



普通高等教育“十二五”规划教材

数字信号处理 简明教程

主 编 于凤芹
副主编 张志刚 李昌利



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

数字信号处理简明教程

主 编 于凤芹

副主编 张志刚 李昌利

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书共7章,由三部分组成:第一部分是离散时间信号与系统分析基础,包括离散时间信号与系统的基本概念以及时域描述、频域描述、 z 域描述的原理与方法,第二部分是数字谱分析,包括离散傅里叶变换和快速傅里叶变换,着重说明对连续信号进行数字谱分析的原理、产生的误差和解决的对策,以及快速傅里叶变换的原理,第三部分是数字滤波器设计,包括冲激响应不变法和双线性变换法设计 IIR 数字滤波器、窗函数法设计线性相位 FIR 滤波器、数字滤波器的结构表示。在第2~7章中,还介绍 MATLAB 的具体使用方法。

本书结构体系新颖,内容取舍适度,阐述简明扼要,可作为普通高等院校电子信息工程、通信工程、自动化、电气工程及其自动化、计算机应用、物联网工程、生物医学工程等专业的课程教材,也可作为科技人员学习数字信号处理的简明读物。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理简明教程/于凤芹主编. —北京:科学出版社,2011
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978 7 03-032013-1

I ①数… II ①于… III. ①数字信号处理:高等学校-教材
IV. ①TN911 72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 161024 号

责任编辑:匡敏 刘鹏飞 卜新 / 责任校对:陈王凤
责任印制:张克忠 / 封面设计:速底书装

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>

保定市 中画美凯印刷有限公司印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年7月第一版 开本:720×1000 1/16

2011年7月第一次印刷 印张:11

印数:1—3 500 字数:230 000

定价:25.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

进入 21 世纪,信息技术的发展突飞猛进,信号与信息处理构成信息学科的主要部分,而数字信号处理则是信号与信息处理学科的基础。“数字信号处理”课程是普通高等院校电子信息工程、通信工程、自动化、电气工程及其自动化、计算机应用、物联网工程、生物医学工程等专业本科生重要的专业基础课。随着信息技术在现代社会应用的普及和深入,数字信号处理理论和技术日益发挥着重要作用。

本书在编者多年教学实践经验的基础上,试图将数字信号处理的数字谱分析和数字滤波器设计两大基本内容深入浅出、透彻清晰地讲解出来,使读者容易理解并掌握数字信号处理的基本概念,能够利用数字信号处理的基本理论和基本算法解决实际问题。

本书的主要特色如下:

(1)结构独特,体系新颖。全书由离散时间信号与系统分析基础、数字谱分析、数字滤波器设计三部分组成。第一部分介绍离散时间信号与系统的时域描述、频域描述、 z 域描述的原理与方法;第二部分介绍离散傅里叶变换的定义、物理意义和性质,着重说明对连续信号进行数字谱分析的原理、产生的误差和解决的对策,阐述快速傅里叶变换的原理;第三部分介绍冲激响应不变法和双线性变换法设计 IIR 滤波器、窗函数法设计线性相位 FIR 数字滤波器、数字滤波器的结构表示。

(2)内容取舍合理,注重基础性和先进性。鉴于目前普通本科院校学生的实际理解接受能力和授课学时有限,不主张将研究生阶段课程中的现代信号处理、小波变换等内容渗透到数字信号处理课程中,本书重点介绍数字信号处理中的数字谱分析和数字滤波器设计两大基本内容,保证教材的基础性;将计算机仿真工具 MATLAB 引入课程,使学生学以致用,为避免初学者分不清课程内容与使用工具之间的关系,也考虑到教学的方便性,在相应章节的最后介绍 MATLAB 工具如何应用,从而体现教材的先进性。

(3)叙述深入浅出,简洁明了。本书试图改变数字信号处理课程内容过多过难、篇幅过大的通病,简化数学推导过程,抓住知识点所对应的物理现象和工程背景来讲述。着力帮助学生解决“解题难”的问题,通过适量的例题介绍分析方法和解题技巧,促进学生对本概念和基本理论的理解。

本书第一部分由江南大学于凤芹教授编写,第二部分由广东海洋大学李昌利副教授编写,第三部分由烟台大学张志刚副教授和李爱华老师编写。于凤芹教授负责全书的策划申报、体系构思、组织编写,并负责统稿。

编者水平有限,在书中若有不妥之处,真诚希望读者提出宝贵意见和建议!联系方式:yufq@jiangnan.edu.cn。

编 者

2011 年 5 月 28 日

目 录

前言

第一部分 离散时间信号与系统分析基础

| | |
|-----------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 2 |
| 1.1 数字信号处理的基本概念 | 2 |
| 1.2 数字信号处理系统的特点 | 3 |
| 1.3 数字信号处理的发展与应用领域 | 4 |
| 1.4 本书体系安排与内容导读 | 6 |
| 第 2 章 离散时间信号与系统的描述方法 | 9 |
| 2.1 时域采样与恢复 | 9 |
| 2.1.1 时域采样 | 9 |
| 2.1.2 采样信号的频谱与采样定理..... | 10 |
| 2.1.3 采样信号的恢复..... | 12 |
| 2.2 时域离散信号——序列..... | 13 |
| 2.3 离散时间系统的时域描述..... | 17 |
| 2.3.1 LTI 离散时间系统..... | 17 |
| 2.3.2 LTI 离散时间系统的单位脉冲响应..... | 18 |
| 2.3.3 离散时间系统的线性常系数差分方程..... | 20 |
| 2.4 离散时间信号与系统的频域描述..... | 21 |
| 2.4.1 离散时间傅里叶变换的定义与性质..... | 21 |
| 2.4.2 离散时间系统的频率响应..... | 23 |
| 2.5 离散时间信号与系统的 z 域描述..... | 24 |
| 2.5.1 z 变换的定义及收敛域 | 24 |
| 2.5.2 z 变换的基本性质和定理 | 26 |
| 2.5.3 z 反变换 | 29 |
| 2.5.4 离散时间系统的系统函数..... | 30 |
| 2.6 MATLAB 用于离散时间信号与系统分析 | 34 |
| 2.6.1 用 MATLAB 实现序列产生及其基本运算 | 34 |
| 2.6.2 用 MATLAB 求解差分方程..... | 36 |

| | |
|------------------------------------|----|
| 2.6.3 用 MATLAB 计算 DTFT | 37 |
| 2.6.4 用 MATLAB 进行系统的 z 域分析 | 39 |
| 习题 | 41 |

第二部分 数字谱分析

| | |
|--------------------------------|----|
| 第 3 章 离散傅里叶变换 | 46 |
| 3.1 信号频域分析的几种形式 | 46 |
| 3.1.1 连续时间非周期信号的傅里叶变换 | 46 |
| 3.1.2 连续时间周期信号的傅里叶级数表示 | 46 |
| 3.1.3 序列的离散时间傅里叶变换 | 47 |
| 3.1.4 周期序列的离散傅里叶级数 | 48 |
| 3.2 离散傅里叶级数的定义和性质 | 49 |
| 3.3 离散傅里叶变换 | 50 |
| 3.3.1 离散傅里叶变换的定义 | 50 |
| 3.3.2 离散傅里叶变换的物理意义 | 52 |
| 3.3.3 离散傅里叶变换的性质 | 55 |
| 3.4 用 DFT 计算数字频谱的误差及解决方法 | 64 |
| 3.5 用 MATLAB 实现离散傅里叶变换 | 68 |
| 习题 | 70 |
| 第 4 章 快速傅里叶变换 | 71 |
| 4.1 快速傅里叶变换的基本方法 | 71 |
| 4.1.1 基 2 时间抽取的快速傅里叶变换 | 71 |
| 4.1.2 基 2 频率抽取的快速傅里叶变换 | 75 |
| 4.2 离散傅里叶反变换的快速算法 | 78 |
| 4.3 快速傅里叶变换的应用 | 79 |
| 4.3.1 利用快速傅里叶变换计算线性卷积 | 79 |
| 4.3.2 利用快速傅里叶变换计算相关函数 | 87 |
| 4.4 用 MATLAB 实现快速傅里叶变换 | 87 |
| 习题 | 89 |

第三部分 数字滤波器设计

| | |
|-----------------------------------|----|
| 第 5 章 IIR 数字滤波器的设计方法 | 92 |
| 5.1 数字滤波器设计的相关概念 | 92 |
| 5.1.1 滤波的基本概念 | 92 |

| | | |
|--------------|----------------------------------|------------|
| 5.1.2 | 数字滤波器的分类 | 94 |
| 5.1.3 | 数字低通滤波器的技术指标 | 95 |
| 5.1.4 | IIR 滤波器的设计方法 | 96 |
| 5.2 | 模拟低通原型滤波器的设计方法 | 97 |
| 5.2.1 | 模拟低通滤波器的技术指标 | 97 |
| 5.2.2 | Butterworth 模拟低通滤波器的设计 | 98 |
| 5.3 | 冲激响应不变法设计 IIR 滤波器 | 103 |
| 5.3.1 | 冲激响应不变法的映射关系 | 103 |
| 5.3.2 | 原型模拟滤波器与数字滤波器的频响关系 | 104 |
| 5.3.3 | 冲激响应不变法的设计方法 | 105 |
| 5.4 | 双线性变换法设计 IIR 滤波器 | 107 |
| 5.4.1 | 双线性变换法的映射关系 | 108 |
| 5.4.2 | 频率的预畸变校正 | 109 |
| 5.4.3 | 双线性变换法的设计方法 | 110 |
| 5.5 | 用 MATLAB 设计 IIR 滤波器 | 112 |
| 5.5.1 | Butterworth 模拟低通滤波器的 MATLAB 设计方法 | 112 |
| 5.5.2 | 其他类型低通滤波器的 MATLAB 设计方法 | 113 |
| 5.5.3 | 高通、带通和带阻滤波器的设计 | 119 |
| 5.5.4 | 脉冲响应不变法的 MATLAB 实现 | 119 |
| 5.5.5 | 双线性变换法的 MATLAB 实现 | 120 |
| 5.5.6 | 直接用 MATLAB 命令设计数字滤波器 | 120 |
| | 习题 | 121 |
| 第 6 章 | FIR 数字滤波器的设计方法 | 125 |
| 6.1 | 线性相位 FIR 数字滤波器的条件和特点 | 125 |
| 6.1.1 | FIR 数字滤波器的线性相位条件 | 126 |
| 6.1.2 | 线性相位 FIR 数字滤波器的幅度特性 | 127 |
| 6.1.3 | 线性相位 FIR 数字滤波器的零点分布 | 131 |
| 6.2 | 窗函数法设计线性相位 FIR 数字滤波器 | 132 |
| 6.2.1 | 矩形窗函数法设计线性相位 FIR 数字滤波器 | 132 |
| 6.2.2 | 常用窗函数及性能分析 | 139 |
| 6.2.3 | 窗函数法设计 FIR 数字滤波器的步骤 | 145 |
| 6.3 | 用 MATLAB 设计 FIR 数字滤波器 | 146 |
| | 习题 | 149 |
| 第 7 章 | 数字滤波器的结构表示 | 153 |
| 7.1 | IIR 数字滤波器的基本结构 | 154 |
| 7.1.1 | 直接型结构 | 154 |

| | | |
|-------|------------------------|-----|
| 7.1.2 | 级联型结构 | 155 |
| 7.1.3 | 并联型结构 | 156 |
| 7.1.4 | 网络结构的 MATLAB 实现 | 158 |
| 7.2 | FIR 数字滤波器的基本结构 | 160 |
| 7.2.1 | 卷积型结构 | 160 |
| 7.2.2 | FIR 数字滤波器的线性相位结构 | 161 |
| | 习题 | 162 |
| | 参考文献 | 165 |

第一部分

离散时间信号与系统分析基础

第 1 章 绪 论

本章阐述数字信号处理的基本概念,说明对模拟信号进行数字化处理的一般过程,总结数字信号处理系统的特点,介绍数字信号处理技术的应用领域,概括数字信号处理课程的构成体系和各章内容导读。

1.1 数字信号处理的基本概念

信号携带着反映客观物理世界的丰富信息,为了获取蕴藏在信号中的信息,需要对信号进行不同的分析和处理。例如,对信号滤波可以限制信号的频带宽度或者滤除干扰和噪声的影响;对信号频谱分析可以了解信号频谱的组成与分布;对信号特征提取可以进行模式识别;对信号编码可以达到压缩数据便于传输与存储目的。

信号分析与处理可以利用模拟电路实现,也可以通过数字计算方式完成。例如,由电阻和电容组成的模拟高通滤波器所完成的滤波任务,可以由加法器、乘法器和延时器组成的数字高通滤波器来完成。所谓数字信号处理,就是将信号转换成为数字序列,在通用计算机或者专用数字处理设备,通过执行特定的算法程序,对数字序列进行各种处理和变换,将信号转换成为符合某种需要的形式。

信号表现为随时间变化的物理量,一般用连续时间变量的函数来表示,称为连续时间信号。如果信号在幅度上也是连续的,则称为连续时间连续幅度信号,简称模拟信号。对模拟信号进行数字化处理,一般要经过如图 1-1 所示的几个过程,每个过程完成特定的功能。模拟信号 $x_a(t)$ 首先经过前置低通滤波后,经过 A/D 转换器的时间采样和幅度量化后,成为时间和幅度均不连续的离散时间离散幅度信号,简称数字信号 $x(n)$ 。将数字信号送入数字信号处理系统进行数字化处理,经过数字系统处理后得到输出信号 $y(n)$,通过 D/A 转换还原为模拟信号,最后经过模拟低通平滑滤波器得到所需要的模拟输出信号 $y_a(t)$ 。

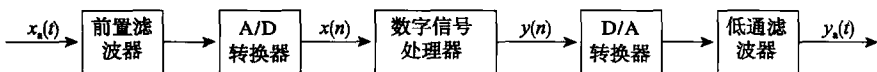


图 1-1 数字信号处理系统的组成

根据输入信号的不同形式和输出信号的具体要求,一个实际的数字信号处理系统不一定需要图 1-1 所示系统中的所有过程。如果系统的输出是以数字形式显示或打印,则不需要 D/A 转换过程。分析和处理数字化存储的语音和图像信号,就不用进行

A/D 转换。

数字信号处理系统有以下三种方式：一是编写算法程序在通用计算机上执行的软件实现方式，一般用于实验教学、算法仿真和速度要求不高的应用场合；二是由专用的信号处理的集成电路单元构成的硬件实现方式，如快速傅里叶变换芯片、数字滤波器芯片等，一般用于不需要修改、设备已定型且大批量生产的高速实时处理设备；三是软硬件结合实现方式，数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)芯片内部带有硬件乘法器、累加器，指令执行采用流水线的并行结构，配有适合信号处理运算的高效指令，具有便于灵活开发应用和高速实时处理等优点，DSP 技术已经成为数字信号处理应用的核心实现技术之一。

1.2 数字信号处理系统的特点

数字信号处理系统除了具有数字系统的共同优点，如稳定性高、抗干扰好、可靠性强、便于大规模集成等外，与模拟处理系统相比，数字信号处理系统还具有如下优点。

1) 灵活性好

数字信号处理采用专用或通用的数字系统，数字系统的性能取决于系统的结构和参数，而系统的结构和参数存储在数字系统中，只要通过程序改变系统的结构和程序参数就可以改变系统的性能。例如，利用一个可以改变系统参数的可编程数字系统，实现截止频率可以调整的滤波器，而如果需要改变一个模拟系统的性能，则必须完全进行重新设计来实现。

2) 处理精度高

模拟系统的精度取决于电路结构和元器件的精度，而数字系统的精度则取决于处理器的字长。在模拟电路中，元器件精度要达到 10^{-3} 以上已不容易，而数字系统 17 位字长可以达到 10^{-5} 的精度却属平常。例如，基于离散傅里叶变换的数字式频谱分析仪，其幅值精度和频率分辨率均远远高于模拟频谱分析仪。

3) 可以实现模拟系统很难达到的特性

数字处理系统可以实现模拟系统不可能实现的某些特性。如 FIR 数字滤波器可以实现严格的线性相位特性；模拟的理想低通滤波器被证明是物理上不可实现的系统，而在数字处理系统中通过将信号存储起来，用延迟的方法可以实现非因果系统，数字的低通滤波器可以无限逼近理想低通滤波器性能；数字信号方式可以处理频率非常低的信号，如地震应用中出现的信号频率都很低，如果利用模拟电路进行处理，需要的电感和电容在物理上尺寸将很大，而数字处理系统很容易处理频率比较低的信号。此外，数字系统通过数学变换算法编写程序来实现各种复杂的处理，如数字电视系统的多画面、各种特技效果、特殊的音响和配音效果。

4) 可以实现多维、多通道信号处理

一般数字处理系统具有强大的存储单元，可以存储二维图像信号或三维视频信号，

数字系统能够处理多维信号。多通道信号分析与处理理论和技术,已广泛应用于移动通信系统和卫星通信系统等,利用数字系统高效的 CPU 处理能力和庞大的存储能力,数字系统可以实现多通道信号处理。

5)但与模式处理系统相比,数字信号处理系统具有如下缺点:

对模拟信号进行数字化处理时,需要附加 A/D 和 D/A 转换等预处理和后处理电路,增加了系统的复杂性。数字处理系统有效频率处理范围主要由采样速度以及 A/D 转换器分辨率决定,由于受到技术和工艺的发展限制,目前的数字处理系统处理信号的频率范围仍受到一些制约。数字信号处理系统由耗电的有源器件构成,一个数字信号处理芯片可能包含了几十万个甚至更多的晶体管,而模拟处理系统大量使用电阻、电容、电感等无源器件,所以,数字处理系统的功耗比较大,随着系统的复杂性增加,这一矛盾将会更加突出。

1.3 数字信号处理的发展与应用领域

一般认为,数字信号处理学科始于 1965 年美国科学家 Cooley 和 Tukey 提出的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)。FFT 是快速计算数字频谱的方法,在当时的计算机资源条件下,把按照定义计算离散傅里叶变换的速度提高了两个数量级,从而使数字信号处理从理论走向实际应用。FFT 的意义不仅在于其快速计算傅里叶变换的思想,而且它启发人们发展信号处理新理论和完善新算法,卷积、相关、系统函数、功率谱等经典的线性系统理论中的概念,都在 FFT 意义上重新定义并快速计算。随着电子技术和计算机技术的飞速发展,承载数字信号处理理论的器件不断发展和完善,尤其是专门用于数字信号处理的功能强大的数字信号处理器(DSP)的出现,使数字信号处理技术得到广泛应用。现在,随着互联网、个人移动通信以及近年来提出的物联网技术的普及应用,对数字信号处理技术提出了更高的要求。

数字信号处理学科的内容非常丰富,主要是因为它有着非常广泛的应用领域,而不同的应用领域对数字信号处理学科又提出了不同的具体要求,更进一步丰富和发展了数字信号处理的新理论和新技术。以下简要介绍数字信号处理的主要应用领域。

1. 语音信号与音乐信号处理

语音信号处理是研究利用数字信号处理技术对语音信号进行处理的一门新兴的交叉学科,即用数字化方法对语音信号进行存储、压缩、传输、识别、合成、增强等处理。同时,语音信号是理想的人机交互的输入方式,人们梦寐以求地幻想计算机能够像人一样“听”和“说”,利用人工智能信息处理,对语音信号分析、识别与合成的研究和应用是语音信号处理的研究热点之一。使用信号处理技术还可以对音乐信号处理,如使用压缩器和扩张器来压缩或扩张音乐信号的幅度范围;使用均衡器和滤波器改变音乐信号的频率分布,通过这些处理,纠正在录音或传输过程中的缺陷,改善音乐信号的音质和

音色。

2. 生物医学信号分析与处理

心脏的电活动用心电图(ECG)表示,典型的心电图基本上是一个周期性的波形,表示血液从心脏到动脉传输的一个循环。心电图波形的每一部分都携带着医生分析患者心脏状态的信息,利用智能信息处理技术,对心电图信号自动的检测定位并识别,来辅助医生进行疾病诊断。同样,脑电图(EEG)表示大脑中上亿个单独神经元随机触发的电活动的总和,根据脑电图信号的时域波形或频谱图可以诊断癫痫、失眠等疾病类型。此外,由于生物医学信号获取过程易受各种噪声和干扰影响,介入了虚假信号的心电图或脑电图使医生很难做出正确的判断,利用信号处理的方法对微弱的生物医学信号滤波,是对生物医学信号分析与处理的必要环节。

3. 地震信号与地质勘探信号的分析

地震信号是由地震、火山喷发或地下爆炸产生的岩石运动引起的。大地运动产生从运动源通过地球体向所有方向传播的弹性波。地震仪记录了两个水平方向和一个垂直方向地面运动的信号,对这些信号的分析有可能确定地震或核爆炸的幅度及大地运动的起源位置。此外,为了勘探地下储藏的石油、天然气和其他矿藏情况,通常采用人工地震勘探方法来探测地层结构,即在选定的地点人工爆炸产生地震信号,振动波向地下传播时遇到地层分界面产生反射波,在距离振源一定距离的地方放置感受器来接收到达地面的反射波,从反射波的延迟时间和强度可以判断地层的深度和结构。对反射波进行反褶积法和同态滤波法等一系列算法,可以了解地下地质结构性质,并判断是否存在油气等碳氢化合物。

4. 通信信号分析与处理

数字信号处理在通信领域发挥重要作用,尤其在蜂窝移动电话、数字调制与解调、视频和音频的压缩传输技术等方面。例如,信号在信道上传输时,可能会受到信道失真、衰落、电磁干扰等各种影响,接收系统要利用数字信号处理的多种算法来补偿这些干扰的影响,提高通信质量。在卫星通信、TDMA/FDMA/CDMA 移动通信、软件无线电通信等系统中所涉及的自适应脉冲编码、增量调制、自适应均衡、信道复用、调制解调、加密解密、扩频技术等一系列技术都与数字信号处理的理论和算法相关。

5. 图像与视频信号处理

图像信号处理的理论已应用渗透到许多科学技术领域。利用图像处理技术研究粒子的运动轨迹、生物细胞的结构、地貌的状态、气象云图的分析、宇宙星体的构成等。在图像处理的实际应用中,较为瞩目的成果有遥感图像处理技术、计算机断层成像技术、计算机视觉技术和景物分析技术等,如为监测森林火灾、湖水污染、农业灾害等航空拍

摄照片的图像增强与分析,为便于互联网或移动通信网络传输的图像数据压缩,计算机视觉中的图像分割、边缘检测。

6. 雷达与声呐信号处理

雷达与声呐都是利用电磁波探测目标的电子设备,雷达用于空中而声呐置于水下。其工作原理是:雷达或声呐设备发射电磁波对目标进行照射并接收其回波,由此获得目标至电磁波发射点的距离、径向速度、方位、高度等信息。对接收的回波需要进行一系列的数字信号处理才能获得需要的信息。而数字信号处理中的线性系统理论、数字滤波、采样理论、频谱分析理论构成了雷达系统和声呐系统所依赖的信号处理基础技术,在这两个系统中所涉及的目标和干扰模型、匹配滤波、波形设计、多普勒处理、门限检测及恒虚警率等课题都涉及数字信号处理的基本算法。

7. 振动信号处理

振动信号处理的原理是:在测试体上施加一个人为激振力作为输入信号,在测量点处放置各种类型的传感器得到输出信号,输出信号与输入信号之比是该测试体所构成的系统的传递函数。根据得到的传递函数进行系统辨识和模式识别,即所谓模态参数识别分析,从而计算出该测试体的模态刚度、模态阻尼等主要参数。根据这种方法建立的系统数学模型,可以对测试体结构做进一步动态优化设计,在模态参数识别中均可利用数字处理器来进行。机械振动信号的分析与处理技术已应用于汽车、飞机、船只、机械设备、房屋建筑、水坝桥梁的设计和监测实践中。

1.4 本书体系安排与内容导读

从前面介绍的数字信号处理的应用领域可以看出,数字信号处理的内容非常丰富。根据教材的基础性、适应性和发展性原则,本书强调数字信号处理的基本理论和基本方法,以数字谱分析和数字滤波器设计两大核心内容作为主要讨论对象,在相应章节引入MATLAB工具,实现基本算法。

全书由离散时间信号与系统分析基础、数字谱分析、数字滤波器设计三部分组成,如图1-2所示。第一部分离散时间信号与系统分析基础主要介绍数字信号处理的基本概念、离散时间信号的描述方法以及线性时不变离散时间系统分析的基本方法;第二部分数字谱分析是数字信号处理的核心内容,研究如何利用计算机来快速完成连续时间信号的频谱计算;第三部分数字滤波器设计是实现信号处理的重要方法之一,主要思想是根据设计需要设计一个数字系统,使其系统的频率特性满足滤波器类型及其相应的频带要求,以最大限度地抑制或消除干扰信号。学习离散时间信号与系统的基本理论和基本方法,掌握数字谱分析和数字滤波器设计的基本理论和基本方法,是信号与信息处理、通信、电子测量和自动控制等领域科技人员必备的基础知识。

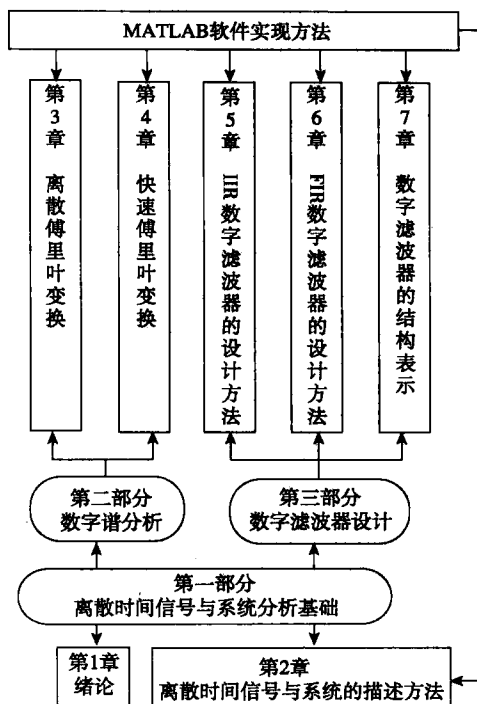


图 1-2 本书内容体系安排

第 1 章介绍数字信号处理的基本概念、对模拟信号进行数字化处理的一般过程、数字信号处理系统的特点、数字信号处理技术的应用领域以及数字信号处理课程的构成体系和各章内容导读。

第 2 章介绍时域采样理论、线性移不变离散时间系统的定义与性质；说明离散时间信号与系统的时域描述方法，即单位脉冲响应和线性常系数差分方程；简述离散时间信号与系统的频域描述，即离散时间傅里叶变换的定义、性质、序列的频率特性、离散时间系统的频率响应；讨论离散时间信号与系统的 z 域描述，包括 z 变换的定义、性质、 z 变换方法、离散时间系统的系统函数的作用；最后用例题和函数调用、程序代码等形式说明 MATLAB 在离散时间信号和系统分析中的应用。

第 3 章首先简要回顾连续时间非周期信号的傅里叶变换(FT)、连续时间周期信号的傅里叶级数(FS)、非周期序列的离散时间傅里叶变换(DTFT)、周期序列的离散傅里叶级数(DFS)等傅里叶变换的不同表现形式；然后讨论离散傅里叶变换的定义、其物理意义、离散傅里叶变换的性质，详细介绍用 DFT 计算数字频谱可能产生的误差及解决方法；最后通过例题形式说明用 MATLAB 实现 DFT 的方法。

第 4 章首先简要分析直接计算 DFT 的运算量和减少计算量的途径，详细说明两种快速傅里叶变换的基本方法，即基 2 时间抽取的 FFT 和基 2 频率抽取的 FFT 的原理

和流图表示;然后介绍利用 FFT 计算线性卷积和计算相关函数两种的 FFT 的应用;最后说明 MATLAB 实现 FFT 的函数调用方法。

第 5 章在简要说明数字滤波器设计的基本概念后,介绍模拟低通原型滤波器设计方法,讨论设计 IIR 滤波器的常用的两种方法,即冲激响应不变法设计 IIR 滤波器和双线性变换法设计 IIR 滤波器的原理和步骤;最后说明用 MATLAB 设计 IIR 滤波器的具体方法。

第 6 章首先说明线性相位 FIR 数字滤波器脉冲响应应该满足的条件、滤波器频率响应特点、系统函数的零点分布规律;然后介绍窗函数法设计线性相位 FIR 数字滤波器设计原理、设计步骤以及不同窗函数的设计性能分析;最后说明如何用 MATLAB 来设计 FIR 滤波器方法。

第 7 章主要讨论数字滤波器如何在计算机上实现的方法。数字滤波器在工程上有软件实现和硬件实现两种方法:一是根据数字滤波器的差分方程或系统函数,通过计算机编程完成滤波功能的软件实现,软件实现方法在 5.5 节和 6.3 节已经详细介绍;二是依据滤波器的算法结构,利用加法器、乘法器以及延时单元的不同组合完成滤波的硬件实现。本章主要讨论硬件实现方法,分别说明 IIR 数字滤波器的基本结构和 FIR 数字滤波器的基本结构。

第 2 章 离散时间信号与系统的描述方法

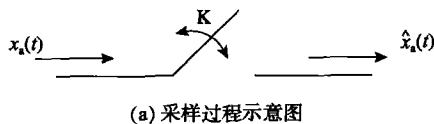
本章首先介绍时域采样理论,然后讨论离散时间信号与系统的时域描述方法、频域描述方法、 z 域描述方法。考虑到在前续的信号与系统等课程中已有的基础,本章将该内容概括并深入拓展。

2.1 时域采样与恢复

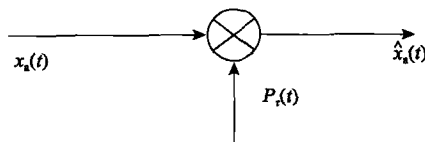
数据采集系统采集到的自然界中物理量一般是随时间变化的模拟信号,对连续信号进行数字处理的第一步,就是将其在时间上采样得到离散时间信号。那么模拟信号经过采样后,要满足什么条件才不会丢失信息?由离散时间信号恢复成连续模拟信号应该具备哪些条件?这是我们要解决的问题。此外,通过对模拟信号的采样以及恢复的讨论,可以将离散时间信号与系统和连续时间信号与系统建立联系。

2.1.1 时域采样

模拟信号 $x_a(t)$ 经过电子开关 K,如图 2-1(a)所示,电子开关 K 每隔 T 短暂地闭合一次,闭合的持续时间是 τ ,开关输出就是采样信号 $\hat{x}_a(t)$ 。电子开关 K 的打开与闭合可以用周期为 T 、持续时间为 τ 的周期脉冲信号 $p_r(t)$ 来描述,则采样信号就是模拟信号 $x_a(t)$ 与周期脉冲信号 $p_r(t)$ 的乘积。所以,采样过程实际上是脉冲调幅过程,如图 2-1(b)所示。



(a) 采样过程示意图



(b) 采样过程的模型表示

图 2-1 采样过程的开关示意与模型表示