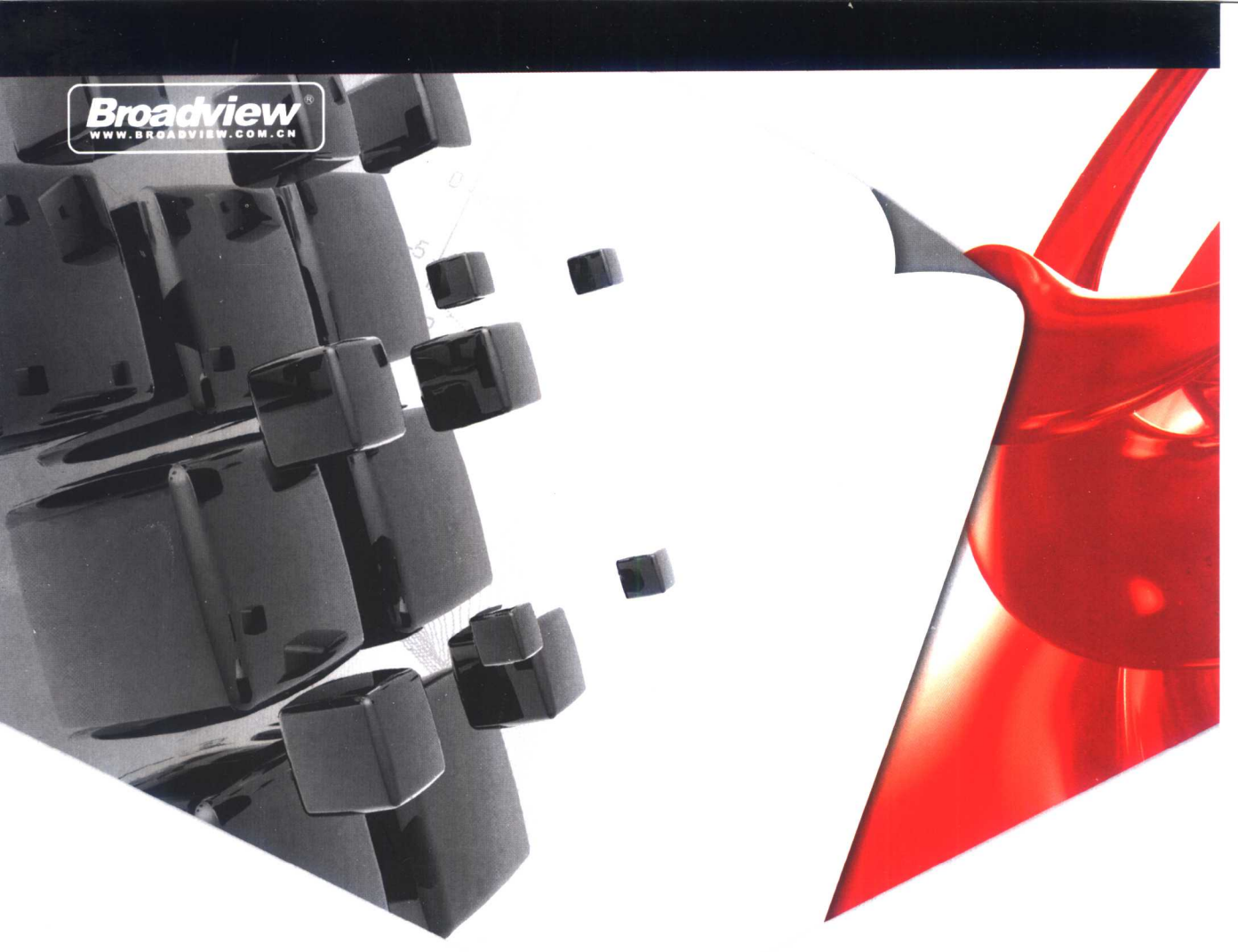




Broadview®
WWW.BROADVIEW.COM.CN



数字信号处理教程

MATLAB释义与实现

陈怀琛 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

数字信号处理教程

——MATLAB 释义与实现

陈怀琛 编著

電子工業出版社

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生教材,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生。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. —北京: 电子工业出版社, 2004.12

ISBN 7-121-00423-2

I. 数... II. 陈... III. ①数字信号—信号处理—教材 ②计算机辅助计算—软件包, MATLAB—教材
IV. ①TN911.72 ②TP391.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 101319 号

策划编辑: 郭 立 guoli@phei.com.cn

责任编辑: 孙学瑛

印 刷: 北京天竺颖华印刷厂

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

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 23.5 字数: 575 千字

印 次: 2004 年 12 月第 1 次印刷

印 数: 6 000 册 定价: 29.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

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,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通信手段进行教学。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 年后,美国新出版的信号处理教材就没有一本是不用 MATLAB 的[1,3,7,8,9]。相反地,至今国内却还没有一本把 MATLAB 贯彻始终的信号处理教材,两者相比落后了近八年。本书的第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?我认为在目前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 语言相结合的方面,国外教材有多种模式。有的以讲概念为主, MATLAB 放在作业和实验中[9];有的以 MATLAB 为主,概念则建议读者另选教材[1];有的两者都讲得不少,但书就变得很厚[8];本书则大体采纳了[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,这并也不是说明,没有学过 MATLAB 就不能用这本书。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[1],课堂 90%用英语讲,同学中多数没有学过 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。尽管如此,在教学中有些同学仍提出“究竟着重概念还是编程?”这样的问题,说明他们对于将语言和概念结合起来仍感到困难。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。信号处理课是大学三年级开设的。读者应该能在本课程中用 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 小时左右先学习其入门并实际作一些应用。为此，我们新制作了一套“MATLAB 入门”（四张）讲课光盘。该组光盘以 MATLAB6.x 为背景（也介绍一点 MATLAB 7.0），可在计算机上实时播送。本课程的老师统一购买了这套光盘给大家播放，可以不用费劲去备 MATLAB 课。与之配套的教材是[6]或[16]。其中，[16]是为大学一、二年级同学设计的，在应用方面结合的是数学、物理、力学、电学和信号，面宽而较浅；[6]是为大学二、三年级同学设计的，结合了电路、信号和系统、信号处理和控制原理四门课程。这套光盘由本人主讲，西安电子科技大学网络学院制作。有关发行购买事项，请各位教师注意下载程序中另附的通知。

本书利用电子工业出版社的博文视点公司网站向读者免费提供完整的子程序集、例题程序集和示教程序集（即附录 B,C,D 中的全部程序）共 180 余个。程序集名为 dsk04，下载网址为：<http://www.broadview.com.cn/>，单击[资源下载](#)，再按书名查找即可。下载前要按提问填写下载人的必要信息，在此网页上，还将提供作者其他有关书籍程序集和光盘获取的信息。由于读者可以免费获得全部的程序，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。

为了使教师能够较方便地利用本书进行教学，我们准备了一套教师用光盘。其中包括两部分内容：一是为讲授本书用的 PowerPoint 幻灯片，约 900 张；二是本书部分习题的题解，因为有些教师认为若有题解流入学生中，出题的效果将打折扣。为了兼顾对题解的不同看法，我们只给了三分之一的题解。预计这张教师光盘将于本书出版后三个月内完成。由“西安电子科技大学电工电子教学基地”进行版权管理。我们将在下载程序中附上有关教师用光盘的发行办法和申购表，请读者注意。

为了适应不同类型的专业和学生数字信号处理的不同要求，本书在排版上分了大小两种字型。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。整个第 9 章都属于任选内容，但没有用小字，因为这不会引起误解，同时使读者看书时可以舒服一些。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、系数向量的浮点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（研究生闵紫辰和刘丽娜帮助完成了部分演示程序）。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[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，乘此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，我曾把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，给作者很大的帮助。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，电子工业出版社的博文视点公司的各位编辑对本书一路绿灯，提供了出版和网页方面一切方便，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。我的电子邮址为 hchchen@xidian.edu.cn，电话为（029）88202988。我很希望得到读者对本书的反馈信息。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 信号和信号处理	1
1.1 信号的分类	1
1.2 信号处理	5
1.3 信号采样和复原实例	8
1.4 本书概貌的说明	10
复习思考题	12
习题	12
第 2 章 时域中的离散信号和系统	13
2.1 模拟信号与其采样序列的关系	13
2.2 基本序列及其运算	14
2.3 几种重要的序列和序列运算	21
2.4 时域离散系统	27
2.5 脉冲响应——用时间序列表征的系统特性	31
2.6 序列运算的 MATLAB 函数列表	37
复习思考题	38
习题	39
第 3 章 离散序列的两种傅里叶变换	41
3.1 序列信号的周期性和频率	41
3.2 离散时间傅里叶变换(DTFT)	46
3.3 离散系统的频率特性	57
3.4 周期序列的频谱——离散傅里叶级数	61
3.5 离散傅里叶变换(DFT)	65
3.6 离散傅里叶变换(DFT)的特性	68
3.7 用 DFT 计算线性卷积	79
复习思考题	84
习题	85
第 4 章 信号频谱的高效计算	90
4.1 各种傅里叶变换及其相互关系	90
4.2 快速傅里叶变换(FFT)	93
4.3 用 FFT 计算离散时间序列的频谱	102
4.4 连续信号采样中的频谱变换	106
4.5 连续信号的频谱计算	113
4.6 从频谱计算序列信号(IDFT)	121
4.7 用 FFT 计算能量	128

4.8 小结	129
复习思考题	130
习题	131
第 5 章 变换域中的离散时间系统	133
5.1 z 变换	133
5.2 z 反变换和差分方程的解	140
5.3 z 域中对系统的描述	149
5.4 z 平面上的谱分析	157
5.5 理想滤波器	162
5.6 低阶数字滤波器	165
5.7 全通滤波器	170
复习思考题	171
习题	172
第 6 章 数字滤波器结构	175
6.1 概述	175
6.2 滤波器的框图结构及解法	176
6.3 FIR 基本网络结构	179
6.4 IIR 基本网络结构	186
6.5 一些其他类型的滤波器结构	194
6.6 状态变量分析法	199
6.7 各种结构形式的比较	204
复习思考题	205
习题	206
第 7 章 FIR 滤波器设计	209
7.1 数字滤波器设计的基本要求	209
7.2 线性相位滤波器的特性	212
7.3 设计 FIR 滤波器的窗函数法	220
7.4 利用频率样本法设计 FIR 滤波器	233
7.5 FIR 滤波器的最优设计法	238
7.6 FIR 滤波器设计的一些深入问题	249
复习思考题	255
习题	256
第 8 章 IIR 滤波器设计	259
8.1 关于模拟滤波器的预备知识	259
8.2 模拟滤波器原型的设计	262
8.3 由模拟滤波器变换为数字滤波器	276
8.4 模拟滤波器的频带变换	291
8.5 数字滤波器的频带变换	298
8.6 MATLAB 中直接设计 IIR 数字滤波器的函数	303

8.7 IIR 和 FIR 数字滤波器的比较	304
8.8 MATLAB 中的滤波器设计工具	305
复习思考题	308
习题	309
第 9 章 综合应用	311
9.1 信号处理工具的介绍	312
9.2 语音数字化量化噪声的改善	314
9.3 系数量化和运算量化的影响	318
9.4 数字信号处理在双音拨号系统中的应用	323
9.5 正余弦信号的谱分析	328
9.6 音乐信号处理	333
9.7 变采样率数字滤波	337
9.8 稀疏天线阵列设计	341
9.9 结束语	343
复习思考题	345
习题	345
附录 A 信号处理工具箱函数表	348
附录 B 本书自编子程序索引表	354
附录 C 例题程序索引表	355
附录 D 图形生成和演示程序索引表	359
参考文献	360

第1章 信号和信号处理

1.1 信号的分类

任何携带信息的物理量都可称为信号。自然界中充满了信号，其中有的是客观存在的，包括自然的和人类的信号；有的则是人类有目的地制造的信号；有的信号是有用的；有的则是不需要的，甚至是有害的，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，是现代信息技术的一个不断追求且永无止境的目标，它推动了信号处理科学在近几十年来的飞速发展。把计算机和数字技术应用到信号处理中，是技术手段上的一个飞跃，它开拓了一个用数字技术来快速、精确地处理信号的广阔天地。因而，数字信号处理就成为人们研究和学习的一个热点。

有各种各样的方法对信号进行分类。

(1) 按信号载体的物理特征，可分为：电、磁、光、机械、热、声音等，一些社会科学研究的信号则以统计数据为载体。

(2) 按信号中的自变量的数目可分为：

- 一维信号，如语言和音乐，它们是以时间为自变量的。
- 二维信号，如黑白照片或地形图，它们以 x, y 两维坐标为自变量；彩色照片的自变量仍然是二维，但其因变量较多，有红、绿、蓝三色，即三个因变量。
- 三维信号，如黑白电视图像，它的三个自变量是 x, y 坐标和时间 t ；彩色电视图像信号则既有三个自变量，又有三个因变量（如红、绿、蓝三色）。
- 四维信号，比如大气中的温度分布，其自变量为经度、纬度、高度和时间。

本书只讨论一维信号的处理问题，它也是研究多维信号处理的基础。

(3) 按照信号中自变量和因变量的取值特点可分为：

- 连续时间 (Continuous-Time, CT) 信号或连续信号，其自变量可连续取值，通常，其因变量也可以在一定动态范围内任意连续取值，即模拟量。所以这样的信号也称为模拟信号，写成 $x_a(t)$ 。严格地说，自变量的连续性称为连续时间，因变量的连续性，称为模拟信号。物理世界的大多数信号属于这个范围。
- 离散时间 (Discrete-Time, DT) 信号，虽然时间仍是连续变化的，但变量仅在离散的时刻上定义。大多数离散时间信号是由对连续时间信号采样而得到的，例如，每小时量一次温度，每秒测定十次目标坐标等。但有一些离散时间信号是固有的，比如每天计算一次利息等。因变量 x 的值仍然为可以连续取值的模拟量（在本书中，因主要讨论离散信号，所以对离散信号不加下标，而对连续模拟信号加下标 a ）。通常采样周期是一个固定值 T ，离散时间是一个顺序增加的整数数组，可写成 nT ，其中 $n=0,1,\dots$ 。因此长度为 N 的离散信号 $x(n)$ 可表示为：

$$x(n) = x_a(t) \Big|_{t=nT} \quad n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (1.1.1)$$

- 数字信号 (digital signal): 为了在数字系统中对这些因变量数据进行存储和处理, 就必须把它们用字长较短的二进制数来表示, 这个运算称为量化(quantize)。得到二进制数的最低位所代表的值, 就是分辨率, 又称为量化步长。如果离散信号中的因变量不是模拟量而是量化了的数字量, 或原来的模拟量经过了取样和模拟/数字变换, 输出为离散值, 则这种自变量和因变量都只取离散值的信号称为数字信号。把数据 x 变成量化值 x_q 的数学变换关系如下。

$$x_q = \Delta x \cdot \text{round}(x/\Delta x) \quad (1.1.2)$$

假如量化步长为 Δx , 则 $x/\Delta x$ 是把数据 x 量化为步长的倍数, 一般情况下, 它是带小数的。 $\text{round}(x/\Delta x)$ 是用四舍五入的方法取此倍数为整倍数。再把取整后的倍数乘以 Δx , 就复原为量化后的值 x_q 。

这个量化算法, 不仅用于单个数据, 也适用于数组。把数取整的方法还有向上取整 $\lceil x \rceil$ 、向下取整 $\lfloor x \rfloor$ 、向零取整等, 相应的 MATLAB 函数是 `ceil`, `floor`, `fix` 等。`round` 是最常用的。

用 MATLAB 来实现时, 由于它只接受英文字符, 设 $\text{deltax} = \Delta x$, 量化语句就写成:

```
xq=round(x/deltax)*deltax;
```

例如, 若 $x = [3.14159, 0.38455, 54.3753, -0.134273]$; $\text{deltax} = 2^{-4}$;

则执行量化语句 $xq = \text{round}(x/\text{deltax}) * \text{deltax}$; 的结果为:

```
xq =    3.1250    0.3750   54.3750   -0.1250
```

这是一种按绝对值或定点数进行量化的方法。对所有的数, 量化步长都是 $2^{-4} = 0.0625$ 。所以其量化造成的绝对误差最大为 $\text{deltax}/2$ 。如果考虑相对误差, 即数的误差与其绝对值之比, 可表示为: $\text{rerror} = (xq - x) ./ \text{abs}(x)$, 得到如下结果:

```
rerror = -0.0053   -0.0248   -0.0000   -0.0691
```

结果是: 对大的数, 量化造成的相对误差小; 而对小的数, 量化造成的相对误差大。对于一个信号序列, 由于只能用同一个 A/D 转换器进行量化, 量化步长必须是相同的, 所以只能采取这种方式。人们希望的往往是使相对误差大体相等的量化方法, 也称为浮点数的量化方法。这可以用软件实现, 用硬件是不容易做到的。第 9.2 节中将介绍用非线性变换的方法来实现对信号的近似同等的相对量化。

下面举个例子说明这三种信号, 以加深理解。

例 1.1.1 设连续信号为 $x_a(t) = \sqrt{t} + \cos t$, $0 \leq t \leq t_f = 6$ 。

其中 t_f 为终点时刻。若采样周期为 0.5s, 求采样后的离散时间信号; 又设 A/D 变换的量化步长为 0.5, 求量化后的数字信号, 并绘出曲线。对连续时间信号、离散时间信号和数字信号进行比较。

解: 用 MATLAB 语言来描述此问题的模型。首先建立连续时间的自变量向量 t , 程序中, 自变量 t 是可在 $0 \sim t_f$ 秒中取任何值的连续量, 因变量 x_a 也可以取任何值的模拟量, 但计算机无法严格地表示连续量和模拟量。就自变量来说, 它只能把 t 取得很密。程序中将其表示为 $t = 0:\text{dt}:t_f$; 把时间增量 dt 取得很小, 例如取 $dt = 0.001$ 。够不够密不能只看 dt 绝对值的大小, 而要看相邻两个样本值之间变化是不是足够小, 真正严格的数学标准只有通过傅里叶分析才能建立。因变量就取 MATLAB 中的双精度格式, 其动态范围是 10^{-308} 到 10^{308} , 而有效值是十进制数 15~16 位, 分辨率是 2.24×10^{-16} , 看来很接近于模拟量了。即使如此, 严格地从理论上说, 程序中的 t 和 x_a 相对于真正的连续量和模拟量还差很远, 而且这个距离是计算机永远无法超越的。工程上只能不断逼近理论值, 这是学习本课中应具备的工程观点。

将此时间轴按 $T = 0.5 \text{ s}$ 的采样周期进行分割, 得到的离散时间的自变量向量 n 。通常它从零开始, 取顺序增加的整数, 直到终点 t_f/T , 表示为 $n=[0:1:6/T]$ 。将按这个采样周期对此信号 x_a 进行采样, 所得的离散时间信号的表达式为

$$x(n) = x_a(t) \Big|_{t=nT} = \sqrt{nT} + \cos(nT), \quad n=0, 1, \dots, 12$$

它们在时间轴上只能在间隔为 $T=0.5\text{s}$ 的间断点上取值, 而作为因变量的 x 在纵坐标方面的取值是连续的, 即仍然是模拟信号。它取的是 MATLAB 中的双精度数据格式, 因而和 x_a 取值相同, 画在图上, 它们应该是重合的。

将 x 量化为 x_q 的方法已在上面对详细说明了, 此处只要设定 $\text{deltax}=0.5$ 即可。

根据以上分析, 建议读者用笔算的方法求出 $n=0\sim 12$ 共 13 点处的离散因变量 x 和它们的量化值 x_q , 并且可以用草图画出曲线。然后与下面的 MATLAB 程序 hc111 比较, 研究用 MATLAB 编程有哪些优点。

```
dt=0.001; tf=6; t=0:dt:tf;           % 建立连续自变量向量
xa=sqrt(t)+cos(t);                     % 原始的连续时间信号 xa(t)
T=0.5;n=0:tf/T;                         % T 为采样周期, 建立离散自变量向量
x=sqrt(n*T)+cos(n*T);                  % 采样周期为 T 的离散时间信号 x(n)
deltax=0.5;                             % deltax 为 x 的量化步长
xq=round(x/deltax)*deltax;              % 舍入量化后的数字信号 xq
subplot(1,2,1),                         % 画出连续时间信号曲线
plot(t,xa,':'),hold on,grid on          % 画出离散时间信号曲线
plot(n*T,x,'o')                         % 画出画出数字信号曲线
stem(n*T,xq,'*'), grid on               % 画出画出数字信号曲线
legend('连续信号 xa','离散时间信号 x','数字信号 xq') % 画出图例标注
subplot(1,2,2)                           % 画出数字信号采样保持后恢复的连续信号曲线
stairs(n*T,xq), grid on                 % 画出图例标注
legend('将数字信号采样保持','恢复的连续信号曲线') % 画出图例标注
set(gcf,'color','w')                    % 将本图的背景色置为白色
```

本程序最后加上了完整的绘图语句, 其中包括加图例标注的 `legend` 语句和设置背景色的 `set` 语句。这是本书的第一个程序, 所以详细一些。为节省篇幅, 在后面的程序中将会精简多数的绘图和标注语句, 读者可从网上 (www.broadview.com.cn) 提供的程序集中下载完整的程序。

程序运行的结果见图 1.1^①。图 1.1 (a) 给出了这三种不同信号的曲线, 连续时间模拟信号的曲线用虚线画出, 离散时间信号用空心圆点画出, 而数字信号用星号画出, 图上还画出了纵横坐标量化后的网格。为了看清楚时间离散化和因变量量化对原始波形的影响, 现把数字信号在一个采样周期内展宽, 画在图 1.1 (b) 中。可以看到它与 (a) 图所示的虚线差别很大, 这是因为取了特别大的采样周期 T 和特别大的量化步长 Δx 的缘故。如果把这两个量不断减小, 则在一个采样周期内展宽后的数字波形就会很接近于原模拟波形。读者可以自行减小程序中的 T 和 deltax , 重新运行并进行验证。这里也要提示读者注意学习本程序的编程技巧, 应当使一些可调整的变量只在程序前面出现一次, 改变它的值时只需改动一个数据, 仍能保证程序的完整执行。

^① 本书中的插图是由程序运行直接产生的, MATLAB 认为正、斜体是一样的, 其图内外文字一律为正体, 不遵循“物理量名称的外文代号为斜体”的规则。

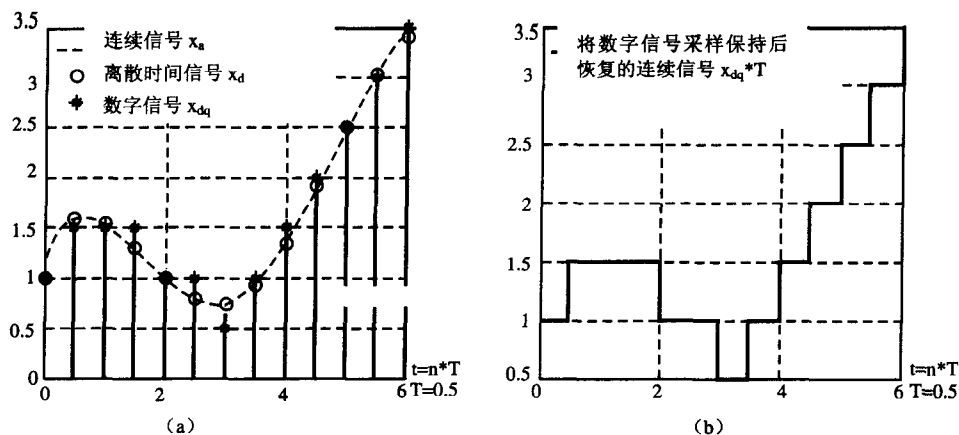


图 1.1.1 连续信号、离散时间信号和数字信号

(4) 按照信号的来源来分, 那就太多了, 这里只能举些例子, 如下所示。

- 心电 (Electro Cardio Graphy, ECG) 信号: 其形状见图 1.1.2。波形的特征点由 P , Q , R , S , T 来表征, 从它们的间距、幅度和形状来确定心功能的状况, 所以它以时域分析处理为主。信号的幅度约 $1\mu\text{V}$, 而脉冲的宽度约为 0.02s , 因此要求放大器的带宽约在 100Hz 以上, 才能避免明显的波形失真。因为信号很微弱, 心电图仪很容易受 50Hz 的市电影响, 要采取多种信号处理措施来消除市电干扰。

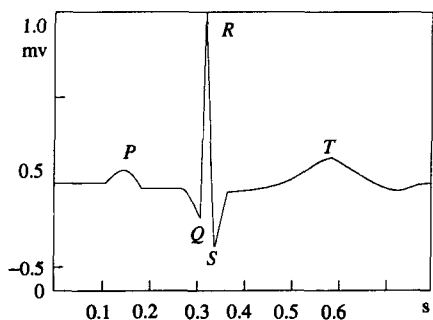


图 1.1.2 心电图信号

- 脑电图 (ElectroEncephaloGram, EEG) 信号: 它的幅度范围为 $2\text{mV} \sim 100\text{mV}$, 频带从 0.5Hz 到 100Hz , 又分成 5 个区段: $0.5\text{Hz} \sim 4\text{Hz}$ 为 δ 段, $4\text{Hz} \sim 8\text{Hz}$ 为

θ 段, $8\text{Hz} \sim 13\text{Hz}$ 为 α 段, $13\text{Hz} \sim 22\text{Hz}$ 为 β 段, $22\text{Hz} \sim 30\text{Hz}$ 为 γ 段。由于每一段的信号分别反映不同的大脑活动, 所以要把各频段的信号区分开来, 频域分析和滤波是主要的信号处理手段。

- 地震信号: 它由岩石的自然运动或人为的地下爆炸等产生。主要有三种弹性波, 其中两种在地球球体中传播, 而第三种则沿地球表面传播。因为地球中岩石的运动是三维的, 因此, 地震仪要在三个方向安装传感器, 分别测出和记录这些信号。地震信号除了对于研究地球和地震有用之外, 很重要的一方面是用来找石油和天然气。因为油和气的力学特性与固体不同, 在地震信号中可以得到反映, 提取这些信号就可以得到地下存储的石油和天然气的信息。
- 发动机信号: 内燃机、汽轮机、航空发动机、水力涡轮机等各种机械, 在转动中会产生丰富的振动信号, 其中包含了它们的运行信息, 例如, 转速、驱动进程、动力大小、异物干扰等, 从中可以监视它们的运行过程, 并在故障出现的早期就提出警告。
- 语言信号: 人们研究语言信号, 早期是为了语言的传送, 比如电话和它的多路传送, 后来又为了语言的合成与识别。语音的频带大约为 $300\text{Hz} \sim 3000\text{Hz}$ 就可以听懂了,

但其质量比较低。高质量的语言传送,语言的合成,对语音频带要求就比较高了。特别是语音识别,对语言信号的分析 and 特征提取,提出了更高的要求。

- 音乐信号:音乐信号的频带通常低至 20 Hz,高至 18 000 Hz,有些特殊的乐器甚至还超过了这个范围,因此在信号处理时,要考虑表现各种乐器特殊音色的要求,还要考虑到音乐厅的回声、混响和立体声等的效果。
- 统计数据:信号可以来自自然现象,也可能来自社会现象。大量的社会经济的数据,其中包含着丰富的表征社会发展和缺陷的信息,也需要人去提取。所以信号处理的许多原理已经在社会科学研究中得到应用。

1.2 信号处理

1.2.1 信号处理的举例

对于物理世界存在的信号,要增强或提取它的某些成分和特征,又要抑制和消除它的另一些成分。为此而采取的措施都可以称为信号处理。在计算机或数字技术出现之前,所采用的都是,也只能是模拟的方法,即物理的方法,举例如下。

- 汽车在崎岖的道路上行驶,车内的人和物将受到地面起伏所造成的冲击和颠簸。人们利用车的轮胎、支架弹簧及液压阻尼器等,可以吸收和过滤其中强的冲击尖峰和高频率的振动。同样的机械减震原理也可用在其他车辆、船舶和飞行器中。
- 由于交流电电流经过全波整流生成的直流电源包含着 100Hz 和更高次的谐波。因此在其后必须加上由电感、电容、电阻组成的模拟滤波器,把直流保留下来,并把交流成分抑制到足够低的水平。
- 在电声系统中,要使扬声器放出频谱均匀的强功率声音,扬声器的结构必须进行非常讲究的设计,还要合理搭配多种喇叭,以保证它对各个频段有均匀的响应。为了在礼堂和音乐厅中有良好优美的音色和混响,在建筑形状、吸音板布局和材吸音料的选择上都要有周密的分析和计算。
- 采用物理原理工作的滤波器,有晶体滤波器和声表面滤波器等。前者利用晶体的电—机械谐振特性产生非常方陡的滤波通带,后者则是利用声表面波的振动传播特性,产生迟延和滤波。
- 光学处理的各种反射镜、透镜、光栅、滤光片等。它们可以在光的运动方向、极化方向和光谱范围等多方面对光信号进行分析、选择、过滤和增强处理。
- 微波中的长线,阻抗匹配器、负载吸收器等,可以对高频信号按频率、极化形式等进行选择,并分别予以处理;天线则可以控制电磁波发射的方向,也可以说是进行高频信号的空间处理,其结果是增强某些方向的电磁场,减弱其他方向的信号。
- 电话的双频拨号:过去的电话拨号是靠脉冲计数来确定 0~9 这 10 个数字。不仅拨号的速度慢,而且没有办法扩展电话的其他服务功能,所以现在都改为双音拨号。它的原理如下:每一个数都由低带和高带两个音频混合而成,低带频率有四个:697 Hz, 770 Hz, 852 Hz 和 941 Hz;高带频率为 1 209 Hz, 1 336 Hz, 1 477 Hz 三个(另一个 1 633 Hz 备用)。三个高带和四个低带频率可以组合成 12 个数,如图 1.2.1 所示。中

继站利用信号处理技术,在短促的拨号音中迅速分辨出它的高低两个频率,从而确定它代表的数。不仅速率快,而且在 0 到 9 之外还有两个多余的码 # 和 *, 可以用来扩大电话的服务功能。

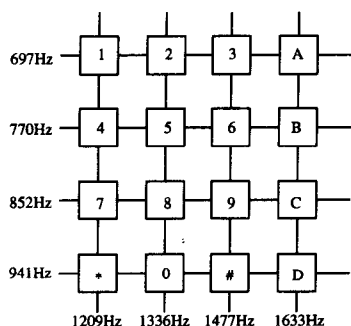


图 1.2.1 双频拨号的频率分配

上面举出的这一些例子,可以说明信号处理所涉及领域之广泛。本书所讨论的信号处理的数学分析方法是通用的,可以适用于上述所有例子。但真正进行处理,特别是进行数字化处理,目前还只限于弱电和低频领域。其中的许多情况必须使用物理的方法。随着技术的迅速发展,这个“低频”的上界不断向上扩张,现在已经由音频发展到视频,而且有些其他物理领域的信号处理问题,也通过传感器变换为电信号来处理,然后,再变换回该物理领域去。

不过这种变换有些是难于做到的,所以要看到数字信号处理有局限性的一面。

1.2.2 信号处理的一般任务

信号的时域分析处理——一类是进行信号分析,比如说分析心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。时域的分析也用在雷达回波的分析,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。前一类是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。比如调制过程就是非线性的,在本书中只在第 9 章中涉及一些讨论非线性信号处理的过程,前八章中只进行线性分析处理。

信号的频域分析处理——比如前面谈到的脑电波的分析,要分别找到各频段的脑电波幅度来判断大脑的活动;在电声系统中,大量地应用频域分析的技术、高保真的放大器,就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,它是先用多路的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的。因此就需要从频域分析着手。

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,以便能提取出有用的信号,而抑制噪声干扰。按照这样的目的来设计的系统也就是滤波器,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。

对线性领域来说,信号处理有两大任务:一是信号分析,其重点是频谱分析;二是滤波器设计分为有限长脉冲响应(FIR)和无限长脉冲响应(IIR)两种类型讨论,如图 1.2.2 所示。

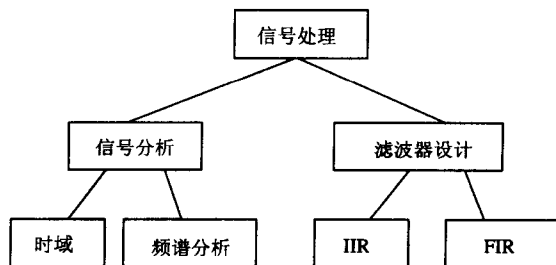


图 1.2.2 信号处理的任务示意方框图

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。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由图1.2.3组成。

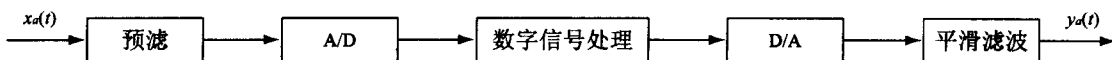


图 1.2.3 数字信号处理的框图

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。其原因在于它比模拟信号处理具有许多优点，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变化而变化，尤其使用了超大规模集成的数字信号处理芯片(Digital Signal Processor, DSP)，设备简化，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，现在已提高到32位、64位。其精度之高是模拟系统不能相比拟的。

(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，这一优点更加使数字信号处理不

再仅仅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，在下一个采样信号来到以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，目前数字信号处理还只能工作在视频以下。提高处理速度也正是数字信号处理科学和技术努力的方向。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。

(1) 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】，使录音机操作界面出现在屏幕上如图 1.3.1 所示。用鼠标单击有以红色圆点为标志的录音按钮，接着对话筒说话“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，所录的音就可以通过放音重现。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，恢复为原来的模拟的声音信号。



图 1.3.1 Windows 系统中的录音机界面

(2) 现在做下一步的工作。单击主菜单上的【文件】→【保存】，就把这段声音以数据文件的形式存储起来。假定把文件名取为“dajiahao”(因为 MATLAB 等软件不接受中文文件名，所以用拼音)，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】，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 27548B。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。

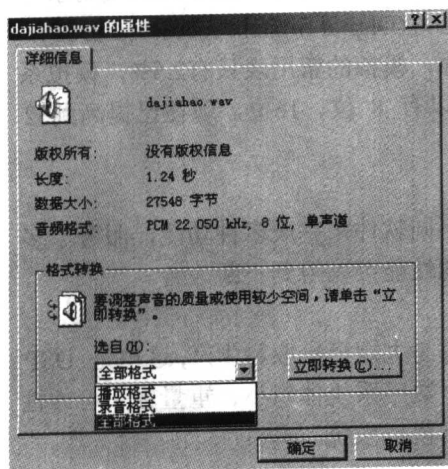


图 1.3.2 wav 文件属性

(3) 再进一步，我们还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】，屏幕上又出现声音特性选定