

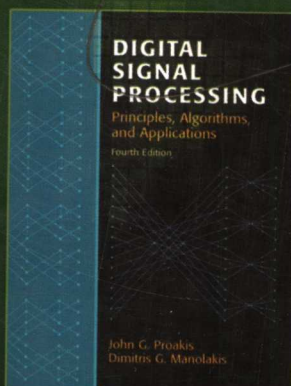
国外电子与通信教材系列



数字信号处理

(第四版)

Digital Signal Processing
Principles, Algorithms, and Applications
Fourth Edition

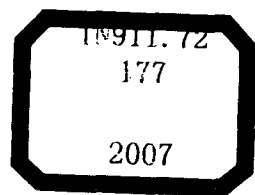


[美] John G. Proakis 著
Dimitris G. Manolakis
方艳梅 刘永清 等译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



国外电子与通信教材系列

数字信号处理

(第四版)

Digital Signal Processing
Principles, Algorithms, and Applications
Fourth Edition

[美] John G. Proakis 著
Dimitris G. Manolakis

方艳梅 刘永清 等译

電子工業出版社.
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书全面系统地阐述了数字信号处理的基础知识,其中前10章讲述了确定性数字信号处理的知识,包括离散时间信号及系统的介绍、 z 变换、傅里叶变换、频率分析以及滤波器设计等。后4章则介绍了随机数字信号处理的知识,主要学习多速率数字信号处理、线性预测、自适应滤波以及功率谱估计。本书内容全面丰富、系统性强、概念清晰。叙述深入浅出,为了帮助读者深刻理解基本理论和分析方法,书中列举了大量的精选例题,同时还给出了许多基于MATLAB的仿真实验。另外,在各章的最后还附有习题,以帮助读者进一步巩固所学知识。

本书可作为电子工程、计算机工程、信号处理以及通信工程等专业的本科和研究生教材,也适合于教师和广大科技工作者参考使用。

Simplified Chinese edition Copyright © 2007 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications, Fourth Edition, ISBN: 0131873741 by John G. Proakis and Dimitris G. Manolakis. Copyright © 2007. All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和Pearson Education培生教育出版亚洲有限公司合作出版。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。

本书封面贴有Pearson Education培生教育出版集团激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2006-7672

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理:第4版/(美)普埃克(Proakis J. G.)等著;方艳梅等译

北京:电子工业出版社,2007.6

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications, Fourth Edition

ISBN 978-7-121-03496-1

I. 数... II. ①普... ②方... III. 数字信号-信号处理-教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第075786号

责任编辑:余 义

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订:三河市皇庄路通装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:51.75 字数:1325千字

印 次:2007年6月第1次印刷

定 价:78.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

主 任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委 员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长

译者序

本书是数字信号处理的经典教材,是作者在多年教学的基础上编写而成的。其版本不断更新,内容涵盖了离散时间信号、系统和现代数字信号处理的基础知识。本书的每一章均从基本概念入手,详细阐述各种基本理论与分析方法,并在介绍中给出了许多数字信号处理的应用实例,以及基于 MATLAB 的仿真实验。在学习完本书以后,学生即可掌握数字信号处理的基础知识及实际应用。

本书作者 John G. Proakis 是美国东北大学电子与计算机工程系的教授,其研究方向为数字通信与数字信号处理,主要包括自适应滤波、自适应通信系统、自适应均衡技术、多径衰落信道的通信、雷达探测、信号参数估计、通信系统建模与仿真、最优化技术、统计分析等,已多次出版《数字信号处理》和《数字通信》等经典著作。第二位作者 Dimitris C. Manolakis 工作于美国麻省理工学院林肯实验室,主要研究方向是数字通信与数字信号处理。他们在本书中融入多年的教学及实践经验,并且注重理论与实际相结合。

本书共分为 14 章及两个附录,其中前 10 章讲述了基本数字信号处理知识,依次为:绪论、离散时间信号与系统、 z 变换及其在 LTI 系统分析中的应用、信号的频率分析、LTI 系统的频域分析、信号的采样与重建、离散傅里叶变换的特性及应用、DFT 的有效计算:快速傅里叶变换算法、离散时间系统的实现、数字滤波器设计。后 4 章介绍了高级数字信号处理,包括多速率数字信号处理、线性预测和最优线性滤波器、自适应滤波器以及功率谱估计。附录 A 介绍随机数发生器,附录 B 摘录了用于线性相位 FIR 滤波器设计的转换系数表。最后,作者还给出了参考书目及精选习题答案。

参加本书翻译工作的有方艳梅、刘永清、梁小萍、杨锐、屈振华,由方艳梅和刘永清完成全书的审校工作。

限于译者水平,本书疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

译者

2007 年 5 月

前 言

本书是作者近几年来在为本科生和研究生讲授数字信号处理课程的基础上编写的,主要介绍离散时间信号、系统和现代数字处理的基础知识,以及它们在电子工程、计算机工程和计算机科学等专业方面的应用。本书可作为本科生在离散系统和数字信号处理方面的一学期或两学期课程的教材,同时也可作为一年级研究生在数字信号处理方面的一学期课程的教材。

本书假定学生事先已掌握了积分学(包括常微分方程)和连续时间信号的线性系统的知识(包括拉普拉斯变换)。虽然本书第4章将描述周期或非周期信号的傅里叶级数和傅里叶变换,但我们期望读者在先修课程中已经了解了这部分内容。

本书在理论知识和实际应用之间进行了较好的折中。书中提供了大量经过精心设计的习题,以便帮助学生掌握课程的内容。解答手册仅供教师下载。此外,在出版社的网站上为教师准备了图表及幻灯片。

在本书的第四版中,我们增加了关于自适应滤波器的新章节,并陆续修改和更新了关于多采样率数字信号处理、信号采样和重构等章节。同时,增加了关于离散余弦变换的新内容。

第1章描述模拟信号的模数转换过程所涉及到的操作。描述了正弦信号的采样过程,解释了混叠问题,并且对信号量化和数模转换的一般术语进行了描述,但分析部分将留待后续章节描述。

第2章主要论述时域的线性时不变(移不变)离散时间系统和离散时间信号。导出了卷积和,并根据系统的冲激响应周期将其分为有限长冲激响应(FIR)和无限长冲激响应(IIR)。描述了由差分方程表征的线性时不变系统,并得到了具有初始条件的差分方程的解。本章最后总结了离散时间相关性问题的。

第3章介绍 z 变换,包括双边 z 变换和单边 z 变换,并给出了确定逆 z 变换的方法。论述了在线性时不变系统的分析过程中如何使用 z 变换,并证实了系统的重要特性都与 z 域特征有关,如因果性和稳定性。

第4章论述频域中的信号分析。描述了连续时间信号和离散时间信号的傅里叶级数和傅里叶变换。

在第5章中,通过频率响应函数表征了频域中的线性时不变(LTI)离散时间系统,并确定了对周期和非周期信号的响应。描述了一些重要类型的离散时间系统,包括谐振器、槽口滤波器、梳状滤波器、全通滤波器和振荡器等。同时,也考察了一些简单FIR和IIR滤波器的设计。此外,还介绍了最小相位、混合相位和最大相位系统的概念,以及去卷积的问题。

第6章讲述连续时间信号的采样以及由采样信号重构原始信号的内容。所涉及的范围包括带通信号的采样和重构,离散时间信号的采样及模数和数模转换过程。本章中还包含有对过采样的模数和数模转换器的处理。

第7章讨论DFT的性质和应用。描述了用DFT执行线性滤波的两种方法,并说明了使用DFT对信号进行频率分析的方法。本章最后讨论了离散余弦变换。

第8章涉及DFT的有效计算。本章描述了基2、基4和分裂基快速傅里叶变换(FFT)算法,以及FFT算法在卷积和相关计算中的应用。对于用线性滤波计算DFT的方法,介绍了Goertzel算法和线性调频 z 变换两种方法。

第9章介绍 IIR 和 FIR 系统的实现方法。包括直接型、级联型、并联型、格型和带抽头的格型滤波器结构的实现。本章同时分析了在数字实现 FIR 和 IIR 系统过程中的量化效应。

第10章介绍数字 FIR 和 IIR 滤波器的设计技术。设计技术包括离散时间的直接方法和通过各种变换将模拟滤波器转换成数字滤波器的方法。

第11章介绍采样率变换及其在多采样率数字信号处理中的应用。除了描述了通过整数和有理数因子的抽取和插值之外,还介绍了对于任意因子的采样率转换方法,以及多相位滤波器结构的实现。本章还讨论了数字滤波器组、二通道的正交镜像滤波器(QMF)和 M 通道的 QMF 组。

第12章介绍线性预测和最优线性维纳滤波器。本章还描述了求解归一化方程的 Levinson-Durbin 算法和 Schur 算法,以及 AR 格型和 ARMA 格型抽头滤波器。

第13章介绍基于 LMS 算法和递归最小平方(RLS)算法的单通道自适应滤波器。直接型 FIR 和格型 RLS 算法及滤波器结构均在本章介绍。

第14章讲述功率谱估计。描述了不带参数的方法和基于模型(带参数的)的方法,还描述了基于特征组合的方法,包括 MUSIC 和 ESPRIT。

事先已经学习过离散系统的高年级学生,可以先快速浏览第1章至第5章的内容,然后仔细学习第6章至第10章的内容。

对于研究生一年级的数字信号处理课程,前6章供学生复习离散时间系统,教师可以快速浏览大部分内容,然后讲述第7章到第11章的内容,再选讲第12章至第14章的部分内容。

本书中提供了很多例题和近500道习题。部分习题的答案列在本书的后面。很多习题可以通过类似 MATLAB 这样的软件包在计算机上得到数值解。学生还可以使用本书配套的手册 Student Manual for Digital Signal Processing with MATLAB。MATLAB 软件是本教材的基本软件工具。教师可能还希望参考其他一些包含基于计算机练习的补充教材,例如,由 C.S.Burrus 等编写的 Computer-Based Exercises for Signal Processing Using MATLAB (Prentice Hall, 1994)。

我们受益于很多有才华的同事,他们通过阅览本书前几版提供了许多有价值的建议,其中有 W. E. Alexander, G. Arslan, Y. Bresler, J. Deller, F. DePiero, V. Ingle, J. S. Kang, C. Keller, H. Lev-Ari, L. Merakos, W. Mikhael, P. Monticciolo, C. Nikias, M. Schetzen, E. Serpedin, T. M. Sullivan, H. Trussell, S. Wilson 和 M. Zoltowski。我们同时基于 R. Price 的建议及其他相关见解,增加了关于分裂基 FFT 算法的内容。最后,我们要感谢许多那些已毕业的学生的建议和意见,特别是 A. L. Kok, J. Lin, E. Sozer 和 S. Srinidhi,他们协助准备了几幅图表和解答手册。

JOHN G. PROAKIS
DIMITRIS G. MANOLAKIS

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail : dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 信号、系统及信号处理	1
1.1.1 数字信号处理系统的基本组成	3
1.1.2 数字信号处理与模拟信号处理相比的优点	3
1.2 信号分类	4
1.2.1 多通道信号与多维信号	4
1.2.2 连续时间信号和离散时间信号	6
1.2.3 连续值信号与离散值信号	7
1.2.4 确定性信号与随机信号	8
1.3 连续时间信号与离散时间信号中的频率概念	8
1.3.1 连续时间正弦信号	8
1.3.2 离散时间正弦信号	9
1.3.3 谐相关的复指数信号	12
1.4 模数和数模转换	13
1.4.1 模拟信号采样	14
1.4.2 采样定理	19
1.4.3 连续幅度信号的量化	22
1.4.4 正弦信号的量化	24
1.4.5 量化采样信号的编码	25
1.4.6 数模转换	25
1.4.7 数字信号与系统及离散时间信号与系统的分析	26
1.5 小结与参考文献	26
习题	27
第 2 章 离散时间信号与系统	30
2.1 离散时间信号	30
2.1.1 离散时间信号的基本元素	31
2.1.2 离散时间信号的分类	33
2.1.3 离散时间信号的简单处理	36
2.2 离散时间系统	38
2.2.1 系统的输入-输出描述	39
2.2.2 离散时间系统的结构图表示	41
2.2.3 离散时间系统的分类	42
2.2.4 离散时间系统的互连	48
2.3 离散时间线性时不变系统的分析	50

2.3.1	线性系统的分析方法	50
2.3.2	离散时间信号分解为冲激信号	51
2.3.3	LTI 系统对任意输入的响应:卷积和	52
2.3.4	卷积的性质以及 LTI 系统的互连	58
2.3.5	因果 LTI 系统	60
2.3.6	线性时不变系统的稳定性	62
2.3.7	有限长和无限长冲激响应的系统	64
2.4	由差分方程描述的离散时间系统	64
2.4.1	递归和非递归的离散时间系统	65
2.4.2	由常系数差分方程描述的线性时不变系统的特性	68
2.4.3	线性常系数差分方程的解	71
2.4.4	线性时不变递归系统的冲激响应	77
2.5	离散时间系统的实现	79
2.5.1	线性时不变系统的实现结构	79
2.5.2	FIR 系统的递归和非递归实现	82
2.6	离散时间信号的相关性	84
2.6.1	互相关和自相关序列	86
2.6.2	自相关和互相关序列的性质	87
2.6.3	周期序列的相关性	90
2.6.4	输入-输出相关序列	92
2.7	小结与参考文献	94
	习题	94
第 3 章	z 变换及其在线性时不变系统分析中的应用	108
3.1	z 变换	108
3.1.1	z 正变换	108
3.1.2	z 逆变换	113
3.2	z 变换的性质	115
3.3	有理 z 变换	125
3.3.1	极点和零点	125
3.3.2	因果信号的极点位置和时域行为	127
3.3.3	线性时不变系统的系统函数	128
3.4	z 逆变换	131
3.4.1	围线积分法求 z 逆变换	131
3.4.2	幂级数展开法求 z 逆变换	133
3.4.3	部分分式展开法求 z 逆变换	134
3.4.4	有理 z 变换的分解	140
3.5	z 域线性时不变系统的分析	141
3.5.1	有理系统函数的系统响应	142
3.5.2	暂态响应和稳态响应	142

3.5.3	因果性和稳定性	143
3.5.4	零极点抵消	145
3.5.5	多阶极点和稳定性	146
3.5.6	二阶系统的稳定性	147
3.6	单边 z 变换	150
3.6.1	定义和性质	151
3.6.2	差分方程的求解	154
3.6.3	具有非零初始条件的零极点系统的响应	155
3.7	小结与参考文献	156
	习题	157
第 4 章	信号的频率分析	165
4.1	连续时间信号的频率分析	165
4.1.1	连续时间周期信号的傅里叶级数	166
4.1.2	周期信号的功率密度谱	169
4.1.3	连续时间非周期信号的傅里叶变换	172
4.1.4	非周期信号的能量密度谱	175
4.2	离散时间信号的频率分析	178
4.2.1	离散时间周期信号的傅里叶级数	178
4.2.2	周期信号的功率密度谱	181
4.2.3	离散时间非周期信号的傅里叶变换	183
4.2.4	傅里叶变换的收敛性	185
4.2.5	非周期信号的能量密度谱	188
4.2.6	傅里叶变换和 z 变换的关系	191
4.2.7	倒谱	193
4.2.8	单位圆上有极点的信号的傅里叶变换	194
4.2.9	信号的频域分类:带宽的概念	195
4.2.10	某些自然信号的频率范围	197
4.3	频域和时域的信号特性	198
4.4	离散时间信号傅里叶变换的性质	200
4.4.1	傅里叶变换的对称性质	201
4.4.2	傅里叶变换的定理和性质	206
4.5	小结与参考文献	214
	习题	215
第 5 章	LTI 系统的频域分析	222
5.1	线性时不变系统的频域特性	222
5.1.1	对复指数和正弦信号的响应:频率响应函数	222
5.1.2	正弦输入信号的稳态和暂态响应	229
5.1.3	周期输入信号的稳态响应	230
5.1.4	非周期输入信号的响应	230

5.2	LTI 系统的频率响应	232
5.2.1	具有有理系统函数系统的频率响应	232
5.2.2	频率响应函数的计算	234
5.3	LTI 系统输出的相关函数和频谱	237
5.3.1	输入-输出相关函数和频谱	237
5.3.2	随机输入信号的相关函数和功率谱	238
5.4	作为频率选择滤波器的线性时不变系统	240
5.4.1	理想滤波器特性	241
5.4.2	低通、高通和带通滤波器	243
5.4.3	数字谐振器	247
5.4.4	槽口滤波器	249
5.4.5	梳状滤波器	250
5.4.6	全通滤波器	253
5.4.7	数字正弦振荡器	255
5.5	逆系统和去卷积	257
5.5.1	线性时不变系统的可逆性	257
5.5.2	最小相位、最大相位及混合相位系统	260
5.5.3	系统辨识与去卷积	263
5.5.4	同态去卷积	265
5.6	小结与参考文献	266
	习题	266
第 6 章	信号的采样与重建	282
6.1	理想的连续时间信号采样与重建	282
6.2	连续时间信号的离散时间处理	290
6.3	模数转换器和数模转换器	295
6.3.1	模数转换器	295
6.3.2	量化与编码	296
6.3.3	量化误差分析	299
6.3.4	数模转换器	300
6.4	连续时间带通信号的采样与重建	302
6.4.1	均匀或一阶采样	302
6.4.2	交叉或非均匀二阶采样	306
6.4.3	带通信号的表示	311
6.4.4	利用带通信号表示进行采样	313
6.5	离散时间信号采样	314
6.5.1	离散时间信号采样和插值	314
6.5.2	带通离散时间信号表示和采样	318
6.6	过采样 A/D 转换器和 D/A 转换器	319
6.6.1	过采样 A/D 转换器	319

6.6.2 过采样 D/A 转换器	324
6.7 小结与参考文献	325
习题	325
第 7 章 离散傅里叶变换的特性及应用	332
7.1 频域采样:离散傅里叶变换	332
7.1.1 离散时间信号的频域采样和重建	332
7.1.2 离散傅里叶变换	336
7.1.3 DFT 是线性变换	339
7.1.4 DFT 与其他变换的关系	341
7.2 DFT 的性质	343
7.2.1 周期性、线性和对称性	344
7.2.2 两个 DFT 的乘法和圆周卷积	348
7.2.3 DFT 的其他性质	352
7.3 基于 DFT 的线性滤波算法	356
7.3.1 在线性滤波中使用 DFT	356
7.3.2 长数据序列滤波	360
7.4 利用 DFT 对信号进行频率分析	362
7.5 离散余弦变换	367
7.5.1 FDCT	367
7.5.2 IDCT	368
7.5.3 DCT 是正交变换	369
7.6 小结与参考文献	372
习题	372
第 8 章 DFT 的有效计算:快速傅里叶变换算法	379
8.1 DFT 的有效计算:FFT 算法	379
8.1.1 直接计算 DFT	380
8.1.2 用分而治之的方法计算 DFT	380
8.1.3 基 2 FFT 算法	384
8.1.4 基 4 FFT 算法	391
8.1.5 分裂基 FFT 算法	395
8.1.6 FFT 算法的实现	398
8.2 FFT 算法的应用	399
8.2.1 有效计算两个实序列的 DFT	399
8.2.2 有效计算 $2N$ 点实序列的 DFT	400
8.2.3 FFT 算法在线性滤波与相关分析中的应用	400
8.3 用线性滤波法计算 DFT	402
8.3.1 Goertzel 算法	402
8.3.2 调频 z 变换算法	403
8.4 DFT 计算中的量化效应	407

8.4.1	直接计算 DFT 的量化误差	407
8.4.2	FFT 算法的量化误差	409
8.5	小结与参考文献	412
	习题	412
第 9 章	离散时间系统的实现	417
9.1	离散时间系统的实现结构	417
9.2	FIR 系统的结构	418
9.2.1	直接型结构	418
9.2.2	级联型结构	419
9.2.3	频率采样结构	421
9.2.4	格型结构	423
9.3	IIR 系统的结构	431
9.3.1	直接型结构	431
9.3.2	信号流图和转置结构	432
9.3.3	级联型结构	435
9.3.4	并联型结构	437
9.3.5	IIR 系统的格型结构和格型梯状结构	439
9.4	数的表示	445
9.4.1	数的定点表示	445
9.4.2	二进制数的浮点表示	447
9.4.3	舍入与截尾引起的误差	449
9.5	滤波器系数的量化效应	452
9.5.1	滤波器系数量化效应的敏感度分析	453
9.5.2	FIR 滤波器的系数量化	459
9.6	数字滤波器中的舍入效应	460
9.6.1	递归系统的极限环振荡	461
9.6.2	尺度变换以防止溢出	464
9.6.3	数字滤波器定点实现中量化效应的统计描述	465
9.7	小结与参考文献	471
	习题	472
第 10 章	数字滤波器设计	481
10.1	整体考虑	481
10.1.1	因果性及其含义	481
10.1.2	实际选频滤波器的特性	484
10.2	FIR 滤波器的设计	485
10.2.1	对称和反对称的 FIR 滤波器	485
10.2.2	使用窗函数设计线性相位 FIR 滤波器	488
10.2.3	采用频率采样方法设计线性相位 FIR 滤波器	492
10.2.4	最优等纹波线性相位 FIR 滤波器的设计	498

10.2.5	FIR 微分器设计	508
10.2.6	希尔伯特变换器的设计	509
10.2.7	线性相位 FIR 滤波器设计方法的比较	514
10.3	从模拟滤波器设计 IIR 滤波器	516
10.3.1	用导数逼近设计 IIR 滤波器	517
10.3.2	用冲激不变设计 IIR 滤波器	520
10.3.3	利用双线性变换设计 IIR 滤波器	524
10.3.4	通用模拟滤波器的特性	527
10.3.5	基于双线性变换的数字滤波器设计的一些例子	534
10.4	频率变换	537
10.4.1	模拟域频率变换	537
10.4.2	数字域频率变换	538
10.5	小结与参考文献	540
	习题	541
第 11 章	多速率数字信号处理	552
11.1	引言	552
11.2	以因子 D 抽取	556
11.3	以因子 I 内插	558
11.4	以有理因子 I/D 转换采样率	560
11.5	采样率转换的实现	563
11.5.1	多相滤波器结构	563
11.5.2	滤波器和下采样器/上采样器的相互交换	565
11.5.3	利用级联积分器的梳状滤波器转换采样率	565
11.5.4	抽取和内插滤波器的多相结构	567
11.5.5	有理采样率转换的结构	570
11.6	采样率转换的多级实现	571
11.7	带通信号的采样率转换	573
11.8	以任意因子的采样率转换	575
11.8.1	利用多相内插器任意重采样	575
11.8.2	利用 Farrow 滤波器结构任意重采样	576
11.9	多速率信号处理的应用	577
11.9.1	移相器的设计	577
11.9.2	不同采样率数字系统的接口技术	578
11.9.3	窄带低通滤波器的实现	579
11.9.4	语音信号子带编码	580
11.10	数字滤波器组	581
11.10.1	均匀滤波器组的多相结构	585
11.10.2	复用转接器	586
11.11	双通道正交镜像滤波器组	587