

MATLAB®
examples

数字信号处理教程

——MATLAB释义与实现

(第3版)

陈怀琛 编著
柴政 陈怀琛 修订

数字信号处理教程

——MATLAB释义与实现

(第③版)



陈怀琛 编著
柴政 陈怀琛 修订

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京•BEIJING

内 容 简 介

本教程系统地讲解了数字信号处理的基本理论和方法,注重物理概念的阐述,尽量把 MATLAB 的多媒体功能用于图形、动画和声音等形象的演示,是一本自始至终使用 MATLAB 来阐述问题和进行计算的数字信号处理教材。本教程中的全部例题程序和演示程序都可以免费从网上下载。本教程把《数字信号处理》课程定位为讲述“用数字方法处理(任何)信号”的技术,因此,对模拟信号的计算机处理给予了充分的篇幅,而这正是目前许多数字信号处理教材的弱点。

本书适合作为电子信息专业的大学本科学子教材,书中采用了大小两种字号混排,目的是适应不同专业和不同要求的本科学子。对于学过数字信号处理课程,但没有用 MATLAB 来解决有关问题的研究生和工程技术人员,也有很好的参考价值。

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。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理教程: MATLAB 释义与实现 / 陈怀琛编著. —3 版. —北京: 电子工业出版社, 2013.8
ISBN 978-7-121-20983-3

I. ①数… II. ①陈… III. ①数字信号处理—计算机辅助计算—软件包—高等学校—教材
IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 158101 号

策划编辑: 郭 立 张国霞

责任编辑: 徐津平

特约编辑: 顾慧芳

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

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: 17.25 字数: 500 千字

印 次: 2013 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,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 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

第3版序

本书自 2004 年出版以来,受到学术界和工程界的广泛好评。主要原因在于它是国内第一本用计算机作为解题和演示工具的信号处理教材,并且非常强调物理意义和实际应用。但我们发现,购买本书的多为教师和工程师,本科院校选择它作为教材的还不够多。其原因可能有二:一是相当多大学的三年级学生还没有 MATLAB 的基础;二是这本教材的内容相对于本科的教学要求还有些偏多偏深,上次修订时就有过予以精简的设想,但没有实施。

随着时间的推移,全国各个大学对科学计算语言日益重视。2009 年,教育部高教司推行了“利用信息技术工具改造课程项目”,推动了许多大学课程的计算机化。有的学校在大一的线性代数、物理等课程以及大二的力学、电路、信号与系统等课程中开始讲授和使用 MATLAB 语言,这些学生到了大三时已经有了初步的 MATLAB 编程能力,推广这本教材也就有了较好的基础。逐渐地有更多学校的老师希望使用这本书做教材,建议我们按普及知识的思路对本书进行改编,这促进了我们进一步修订的决心。

此次修订中,我们保留了所有讲述基本概念的文字、程序和图形,更加注意上下文的衔接,自始至终运用 MATLAB 程序阐述问题,提供了其他教材没有的图形、曲线和动画。全书提供了演示程序、例题程序、解题子程序近 160 个,与前两版相差不多。书中仍用大小两种字号排版,并附有大量思考题和习题,便于读者按先简后繁的次序循序渐进地阅读。书中采用的大小两种字号中,小字属于可以不学的次要内容,便于学生自学时跳过。作为基本要求,全书用大字印刷的内容不到 200 页。如果学生有了初步的 MATLAB 语言基础,在本科教学计划时间内掌握本书所讲内容应该是不困难的。

这一版的程序集取名为 dsk04t。实际上该版的程序都包含在前两版的程序集中。例题程序名原来是按例题编号取的,由于例题的减少,会造成编号的变化,遇到这种情况,我们将按新的编号确定程序名,并在后面加一个字母“t”,以免与以前的程序名混淆。例如原来的例 3.2.4,原有的程序名为 hc324,在修订版中其编号变为了例 3.2.2,在程序集 dsk04t 中它的程序名就改为 hc322t,不过这种情况不多,绝大多数例题程序的编号都没有变化。

本书的程序集和相关课件等教学资料可从下列网址中找到并下载。

(1) 本人主页: <http://chen.matlabedu.cn>。

(2) 出版社网站: <http://www.broadview.com.cn/20983>。

此次修订由我和江西理工大学的柴政老师合作完成。柴政老师用此书教了多届学生,对学生的知识掌握情况比较了解,因此由他根据历年的教学经验提出修订方案,经我们统一讨论后,由柴政老师提供修订初稿,再由我复核修改。

我的电子邮件地址为: hchchen1934@vip.163.com或 hchchen@xidian.edu.cn,柴政老师的电子邮件地址为: chaizheng0924@163.com,欢迎读者朋友向我们提出对教材的建议。

电子工业出版社对本书的修订给予了大力支持,编辑张国霞做了大量的工作,我们谨表谢意。

西安电子科技大学 陈怀琛

2013 年 6 月

第2版序

本书第1版于2004年11月出版以后,读者普遍反映很好。因为这本书与其他传统的教材不同,它是一本用MATLAB全面阐述数字信号处理的教材,给出了所有概念阐述的形象演示和分析设计的计算机算法,而且提供了例题和演示的程序集,书中所有理论和公式都可以通过执行程序得到验证,理论联系实际。读者学完后会快速地用计算机解决问题,做到心中有底。读者反映这本书的缺点主要是对本科生而言内容有些偏多。

在修订出版第2版时,我们最初想把书改浅一些,薄一点,为此又专门征求了一些曾仔细阅读并使用过本书的教授的意见。现把他们的意见摘出几条:“我觉得您已出版的‘释义’虽然厚一些,但写得易懂。若从头写一本更薄的,恐怕篇幅小,难以达到‘释义’那本书的效果。”“您的书是国内用MATLAB阐述DSP的第一本好书。最好不要重新写另一本。完全可以在原来的基础上进一步完善。”……经过探讨,大家觉得本书在对物理和数学概念的阐述上毫不逊于传统的教材,例如,关于模拟频率和数字频率的定义、关于角频率的正负,以有主对DFT的序号 k 与实际频率 f 的关系等,讲得很细致,便于本科生接受。其实,作者收到过一些本科生赞扬本书的来信,他们的经验是,不要怕书厚,不要怕MATLAB,一个问题一个问题地看下去,这本书讲得很清楚,而且马上可以用程序验证,很好懂。

目前,大学本科用这本书作教材的还不太多,第一个原因是很多大学生(甚至部分老师)的MATLAB基础差,见到程序就头痛,不敢用MATLAB教学。但是从国内外发展的趋势来看,要搞信号处理,不用计算机是不行的,用MATLAB的学校只会愈来愈多。令我们高兴的是:随着时间的推移,本书的大量程序已被多本其他教材引用。我们不能自己放弃或削弱这个特色。第二个原因是书中确有少数偏深的内容,这些内容虽然超越了本科大纲,却有利于已经毕业的读者在设计中更好地运用MATLAB,也有利于大学生在后续课程或毕业设计中应用。考虑到第1版的读者群并不限于本科生,很多是毕业了工程师或研究生,这些内容仍是重要的,不能删除。同时为了保证大学生阅读方便,在本版中把它们用小号字印刷。

这样,第2版的修订量就比较小,主要包括了以下三方面:①改正了第1版中的一些印刷错误和图文标注;②由于MATLAB软件的升级,对相关部分按新版本做了修订;③尽量减少大号字的篇幅,把它们改为小号字,使本科生能抓住要点,阅读方便。修订后程序集内容基本不变,新程序集名称改为dsk04n,修改中尽量考虑了新旧版本的兼容问题。

北京理工大学的王大伦教授曾仔细阅读本书第1版,对书中的大小错误都做了批注,并反馈给作者,对第2版的修订帮助很大,在此特表谢意。

用MATLAB已经可以把信号处理的概念设计变成非常方便的工作。近几年来,Mathworks公司致力于扩展MATLAB的功能,目的是用基于模型的流程,使用统一的软件工具,把概念设计变成工程设计。这就更提高了把MATLAB作为设计工具的重要性。我们在本版中增加了第10章,对此做了一个引导性的介绍。北京迈斯沃克公司(Mathworks China)的徐正高高级工程师写了该章的10.4和10.5两节,我们在此深表谢意。

陈怀琛 2008-05-19

于西安电子科技大学

第 1 版序

随着电子技术迅速地向数字化发展,《数字信号处理》越来越成为广大理工科学生,特别是 IT 领域的学生和技术人员的必修内容,先前也出版过很多有关这方面的书籍。但国内这门课程本身的现代化进程,却并不令人满意。这里的“现代化”指的是利用最新的计算技术和网络手段进行教学。我编写这本书的目的,就是想突出利用 MATLAB 和 Internet 来进行数字信号处理的教学。

信号处理涉及大量的运算,可以说离开了计算机及相应的软件,就不可能解决任何稍微复杂的实际应用问题。早在 20 世纪 90 年代中期, MATLAB 就已成为国际公认的信号处理的标准软件和开发平台。从 1996 年开始,美国新出版的信号处理教材就没有一本是不用 MATLAB 的(见参考文献 [1,3,7,8,9])。而国内把 MATLAB 贯彻始终的信号处理教材却还很少,在教学中真正用 MATLAB 的就更少,两者相比落后了近八年。本书的一个意图就是使之成为一本自始至终使用 MATLAB 阐述问题和进行计算的数字信号处理教材,更好地与国际接轨。

关于《数字信号处理》课程的内涵,存在着两种不同看法:一种看法是把“数字信号”限定为“处理”的对象;另一种看法则把“数字技术”作为一种方法,研究如何用它来“处理信号”。从第一种看法出发,“数字信号处理”课程只讲离散信号。经验证明,这种划分会造成学生不会用数字技术处理连续信号,形成学科内容的“空白区”。而从第二种看法出发,“数字信号处理”课程应该同时考虑连续和离散信号,重点是如何用计算机进行分析和计算。我赞同后一种看法。因此,在本书多处加强了离散信号和连续信号等价性的讨论,并详细介绍了连续信号频谱的数值计算问题。

中国的教材一般将快速傅里叶变换列为一章,篇幅约 30~40 页。美国教材则通常列为一节,篇幅一般只有 10 页左右。这是什么原因?我认为目前在所有的科学计算软件和数字信号处理芯片中,FFT 已经是标准的模块,一般都没有必要自己编写 FFT 程序,所以重点应该是 FFT 的用法而不是算法。国外教材对这部分内容经历了“薄—厚—薄”的历史过程,我国则慢了一拍,所以本教材也精简了这方面的内容。

在把数字信号处理概念与 MATLAB 语言相结合方面,国外教材有多种模式。有的以讲概念为主,把 MATLAB 放在作业和实验中(见参考文献 [9]);有的以 MATLAB 为主,概念则建议读者另选教材(见参考文献 [1]);有的两者都讲得不少,但书就变得很厚(见参考文献 [8]);本书则大体采纳了参考文献 [3] 的模式,以系统地讲解信号处理的原理为主,用 MATLAB 程序的核心语句帮助解释概念。要做到这点,学生必须在修本课程以前已经学过并用过 MATLAB。当然,这并不是说,没有学过 MATLAB 就不能用本书。我曾在西安电子科技大学和桂林电子工业学院两次使用 MATLAB 进行数字信号双语教学,教材是英文书(见参考文献 [1]),课堂上 90% 用英语讲,学生中多数人没有学过 MATLAB,课还是正常进行,完成得还可以。但这些学生都已通过英语四级,因此属于班级中程度较高者,而且多加了一个学分。尽管如此,在教学中有些同学仍提出“究竟是着重概念还是编程”这样的问题,说明他们将语言和概念结合起来时仍感到困难。所以,经验告诉我们:从大面积课堂教育而

言，最好不要把 MATLAB 放到高年级和信号处理混在一起学。

我一贯的指导思想是：学生应在大学一年级或二年级学习 MATLAB，这对各门课程都有好处。信号处理课是在大学三年级开设的。此时学生应该已经能用矩阵建模并用 MATLAB 语言来思考和概括数学问题了。有了这样的基础，才能对本书有较深的体会。建议未学过 MATLAB 的读者，至少用 10 个小时左右的时间先学习其入门并实际做一些应用。由于读者可以免费获得全部程序，从而也可得到程序产生的图形。我们把书中的程序都用小字排版，图形也缩排了，以降低篇幅和书价。希望读者理解。

为了兼顾不同类型的专业和学生对数字信号处理的不同要求，本书在排版上分了大小两种字形。大字是达到基本要求应掌握的内容，小字排版的部分是可以跳过不看的，不会影响对本课程基本概念的掌握。每章的最后都给出了复习思考题和习题，以利于读者自学复习。

为了阐述数字信号处理中的重要概念，本书采用了一些其他教材中未采用的术语和方法。例如，离散时间傅里叶变换、采样序列的等价序列、符幅特性、在无穷远邻域的收敛性、离散最小二乘设计法等。书中也有一些作者本人的研究工作内容。比如，信号流图的解析形式及 MATLAB 解、信号流图与状态空间法的转换和 MATLAB 解、系数向量量化的子程序以及一些有图形、动画和声音表现的演示程序等。其目的是引起大家讨论，更好地解放思想，用创新的态度来对待这门课程的教学。

这本书采用了参考文献 [4,3,1,5,8] 中不少的内容和例题，用到了这些作者的宝贵经验，也借用了一些图形、例题和习题，乘机机会向这些教材的作者们表示谢意。在 2003 年 8 月的“第十一届信号处理学术年会”上，我曾就编写本书的指导思想，与许多信号处理界的专家（如袁保宗、程佩青、张贤达等教授）交换过意见，得到了他们的支持。本书初稿形成后，又曾广泛征求了本校的丁玉美、赵树杰、廖桂生、高西全、史林等长期从事数字信号处理教学的教授们对初稿的意见，特别是丁玉美教授仔细阅读了稿件，给予作者很大的帮助。西安电子科技大学的段宝岩校长还特别资助了作者的学术交流经费，保铮院士对本书的出版也给予了关心。此外 Mathworks 公司对本书的出版也给予了软件新版本的支持，电子工业出版社博文视点资讯有限公司的各位编辑对本书一路绿灯，提供了出版和网页方面的一切方便，使本书能及早问世。对大家的这些帮助，作者表示衷心的感谢。

由于作者水平和编著时间的限制，书中肯定有很多不足之处，欢迎广大读者指正。欢迎读者将教学实践中积累的经验告诉本人，并希望大家不断改进和充实网上的演示程序！

陈怀琛 2004 年 8 月 31 日
于西安电子科技大学

目 录

第 1 章 数字信号处理的发展及应用	1
1.1 数字信号处理的兴起	1
1.2 数字信号处理的任务	1
1.2.1 数字信号处理的应用	1
1.2.2 信号处理的主要任务	2
1.2.3 数字信号处理	3
1.3 信号采样和复原实例	4
1.4 本书概貌的说明	5
1.4.1 对“数字信号处理”内涵的理解	5
1.4.2 关于 MATLAB 语言	6
1.4.3 本书的组成	6
复习思考题	7
习题	8
第 2 章 时域中的离散信号和系统	9
2.1 模拟信号与其采样序列的关系	9
2.2 基本序列及序列的基本运算	10
2.2.1 序列的表示方法	10
2.2.2 常用的典型序列	11
2.2.3 序列的运算和变换	13
2.3 序列的周期延拓、奇偶分解和卷积	17
2.3.1 周期延拓	17
2.3.2 奇偶分解	18
2.3.3 复数域的分解	18
2.3.4 序列的卷积	20
2.4 时域离散系统	21
2.4.1 线性系统	21
2.4.2 线性时不变离散系统	22
2.4.3 LTI 离散系统的数学描述——线性常系数差分方程	22
2.4.4 用 MATLAB 的递推解法	24
2.5 脉冲响应——用时间序列表征的系统特性	24
2.5.1 脉冲响应的特性	24
2.5.2 用解析卷积方法求系统输出	25
2.5.3 用向量-矩阵乘法进行卷积计算	26
2.5.4 用脉冲响应判断系统的因果性	28
2.5.5 用脉冲响应判断系统的稳定性	28
2.5.6 用脉冲响应分类数字滤波器	28

2.6 序列运算的 MATLAB 函数列表	29
复习思考题	30
习题	30
第 3 章 离散序列的两种傅里叶变换	32
3.1 序列信号的周期性和频率	32
3.1.1 序列信号的周期性	32
3.1.2 序列信号的频率	33
3.1.3 有限带宽序列	36
3.2 离散时间傅里叶变换 (DTFT)	36
3.2.1 离散时间傅里叶变换 (DTFT) 的定义	36
3.2.2 DTFT 的性质	37
3.2.3 DTFT 的解析计算示例	37
3.2.4 DTFT 的数值计算示例	38
3.2.5 用 MATLAB 计算 DTFT	40
3.2.6 MATLAB 计算举例	41
3.3 系统频率特性及其计算	44
3.4 周期序列的频谱——离散傅里叶级数	46
3.4.1 从一个计算实例出发	46
3.4.2 周期序列的傅里叶级数	47
3.4.3 用 MATLAB 计算离散傅里叶级数	49
3.5 离散傅里叶变换 (DFT)	50
3.5.1 离散傅里叶变换 (DFT) 的定义	50
3.5.2 用 MATLAB 计算 DFT 和 IDFT	51
3.5.3 两种离散傅里叶变换 (DFT 与 DTFT) 的关系	52
3.6 离散傅里叶变换 (DFT) 的特性	53
3.6.1 隐含周期性	54
3.6.2 循环移位性质	55
3.6.3 循环折叠性质	56
3.6.4 循环卷积特性	57
复习思考题	60
习题	61
第 4 章 信号频谱的高效计算	64
4.1 各种傅里叶变换及其相互关系	64
4.1.1 傅里叶变换的主要类型	64
4.1.2 DFT 与其他变换的直接关系	65
4.2 快速傅里叶变换 (FFT)	66
4.2.1 时域抽取 (DIT) 基二 FFT 算法	66
4.2.2 用 MATLAB 程序描述 FFT 算法	70
4.2.3 基四和其他基的 FFT 算法	71

4.2.4	其他 FFT 算法	71
4.3	用 FFT 计算离散时间序列的频谱	73
4.3.1	有限长离散时间序列的频谱计算	73
4.3.2	用补零方法由 FFT 求 DTFT	74
4.3.3	无限长序列的频谱计算	75
4.4	连续信号采样中的频谱变换	77
4.4.1	时域采样定理 (奈奎斯特定理)	77
4.4.2	由离散序列重构模拟信号	80
4.5	连续信号的频谱计算	82
4.5.1	非周期连续信号的频谱计算	83
4.5.2	连续周期信号的频谱计算	88
4.6	从频谱计算序列信号 (IDFT)	90
4.6.1	频率域采样定理	90
4.6.2	从频谱计算离散时间序列	91
4.6.3	从频谱计算连续时间信号	94
4.7	用 FFT 计算能量	96
4.8	小结	97
	复习思考题	97
	习题	98
第 5 章	变换域中的离散时间系统	101
5.1	z 变换	101
5.1.1	z 变换的定义与收敛性	101
5.1.2	z 变换的重要特性和定理	104
5.1.3	z 变换的计算实例	105
5.2	z 反变换和差分方程的解	105
5.2.1	用留数定理求 z 反变换	106
5.2.2	用部分分式法求 z 反变换	106
5.2.3	幂级数法 (长除法) 求 z 反变换	108
5.2.4	用 z 变换解差分方程	110
5.3	z 域中对系统的描述	112
5.3.1	系统函数 (传递函数)	112
5.3.2	正幂系统函数和零极增益形式	115
5.3.3	零极点分布与系统的因果性和稳定性	116
5.4	z 平面上的谱分析	117
5.5	理想滤波器	118
5.5.1	数字滤波器的基本概念	118
5.5.2	理想的因果低通滤波器的频率特性	119
5.5.3	线性相位条件对脉冲响应对称性的要求	120
5.5.4	考虑因果性和对称性对理想滤波器的影响	122

5.6	低阶数字滤波器	122
5.6.1	一阶数字滤波器	122
5.6.2	二阶数字滤波器	125
5.6.3	梳状滤波器的零极点分布	126
5.7	全通滤波器	127
	复习思考题	128
	习题	128
第 6 章	数字滤波器结构	131
6.1	概述	131
6.2	滤波器的信号流图结构及解法	132
6.2.1	信号流图	132
6.2.2	信号流图方程的计算机解法	133
6.2.3	信号流图与数字系统的网络结构图	135
6.3	FIR 基本网络结构	135
6.3.1	概述	135
6.3.2	直接形式	136
6.3.3	级联形式	136
6.3.4	线性相位形式	137
6.3.5	频率样本结构	138
6.4	IIR 基本网络结构	141
6.4.1	直接形式	142
6.4.2	级联形式	143
6.4.3	并联形式	145
6.5	格型滤波器及其信号流图解法	146
6.6	各种结构形式的转换和比较	147
6.6.1	各种结构形式的转换	147
6.6.2	从计算的复杂性做比较	148
6.6.3	从减小系数量化影响做比较	148
	复习思考题	148
	习题	149
第 7 章	FIR 滤波器设计	151
7.1	数字滤波器设计的基本要求	151
7.1.1	数字滤波器的设计基本步骤	151
7.1.2	数字滤波器的主要指标	151
7.1.3	为什么以低通滤波器为典型	154
7.2	线性相位滤波器的特性	154
7.2.1	线性相位和幅频特性 (Amplitude Response)	154
7.2.2	幅频特性的计算举例	158
7.2.3	计算幅频特性的 MATLAB 程序	159

7.2.4	线性相位滤波器的零极点分布	161
7.3	设计 FIR 滤波器的窗函数法	161
7.3.1	对脉冲响应进行截断的分析方法	161
7.3.2	矩形窗截断的定量分析	163
7.3.3	几种常用窗函数的介绍	166
7.3.4	MATLAB 提供的窗函数	167
7.3.5	用窗函数设计 FIR 滤波器的步骤	169
7.4	利用频率样本法设计 FIR 滤波器	175
7.4.1	预期频率特性的设置方法	175
7.4.2	频率样本法的设计过程	176
7.4.3	MATLAB 中频率样本法的设计函数	180
7.5	FIR 滤波器的最优设计法	181
	复习思考题	184
	习题	184
第 8 章	IIR 滤波器设计	186
8.1	关于模拟滤波器的预备知识	186
8.1.1	模拟滤波器的指标	186
8.1.2	以模拟滤波器为基础的设计方法	188
8.2	模拟滤波器原型的设计	189
8.2.1	巴特沃斯低通滤波器	189
8.2.2	切比雪夫 I 型低通滤波器	194
8.2.3	切比雪夫 II 型低通滤波器	198
8.2.4	椭圆低通滤波器	200
8.2.5	滤波器原型的相位响应	202
8.3	由模拟滤波器变换为数字滤波器	202
8.3.1	脉冲响应不变法	203
8.3.2	双线性变换法	208
8.4	模拟滤波器的频带变换	216
8.4.1	低通到低通的频带变换	217
8.4.2	低通到高通的频带变换	217
8.4.3	低通到带通的频带变换	218
8.4.4	低通到带阻的频带变换	219
8.4.5	信号处理工具箱中的频带变换函数	220
8.5	MATLAB 中直接设计 IIR 数字滤波器的函数	223
8.6	IIR 和 FIR 数字滤波器的比较	224
	复习思考题	225
	习题	226
第 9 章	信号处理工程化的 MATLAB 工具	228
9.1	信号处理工具 (sptool) 的介绍	228

9.2	MATLAB 中的滤波器设计工具	231
9.3	系数量化和运算量化的影响	234
9.3.1	数的浮点和定点表示方法	234
9.3.2	系数量化对 FIR 滤波器的影响举例	236
9.3.3	系数量化对 IIR 滤波器的影响举例	237
9.3.4	运算量化和溢出问题	238
9.3.5	滤波器设计工具中的量化处理	239
9.3.6	定点 (Fix-point) 工具箱	240
9.4	系统仿真 (Simulink) 工具简介	240
9.4.1	概述	240
9.4.2	模块库及模型的建立	241
9.4.3	仿真的运行	242
9.5	MATLAB 与嵌入式代码的衔接	243
9.6	基于模型的开发流程	244
9.7	嵌入式代码开发的一个实例	246
9.8	数字信号处理的未来	250
附录 A	信号处理工具箱函数集	252
附录 B	本书自编子程序索引表	258
附录 C	例题程序索引表	259
附录 D	图形生成和演示程序索引表	262
参考文献		263

第 1 章 数字信号处理的发展及应用

1.1 数字信号处理的兴起

自然界充满了信号，其中，有的信号是客观存在的，包括自然的和社会的信号，而大多数信号是人类有目的地制造的；有的信号是有用的，有的则是不需要的，甚至是有害的。如何对信号进行滤波、变换、解调、增强、压缩、估计、识别等处理，从这些信号中提取愈来愈多的对人类有用的信息，抑制其中有害的信息，均属于信号处理的范畴。而只要采取的是数字方式手段，无论处理的对象是离散的还是连续的信号，都称为数字信号处理（Digital Signal Processing, DSP）。值得提醒的是很多时候 DSP 简写也被用来表示数字信号处理专用的微处理器（Digital Signal Processor）。

DSP 起源于 20 世纪 60 年代，当时数字计算机的价格非常昂贵，所以 DSP 仅用于一些关键的应用领域。最初的尝试有：雷达与声呐，与国防大计相关；石油勘探，可以获得巨大的利益；空间探测，其对数据的量与要求是最高的；医学成像，可以挽救人的生命。随着现代技术的发展，特别是专用微处理器的出现，使得 DSP 技术迅速改变了 21 世纪科学和工程的面貌。几乎在所有的领域当中，人们总是想办法用采集信号的各种办法把想要获取的信息转化成数字信号，再交给 DSP 来处理。每一个领域都需要结合自己的算法、数学知识和专业技术来运用 DSP 技术。

现在，DSP 成为本科生的标准课程，是很多领域的科学家和工程师所必须掌握的基本技能。与信号与系统、DSP 微处理器、语音信号处理、图像信号处理等课程组成与前一个技术革命——“电子技术”相提并论的知识体系。但是，当你学习和查阅相关教科书或参考文献时，可能面对的是连篇的公式、难懂的数学符号和不熟悉的算法程序，觉得非常困难，不知从何处下手。大多数 DSP 书籍甚至对这个领域内有经验的人来说都是难以理解的。这倒不是那些书本身有什么错误，而是因为 DSP 本来就是一项专业性非常强的学科分支，总是涉及技术前沿领域。本教材的目的就是希望能通过 MATLAB 的释义减少以往的学习障碍，把 DSP 作为一个工具而不是抽象的理论知识教给读者，让没有深厚数字知识和理论基础的学生也能掌握有关的基本概念，并且能够把它的技术应用于自己感兴趣的领域。

1.2 数字信号处理的任务

1.2.1 数字信号处理的应用

数字信号处理技术已经在广泛的领域中得到应用。

- 工业应用：高速数据的采集与生成、数字仪器、数字控制、智能电网、机器人等领域。
- 能源：智能仪器、照明控制、石油和天然气勘探等领域。
- 汽车电子：动力传动系统的综合控制(PCM)、将制动防抱死控制系统(ABS)、牵引力控制系统(TCS)、驱动防滑控制系统(ASR)、车载音响、分析检修等领域。
- 视频和影像：图像处理、模式识别、安防监控等领域。
- 通信与电信：组网、视频通信、语音通信、有线和无线通信网络等领域。

- 消费电子：数字智能家电、个人媒体终端、数码产品等领域。
 - 医疗电子：呼吸机、超声波设备、病患监控、磁共振成像、CT 扫描仪、便携式诊断仪器等领域。
- 将这千百种应用加以分解，可以归纳出信号处理在其中所承担的主要任务。

1.2.2 信号处理的主要任务

经过半个多世纪的蓬勃发展，数字信号处理已经成为一门成熟的学科，其包含内容之庞杂、算法之丰富、应用之广泛，即便是最优秀的信号处理专家也难以窥探其全貌，何况是初学者。所以“数字信号处理”课程一般选取以下三个主要任务，作为初学者必须掌握的基础知识。

（1）信号的时域分析处理

信号的时域分析处理有两类，一类是进行信号分析，例如，分析电路中各波形的时间间隔、峰值的大小和宽度、周期性、形状的变异等。时域分析也用于对雷达回波的分析，从背景和干扰中提取目标的坐标和速度，等等。另一类是生成和变换各种调制信号，对信号的动态范围进行压缩扩张，用门限方法进行噪声的抑制，等等。前一类属于时域中信号的线性处理，主要通过信号的加减、时移、倍乘、卷积、求相关函数等来实现。而后一类则属于非线性的变换和处理。例如，调制过程就是非线性的。本书只在第9章涉及一些讨论非线性信号处理的过程，在前8章中只进行线性分析处理。

（2）信号的频域分析处理

信号的频域分析处理应用范围很广，例如，在电声系统中就大量应用频域分析的技术，高保真的放大器往往要通过各种滤波器来提高某些频段的放大量，抑制另一些频段的放大量，还要通过延迟和多路的方法，实现立体声和混响效果。音乐的录制则更为专业，它是先用多路传感器和磁轨把乐队演奏时的各个乐器的声音分别录下来，然后各自做适当的滤波处理后，再以不同比例加以延迟和混合，造成在音乐厅中产生的混响效果，最后把合成信号制成磁带或光盘。

信号的频域和时域分析通常是要结合在一起进行的。例如，要不失真地反映心电图的时域波形，放大器就要有足够宽的频带，同时要能抑制 50Hz 的市电干扰，放大器在市电频率附近要有陷波特性，因此就需要从频域分析着手。

（3）滤波器设计

在对信号进行分析的基础上，需要设计适当的系统，以便能提取有用的信号，从而抑制噪声干扰。按照这样的目的设计的系统就是滤波器，滤波器的设计通常是在频率域进行的。模拟滤波器设计技术已经相当成熟，本书要用到它，但将着重讨论数字滤波器的设计问题，把滤波器设计分为有限长脉冲响应（FIR）和无限长脉冲响应（IIR）两种类型来讨论。

信号处理的任務示意方框图如图 1.2.1 所示。

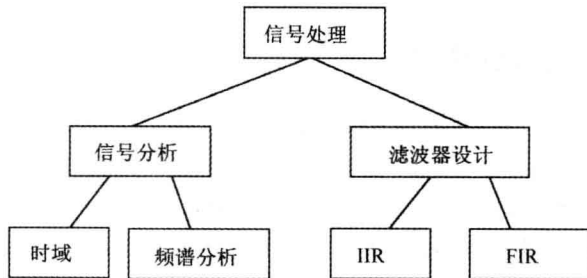


图 1.2.1 信号处理的任務示意方框图

1.2.3 数字信号处理

弱电和低频领域的信号处理任务,过去主要靠模拟电路来实现,但近几十年来,已愈来愈多地依靠计算机或数字芯片来完成。这样的信号处理系统如图 1.2.2 所示。

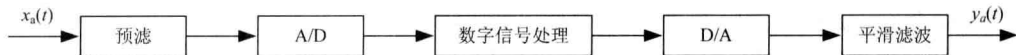


图 1.2.2 数字信号处理的框图

此系统的输入 $x_a(t)$ 和输出 $y_a(t)$ 都是模拟信号。输入信号 $x_a(t)$ 经过预滤波后进入模拟/数字 (A/D) 转换器,由它进行采样并量化为数字信号,然后送入数字信号处理系统进行处理。处理后的输出数字量,经过 D/A 转换器,变成模拟信号,再经过平滑滤波,成为输出信号 $y_a(t)$,送回物理系统。初看起来,这种方案增加了系统的复杂性,但实际上它却得到广泛的使用,其原因在于与模拟信号处理相比,它有许多优点,如下所述。

(1) 灵活性

数字信号处理系统(简称数字系统)的性能取决于系统参数,这些参数保存在存储器中,很容易修改,因此系统的性能容易通过修改程序来调整。灵活性还表现在数字系统可以分时复用,用一套数字系统可以分时处理几路信号。

(2) 高精度和高稳定性

模拟系统的特性会随温度、湿度等环境条件而变,数字系统的特性一般不会随使用条件的变化而变化,尤其是使用了超大规模集成的数字信号处理芯片(Digital Signal Processor, DSP),简化设备,更提高了系统的稳定性和可靠性。在精度方面,模拟的繁用表只有 2.5%,模拟系统达到 1%就算是精密仪器了,而数字系统二进制位数可以有 8 位、16 位,现在已经提高到了 32 位、64 位,其精度之高是模拟系统不能相比的。

(3) 便于开发和升级

同样的数字芯片,在通用的硬件平台上,可以开发不同软件来完成多种功能,服务于多种系统。由于软件可以方便地传送、复制和升级,系统的性能可以得到不断改善。

(4) 便于大规模集成

数字部件具有高度的规范性,对电路参数要求不严,容易大规模集成和生产,这也是 DSP 芯片发展迅速的原因之一。由于采用了大规模集成电路,数字系统体积小、重量轻、可靠性和一致性高,在大规模生产的情况下,它的成本往往低于模拟系统。

(5) 功能强

对数字信号可以进行存储、剪裁、复制、传送等处理,这一优点更使数字信号处理不再仅仅局限于对模拟系统的模仿上,它可以完成许多模拟系统完不成的任务。例如,电视系统中的画中画、多画面、各种视频特技包括画面压缩、画面放大、画面坐标旋转、动画和画面合成、特技制作等。

数字信号处理相对于模拟信号处理也有一些弱点:首先是处理速度的问题。模拟系统通常是可以立即做出实时响应的物理系统,而数字信号处理则要在获得采样信号后进行规定的运算和操作,在下一个采样信号到来之前必须完成这些运算。要做到这一点,只有三个办法:一是简化运算;二是加大采样周期;三是提高运算和操作速度。正因为这些方面要受到各种技术条件的制约,目前数字信号处理器的最高工作频率约为 GHz 量级,当然仍在不断的提高中。另外,涉及大功率的许多物理模拟信号处理系统,也无法由数字系统来代替。

1.3 信号采样和复原实例

利用计算机上的硬件和 Windows 操作系统，结合 MATLAB 软件，可以很方便地进行数字信号的采样、变换、存储、分析、处理和重构，现用音频信号做一个实验。

步骤一：在计算机的话筒输入插口上，插入一个话筒。然后打开计算机，用鼠标依次选择【开始】→【程序】→【附件】→【娱乐】→【录音机】命令，使录音机操作界面出现在屏幕上，如图 1.3.1 所示。单击以红色圆点为标志的录音按钮，接着对话筒说“大家好！”，说完后立即按下以方块为标志的停止按钮，屏幕右侧将显示所录声音的长度。例如，这里显示的是 1.25s。如果计算机上接有扬声器，该录音就可以通过放音重现。在这一步工作中，已利用了计算机上的 A/D 转换器，把模拟的声音信号变成了离散的量化了的数字信号。而在放音时，它又通过 D/A 转换器，把保存起来的数字数据，恢复为原来模拟的声音信号。

步骤二：单击主菜单上的【文件】→【保存】命令，就把这段声音以数据文件的形式存储起来。假定将文件命名为“dajiahao”（因为 MATLAB 等软件不接受中文文件名，所以此处使用拼音），可以看到，文件的后缀默认为.wav，这是 Windows 操作系统规定的声音文件的标准。为了进一步看出它的特征，再单击【文件】→【属性】命令，就可以出现如图 1.3.2 所示的文件属性界面。整个文件的数据大小为 27 548B。它的采样频率是 22 050Hz，量化为 8 位二进制码，编码方式为 PCM（脉冲编码调制）。这几个数据格式是系统默认设定的。



图 1.3.1 Windows 系统中的录音机界面

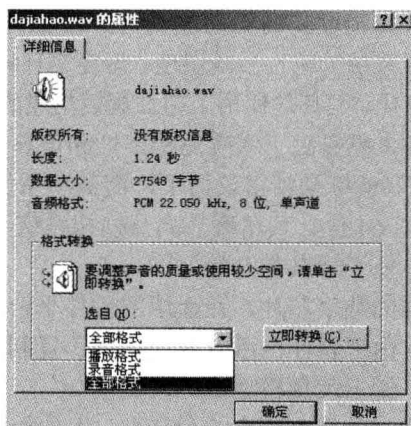


图 1.3.2 wav 文件属性

步骤三：我们可以修改这个录音格式，也可以修改它的放音格式。先选择要转换的格式名称，再按【立即转换】按钮，屏幕上又出现了声音选定界面，如图 1.3.3 所示。其中有几十项备选的声音标准，采样速率从 8 000Hz 到 48 000Hz 有好几种，量化等级有 8 位和 16 位两种，还有单声道和立体声的不同。读者不难从这些指标算出需要传送的数字信号的数据率。一般认为，电话对声音质量的要求最低，只要传送 3 000Hz 以下的频率，根据采样定理，采样频率必须比所传送的频率高一倍以上，用最低的 8kHz 采样，取单声道，量

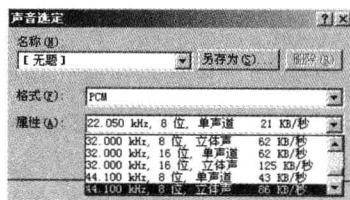


图 1.3.3 声音设定内容和文件属性

化为 8 位就能听清语言了，所以要求的传送速率仅为 $8\text{kHz} \times 8\text{bit/s} = 8\text{KB/s}$ （B 表示 Byte）。而 CD 唱片则要求复现近 20 000Hz 的频率，因此采样频率取到了 44 100Hz。立体声要求传两路信号，每秒要传送 $2 \times 44\,100 = 88\,200$ 个采样数据。每个数据量化为 16 位，即至少要用 16 个脉冲或两个字节来表示。可算出其要求的传送速率为 176 400B/s，除以 1 024，得知相当于 172KB/s。

步骤四：可以用 MATLAB 等软件，打开并读出文件的内容，