

SHUZI XINHAO CHULI

# 数字信号处理

王世一 编著

北京工业学院出版社

# 数字信号处理

王世一 编著

北京工业学院出版社

## 内 容 简 介

本书系统地讨论了数字信号处理的基本原理、方法和实现。全书共分七章，从数字信号处理概述开始。接着介绍了离散时间信号和系统， $z$ 变换，离散傅里叶变换、加权技术与窗函数。在此基础上，详细介绍了快速傅里叶变换的各种算法，深入讨论了数字滤波器的结构、理论与各种设计方法。然后分析了数字信号处理的有限字长影响。最后介绍了数字滤波器及快速傅里叶变换的软、硬件实现。

本书内容充实，将数字信号处理的理论方法、技术实现及发展有机的结合在一起。全书条理清楚，论述系统透彻，力求深入浅出，便于自学。

本书可作大学有关专业的教材，还可供从事通信、雷达、声纳、地震、遥感、生物医学等有关领域信号处理的科技工作者参考。

## 数 字 信 号 处 理

王世一 编著

＊

北京工业学院出版社出版  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
北京工业学院印刷厂印刷

＊

787×1092 毫米 16 开本 27 印张 636 千字

1987 年 6 月第一版 1987 年 6 月第一次印刷

印数：1-10,000册

统一书号：15434·51 定价：4.45 元

## 前 言

数字信号处理是在本世纪六十年代中期,随着数字电子计算机的发展而迅速发展起来的一门主要学科,它已广泛地应用于科学技术的各个领域,如雷达,通信,声纳,地震,遥感,生物医学工程等,并已成为这些领域的一种重要的现代化工具。本书就是为适应数字信号处理的数学需要而编写的。

本书的主要内容放在各种信号处理领域所广泛应用的基本原理上。全书共分七章,第一章是数字信号处理概述,目的是让读者对数字信号处理有一总的轮廓的了解,以增强学习的目的性。第二章介绍离散时间信号、系统及 $z$ 变换,这部分内容在《信号与系统》课程中已有介绍,但为了照顾课程的系统性及教学的方便,本书作了适当的重复。第三章是离散傅里叶变换。加权技术与窗函数。第二、三章是离散时间信号与系统的基础理论。第四、五章分别介绍了快速傅里叶变换以及数字滤波器的各种结构与设计方法,并进而介绍了优化设计法,这部分内容是本书的重点。《数字信号处理》是一门理论与实践,原理与应用紧密结合的学科,因而本书第六章讨论了数字信号处理的有限字长效应,第七章介绍了数字信号处理的软硬件实现,这些内容是数字信号处理实际实现时必须掌握的。

书中打有\*的内容可根据教学时数及要求灵活选用,也可作为学生进一步阅读的材料。

学习本课程要求学生具备有关《信号与系统》,《脉冲数字电路》,《统计无线电技术》等方面知识。通过本课程学习,尽可能使读者系统地了解数字信号处理的基本原理,方法和实现,并能初步掌握和学会运用数字信号处理的两个主要工具——快速傅里叶变换与数字滤波器,为进一步从事数字信号处理方面的学习和工作打下理论基础。

本书由北京工业学院戴润林老师与黄辉宁老师主审,并提出了许多宝贵的意见,在此仅向他们表示深切的感谢。北京工业学院的马启光老师对本书的编写也给予了许多积极的帮助,在此一并致谢。

由于编者水平所限,书中难免存在一些缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

编 者

1986.10

# 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| <b>第一章 数字信号处理概述</b> .....      | 1  |
| § 1-1 引言.....                  | 1  |
| § 1-2 信号.....                  | 1  |
| § 1-3 系统.....                  | 2  |
| § 1-4 什么是数字信号处理.....           | 2  |
| § 1-5 数字信号处理系统的突出优点.....       | 6  |
| <b>第二章 离散时间信号和系统分析基础</b> ..... | 8  |
| § 2-1 引言.....                  | 8  |
| § 2-2 连续时间信号的取样及取样定理.....      | 8  |
| 一、信号的取样.....                   | 8  |
| 二、取样定理.....                    | 9  |
| 三、折叠频率与奈奎斯特(Nyquist)频率.....    | 13 |
| 四、信号的恢复.....                   | 14 |
| 五、取样内插公式.....                  | 14 |
| § 2-3 离散时间信号的表示及运算规则.....      | 16 |
| 一、序列的表示法.....                  | 16 |
| 二、序列间的运算规则及符号表示.....           | 17 |
| 三、常用的典型序列.....                 | 18 |
| 四、序列的周期性.....                  | 20 |
| 五、用加权延时单位取样序列的线性组合表示任意序列.....  | 21 |
| 六、序列的能量.....                   | 21 |
| § 2-4 离散时间线性非时变系统与差分方程.....    | 21 |
| 一、离散时间线性非时变系统.....             | 21 |
| 二、卷积运算的基本规律.....               | 25 |
| 三、系统的稳定性和因果性.....              | 26 |
| 四、常系数线性差分方程.....               | 28 |
| § 2-5 离散时间信号和系统的频域分析.....      | 32 |
| 一、系统的频率响应.....                 | 33 |
| 二、系统频率响应的两个性质.....             | 34 |
| 三、系统频率响应与单位取样响应的关系.....        | 34 |
| 四、序列的频域表示法.....                | 35 |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 五、输出序列与输入序列的傅氏变换间的关系                | 36 |
| § 2-6 傅里叶变换的对称性质                    | 36 |
| 一、几个术语                              | 36 |
| 二、傅里叶变换的对称性质                        | 38 |
| § 2-7 $z$ 变换                        | 38 |
| 一、 $z$ 变换的定义                        | 39 |
| 二、 $z$ 变换的收敛域                       | 39 |
| § 2-8 拉氏变换, 傅氏变换及 $z$ 变换间关系         | 45 |
| 一、序列的 $z$ 变换与拉普拉斯变换的关系              | 45 |
| 二、序列的 $z$ 变换与傅里叶变换的关系               | 47 |
| 三、序列的傅氏变换与拉氏变换(双边)的关系               | 48 |
| § 2-9 逆 $z$ 变换                      | 48 |
| 一、逆 $z$ 变换公式                        | 48 |
| 二、逆 $z$ 变换的三种常用方法                   | 49 |
| § 2-10 $z$ 变换的定理与性质                 | 55 |
| 一、线性特性                              | 55 |
| 二、序列的移位                             | 56 |
| 三、乘指数序列                             | 56 |
| 四、 $X(z)$ 的微分                       | 56 |
| 五、复数序列的共轭                           | 56 |
| 六、初值定理                              | 56 |
| 七、终值定理                              | 57 |
| 八、序列的卷积                             | 57 |
| 九、序列乘积的 $z$ 变换——复卷积定理               | 57 |
| 十、帕斯维尔(Parseval)定理                  | 59 |
| § 2-11 单边 $z$ 变换及双、单边 $z$ 变换的应用场合   | 61 |
| 一、单边 $z$ 变换的定义                      | 61 |
| 二、单边逆 $z$ 变换                        | 62 |
| 三、双、单边 $z$ 变换的应用场合                  | 62 |
| § 2-12 系统函数                         | 62 |
| 一、系统函数的定义                           | 62 |
| 二、系统函数和差分方程的关系                      | 63 |
| 三、系统函数的收敛域                          | 64 |
| 四、系统频率响应的几何确定法                      | 64 |
| 五、无限长单位脉冲响应(IIR)系统与有限长单位脉冲响应(FIR)系统 | 71 |
| 小 结                                 | 72 |
| 习 题                                 | 73 |

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>第三章 离散傅里叶变换 (DFT)</b> | <b>79</b> |
| § 3-1 引言                 | 79        |
| § 3-2 傅里叶变换的几种形式         | 79        |
| 一、连续时间与连续频率的傅里叶变换        | 79        |
| 二、连续时间与离散频率的傅里叶变换        | 80        |
| 三、离散时间与连续频率的傅里叶变换        | 81        |
| 四、离散时间与离散频率的傅里叶变换        | 81        |
| § 3-3 离散傅里叶级数 (DFS)      | 82        |
| 一、离散傅里叶级数变换的推导           | 82        |
| 二、离散傅里叶级数的主要性质           | 85        |
| § 3-4 离散傅里叶变换的定义         | 87        |
| § 3-5 离散傅里叶变换的性质         | 89        |
| 一、线性特性                   | 90        |
| 二、离散傅里叶逆变换的另一公式          | 90        |
| 三、对称定理                   | 90        |
| 四、反转定理                   | 91        |
| 五、序列的总和                  | 91        |
| 六、序列的始值                  | 91        |
| 七、延长序列的离散傅里叶变换           | 91        |
| 八、序列的圆周移位                | 92        |
| 九、圆周卷积及其与有限长序列的线性卷积关系    | 94        |
| 十、离散相关定理                 | 102       |
| 十一、帕斯维尔定理                | 103       |
| 十二、离散傅里叶变换的奇偶性及对称性       | 103       |
| 十三、离散傅里叶变换可看作一组滤波器       | 110       |
| 十四、DFT 与 $z$ 变换          | 112       |
| § 3-6 频域取样               | 113       |
| 一、对 $X(z)$ 取样时取样点数的限制    | 113       |
| 二、 $X(z)$ 的内插公式          | 114       |
| § 3-7 用 DFT 对连续时间信号逼近的问题 | 116       |
| 一、计算的变换与所需变换间相对数值的确定     | 117       |
| 二、计算的变换与所需变换间的误差         | 117       |
| § 3-8 加权技术与窗函数           | 120       |
| 一、加权的作用                  | 120       |
| 二、常用的窗函数                 | 123       |
| 小 结                      | 138       |

|          |     |
|----------|-----|
| 习 题..... | 139 |
|----------|-----|

#### 第四章 快速傅里叶变换 (FFT) .....143

|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| § 4-1 引言.....                                  | 143 |
| § 4-2 直接计算 DFT 的问题和改善 DFT 运算效率的基本途径.....       | 143 |
| 一、直接计算 DFT 的问题 .....                           | 143 |
| 二、改善 DFT 运算效率的基本途径 .....                       | 144 |
| § 4-3 按时间抽取(DIT)的 FFT 算法(库利-图基算法) .....        | 145 |
| 一、算法原理.....                                    | 145 |
| 二、按时间抽取的 FFT 算法与直接计算 DFT 运算量的比较 .....          | 152 |
| 三、按时间抽取的 FFT 算法的特点 .....                       | 153 |
| 四、按时间抽取的 FFT 算法的若干变体 .....                     | 156 |
| § 4-4 按频率抽取(DIF)的 FFT 算法(桑德-图基算法) .....        | 158 |
| 一、算法原理.....                                    | 158 |
| 二、时间抽取算法与频率抽取算法的比较.....                        | 161 |
| 三、时间抽取算法和频率抽取算法的关系以及 IDFT 运算 .....             | 161 |
| 四、按频率抽取的 FFT 算法的若干变体.....                      | 163 |
| § 4-5 $N$ 为复合数的 FFT 算法——统一的 FFT 方法 .....       | 163 |
| 一、算法原理.....                                    | 163 |
| 二、运算步骤.....                                    | 165 |
| 三、基数.....                                      | 166 |
| 四、 $N$ 为复合数的 FFT 运算量的估计.....                   | 168 |
| § 4-6 实序列的 FFT 算法 .....                        | 169 |
| 一、一个 $N$ 点 FFT 同时运算两个 $N$ 点实序列 .....           | 169 |
| 二、一个 $N$ 点的 FFT 运算一个 $2N$ 点的实序列.....           | 170 |
| § 4-7 线性调频 $z$ 变换(chirp $z$ Transform) 算法..... | 171 |
| 一、问题的提出.....                                   | 171 |
| 二、算法原理.....                                    | 171 |
| 三、CZT 的实现步骤 .....                              | 173 |
| 四、CZT 运算量的估算 .....                             | 175 |
| 五、CZT 算法的特点 .....                              | 176 |
| * § 4-8 ZFFT 算法.....                           | 177 |
| * § 4-9 快速傅里叶变换的应用.....                        | 179 |
| 一、利用 FFT 求卷积——快速卷积 .....                       | 179 |
| 二、利用 FFT 求相关——快速相关 .....                       | 181 |
| § 4-10 快速傅里叶变换的进展 .....                        | 181 |
| 小 结.....                                       | 183 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 习 题                               | 184 |
| <b>第五章 数字滤波器</b>                  | 186 |
| § 5-1 引言                          | 186 |
| § 5-2 数字滤波器的结构                    | 187 |
| 一、无限长单位脉冲响应滤波器的结构                 | 187 |
| 二、有限长单位脉冲响应滤波器的结构                 | 192 |
| § 5-3 无限长单位脉冲响应数字滤波器设计            | 200 |
| 一、概述                              | 200 |
| *二、常用模拟低通滤波器的特性                   | 201 |
| 三、从模拟滤波器设计数字滤波器的方法                | 209 |
| *四、直接设计 IIR 数字滤波器                 | 239 |
| 五、IIR 数字滤波器的计算机辅助设计(优化技术设计)       | 248 |
| § 5-4 有限长单位脉冲响应(FIR)数字滤波器设计       | 257 |
| 一、概述                              | 257 |
| 二、线性相位 FIR 滤波器的特点                 | 257 |
| 三、窗函数设计法                          | 265 |
| 四、频率取样设计法                         | 273 |
| 五、FIR 滤波器的计算机辅助设计(优化技术设计)         | 284 |
| *六、用作化小器与内插器的 FIR 滤波器             | 299 |
| § 5-5 IIR 与 FIR 数字滤波器的比较及数字滤波器的发展 | 301 |
| 一、IIR 与 FIR 数字滤波器的比较              | 301 |
| 二、数字滤波器的发展                        | 302 |
| 小 结                               | 302 |
| 习 题                               | 304 |
| <b>第六章 数字信号处理中有限字长的影响</b>         | 309 |
| § 6-1 引言                          | 309 |
| § 6-2 数的表示及其运算对量化的影响              | 310 |
| 一、三种算术运算法                         | 310 |
| 二、负数的原码、补码、反码表示                   | 312 |
| 三、截尾效应和舍入效应                       | 314 |
| § 6-3 输入信号的量化误差                   | 320 |
| 一、A/D 转换器的量化效应                    | 320 |
| 二、量化误差的统计分析                       | 321 |
| 三、量化误差通过系统                        | 323 |
| 四、D/A 转换的误差分析                     | 325 |
| § 6-4 数字滤波器的系数量化误差                | 327 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 一、系数量化对零、极点位置的影响·····    | 327 |
| 二、系数量化影响的统计分析·····       | 334 |
| § 6-5 数字滤波器的运算误差·····    | 341 |
| 一、IIR 滤波器的运算量化误差分析·····  | 342 |
| 二、FIR 滤波器的运算量化误差分析·····  | 364 |
| § 6-6 FFT 系统的量化误差分析····· | 371 |
| 一、计算 DFT 时的量化效应分析·····   | 372 |
| 二、定点 FFT 计算中量化效应分析·····  | 373 |
| 三、浮点 FFT 计算中量化效应分析·····  | 379 |
| 四、FFT 系统系数量化效应分析·····    | 382 |
| 小 结·····                 | 385 |
| 习 题·····                 | 386 |
| <br>第七章 数字信号处理的实现·····   | 390 |
| § 7-1 引言·····            | 390 |
| § 7-2 FFT 的实现·····       | 391 |
| 一、FFT 软件实现·····          | 391 |
| 二、FFT 的专用硬件实现·····       | 396 |
| § 7-3 数字滤波器的实现·····      | 406 |
| 一、数字滤波器的软件实现·····        | 406 |
| 二、数字滤波器的专用硬件实现·····      | 410 |
| 小 结·····                 | 420 |
| 参考文献·····                | 420 |

# 第一章 数字信号处理概述

## § 1-1 引言

过去, 信号处理一直是采用模拟设备来完成。近代, 数字计算机的出现和大规模集成技术的高度发展, 为信号处理提供了强有力的手段, 在电子技术各个领域, 例如雷达, 声纳, 语言通信, 数字通讯等, 正日益广泛地用数字方法替代模拟方法实现信号处理。因而, 从本世纪六十年代以来, 逐渐形成了一门新的学科——《数字信号处理》。

本章介绍的内容是为了让读者对数字信号处理有一轮廓的概念, 以增强学习全部课程的目的性。

## § 1-2 信号

信号可定义为一运载信息的函数, 其自变量常取为时间, 虽然事实上它可以不代表时间, 也不一定只限于有一个自变量。信号常分为

**模拟信号** 在连续时间范围内所定义的信号, 而信号的幅值可以取连续范围内任意数值, 即时间连续, 幅度也连续的信号。如图 1-1(a) 所示。

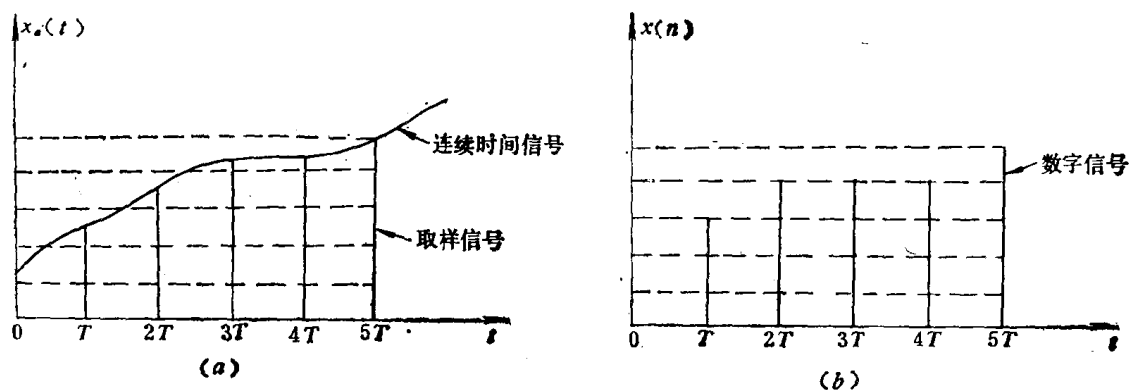


图 1-1 连续时间信号的取样与量化

(a) 取样 (b) 量化 (当离散时间信号的幅度不同于量化电平时, 以最接近的一个量化电平来近似。图中未用二进制数码表示)

**连续时间信号** 在规定的连续时间内, 信号的幅值可以是连续值也可以是离散值 (其幅度随时间  $t$  作跳跃式的变化) 的信号。“连续时间信号”与“模拟信号”经常用来说明同

一信号，可以互相通用，模拟信号可视为连续时间信号的一个特例。因为“模拟”与“模仿”容易混淆，所以一般以采用“连续时间信号”为宜，只有在与“数字”相提并论时，才用“模拟”这个名词。本书后面对模拟信号与连续时间信号概称连续时间信号。

**离散时间信号** 在一组离散的时间下表示信号数值的函数。因为最常遇到的离散时间信号是模拟信号在时间上以均匀（有时也以非均匀）间隔的取样<sup>①</sup>，所以离散时间信号又称为取样信号或序列，如图1-1(a)所示。

**数字信号** 在时间上和幅度上都经过量化<sup>②</sup>的信号。“量化”是利用一组数值来表示变量的过程。所谓“量化变量”实际上就是一组不同的数值。因此，数字信号可以用一序列的数来表示〔见图1-1(b)〕，而每一个数又是由有限个数码来表示的。

“离散时间”与“数字”也经常用来说明同一信号。离散时间信号的一些理论也适用于数字信号。

## § 1-3 系 统

几乎在科学技术的每一领域，为了简化信号的提取，必须进行信号处理。凡是反映信号处理因果关系的设备或运算都称为系统。信号处理系统可与信号按同样思路进行分类。

**连续时间系统** 输入与输出皆为连续时间信号的系统。

**离散时间系统** 输入与输出皆为离散时间信号的系统。

**模拟系统** 输入与输出都是模拟信号的系统。

**数字系统** 输入与输出都是数字信号的系统。

本书主要研究数字（离散）信号和系统。

## § 1-4 什么是数字信号处理

**数字信号处理的含义** 处理就是变换。数字信号处理就是用数字的方法，对信号的波形进行变换。这通常是将一个信号变换成在某种意义上比原始信号更合乎要求的另一种信号形式。例如，我们可设计一些变换以分离两个或多个已经按某种方式合在一起的信号；也可增强一个信号的某一分量或参数；或者是估算信号的一个或几个参数。

**数字信号处理领域的组成** 从某种观点来看，数字信号处理是多种计算机算法的汇集，因此可认为它是计算数学的另一分支。数字信号处理领域的组成可如图1-2所示，离散时间线性非时变系统理论和离散傅里叶变换(DFT)是整个领域的理论基础，数字滤波和谱分析是数字信号处理的基本内容，二维信号处理是一个正在发展的比较新的领域，数字滤波及谱分析也有新的内容与发展。图1-2中FIR表示有限长脉冲响应，IIR表示无限长脉冲响

① 所谓取样，就是把连续时间的波形  $x_a(t)$ ，用它在一系列时刻上的函数值来代替。

② 时间的量化就是取样

应, FFT 表示快速傅里叶变换。

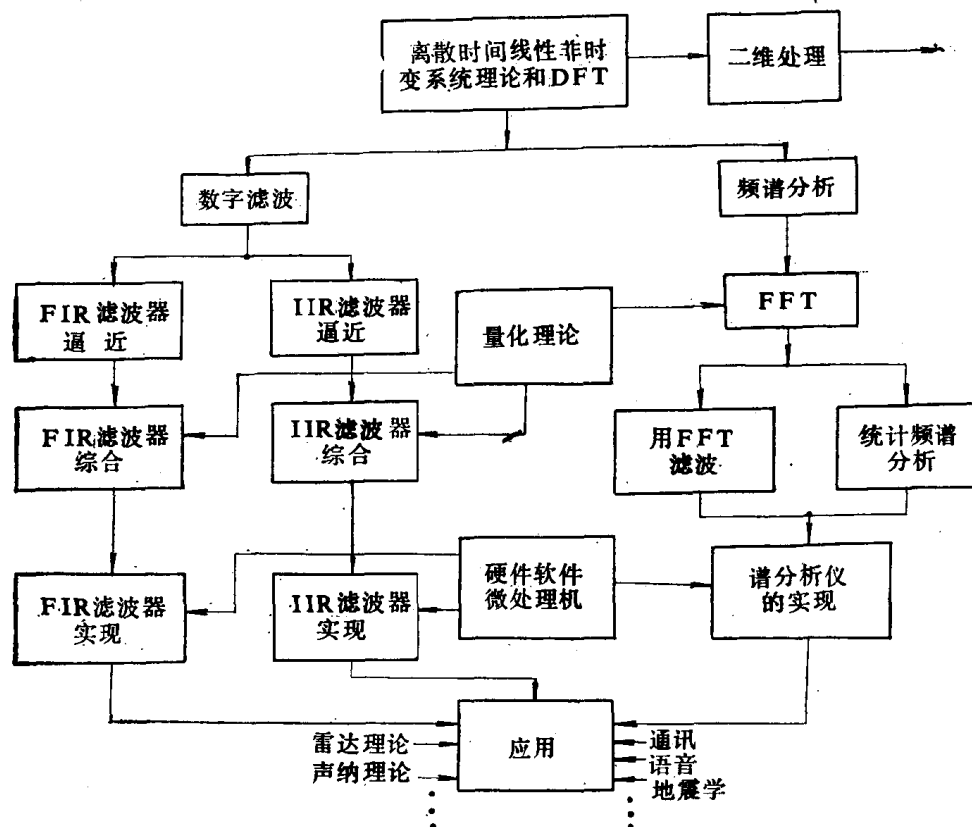


图 1-2 数字信号处理领域组成图

**数字信号处理过程** 借助于图 1-3 所示的简单系统来说明数字信号处理过程。

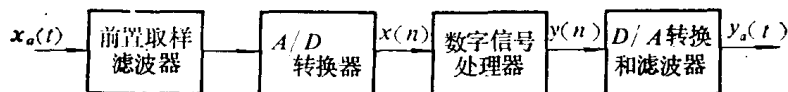


图 1-3 数字信号处理系统的简单方框图

模拟输入信号  $x_a(t)$  (见图 1-4(a))，首先通过一连续时间的前置取样滤波器，以保证输入信号  $x_a(t)$  的最高频率限制在一定数值之内。然后在  $A/D$  转换器中每隔  $T$  (取样周期) 秒读出一  $x_a(t)$  的幅度，并将其量化为标准电平。例如 3.3V 的取样值量化为 3V，3.6V 的取样值量化为 4V。所得的量化取样信号如图 1-4(b) 所示。

其后， $A/D$  转换器将保持电路中的取样信号电平进一步变换成数字。数字信号处理中常采用二进制数系，仅用 0、1 两个数值来表示所有可能的数。一个十进制数  $m$  可以用  $n$  个二进制码 (码位) 来表示：

$$m = 2^n \quad (1-1)$$

若  $m$  是所需的可能电平数，则所需的码位  $n$  等于或大于  $\log_2 m$  的最小正整数。由于数

码的长度总是有限的，因而这些数码所能代表的信号的幅度就有一定限制。例如 图 1-4(c) 中所示的每个数字用三位二进制码来表示时，则只能表达  $2^3=8$  种不同的信号幅度。这些幅度称为量化电平。

信号的取样脉冲应该很窄，以便有更多的空余时间进行多路复用。取样脉冲表示为二进制数码时，代表二进制数的码位间隔应该很短，以便留有足夠的空余时间为其它信号使用。

模拟信号的取样、量化以及转化为二进制的过程总称为模数转换 ( $A/D$  转换)。当然量化越细，量化电平数越多，固然误差减小，但设备复杂，成本变高。一般情况下，信号的动态范围应与  $A/D$  转换器相适应，所用位数，应满足精确度的要求。取样和量化的处理，已早有  $A/D$  转换器集成电路单片问世，且性能越来越好。

$A/D$  转换后的时间上与幅度上都量化的信号称为数字信号。它本质上是一序列的“数”，为此，我们用  $x(n)$  来表示数字信号序列，自变量  $n$  是一个整型变量，它表示这个数在序列中的次序。为了形象起见，用一根线段来表示  $x(n)$  数值的大小，如图 1-4(d) 所示。

数字信号序列  $x(n)$ ，按一定要求在数字处理器中进行加工。例如，希望滤掉信号中的所有不必要的频率成份，这在模拟处理的情况下，利用电感、电容和电阻组成满足一定传输特性的滤波器，就达到了滤波的要求。在数字处理的情况下，利用数字滤波器可以达到同样要求。数字滤波器利用数字相加、再乘以常数和延时将输入数列按既定要求转换成输出数列，达到处理的目的。数字处理器可以是通用计算机，微型计算机，或专用和通用信号处理机。

$x(n)$  经数字处理器加工以后，转换为另一组输出序列  $y(n)$ ，再在数/模 ( $D/A$ ) 转换器中将数码反转换成模拟电压 (或电流)。在转换时，二进制数首先转换为连续时间脉冲。脉冲间的空隙由所谓“重建滤波器”填充起来。这滤波器包括一保持电路。在两个取样值之间令输出保持上一个取样值，称之为零阶保持法，其过程如图 1-5 所示。这种恢复方法除了在

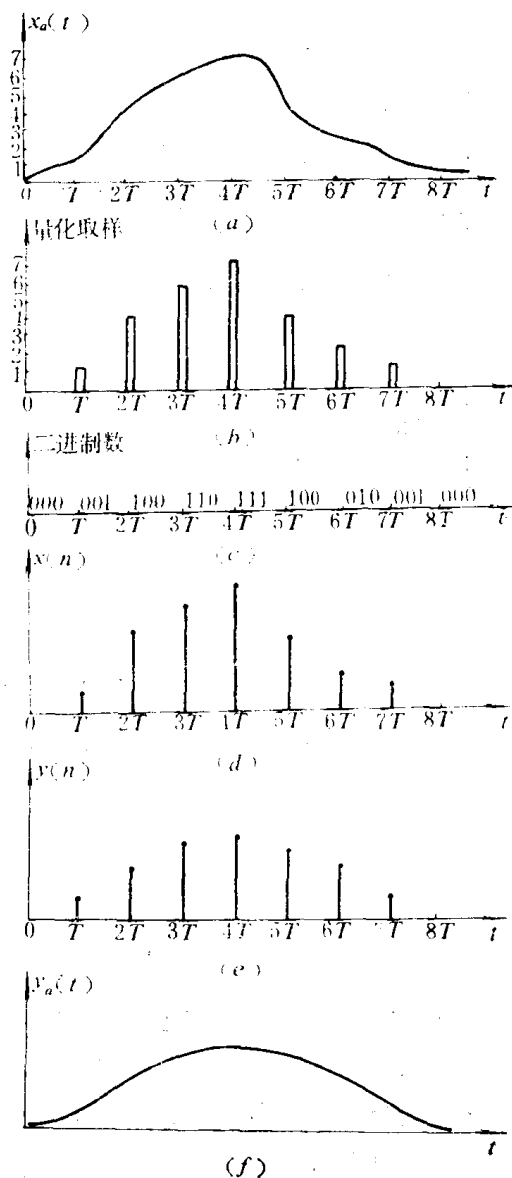


图 1-4 数字信号处理过程波形图

- (a) 输入模拟信号波形 (b) 取样量化信号  
 (c) 数字数码 (d) 输入信号序列  
 (e) 输出信号序列 (f) 输出模拟信号

取样率远高于信号中最高频率外，通常带来较大误差。一个既不十分复杂，但又相当精确的恢复方法是所谓“一阶多角形保持”，也即“线性插值”。其意思是在两个取样值之间令输出为两个取样值的线性插值。一阶多角形保持法过程如图1-6所示。 $D/A$ 转换器也早有现成的集成电路产品，并有高速，高分辨率，输入与微机兼容等优越性能。

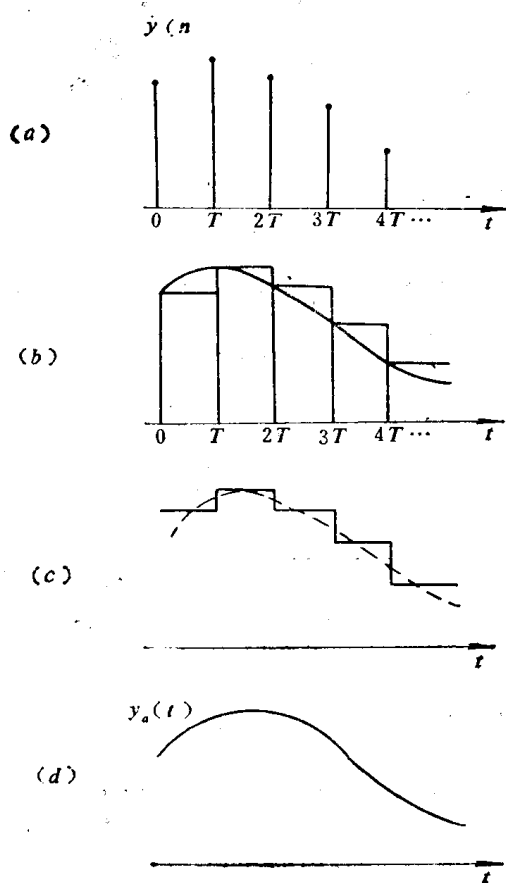


图 1-5 零阶保持法

- (a) 输出序列  $y(n)$
- (b) 二进制转化为连续时间脉冲
- (c) 保持电路的输出信号（虚线所示）
- (d) 经连续时间滤波器平滑后的波形

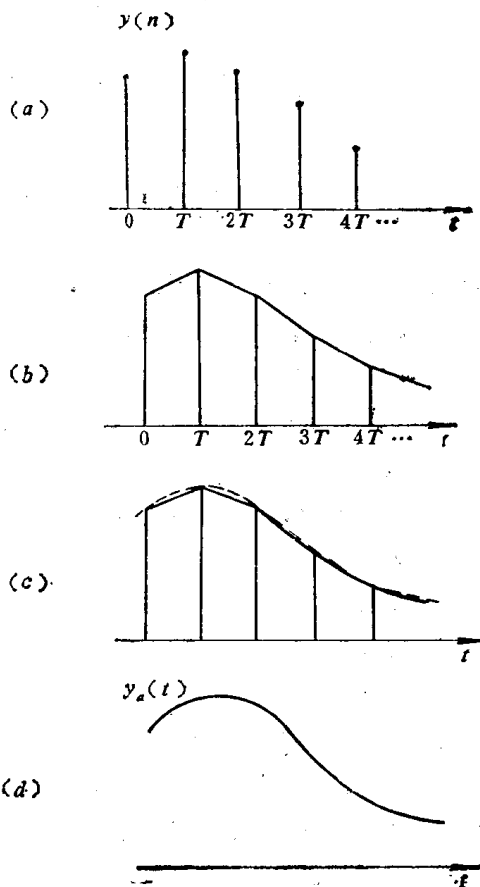


图 1-6 一阶多角形保持法

- (a) 输出序列  $y(n)$
- (b) 二进制转换为连续时间脉冲
- (c) 保持电路的输出信号（虚线所示）
- (d) 经过连续时间滤波器平滑后的波形

最后还需要利用连续时间滤波器滤除模拟量中不必要的高频成份就得到系统输出的模拟信号  $y_a(t)$  如图1-4(f)、图1-5及图1-6中的(d)所示。

实际的数字信号处理系统不一定都需要图1-3中的所有四个部分。有些系统就不需要最后的 $D/A$ 转换，终端可直接以数字形式打印或显示。另有一些系统其输入量原本就是数字量，因此开始的 $A/D$ 转换显然是不需要的。这种系统有时称为纯“数字系统”。

**模拟信号的数字式处理需满足的条件** 由上所述，读者也许会问：对模拟信号进行取样与量化，是否会把取样点间的信息丢失呢？又，在量化过程中，实际的信号幅值是用它最接近的标准电平代替的，因而在幅值上引入误差，这难道不会影响信号处理的质量吗？

关于取样问题，第二章中所述的取样定理将说明：如果信号的频带是有限的，而取样率又是大于或等于两倍的信号最高频率，则可根据它的离散取样值完全恢复出原始信号。

关于量化误差，可以这样来看。若测量得到模拟电压幅度为 4.75V，用二进制表示，则可以写成 100.110。当表示数的位数有限时，例如只能用四位数表示 100.110 时，则小数点后的数就表示不出来，从而出现误差。可以看出，位数越多，这种误差就越小。

令  $E_{\max}$  和  $E_{\min}$  代表信号的最大值和最小值，并令  $q$  代表相邻量化电平之间的垂直距离，则有

$$q = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2^n} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{m} \quad (1-2)$$

$q$  称为量化宽度，表示一个量化单位，符号  $m$  和  $n$  的定义如前。当一个连续信号  $x_a(t)$  加

到量化器上时，输出将是阶梯形波，如图 1-7 所示。这种由量化引起的误差叫做量化误差，记为  $e$ 。在图 1-7 所示的情况下，它在  $-q/2$  到  $+q/2$  的范围内变化着。显然，量化误差  $e$  与量化宽度  $q$  及输入信号  $x_a(t)$  有关，可用下式表出

$$\begin{aligned} e(q; x_a(t)) \\ = x_a(t) - y_a(t) \end{aligned} \quad (1-3)$$

综上所述可知：对模拟信号  $x_a(t)$  进行数字式处理时，如果取样率足够高，并用足够多的码数（二进制数）来表示每一取样信号，使得量化误差足够小，就不致损失信息。因而可用一序列的离散二进制数表示连续时间信号并直接用数字线路进行处理。

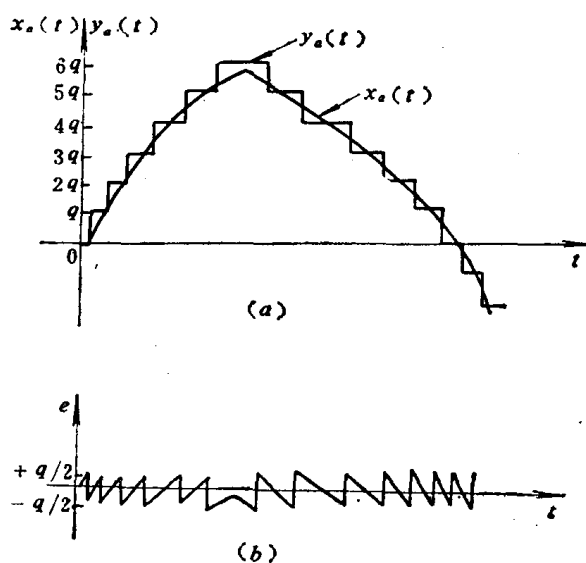


图 1-7 量化及量化误差波形图

(a) 连续时间输入信号及量化后的输出信号  
(b) 量化误差波形

## § 1-5 数字信号处理系统的突出优点

由上所述，很自然会产生这样的问题，这种包括有  $A/D$  转换、数字处理和  $D/A$  转换的复杂过程，虽能完成信号处理的作用，但是否经济，有无必要呢？回答是肯定的。这主要是因为数字信号处理具有下述明显的优点。

1. 精度高：模拟网络中元件精度很难达到  $10^{-3}$  以上，而数字系统 17 位字长就可达  $10^{-5}$  精度。在一些高精度的系统中有时只有采用数字技术才可达精度要求。如雷达技术中的脉冲压缩，要求主、副瓣之比达 35dB 或 40dB，在理论上是可行的，但在采用模拟处理时，由

于元件精度的限制,只能做到 30dB 左右。可是当采用数字脉压时,在  $\tau=500\mu s$ , 压缩比  $D=2^{10}=1024$ , 模数转换器用 8 位时,其主、副瓣之比却可达 40dB,且动态范围可大到 60dB。

2. 灵活性大:数字系统的性能主要决定于乘法器的各系数,而这些系数是存放在系数存储器中的。改变所存放的系数,就可得到不同的系统,比改变模拟系统的特性容易得多。

3. 可靠性强:因为数字系统只有两个信号电平,“1”,“0”,受噪声及环境条件等影响小,不像模拟系统各参数都有一定的温度系数,易受环境条件,如温度、振动、电磁感应等影响。再者,数字系统多采用大规模集成电路,其故障率远比采用众多分立元件构成的模拟系统的故障率低。

4. 易于大规模集成:因数字部件具有高度规范性,便于大规模集成,大规模生产,且数字电路主要工作在截止饱和状态,对电路参数要求不严格,因此产品的成品率高,价格日趋降低。特别在一些用模拟网络进行的低频信号的处理中,网络的电感和电容的数值大到惊人的程度,甚至不能很好地实现,这时采用数字滤波器,在体积、重量和性能方面,将特别显示出其优越性。

5. 时分复用:数字系统的另一个最大优点就是所谓“时分复用”,即可利用一套计算设备同时处理几个通道信号。从图 1-4 的取样信号可见,在信号的相邻取样点之间存在着相当长的空隙时间,在此时间内其它信号的取样值同样可送入到同一处理设备进行信号处理。其原理如图 1-8 所示,同步系统控制各路信号按先后次序分别输入一序列值进入处理器,处理器算完一路结果再算第二路...,在将各路信号第一个序列算完后,在同步系统控制下分别送给了各路输出,再按先后次序计算各路输入信号的第二个序列,如此反复。因此,对于每一路信道来说,都好像单独占用着处理器一样。处理器运算的速度越高,它能同时处理的信道数也越多。

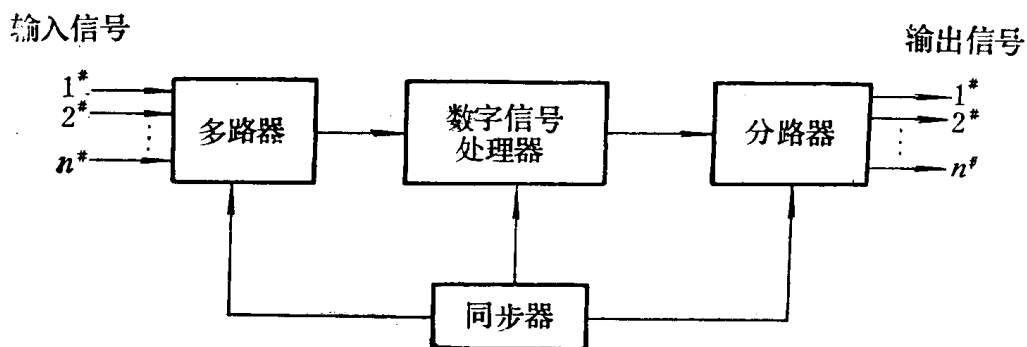


图 1-8 时分复用系统

由于数字信号处理较之模拟信号处理有众多的优点和大规模集成技术的迅速发展,因而数字信号处理已在科学技术各个领域获得越来越广泛的应用。