

Digital Signal Processing Using MATLAB® V.4

数字信号处理 及其MATLAB实现



〔美〕 Vinay K.Ingle 著
John G.Proakis

陈怀琛 王朝英 等译
高西全

ITP



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

数字信号处理及其 MATLAB 实现

Digital Signal Processing Using MATLAB

[美] Vinay K. Ingle 著
John G. Proakis

陈怀琛 王朝英 高西全 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

致谢

我们要感谢在东北大学选 ECE-1456 课程的许多大学生,他们给了我们一个讲坛来做“用 MATLAB 进行教学”的试验,并忍受了我们啰嗦地强调 MATLAB。许多高效的 MATLAB 程序也出自这些学生。我们也要感谢我们的审稿人,他们的建设性的批评使得这些材料组织得更好。他们是:加州大学洛杉矶分校的 Abeer A. H. Alwom,天主教大学的 Steven Chin,北卡州立大学的 Joel Trussel。

我们要感谢 PWS 出版公司的前编辑 Tom Robbins,因为他提出了建立‘书之伴侣丛书’的倡议并热心支持用 MATLAB 进行教学,特别是用于数字信号处理。同样要感谢现任编辑 Bill Barter,因为他对这一工作全过程的支持。最后我们要感谢 PWS 出版公司的工作人员为书稿的完成所作的努力。

Vinay K. Ingle
John G. Prookis
Boston, Massachusettes

内 容 简 介

本书系统讲述了数字信号处理的基本知识和应用,以及以 MATLAB 软件为基础的设计题目。本书共十章,主要讲述:MATLAB 简述,离散时间信号和系统;离散时间付利叶分析;Z 变换;离散付利叶变换;数字滤波器结构;FIR 滤波器设计;IIR 滤波器设计;自适应滤波方面的应用;通信中的应用。

本书思路明朗、叙述清楚,深入浅出。尤其较好地将 MATLAB 和数字信号处理中的传统论题集成,有特色,是一本有效利用 MATLAB 解题的好参考书。

Copyright © 1996, by PWS Publishing Company, A Division of International Thomson Publishing Inc.

ALL RIGHTS RESERVED. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or any information storage and retrieval system, without permission, in writing, from the Publisher.

本书中文简体专有翻译出版权由美国 International Thomson Publishing 授予电子工业出版社。该专有出版权受法律保护。

图书在版编目 (CIP) 数据

数字信号处理及其 MATLAB 实现/ (美) 英格尔 (Ingle, V. K.), (美) 普罗克斯 (Proakis, J. G.) 著; 陈怀琛等译. - 北京: 电子工业出版社, 1998. 8

书名原文: Digital Signal Processing Using MATLAB
ISBN 7-5053-4816-7

I. 数… II. ①英… ②普… ③陈… III. 数字信号-信号处理-应用程序, MATLAB IV. TP911. 72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 13545 号

书 名: 数字信号处理及其 MATLAB 实现

著 者: Vinay K. Ingle John G. Proakis

译 者: 陈怀琛 王朝英 高西全等

责任编辑: 焦桐顺

特约编辑: 德妹

排版制作: 华燕实业公司

印 刷 者: 北京天宇星印刷厂

装 订 者: 河北涿州桃园装订厂

出版发行: 电子工业出版社出版、发行

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036 发行部电话 68214070

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

经 销: 各地新华书店经销

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 24.25 字数: 620 千字

版 次: 1998 年 9 月第 1 版 1998 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-5053-4816-7
TP·2340

定 价: 48.00 元

著作权合同登记号 图字: 01-98-0463

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

版权所有·翻印必究

译者序

人类正在进入信息时代,而数字化又是信息技术发展的方向,因此数字信号的处理已成为电子信息学科中的工程技术人员必不可少的知识。在电子信息类专业的教学计划中,《数字信号处理》过去只作为研究生课程,现在已经把它的基础部分纳入了大学本科的教学中,这是技术发展的必需和结果。我们应当推动这一趋势。

由于数字信号处理的概念比较抽象,本科学生学习这门课程具有一定的困难。加上其数值计算又比较繁琐,教师不太好布置作业,使学生的实践受到相当的限制,这就会在很大程度上影响本课的教学效果。国外在若干年前,就开始把 MATLAB 用于数字信号处理的教学过程中并取得了很好的经验,在美国,现在 MATLAB 已经成为解决数字信号处理问题的公认的标准软件。

为了推动数字信号处理课程的发展和改革,使它更好地与国际接轨,我们翻译了美国东北大学 Vinay K. Ingle 和 John G. Proakis 两位教授所写的书:“Digital Signal Processing Using MATLAB”(PWS 出版社 1997 年版权)。这本书思路明朗,叙述清楚,而且将书中所编的函数和程序集成为一个数字信号处理工具箱,不仅能为当前的课程中解题服务,而且对以后深入学习和应用数字信号处理,都会有很大帮助。因此我们决定把它翻译成为中文出版,得到了电子工业出版社的大力支持。

除了对书的本文进行翻译之外,我们对书中的 MATLAB 程序和函数的注释和文字显示部分也进行了汉化,所有的程序都作过运行验证,并且单独组成一个软盘,可以提供给读者。需要此软盘的读者可与西安电子科技大学 137 信箱联系。本书可供大学本科和研究生作为教学参考书,也可供实际从事数字信号处理研究工作的人员使用。

本书中的很多图形是由 MATLAB 生成再剪贴到 WORD 中去的。这种方式的图形分辨率较低。原书是将 MATLAB 生成的图形直接转为 eps 格式的文件打印出来的,质量高得多,但对图形中有汉字的不支持。因此,只好用前一方式,它也有好处,读者在计算机屏幕上看到的图形将同书上一样。

本书翻译过程中,我们与原书作者保持着经常的电子邮件联系,及时解决了许多疑难问题,我们对原书作者的合作表示感谢。

本书共十章,陈怀琛翻译了第一章至第三章及全书译稿的总审,王朝英翻译了第五章至第八章并负责全书译稿的整理,高西全翻译了第九第十章,第四章由李明辉和铁锚提供译稿。我们欢迎读者的建议和要求,来函可寄西安电子科技大学 137 信箱(邮编 710071)或电子工业出版社转。

序 言

从上个年代初开始,我们经受了一个计算机技术的革命和界面友好应用的大发展。这个革命至今仍在继续,它使得廉价的个人计算机赶上了昂贵的工作站的性能。这个技术的过程应该对教育的过程产生影响,特别是能够进行有效的教学以提高学习的效果。这本数字信号处理的书将为达到这个目的作出微薄的贡献。

在过去几年中,信号处理的教学方法已经发生了变化,由‘单纯讲课’的模式到‘讲课-实验’的集成环境,其中包括教学生用 DSP 硬件实际动手。然而为了有效地讲授 DSP,讲课中也需要充分使用以计算机为基础的解释、示例和习题。前几年,由 Mathworks 公司开发的 MATLAB 软件已经使自己成为信号处理界公认的数值计算的标准和开发算法的备选平台。这一发展有多种理由,但最重要的一个理由是 MATLAB 实际上可在所有的计算平台上运行。若干年前,市场上只有昂贵的 MATLAB 专业版。廉价的学生版的出现使得在课堂上使用 MATLAB 成为可能。近来,出现了一些数字信号处理的教科书,它们能提供可用 MATLAB 求解的习题。然而对于学生(以及对 DSP 有兴趣的工程师),还没有一本能告诉他们如何有效地利用 MATLAB 解题的参考书。在本书中,我们试图把 MATLAB 和数字信号处理中的传统论题集成起来,使得 MATLAB 能被用来开发困难的论题和解决深入的题目。数字信号处理中的许多问题和算法设计需要大量的计算。对于这些, MATLAB 提供了一个适宜的工具因而可以很方便地试验许多场景。这样的方法可以强化学习的进程。

本书的概貌

本书主要是用来作为本科三、四年级大学生数字信号处理课程的补充教材。我们假定学生已经熟悉了 MATLAB 的基础。这些内容已在许多关于 MATLAB 的教科书和手册中叙述过因而这里不再重复。同样地,本书也不写成一本 DSP 的教科书,因为已经有了不少出色的教材。我们尝试作的是提供深度足够的由 MATLAB 函数和例题叙述的素材,以使得通篇的说明能够前后一致、合乎逻辑以及令人愉快。

当本计划正在进行时,用的是 MATLAB 3.5 学生版。从 1995 年初起,一个更先进的具有优良图形用户界面的 4.0 学生版进入了市场。本书是和新版本兼容的。

本书的组成

本书的前八章讨论了一般 DSP 入门课程中涉及的传统内容。后两章是作为 DSP 的应用,着重于以 MATLAB 为基础的设计题目。以下列出各章的目录及其简要说明。

第一章。导论:本章向读者介绍信号处理学科,并讨论了数字信号处理与模拟信号处理相比的优点。同时也对 MATLAB 做了一个简要的叙述。

第二章,离散时间信号和系统:本章对时域中的离散信号和系统作了简要的综述,并且演

示了如何合理地使用 MATLAB 函数。

第三章,离散时间付利叶分析:本章讨论了频域内离散信号和系统的表示方法。也阐述了模拟信号的采样和重构。

第四章,z 变换:本章讨论了在复频域中信号和系统的表述。介绍了用 MATLAB 技术分析 z 变换和计算 z 反变换。也给出了用 z 变换和 MATLAB 求差分方程解的方法。

第五章,离散付利叶变换:本章讨论付利叶变换计算及提高其执行效率的问题。离散付利叶级数是用来介绍离散付利叶变换的。它的一些特性可用 MATLAB 来演示的。对快速卷积和快速付利叶变换之类的命题进行了透彻的讨论。

第六章,数字滤波器结构:本章讨论了数字滤波器实现中的几种结构。开发了一些有用的 MATLAB 函数以便确定和实现这些结构。对格型梯形滤波器也进行了介绍和探讨。

第七章,FIR 滤波器设计:本章和下一章介绍了数字滤波器设计中的重要命题。讨论了 FIR 滤波器的三种重要设计技术,即窗设计、频率采样设计和等波动滤波器设计。并用 MATLAB 给出了几个设计实例。

第八章,IIR 滤波器设计:本章中包括了 IIR 滤波器设计技术。它先从模拟滤波器设计开始,然后介绍了滤波器变换和滤波器频带变换等论题。再一次给出了用 MATLAB 作设计的几个实例。

第九章,自适应滤波方面的应用:本章是用 MATLAB 进行专题设计的两章中的第一章。内容包括自适应 FIR 滤波器的理论和实现的介绍,以及有关系统辨识、干扰抑制、窄带频率增强和自适应均衡的设计专题。

第十章,通信中的应用:本章着重于某些涉及波形表述和编码以及数字通信的设计专题。内容有对脉冲编码调制(PCM)、差分 PCM(DPCM)、自适应 DCPM(ADPCM)、DELTA(增量)调制(DM)、自适应 DM(ADM)、学习预测编码(LPC)、双音多频信号(DTMF)的产生和检测等的描述。同时也介绍了二进制通信和扩频通信中信号检测的应用。

软件

本书是我们在教以 MATLAB 为基础的数字信号处理本科课程几年的产物。书中涉及的许多 MATLAB 程序是在课程中开发的。这些函数可以从本书所附软盘中作为 pws-kdsp 工具箱得到,可以为它建立一个子目录并把它放在 matlabpath 的路径上以便调用。本书中还包括了很多用于例题的 MATLAB 程序。这些程序也在盘上并按章放在各自的子目录中。此外许多图形是由 MATLAB 绘出的,其程序文本可在 figure 子目录中找到。学生们应当研究这些程序以便深入理解 MATLAB 的求解过程。我们将欢迎一切批评指正或更紧凑的程序。习题的解答及相应的程序可在最近的将来提供给教师们。关于 MATLAB 和有关的出版物可从下列地址得到:

The Mathworks, Inc.

24 Prime Park Way

Natick, MA 01760-1500

Phone: (508) 647-7000 Fax: (508) 647-7001

E-mail: info@mathworks.com

WWW: <http://www.mathworks.com>

目 录

第一章 导论	(1)
数字信号处理的综述	(1)
关于 MATLAB 的一些说明	(4)
第二章 离散时间信号和系统	(5)
离散时间信号	(5)
离散系统	(17)
卷积	(19)
MATLAB 实现	(21)
差分方程	(25)
习题	(30)
第三章 离散时间付利叶分析	(35)
离散时间付利叶变换(DTFT)	(35)
DTFT 的特性	(41)
LTI 系统的频域表示式	(47)
模拟信号的采样和重构	(53)
习题	(65)
第四章 z 变换	(71)
双向 z 变换	(71)
z 变换的重要特性	(74)
z 反变换	(78)
z 域中的系统描述	(85)
差分方程的解	(95)
习题	(101)
第五章 离散付利叶变换	(106)
离散付利叶级数	(106)
z 域中的采样与重构	(113)
离散付利叶变换	(117)
离散付利叶变换的性质	(127)
用 DFT 计算线性卷积	(141)
快速付利叶变换	(147)
习题	(157)
第六章 数字滤波器的结构	(167)
基本元件	(167)
IIR 滤波器结构	(167)
FIR 滤波器结构	(180)

格型滤波器结构·····	(191)
习题·····	(201)
第七章 FIR 滤波器设计 ·····	(206)
基本知识·····	(206)
线性相位 FIR 滤波器的性质 ·····	(208)
窗设计技术·····	(222)
频率采样设计技术·····	(242)
最优等波动设计·····	(254)
习题·····	(268)
第八章 IIR 滤波器设计 ·····	(276)
预备知识·····	(276)
模拟滤波器原型的特征·····	(278)
模拟 - 数字滤波器变换·····	(300)
用 MATLAB 进行低通滤波器设计 ·····	(317)
频带变换·····	(323)
FIR 滤波器和 IIR 滤波器的比较·····	(334)
习题·····	(336)
第九章 自适应滤波方面的应用 ·····	(343)
系数调整 LMS 算法 ·····	(344)
系统辨识或系统建模·····	(346)
宽带信号中窄带干扰的消除·····	(347)
自适应谱线增强·····	(349)
自适应信道均衡·····	(349)
小结·····	(351)
第十章 通信中的应用 ·····	(352)
脉冲编码调制(PCM) ·····	(352)
差分 PCM(DPCM) ·····	(355)
自适应 PCM(ADPCM)与 DPCM ·····	(357)
ADPCM 标准 ·····	(359)
增量调制 (DM)·····	(360)
语音信号的线性预测编码(LPC)·····	(363)
双音多频(DTMF)信号·····	(366)
二进制数据通信·····	(369)
扩展频谱通信·····	(370)
小结·····	(372)
附录 A PWS_DSPC 汉化的数字信号处理工具箱 1.0 版中的 Matlab 函数 ·····	(373)
参考文献 ·····	(376)

第一章 绪 论

第一节 数字信号处理概述

数字信号处理,或者说对信号的数字处理,是60年代前后发展起来的一门新兴学科。进入70年代以来,随着电子计算机、大规模集成电路(LSI)和超大规模集成电路(VLSI),以及微处理器技术的迅猛发展,数字信号处理无论在理论上还是在工程应用中,都是目前发展最快的学科之一,并且日趋完善和成熟。

由于数字计算机和大规模集成电路的发展和普及,有人似乎认为现在是“数字万能”的时代了,这是一种偏见。作为一次信息源,或称为原始信号源,例如语音、图像等模拟信号,它的重要性今后也不会改变。然而,数字技术的发展却为模拟信号的数字处理开辟了广阔的前景。对数字信号处理没有一个严格的定义,我们不妨把用包括软件在内的数字技术来处理模拟信号叫做数字信号处理。或者简单地说,数字信号处理就是用数字的方法对信号进行变换和处理。

从学科的内容看,数字滤波器和快速傅里叶变换是数字信号处理的两个最重要的学科分支,也是数字信号处理的核心内容。如果仅仅用数字滤波器代替某个系统中的模拟滤波器,则还不能充分发挥数字技术的特长。事实上,对信号进行调制、滤波、变换、增强、压缩、检测、估计、识别等,都是数字信号处理的研究范围。用数字的方法实现具有各种功能的信号处理系统,可以使系统做到更加经济和小型化,进而有可能实现过去用模拟技术难以实现的各种功能。

图1-1给出了模拟信号数字化处理系统的简化框图。此系统先将模拟信号变换为数字信号,经数字信号处理后,再变换成模拟信号输出。其中抗混叠滤波器的作用,是将输入信号 $x(t)$ 中高于折叠频率(其值等于采样频率的一半)的分量滤除,以防信号频谱的混叠。随后,信号经采样和A/D变换后,变成数字信号 $x(n)$ 。数字信号处理器对 $x(n)$ 进行处理,得到输出数字信号 $y(n)$,经D/A变换器变成模拟信号。此信号经低通滤波器,滤除不需要的高频分量,最后输出平滑的模拟信号 $y(t)$ 。

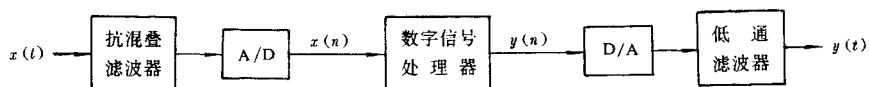


图 1-1 数字信号处理系统的简化框图

实际的数字信号处理系统并不一定要包括图1-1所示的所有方框。有些系统只需数字信号输出,就不需要D/A变换器;有些系统的输入已经是数字信号,那么就不需要A/D变换器;对于纯数字系统,则只需要数字信号处理器这一核心部分就行了。

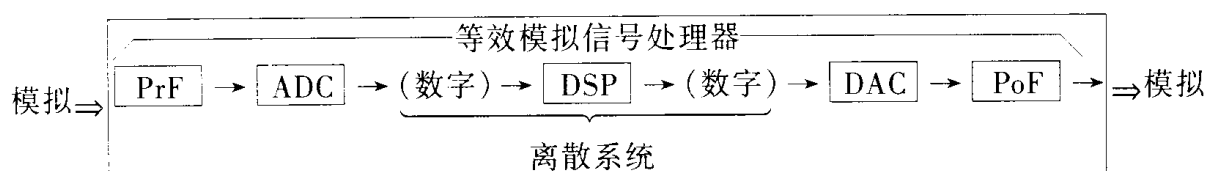
目前,数字信号处理技术已广泛应用于数字通信、雷达、遥感、声纳、语音合成、图像处理、测量与控制、高清晰度电视、数字音响、多媒体技术、地球物理学、生物医学工程、振动工程,以及机器人等各个领域,而且随着科学技术的发展,其研究范围和应用领域还在不断地发展和扩大。

信号是如何被处理的？

我们在实际中所遇到的信号大部分是模拟信号。它们的幅度随时间连续地变化。通常由无源或有源器件组成的电网络对它们作处理。人所共知,这种方法称为模拟信号处理(ASP)。例如无线电和电视接收机。

模拟信号: $x_a(t) \Rightarrow$ 模拟信号处理器 $\Rightarrow$ 模拟信号 $y_a(t)$

它们也可以用包括加法器、乘法器、和逻辑元件或用微处理器组成的数字硬件来处理。但是必须先把模拟信号变成适合于数字硬件来处理的形式。这样的信号形式称为数字信号。它在一定的时间间隔内只取有限数目的数值之一,因而它能用二进制数或位来表示。数字信号的处理称为 DSP,它可用框图表示:



图中各个方框的意义介绍如下:

PrF: 这是一个前置滤波器或反泄漏滤波器,它限制了模拟信号以防止泄漏。

ADC: 模-数转换器,它由模拟信号产生出一个二进制流。

数字信号处理器: 这是 DSP 的心脏,它可以代表一个通用计算机或专用处理器,或数字硬件等等。

DAC: 这是 ADC 的逆运算,称为数-模转换器,它由一个二进制流产生一个阶梯波形,作为形成模拟信号的第一步。

PoF: 这是一个后置滤波器,它把阶梯波形平滑成为预期的模拟信号。

从上面两种信号处理的方法中可以看到,DSP 方法比看来简单的 ASP 方法更加复杂,包括更多的元件。因此人们要问:为什么要用数字方法处理信号? 答案在于 DSP 带来的很多优点。

DSP 胜于 ASP 的优点

ASP 的主要缺点是在作复杂信号处理时只有有限的能力。这造成了处理的不灵活性和系统时间的复杂性。这也造成了产品的昂贵。另一方面,采用 DSP 方法,它可以把一个便宜的个人计算机变成一个强大的信号处理器。DSP 的一些重要的优点如下:

1. 用 DSP 方法的系统的开发可以用通用计算机上的软件来进行。因此 DSP 比较容易开发和测试,而软件是可移植的。

2. DSP 运算是单纯地基于加法和乘法,这导致特别稳定的处理性能——例如不受温度影响。

3. DSP 运算可方便地作实时的修改,通常只要改变程序,或对寄存器重新加载。

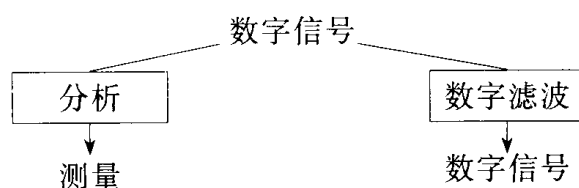
4. 由于超大规模集成电路(VLSI)降低了存储器、门、微处理器等等的价格,DSP 比较便

宜。

DSP 的主要缺点是运算速度低,特别是对很高频的信号。主要由于它的上述优点,DSP 现在已是许多技术和应用中的首选方法,诸如消费电子、通信、无绳电话和医学图象等。

DSP 的两个重要类别

大部分 DSP 运算可分为信号分析任务和信号滤波任务两类,图示如下:



信号分析 本任务涉及信号特性的测量。它通常是一个频域的运算。它的一些应用为:

- * 谱(频率和/或相位)分析
- * 语音分析
- * 说话人识别
- * 目标检测

信号滤波 本任务的特征是“信号入-信号出”的情况。实现这个任务的系统通常被称为滤波器。它通常(但不总是)作时域运算。它的一些用途为:

- * 滤除不需要的背景噪声
- * 去除干扰
- * 频带分割
- * 信号谱的成形

在某些应用中,例如语音合成,首先要对信号进行分析,研究它的特征。然后再用于数字滤波器中来产生合成的声音。

本书的前半部讨论 DSP 的信号分析部分。在第二章中,我们从离散信号和系统的描述开始。第三章对这些信号和系统在频域进行了分析。第四章介绍了频域描述的普遍方法——称为 z 变换。第五章讨论了计算付利叶变换的实际算法,包括离散付利叶变换和快速付利叶变换。

本书的后半部讨论 DSP 的信号滤波方面。在第六章中我们描述了数字滤波器的不同状态和结构。在第七章中给出了一种滤波器——有限长度脉冲响应(FIR)滤波器的设计技术和算法。而在第八章中给出了另一种称为无限长度脉冲响应(IIR)滤波器的设计方法。在这两章中,我们只讨论滤波器设计中简单而实用的技术,没有讨论更先进的技术。最后,在最末两章以设计任务的形式给出了一些实际应用题,它们可以用前八章所学的内容来完成。第九章介绍了自适应滤波,讨论了系统辨识、干扰抑制、自适应线路信号增强等等的简单设计任务。第十章给出了数字通信的一个简单的介绍,并给出有关 PCM、DPCM 和 LPC 等方面论题的设

计任务。

在所有各章中,中心主题是聪明地应用和适当地演示 MATLAB 工具。对已有的 DSP 中大多数的 MATLAB 函数都作了详细的说明,并在许多例子中演示了如何正确地使用它们。此外还开发了许多新的 MATLAB 函数,以便深入领会一些算法工作的内涵。我们相信,这种亲自动手的方法将能使学生在去除对 DSP 的害怕心理并提供丰富的学习经验。

关于 MATLAB 的一些说明

MATLAB 是一种交互式的以矩阵为基础的系统,它用于科学和工程的计算与可视化。它的力量在于它只需用其他编程语言(如 FORTRAN 或 C)的几分之一的时间即可方便地解决复杂的数值计算问题。它的强有力也在于它那相对简单的编程功能。MATLAB 很容易扩展和创造新的命令和函数。

MATLAB 能在很多计算环境下运行:Sun/HP/VAXstation 工作站、80x86 PC、Apple Macintosh、VAX 和一些并行计算机。MATLAB 的基本程序已经由于近年来出现的大量的工具箱(即对某一专题开发的函数集)而得到进一步的加强。本书中的信息一般均适用于所有上述环境。本书的开发开始于在 DOS 下运行的 MATLAB 3.5 专业版。比较便宜包含较少的工具箱和函数的学生版也由 Prentice-Hall 出版社提供了。因此我们决定使本书中开发的 MATLAB 程序和其他内容能与学生版兼容。然而当前的主流版本已经是具有图形用户界面的 MATLAB 4.2 版,而且包含了增强了的新工具箱的具有图形用户界面(GUI)的新的学生版也已于 1995 年 2 月推出,本书也完全与这个版本兼容。我们尽了最大努力来弄清那些存在而可用的新函数。在学生版中新加了一个符号运算(Symbolic)工具箱,它是基于 MAPLE 的。因为数字信号处理主要用到数值计算,在本书中既未讨论也未用到符号运算工具箱。

MATLAB 的范围和能力远远超过了在本节中说的这些。再给出 MATLAB 的详细信息和教材是没有意义的,因为在这个论题上已经有很多的优秀书籍和手册可用了。学生应该参阅 MATLAB 用户手册[2]和参考手册[1]。同样,学生应该尝试[3]中的教科书。上面所给的参考书中的信息,以及在线帮助的文件,通常对使用本书的学生已是足够了。

第二章 离散时间信号和系统

我们从离散时间的信号和系统开始研究。本章将介绍许多重要类型的信号和它们的运算。线性和时不变系统讨论得最多因为它们最容易分析和实现。对卷积和差分方程表示式给予了特别的注意, 因为它们在数字信号处理和 MATLAB 中的重要性。本章的重点是用 MATLAB 表示和实现信号和系统。

离散时间信号

信号可以粗略地分为模拟信号和数字信号。模拟信号将用 $x(t)$ 表示, 其中变量 t 可以表示任何物理量, 但我们假定它代表以秒为单位的时间。离散信号用 $x(n)$ 表示。其中变量 n 为整数并代表时间的离散时刻。因此它也称为离散时间信号。他是一个数字的序列并可用以下符号之一来表述:

$$x(n) = \{x(n)\} = \{\dots, x(-1), x(\underset{\uparrow}{0}), x(1), \dots\}$$

其中, 向上的箭头表示在 $n=0$ 处的取样。

在 MATLAB 中, 我们可以用一个列向量来表示一个有限长度的序列。然而这样一个向量并没有包含采样位置的信息。因此, $x(n)$ 的正确表示方式应该包括分别表示 x 和 n 两个向量。例如序列 $x(n) = \{2, 1, -1, \underset{\uparrow}{0}, 1, 4, 3, 7\}$ 在 MATLAB 中表示为:

```
>> n = [-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4]; x = [2, 1, -1, 0, 1, 4, 3, 7];
```

当不需要采样位置信息或这个信息是多余的时候(例如该序列从 $n=0$ 开始), 我们可以只用 x 向量来表示。由于有限的内存, MATLAB 无法表示一个任意无限序列。

序列的类型

为了分析的需要, 在数字信号处理中用了一些基本的序列。它们的定义和 MATLAB 表达式如下:

1. 单位采样序列

$$\delta(n) = \begin{cases} 1, & n=0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases} = \{\dots, 0, 0, \underset{\uparrow}{1}, 0, 0, \dots\}$$

在 MATLAB 中, 函数 `zeros(1, N)` 产生一个由 N 个零组成的列向量。它可用来实现有限

区间的 $\delta(n)$ 。然而,更高明的方法是利用逻辑关系式 $n == 0$ 来实现 $\delta(n)$ 。例如,要实现

$$\delta(n - n_0) = \begin{cases} 1, & n = n_0 \\ 0, & n \neq n_0 \end{cases}$$

在 $n_1 \leq n \leq n_2$ 区间内的值,我们可用如下的 MATLAB 函数:

```
function [x,n] = impseq(n0,n1,n2)
% Generates x(n) = delta(n - n0); n1 <= n <= n2
% -----
% [x,n] = impseq(n0,n1,n2)
%
n = [n1:n2]; x = [(n - n0) == 0];
```

2. 单位阶跃序列

$$u(n) = \begin{cases} 1, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases} = \left\{ \dots, 0, 0, \underset{\uparrow}{1}, 1, 1, \dots \right\}$$

在 MATLAB 中函数 `ones(1,N)` 产生由 N 个 1 组成的列向量。它可用来产生有限区间上的 $u(n)$ 。另一个高明的方法是使用逻辑关系式 $n \geq 0$ 。在 $n_1 \leq n \leq n_2$ 区间内实现。

$$u(n - n_0) = \begin{cases} 1, & n \geq n_0 \\ 0, & n < n_0 \end{cases}$$

可以用如下的 MATLAB 函数。

```
function [x,n] = stepseq(n0,n1,n2)
% Generates x(n) = u(n - n0); n1 <= n <= n2
% -----
% [x,n] = stepseq(n0,n1,n2)
%
n = [n1:n2]; x = [(n - n0) >= 0];
```

3. 实数指数序列:

$$x(n) = a^n, \forall n; a \in R$$

在 MATLAB 中,要用数组运算符“.”来实现一个实指数序列。例如要实现序列 $x(n) =$

$(0.9)^n, 0 \leq n \leq 10$ 。应该用下列 MATLAB 程序：

```
> > n = [0:10]; x = (0.9).^n;
```

4. 复数指数序列：

$$x(n) = e^{(\sigma + j\omega_0)n}, \forall n$$

其中 σ 称为阻尼系数而 ω_0 是以弧度为单位的角频率。MATLAB 函数 `exp` 可用来产生指数序列。例如要产生 $x(n) = \exp[(2 + j3)n], 0 \leq n \leq 10$ ，可以用下列 MATLAB 程序：

```
> > n = [0:10]; x = exp((2 + 3j) * n);
```

5. 正余弦序列：

$$x(n) = \cos(\omega_0 n + \theta), \forall n$$

其中 θ 为以弧度为单位的相角。MATLAB 函数 `cos` (或 `sin`) 可用来产生正余弦序列。例如，要产生 $x(n) = 3\cos(0.1\pi n + \pi/3) + 2\sin(0.5\pi n), 0 \leq n \leq 10$ ，应该用下列 MATLAB 程序。

```
> > n = [0:10]; x = 3 * cos(0.1 * pi * n + pi/3) + 2 * sin(0.5 * pi * n);
```

6. 随机序列：许多实际的序列是不能像上面那样用数学式来描述的。这些序列称为随机或 Stochastic 序列并用相应的概率密度函数或统计矩来表征。在 MATLAB 中，有两种(伪)随机序列可用。`rand(1, N)` 产生其元素在 $[0, 1]$ 之间均匀分布而长度为 N 的随机序列。`randn(1, N)` 则产生均值为 0，方差为 1，长度为 N 的高斯随机序列。其他的随机序列都可用这两种函数的变换得到。

7. 周期序列：如果序列 $x(n) = x(n + N), \forall n$ 则 $x(n)$ 称为周期的。满足上述关系的最小正数 N 称为基本周期。我们用 $\tilde{x}(n)$ 来表示周期序列。要产生一个周期 $\{x(n), 0 \leq n \leq N - 1\}$ 产生有 P 个周期的序列 $\tilde{x}(n)$ ，可以把它复制 P 次：

```
> > xtilde = [x, x, ..., x];
```

但是高明的方法是利用 MATLAB 的强有力的下标能力。先产生一个包含 P 行 $x(n)$ 值的矩阵，然后用结构 `(:)` 来把它的 P 行串接起来成为一个长行，不过这种结构只能用于列向。所以我们往往还要用矩阵转置来把它扩展到行向。

```
> > xtilde = x' * ones(1, P); % P 列 x; x 是一个行向量
```

```
> > xtilde = xtilde(:);           % 长的列向量
> > xtilde = xtilde';           % 长的行向量
```

注意后两行可合成一条命令以缩短代码,这可从例 2.1 中看到。

对序列的运算

这里将简要地介绍序列的基本运算和它们的 MATLAB 等效程序。

1. 信号相加:这是一种对应的样本与样本之间的相加。表为:

$$\{x_1(n)\} + \{x_2(n)\} = \{x_1(n) + x_2(n)\}$$

在 MATLAB 中它可用算术运算符“+”实现。然而 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 的长度必须相等。如果序列长度不等,或者长度虽然相等但采样的位置不同,就不能用运算符“+”了。我们必须首先给 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 以适当的参数使它们有同样的位置向量 n (因而也有同样的长度)。这需要非常注意 MATLAB 的下标运算。特别是逻辑与运算“&”,关系运算如“<=”和“=”,以及要用 find 函数来使 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 具有相同的长度。下面称为 sigadd 的函数演示了这些运算。

```
function [y,n] = sigadd(x1,n1,x2,n2)
% 实现 y(n) = x1(n) + x2(n)
% -----
% [y,n] = sigadd(x1,n1,x2,n2)
% y = 在包括 n1 和 n2 的 n 上求和序列
% x1 = 长为 n1 的第一个序列
% x2 = 长为 n2 的第二个序列(n2 可与 n1 不等)
%
n = min(min(n1),min(n2)):max(max(n1),max(n2)); % y(n)的长度
y1 = zeros(1,length(n)); y2 = y1; % 初始化
y1(find((n >= min(n1)) & (n <= max(n1)) == 1)) = x1; % 具有 y(n)的长度的 x1
y2(find((n >= min(n2)) & (n <= max(n2)) == 1)) = x2; % 具有 y(n)的长度的 x2
y = y1 + y2; % 序列相加
```

它的应用在例 2.2 中叙述。

2. 信号相乘:这是对应采样值之间的相乘(即“点”乘),表为:

$$\{x_1(n)\} \cdot \{x_2(n)\} = \{x_1(n)x_2(n)\}$$

在 MATLAB 中,它由数组运算符“.*”实现。但它受到“+”运算符同样的限制。因此必