

# 数字音频原理与应用

## (第四版)

Principles of Digital Audio ,Fourth Edition

(美) Ken C. Pohlmann 著

苏菲译

孙景鳌 审校

麦格劳-希尔教育出版集团

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了数字音频的基本理论和分析方法,其内容涉及数字音频技术的实际应用及其发展的各个方面。全书共 18 章。第 1、2 章介绍数字音频原理;第 3、4 章讲述数字音频记录与重放技术;第 5 章介绍编码纠错;第 6、7 章分别讲述磁带存储与数字磁带;第 8、9 章介绍光盘存储原理和光盘机;第 10 章讨论感知编码;第 11、12 章介绍 DVD 和袖珍光盘;第 13 章讲述设备互连;第 14、15 章介绍计算机音频和因特网音频技术;第 16 章介绍数字广播和数字电视;第 17 章讲述数字信号处理的基础知识;第 18 章介绍  $\Sigma\text{-}\Delta$  变换。

本书可作为高年级本科生和研究生的教材,也可供相关专业的研发人员和工程技术人员参考。

Ken C. Pohlmann

Principles of Digital Audio, Fourth Edition

ISBN 0-07-134819-0

Copyright © 2000 by the McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any means or stored in a database or retrieval system without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Publishing House of Electronics Industry

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和美国麦格劳·希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号:01-2000-3371

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

数字音频原理与应用 第四版/(美)波尔曼(Pohlmann, K. C.)著,苏菲译.—北京:电子工业出版社,2002.2

书名原文 Principles of Digital Audio, Fourth Edition

ISBN 7-5053-7112-6

I. 数... II. ①波... ②苏... III. ①数字技术:电声技术—理论 ②数字技术:电声技术—应用 IV. TN912

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 080748 号

责任编辑:张来盛 沈艳波

印 刷:

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:30 字数:768 千字

版 次:2002 年 2 月第 1 版 2002 年 2 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:45.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。  
联系电话(010)68279077

## 第四版序言

1984年在纽约的一次音频工程协会举行的会议上,我作了一个关于数字音频基础的报告,报告的素材选自我在迈阿密大学新开的一门课程。报告结束后,许多听众希望就这一有趣而新颖的主题获得更多的资料和信息,其中有一位编辑捕捉到了这个细节,其后他劝说我写一本关于数字音频的著作,他解释说,与作报告相比,更好的办法是把它们写在书上。我接受了他的提议,1985年《数字音频原理》一书因此而出版了。这本书的出版极大地满足了关于数字音频研究与开发的需要。实际上,娱乐、电信、信号处理和计算机科学等,其各个部分都发生了变革,出现了全新的产业。数字音频改变了我们的生活。

数字音频的普及与人们对于了解数字音频工作的需要是一致的。音频工程师们(很多学生也想加入他们的行列)如饥似渴地收集关于数字音频的每一条信息,这无疑会促进数字音频这门科学的进一步发展,因此我撰写了本书的第一版、第二版和第三版。

当我出版本书的第三版时,我对自己说,我将不再出版本书的第四版。对于自己的决定,我犯了一个不明智的错误,尤其是我自己认为如果技术不断地以令人吃惊的速度往前发展,而且很多人都渴望了解它,出版本书的下一版本就显得非常必要了。当我写完本书的第四版时,我吸取了上次的教训,对于本书的第五版,我将事先不作出任何形式的承诺。

熟悉本书以前版本的读者对于本书的改进将不会感觉到吃惊。一些章节(如离散时间采样)没有改变,但是加入了我们对它的理解。对一些相当重要的章节进行了改写。技术的发展迫使我缩减了一些章节的篇幅,同时加大了另外一些章节的篇幅。就像历史经常改写自己一样,我们对科学的认识也在不断地深化。更为重要的是,在第三版之后的5年中,全新的数字音频应用已经发展起来了。PC技术已经和数字音频技术紧密结合起来,因特网日渐普及,DVD和DVI经过多年的发展也日渐成熟。

本书的三分之一经过了改写,并加入了一些新的内容和插图,删除了对一些章节的论述,以便保持与前几版的页数相近,同时增加了对理论上和实践中较新问题的讨论。读者可以在书中找到许多最新的信息和许多新的专业缩略语。其中PC音频方面包括IEEE 1394,USB,AC 97和DirectX等,因特网音频方面包括MP3,SDMI和RealNetworks G2等,低比特率方面包括MPEG-2,AAC,MPEG-4,Dolby Digital和PAC等,DVD方面包括DVD-Video,DVD-Audio,可记录DVD,UDF和MLP等,数字广播和数字电视方面包括ATSC,DIV,AM-IBOC和FM-IBOC(包括USA Digital Radio和LDR类型)等,光盘方面包括CD-R,CD-RW和Super Audio CD等。同时还更新并补充了参考文献。

我在最大程度上保留了本书的易读性,但是对一些问题的深入论述必将增加读者对本书理解的难度,同时对于日渐复杂的技术(例如DVD技术)需要更大的篇幅进行论述。当然,读者可以根据自身的水平和需要选择阅读。由于本书涉及的内容比较丰富,更适合专业技术人员和学生阅读。

本书既不是一本技术手册,也不是一部专业论文集,而是一本引导性教材,目的在于以最简明的论述,力求给读者提供更多的信息而又使读者清楚地理解书中的内容。

本书的很多素材来自于数字音频领域的专家和先驱的研究和实践。我们应该感谢他们所做的巨大的、开创性的工作,他们的工作使我们的生活进入了数字音频时代,同时他们对这门年轻科学的深刻理解也改变了我们的工业和社会。

最后需要指出的是,我希望本书的最新版本能够对读者有所帮助。

Ken C. Pohlmann

## 关于作者

Ken C. Pohlmann 是佛罗里达州迈阿密大学的教授,同时也是该校音乐工程计划的负责人。他开设了一系列关于声学、心理声学、数字音频、高级数字音频、因特网音频与音乐节制作等的本科和研究生课程,并于 1986 年在美国创立了第一个音乐工程方面的研究生专业。

Pohlmann 先生同时还是致力于研究、开发与测试新一代音频技术的 Hammer 实验室主任,以及设计数字音频系统和开发车载音响系统方面的顾问,他的客户包括:Alpine Electronics、Bertlesmann Music Group、Blockbuster Entertainment、Baker & McKenzie、BMW、加拿大广播公司、Daimler-Chrysler、Fish & Neave、福特汽车公司、Fujitsu Ten、Haman International、休斯电子公司、现代汽车公司、IBM、Lexus、微软、摩托罗拉、Nippon Columbia、Onkyo America、飞利浦、RealNetworks、Recording Industry Association of America、Sensomatic、Sonopress、索尼、TDK、时代华纳、丰田公司和 United Technologies 等。Pohlmann 先生在位于 Urbana-Champaign 的伊利诺伊大学获得电子工程专业的本科和硕士学位。

Pohlmann 先生与他人合作创立了 Microcomputer Arts 公司(1980 年)、International Business Information System 公司(1982 年)和 U.S. Digital Disc 公司(1985 年)。他主持了 1989 年在多伦多召开的音频工程协会(AES)关于数字音频方面的国际会议,合作主持了 1997 年在西雅图召开的因特网音频国际会议。他两次获得政府 AES 委员会奖,由于教学和研究方面的贡献,1990 年获得 AES 院士奖。1991 年进入 AES 委员会,1993 年当选为 AES 在北美地区的副主席。1992 年,由于教学和研究方面的贡献,获得迈阿密大学 Philip Frost 奖。

Pohlmann 先生撰写了《数字音频原理》(McGraw-Hill 出版社)和《简明光盘手册》(A-R 版)两本专著,和 John Wiley Sons 一起撰写了《新型媒体写入技术》一书,与 Howard W. Sams 一起编辑并撰写了《高级数字音频》一书。从 1982 年至今,他为“Audio”杂志、“dB”杂志、“Car Stereo Review”、“CD Review”、“Electronics Australia”、“Guitar Player”杂志、“IEEE Spectrum”、“Journal of the Audio Engineering Society”、“Laserdisk Professional”、“Mix”杂志、“PC”杂志、“Sound & Vision”、“Scientific American”、“Stereo Review”和“Video”杂志等撰写了 1400 多篇期刊文章。他是“Car Stereo Review”杂志的专栏作家,同时还是“Sound & Vision”杂志的编辑和专栏作家。

# 目 录

|                     |        |
|---------------------|--------|
| 第 1 章 声音和数字         | ( 1 )  |
| 1.1 关于声音的基本知识       | ( 1 )  |
| 1.1.1 声音的产生与传播      | ( 1 )  |
| 1.1.2 声压            | ( 2 )  |
| 1.1.3 谐音            | ( 3 )  |
| 1.2 数字基础            | ( 3 )  |
| 1.2.1 数制            | ( 3 )  |
| 1.2.2 二进制系统         | ( 5 )  |
| 1.3 二进制编码           | ( 5 )  |
| 1.3.1 加权二进制编码       | ( 6 )  |
| 1.3.2 非权值二进制码       | ( 6 )  |
| 1.4 二进补码            | ( 7 )  |
| 1.5 布尔代数            | ( 8 )  |
| 1.6 模拟与数字           | ( 11 ) |
| 第 2 章 数字音频基础        | ( 13 ) |
| 2.1 离散时间取样          | ( 13 ) |
| 2.1.1 取样定理          | ( 13 ) |
| 2.1.2 奈奎斯特频率        | ( 14 ) |
| 2.1.3 混叠            | ( 17 ) |
| 2.2 量化              | ( 18 ) |
| 2.2.1 信号误差比         | ( 19 ) |
| 2.2.2 量化失真          | ( 21 ) |
| 2.2.3 几种降低量化噪声的方案   | ( 22 ) |
| 2.3 抖动              | ( 22 ) |
| 2.3.1 采用抖动信号的效果     | ( 23 ) |
| 2.3.2 抖动的类型         | ( 26 ) |
| 2.4 结论              | ( 29 ) |
| 第 3 章 数字录音          | ( 30 ) |
| 3.1 脉冲编码调制          | ( 30 ) |
| 3.2 抖动发生器           | ( 32 ) |
| 3.3 输入低通滤波器         | ( 32 ) |
| 3.4 A/D 变换器         | ( 35 ) |
| 3.4.1 取样保持电路        | ( 35 ) |
| 3.4.2 A/D 变换器的技术指标  | ( 37 ) |
| 3.4.3 逐次比较型 A/D 变换器 | ( 40 ) |

|       |                   |        |
|-------|-------------------|--------|
| 3.4.4 | 过取样 A/D 变换器       | ( 41 ) |
| 3.5   | 录制处理              | ( 43 ) |
| 3.6   | 信道编码              | ( 44 ) |
| 3.6.1 | 信道编码的基本概念         | ( 44 ) |
| 3.6.2 | 简单编码              | ( 47 ) |
| 3.6.3 | 群码                | ( 48 ) |
| 3.6.4 | 编码应用              | ( 52 ) |
| 第 4 章 | 数字音频再生            | ( 53 ) |
| 4.1   | 再生处理              | ( 53 ) |
| 4.2   | D/A 变换器           | ( 54 ) |
| 4.2.1 | 概述                | ( 54 ) |
| 4.2.2 | 权电阻 D/A 变换器       | ( 56 ) |
| 4.2.3 | R-2R 梯形 D/A 变换器   | ( 57 ) |
| 4.2.4 | 过零失真              | ( 58 ) |
| 4.2.5 | 超字长 D/A 变换        | ( 59 ) |
| 4.3   | 输出 S/H 电路         | ( 60 ) |
| 4.4   | 输出低通滤波器           | ( 62 ) |
| 4.5   | 冲激响应              | ( 63 ) |
| 4.6   | 数字滤波器             | ( 64 ) |
| 4.6.1 | 数字滤波器概述           | ( 64 ) |
| 4.6.2 | 噪声整形              | ( 69 ) |
| 4.6.3 | 输出处理              | ( 69 ) |
| 4.7   | 其他编码方法            | ( 70 ) |
| 4.7.1 | 浮点系统              | ( 71 ) |
| 4.7.2 | 块浮点系统             | ( 72 ) |
| 4.7.3 | 不一致压缩扩张系统         | ( 73 ) |
| 4.7.4 | $\mu$ 律和 A 律压缩与扩张 | ( 73 ) |
| 4.7.5 | 差分 PCM            | ( 74 ) |
| 4.7.6 | 增量调制              | ( 75 ) |
| 4.7.7 | 自适应增量调制           | ( 76 ) |
| 4.7.8 | 压缩扩张预测增量调制        | ( 77 ) |
| 4.7.9 | 自适应差分脉冲编码调制       | ( 78 ) |
| 4.8   | 时基纠错              | ( 79 ) |
| 4.8.1 | 抖动                | ( 79 ) |
| 4.8.2 | 眼图                | ( 80 ) |
| 4.8.3 | 取样抖动误差与接口抖动误差的比较  | ( 81 ) |
| 4.8.4 | 存储介质中的抖动          | ( 82 ) |
| 4.8.5 | 传输抖动              | ( 83 ) |
| 4.8.6 | 变换器抖动             | ( 84 ) |
| 第 5 章 | 纠错技术              | ( 88 ) |

|       |                |         |
|-------|----------------|---------|
| 5.1   | 错误来源           | ( 88 )  |
| 5.2   | 错误检测           | ( 90 )  |
| 5.2.1 | 单位校验位          | ( 91 )  |
| 5.2.2 | 国际标准书号         | ( 93 )  |
| 5.3   | 循环冗余校验码        | ( 93 )  |
| 5.4   | 纠错编码           | ( 98 )  |
| 5.4.1 | 分组码            | ( 98 )  |
| 5.4.2 | 卷积码            | ( 103 ) |
| 5.5   | 交织处理           | ( 105 ) |
| 5.6   | 里德-所罗门编码       | ( 108 ) |
| 5.7   | 互交织 RS 码       | ( 111 ) |
| 5.8   | 错误隐藏           | ( 115 ) |
| 5.8.1 | 插值             | ( 115 ) |
| 5.8.2 | 静音             | ( 116 ) |
| 5.9   | 复制             | ( 116 ) |
| 第 6 章 | 磁带存储           | ( 117 ) |
| 6.1   | 数字磁带           | ( 117 ) |
| 6.1.1 | 记录带宽           | ( 117 ) |
| 6.1.2 | 磁带记录           | ( 117 ) |
| 6.1.3 | 符号间干扰          | ( 119 ) |
| 6.1.4 | 纵向磁记录          | ( 119 ) |
| 6.1.5 | 横向记录           | ( 120 ) |
| 6.2   | 静态磁头磁带记录仪      | ( 121 ) |
| 6.2.1 | 概述             | ( 121 ) |
| 6.2.2 | DASH 记录格式      | ( 123 ) |
| 6.3   | 旋转磁头磁带记录仪      | ( 125 ) |
| 6.3.1 | 磁带录像机的操作过程     | ( 125 ) |
| 6.3.2 | 数字音频处理器        | ( 127 ) |
| 6.3.3 | 专业数字视频格式       | ( 128 ) |
| 6.3.4 | ADAT 数字多磁道技术   | ( 130 ) |
| 6.3.5 | Tascam 数字多磁道技术 | ( 133 ) |
| 6.3.6 | 旋转磁头的优缺点       | ( 134 ) |
| 第 7 章 | 数字录音带          | ( 137 ) |
| 7.1   | DAT 盒式磁带       | ( 137 ) |
| 7.2   | DAT 模式         | ( 138 ) |
| 7.3   | DAT 硬件设计       | ( 139 ) |
| 7.4   | 磁道格式           | ( 141 ) |
| 7.5   | 方位记录与自动磁道跟踪    | ( 145 ) |
| 7.5.1 | 方位记录           | ( 145 ) |
| 7.5.2 | 自动磁道跟踪         | ( 145 ) |

|              |               |                |
|--------------|---------------|----------------|
| 7.6          | 8-10 调制       | ( 146 )        |
| 7.7          | DAT 纠错        | ( 148 )        |
| 7.8          | 串行复制管理系统      | ( 150 )        |
| 7.9          | 预录制 DAT       | ( 151 )        |
| 7.10         | 专业 DAT        | ( 151 )        |
| 7.10.1       | DAT 界面        | ( 151 )        |
| 7.10.2       | DAT 时间码       | ( 152 )        |
| 7.10.3       | 专业 DAT 的特点    | ( 153 )        |
| <b>第 8 章</b> | <b>光盘存储原理</b> | <b>( 154 )</b> |
| 8.1          | 基本光学知识        | ( 154 )        |
| 8.1.1        | 自然光与单色光       | ( 154 )        |
| 8.1.2        | 光的折射          | ( 155 )        |
| 8.1.3        | 衍射            | ( 156 )        |
| 8.1.4        | 光学系统的分辨率      | ( 157 )        |
| 8.1.5        | 偏振            | ( 157 )        |
| 8.2          | 光盘存储的一般概念     | ( 159 )        |
| 8.3          | 不可擦光盘存储       | ( 160 )        |
| 8.3.1        | 只读光盘存储        | ( 160 )        |
| 8.3.2        | 只写一次光盘        | ( 161 )        |
| 8.4          | 可擦写光盘         | ( 162 )        |
| 8.4.1        | 磁光记录          | ( 162 )        |
| 8.4.2        | 相变光记录         | ( 164 )        |
| 8.4.3        | 染料化合物记录       | ( 165 )        |
| 8.5          | 电影中的数字音频      | ( 165 )        |
| <b>第 9 章</b> | <b>CD</b>     | <b>( 168 )</b> |
| 9.1          | 概述            | ( 168 )        |
| 9.1.1        | CD 系统的发展      | ( 168 )        |
| 9.1.2        | CD 盘          | ( 169 )        |
| 9.1.3        | 光盘规格          | ( 170 )        |
| 9.2          | 数据编码          | ( 172 )        |
| 9.3          | 子码            | ( 175 )        |
| 9.4          | 播放器的光学设计      | ( 179 )        |
| 9.4.1        | 光接收器          | ( 179 )        |
| 9.4.2        | 自动聚焦设计        | ( 180 )        |
| 9.4.3        | 自动跟踪系统        | ( 181 )        |
| 9.4.4        | 单光束接收器        | ( 183 )        |
| 9.4.5        | 接收器控制         | ( 184 )        |
| 9.5          | 播放器的电路设计      | ( 184 )        |
| 9.5.1        | EFM 解调        | ( 184 )        |
| 9.5.2        | 检错和纠错         | ( 186 )        |

|        |                  |         |
|--------|------------------|---------|
| 9.5.3  | 输出处理             | ( 187 ) |
| 9.6    | 光盘制作             | ( 187 ) |
| 9.6.1  | 母带制作             | ( 188 ) |
| 9.6.2  | 母盘制作             | ( 188 ) |
| 9.6.3  | 模具制作             | ( 189 ) |
| 9.6.4  | 光盘生产             | ( 190 ) |
| 9.7    | 其他 CD 格式         | ( 191 ) |
| 9.7.1  | CD-ROM           | ( 191 ) |
| 9.7.2  | CD-R             | ( 195 ) |
| 9.7.3  | CD-RW            | ( 200 ) |
| 9.7.4  | CD-MO            | ( 201 ) |
| 9.7.5  | CD-i             | ( 201 ) |
| 9.7.6  | 图片 CD            | ( 203 ) |
| 9.7.7  | CD+G 和 CD+MIDI   | ( 204 ) |
| 9.7.8  | CD-3             | ( 205 ) |
| 9.7.9  | VCD              | ( 205 ) |
| 9.8    | 超级音频 CD          | ( 206 ) |
| 9.8.1  | 概述               | ( 206 ) |
| 9.8.2  | DSD 调制           | ( 208 ) |
| 9.8.3  | 播放器设计            | ( 209 ) |
| 第 10 章 | 感知编码             | ( 211 ) |
| 10.1   | 心理声学             | ( 211 ) |
| 10.1.1 | 心理声学概述           | ( 211 ) |
| 10.1.2 | 人耳生理系统和临界频段      | ( 213 ) |
| 10.1.3 | 闻阈和掩蔽            | ( 215 ) |
| 10.2   | 感知编码原理           | ( 219 ) |
| 10.3   | 数据压缩编码           | ( 220 ) |
| 10.3.1 | 子带编码             | ( 221 ) |
| 10.3.2 | 变换编码             | ( 225 ) |
| 10.3.3 | 滤波器组             | ( 225 ) |
| 10.4   | MPEG-1 音频标准      | ( 227 ) |
| 10.4.1 | MPEG-1 概述        | ( 227 ) |
| 10.4.2 | 心理声学模型           | ( 230 ) |
| 10.4.3 | 第 层              | ( 231 ) |
| 10.4.4 | 第 层              | ( 234 ) |
| 10.4.5 | 第 层              | ( 236 ) |
| 10.5   | MPEG-2 音频标准      | ( 238 ) |
| 10.5.1 | MPEG-2 音频编码与解码   | ( 238 ) |
| 10.5.2 | MPEG-2 AAC       | ( 240 ) |
| 10.6   | 数字杜比( AC-3 ) 解码器 | ( 242 ) |

|               |                          |                |
|---------------|--------------------------|----------------|
| 10.7          | Apt-X100 编码器.....        | ( 248 )        |
| 10.8          | 感知编码器的性能评价.....          | ( 248 )        |
| 10.9          | 结论.....                  | ( 251 )        |
| <b>第 11 章</b> | <b>DVD.....</b>          | <b>( 252 )</b> |
| 11.1          | 简介.....                  | ( 252 )        |
| 11.1.1        | 从 CD 到 DVD 的发展.....      | ( 252 )        |
| 11.1.2        | DVD 物理参数.....            | ( 254 )        |
| 11.1.3        | 光盘的制作.....               | ( 255 )        |
| 11.1.4        | 数据编码.....                | ( 258 )        |
| 11.1.5        | 通用光盘格式( UDF ).....       | ( 259 )        |
| 11.2          | DVD-Video.....           | ( 262 )        |
| 11.2.1        | 视频编码.....                | ( 262 )        |
| 11.2.2        | 音频编码.....                | ( 263 )        |
| 11.2.3        | 播放特点.....                | ( 264 )        |
| 11.2.4        | DVD-Video 版权保护.....      | ( 265 )        |
| 11.2.5        | DVD-Video 总结.....        | ( 266 )        |
| 11.3          | DVD-Audio.....           | ( 269 )        |
| 11.3.1        | 概述.....                  | ( 269 )        |
| 11.3.2        | 编码和声道选项.....             | ( 270 )        |
| 11.3.3        | 光盘内容.....                | ( 274 )        |
| 11.3.4        | 版权保护.....                | ( 276 )        |
| 11.3.5        | DVD-Audio 总结.....        | ( 277 )        |
| 11.4          | 数据压缩.....                | ( 280 )        |
| 11.4.1        | 熵编码.....                 | ( 281 )        |
| 11.4.2        | 音频数据压缩.....              | ( 282 )        |
| 11.4.3        | MLP.....                 | ( 285 )        |
| 11.5          | 其他 DVD 光盘格式.....         | ( 287 )        |
| <b>第 12 章</b> | <b>袖珍光盘.....</b>         | <b>( 290 )</b> |
| 12.1          | 系统简介.....                | ( 290 )        |
| 12.2          | 信号格式.....                | ( 291 )        |
| 12.3          | 光盘设计.....                | ( 292 )        |
| 12.4          | 数据读取.....                | ( 294 )        |
| 12.5          | 光磁录音和场调制.....            | ( 296 )        |
| 12.6          | ATrac 数据压缩.....          | ( 298 )        |
| 12.7          | 光盘制作.....                | ( 302 )        |
| <b>第 13 章</b> | <b>设备互连.....</b>         | <b>( 304 )</b> |
| 13.1          | 音频接口概述.....              | ( 304 )        |
| 13.2          | SDIF-2 互连.....           | ( 304 )        |
| 13.3          | Alesis 多信道光学数字接口.....    | ( 306 )        |
| 13.4          | AES3 (AES/EBU) 专业接口..... | ( 306 )        |

|               |                               |                |
|---------------|-------------------------------|----------------|
| 13.4.1        | 信道状态数据块                       | ( 308 )        |
| 13.4.2        | 执行过程                          | ( 310 )        |
| 13.5          | AES10( MADI ) 多信道接口           | ( 311 )        |
| 13.6          | S/PDIF 用户互连                   | ( 312 )        |
| 13.7          | 串行复制管理系统                      | ( 315 )        |
| 13.8          | AES11 数字音频基准信号                | ( 316 )        |
| 13.9          | AES18 用户数据信道                  | ( 318 )        |
| 13.10         | 音频设备的 AES24 控制                | ( 319 )        |
| 13.11         | 取样速率转换器                       | ( 319 )        |
| 13.12         | 光缆互连                          | ( 321 )        |
| 13.12.1       | 光纤系统                          | ( 321 )        |
| 13.12.2       | 光缆的结构和参数                      | ( 322 )        |
| 13.12.3       | 连接和安装                         | ( 325 )        |
| 13.12.4       | 结论                            | ( 327 )        |
| <b>第 14 章</b> | <b>计算机音频</b>                  | <b>( 328 )</b> |
| 14.1          | PC 总线和接口                      | ( 328 )        |
| 14.1.1        | IEEE 1394 Fire Wire           | ( 329 )        |
| 14.1.2        | 通用串行总线结构                      | ( 331 )        |
| 14.2          | 计算机与音响                        | ( 333 )        |
| 14.2.1        | 声卡                            | ( 333 )        |
| 14.2.2        | 乐器数字界面                        | ( 334 )        |
| 14.2.3        | 音乐合成                          | ( 334 )        |
| 14.2.4        | 环绕声音处理                        | ( 335 )        |
| 14.2.5        | 音频编解码器 '97                    | ( 336 )        |
| 14.3          | Windows 多媒体 API 和 DirectX API | ( 337 )        |
| 14.4          | MMX                           | ( 338 )        |
| 14.5          | 文件格式                          | ( 338 )        |
| 14.6          | 数字音频读取                        | ( 341 )        |
| 14.7          | 硬盘记录                          | ( 343 )        |
| 14.7.1        | 系统特性                          | ( 343 )        |
| 14.7.2        | 硬盘驱动器                         | ( 344 )        |
| 14.8          | PC 音频软件应用                     | ( 347 )        |
| 14.8.1        | 概述                            | ( 347 )        |
| 14.8.2        | 硬盘编辑                          | ( 348 )        |
| 14.8.3        | 视频工作站的音频                      | ( 349 )        |
| <b>第 15 章</b> | <b>因特网音频</b>                  | <b>( 351 )</b> |
| 15.1          | 计算机网络和文件传输                    | ( 351 )        |
| 15.1.1        | 电话服务                          | ( 351 )        |
| 15.1.2        | ISDN                          | ( 353 )        |
| 15.1.3        | 非对称数字用户接入线路                   | ( 354 )        |

|        |                |         |
|--------|----------------|---------|
| 15.1.4 | 计算机网络          | ( 355 ) |
| 15.1.5 | ATM            | ( 357 ) |
| 15.2   | 因特网和因特网音频      | ( 358 ) |
| 15.2.1 | 因特网概述          | ( 358 ) |
| 15.2.2 | MP3            | ( 360 ) |
| 15.2.3 | SDMI           | ( 362 ) |
| 15.3   | 实时音频           | ( 363 ) |
| 15.3.1 | 音频流            | ( 363 ) |
| 15.3.2 | 实时音频 G2 音乐编解码器 | ( 364 ) |
| 15.3.3 | 音频网络广播         | ( 366 ) |
| 15.4   | MPEG - 4       | ( 366 ) |
| 15.4.1 | 交互操作           | ( 367 ) |
| 15.4.2 | 音频编码           | ( 367 ) |
| 15.5   | 加密和水印          | ( 369 ) |
| 第 16 章 | 数字广播和数字电视      | ( 372 ) |
| 16.1   | 卫星通信           | ( 372 ) |
| 16.1.1 | 概述             | ( 372 ) |
| 16.1.2 | 数字传输           | ( 374 ) |
| 16.1.3 | 直播卫星           | ( 375 ) |
| 16.2   | 数字音频广播         | ( 376 ) |
| 16.2.1 | 传输方法           | ( 376 ) |
| 16.2.2 | 频谱资源           | ( 377 ) |
| 16.2.3 | 技术考虑           | ( 378 ) |
| 16.3   | Eureka 147/DAB | ( 380 ) |
| 16.4   | 带内数字广播         | ( 383 ) |
| 16.4.1 | 概述             | ( 383 ) |
| 16.4.2 | 美国的数字广播        | ( 385 ) |
| 16.4.3 | Lucent 数字广播    | ( 387 ) |
| 16.4.4 | 感知音频编码         | ( 388 ) |
| 16.5   | 直接卫星广播         | ( 389 ) |
| 16.6   | 数字电视           | ( 390 ) |
| 16.6.1 | MPEG 视频编码      | ( 390 ) |
| 16.6.2 | ATSC 数字电视      | ( 396 ) |
| 16.7   | 从现有电视到数字电视的过渡  | ( 400 ) |
| 第 17 章 | 数字信号处理         | ( 403 ) |
| 17.1   | 数字信号处理概述       | ( 403 ) |
| 17.2   | 线性和时不变         | ( 404 ) |
| 17.3   | 冲激响应和卷积        | ( 404 ) |
| 17.4   | 数学变换           | ( 407 ) |
| 17.4.1 | 复数             | ( 407 ) |

|        |                                   |         |
|--------|-----------------------------------|---------|
| 17.4.2 | 傅里叶变换和拉普拉斯变换                      | ( 407 ) |
| 17.4.3 | Z 变换                              | ( 410 ) |
| 17.5   | 单位圆和收敛域                           | ( 410 ) |
| 17.6   | DSP 芯片                            | ( 412 ) |
| 17.6.1 | 概述                                | ( 412 ) |
| 17.6.2 | DSP 集成电路                          | ( 412 ) |
| 17.6.3 | DSP 编程                            | ( 414 ) |
| 17.6.4 | DSP 应用                            | ( 418 ) |
| 17.7   | 数字滤波器                             | ( 425 ) |
| 17.7.1 | 概述                                | ( 425 ) |
| 17.7.2 | FIR 滤波器                           | ( 426 ) |
| 17.7.3 | IIR 滤波器                           | ( 429 ) |
| 17.7.4 | 滤波器的应用                            | ( 429 ) |
| 17.7.5 | 误差分析                              | ( 431 ) |
| 第 18 章 | $\Sigma$ - $\Delta$ 变换和噪声整形       | ( 433 ) |
| 18.1   | $\Sigma$ - $\Delta$ 变换            | ( 433 ) |
| 18.1.1 | $\Sigma$ - $\Delta$ 调制            | ( 434 ) |
| 18.1.2 | 闲置输出                              | ( 438 ) |
| 18.2   | 具有噪声整形的 D/A 变换                    | ( 439 ) |
| 18.2.1 | 具有二阶噪声整形的 1 比特 D/A 变换             | ( 439 ) |
| 18.2.2 | 三阶噪声整形的多比特 D/A 变换                 | ( 441 ) |
| 18.2.3 | 准四阶噪声整形的多比特 D/A 变换                | ( 444 ) |
| 18.3   | $\Sigma$ - $\Delta$ A/D 变换        | ( 445 ) |
| 18.3.1 | $\Sigma$ - $\Delta$ A/D 调制器       | ( 446 ) |
| 18.3.2 | 抽取滤波器                             | ( 448 ) |
| 18.3.3 | $\Sigma$ - $\Delta$ A/D 变换器芯片     | ( 450 ) |
| 18.3.4 | $\Sigma$ - $\Delta$ A/D-D/A 变换器芯片 | ( 452 ) |
| 18.4   | 非过取样量化误差的噪声整形                     | ( 452 ) |
| 18.4.1 | 最佳感知噪声整形                          | ( 453 ) |
| 18.4.2 | 数据掩蔽技术                            | ( 456 ) |
| 18.5   | 结论                                | ( 458 ) |
| 附录 A   | 取样原理                              | ( 459 ) |

# 第 1 章 声音和数字

数字音频是一门成熟的技术，它推动了许多工程和制造技术的发展。虽然其基本的概念在 1920 年就为人们所知，但是数字音频直到 1970 年才开始商业化进程。数字音频的复杂性反而促使我们对其基础内容进行讨论。这一章首先对一个音频事件所包含信息的数字编码方法进行讨论。

## 1.1 关于声音的基本知识

在学习数字音频时不应忽视声学现象。音乐是一个声学事件，无论它是由乐器发出的，还是直接由电信号产生的，所有的音乐最终都要经空气传播，成为声音和听觉的事件。这是对自然声音的简要论述。

### 1.1.1 声音的产生与传播

声学是研究声音的，并且与声波的产生、传播和接收有关。当能量在媒质中振动时，就产生了这 3 个现象的环境。例如，当水壶盖被敲击时，它的盖子使周围的空气（媒质）产生振动，这种振动的结果是水壶的声音。这个机制看起来相当简单：盖子被激励而前、后振动。盖子推向前，它前面的空气分子被压缩；推向后，前面那部分的空气变得稀薄。振动由高于和低于均衡大气压的压力组成。节点是排气量最小的地方，相反节点是排气量最大的地方（正向和反向）。排气量是相当小的，在通常情况下，粒子排气量是  $25.4 \text{ nm}$ （ $1 \times 10^{-6}$  英寸），人群的声响流出量会导致  $25.4 \mu\text{m}$ （ $1/1000$  英寸）的排气量。

声音是通过空气分子延续声源的振动来传播的。空气分子前后撞击，将能量振动从声源传播开来。声音的传播是将本地振动向一个接一个的区域传播的过程。本地空气分子的位置变化是沿着振动传播的方向进行的，因此声音是纵向传播的。放置在声场内的一个接收器（像麦克风振动膜）会根据作用在它上面的压力而振动，媒质密度越大，传播越容易完成。例如，声音在水中比在空气中更容易传播。

把传感器接入声学系统，传感器可以将能量从一种形式转变成另一种形式。传感器可用做声音产生器和接收器。例如，水壶盖将机械能转化成声能；麦克风将声能转变为电能，扬声器则将这个过程倒了过来，将电能转换成声能。

声音振动所产生压力的改变可以是周期性的，也可以是非周期性的。小提琴以一个固定的速率周期性地改变前、后的空气密度（实际上，颤音产生的振动是准周期性的），但钹的撞击声是非周期性的。一系列周期性的振动（从压力稀薄到压缩，再回到稀薄）是一个周期。每秒经过一个固定点的振动周期的次数是声波的频率，用 Hz 表示。例如，小提琴会产生一个每秒重复 440 次的波形，它的频率为 440 Hz。频率的倒数等于振动 1 次所用的时间，即周期。自然中的频率范围可以非常低，如  $10^{-5}$  Hz 大气压的改变；也可以非常高，如  $10^{22}$  Hz 的宇宙射线。20 Hz ~ 20 kHz 是人类听力的大致范围。音频设备的响应设计在这个频率范围内即可。

波长是声音在一个完整压力改变周期内传播的距离，它是一个周期物理长度的度量。因

为声音在空气中的传播速度是固定的，大约为 340m/s。将速度除以声音频率就得到了波长。例如，20kHz 对应的波长大约是 0.017m，20Hz 对应的波长大约是 17m。任何传感器（包括我们的耳朵）都不能线性地接收或产生这个范围的波长。它们的频率响应不是单调的，且频率范围是有限的。最低频率和最高频率之间的范围可以用来定义系统的带宽。如果两个波形正、负变化一致，则称它们同相；如果这种变化完全相反，则称它们反相。波形间相对时间的不同叫做相位偏移。如果将两个有相位偏移的波形组合，则在新的波形中会产生相长干扰和相消干扰。

声音可以产生衍射，可以穿过小孔或绕过障碍物。衍射与波长有关，波长越长则衍射越明显。因此，高频在自然界中具有更好的方向性。如果在扩音器前放一本杂志，高频会受到阻碍，而低频（波长相对较长）会绕过杂志。

由于速率的改变，声音还能折射。例如，声音可以从温度较高的地方向温度较低的地方折射。温度每升高摄氏 1.8℃，声音在空气中的速度就增加 0.335 m/s。温度对声音的影响是乐队演奏家所熟知的。因为声速会改变，乐器在演奏前必须预热（其差别大约是半个音阶）。

空气中的声速相当低，为 340m/s。声音从源端传到接收端所需的时间可以用距离除以声速得到。例如，声音传 60m 的时间约为 1/6s。声音在传播时会被吸收，即使通过空气，声音的能量也会被衰减。高频在空气中被衰减更为明显。身边的雷闪听起来是尖利的声音，而较远的雷闪听起来却是隆隆声，这就是因为高频被衰减的缘故。湿度也影响空气的衰减程度，湿空气更能吸收声音。有趣的是，潮湿的空气没有干燥的空气密度大（水分子质量比它所替代的氧和氮的质量小），导致声速的提高。

## 1.1.2 声压

通常用声压低于或高于均衡大气压来描述声压的大小。声压的绝对值是很小的，例如大气压是 103.422kPa，一个大的响声也不过引起 103.4151~103.4289kPa 的声压改变。从最低声压到最高声压这个跨度的动态范围很大。人耳（是一个音频系统）能感知的声压动态范围是百万级的。由于这个范围太大，需要用对数来表示。分贝（dB）是以 10 为底的对数单位。例如， $10^8=100\,000\,000$ ，所以 100 000 000 的对数为 8。特别地，以功率之比的 10 倍来定义 dB，即：

$$\text{声强} = 10\lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \text{ dB}$$

这里  $P_1$  和  $P_2$  是声音功率或电功率的值。若分母  $P_2$  为参考值，就可以得到标准的测量值。在声学测量中，可以将参考值设置为听觉的门槛值（ $10^{-12} \text{ W/m}^2$ ）来度量声强的分贝。因此，摇滚乐队产生的  $10 \text{ W/m}^2$  的声强级可以如下计算：

$$\begin{aligned} \text{声强} &= 10\lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \text{ dB} \\ &= 10\lg\left(\frac{10}{10^{-12}}\right) \text{ dB} \\ &= 130 \text{ dB SPL (声压级)} \end{aligned}$$

当上面的公式中用到电流、电压或声压（它们的平方正比于能量）时，该分贝数应乘以 2。

度量声压的零参考级（SPL）是  $2 \times 10^{-9} \text{ N/cm}^2$ 。这是听力的最低极限值，将人类可以感知到的这一最低的 SPL 定义为 0dB SPL。声压级可以用声压与 SPL 之比的对数来表示。一个

安静的家庭环境有大约 35 dB 的 SPL，吵闹的街道约为 70 dB SPL，靠近喷气发动机处可超过 150 dB SPL。交响乐中最弱音的一个乐章有 30 dB SPL，而最强音的乐章有 110 dB SPL，其动态范围是 80 dB。

### 1.1.3 谐音

周期振动的最简单形式是正弦波，它可以用诸如钟摆和音叉这样简单的振荡器产生。正弦波是单一的，即它只有一种基本频率（基频）存在。所有其他的周期波形都是复杂的，是由一个基本频率和一系列其他与基频成倍数的频率组成。像机车发动机这样的非周期复杂波形，则不存在这种组成关系。许多乐器的谐音与基音只是简单的倍数关系。例如，一个调到基频为 150 Hz 的复杂波形，有 300 Hz, 450 Hz, 600 Hz, 750 Hz 等许多谐音。

泛音可能高过人类听觉上限。泛音的幅度和相位关系说明了波形的音质。例如，大提琴和喇叭可以用同一个基音演奏一个音符，然而，由于它们的谐音序列不同，它们的音质就截然不同。当大提琴用 D4 作为谐音演奏时，拉 D 这根弦的中点，通常产生 D3 这个音调，音调高了 8 度。这是因为演奏者去掉了包括基音在内的所有奇数谐音。音调和音质因为谐音结构的改变而改变了。谐音结构可以解释为什么人耳只有有限的能力来辨别高频声压的音质。10 kHz 周期单音的第一个谐音为 20 kHz。大多数人很难辨别这个谐音，更不用说其他高于这个频率的谐音了。为了很好地录制一个复杂的波形，就必须保护好其必需的基音和谐音结构，至少要达到听力的限度。

周期波形的谐音性质可以用傅里叶级数来表示。傅里叶级数描述了所有正弦系列的谐音组成的复杂周期波形。复杂的波形可以由许多正弦波叠加而成。而且，复杂波形还可以被分解成它的正弦波成分，以分析这个复杂波形的性质。用数学转换公式可以将用时间表示的波形转换为用频率表示的形式。例如，方波可以转换为基本正弦波和较高次的谐波。相反的转变则是将上面的过程颠倒过来。

声学信号是复杂的，人们最初认为模拟音频技术和数字音频技术可以完全把握人类听觉，这是不正确的。对于复杂的情况，人的准确的听觉限制还不得而知。在最好的情况下，即使有最成熟的技术，将我们所听到的声音通过音频系统再生出来，也只是实际声音的近似。

## 1.2 数字基础

声学 and 模拟音频技术主要研究连续的值，数字音频则将波形的幅度用一系列的离散数字来描述。数字技术使处理信息的能力大大提高，音频记录、信号处理和硬件设计的水平随着数字技术的发展而提高。软件技术被引入到音频领域之中是音频技术的真正革命。

任何数字音频系统都会遇到的基本问题，是用什么形式来描述音频信息。最合乎逻辑的选择是二进制数字系统。这个基于 2 的表示方式对信息存储和处理是非常适合的，其基本的算术计算和逻辑计算也都很方便。

### 1.2.1 数制

数字音频的发展，使我们开始用数字而不再用模拟的方式表示音频信息。数字提高了对信息进行编码、处理和解码的方法。我们通常把数字当做符号，它们的含义可以根据使用的方法不同而不同。