

“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

空间声原理

谢菠荪 著



科学出版社

现代声学科学与技术丛书

空间声原理

谢菠荪 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地论述了空间声的基本原理、方法与应用,总结了国际上在该领域的研究成果和最新进展,特别是总结了作者及其课题组在该领域的研究工作。全书共 16 章,内容涵盖声场与空间听觉,各种空间声系统的原理与分析方法,包括两通路立体声、多通路水平面与空间环绕声、Ambisonics 与波场合成、双耳与虚拟听觉重放、空间声信号的检拾与合成、记录与传输、空间声客观分析与主观评价、空间声的应用等。本书最后列出大约 1000 篇参考文献,包括了该领域的主要基础论文。

本书的读者对象为从事空间声领域研究的科学工作者、研究生和技术工程师。本书能帮助他们掌握该领域的前沿技术,开展研究或技术开发工作。

图书在版编目(CIP)数据

空间声原理/谢波荪著. —北京:科学出版社, 2019.6
(现代声学科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-061210-6

I. ①空… II. ①谢… III. ①空间-声-理论 IV. ①O42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 096007 号

责任编辑:刘凤娟 田秩静 / 责任校对:彭珍珍
责任印制:吴兆东 / 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>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 6 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张: 52 1/2

字数: 1 029 000

定价: 249.00 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	邓明晰	侯朝焕	李晓东
林书玉	刘晓峻	马远良	钱梦騄
邱小军	孙 超	王威琪	王小民
谢菠荪	杨德森	杨 军	杨士莪
张海澜	张仁和	张守著	

前 言

除视觉外,听觉是人类感知外界信息的另一重要途径。人类的听觉中,除了对声音的响度、音调和音色等主观属性的感觉外,还包括对声音的空间听觉,也就是对声音空间属性或特性的主观感觉。在一定的条件下,利用声音空间属性,听觉系统可以对声源进行定位,也可以产生对周围声学环境的空间印象。

空间声的目的是重放声场的空间信息,给倾听者产生特定的空间听觉事件或感知。传统上,空间声主要应用在影院和家用声重放等文化娱乐领域。近年来,空间声应用已逐渐拓展到听觉心理和生理、室内声学设计、通信、互联网与计算机、多媒体与虚拟现实、医学等科学研究及工程技术领域。

空间声已有 100 多年的发展历史。20 世纪 30 年代起,声学与电子技术的结合使空间声得到较大的发展并逐渐进入实际应用。而 90 年代初以来,计算机与数字信号处理技术的发展,更进一步推动了空间声技术的快速发展。长期以来,国际上对空间声进行了大量的基础研究与技术开发工作,已发展了多种基于不同物理和听觉原理的空间声系统与技术,许多技术也得到了广泛应用。

国内在 1958 年就开始了空间声方面的研究工作。特别是 20 世纪 70 年代中期以来,华南理工大学的课题组进行了系列性的基础与应用研究工作。2010 年以来,空间声已引起了国内研究工作者的广泛兴趣,不少研究单位已开始这方面的工作。

从科学研究的角度,现代空间声是综合了声学(物理学)、听觉心理和生理、电子技术、信号处理与计算机,甚至音乐艺术的跨学科领域。声场的物理与听觉分析是空间声的科学基础;信号处理、电子技术与各种电声设备与器件是实现空间声的技术手段。由于有明确的应用背景,空间声一直是声学、信号处理方面的热门课题,目前还在不断地发展。这既涉及基础科学研究,也涉及应用技术的开发。

在与空间听觉和空间声相关的一些专门领域,国际上已出版了一些专著,例如,Blauert(1997)的 *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*, Ahrens (2012a) 的 *Analytic Methods of Sound Field Synthesis*, Kim 和 Choi (2013) 的 *Sound Visualization and Manipulation* 等。本书作者也曾出版了专著《头相关传输函数与虚拟听觉》(中文版,2008;英文版,2013)。但全面论述空间声基本原理、方法与应用的书很少,近二十年国际上主要有 Rumsey (2001) 为音乐与录声技术专业大学生所写的教科书 *Spatial Audio*。事实上,由于空间声的内容广泛、研究历史悠久,且近年来发展很快,要写一本全面论述空间声原理与发展的书也是一件难事。

华南理工大学的谢兴甫教授曾撰写过一本中文专著《立体声原理》，1981年由科学出版社出版。该书全面论述和总结了当时（70年代末以前）国际上在空间声领域的主要研究工作，包括了空间声早期发展的主要内容，对当时国内空间声技术的发展起到了重要的作用。但该书出版至今（2018年）已37年。在这期间，特别是90年代以来，国际上对空间声的研究有很大的发展。现在的空间声无论在基本的物理、听觉原理，还是实现的技术手段方面都与70年代有很大的差别。因而也需要重新写一本论述空间声原理与发展的书。

作为《现代声学科学与技术丛书》的其中一册，本书系统地论述了空间声的基本原理、方法与应用，总结了国际上在该领域的研究成果和最新进展，特别是总结了作者和课题组在该领域的研究工作。本书侧重空间声物理与听觉原理的分析，同时希望在声场空间采样、恢复与听觉近似的理论框架上，将基于不同物理和听觉原理的空间声联系起来，这也是本书的另一个重要目的。全书分为16章，基本上概括了目前空间声领域的主要研究内容。其中第1章论述声场、空间听觉与声重放的基本原理与概念，是后面各章讨论的基础。第2章讨论两通路立体声的基本原理及相关的一些问题。第3~6章论述了各种多通路水平面和空间环绕声的原理与发展，并采用传统的分析方法对它们进行了详细的分析。第7章论述多通路环绕声信号的检拾与合成方法。第8章讨论矩阵环绕声与多通路环绕声信号的向下、向上混合问题。第9章和第10章论述声场物理分析与重构的基本原理与方法，详细讨论Ambisonics空间声重放的声场分析和波场合成声重放的基本原理。第11章论述双耳声压的准确重构，讨论双耳与虚拟听觉重放的原理与实现方法。第12章论述空间声重放的双耳声压和听觉模型分析方法。第13~15章分别论述空间声信号的记录与传输、空间声重放的声学条件、空间声的主观评价和心理声学实验等与实际应用相关的问题。最后第16章简要论述空间声的各种应用。本书的两个附录简要介绍空间声理论和实验分析所用到的一些数学工具。本书最后列出大约1000篇参考文献，包括了该领域特别是近三十年的主要基础论文。

本书的读者对象为从事空间声领域研究的科学工作者、研究生和技术工程师。希望本书能帮助他们掌握该领域的基本原理和前沿技术，开展相应的研究或技术开发工作。由于该领域具有跨学科的性质，因而阅读本书需要有一定的声学 and 信号处理方面的基础知识，在参考文献部分也列出了相关的参考书籍。

本书的出版得到国家自然科学基金（编号：11674105）和华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室项目资助。而作者及课题组多年的研究工作得到了国家自然科学基金（19974012, 10374031, 10774049, 11174087, 50938003, 11004064, 11474103, 11574090, 11104082）、教育部优秀青年教师资助计划、广州市科技计划项目（98-J-010-01, 2011DH014, 2014-Y2-00021）的资助。作者工作单位华南理工大学给予了大力的支持。

作者在多年的研究工作中,有幸得到北京邮电大学管善群教授的指导。而作者在 20 世纪 90 年代中期攻读博士学位期间,得到了同济大学王佐民研究员的指导,毕业后一直得到他的支持、鼓励和帮助。

作者的研究工作还得到课题组的钟小丽、余光正、谢志文教授,饶丹副教授,孟庆林博士,广州大学张承云副教授,以及本人指导的历届研究生的合作和支持。特别是本书写作过程中,余光正教授帮助绘制了本书的所有插图。麦海明、江建亮、易凯灵、刘路路、赵童五位博士研究生协助核对了参考文献和清样。

作者在多年的研究工作中,也得到了多位国内外同行专家不同形式的支持、鼓励和帮助,包括 Ruhr-University Bochum 的 Jens Blauert 教授; Rensselaer Polytechnic Institute 的 Ning Xiang 教授; 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室吴硕贤院士、赵越喆教授; 中国科学院声学研究所宗健、沈豪、程明昆、杨军、李晓东、颜永红、李军锋研究员; 南京大学徐柏龄、程建春、邱小军、沈勇、刘晓俊教授和卢晶副教授; 同济大学毛东兴教授、俞悟周副研究员; 华中科技大学龙长才教授; 复旦大学他得安教授; 中国科学院深圳先进技术研究院郑海荣研究员; 中国电子科技集团公司电视电声研究所范宝元、杨锦刚教授, 吴金才、钟厚琼高工; 广州大学王杰教授; 国光电器股份有限公司俞锦元高工; 原武汉无线电厂祁家堃高工; 广州迪士普音响科技有限公司王恒先生等。

丛书的执行主编程建春教授、科学出版社刘凤娟编辑为本书的出版做了大量的工作。

在此,作者向上述单位和个人表示衷心的感谢。

作者的父亲谢兴甫教授、母亲梁淑娟教授都是声学工作者。其中谢兴甫教授是《立体声原理》一书的作者。三十多年前,正是在他们的引导下,作者选择了声学作为研究领域。而 2009 年作者计划撰写本书的时候,得到了母亲的大力支持和鼓励。不幸父亲已去世多年,母亲也于 2011 年去世,在此谨以本书作为纪念。

谢菠荪

华南理工大学

Email: phbsxie@scut.edu.cn

2018 年 4 月

目 录

前言

第 1 章 声场、空间听觉与声重放	1
1.1 空间坐标系统	1
1.2 声场及其物理性质	3
1.2.1 自由场与简单的声源辐射	3
1.2.2 边界的反射	6
1.2.3 声源辐射的指向性	9
1.2.4 室内声场的统计声学分析	11
1.2.5 声波的接收	14
1.3 听觉系统与感知	18
1.3.1 听觉系统与功能	18
1.3.2 声音的听阈与响度感知	22
1.3.3 掩蔽效应	23
1.3.4 临界频带与听觉滤波器	25
1.4 人工头听觉仿真模型与双耳声信号	26
1.4.1 人工头听觉仿真模型	26
1.4.2 双耳声信号与头相关传输函数	28
1.5 空间听觉	30
1.6 单声源定位因素	32
1.6.1 双耳时间差	32
1.6.2 双耳声级差	36
1.6.3 混乱锥和动态因素	38
1.6.4 谱因素	40
1.6.5 HRTF 与方向定位因素的讨论	43
1.6.6 距离定位因素	45
1.7 多声源的合成定位与空间听觉	47
1.7.1 两扬声器定位实验	47
1.7.2 优先效应	51
1.7.3 部分相关与非相关声源信号的合成空间听觉	53
1.7.4 听觉场景分析与空间听觉	56

1.7.5 鸡尾酒会效应	57
1.8 室内反射声与听觉空间印象	58
1.8.1 听觉空间印象	58
1.8.2 室内声学参数与听觉空间印象	59
1.8.3 双耳声学参数与听觉空间印象	61
1.9 空间声的原理、分类与发展	63
1.9.1 空间声的基本原理	63
1.9.2 空间声的分类	65
1.9.3 空间声的发展与应用	66
1.10 本章小结	71
第 2 章 两通路立体声的原理	73
2.1 两通路立体声的基本原理	73
2.1.1 通路声级差与虚拟源定位公式	73
2.1.2 信号频率的影响	78
2.1.3 通路相位差的影响	79
2.1.4 通路时间差与虚拟源定位	84
2.1.5 两通路立体声原理与局限性的讨论	85
2.2 两通路立体声信号的检拾与合成	88
2.2.1 XY 检拾	89
2.2.2 MS 变换与 MS 检拾	97
2.2.3 空间传声器对检拾	105
2.2.4 近重合传声器对检拾	108
2.2.5 多个点传声器和全景电位器技术	111
2.2.6 两通路立体声信号检拾与合成的讨论	114
2.3 两通路立体声与单通路声信号的转换	116
2.4 两通路立体声重放	117
2.4.1 两通路立体声的标准扬声器布置	117
2.4.2 倾听位置前后偏移对重放虚拟源的影响	118
2.4.3 倾听位置左右偏移的影响与补偿	120
2.5 本章小结	123
第 3 章 多通路环绕声的基本原理与分析	125
3.1 多通路环绕声的物理和心理声学原理	125
3.2 多通路平面环绕声的合成定位原理与分析方法	130
3.2.1 水平面多扬声器合成虚拟源定位公式	130
3.2.2 叠加声场的速度与能量定位矢量分析	133

3.2.3	有关水平面合成虚拟源定位公式的讨论	140
3.3	多扬声器重放部分相关与非相关信号	143
3.4	本章小结	144
第 4 章	均匀扬声器布置的多通路平面环绕声	146
4.1	分立四通路环绕声的分析	147
4.1.1	四通路环绕声概述	147
4.1.2	四通路环绕声的分立-对信号馈给	148
4.1.3	四通路环绕声的一阶声场信号馈给	152
4.1.4	分立四通路环绕声的讨论	156
4.2	其他均匀扬声器布置的水平面多通路声重放	157
4.2.1	六通路重放的分立-对信号馈给	157
4.2.2	一阶声场信号馈给与水平面 $M \geq 3$ 通路重放	161
4.3	水平面声场信号变换与 Ambisonics	163
4.3.1	水平面一阶声场信号变换分析	164
4.3.2	水平面一阶 Ambisonics	168
4.3.3	水平面高阶 Ambisonics	174
4.3.4	水平面 Ambisonics 的讨论与实施	182
4.4	本章小结	185
第 5 章	非均匀扬声器布置的分立多通路平面环绕声	186
5.1	伴随图像与通用声重放系统概述	186
5.2	5.1 通路环绕声及其信号馈给分析	189
5.2.1	5.1 通路环绕声概述	189
5.2.2	5.1 通路环绕声的分立-对振幅信号馈给	190
5.2.3	5.1 通路环绕声的全局 Ambisonics 类信号馈给	196
5.2.4	前方三扬声器信号的优化与局域 Ambisonics 信号馈给	203
5.2.5	通路时间差与 5.1 通路环绕声虚拟源定位	205
5.3	其他通用的分立多通路平面环绕声系统	206
5.4	低频效果通路	210
5.5	本章小结	211
第 6 章	多通路三维空间环绕声	212
6.1	多通路三维空间环绕声的虚拟源定位分析	212
6.1.1	三维空间多扬声器的合成虚拟源定位公式	212
6.1.2	三维声场的速度与能量定位矢量分析	216
6.1.3	有关三维空间合成虚拟源定位理论的讨论	218
6.1.4	与水平面合成定位公式的关系	219

6.2	中垂面和矢状面两扬声器合成定位	222
6.3	基于振幅矢量的信号馈给	228
6.4	三维空间 Ambisonics 信号馈给与重放	230
6.4.1	三维空间 Ambisonics 的基本原理	230
6.4.2	三维空间一阶 Ambisonics 重放的例子	235
6.4.3	水平面扬声器布置和 Ambisonics 信号重放上方声音信息	238
6.5	多通路三维空间环绕声的一些发展与问题	239
6.5.1	一些多通路三维空间环绕声系统	239
6.5.2	基于目标的空间环绕声	243
6.5.3	多通路三维空间环绕声的一些问题	246
6.6	本章小结	249
第 7 章	多通路环绕声信号的检拾与合成	250
7.1	多通路环绕声信号检拾与合成的基本考虑	250
7.2	5.1 通路环绕声信号的传声器检拾技术	253
7.2.1	5.1 通路环绕声检拾技术概述	253
7.2.2	5.1 通路环绕声信号的主传声器检拾技术	253
7.2.3	前方三通路信号的传声器检拾技术	260
7.2.4	环境声信息的传声器检拾及其与定位信息的组合	265
7.2.5	附加中心通路信号的检拾	269
7.3	其他的多通路声传声器检拾技术	270
7.3.1	其他分立多通路声的传声器检拾技术	270
7.3.2	Ambisonics 信号的检拾	275
7.4	多通路环绕声虚拟源定位信号的合成	276
7.4.1	虚拟源方向定位信号的合成方法	276
7.4.2	感知虚拟源距离与扩展的控制	278
7.4.3	运动虚拟源的合成	280
7.5	立体声和多通路环绕声中反射声信息的合成	282
7.5.1	合成分立反射声的延时算法	283
7.5.2	合成后期混响的无限脉冲响应滤波器算法	287
7.5.3	合成后期混响的有限脉冲响应与混合滤波器结构算法	293
7.5.4	信号的去相关处理方法	295
7.5.5	基于物理测量或计算的合成房间反射声方法	297
7.6	多通路声信号合成的方向声频编码方法	299
7.7	本章小结	303

第 8 章 矩阵环绕声与向下、向上混合	305
8.1 矩阵环绕声系统	305
8.1.1 方形排列的矩阵四通路环绕声系统	305
8.1.2 Dolby Surround 系统	310
8.1.3 Dolby Pro-logic 逻辑解码技术	312
8.1.4 矩阵环绕声与逻辑解码技术的一些发展	314
8.2 多通路环绕声信号的向下混合	319
8.3 环绕声信号的向上混合	323
8.3.1 向上混合的基本考虑	323
8.3.2 前方通路信号的简单向上混合	324
8.3.3 环境声信息的简单提取与增强	325
8.3.4 两通路立体声信号的模型与统计特性	326
8.3.5 标度掩蔽分解方法	329
8.3.6 主成分分析分解方法	332
8.3.7 最小均方误差分解方法	338
8.3.8 时域自适应最小均方误差分解方法	340
8.3.9 更多通路的信号分解与向上混合	342
8.4 本章小结	343
第 9 章 多通路声的物理声场检拾与重构分析	344
9.1 理想重放的逐级近似与 Ambisonics	345
9.1.1 理想平面环绕声的逐级近似	345
9.1.2 理想空间环绕声的逐级近似	351
9.2 多通路声场重构及空间谱域分析方法	353
9.2.1 多通路声场重构的普遍表述	353
9.2.2 水平面圆周上次级声源阵列布置的空间谱域分析	356
9.2.3 球面次级声源阵列布置的空间谱域分析	361
9.3 Ambisonics 重构声场和驱动信号的空间谱域分析	365
9.3.1 水平面 Ambisonics 的重构声场	365
9.3.2 空间 Ambisonics 的重构声场	371
9.3.3 混合阶远场 Ambisonics	375
9.3.4 近场补偿高阶 Ambisonics	376
9.3.5 复杂声源信息的 Ambisonics 编码	384
9.3.6 Ambisonics 空间谱域分析的一些特殊应用	387
9.4 有关 Ambisonics 的一些问题	389
9.4.1 Ambisonics 的次级声源布置与稳定性	389

9.4.2	Ambisonics 声场的空间变换	394
9.5	Ambisonics 重构声场的误差分析	398
9.5.1	Ambisonics 重构声场的积分波阵面误差	398
9.5.2	Ambisonics 次级声源阵列布置的空间谱混叠	402
9.6	多通路重构声场的空间域分析	404
9.6.1	空间域分析的基本方法	404
9.6.2	重构声场的误差与虚拟源合成定位公式	405
9.6.3	多通路重构声场的空间域多场点控制方法	408
9.7	多通路声重放中室内反射的消除	414
9.8	多通路环绕声信号的传声器阵列检拾	416
9.8.1	水平面 Ambisonics 信号的环形传声器阵列检拾	417
9.8.2	空间 Ambisonics 信号的球形传声器阵列检拾	419
9.8.3	有关传声器阵列检拾的讨论	422
9.9	本章小结	425
第 10 章	波场合成声重放系统	427
10.1	波场合成的基本原理与实现	427
10.1.1	基尔霍夫-亥姆霍兹积分与波场合成	427
10.1.2	次级声源类型的简化	430
10.1.3	水平面波场合成与直线形次级声源阵列布置	432
10.1.4	有限长次级声源阵列与空间截断效应	436
10.1.5	分立次级声源布置与空间混叠	437
10.1.6	水平面波场合成系统的实施及相关的问题	440
10.2	波场合成的严格理论	442
10.2.1	亥姆霍兹方程的格林函数	443
10.2.2	三维空间波场合成的严格理论	446
10.2.3	二维空间波场合成的严格理论	450
10.2.4	聚焦虚拟声源的合成	454
10.3	波场合成的重构声场分析	458
10.3.1	波场合成声场的普遍表述与空间谱域分析	458
10.3.2	波场合成的空间混叠分析	461
10.3.3	波场合成与空间谱相除法	466
10.4	声场重构方法的进一步讨论	468
10.4.1	不同声场重构方法之间的关系与比较	468
10.4.2	声全息与重构声场的进一步分析	470
10.4.3	声全息重放与 Ambisonics 关系的进一步分析	475

10.4.4 波场合成与 Ambisonics 比较	477
10.5 非理想条件下波场合成的均衡处理	480
10.6 本章小结	482
第 11 章 双耳与虚拟听觉重放	484
11.1 双耳与虚拟听觉重放的基本原理	484
11.1.1 双耳检拾和重放	484
11.1.2 虚拟听觉重放	486
11.2 HRTF 的获取	488
11.2.1 HRTF 的测量	488
11.2.2 HRTF 的计算	491
11.2.3 HRTF 的定制	493
11.3 HRTF 的基本物理特性	494
11.3.1 远场 HRIR 的时域特性	494
11.3.2 远场 HRTF 的频域特性	495
11.3.3 近场 HRTF 的特性	498
11.4 HRTF 信号处理滤波器的设计	498
11.5 HRTF 空间插值与基函数分解	501
11.5.1 HRTF 空间插值	501
11.5.2 HRTF 的空间基函数分解与空间采样理论	503
11.5.3 HRTF 空间插值与多通路声信号馈给	507
11.5.4 HRTF 谱形状基函数分解与主成分分析	512
11.6 双耳合成虚拟源信号处理的简化	514
11.6.1 虚拟扬声器方法	515
11.6.2 基函数线性分解方法	518
11.7 耳机-外耳传输特性均衡	520
11.7.1 耳机-外耳传输特性均衡的基本原理	520
11.7.2 耳机双耳和虚拟听觉重放的问题	525
11.8 双耳声信号的扬声器重放	527
11.8.1 扬声器重放双耳声信号的基本原理	527
11.8.2 两扬声器重放虚拟源的范围	530
11.8.3 头部运动与扬声器重放虚拟源的稳定性	532
11.8.4 扬声器重放的音色改变与均衡处理	533
11.9 立体声和多通路环绕声的虚拟重放	535
11.9.1 立体声和多通路环绕声的双耳重放	535
11.9.2 立体声虚拟源分布的扩展	539

11.9.3 多通路环绕声的扬声器虚拟重放	541
11.10 虚拟听觉环境与动态实时绘制系统	545
11.10.1 室内反射声的双耳模拟	545
11.10.2 动态实时绘制系统	546
11.11 本章小结	549
第 12 章 空间声重放的双耳声压和听觉模型分析	551
12.1 合成虚拟源与听觉事件的双耳声压物理分析	551
12.1.1 双耳声压及定位因素的计算	551
12.1.2 合成定位的分析方法	556
12.1.3 声级差型立体声和多通路环绕声的双耳声压分析	558
12.1.4 时间差型立体声的合成定位分析	564
12.1.5 非中心倾听位置的合成定位分析	567
12.1.6 通路信号相关性与空间听觉事件的分析	572
12.2 双耳听觉模型与空间声重放分析	575
12.2.1 虚拟源侧向定位模型与分析	576
12.2.2 虚拟源垂直与前后定位模型分析	579
12.2.3 双耳响度模型与空间声重放的音色分析	581
12.3 声重放双耳声信号的测量与分析	586
12.4 本章小结	587
第 13 章 空间声信号的记录与传输	588
13.1 声频信号的模拟记录与传输	589
13.1.1 45°/45° 盘式记录	589
13.1.2 磁性模拟记录	591
13.1.3 模拟立体声广播	591
13.2 数字声频信号记录与传输的基本概念	593
13.3 量化噪声及其整形	596
13.3.1 量化信噪比	596
13.3.2 量化噪声整形与 1 bit DSD 编码	597
13.4 数字声频信号压缩编码的基本原理	600
13.4.1 数字声频信号压缩编码概述	600
13.4.2 自适应差分脉冲编码调制	602
13.4.3 时-频域感知压缩编码	604
13.4.4 矢量量化	608
13.4.5 空间声频编码	609
13.4.6 谱带复制	611

13.4.7 熵编码	611
13.4.8 基于目标的声频编码	612
13.5 MPEG 系列压缩编码标准	613
13.5.1 MPEG-1 压缩编码	613
13.5.2 MPEG-2 BC 压缩编码	616
13.5.3 MPEG-2 AAC 压缩编码	618
13.5.4 MPEG-4 编码	621
13.5.5 MPEG 参数化空间声与联合语言、声频编码	622
13.5.6 MPEG-H 3D 声频标准	626
13.6 Dolby 系列的压缩编码技术	630
13.6.1 Dolby Digital 压缩编码技术	630
13.6.2 Dolby 压缩编码技术的扩展	634
13.7 DTS 系列压缩编码技术	638
13.8 MLP 无损压缩编码技术	641
13.9 ATRAC 压缩编码技术	643
13.10 中国声频信号压缩编码技术与标准	644
13.11 声频信号的光盘记录	646
13.11.1 光盘的结构、存储原理与分类	646
13.11.2 CD 及其声频格式	648
13.11.3 DVD 及其声频格式	651
13.11.4 SACD 及其声频格式	655
13.11.5 蓝光光盘及其声频格式	655
13.12 数字声音广播与数字电视的声音	657
13.12.1 数字声音广播与数字电视声音概述	657
13.12.2 Eureka-147 数字声频广播	658
13.12.3 数字调幅广播	660
13.12.4 带内同频广播	661
13.12.5 数字电视的声音	661
13.13 声频信号的计算机记录与传输	662
13.14 本章小结	663
第 14 章 空间声重放的声学条件	665
14.1 空间声重放的声学条件概述	665
14.2 听音室的声学设计与考虑	666
14.3 扬声器布置与特性	669
14.3.1 听音室内主扬声器的布置	669

14.3.2	主扬声器特性	671
14.3.3	低频管理与次低频扬声器的布置	672
14.4	信号电平与监听声级的校准	675
14.5	空间声重放条件的标准或指引	677
14.6	空间声重放的耳机与双耳虚拟监听	682
14.7	影院空间声重放的声学条件与设计	682
14.8	本章小结	686
第 15 章	空间声主观评价和心理声学实验	688
15.1	空间声主观评价的心理声学实验概述	688
15.2	空间声主观评价的内容与属性	692
15.3	主观对比与选择实验评价	695
15.3.1	主观对比与选择实验及其分析方法	695
15.3.2	主观对比与选择实验的例子	697
15.4	高质量空间声系统小质量损伤的定量评价方法	698
15.5	中等质量空间声系统的定量评价方法	700
15.6	虚拟源定位实验	702
15.6.1	虚拟源定位实验的基本方法	702
15.6.2	虚拟源定位实验结果的初步分析	703
15.6.3	虚拟源定位实验的一些结果	706
15.7	本章小结	708
第 16 章	空间声的应用及相关的问题	710
16.1	商用影院、家用和汽车内的空间声重放应用	710
16.1.1	空间声在商用影院的应用及相关问题	710
16.1.2	空间声在家用重放的应用及相关问题	715
16.1.3	汽车内的空间声重放及相关问题	718
16.2	虚拟现实、通信、多媒体和移动播放设备的应用	719
16.2.1	虚拟现实的应用	719
16.2.2	通信与信息系统的應用	721
16.2.3	多媒体的应用	723
16.2.4	移动和手持产品应用	724
16.3	空间听觉与心理声学科学实验的应用	725
16.4	声场可听化的应用	728
16.4.1	室内声场的可听化	728
16.4.2	可听化技术的其他应用	731
16.5	空间声在医学的应用	732