



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

北京大学数学教学系列丛书

本科生
信息基础课教材

数字信号 处理

(第二版)

程乾生 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

北京高等教育精品教材

北京大学数学教学系列丛书

数字信号处理

(第2版)

程乾生 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/程乾生著. —2 版. —北京: 北京大学出版社, 2010. 8
(北京大学数学教学系列丛书)

ISBN 978-7-301-17594-1

I. ①数… II. ①程… III. ①数字信号-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(2010)第 149676 号

书 名: 数字信号处理(第 2 版)

著作责任者: 程乾生 著

责任编辑: 刘 勇

标准书号: ISBN 978-7-301-17594-1/O · 0819

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 电子邮箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 理科编辑部 62752021
出版部 62754962

印 刷 者: 北京飞达印刷有限责任公司

经 销 者: 新华书店

890 mm×1240 mm A5 13.875 印张 400 千字

2003 年 11 月第 1 版 2010 年 8 月第 2 版

2010 年 8 月第 1 次印刷(总第 4 次印刷)

定 价: 28.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

谨以此书纪念

清华大学教授、中国科学院院士 常 迥先生
北京大学教授、中国科学院院士 程民德先生

内 容 简 介

本书主要讲述数字信号处理的基本概念、原理及方法,内容精简,道理明晰.全书主要内容包括:连续信号的频谱和傅氏变换,离散信号和抽样定理,滤波与褶积、Z变换,线性时不变滤波器与系统,冲击函数—— δ 函数,希尔伯特变换与实信号的复数表示,有限离散傅氏变换,相关分析,物理可实现信号、最小相位和最小能量延迟信号,有限长脉冲响应滤波器和窗函数,递归滤波器及其设计.

本书是作者集30余年在数字信号处理方面科研与教学实践经验,并在本书第1版的基础上,经过修订、补充而成.本书第1版是北京高等教育精品教材,本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材.

本书是第一次修订版,其指导思想是在保持第1版的框架与内容基本不变的基础上,对教材作必要的修改与补充,以使本书更进一步贴近读者,更便于教学或自学.具体做法或新版的特点有三:(1)内容集中,为了突出数字信号处理的基本内容,去掉了原书第十二章和第十三章的内容;(2)章节的安排具有积木式结构,根据不同学校的不同要求或不同的课时,选择适当章节组成合适的教材;(3)增加了例题和问题,每章的问题都有详细解答,既便于教师教学,又便于读者自学.

1998年,教育部颁布的普通高等学校专业目录,把信息与计算科学作为数学类的两个专业之一,另一专业是数学与应用数学.作为信息科学重要内容之一的数字信号处理,有自己特有的内容、理论和方法,当不受学科类别的限制.因此,本书适合大学理学的电子信息科学类、地球物理学类和大学工学的电气信息类、地矿类等相关专业.

本书可作为综合大学、理工科大学信息、无线电通讯、地球物理、自动控制、生物医学、应用数学等专业本科生“数字信号处理”课程的教材或教学参考书,同时也可作为从事信号处理工作的科技人员及有关师生的一本有价值的参考书.

读者在阅读本书时如有疑难问题,或有好的建议,请与作者联系.电子信箱:
qcheng@math.pku.edu.cn

作 者 简 介

程乾生 北京大学数学科学学院教授,博士生导师,毕业于北京大学数学力学系.程乾生教授曾任中国电子学会信号处理学会副理事长,中国数学会概率统计学会常务理事,中国工业与应用数学学会常务理事,中国工业与应用数学学会信号与信息处理专业委员会主任.著作多部,论文近百篇,曾获国家教委科技进步奖和国家自然科学奖.研究领域为:信号与信息处理,时间序列分析,模式识别,金融数学等学科.

《北京大学数学教学系列丛书》编委会

名誉主编：姜伯驹

主 编：张继平

副 主 编：李 忠

编 委：（按姓氏笔画为序）

王长平 刘张炬 陈大岳 何书元

张平文 郑志明 柳 彬

编委会秘书：方新贵

责任编辑：刘 勇

修订版前言

本书是作者集 30 余年在数字信号处理方面科研与教学实践经验,并在本书第 1 版的基础上修订而成的.本书第 1 版是北京高等教育精品教材,修订版是普通高等教育“十一五”国家级规划教材.

本书是第 1 版的修订版,其指导思想是在保持第 1 版的框架与内容基本不变的基础上,对教材作必要的修改与补充,以使本书更进一步贴近读者,更便于教学或自学.

这次修订,采取了以下做法,或有以下特色:

删去支节内容,突出主要内容,保留论述的严谨性.原书第十二章最小平方滤波和第十三章随机信号的内容,与本书所阐述的数字信号处理的基本概念、原理和方法关系不大,因此被删除了.为了使读者知其然也知其所以然,有些问题的证明也保留了,如,在讨论物理可实现的希尔伯特变换时,要用到离散单位阶跃信号的频谱公式(6-4-24),这个公式在世界上一些最著名的教材中都要用到(如教材: A. V. Oppenheim, R W. Schaffer, J. R. Buck. Discrete-Time Signal Processing. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1999),但是都没有给出证明.我们给出了证明,在修订版中我们保留了证明.当然,许多读者可以不看这些内容,但对有兴趣的读者提供了难以找到的参考内容.另外,附录 A 切比雪夫递归滤波对了解递归滤波是很重要的,附录 B 信号处理中的某些代数问题对研究信号处理提供数学工具也是必要的.因此,这两个附录我们也保留了.

本书章节的安排具有积木式结构.可以根据不同学校的要求或不同的课时,选择适当的章节组成合适的教材.如,可以选择第一章,第二章,第三章,第四章,第七章 § 1—§ 4,第十章,第十一章,这样可以组成一个简明教程.我们把本书的每一节都当成一个基本积木块,当你垒积木时,并不是每个基本积木块都要用到.

为了让读者更好地理解概念、理论和方法,我们增加了例题,并

给出了各章问题的解答。我是北京大学上世纪五六十年代严格科班教育培养出来的大学生,那时老师严格要求学生要做到独立钻研、独立思考,严禁出什么习题解答。我也一直不主张在教材中给出习题解答的。直到有一件事情改变了我的看法。前几年,我的一个学生到哥伦比亚大学攻读博士学位。他有一门必修课,讲课的是一位美国工程院院士。还有一名助教。助教每周给他们上一次习题课,内容就是解答教授上周留的作业。学生可以在下周助教的网页上下载本周讲的习题解答。在助教上习题课时,如果学生对某个问题有不同的看法或不同的解法,可以提出来,大家在课堂上可以充分地讨论。事实证明,这样的教学模式并未影响哥伦比亚大学学生的独立思考。每年的博士生资格考试至少要淘汰百分之二十的学生,只留下基础好又善于独立思考的学生。美国人对博士生教育之重视、对做习题作业之重视远远超出了我的想象。有鉴于此,我决定把习题解答和教材内容放在一本书里,以便于读者自学和独立思考。同时建议读者在每一章、每一节,先看明白内容,弄清概念、理论和方法,再自己独立做例题、做问题,先不要看答案。如果自己做出来了,再看答案,分析一下是否还有更好的方法。如果自己实在做不出来,可看答案,但一定要分析做不出来的原因,以提高自己分析问题、解决问题的能力。

信号处理课程不仅是理论课程,也是应用课程。因此,我们希望在有条件的学校,做些模拟数据和实际数据的频谱分析和滤波试验。MATLAB是一个包含信号处理功能的软件,只要掌握本书的概念和方法,查阅有关 MATLAB 手册,就可以上机试验了。

由于水平和能力有限,作者诚恳希望读者在发现书中错误时能直接提出来,以便改进。

好奇心、兴趣是一切创造的原动力。同样,也是学习的原动力。愿你以快乐的心情讲授或学习这本书。

程乾生

2010年6月于北京大学承泽园

第 1 版前言

在当今信息科学中,信号处理是极为重要的一个分支.在生物医学、地球物理、无线电通讯、自动控制、雷达、声纳、语音处理等许多科技领域以及金融、经济、社会学等许多社会科学领域,都有大量的信号处理问题.许多领域的需要,计算机的快速发展和广泛应用以及数学方法不断地深入研究和改进,都大大促进了数字信号处理的发展.为了适应信息科学的发展和大学“数字信号处理”课程教学以及科技人员的需要,特地编写此书,作为信号处理的基础教材和入门书,旨在深入地讨论数字信号处理的基本概念、原理和方法.

本书是在我的第一部著作《信号数字处理的数学原理》(石油工业出版社,1979)及其第二版(1993)的基础上,并集我 20 余年教授“数字信号处理”课的经验而写成.1971 年,我参加了地震勘探数字技术研究课题组.当时我们并不知道有信号处理这门学科,也没有发现有关的外文书籍.只能一篇文献一篇文献的阅读、钻研,看懂了以后再对年轻的科研人员讲解,他们听懂了以后再编程序上机加以实现,对实际资料进行处理.在这个过程中,北京大学严谨的学风使我受益匪浅.这种严谨学风要求我在阅读文献时,对概念追究其来源,对结论追究其论证.在那个年代,北京大学停止订购许多外文杂志及书籍,我为了查阅文献,只能经常骑自行车往返于北京大学和北京和平里中国科技情报所之间.尽管十分劳累,但为了弄清一个概念,弄懂一个道理,心里还是十分高兴的.我的第一部关于信号处理的著作《信号数字处理的数学原理》,就是根据给年轻工程人员讲课的讲稿整理而成的.由于还有不少教师参加通信课题研究,北京大学数学系在信号与信息处理方向的教学与科研方面都有相当基

础,因此,1981年在本科生的教学中就设立了信息处理方向.从1981年起,北京大学数学系每年都要给本科生开设“数字信号处理”课程.已学习这门课程的本科生、硕士和博士生有好几百人,其中许多人已成为科研和教学中的骨干.由于以上原因,如果说本书有特色的话,主要表现在编写和内容阐述两方面.在编写上,力求通俗易懂、深入浅出,既适合教学,也适合自学,使具有高等数学知识的读者,能掌握本书的大部分内容.在内容上,对概念的阐述要清晰,并且力求说明其来源和意义,对于结论,在论证的时候要强调分析和解决问题的方法.我们在希尔伯特变换及其应用, δ 函数及其应用,最小相位信号,最小能量信号等章节,都做了这些方面的尝试.有些章节的内容,是根据教学经验更改的,例如,我们把 Z 变换看成离散信号频谱的简化表示,这样既避免了一般的泛泛讨论,又强调了 Z 变换的频谱意义.

本书深入地讲述数字信号处理的基本概念、原理和方法,内容比较广泛,主要包括:信号频谱和傅氏变换,离散信号和抽样定理,滤波与褶积、 Z 变换,线性时不变系统,冲击函数—— δ 函数,希尔伯特变换与实信号的复数表示、包络、瞬时相位和瞬时频率,相关分析,离散物理可实现信号的性质和最小相位信号、最小能量延迟信号,有限长脉冲响应滤波器和窗函数,递归滤波器的设计,最小平方滤波,随机信号的能谱与功率谱,线性随机过程的表示与ARMA模型.但是,并不是所有上述内容都需要在课堂上讲授.满足教学要求的基本内容为:第一章,第二章,第三章,第四章 $\S 1\sim\S 4$,第五章 $\S 1\sim\S 2$,第六章 $\S 1\sim\S 4$,第七章 $\S 1\sim\S 4$,第八章,第九章 $\S 1\sim\S 6$,第十章,第十一章.关于以上基本内容,我们要做两点说明:第一,以上所列基本内容,并不是要求教师在课堂上都讲授,可以讲授最重要的,其他可让学生自学;第二,如果教学课时比较多,可以选择除上述基本内容外书中的其他一些内容进行讲授.为了使读者掌握书中内容,希望读者能了解例题,并尽量多做一些每章后的问题.

由于水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正.

最后,作者要诚挚地感谢我国信息科学前辈、清华大学常迥教授和我的老师、北京大学程民德教授对我一贯的鼓励、支持和帮助,我真诚地以此书纪念他们.编辑刘勇同志为此书的出版付出了巨大心血,我在此也表示真诚的感谢.

程乾生

2003年6月30日于

北京大学承泽园

目 录

绪论	(1)
参考文献	(4)
第一章 连续信号的频谱和傅氏变换	(6)
§ 1 有限区间上连续信号的傅氏级数和离散频谱	(6)
§ 2 傅氏变换,连续信号与频谱	(13)
问题	(24)
参考文献	(28)
第二章 离散信号和抽样定理	(29)
§ 1 离散信号	(29)
§ 2 连续信号的离散化,正弦波的抽样问题	(35)
§ 3 带限信号与奈奎斯特频率	(40)
§ 4 离散信号的频谱和抽样定理	(45)
§ 5 由离散信号恢复连续信号的问题	(51)
§ 6 抽样与假频,抽样或重抽样的注意事项	(53)
问题	(55)
参考文献	(57)
第三章 滤波与褶积, Z 变换	(58)
§ 1 连续信号的滤波与褶积	(58)
§ 2 离散信号的滤波与褶积	(62)
§ 3 信号的能谱与能量等式,功率谱与平均功率等式	(66)
§ 4 离散信号与频谱的简化表示	(72)
§ 5 离散信号的 Z 变换	(75)
§ 6 作为罗朗级数的 Z 变换	(82)
问题	(87)
参考文献	(90)

第四章 线性时不变滤波器与系统	(91)
§ 1 线性时不变系统及其时间响应函数	(91)
§ 2 线性时不变系统的因果性和稳定性	(95)
§ 3 系统的组合——串联、并联及反馈	(99)
§ 4 有理系统及其时间响应函数	(103)
§ 5 差分方程的单边 Z 变换解法	(106)
问题	(113)
参考文献	(115)
第五章 冲激函数——δ 函数	(116)
§ 1 冲激函数—— δ 函数的定义和频谱	(116)
§ 2 δ 函数的微商	(122)
§ 3 用 δ 函数求函数的微商和频谱	(125)
问题	(130)
参考文献	(130)
第六章 希尔伯特变换与实信号的复数表示	(131)
§ 1 实连续信号的复信号表示和希尔伯特变换	(131)
§ 2 希尔伯特变换的例子	(134)
§ 3 连续和离散实信号的包络、瞬时相位和瞬时频率	(137)
§ 4 物理可实现信号的希尔伯特变换	(141)
问题	(152)
参考文献	(154)
第七章 有限离散傅氏变换	(155)
§ 1 有限离散傅氏变换、有限离散频谱所引起的假信号	(155)
§ 2 快速傅氏变换(FFT)	(162)
§ 3 有限离散傅氏变换的循环褶积	(169)
§ 4 应用快速傅氏变换进行频谱分析	(178)
§ 5 有限离散哈特利变换、余弦变换和广义中值函数	(183)
问题	(192)
参考文献	(199)

第八章 相关分析	(201)
§ 1 相关的基本概念,相关与褶积的关系	(201)
§ 2 相关函数的性质	(207)
§ 3 循环相关和普通相关	(214)
§ 4 多道相关	(220)
问题	(228)
参考文献	(232)
第九章 物理可实现信号、最小相位信号和最小能量延迟信号	(233)
§ 1 物理可实现信号	(233)
§ 2 能量有限的物理可实现信号、纯相位物理可实现信号和全通滤波器	(236)
§ 3 相位延迟与群延迟的概念,最小相位信号	(241)
§ 4 全通滤波器的能量延迟性质、最小延迟信号	(248)
§ 5 Z 变换为多项式和有理分式时的最小相位性质	(257)
§ 6 最小相位信号和柯氏谱	(262)
问题	(265)
参考文献	(266)
第十章 有限长脉冲响应滤波器和窗函数	(268)
§ 1 理想滤波器及其存在的问题	(268)
§ 2 时窗函数	(274)
§ 3 广义线性相位滤波器,有限长脉冲响应滤波器设计的其他方法	(289)
问题	(293)
参考文献	(296)
第十一章 递归滤波器的设计	(298)
§ 1 递归滤波及其稳定性	(298)
§ 2 模拟滤波器的设计	(305)
§ 3 数字递归滤波器的设计	(314)
问题	(321)

参考文献	(323)
附录 A 切比雪夫递归滤波	(324)
参考文献	(337)
附录 B 信号处理中的某些代数问题	(338)
§ 1 豪斯霍尔德变换矩阵和矩阵的 QR 分解、正交分解	(338)
§ 2 矩阵的奇异值分解	(343)
§ 3 广义逆矩阵	(347)
§ 4 最小平方问题	(350)
§ 5 阻尼方法	(355)
§ 6 奇异值分析	(359)
§ 7 矩阵的模、条件数和分解,矩阵的微商	(366)
问题	(379)
参考文献	(381)
问题解答	(382)
第一章问题解答	(382)
第二章问题解答	(386)
第三章问题解答	(389)
第四章问题解答	(396)
第五章问题解答	(402)
第六章问题解答	(404)
第七章问题解答	(409)
第八章问题解答	(416)
第九章问题解答	(418)
第十章问题解答	(421)
第十一章问题解答	(426)

绪 论

1. 什么是信号?

信号是人人都熟悉、日常生活中常用的一个名词.但是,它的确切含意是什么呢?

美国最著名的一本信号处理著作称,“术语信号通常用于代表携带信息的某个东西”(见文献[1]第8页).这和一本美国英语词典所说的相似,“信号是传递信息的一个行动或一个东西,通常不用文字来表示”(见文献[2]第1418页).上述说法太泛了,以至于还是不能了解信号的确切含意.

在现代汉语词典里,对信号的解释稍为具体些,“信号:① 用来传递消息或命令的光、电波、声音、动作等;② 电路中用来控制其他部分的电流、电压或无线电发射机发出的电波.”(见文献[3]第1272页).

在信号处理这门学科里,要研究的信号究竟是什么呢?我们先看一些具体的例子.

声音(见图0-1),心电图,地震记录,气象温度记录,……——一元函数 $f(t)$;

