分。他还用“拍”的理论解释了两音合成后听觉上的快感与频率之间的关系等。

随着声学理论的发展,声学的的应用不断扩大。17 世纪发明了汽笛。1871 年爱迪生



(Edison)发明了留声机。20世纪初,美国的赛宾(Sobine)提出了著名的混响理论,使礼堂、剧院的设计有规律可循,建筑声学内容逐渐充实,应用广泛。他对礼堂声学的研究做出了杰出贡献,奠定了室内声学的基础。

20世纪,由于电子学的发展,使用电声换能器和电子仪器设备,可以产生、接收和利用任何频率、任何波形、几乎任何强度的声波,这使声学研究的范围远非昔日可比。现代声学中最初发展的分支就是建筑声学和电声学以及相应的电声测量。之后,随着频率范围的扩展,又发展了超声学和次声学;由于手段的改善和对听觉的进一步研究,发展了生理声学和心理声学;由于对语言和通信广播的研究,发展了语言声学。

在第二次世界大战中,开始把超声技术广泛地应用到水下探测,促使水声学得到很大的发展。20世纪初以来,特别是20世纪50年代以来,全世界由于工业、交通等事业的巨大发展,出现了噪声环境污染问题,因而促进了对噪声机理、噪声控制、机械振动和冲击的研究。高速大功率机械应用日益广泛,非线性声学受到普遍重视。此外还有音乐声学、生物声学。多个分支学科的发展逐渐形成了完整的现代声学体系。

在我国古代,声学一直被视为一个重要的学科和技术门类。历代对于发声的原理、声的传播、声学的应用特别是乐器声学等方面的研究,都很有建树。根据对现存的有关古书及文物的考证可以看出,我国古代有关声学方面的知识是从制造、使用乐器开始的。早在公元前11世纪的商代,我国已能制造石磬和成套的铜铙等乐器。

我国音乐声学方面的一个突出成就就是乐器制造。最杰出的例子就是曾侯乙编钟。1978年在湖北随县出土的春秋战国时期的曾侯乙编钟,经测定距今已有2400多年。其音域的宽广,律制的完善,音准的精确,以至于工艺的精巧,都是当时世界上无可比拟的。值得一提的是,钟的形状是扁钟(椭圆钟)。在编队演奏中,圆钟的效果很不好,因为延时特别长,许多音混在一起,不成音律。在国外,钟是圆的,所以一直到19世纪,对于钟是否可以制成单独演奏乐曲的乐器还抱有怀疑态度。而我国春秋时期的钟就已经解决了这个问题。

公元前4世纪至公元前3世纪间成书的《墨经》中有大量的有关声学方面的记载,其中有一段关于利用挖地并埋缸听测地声的记录。这种方法,现代仍在使用。

我国古代在音乐声学方面最突出的贡献之一是音律学,特别是明代朱载堉在世界上首先系统地提出十二平均率。

在我国,一些古建筑中还有一些巧妙地利用声音反射、共鸣特性的设计。其中最著名的就是北京天坛的回音壁、三音石、圆丘,此外还有山西永济县的莺莺塔。

我国现代声学的研究在马大猷、汪德昭、应宗福等老一辈科学家的带领下,自20世纪50年代开始,50多年来建立了一支门类基本齐全的声学研究队伍,在近百个单位(包括大学、研究所、工业部门)中,都具有基本设备和手段。解决实际声学问题的能力达到国际水平,并为声学基础性研究做出了许多贡献。在物理声学、水声学、超声学、噪声控制、建筑声学、电声学、大气声学等领域都有突出的研究成果。在音响工程、电声技术等领域,陈通、管善群、谢兴圃等老一辈科学家是我国音响工程技术理论的奠基人和开创者,做出了重要的贡献。

## 1.4 声学的广延性

声音在宇宙中无所不在,又同时涉及主观和客观两个世界,因而具有很强的广延性,