

数字音频

原理与检测技术

Shuzi Yinpin Yuanli yu Jiance Jishu

国家广播电视产品质量监督检验中心
中国电子科技集团公司第三研究所 编
中国电子音响工业协会

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

数字音频原理与检测技术

国家广播电视产品质量监督检验中心

中国电子科技集团公司第三研究所

中国电子音响工业协会

编

人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

数字音频原理与检测技术 / 国家广播电视产品质量
监督检验中心, 中国电子科技集团公司第三研究所, 中国
电子音响工业协会编. -- 北京: 人民邮电出版社,
2015. 1

ISBN 978-7-115-35577-5

I. ①数… II. ①国… ②中… ③中… III. ①数字音
频技术—理论②数字音频技术—检测 IV. ①TN912.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第165337号

内 容 简 介

本书介绍了声学技术的经典理论, 电声换能器件的原理, 音频信号的压缩编码、解码原理, 数字音频工
程技术原理, 检测技术原理等内容, 可以帮助数字音频工程技术人员和检测人员提高业务素质和技术水平。

本书适合数字音频行业从事数字音频研发、设计、生产制造、质量检测、标准制定的科技人员阅读。

-
- ◆ 编 国家广播电视产品质量监督检验中心
中国电子科技集团公司第三研究所
中国电子音响工业协会
- 责任编辑 张 鹏
责任印制 程彦红
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京鑫正大印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16 彩插: 2
印张: 25.25 2015 年 1 月第 1 版
字数: 624 千字 2015 年 1 月北京第 1 次印刷
-

定价: 78.00 元

读者服务热线: (010)81055410 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

编委会

主任：李兆利

副主任：陈科 李华 周海燕 曲晓杰 陈立新 刘志刚 谢于迪

特邀顾问：刘宪坤 李桂苓 董二生 刘全恩 安永成

编委会成员：（排名不分先后）

曹玉雯 韩捷 姜波 程进 冯杰 黄川 张萍

阮卫泓 孙三 潘榕 张坡 尤国雷 戴璐 刘芳

徐文学 王中 彭泓 吴蔚华 何翔

封面题字：刘宪坤

主 编：陈 科

副主编：韩 捷 程 进 黄 川 戴 璐 潘 榕

孙 三 姜 波

本书各章主要编写者及审稿者

章号	章名	主要编写者	主要审稿者
第 1 章	声学基础知识	曹玉雯	韩捷
第 2 章	电声换能器	姜波	韩捷
		程进	冯杰
第 3 章	数字音频处理技术	黄川	张萍
第 4 章	音频压缩编、解码	陈科	李桂苓
第 5 章	数字音频接口	黄川	阮卫泓
第 6 章	多声道环绕声技术	孙三	刘宪坤
第 7 章	电声换能器标准与检测	尤国雷 张坡	姜波
第 8 章	音频设备标准与检测	潘榕	刘全恩 阮卫泓
第 9 章	音频工程系统标准与检测	戴璐 刘芳	徐文学
第 10 章	声音质量评价	黄川 韩捷	董二生
第 11 章	我国音响行业发展现状及发展思路	王中 彭泓	谢于迪

前言

数字技术是电子技术领域的一场革命，它逐渐取代了传统的模拟技术，使电子技术发生了翻天覆地的变化。同样，数字技术在音频工程中的广泛应用，使音频技术以崭新的面貌呈现在人们面前。使用数字音频技术便于对信号进行处理、控制和管理，也便于存储和复制。数字音频技术可广泛应用在通信、音频广播、音响工程、场馆建设、消费电子等国民经济的各个领域，正在对国民经济各个领域的发展产生深远影响。

当前，数字音频技术发展迅速，各种新型数字音频设备、换能器件不断出现，并发生了日新月异的变化。高品质、多声道、高效率编码、器件微型化、传输网络化、处理技术软件化等已成为今后数字音频技术的发展方向。

随着数字音频技术的发展，音频工程行业广大技术人员急需一本系统介绍声学技术原理，数字音频原理及检测技术的专著，根据数字音频技术的发展趋势，介绍声学技术的经典理论，电声换能器件原理，音频信号的压缩编、解码原理，数字音频工程技术原理、检测技术原理等，提高数字音频工程技术人员和检测人员的业务素质和技术水平。为此，国家广播电视产品质量监督检验中心、中国电子科技集团公司第三研究所、中国电子音响协会，组织行业有关专家、工程技术人员，共同编写了这本《数字音频原理与检测技术》，希望能对数字音频产品的研发、生产、检测和教学有所帮助。

本书共分3个部分11章。第一部分声学原理，共分两章，第1章声学基础知识，介绍声学发展简史、声学名词术语、声波基本性质、声辐射原理、听觉系统等，对声学工程的经典原理进行了系统分析与介绍；第2章介绍电声换能器原理，包括电力声类比、有限元分析、各种不同类型的传声器原理和扬声器原理等。第二部分音频信号处理，共分4章，是本书的重点，分别介绍了数字音频处理技术，音频压缩编、解码原理及国内外音频编、解码标准，各种不同类型的数字音频接口，多声道数字环绕声技术等，对数字音频信号处理技术中的基本原理、各种不同方式的信号处理技术，例如压扩、均衡、延时、混响、降噪等，进行了系统分析，介绍了MPEG系列音频标准、杜比AC-3、DRA、AVS及数字音频信号解码原理等。第三部分电声学和音频检测，介绍音频和声频检测技术。其中第7章电声换能器标准与检测介绍电声学测量条件及声学测量仪器，传声器、扬声器、头戴耳机主要性能参数的测量；第8章音频设备标准与检测介绍了国内外音频相关测量标准、音频设备测量的基本原理和方法；第9章音频工程系统标准与检测介绍建筑声学检测和厅堂扩声系统检测以及标准测量条件、测量项目、测量仪器、测量点的选择及测量方法等；第10章声音质量评价，介绍音质主观评价、音质客观评价、客观质量评价的结构，感知模型、扬声器听音试验标准、扩声系统工程主观听音评价方法等；第11章介绍了我国音响行业发展现状和发展的思路。附录给出本书使用的主要缩略语。

参加本书编写的人员大多是多年从事数字音响工程技术研究、设计、制造、检测、标准制定的专家和工程技术人员。本书不仅对音频技术的经典理论进行了权威论述，并对数字音频工程的设计、技术标准的制定原则、检测技术的经验进行了系统总结，反映了当前数字音

频工程技术的最新成果，可作为指导数字音频工程设计、制造、检测人员的参考资料。本书的编写得到了天津大学电子信息工程学院李桂苓教授，国家广播电视产品质量监督检验中心专家办公室刘宪坤教授、董二生高级工程师、刘全恩高级工程师、安永成教授以及中国电子音响工业协会的大力支持与帮助。刘宪坤教授特为本书题写了书名，在此一并表示感谢。

本书内容新颖、翔实，全面系统地讲述了数字音频的原理和检测技术。全书编写力求深入浅出，通俗易懂，图文并茂，突出实用性。本书适合数字音频行业从事数字音频研发、设计、生产制造、质量检测、标准制定的科技人员阅读，也可作为大中专院校、职业技术学院电子消费类专业的教学参考书，广大音响发烧友阅读本书也会有所收获。

由于编写者水平有限，加之编写时间仓促，书中不妥之处在所难免。希望本书能起到抛砖引玉的作用，有更多的同仁参与讨论，提出宝贵的修改意见，以便本书再版时修订。

国家广播电视产品质量监督检验中心
中国电子科技集团公司第三研究所
中国电子音响工业协会

目录

第一部分 声学原理	1
第1章 声学基础知识	1
1.1 概述	1
1.1.1 声学简史	1
1.1.2 声学的重要概念	2
1.2 声波的基本性质	6
1.2.1 概述	6
1.2.2 波动方程	6
1.2.3 波动方程的解	7
1.2.4 声波的干涉和叠加	8
1.3 声波辐射	9
1.3.1 脉动球源与点声源	9
1.3.2 偶极声源	13
1.3.3 无限大障板上的活塞辐射	16
1.4 听觉简介	22
1.4.1 听觉系统简介	22
1.4.2 音调	23
1.4.3 响度和响度级	23
1.4.4 掩蔽	25
1.4.5 声音的辨别	25
参考文献	25
第2章 电声换能器	26
2.1 概述	26
2.2 电力声类比	27
2.2.1 电路互易法则	27
2.2.2 力学系统类比	28
2.2.3 声学系统类比	30
2.2.4 电力声类比	32
2.3 有限元法分析	33
2.3.1 方法介绍	33

2.3.2 仿真软件	36
2.4 传声器	38
2.4.1 概述	38
2.4.2 传声器等效电路	39
2.4.3 动圈传声器	41
2.4.4 电容传声器	42
2.4.5 骨导传声器	45
2.4.6 光纤传声器	48
2.4.7 压电传声器	53
2.4.8 MEMS 微传声器	54
2.4.9 传声器小结	58
2.4.10 传声器阵列原理	58
2.4.11 传声器阵列典型应用	60
2.5 扬声器	61
2.5.1 概述	61
2.5.2 扬声器分类	63
2.5.3 锥形扬声器	65
2.5.4 球顶式扬声器	67
2.5.5 号筒扬声器	67
2.5.6 其他类型扬声器	69
2.5.7 T/S 参数	72
2.5.8 扬声器系统	74
2.5.9 线阵列扬声器系统	81
2.5.10 参量阵扬声器	82
2.5.11 微型扬声器系统	88
参考文献	90
第二部分 音频信号处理	91
第 3 章 数字音频处理技术	91
3.1 ADC 与 DAC	91
3.1.1 模拟与数字信号	91
3.1.2 采样与混叠	91
3.1.3 采样定理	92
3.1.4 混叠	92
3.1.5 量化及量化误差	93
3.1.6 过采样和 Σ - Δ 转换器	96
3.1.7 小结	99

3.2 数字音频信号电平	99
3.3 数字音频设备互连	99
3.3.1 阻抗匹配	99
3.3.2 数据宽度的差异	100
3.3.3 满刻度电平的不同	100
3.3.4 时钟及抖动	101
3.4 数字音频处理的基本原理	102
3.5 压扩	102
3.6 滤波	103
3.6.1 数字滤波器的基本结构	104
3.6.2 IIR 滤波器	104
3.6.3 FIR 滤波器	106
3.6.4 数字滤波器的设计	108
3.6.5 数字滤波器的应用	110
3.7 均衡	111
3.8 延时、回声与混响	111
3.8.1 延时	111
3.8.2 回声和混响	111
3.9 变调	113
3.10 变速	113
3.11 降噪	114
3.11.1 噪声抵消法	114
3.11.2 自适应滤波法	115
参考文献	117
第 4 章 音频压缩编解码	118
4.1 数字音频信号编码基础	118
4.1.1 高质量数字音频	118
4.1.2 数字音频压缩编码的主要标准	118
4.1.3 感知压缩编码	119
4.1.4 心理声学——听觉阈值和掩蔽	120
4.1.5 心理声学模型的计算	125
4.2 MPEG-1 Layer 2 音频信号编码	136
4.2.1 主体结构	136
4.2.2 分析滤波器	136
4.2.3 比例因子	139
4.2.4 Layer 2 心理声学模型	139
4.2.5 比特分配和量化	140

4.3	MPEG-1 Layer 3 音频信号编码	142
4.3.1	混合滤波器组	144
4.3.2	Layer 3 心理声学模型	146
4.3.3	量化和频域系数编码	148
4.4	MPEG-AAC 音频信号编码	153
4.4.1	概述	153
4.4.2	主要特征	154
4.5	MPEG-2 多声道音频编码	157
4.6	杜比 AC-3 音频信号编码	159
4.6.1	概述	159
4.6.2	分析滤波器组	160
4.6.3	指数编码	161
4.6.4	比特分配	162
4.6.5	声道耦合	163
4.6.6	尾数量化及编码帧形成	165
4.7	DTS	165
4.7.1	编码过程	166
4.7.2	解码过程	167
4.8	DRA 音频信号编码	167
4.9	AVS 音频信号编码	168
4.9.1	AVS-P3 编码	168
4.9.2	AVS-P3 中的关键技术	169
4.10	感知音频编码方案的比较	172
4.11	MPEG-1 Layer 2 解码	176
	参考文献	176
第 5 章 数字音频接口		178
5.1	消费类数字音频接口	178
5.1.1	TOSLINK 光纤接口	178
5.1.2	RCA 同轴电缆	178
5.1.3	HDMI	179
5.1.4	DP 接口	180
5.2	专业类数字音频接口	181
5.2.1	AES3 接口	181
5.2.2	AES10 接口	188
5.2.3	ADAT 接口	189
5.2.4	其他相关标准	190
5.2.5	SDI	192

5.3 通用数据接口	193
5.3.1 USB	194
5.3.2 网络接口	197
参考文献	203
第6章 多声道环绕声技术	204
6.1 多声道环绕声的发展概况	204
6.1.1 电影多声道环绕声的发展史	204
6.1.2 音乐多声道环绕声的发展史	206
6.2 声像定位	207
6.2.1 基本的声像定位原理	207
6.2.2 多声道的声像定位效果	208
6.2.3 声像定位、空间感及环绕感	209
6.3 多声道环绕声制作	210
6.4 无损编码	216
6.4.1 MLP 无损压缩	217
6.4.2 MLP 编码过程	217
6.4.3 MLP 解码	219
6.5 环绕声重放系统和监听	220
6.5.1 环绕声重放系统原理	220
6.5.2 HRTF 与环绕声重放	221
6.5.3 常见的环绕声重放系统	223
6.5.4 监听	229
6.6 虚拟环绕声	237
6.6.1 虚拟环绕声分类	237
6.6.2 虚拟环绕声系统的稳定性	239
6.7 多声道环绕声的未来发展	240
6.7.1 综述	240
6.7.2 关于 22.2 声道音频格式	240
6.7.3 声学 and 音频技术标准化组织	242
6.7.4 22.2 声道音频格式的标准化现状	243
参考文献	246
第三部分 电声学和音频检测	247
第7章 电声换能器标准与检测	247
7.1 电声换能器检测基础	247
7.1.1 电声换能器标准	247

7.1.2	基本概念	248
7.1.3	测量声学环境	249
7.1.4	测量仪器	251
7.1.5	测量信号	253
7.2	传声器测量	255
7.2.1	概述	255
7.2.2	传声器灵敏度	256
7.2.3	传声器频率响应	261
7.2.4	传声器指向性	263
7.2.5	传声器的输出阻抗	265
7.2.6	传声器的等效噪声	266
7.2.7	传声器测量实例	266
7.3	扬声器测量	268
7.3.1	概述	268
7.3.2	扬声器极性	268
7.3.3	扬声器阻抗特性	268
7.3.4	扬声器灵敏度	270
7.3.5	扬声器频率响应	271
7.3.6	扬声器指向特性	273
7.3.7	扬声器失真测量	277
7.3.8	扬声器输入电功率	280
7.3.9	T/S 参数	281
7.3.10	非消声室检测	283
7.3.11	定义扬声器声学中心	284
7.4	头戴耳机测量	284
7.4.1	概述	284
7.4.2	头戴耳机的额定测量条件	285
7.4.3	额定阻抗	285
7.4.4	阻抗/频率特性	286
7.4.5	灵敏度	286
7.4.6	频率响应	287
7.4.7	宽频特征电压	289
	参考文献	289
第 8 章	音频设备标准与检测	291
8.1	音频信号	291
8.2	音频设备	291
8.3	音频设备测量标准	292

8.4 音频信号单位	294
8.4.1 伏特 (V) 和瓦特 (W)	294
8.4.2 分贝 (dB)	294
8.4.3 dBm	294
8.4.4 dBu 和 dBV	295
8.4.5 dBFS	295
8.5 音频测量优选频率和倍频程	295
8.6 音频测量信号	297
8.6.1 正弦波信号	297
8.6.2 方波信号	297
8.6.3 多音信号	298
8.6.4 正弦猝波信号	298
8.6.5 白噪声信号	298
8.6.6 粉红噪声信号	299
8.7 音频测量仪器	300
8.8 音频测量	300
8.8.1 输入和输出阻抗	300
8.8.2 输出电压 (电平)	301
8.8.3 增益测量	301
8.8.4 多通道增益差和相位差测量	302
8.8.5 频率特性测量	302
8.8.6 噪声测量	303
8.8.7 幅度非线性测量	304
8.8.8 平衡测量	308
8.8.9 多通道串音衰减和分离度测量	310
8.8.10 抖动测量	311
8.8.11 音频数字接口分析	312
参考文献	314
第9章 音频工程系统标准与检测	316
9.1 建筑声学概述	316
9.1.1 室内声学基本概念	316
9.1.2 室内声学设计和音质设计简介	317
9.1.3 建筑环境噪声	318
9.1.4 室内音质声学测量	326
9.2 扩声系统简介	332
9.2.1 扩声系统的功能	333
9.2.2 扩声系统的分类	333

9.2.3	扩声系统相关标准	334
9.2.4	扩声系统的设计	334
9.3	扩声系统检测	337
9.3.1	测量条件	339
9.3.2	测量仪器	339
9.3.3	测点的选取	340
9.3.4	测量方法	340
9.3.5	扩声系统设计和测量实例	345
9.4	扩声系统工程主观听音评价方法	350
9.4.1	简介	350
9.4.2	声音质量主观评价用节目源	354
	参考文献	355
第 10 章	声音质量评价	357
10.1	概述	357
10.2	音质评价标准	357
10.2.1	扬声器听音试验	357
10.2.2	收音机主观评价标准	358
10.2.3	电视广播接收机主观试验评价方法	358
10.2.4	多声道系统损伤的主观评价方法	358
10.2.5	音质客观评价方法	358
10.3	音质的主观评价	358
10.3.1	试听室	358
10.3.2	节目素材	361
10.3.3	听音员	363
10.3.4	听音方法	363
10.3.5	结果表示	366
10.4	音质的客观评价	366
10.4.1	ITU-R 1387 介绍	367
10.4.2	PEAQ 中使用的音频信号特征	367
10.4.3	客观评价分数获取	369
10.4.4	应用与局限	369
	参考文献	369
第 11 章	我国音响行业发展现状及发展思路	371
11.1	音响行业的概念、范围和特点	371
11.1.1	音响行业的概念和范围简介	371
11.1.2	音响行业的特点	371

11.2 我国音响行业发展现状	372
11.2.1 我国音响行业发展回顾和在国际分工中的地位	372
11.2.2 2012 年总体发展情况	373
11.2.3 2012 年出口情况	375
11.3 音响行业国内外主要企业	380
11.3.1 国内主要企业	380
11.3.2 国外主要骨干企业	380
11.4 我国音响行业发展存在的问题	381
11.5 我国音响行业发展面临的形势和发展目标	382
11.5.1 面临的形势	382
11.5.2 发展目标	383
附录 缩略语表	385

第一部分 声学原理

第 1 章 声学基础知识

1.1 概 述

1.1.1 声学简史

声学是有关声音的科学。100 多年以前, 声学领域的工程师主要以耳朵作为测量的工具, 能控制的噪声声源, 当时只有哨子、铙和汽笛等。大约在那个时期, 瑞利 (Rayleigh)、斯托克斯 (Stokes)、汤姆森 (Thomson)、兰姆 (Lamb)、亥姆霍兹 (Helmholtz)、考尼格 (Konig)、丁达尔 (Tyndall)、孔脱 (Kundt) 等的大名都在重要的刊物上出现过。在当时声学方面研究成果的基础之上, 瑞利的两卷本《声学理论》出版 (1877 年和 1878 年), 至今仍被人们应用。此后, 声学研究停留在这一水平上, 直到塞宾 (W.C.Sabine) 发表了一系列论文 (1900~1915 年), 使建筑声学进入到科学的范畴。

1907 年, 伦敦大学教授弗莱明 (L.A.Fleming) 利用真空管发明了三极真空管, 这一根本性的改革开启了真空管放大器的时代, 使得声学领域的发展得到了最大加速。有了真空管放大器, 任何频率的强大声音都可人为产生, 而极弱声音的强度也可以被测量。尤其重要地是, 我们能够制造小巧耐用、不怕气流干扰的测量仪器。

电声学的研究也是从 19 世纪开始的。贝尔 (Alexander Graham Bell) 于 1876 年发明了电话, 但是对于电声换能器 (指传声器、耳机、扬声器等) 严格意义上的科学研究是在此 50 年后。1920 年, 美国人肯尼迪 (A.E.Kennedy) 把类比的概念和方法引入电声系统和机械振动系统, 使二者可以利用成熟的电路系统的方法和结果, 从此电声系统进入更加科学的发展道路。

大约在同时, 在贝尔电话实验室中, 弗莱彻 (Harvey Fletcher) 开始听觉和语言方面的研究。在他的研究中, 响度和掩蔽的概念被数量化了, 控制有效的语言通信的许多因素也被肯定了 (1920~1940 年)。此外, 声学通过超声学的媒介, 进入医药和化学领域, 此后人们开始了超声透热治疗的试验。

第二次世界大战爆发后, 军队要求能有效地侦察潜伏在水中的潜水艇, 并能在嘈杂环境中 (例如飞机和装甲车中) 进行高度可靠的语言通信。英国、德国、法国和美国都建立了巨大的实验室来研究这些问题。声学方面的研究开始了大规模、广领域地发展。

在今天, 声学从以前作为电话工业、少数建筑和军事上的工具, 逐渐变为几乎与每个人日常生活都有关的事业。人们要求在安全和舒适的声学环境中工作, 因而建筑师在他们设计房屋的例行工作中聘请声学工程师为他们提出建议。另外, 对减少飞机、高铁等产生的极高噪声, 目前已有更普通的要求, 因为这些噪声有损于人们的健康。随着 MP3、智能手机等设备风靡全球, 人们可以随时随地享受音乐。声学目前也已进入精密技术的时代。