



电子信息学科基础课程系列教材

——面向现代工程师培养

教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会推荐教材

数字信号处理 原理与实践（修订版）

刘纪红 孙宇舸 叶柠 等编著



清华大学出版社



电子信息学科基础课程系列教材

——面向现代工程师培养

教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会推荐教材

数字信号处理 原理与实践（修订版）

刘纪红 孙宇舸 叶柠 等编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书较系统地讨论了数字信号处理的基本理论、基本方法、基本算法,结合 MATLAB 仿真软件实现了典型的应用实例。全书共分为 9 章。第 1~4 章主要讨论了离散时间信号与系统、 z 变换、离散傅里叶变换和快速傅里叶变换。第 5、6、7 章讨论了数字滤波器的基本结构、无限长单位冲激响应(IIR)滤波器和有限长单位冲激响应(FIR)滤波器,利用 MATLAB 仿真软件设计滤波器的方法,并给出了大量实例。第 8 章结合 TI 公司的 TMS320 系列 DSP 介绍了数字信号处理器及相关设计和应用的平台。第 9 章从语音和图像处理的角度出发,论述了 DSP 的应用实例。

本书结合实例进行论述,本书内容丰富,重点突出,条理清楚、深入浅出,还配有多种形式的习题,便于自学和快速应用。

本书可以作为大专院校通讯工程、电子信息工程、信息工程、自动控制工程和生物医学工程等专业的教材,也可以作为通信和信息技术、图像处理、遥感、雷达、语音处理和生物信息处理等领域从事信号处理的科学工作者的参考书。

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

数字信号处理原理与实践/刘纪红,孙宇舸,叶柠等编著.--修订版.--北京:清华大学出版社,2014

电子信息学科基础课程系列教材

ISBN 978-7-302-37052-9

I. ①数… II. ①刘… ②孙… ③叶… III. ①数字信号处理 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 143063 号



责任编辑:文 怡

封面设计:何凤霞

责任校对:焦丽丽

责任印制:李红英

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>, 010-62775954

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:20

字 数:458 千字

版 次:2014 年 9 月第 1 版

印 次:2014 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:39.50 元

产品编号:055163-01

《电子信息学科基础课程系列教材》
编 审 委 员 会

主任委员

王志功(东南大学)

委员 (按姓氏笔画)

马旭东(东南大学)	邓建国(西安交通大学)
王小海(浙江大学)	王诗宓(清华大学)
王 萍(天津大学)	王福昌(华中科技大学)
刘宗行(重庆大学)	刘润华(中国石油大学)
刘新元(北京大学)	张 石(东北大学)
张晓林(北京航空航天大学)	沈连丰(东南大学)
陈后金(北京交通大学)	郑宝玉(南京邮电大学)
郭宝龙(西安电子科技大学)	柯亨玉(武汉大学)
高上凯(清华大学)	高小榕(清华大学)
徐淑华(青岛大学)	袁建生(清华大学)
崔 翔(华北电力大学)	傅丰林(西安电子科技大学)
董在望(清华大学)	曾孝平(重庆大学)
蒋宗礼(北京工业大学)	

本书编写人员

刘纪红 孙宇舸 叶 柠 田亚男 赵振江

《电子信息学科基础课程系列教材》 丛书序

电子信息学科是当今世界上发展最快的学科,作为众多应用技术的理论基础,对人类文明的发展起着重要的作用。它包含诸如电子科学与技术、电子信息工程、通信工程和微波工程等一系列子学科,同时涉及计算机、自动化和生物电子等众多相关学科。对于这样一个庞大的体系,想要在学校将所有知识教给学生已不可能。以专业教育为主要目的的大学教育,必须对自己的学科知识体系进行必要的梳理。本系列丛书就是试图搭建一个电子信息学科的基础知识体系平台。

目前,中国电子信息类学科高等教育的教学中存在着如下问题:

- (1) 在课程设置和教学实践中,学科分立,课程分立,缺乏集成和贯通;
- (2) 部分知识缺乏前沿性,局部知识过细、过难,缺乏整体性和纲领性;
- (3) 教学与实践环节脱节,知识型教学多于研究型教学,所培养的电子信息学科人才不能很好地满足社会的需求。

在新世纪之初,积极总结我国电子信息类学科高等教育的经验,分析发展趋势,研究教学与实践模式,从而制定出一个完整的电子信息学科基础教程体系,是非常有意义的。

根据教育部高教司 2003 年 8 月 28 日发出的[2003]141 号文件,教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会(基础课分教指委)在 2004—2005 两年期间制定了“电路分析”、“信号与系统”、“电磁场”、“电子技术”和“电工学”5 个方向电子信息科学与电气信息类基础课程的教学基本要求。然而,这些教学要求基本上是按方向独立开展工作的,没有深入开展整个课程体系的研究,并且提出的是各课程最基本的教学要求,针对的是“2+X+Y”或者“211 工程”和“985 工程”之外的大学。

同一时期,清华大学出版社成立了“电子信息学科基础教程研究组”,历时 3 年,组织了各类教学研讨会,以各种方式和渠道对国内外一些大学的 EE(电子电气)专业的课程体系进行收集和 research,并在国内率先推出了关于电子信息学科基础课程的体系研究报告《电子信息学科基础教程 2004》。该成果得到教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会的高度评价,认为该成果“适应我国电子信息学科基础教学的需要,有较好的指导意义,达到了国内领先水平”,“对不同类型院校构建相关学科基础教学平台均有较好的参考价值”。

在此基础上,由我担任主编,筹建了“电子信息学科基础课程系列教材”编委会。编委会多次组织部分高校的教学名师、主讲教师和教育部高等学校教学指导委员会委员,进一步探讨和完善《电子信息学科基础教程 2004》研究成果,并组织编写了这套“电子信息学科基础课程系列教材”。

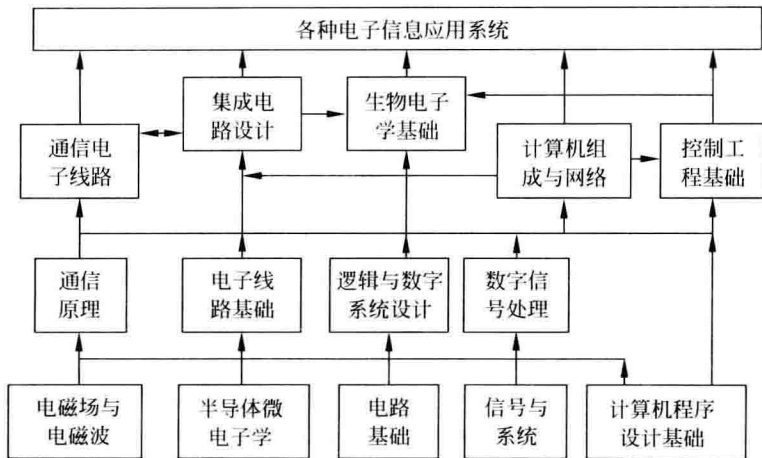
在教材的编写过程中,我们强调了“基础性、系统性、集成性、可行性”的编写原则,突出了以下特点:

- (1) 体现科学技术领域已经确立的新知识和新成果。
- (2) 学习国外先进教学经验,汇集国内最先进的教学成果。
- (3) 定位于国内重点院校,着重于理工结合。

(4) 建立在对教学计划和课程体系的研究基础之上,尽可能覆盖电子信息学科的全部基础。本丛书规划的 14 门课程,覆盖了电气信息类如下全部 7 个本科专业:

- 电子信息工程
- 通信工程
- 电子科学与技术
- 计算机科学与技术
- 自动化
- 电气工程与自动化
- 生物医学工程

(5) 课程体系整体设计,各课程知识点合理划分,前后衔接,避免各课程内容之间交叉重复,目标是使各门课程的知识点形成有机的整体,使学生能够在规定的课时数内,掌握必需的知识和技术。各课程之间的知识点关联如下图所示:



即力争将本科生的课程限定在有限的与精选的一套核心概念上,强调知识的广度。

(6) 以主教材为核心,配套出版习题解答、实验指导书、多媒体课件,提供全面的教学解决方案,实现多角度、多层面的人才培养模式。

(7) 由国内重点大学的精品课主讲教师、教学名师和教指委委员担任相关课程的设计和教材的编写,力争反映国内最先进的教改成果。

我国高等学校电子信息类专业的办学背景各不相同,教学和科研水平相差较大。本系列教材广泛听取了各方面的意见,汲取了国内优秀的教学成果,希望能为电子信息学科教学提供一份精心配备的搭配科学、营养全面的“套餐”,能为国内高等学校教学内容

和课程体系的改革发挥积极的作用。

然而,对于高等院校如何培养出既具有扎实的基本功,又富有挑战精神和创造意识的社会栋梁,以满足科学技术发展和国家建设发展的需要,还有许多值得思考和探索的问题。比如,如何为学生营造一个宽松的学习氛围?如何引导学生主动学习,超越自己?如何为学生打下宽厚的知识基础和培养某一领域的研究能力?如何增加工程方法训练,将扎实的基础和宽广的领域才能转化为工程实践中的创造力?如何激发学生深入探索的勇气?这些都需要我们教育工作者进行更深入的研究。

提高教学质量,深化教学改革,始终是高等学校的工作重点,需要所有关心我国高等教育事业人士的热心支持。在此,谨向所有参与本系列教材建设工作的同仁致以衷心的感谢!

本套教材可能会存在一些不当甚至谬误之处,欢迎广大的使用者提出批评和意见,以促进教材的进一步完善。



2008年1月

随着信息科学和电子技术的飞速发展,数字信号处理的应用价值日益受到重视。为了培养高水平的相关技术人才,各大专院校目前都非常重视数字信号处理课程的建设,理论与实际应用相结合是数字信号处理课程学习和教学的重点。本书正是为了适应广大理工科本科生、研究生和相关科研技术工作者的这一需求而编写的。

本书是2009年出版的《数字信号处理原理与实践》的修订版,本书在第一版基础上,增加了大量的实践环节,使读者更加易于理解复杂的理论。本书共分为9章,包含三个部分:数字信号处理的基本理论和算法(第1~4章)、数字滤波器的结构和设计(第5~7章),以及数字信号处理的应用(第8~9章)。

在第一部分中,第1章较详细地讨论了离散时间信号和系统的一些基本的概念,给出了离散时间信号的表示方式,以及一些信号处理中的常用的运算。建立了离散系统的概念以及离散系统的一些性质和表示方式。第2章介绍了 z 变换定义、收敛域、性质, z 反变换及其计算,以及系统函数及其收敛域与系统性质的关系。第3章介绍了傅里叶变换的几种形式,以及周期序列的傅里叶级数、有限长序列的傅里叶变换和它们的重要性质,然后介绍了用DFT计算线性卷积的方法,最后介绍了二维离散傅里叶变换的定义和性质,第4章介绍了快速傅里叶变换的算法原理和计算机实现方法。

在第二部分中,第5章重点论述了数字滤波器的基本结构,第6章介绍了无限长单位冲激响应(IIR)滤波器的设计方法,第7章介绍了有限长单位冲激响应(FIR)滤波器的设计方法,在每章中都给出了在MATLAB环境下的滤波器设计方法和实例。

在第三部分中,结合TI公司的TMS320系列芯片介绍了数字信号处理器、相关设计和应用的平台。并以实现信号滤波和图像处理为目标,分别论述了在CCS3.3软件仿真器、TMS320C5402 DSK板和TMS320DM642 EVM板上实现相关DSP应用实例的设计。

本书的一大特色就是充分利用MATLAB工具在数字信号处理中的作用,读者通过书中的MATLAB实例可以更好、更快地掌握数字信号处理的理论和计算机辅助设计技术。

本书由刘纪红、孙宇舸、叶柠、田亚男和赵振江编写完成。刘纪红对全书进行了统稿和审阅。

感谢研究所同仁提出的宝贵意见。

限于编者的水平,对书中不妥和错误之处,殷切希望读者能不吝指正。

编者

2014年6月

绪论	1
第 1 章 离散时间信号与系统	2
1.1 离散时间信号——序列	3
1.1.1 序列的定义与表示	3
1.1.2 一些常用的时间序列	4
1.1.3 序列的运算	8
1.1.4 序列的周期性	25
1.1.5 序列的能量与功率	27
1.2 离散时间系统	28
1.2.1 线性系统	29
1.2.2 时不变系统	29
1.2.3 单位冲激响应	31
1.2.4 因果性	33
1.2.5 稳定性	33
1.2.6 可逆性	34
1.3 线性时不变系统性质	34
1.4 常系数线性差分方程	37
1.4.1 常系数线性差分方程形式	37
1.4.2 常系数线性差分方程的求解	38
1.4.3 边界条件对差分方程的影响	40
1.4.4 差分方程表示法的用途	44
1.5 信号的数字化处理	44
1.5.1 信号的采样	44
1.5.2 信号的恢复	49
1.6 系统的频率响应	51
本章小结	57
习题	57
第 2 章 z 变换	62
2.1 z 变换的定义和收敛域	63
2.1.1 z 变换的定义	63

目录

2.1.2 z 变换的收敛域	66
2.2 z 变换的性质	73
2.3 z 反变换	79
2.3.1 查表法	80
2.3.2 幂级数展开法	80
2.3.3 围线积分法	82
2.3.4 部分分式法	85
2.4 利用 z 变换求解差分方程	86
2.5 系统函数	88
2.5.1 系统函数的定义	88
2.5.2 系统函数的收敛域	88
2.5.3 由系统函数的零、极点确定频率响应	90
本章小结	92
习题	93
第 3 章 离散傅里叶变换	98
3.1 傅里叶变换的几种形式	99
3.2 周期序列的离散傅里叶级数	100
3.2.1 离散傅里叶级数的定义	100
3.2.2 离散傅里叶级数的性质	103
3.3 有限长序列的离散傅里叶变换	105
3.3.1 离散傅里叶变换的定义	105
3.3.2 DFT、DTFT 和 z 变换的关系	107
3.3.3 离散傅里叶变换的性质	109
3.4 利用 DFT 计算线性卷积	113
3.5 二维离散傅里叶变换	114
3.5.1 二维离散傅里叶变换的定义	114
3.5.2 二维离散傅里叶变换的性质	116
本章小结	116
习题	117
第 4 章 快速傅里叶变换	118
4.1 离散傅里叶变换存在的问题	119
4.2 按时间抽取的基-2 FFT 算法	120

4.2.1	算法的推导	120
4.2.2	算法的讨论	124
4.3	按频率抽取基-2 FFT 算法	125
4.4	运算量进一步减少的方法	129
4.5	IDFT 的快速计算方法 IFFT	129
4.6	分裂基 FFT 算法	130
4.6.1	基-4 FFT 算法	131
4.6.2	分裂基算法	132
4.7	快速傅里叶变换的 MATLAB 程序实现	133
4.8	基于 DFT 和 FFT 的频谱分析	135
4.8.1	频谱分析的概念	135
4.8.2	频谱分析的参数选择	136
4.8.3	频谱分析中的误差问题	142
	本章小结	144
第 5 章	数字滤波器的基本结构	146
5.1	数字系统的信号流图表示方法	147
5.2	无限长单位冲激响应(IIR)滤波器的基本结构	148
5.2.1	直接 I 型	148
5.2.2	直接 II 型	149
5.2.3	级联型	149
5.2.4	并联型	151
5.3	有限长单位冲激响应(FIR)滤波器的基本结构	152
5.3.1	直接形式(横截型)	152
5.3.2	级联型	153
5.3.3	频率采样型	153
5.3.4	线性相位 FIR 滤波器	156
	本章小结	158
	习题	158
第 6 章	无限长单位冲激响应(IIR)滤波器	159
6.1	引言	160
6.2	由模拟滤波器设计 IIR 数字滤波器	162
6.3	冲激响应不变法	166

目录

6.4	双线性变换法	172
6.5	阶跃响应不变法	177
6.6	频率变换法	178
6.7	模拟频率变换法	180
6.7.1	模拟低通滤波器变换成数字高通滤波器	180
6.7.2	模拟低通滤波器变换成数字带通滤波器	184
6.7.3	模拟低通滤波器变换成数字带阻滤波器	189
6.8	数字频率变换法	195
6.9	应用实例	199
	本章小结	215
	习题	215
第 7 章	有限长单位冲激响应(FIR)滤波器	218
7.1	引言	219
7.2	线性相位 FIR 滤波器的特点	219
7.2.1	线性相位条件	219
7.2.2	线性相位的特点	221
7.2.3	零点特性	227
7.3	窗函数设计法	228
7.3.1	设计思想	228
7.3.2	各种窗函数	231
7.4	频率采样法	240
7.5	应用实例	246
	本章小结	249
	习题	249
第 8 章	数字信号处理器	251
8.1	数字信号处理器简介	252
8.2	DSP 系统及其开发和应用	253
8.2.1	DSP 系统构成	253
8.2.2	DSP 系统的特点	253
8.2.3	DSP 系统的设计过程	253
8.2.4	DSP 芯片的应用	254
8.3	几种 DSP 芯片介绍	255

8.3.1	TMS320C5402 DSP 芯片	255
8.3.2	TMS320VC5416 DSP 芯片	256
8.3.3	TMS320DM642 DSP 芯片	258
8.3.4	TMS320LF2407 芯片	259
8.3.5	TMS320F28027 芯片	260
8.4	DSP 系统常用实验平台	261
8.4.1	Code Composer Studio 集成开发环境	261
8.4.2	TMS320C5402 DSK 板	262
8.4.3	TMS320DM642 EVM 板	263
8.4.4	网络开发工具包 NDK	263
8.4.5	MATLAB/Simulink 仿真软件	264
	本章小结	264
第 9 章	DSP 应用实例	265
9.1	DSP 在语音处理中的应用	266
9.1.1	语音处理功能的总体设计	266
9.1.2	语音的采集和滤波器的理论设计	266
9.1.3	基于 TMS320C5402 DSK 的功能实现	271
9.2	DSP 在运动目标跟踪中的应用	276
9.2.1	总体设计	276
9.2.2	MATLAB 中仿真结果	277
9.2.3	系统在 TMS320DM642EVM 板上的设计实现	279
9.2.4	实验结果	281
9.3	CCS 中对彩色图像的二值化处理	282
9.3.1	总体设计	282
9.3.2	实现过程	282
9.3.3	处理结果	285
9.4	DSP 在乐谱图像处理中的应用	287
9.4.1	总体设计	287
9.4.2	实现过程	287
9.4.3	处理结果	291
9.5	FIR 滤波器综合性设计应用实例	293
9.5.1	总体设计说明	293

目录

9.5.2 滤波器参数选择	293
9.5.3 确定滤波器系数	294
9.5.4 生成输入的合成信号	295
9.5.5 实现 DSP 下的 FIR 程序	295
9.5.6 运行步骤及仿真结果	297
本章小结	299
参考文献	300

绪 论

随着信息技术相关学科的发展,数字信号处理已经成为一种重要的信号分析工具。从普通的消费类电子设备到精密的科学仪器,越来越多的数字信号处理算法和专用硬件被采用。数字信号处理技术涉及信号和其所承载信息的表达、变换和处理的方法。信号通过数字或符号以序列的方式表达出来。数字信号处理的目的是评估信号的特征参数,或者把信号转变为另一种希望的形式。数字信号处理已经广泛应用于通信、语音处理、地震监测、图像处理和生物工程等领域。

早在 20 世纪 50 年代,MIT 的 Linville 教授开始在他的研究生讨论会上讨论数字滤波器的问題。当时,采样的概念和 z 变换理论已经建立起来。到 20 世纪 60 年代,出现了比较正式的数字信号处理理论。1965 年,Cooley 和 Tukey 提出了一种有效的快速计算傅里叶变换的方法,后被称为快速傅里叶变换(fast Fourier transform,FFT)。随后,各种现代信号处理理论不断出现。

一个典型的数字信号处理系统通常包括对模拟信号的抽样和量化模块、数字信号处理和分析模块,以及模拟信号的重建模块。数字信号处理和分析模块的实现平台可以是 PC、工控机或数字信号处理器等硬件系统。数字信号处理器可以经过编程完成各种信号处理操作,如滤波和频谱估计。

本书采用 MATLAB 平台作为数字信号处理算法的仿真平台,因此在各章中结合章节内容设计了基于 MATLAB 程序的例题,以便将复杂的数字信号处理理论以图示的方式展现出来,并能作为应用设计的第一手资料。

第1章

离散时间信号与系统