



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



高等院校自动化新编系列教材

数字信号处理

SHUZI XINHAO CHULI

王凤文 舒冬梅 赵宏才 编著

惠晓威 主审

(第2版)



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校自动化新编系列教材

数字信号处理

(第2版)

编著 王凤文 舒冬梅 赵宏才
主审 惠晓威



北京邮电大学出版社

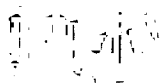
·北京·

内 容 简 介

本书分为上下两篇:上篇为数字信号处理技术的理论基础,包括连续时间信号分析、连续时间系统分析、离散时间信号与系统的时域分析、离散时间信号与系统的频域分析、离散时间信号与系统的数字频域分析、IIR 数字滤波器设计和 FIR 数字滤波器设计 7 章内容;下篇为数字信号处理技术的实现与应用,包括 TMS320C54x 数字信号处理器、TMS320C54x 的指令系统、DSP 的接口与应用设计。

书中给出了大量的习题、例题和 Matlab 仿真实例,在部分章的后面还给出了建议实验内容和实验的设计思路。

本书适合自动化学科数字信号处理技术课程的选用教材。



图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/王凤文,舒冬梅,赵宏才编著. —2 版. —北京:北京邮电大学出版社,2007
ISBN 978-7-5635-1121-1

I. 数… II. ①王…②舒…③赵… III. 数字信号—信号处理—高等学校—教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 049929 号

出版发行:北京邮电大学出版社

社 址:北京市海淀区西土城路 10 号(100876)

北方营销中心:电话 010-62282185 传真 010-62283578

南方营销中心:电话 010-62282902 传真 010-62282735

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:北京忠信诚胶印厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:22

字 数:515 千字

印 数:1—5 000 册

版 次:2006 年 3 月第 1 版 2007 年 6 月第 2 版 2007 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-1121-1/TP·205

定价:32.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社营销中心联系 ·

高等院校自动化新编系列教材

编委会

主 任 汪晋宽

副主任 金海明 罗云林 张美金 崔光照

委 员 (排名不分先后)

于丁文 王凤文 王建国 马淑华 石云霞

齐世清 任彦硕 张家生 张 健 杨建忠

柳明丽 罗长杰 金 伟 赵宏才 赵一丁

顾德英 舒冬梅 藏小杰 郑安平

秘 书 顾德英(兼) 马淑华(兼)

编写说明

一本好的教材和一本好的书不同,一本好的书在于其内容的吸引力和情节的魅力,而一本好的教材不仅要对所介绍的科学知识表达清楚、准确,更重要的是在写作手法上能站在读者的立场上,帮助读者对教材的理解,形成知识链条,进而学会举一反三。基于这种考虑在充分理解自动化专业培养目标和人才需求的前提下,我们规划了这套《高等院校自动化新编系列教材》。

本套系列教材共包括 21 册,在内容取舍划分上,认真分析了各门课程内容的相互关系和衔接,避免了不必要的重复,增加了一些新的内容。在知识结构设计上,保证专业知识完整性的同时,考虑了学生综合能力的培养,并为学生继续学习留有空间。在课程体系规划上,注意了前后知识的贯通,尽可能做到先开的课程为后续的课程提供基础和帮助,后续的课程为先开的课程提供应用的案例,以便于学生对自动化专业的理解。

《高等院校自动化新编系列教材》编委会

2005 年 8 月

再版前言

数字信号处理技术是现今发展最为迅速的学科之一,数字信号处理的理论正在逐步走向成熟,内容也在逐步地扩展。特别是进入到 21 世纪以来,随着超大规模集成电路设计、制造技术和计算机技术的飞速发展,数字信号处理芯片(DSP)的设计和制造技术极速发展,一些性价比极高的 DSP 芯片纷纷推出,使得其应用领域迅速扩大,由原来主要的信号处理、通信、航空、航天、军事应用领域推广到自动化(自适应控制、机器人控制、电机控制、电力线监控、发动机控制等)、仪器仪表、家用电器、生物医学、医疗设备、汽车装备等领域。

为了适应自动化技术发展的需要,培养面向 21 世纪、掌握最新自动化技术的人才,许多院校已开始将数字信号处理课程列为自动化学科的专业必修课程。教材编委会从数字信号处理知识的连续性考虑,提出了编写一本突破原有相关课程(信号与系统分析、数字信号处理、DSP 原理和应用)的体系,适合自动化学科的《数字信号处理》教材的构想,并按照这一构想组织制定了初步的写作大纲,编写了讲义稿,并在我校近几届的自动化学科组织了教学,取得了良好的教学效果。

在此基础上,教材编委会按照普通高等教育“十一五”国家级规划教材的编写要求,组织校内外教授和专家对讲义稿的内容及体系结构进行了多次的论证和审定,最终确定了编写大纲,并组织成书。本书由王凤文(东北大学)、舒冬梅(东北大学)、赵宏才(青岛理工大学)主持编写工作并担任主编,东北大学杨琳娟、青岛理工大学石云霞和辽宁技术学院柳明丽老师参加了本书的部分编写工作。全书由王凤文、舒冬梅统稿,由辽宁工程技术大学惠晓威教授审阅。

本书分为上下两篇:上篇为数字信号处理技术的理论基础,包括连续时间信号分析、连续时间系统分析、离散时间信号与系统的时域分析、离散时间信号与系统的频域分析、离散时间信号与系统的数字频域分析、IIR 数字滤波器设计和 FIR 数字滤波器设计 7 章内容;下篇为数字信号处理技术的实现与应用,包括 TMS320C54x 数字信号处理器、TMS320C54x 的指令系统、DSP 的接口与应用设计。

本书中给出了大量的例题、习题和 Matlab 仿真实例,在部分章的后面还给出了建议实验内容和实验的设计思路,这些内容在构成本书特色之一的同时,相信会给读者带来学习上的诸多便利。

本书适合自动化学科数字信号处理技术课程的选用教材。

在本书编写和申报普通高等教育“十一五”国家级规划教材的过程中,得到了东北大学和东北大学秦皇岛分校领导及同志们的大力支持和帮助,在此表示深深的谢意!

虽然我们尽了很大的努力,但由于水平有限,书中肯定存在着不足,衷心希望阅读本书的读者和同行提出宝贵的意见,以便我们不断改进和完善。谢谢!

作者

目 录

上 篇 数字信号处理技术的理论基础

第 1 章 连续时间信号分析

1.1 概述	3
1.2 连续时间信号的时域分析	3
1.2.1 信号的分类	4
1.2.2 典型信号	6
1.2.3 信号的基本运算	8
1.2.4 奇异信号	14
1.2.5 信号的分解	17
1.2.6 线性相关	18
1.3 连续时间信号的频域分析	19
1.3.1 周期信号的频谱	19
1.3.2 非周期信号的频谱	24
1.3.3 傅里叶变换的基本性质	26
1.3.4 周期信号的傅里叶变换	30
1.3.5 信号的能量谱和功率谱	32
1.4 采样及采样定理	33
1.4.1 时域采样	33
1.4.2 频域采样	36
1.5 连续时间信号的 s 域分析	37
1.5.1 双边拉氏变换及其收敛域	37
1.5.2 单边拉氏变换及其基本性质	38
1.5.3 单边拉氏反变换	40
1.5.4 由 $X(s)$ 的零、极点分布确定信号的时域特性	43
1.5.5 单边拉氏变换与傅里叶变换的关系	45
习题和实验指导	46

第 2 章 连续时间系统分析

2.1 概述	50
--------------	----

2.1.1 信号与系统的关系	50
2.1.2 系统分析	50
2.2 线性时不变连续时间系统的时域分析	51
2.2.1 线性时不变连续时间系统	51
2.2.2 线性时不变连续时间系统的响应	53
2.3 线性时不变连续时间系统的 s 域分析	59
2.3.1 用单边拉氏变换求系统的响应	59
2.3.2 系统函数	60
2.4 线性时不变连续时间系统的频域分析	64
2.4.1 系统的频率响应特性	64
2.4.2 系统的滤波特性	66
2.5 无失真传输	71
2.5.1 失真的概念	71
2.5.2 无失真传输的条件	71
习题和实验指导	72
第3章 离散时间信号与系统时域分析	
3.1 概述	76
3.1.1 数字信号处理系统的基本组成	76
3.1.2 数字信号处理的主要特点	77
3.1.3 数字信号处理的学科概貌	78
3.2 离散时间信号的时域分析	79
3.2.1 离散时间信号——序列	79
3.2.2 序列的基本运算	79
3.2.3 典型序列	85
3.2.4 序列的周期性	88
3.2.5 共轭对称序列和共轭反对称序列	89
3.3 线性移不变离散时间系统时域分析	90
3.3.1 线性移不变离散时间系统	90
3.3.2 单位采样响应	93
3.3.3 线性移不变离散时间系统的完全响应	94
习题和实验指导	97
第4章 离散时间信号与系统频域分析	
4.1 z 变换	100
4.1.1 z 变换的定义及其收敛域	100
4.1.2 z 变换的基本性质和定理	105
4.1.3 z 反变换	109
4.2 离散时间信号的频域分析	114

4.2.1 序列的 z 变换与连续时间信号的拉氏变换之间的关系	114
4.2.2 序列的傅里叶变换	117
4.2.3 序列傅里叶变换的性质	117
4.3 线性移不变离散时间系统的 z 域分析	119
4.3.1 系统函数	119
4.3.2 IIR 系统与 FIR 系统	121
4.3.3 系统响应的 z 域求解	122
4.4 线性移不变离散时间系统的频域分析	124
4.4.1 系统的频率响应特性	124
4.4.2 全通系统与最小相位系统	129
习题和实验指导	132

第 5 章 离散时间信号与系统数字频域分析

5.1 时域-频域的周期-离散对应关系	135
5.1.1 连续时间非周期信号的傅里叶变换	135
5.1.2 连续时间周期信号的傅里叶级数	135
5.1.3 非周期序列的傅里叶变换	136
5.1.4 周期序列的离散傅里叶级数	136
5.2 离散傅里叶级数	137
5.3 离散傅里叶变换及其性质	139
5.3.1 离散傅里叶变换	139
5.3.2 DFT 与 DTFT 及 z 变换的关系	141
5.3.3 离散傅里叶变换的性质	143
5.4 DFT 的快速算法——快速傅里叶变换	148
5.4.1 减少 DFT 运算量的基本途径	148
5.4.2 按时间抽取的基-2 FFT 算法	150
5.4.3 按频率抽取的基-2 FFT 算法	155
5.4.4 离散傅里叶反变换的快速算法	157
5.4.5 进一步减少运算量的措施	158
5.4.6 其他 FFT 算法	160
5.5 用 DFT 计算线性卷积和	165
5.5.1 圆周卷积和与线性卷积和的关系	165
5.5.2 线性卷积和的分段计算法	166
5.6 用 DFT 对连续时间信号及其频谱的近似分析	169
5.6.1 用 DFT 近似分析连续时间信号的频谱	169
5.6.2 用 IDFT 近似分析连续时间信号	170
5.6.3 用 DFT 近似分析连续时间信号频谱时出现的问题	171
5.7 多采样率信号处理	173
5.7.1 序列的抽取	174

5.7.2 抽取与插值相结合的采样率转换	176
5.8 信号处理的其他正交变换	176
习题和实验指导	177
第6章 IIR 数字滤波器设计	
6.1 数字滤波器设计的基本概念	181
6.1.1 数字滤波器设计的主要内容和方法	181
6.1.2 数字滤波器的技术指标要求	181
6.2 IIR 数字滤波器的基本结构	183
6.2.1 信号流图与系统函数、差分方程的转换	183
6.2.2 直接型结构	184
6.2.3 级联型结构	187
6.2.4 并联型结构	189
6.3 模拟滤波器设计	191
6.3.1 模拟滤波器设计的基本概念	191
6.3.2 设计 IIR 滤波器的常用 Matlab 函数	192
6.3.3 模拟低通滤波器设计	193
6.3.4 模拟高通、带通和带阻滤波器设计	199
6.4 数字滤波器设计	205
6.4.1 模拟滤波器到数字滤波器的映射	205
6.4.2 数字滤波器的间接设计	210
习题和实验指导	212
第7章 FIR 数字滤波器设计	
7.1 FIR 数字滤波器的基本结构	214
7.1.1 直接型结构	215
7.1.2 级联型结构	215
7.1.3 频率采样型结构	216
7.2 线性相位 FIR 数字滤波器的条件和特点	219
7.2.1 FIR 数字滤波器的线性相位条件	219
7.2.2 线性相位 FIR 数字滤波器的幅频特性	221
7.2.3 线性相位 FIR 数字滤波器的零点分布	224
7.2.4 线性相位结构	224
7.3 线性相位 FIR 数字滤波器设计	225
7.3.1 窗函数法	225
7.3.2 常用窗函数	229
7.3.3 窗函数法的设计步骤	232
7.4 IIR 与 FIR 数字滤波器的比较	235
习题和实验指导	236

下 篇 数字信号处理技术的实现与应用

第 8 章 TMS320C54x 数字信号处理器

8.1 DSP 芯片概述	239
8.1.1 DSP 芯片的主要特点	239
8.1.2 DSP 芯片的分类	241
8.1.3 DSP 芯片的发展历史和发展趋势	241
8.2 TMS320C54x 芯片的特点	242
8.3 TMS320C54x 芯片的组成结构	244
8.3.1 TMS320C54x 的总线结构	244
8.3.2 TMS320C54x 芯片的中央处理器	245
8.4 TMS320C54x 芯片的存储空间结构	251
8.4.1 程序存储空间	252
8.4.2 数据存储空间	253
8.4.3 特殊功能寄存器	254
8.4.4 I/O 存储空间	254
8.5 TMS320C54x 芯片的引脚	255
8.6 TMS320C54x 芯片的片内外设电路	259
习题与思考	266

第 9 章 TMS320C54x 的指令系统

9.1 TMS320C54x 指令的数据寻址方式	268
9.1.1 立即寻址	268
9.1.2 绝对寻址	269
9.1.3 累加器寻址	270
9.1.4 直接寻址	270
9.1.5 间接寻址	270
9.1.6 存储器映射寄存器寻址	275
9.1.7 堆栈寻址	276
9.2 TMS320C54x 指令系统	276
9.2.1 汇编语言源程序格式	276
9.2.2 算术运算指令	279
9.2.3 逻辑运算指令	287
9.2.4 程序控制指令	290
9.2.5 加载和存储指令	294
习题与思考	299

第 10 章 TMS320C54x 的接口与应用设计

10.1 典型的数字信号处理系统	301
10.2 TMS320C54x 与 D/A、A/D 转换器的接口	302
10.2.1 TMS320C54x 与 D/A 转换器的接口	302
10.2.2 TMS320C54x 与 A/D 转换器的接口	304
10.3 TMS320C54x 的外部存储器和 I/O 扩展	308
10.3.1 TMS320C54x 的程序存储器扩展	308
10.3.2 数据存储器扩展	310
10.3.3 I/O 扩展	311
10.4 FIR 数字滤波器的 TMS320C54x 实现	313
10.4.1 FIR 数字滤波器的结构特点	313
10.4.2 z^{-1} 算法的实现	314
10.4.3 FIR 数字滤波器的 TMS320C54x 实现	315
10.5 IIR 数字滤波器的 TMS320C54x 实现	317
10.5.1 IIR 数字滤波器的结构特点	317
10.5.2 二阶 IIR 数字滤波器的 TMS320C54x 实现方法	317
10.5.3 高阶 IIR 数字滤波器	320
10.6 DSP 在语音和数字图像处理中的应用举例	320
10.6.1 DSP 在 G.726 语音编解码系统中的应用	320
10.6.2 实时图像处理系统	321
10.6.3 图像压缩系统	322
10.7 DSP 的应用程序设计	323
10.7.1 非集成开发环境下 DSP 应用程序设计的开发过程	323
10.7.2 DSP 集成开发环境 CCS 及其使用	326
习题与思考	333
参考文献	335

上 篇

数字信号处理技术的理论基础

第1章 连续时间信号分析

信号是信息的载体,对信号进行分析的目的在于揭示信号的自身特性,以便有效地对信息进行传输、加工和处理,实现应用。本章在介绍信号基本概念和分类的基础上,讨论连续时间信号的时域、频域和变换域(s 域)分析方法,包括连续时间信号在3个域的描述、典型信号、基本运算、分解、3个域之间的相互关系以及 Matlab 实现。本章是数字信号处理的前续基础知识,离散时间信号的分析方法、结论都是在此基础上展开的。

1.1 概 述

人们在相互交往中,常常使用语言、文字、图形、图像及数字等来表达思想、发表意见,这些要表达的意见和思想等统称为消息,消息中对于接收者来说有意义的内容称为信息。为了有效地传输和应用信息,常常需要将信息转换为便于传输和处理的信号。

信号是信息的载体,是信息的表现形式,通常表现为随时间、空间等独立变量变化的某种物理量。信号通常用数学表达式(解析式)和波形来描述,记为单变量函数或多变量函数。随一个独立变量变化的信号称为一维信号,随一个以上独立变量变化的信号称为多维信号。例如:电压、电流、声音、温度等信号,一般看成是随时间(t)变化的一维信号;平面黑白图像信号是平面坐标(x, y)的二维信号;电视图像信号是平面坐标和时间(x, y, t)的三维信号等。本书只讨论一维信号。

信号分析是研究信号的描述、运算,以及信号发生某些变化时其特性的相应变化,目的在于揭示信号的自身特性。分析的方法主要是将信号分解为若干基本信号分量的线性组合,通过研究这些分量的分布规律来获得原信号的特性。由于信号的分解可以在时域、频域和变换域进行,所以信号分析包括时域分析、频域分析和变换域分析3部分。对于同一信号来说,其3个域的分析存在着密切的内在联系,是从不同的角度来反映同一信号的自身特性,因此,信号在一个域的某种变化将会导致另外两个域出现相对应的变化。

1.2 连续时间信号的时域分析

信号的时域分析就是用时间函数来描述信号的波形及其变化,以获知信号的持续时间、幅度随时间的变化规律和变化速率等时间特性。信号所承载的信息由信号的波形形状来反映,在信号的传输过程中,只要保持信号波形的形状不变,信息就不会丢失。

在时域,时间函数的自变量通常用时间 t 或序号 n 来表示。

1.2.1 信号的分类

实际信号是多种多样的,根据不同的特点,常用信号通常分为以下几种类型。

1. 确定信号与随机信号

能用确定的时间函数来描述的信号称为确定信号,又称为规则信号。对于确定信号,可以求出任一时刻的函数值。不能用确定的时间函数来描述,函数值具有随机性的信号称为随机信号,又称为不确定信号。对于随机信号,无法预知其变化规律,只能用概率统计的方法进行分析,如噪声和干扰信号等。确定信号与随机信号密切相关,在一定条件下,随机信号也会表现出某种确定性,确定信号是随机信号研究的基础。本书只讨论确定信号。

2. 连续时间信号与离散时间信号

若信号在其定义域内除有限几个间断点外均有定义(能给出确定的函数值),则这种信号称为连续时间信号,通常记为 $x(t)$,时间变量 t 为实数。连续时间信号的自变量取值是连续的,而幅值(即函数值)可以是连续的(称为模拟信号),也可以是离散的(仅取有限几个规定值)。若信号仅在离散的时间点上有定义,而在其他时间没有定义,则称为离散时间信号,通常记为 $x(n)$, n 为整数,是离散时间点的序号。离散时间信号的自变量取值是离散的,其幅值可以是连续的(称为采样信号),也可以是离散的(称为数字信号)。离散时间信号可以通过对连续时间信号采样得到。

3. 时限信号与非时限信号

若信号仅在有限长的时间区间内存在非零幅值,则称为时限信号或有限长信号,表示为

$$x(t) = \begin{cases} x(t), & t_1 < t < t_2 \\ 0, & \text{其他 } t \end{cases} \quad \text{或} \quad x(n) = \begin{cases} x(n), & n_1 \leq n \leq n_2 \\ 0, & \text{其他 } n \end{cases}$$

其中, t_1, t_2 为任意实数, n_1, n_2 为任意整数,且均为有限值。

若信号的非零幅值所对应的时间区间(简称非零值区间)是无限长的,则称为非时限信号或无限长信号。根据非零值区间的分布,非时限信号又分为双边信号、右边信号和左边信号,分别表示如下:

$$\text{双边信号} \quad x(t), -\infty < t < \infty \quad \text{或} \quad x(n), -\infty < n < \infty$$

$$\text{右边信号} \quad x(t) = \begin{cases} x(t), & t > t_3 \\ 0, & \text{其他 } t \end{cases} \quad \text{或} \quad x(n) = \begin{cases} x(n), & n \geq n_3 \\ 0, & \text{其他 } n \end{cases}$$

$$\text{左边信号} \quad x(t) = \begin{cases} x(t), & t < t_4 \\ 0, & \text{其他 } t \end{cases} \quad \text{或} \quad x(n) = \begin{cases} x(n), & n \leq n_4 \\ 0, & \text{其他 } n \end{cases}$$

其中, t_3, t_4 为任意实数, n_3, n_4 为任意整数,且均为有限值。

右边信号和左边信号统称为单边信号。右边信号若满足 $x(t) = 0 (t < 0)$, 即 $t_3 \geq 0$; 或 $x(n) = 0 (n \leq -1)$, 即 $n_3 \geq 0$, 则称为因果信号。左边信号若满足 $x(t) = 0 (t > 0)$, 即 $t_4 \leq 0$; 或 $x(n) = 0 (n \geq 0)$, 即 $n_4 \leq -1$, 则称为逆因果信号。显然, 双边信号可以分解为一