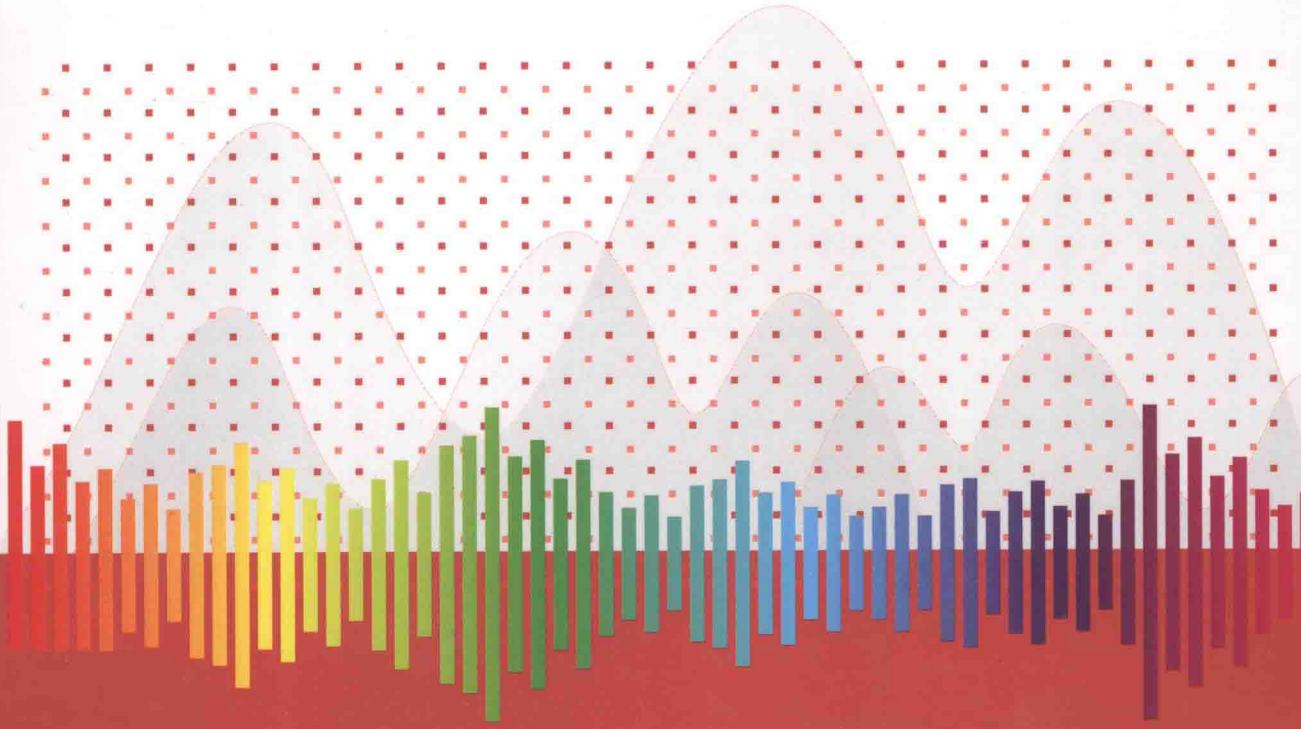
数字信号分析和处理

Digital Signal Analysis and Processing

张旭东 崔晓伟 王希勤 编著

Zhang Xudong Cui Xiaowei Wang Xiqin



清华大学出版社

数字信号分析和处理

Digital Signal Analysis and Processing

张旭东 崔晓伟 王希勤 编著

Zhang Xudong Cui Xiaowei Wang Xiqin

阜阳师范学院图书馆
藏书

清华大学出版社

内 容 简 介

本书系统深入地介绍了数字信号分析和处理的原理和算法。全书由12章组成。第1章是预备知识，概述了连续信号处理的基本知识和采样定理，连续信号处理的各种概念和技术对于深入地理解数字信号处理的结果是非常有帮助的，因此本章的设置可使得本书更加自成体系；第2～8章是全书的核心，内容有：离散信号与系统的表示、离散变换和快速算法、数字频谱分析、数字滤波器设计和实现、希尔伯特变换和复倒谱、多采样率处理等，构成了离散信号处理的基本知识体系；第9～12章介绍了几个与实际应用更加密切的专题，包括有限字长效应、带通采样和I/Q采样技术、数字处理提高A/D和D/A性能、自适应滤波器和数字信号处理系统实现技术等。本书也简要介绍了数字信号处理中的几个前沿课题，例如压缩感知、试验模态分析和希尔伯特-黄变换等。各章专设一节介绍相关的MATLAB函数和实现例程。

本书可以作为电子信息、通信、电子科学技术等专业本科生数字信号处理课程的教材，也可作为电子信息类工程硕士课程的教材和非电子信息专业的研究生教材，亦可作为有关行业工程师、科技人员和大学教师的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。
版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989　13701121933

图书在版编目(CIP)数据

数字信号分析和处理/张旭东，崔晓伟，王希勤编著.--北京：清华大学出版社，2014
ISBN 978-7-302-35920-3

Ⅰ. ①数…　Ⅱ. ①张…　②崔…　③王…　Ⅲ. ①数字信号－信号分析　②数字信号处理　Ⅳ. ①TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第061899号

责任编辑：王一玲
封面设计：傅瑞学
责任校对：焦丽丽
责任印制：何　芊

出版发行：清华大学出版社
网　　址：http://www.tup.com.cn，http://www.wqbook.com
地　　址：北京清华大学学研大厦A座　　**邮　　编**：100084
社 总 机：010-62770175　　**邮　　购**：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质 量 反 馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
课 件 下 载：http://www.tup.com.cn，010-62795954
印 装 者：河北新华第一印刷有限责任公司
经　　销：全国新华书店
开　　本：185mm×260mm　　**印　张**：33.5　　**字　　数**：814千字
版　　次：2014年8月第1版　　**印　　次**：2014年8月第1次印刷
印　　数：1～2000
定　　价：59.00元

产品编号：053978-01

前言

FOREWORD

数字信号处理是国内外高校电子信息专业普遍开设的课程，目前很多高校的生物医学工程、机械、电气、自动化、航空航天等许多专业也开设同名课程。课程的目的是介绍广泛应用于各领域的数字信号处理方法，为实现各类数字或离散系统的信号设计、分析和处理提供理论基础和实现算法，也为更深入广泛地学习诸如图像处理、语音处理、雷达信号处理、通信信号处理、振动信号处理、医学信号处理等更专业的信号处理打下坚实的基础。

本书是作者在清华大学电子工程系长期讲授“数字信号处理”课程的基础上，由多年积累的讲义整理扩充而成的。

一本教材通常有两类典型写法，第一类是按照预定的教学大纲或学时组织材料，教材的内容满足于一门规定课程的教学需求；这样的书因其精练，为学生提供一本经济的教材是其明显的优势，许多“规划”教材属于这一类。第二类更着重反映学科的系统性和完整性，既注重对核心知识细致深入的探讨，也提供一定的知识外延；因为如此，其内容一般会超出一门课程的需要，篇幅会更大，但这类教材为任课教师提供选择的灵活性，也为好学的学生留下足够的自学材料。两类教材各有优缺点，也有教材在两者之间进行平衡，本书偏于第二类。

本书的核心包括第 2 章至第 8 章和第 10 章的不带星号的内容，这些章节足够一学期的“数字信号处理”课程使用；第 9、11、12 章和其他章节带星号的内容是扩充性材料，供任课老师自由选择或学生自学使用；第 1 章是预备性内容，复习了连续信号分析和处理的基本知识，以更方便读者使用。为学习好数字信号处理，经常需要回顾一些连续信号处理的概念，这些概念在第 1 章大都可以找到；另外，第 1 章最后一节（即 1.6 节）详细讨论了采样定理，这节内容应该在“数字信号处理”课程上给予适当深度的复习。

数字信号处理学科具有比较完整的理论、方法和实现算法，又有非常广泛的应用，而广泛的应用又催生了许多软件工具用于数字信号处理算法的仿真、系统设计和系统模拟，MATLAB 的信号处理工具箱（SPB）是目前应用最广泛的一种信号处理软件包。结合 MATLAB-SPB 学习数字信号处理，一方面为理解信号处理算法提供一个良好的可视化实验环境，另一方面，也可早日掌握一种非常有用的软件工具。本书对 MATLAB-SPB 给予适当重视，在各章专门设置一节介绍相关 MATLAB 函数和一些实现例程。这样的处理既不打乱对数字信号处理理论和算法论述的系统性，对 MATLAB 不感兴趣或暂时没有 MATLAB 基础的读者可直接跳过各章的这一节而不影响全书的连贯性，同时又给予 MATLAB 工具以相当篇幅的介绍。本书以数字信号处理原理和算法为主旨，MATLAB 介绍是辅助性的，只选择部分重要的函数给出简单介绍，例程也主要为说明正文中的算法。若要看懂本书介绍 MATLAB 的小节，要求读者对 MATLAB 编程有初步知识。本书不介绍 MATLAB 编程基础，希望学习 MATLAB 编程的读者参考有关 MATLAB 教材，对于 SPB

函数集的完整介绍可参考 MATLAB 文档或 MATLAB 在线 help 功能。书中专门安排了几个 MATLAB 大作业，习题中带 * 号的是这类作业。

本书可以作为电子信息、通信、电子科学技术等专业本科生数字信号处理课程的教材；适当减少理论部分并选择一些扩充性章节，也可作为工程硕士课程的教材；还可作为本科没有开设数字信号处理课程的专业用做研究生教材。本书亦可作为有关行业工程师或科技人员的参考书。本书的核心内容在清华大学电子工程系本科课程中使用多年，加上扩充材料(9，11 两章)后也在该系工程硕士班使用多次，大多数材料还在安捷伦北京研发中心工程师培训课程中使用过。通过适当选择，本书可用于多种不同类型的课程。

感谢应启珩教授对本书初稿进行了细致的审核，提出了许多有建设性的修改意见。电子科技大学彭启琮教授和清华大学胡广书教授对本书的提纲提出许多有益的建议，谨表谢意。我们教学过程中也曾使用本系教授应启珩、冯一云、窦维蓓编著的《离散时间信号分析和处理》一书作为教材或参考书，本书有几个例子取材于该书，谨向三位同事表示感谢，特别是冯一云和应启珩先生是我们的老师和前辈，对我们都有过指导。作者的学生高昊、闫慧辰、黄丽刚、李杰然、李方圆、高艳涛、汪沣、谢林、刘婧、郭元元、王智睿等帮助准备了部分 MATLAB 例程，也帮助校对了部分初稿，谢谢他们。同时感谢多年来选择我们课程的同学，他们的疑问、讨论和反馈对改善本书的质量不可或缺。

作者之一张旭东教授感谢 TEXAS INSTRUMENTS(TI) Leadership Program 长期给予的支持，感谢 TI 对我们 DSP 课程改革和实验环境改善给予的支持，感谢沈洁女士和她的团队、林昆山博士、Gene A Frantz 先生在 DSP 应用上的合作与支持。

尽管我们做了努力，本书仍难免有疏漏和不足之处，望读者指正。

作　者

2014 年 1 月

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目录

CONTENTS

绪论 …… 1

0.1 信号的基本概念和分类 …… 2
0.2 数字与离散 …… 5
0.3 信号处理 …… 6
0.4 离散处理系统和数字处理系统的发展 …… 9
0.5 本书的组成 …… 11

第 1 章 信号处理：从连续到离散 …… 13

1.1 连续时间信号的表示 …… 13
1.1.1 常用连续信号 …… 14
1.1.2 冲激函数 …… 15
1.1.3 信号的脉冲分解 …… 17
1.2 线性时不变系统 …… 17
1.3 线性时不变系统的特征表示 …… 19
1.4 傅里叶分析 …… 20
1.4.1 傅里叶变换的定义和基本性质 …… 20
1.4.2 信号的冲激谱 …… 26
1.4.3 用傅里叶变换表示 LTI 系统 …… 28
1.4.4 时宽带宽积 …… 31
1.5 拉普拉斯变换和系统函数 …… 34
1.5.1 拉普拉斯变换及其性质 …… 34
1.5.2 拉普拉斯反变换 …… 36
1.5.3 连续时间系统的拉普拉斯变换分析 …… 37
1.6 基本采样定理 …… 39
1.7 本章小结 …… 44
习题 …… 44

第 2 章 离散信号与系统基础 …… 47

2.1 离散信号与系统 …… 47
2.1.1 信号的表示问题 …… 49
2.1.2 离散信号的分类 …… 50

2.1.3 一些常用的基本信号 …… 51
2.1.4 离散信号的基本运算 …… 55
2.1.5 离散信号的单位抽样表示 …… 56
2.1.6 离散时间系统 …… 56
2.2 离散 LTI 系统的卷积和方法 …… 59
2.2.1 离散 LTI 系统的卷积和 …… 59
2.2.2 由卷积和表示的 LTI 系统性质 …… 63
2.3 离散 LTI 系统的特征表示与变换 …… 64
2.4 离散时间傅里叶变换 …… 67
2.4.1 离散时间傅里叶变换的定义 …… 67
2.4.2 离散时间傅里叶变换的性质 …… 72
2.4.3 周期序列的 DTFT …… 74
2.4.4 LTI 系统的频率响应 …… 77
2.4.5 自相关分析、能量信号和功率信号 …… 80
2.5 z 变换和系统函数 …… 82
2.5.1 z 变换的定义和收敛域 …… 83
2.5.2 z 变换的有理分式形式和极零点 …… 85
2.5.3 z 反变换 …… 85
2.5.4 z 变换的性质 …… 89
2.5.5 用 z 变换表示系统 …… 92
2.5.6 通过极零点分析频率响应 …… 94
2.6 连续信号的数字处理问题初探 …… 96
2.6.1 连续和离散频谱之间的关系 …… 96
2.6.2 连续系统和离散系统的关系 …… 99
2.7 与本章相关的 MATLAB 函数与实例 …… 101
2.7.1 相关的 MATLAB 函数简介 …… 101
2.7.2 MATLAB 例程 …… 102
2.8 本章小结 …… 107
习题 …… 107

第 3 章 有限长序列离散变换和快速算法 …… 111

3.1 离散正交变换 …… 111
3.2 离散傅里叶变换 …… 112
3.2.1 DFT 作为对 DTFT 的频域离散采样 …… 113
3.2.2 DFT 的矩阵表示 …… 115
3.2.3 DFT 的实例 …… 116
3.3 DFT 与周期序列傅里叶级数的关系 …… 118
3.4 DFT 的性质 …… 119
3.5 用 DFT 计算相关序列 …… 128

3.6 DFT 的快速计算方法 …… 129
3.6.1 按时间抽取基 2 FFT 算法 …… 131
3.6.2 按频率抽取基 2 FFT 算法 …… 134
3.6.3 基 4 和分裂基 FFT …… 137
3.6.4 滑窗 FFT 算法 …… 140
*3.6.5 组合数 FFT 算法简述 …… 141
3.6.6 快速傅里叶反变换 …… 142
3.7 CZT 算法 …… 142
3.8 离散余弦变换及其快速算法 …… 146
3.8.1 离散余弦变换 …… 146
3.8.2 离散余弦变换的快速算法 …… 150
*3.9 一些其他离散变换简介 …… 151
3.9.1 离散正弦变换 …… 151
3.9.2 Hadamard 变换 …… 152
3.9.3 Haar 变换 …… 152
3.9.4 Slant 变换 …… 153
3.10 与本章相关的 MATLAB 函数与实例 …… 153
3.10.1 相关的 MATLAB 函数简介 …… 153
3.10.2 MATLAB 例程 …… 155
3.11 本章小结 …… 157
习题 …… 158

第 4 章 数字频谱分析 …… 161

4.1 DFT 与连续信号频谱的关系 …… 161
4.1.1 DFT 与连续信号频谱关系的直观解释 …… 161
4.1.2 DFT 与连续信号频谱关系的一般性解释 …… 163
4.2 利用 DFT 的频谱分析 …… 166
4.2.1 通过 DFT 作频谱分析的一般过程 …… 166
4.2.2 加窗与频率分辨率 …… 167
4.2.3 DFT 的频率泄漏和栅栏效应 …… 170
4.2.4 由 DFT 插值 DTFT 的讨论 …… 172
4.3 窗函数和加窗频谱分析 …… 175
4.4 对 DFT 作频谱估计的评述 …… 180
4.5 通过 DFT 进行能量谱和功率谱估计 …… 181
*4.6 短时傅里叶变换作时频谱分析 …… 182
4.6.1 短时傅里叶变换 …… 182
4.6.2 离散信号短时傅里叶变换的计算 …… 186
4.7 与本章相关的 MATLAB 函数与实例 …… 189
4.7.1 相关的 MATLAB 函数简介 …… 189

4.7.2 MATLAB 例程 …… 190
4.8 本章小结 …… 194
习题 …… 194

第 5 章 离散系统和数字滤波器 …… 196

5.1 线性时不变系统的表示方法 …… 196
5.2 系统设计 …… 199
5.2.1 逆系统设计 …… 199
5.2.2 数字滤波器设计 …… 203
5.3 全通系统和最小相位系统 …… 208
5.3.1 全通系统 …… 208
5.3.2 最小相位系统 …… 209
5.4 系统的可实现性 …… 211
5.5 IIR 系统的实现结构 …… 213
5.5.1 IIR 系统的基本结构 …… 214
5.5.2 IIR 系统级联和并联结构 …… 215
5.6 FIR 系统实现的基本结构 …… 218
5.6.1 FIR 系统的基本结构 …… 218
5.6.2 线性相位系统及其实现结构 …… 218
5.6.3 线性相位系统的零点分布和级联实现 …… 221
5.7 FIR 滤波器的 FFT 实现结构 …… 223
5.7.1 FIR 滤波器的基本 FFT 实现结构 …… 223
5.7.2 FIR 滤波器的 FFT 实现结构：重叠相加法 …… 224
5.7.3 FIR 滤波器的 FFT 实现结构：重叠保留法 …… 225
5.8 FIR 系统的频率取样结构 …… 226
*5.9 格型滤波器结构 …… 228
5.9.1 FIR 滤波器的格型结构 …… 229
5.9.2 IIR 滤波器的格型结构 …… 233
5.10 数字系统实例 …… 237
5.10.1 数字正弦振荡器 …… 237
5.10.2 数字陷波器 …… 238
5.10.3 梳状滤波器 …… 240
5.11 与本章相关的 MATLAB 函数与样例 …… 242
5.11.1 相关的 MATLAB 函数简介 …… 242
5.11.2 MATLAB 例程 …… 244
5.12 本章小结 …… 247
习题 …… 247

第 6 章 数字滤波器设计 …… 251

6.1 数字滤波器设计概述 …… 251
6.2 线性相位 FIR 滤波器的分类和表示 …… 254
6.3 窗函数法设计 FIR 滤波器 …… 259
6.3.1 线性相位 FIR 滤波器的矩形窗设计 …… 260
6.3.2 线性相位 FIR 滤波器的一般窗设计方法 …… 264
6.4 FIR 滤波器的等波纹逼近设计 …… 269
6.4.1 FIR 滤波器频率响应的多项式表示 …… 271
6.4.2 误差函数的构造 …… 272
6.4.3 Remeze 算法 …… 273
6.5 频率取样设计 …… 276
6.6 IIR 数字滤波器的间接设计方法 …… 280
6.6.1 冲激响应不变法 …… 281
6.6.2 双线性变换法 …… 285
6.7 IIR 数字滤波器的设计实践 …… 288
6.7.1 模拟滤波器设计问题 …… 288
6.7.2 巴特沃思滤波器 …… 289
6.7.3 切比雪夫滤波器 …… 291
6.7.4 椭圆滤波器 …… 293
6.7.5 IIR 数字滤波器设计实例 …… 294
6.8 数字滤波器的频率变换 …… 298
6.9 IIR 滤波器的直接优化设计 …… 303
6.10 与本章相关的 MATLAB 函数与样例 …… 305
6.10.1 相关的 MATLAB 函数简介 …… 305
6.10.2 MATLAB 例程 …… 308
6.10.3 数字微分器设计 …… 310
6.11 本章小结 …… 315
习题 …… 315

第 7 章 希尔伯特变换和复倒谱 …… 318

7.1 连续时间信号的希尔伯特变换 …… 318
7.2 离散时间信号的希尔伯特变换和实现 …… 320
7.2.1 希尔伯特变换器的实现 …… 322
7.2.2 希尔伯特变换的应用 …… 323
7.3 频域的希尔伯特变换关系 …… 324
7.3.1 频域实部和虚部之间的希尔伯特变换关系 …… 324
7.3.2 变换域的幅度与相位关系 …… 326
*7.4 复倒谱 …… 327

7.4.1 复倒谱的定义和基本性质 …… 327
7.4.2 有理分式 z 变换的复倒谱 …… 328
7.4.3 一般采样序列的复倒谱计算 …… 330
7.4.4 复倒谱的一些应用 …… 331
*7.5 希尔伯特-黄变换和实验模态分析 …… 335
7.5.1 HHT 的定义 …… 335
7.5.2 实验模态分解 …… 336
7.6 与本章相关的 MATLAB 函数与实例 …… 340
7.6.1 相关的 MATLAB 函数简介 …… 340
7.6.2 MATLAB 例程 …… 341
7.6.3 希尔伯特变换器设计 …… 345
7.7 本章小结 …… 348
习题 …… 348

第 8 章 多采样率信号处理 …… 349

8.1 采样率转换 …… 349
8.1.1 整数倍降采样率 …… 349
8.1.2 整数倍升采样率 …… 353
8.1.3 有理分数倍采样率转换 …… 355
8.1.4 抽取和插值的线性时变性 …… 356
8.2 采样率转换的高效实现结构 …… 356
8.2.1 抽取和零插值与滤波器的交换等价性 …… 356
8.2.2 采样率转换的级联形式 …… 357
8.2.3 滤波器的多相实现 …… 360
8.2.4 降采样率系统的多相实现 …… 361
8.2.5 升采样率系统的多相实现 …… 362
8.3 积分器-梳状滤波级联系统 …… 362
8.4 升采样率系统与奈奎斯特滤波器 …… 365
8.4.1 奈奎斯特滤波器 …… 365
8.4.2 奈奎斯特滤波器的窗函数法设计 …… 368
8.4.3 半带滤波器设计 …… 368
*8.5 均匀滤波器组 …… 371
8.5.1 均匀 DFT 滤波器组分解 …… 371
8.5.2 均匀 DFT 滤波器组合 …… 374
8.5.3 DFT 的滤波器组解释 …… 374
8.6 双通道准确重构滤波器组 …… 376
8.6.1 准确重构条件 …… 376
8.6.2 正交镜像滤波器组 …… 379
8.6.3 共轭正交滤波器组 …… 380

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

8.6.4 准确重构滤波器组的一般解 …… 381
8.6.5 准确重构双正交线性相位滤波器组 …… 382
8.6.5 能量保持准确重构滤波器组 …… 383
*8.7 多通道准确重构滤波器组 …… 384
8.7.1 由双通道级联的多通道滤波器组 …… 385
8.7.2 一般 M 通道滤波器组 …… 387
*8.8 复用转换滤波器组 …… 389
*8.9 连续和离散小波变换简介 …… 390
8.9.1 连续小波变换 …… 391
8.9.2 尺度和位移离散化的小波变换 …… 391
8.9.3 多分辨分析和正交小波基 …… 392
8.9.4 离散小波变换的 Mallat 算法 …… 396
8.9.5 双正交小波变换 …… 398
8.10 与本章相关的 MATLAB 函数与实例 …… 400
8.10.1 相关的 MATLAB 函数简介 …… 400
8.10.2 MATLAB 例程 …… 406
8.11 本章小结 …… 410
习题 …… 411

第 9 章 线性自适应滤波器初步 …… 414

9.1 自适应滤波器概述 …… 416
9.2 最陡下降法 …… 418
9.3 LMS 自适应滤波算法 …… 420
9.3.1 LMS 算法 …… 421
9.3.2 LMS 算法的收敛性分析 …… 421
9.3.3 一些改进的 LMS 算法 …… 423
9.4 递推 LS 算法 …… 424
9.4.1 最小二乘滤波 …… 425
9.4.2 基本 RLS 算法 …… 426
9.5 LMS 和 RLS 算法对自适应均衡器的一些仿真结果 …… 429
9.6 与本章相关的 MATLAB 函数与实例 …… 432
9.6.1 相关的 MATLAB 函数简介 …… 432
9.6.2 MATLAB 例程 …… 434
9.7 本章小结 …… 436
习题 …… 437

第 10 章 有限字长效应 …… 439

10.1 二进制数据表示和量化误差 …… 440
10.1.1 二进制数据表示 …… 440

10.1.2 有限位二进制定点表示的量化误差 …… 441
10.1.3 量化误差的统计分析模型 …… 443
10.2 A/D 变换器的量化误差 …… 444
10.2.1 ADC 量化模型 …… 444
10.2.2 ADC 误差经过系统的传播 …… 445
10.3 数字系统运算量化误差的统计分析 …… 446
10.3.1 数字系统直接实现的误差分析 …… 446
10.3.2 系统级联和并联实现的误差分析 …… 449
10.3.3 乘法累加器结构 …… 451
10.4 防止溢出和压缩比例因子 …… 452
*10.5 量化噪声分析的状态空间方法 …… 456
10.5.1 运算量化噪声计算的状态方程法 …… 456
10.5.2 压缩比例因子计算的状态方程法 …… 459
10.6 滤波器系数有限字长的影响 …… 462
10.6.1 系数量化对极点位置的影响 …… 462
10.6.2 系数量化影响极点偏移的结构依赖性 …… 464
10.7 有限字长的非线性效应：极限环效应 …… 466
10.8 DFT/FFT 运算的有限字长效应 …… 469
10.8.1 DFT 直接实现的量化误差分析 …… 469
10.8.2 定点 FFT 实现的量化效应分析 …… 469
*10.9 自适应滤波的有限字长效应 …… 471
10.10 与本章相关的 MATLAB 函数与实例 …… 472
10.10.1 相关的 MATLAB 函数简介 …… 472
10.10.2 MATLAB 例程 …… 473
10.11 本章小结 …… 480
习题 …… 480

***第 11 章 采样与重构技术** …… 482

11.1 带通采样定理 …… 482
11.2 I/Q 采样技术 …… 486
11.3 信号处理技术在 A/D 转换器中的应用 …… 489
11.3.1 降低对抗混叠模拟滤波器的要求 …… 490
11.3.2 提高 A/D 转换器的有效量化位数 …… 490
11.3.3 噪声成形和 Σ－Δ A/D 转换器 …… 491
11.4 D/A 转换器和补偿技术 …… 493
11.5 亚奈奎斯特采样与压缩感知技术简介 …… 495
11.6 小结 …… 499

*第 12 章 数字信号处理系统的实现 …… 500

12.1 数字信号处理系统的组成 …… 500
12.2 实时数字信号处理系统的基本概念 …… 502
12.3 数字信号处理器 DSP …… 504
12.4 可编程逻辑器件 CPLD 和 FPGA 实现信号处理系统 …… 509
12.5 本章小结 …… 512

附录 A …… 513

A.1 一些数学基础补充 …… 513
A.2 矩阵的特征分解 …… 515
A.3 方程组的最小二乘解 …… 516

参考文献 …… 517

绪　论

人自身具有很强的信号处理能力，眼睛获取的视觉信号、耳朵获取的听觉信号、鼻子获取的嗅觉信号、舌头获取的味觉信号、皮肤获取的触觉、痛觉和温度感觉信号等，最终由神经中枢对其进行处理，获取对环境的感知。早期设计的很多系统其信号处理功能需要借助人脑这个强大的处理器来完成。比如早期的电报，需要人工编码、发送、译码；早期的电话需要人工接线完成交换；早期的雷达需要人工观察雷达回波，发现、测量和跟踪目标等。为了把人从复杂的信号处理任务中解放出来，避免人工处理信号易疲劳、易犯错误等不利因素，自第一次世界大战以来，机器自动处理信号成为研究的重点，并且取得了长足进步。数字信号处理就是在这种需求的驱动之下应运而生的。

如今数字信号处理技术的成果已经应用到我们生活的方方面面，家用固定电话、移动电话、网络电话、网络视频、数字电视、数字电影等，民用的现代医疗影像仪器、交通流传感器等，军用的数字保密通信、现代雷达、声纳系统等，均广泛采用数字信号处理技术。当今电子信息领域的科研和技术人员有必要掌握数字信号处理的基本原理与技术。

尽管数字信号处理的应用已经十分广泛，但并不表示这项技术已经成熟定型，相反，它仍在快速发展之中。早期数字化主要是在基带，后来发展到中频，现在已经在向射频延伸；早期的数字信号处理系统主要是由数字电路实现，后来发展到用计算机和数字信号处理器实现，现在已经在向网络分布式处理发展；早期的数字信号处理主要面向线性时不变系统，利用正交变换、线性运算等数学工具，后来发展出自适应滤波、小波变换、神经网络等新方法，现在数字信号处理技术正在向非线性系统发展并对非线性数学工具提出新的要求；早期的信号处理主要研究以函数形式表示的信号，后来发展到信号处理之后的数据处理和数据融合，现在信号处理技术正在向数据挖掘、认知等更加复杂的研究数据之间关系的方向发展。所有这些新的发展方向和已经或即将出现的新理论、新技术，无疑会给人类的科技活动带来更加深刻而复杂的变化，而这一切都是以数字信号处理技术的基本理论和技术为基础的。学习好数字信号处理这门课程，能够给未来从事这些新领域的研究和开发工作打下坚实的基础。

本绪论共有两部分内容：第一部分介绍数字信号处理的基本概念，本门课程的主要内容及其相互关系以及学习本门课程需要重点注意的问题；第二部分简要介绍数字信号处理相关理论和技术的发展历史，以期让读者概要了解与本门课程相关的学科发展历程，相关概念、理论、技术和方法的来历，从中体会到科学研究从具体到抽象、从模糊到清晰、从简陋到完善的过程，领悟科学研究的基本规律。

0.1 信号的基本概念和分类

为了加强对基本概念的重视，这里引用逻辑学关于概念及其层次的几个术语，帮助读者理解概念及其层次性对工程学科学习的作用。

概念(concept)是人类在长期实践过程中逐步形成的对某类事物的共同本质特征的认识，概念是一种思维形式，是事物在人脑中的一种反映，是人脑对事物本质特征的抽象概括。概念本身随着主观和客观的发展而变化，由具体到抽象，由肤浅到深入。概念的形成大大简化了人的思维过程，也极大地提高了人和人之间交流的效率。不同的人对同一个概念的认识，既有共通性，也会有差异。深入讨论概念，澄清概念的本质，有助于消除这种差异。对于从事科学研究工作的人来说，无论是为了更好地从事创新性科学研究和工程实践，还是为了更好地加强与同行的学术交流和科研合作，首先必须准确清晰地把握自身领域的基本概念。每个行业都有自己的一套概念体系和相应的术语体系(terminology)，只有深入准确地理解了概念的内涵，才能算是“入了行”；只有能够正确使用概念的术语，才能算是学会“说行话”。

概念是有层次性的，就好比洋葱皮，层层包裹。大概念包含小概念，小概念从属于大概念。这里的“大小”指的是概念的外延(denotation，extension)，即概念所指的对象的范围。大概念称为属(genus)，小概念称为种(species)。属的外延大，包含种；种的外延小，归于属；一个种相对于同一属中其他种的特殊性就是种差(differentia)。种差增加了种的内涵(connotation，intension)，因此，种的内涵比属更丰富。利用概念的属和种差给概念下定义是逻辑学中常用的一种方法，相应的定义公式为：概念＝概念所归的属＋种差。属的性质和种差构成了概念的本质特征。

“数字信号处理(digital signal processing)”这个名称包含了三个基本概念：数字(digital)、信号(signal)、处理(processing)。学习这门课的学生应该对信号比较熟悉了，因此我们先从“信号”这个概念入手，对信号的基本特性稍作分析，然后再讨论什么是“数字”，什么是“信号处理”。

信号的概念包罗万象，举例来说，日常交流中的语言、手势、眼神、表情等都是信号；画家用线条、色彩、浓淡构成的图画是一种信号；音乐家用音符、节奏、强弱构成的乐曲是一种信号；舞蹈家用身体的动作构成的舞蹈也是一种信号，如此等等，举不胜举。从这些信号的具体形式中抽象出来，人们把表达某种内容的形式称之为“信号”。为了避免漫无边际地讨论，我们把对信号这个概念的讨论集中到电子学范畴里来。

电信号 在电子学中，信号(signal)这个概念通常是指作为时间的函数的电量。电量(electric quantity)作为时间的函数也可以简称为电量函数。因此，电子学的信号就是电量函数，简称为电信号。这里所说的电量，可以是电荷量、电压、电流或电磁场强度。这个定义中只把时间规定为电量函数的自变量严格来讲是不完善的，比如二维图像信号是以二维空间变量作为自变量的，视频信号则是以二维空间再加上时间共三维变量作为自变量的。虽然时间和空间在物理上是不同的，但是从数学分析的角度而言，无论是时间还是空间，无论是一维还是多维，都是函数的自变量，数学分析手段对于不同的自变量是统一的，因此从数学的角度看，没有必要在信号定义中区分时间和空间。只要了解了以时间作为自变量的信

号处理技术，那么对以空间作为自变量的信号处理技术也就了解了。二者虽然在处理技术上有差别，但是本质上是共通的，也就无须在目前这个层次上分开讨论。

如此定义电子学的信号对于采用数学工具研究信号处理问题是方便的，因为这样就把信号处理问题转化为对函数所做的各种操作，而对函数的操作是有坚实的数学基础的，这就是分析数学(analysis)。但是这样的定义只反映了各种信号外在表示上的共同特征，并没有反映具体信号的本质特征。在不同领域中，信号有着不同的本质含义。不少“信号与系统”教材中都对信号的本质特性予以讨论，并且通常以通信信号作为重点。之所以如此，是因为信号的存在绝大多数情况下是为了达成人与人之间、人与机器之间、机器与机器之间交流信息的目的，而交流信息就是通信。

通信信号 这里所说的“通信”(communications)是指无线电和电子学范畴的广义的通信学科，而不是狭义的电信(telecom)或者广播(broadcasting)。电信和广播有时也统称为“通信”(communication)，比如电子对抗领域经常把通信(communication)与雷达(radar)和无线电导航(radio navigation)并列。在汉语中，通信有时称为“通讯”，这时是指狭义的通信；英语里面也有用 telecommunications 替代 communication 表示狭义通信的情况，很容易混淆，读者在阅读时要根据上下文注意区分。下文中我们用“通信”(communications)表示广义的通信，它包括了电信、广播、雷达和无线电导航，等等。

在通信中，信号的本质特征是“携带有消息”，消息(message)是信号的内容，信号是消息的载体或者消息的外在表现形式，所以可以说，通信信号是携带有消息的电信号。电量随着时间的变化表达了某种内容，这个内容就是信号所携带的消息。根据香农(Shannon)的信息理论(Information Theory)，确定性的消息不带有信息(信息量为零)。不变的电量(常函数)没有不确定性，其携带的消息是确定性的，显然不带有信息，所以通信信号一定是变化着的电量；有些电量虽然是变化的，但是变化规律是确定的(比如单频正弦波的幅度、频率和相位都确定)，这种确定性的电量函数携带的消息也是确定性的，同样是不带有信息的。所以通常在通信中论及“信号”时，不仅意味着某个电量是随时间变化着的，而且其变化有不确定性。从通信的角度看，接收到信息量为零的消息一般没有实际意义，所以可以更进一步地规定通信信号的本质特征是“携带有信息”，即通信信号是携带有信息的电量函数(电信号)。

从以上分析可以看出，通信信号是一种特殊的电信号，电信号是“属”概念，通信信号是“种”概念。通信信号这“种”信号和其他电信号相比有差别，这个差别就是“携带有信息”。“携带有信息”就是通信信号与其他电信号之间的“种差”。这个种差给通信信号增加了内涵，因此通信信号比一般电信号的内涵要丰富。

通信信号所携带的信息可以是由发送端的发送者在产生信号时加载上去的，也可以是信号传输过程中由信道的不确定性作用加载上去的，或者二者兼而有之。发送者加载信息的情况如电报、电话、手机、网络、广播、电视等电信和广播系统，对于这样的信号，我们通常视信号传输过程中信道的各种影响为对信号的负面影响，需要在接收端予以补偿(均衡)。由信道的作用加载信息的情况，雷达正是一例。在雷达中，一般情况下发送的信号并不带有信息，其信息是在信号传输过程中，由于目标对信号反射或者转发而加载上去的。如果把目标也看成信道的一部分，则可以说，雷达信号的信息是由信道的作用加载上去的。同时由发送者和信道加载信息的情况，无源雷达可算作一例。无源雷达利用其他辐射源发射的信号

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com