

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

数字信号处理及应用

王华奎 张立毅 编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

数字信号处理及应用

王华奎 张立毅 编

高等教育出版社

内容简介

本书以数字信号处理基础内容为主,同时也介绍了有关数字信号处理实现与应用。书中以主要篇幅讨论了离散时间信号与系统的基本概念,离散傅里叶变换及其快速算法,数字滤波器的结构与各种设计方法。这是数字信号处理中的经典内容,也是进一步学习和掌握更多信号处理理论的基础。为便于数字信号处理系统的设计与开发,书中介绍了数字信号处理芯片的原理及其开发工具以及应用实例。

本书概念清晰,说明详细,深入浅出,易于理解,具有丰富的例题和习题,便于自学。

本书可作为高等院校理工科类相关专业本科生教材,也可作为有关工程技术人员的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理及应用/王华奎,张立毅编. —北京:
高等教育出版社,2004.11
ISBN 7-04-014541-3

I. 数... II. ①王...②张... III. 数字信号-信号
处理-高等学校-教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 109712 号

策划编辑	李·慧	责任编辑	刘洋	封面设计	李卫青
责任绘图	杜晓丹	版式设计	王莹	责任校对	王效珍
责任印制	孔源				

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京东光印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 16.75
字 数 310 000

版 次 2004 年 11 月第 1 版
印 次 2004 年 11 月第 1 次印刷
定 价 21.20 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号:14541-00

前 言

当前,随着微电子技术的迅速发展,数字信号处理(DSP)芯片的性能不断提高,价格持续下降,数字信号处理技术已经广泛而深入地应用到诸如航空、航天、雷达、声呐、通信、自动控制和生物医学工程等各个领域,并且不断开拓新的应用领域。可以预言,以DSP芯片为核心,辅以其他外围设备的各种数字化产品,将具有巨大的潜在市场。

数字信号处理是一门以算法为核心、理论性很强的学科。目前,国内有关数字信号处理方面的教材大多数都是讲解算法、推导和证明算法;另一方面,大学本科生和工程技术人员希望在掌握数字信号处理基本原理的同时,也了解其软硬件的实现方法,以及如何把它们应用到工程实践中,这是当前数字信号处理教学面临的新任务。

本书就是基于这种形势要求而编写的。本书的内容大体上分为以下四部分:离散时间信号与系统分析、离散傅里叶变换及其快速算法、数字滤波器的结构与实现、数字信号处理的实现及应用。第一部分包括绪论和第1章,这是本书的基础,通过这一部分的学习,希望读者能对数字信号处理有一个大概的了解,建立起离散时间信号与系统的基本概念,并初步掌握时域与频域的基本分析方法。第二部分包括第2章,介绍数字信号处理中最典型、使用最广泛的一种线性变换工具——离散傅里叶变换及其快速算法,通过它的学习还能进一步认识运算效率在数字信号处理中的地位。第三部分包括了第3、4、5、6章,介绍了数字滤波器的各种结构和设计方法,是离散时间系统设计的基础知识。考虑到有些读者可能缺乏有关模拟滤波器设计的基础,为此在第4章对这些内容做了初步介绍。这三部分构成数字信号处理最基础的内容。第四部分内容为第7章,主要介绍了TI公司的数字信号处理芯片及其开发工具,给出了几种典型的应用实例。这些内容是数字信号处理实现及应用时必须了解的。

本书提供了大量的例题,各章均安排了一定数量的习题,便于读者理解和巩固所学的概念和方法,提高分析问题和解决问题的能力。

书中并未涉及目前最流行的信号处理仿真工具MATLAB,原因在于作者编写的与本书配套的教材《数字信号处理仿真实验教程》即将出版,该书对这方面的内容有深入系统的阐述。

王华奎任本书的主编,并编写了绪论、2、7章,张立毅编写了第3、4、5、6章,李艳萍编写了第1章,李瑞莲编写了全部习题。太原理工大学谢克明教授在百

忙之中审阅了本书全稿,提出了很多精辟的见解和建设性的修改意见,谨在此表示衷心的感谢。在本书编写过程中,也得到博士生、硕士生张晓琴、赵菊敏、常广志、王旭鹏、赵清华、李霞、陈艳丽等人的帮助,在此一并致谢。

限于作者水平,不妥及错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者

2004年8月

目 录

绪论	1
第 1 章 离散时间信号与系统	7
1.1 离散时间信号——序列	7
1.1.1 常用的序列	8
1.1.2 序列运算及其常用关系式	11
1.1.3 几个有用的结果	16
1.2 离散系统	16
1.2.1 线性系统	17
1.2.2 时不变系统	17
1.2.3 系统的因果性与稳定性	19
1.2.4 系统的差分方程描述	20
1.3 离散时间傅里叶变换(DTFT)	24
1.3.1 离散时间傅里叶变换的定义	24
1.3.2 离散时间傅里叶变换的性质	25
1.3.3 线性时不变系统的频率响应	26
1.4 离散信号的 z 变换	27
1.4.1 z 变换的定义及收敛域	27
1.4.2 z 变换的主要性质	35
1.4.3 z 反变换	38
1.4.4 离散时间系统的 z 域表示	44
1.5 模拟信号的采样与恢复	48
1.5.1 理想采样	48
1.5.2 理想采样信号的频谱	50
1.5.3 采样的恢复	54
1.5.4 由采样信号序列重构带限信号	54
本章小结	55
习题	57
第 2 章 离散傅里叶变换(DFT)及其快速算法(FFT)	62
2.1 离散傅里叶级数(DFS)	62
2.1.1 离散傅里叶级数的推导	62
2.1.2 离散傅里叶级数的性质	67

2.2 离散傅里叶变换(DFT)	70
2.2.1 从离散傅里叶级数到离散傅里叶变换	70
2.2.2 DFT与DTFT、 z 变换之间的关系	74
2.2.3 离散傅里叶变换的性质	76
2.3 快速傅里叶变换(FFT)	89
2.3.1 DFT快速算法的必要性与可能性	89
2.3.2 时间抽取FFT算法	92
2.3.3 频率抽取FFT算法	104
2.3.4 IDFT的快速算法(IFFT)	107
2.3.5 线性卷积的快速算法	109
2.3.6 利用FFT进行频谱分析	115
本章小结	124
习题	125
第3章 数字滤波网络	129
3.1 数字滤波器的表示方法	129
3.2 IIR数字滤波器的基本网络结构	129
3.2.1 直接型	130
3.2.2 级联型	131
3.2.3 并联型	132
3.3 FIR数字滤波器的基本网络结构	132
3.3.1 直接型	133
3.3.2 级联型	133
3.3.3 线性相位型	134
本章小结	135
习题	136
第4章 滤波器设计原理	138
4.1 滤波器的基本概念	138
4.1.1 滤波原理	138
4.1.2 滤波器的种类	139
4.1.3 对滤波器的技术要求	140
4.1.4 滤波器的设计过程	141
4.2 模拟低通滤波器的设计	142
4.2.1 巴特沃思(Butterworth)逼近	143
4.2.2 切比雪夫(Chebyshev)逼近	147
4.3 模拟高通、带通及带阻滤波器的设计	154
4.3.1 模拟高通滤波器的设计	154

4.3.2 模拟带通滤波器的设计	156
4.3.3 模拟带阻滤波器的设计	158
本章小结	160
习题	160
第 5 章 IIR 数字滤波器的设计	162
5.1 用脉冲响应不变法设计 IIR 数字滤波器	162
5.1.1 设计的基本思想	162
5.1.2 模拟与数字滤波器的转换关系	162
5.2 用双线性变换法设计 IIR 数字滤波器	166
5.2.1 双线性变换	166
5.2.2 数字低通 IIR 滤波器的设计	168
5.3 数字高通、带通及带阻 IIR 滤波器的设计	169
5.3.1 模拟—数字—数字变换法	170
5.3.2 模拟—模拟—数字变换法	172
本章小结	176
习题	177
第 6 章 FIR 数字滤波器的设计	180
6.1 线性相位 FIR 滤波器的基本特性	180
6.1.1 线性相位条件	180
6.1.2 线性相位条件对 $h(n)$ 的要求	181
6.1.3 线性相位 FIR 滤波器的频率特性	182
6.1.4 线性相位 FIR 滤波器的零点分布	187
6.2 窗函数加权设计 FIR 滤波器	188
6.2.1 设计的基本思想	188
6.2.2 窗函数的功能与选择	189
6.2.3 窗函数加权设计方法	194
6.3 频率采样法设计 FIR 滤波器	199
6.3.1 设计的基本思想	199
6.3.2 线性相位约束条件	200
6.3.3 滤波器的频率响应	201
6.4 IIR 与 FIR 数字滤波器的比较	203
6.4.1 性能比较	203
6.4.2 结构比较	204
6.4.3 设计方法比较	204
本章小结	204
习题	205

第 7 章 数字信号处理的实现及应用	208
7.1 数字信号处理的实现	208
7.2 数字信号处理器的应用	209
7.3 DSP 系统	210
7.3.1 典型的 DSP 系统组成	210
7.3.2 DSP 系统的特点	211
7.3.3 DSP 系统的设计过程	213
7.4 DSP 芯片	214
7.4.1 DSP 芯片的出现及发展	214
7.4.2 DSP 芯片的分类	214
7.4.3 DSP 芯片的特点	215
7.4.4 如何选择 DSP 芯片	216
7.5 TI 公司的芯片	218
7.5.1 定点芯片	218
7.5.2 浮点芯片	220
7.5.3 指令系统	222
7.6 DSP 芯片的开发工具	228
7.6.1 代码生成工具	228
7.6.2 代码调试工具	230
7.7 DSP 实现与应用实例	231
7.7.1 幅度调制(AM)的 DSP 实现	231
7.7.2 FIR 滤波器的 DSP 实现	234
7.7.3 IIR 滤波器的 DSP 实现	236
7.7.4 FFT 的 DSP 实现	240
本章小结	243
习题	244
参考文献	246
附录 TMS320C30 指令系统	248

绪 论

内 容 提 要

近 40 年来,数字信号处理技术突飞猛进,应用也越来越广泛,目前已成为信息科学技术的一个重要组成部分。那么,究竟什么是数字信号处理?它有哪些特点?数字信号处理课程的性质、任务以及教学内容的重点又是什么?怎样学习本课程?这是绪论中要阐述的几个问题。

1. 什么是数字信号处理

信号是信息的载体,几乎所有的工程技术领域都要涉及到信号问题。这些信号包括电的、磁的、声的、光的、热的、机械的及生物体的等各个方面。所谓信息处理是指将信号从一种形式变换成另一种形式,比如将信号从时域变换到频域,从模拟信号变换为数字信号等。此种变换用于分离两个或多个已按某种方式组合在一起的信号,或是增强一个信号的某一分量,或是估计信号的一个或多个参数等,以达到提取信息和便于应用的目的。信号的各种处理在通信、雷达、声呐、导航、遥感和生物医学工程等领域得到了广泛的应用。信号处理理论与技术的内容非常丰富,大体可分为模拟信号处理和数字信号处理。

如果对信号的处理是通过模拟器件进行的,称为模拟信号处理。它是以各种分立元件,如电阻、电容、电感、晶体管等为基础组成的系统。简单的阻容滤波器及晶体管放大器便是这种系统。

如果对信号的处理是通过数字器件进行的,称为数字信号处理。它是用计算机、各种数字硬件和软件包替代各种模拟网络,对实际的各种信号实现采集、滤波、检测、估值、调制、解调、建模和频谱分析等功能,以得到符合人们需要的信号形式。它是 20 世纪 60 年代随着计算机技术和大规模集成电路的迅速发展并与信息和网络理论相结合而综合发展起来的一门新兴学科。

为了对数字信号处理有一个大致的概念,先从模拟信号的数字化处理谈起。模拟信号的数字化处理就是先将模拟信号转变为数字信号,然后用数字技术进行加工,最后还原为模拟信号的处理过程。图 1 表示了这样一个系统的方框图,

这种系统也称为采样信号处理系统。模拟输入信号 $x_a(t)$ [如图 2(a)] 首先要经过采样器和模/数(A/D)转换器转变为数字信号,这里,采样器每隔时间 T 采集一次输入信号的幅度,并将它存放在 A/D 转换器的保持电路中。经过采样以后的信号称为“离散时间信号”,它只表达时间轴上一些离散点 $0, T, 2T, \dots, nT$ 上的信号值,这些值为 $x_a(nT)$,如图 2(b)所示。因此,离散时间信号就是指一组特定时间下表达信号数值的函数,采样过程就是对模拟信号的时间量化的过程。

A/D 转换器则是将保持电路中的采样信号电平进一步变换成数字,一般都是采用二进制数码。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幅度就有一定限制。例如每个数字用 5 位二进制表示,那么,只能表达 32 种不同的信号幅度,这些幅度称为量化电平。当离散时间信号的幅度不同于量化电平时,就必须用离它最近的一个量化电平来近似。因而,经过 A/D 转换器后,信号在幅度上也量化了,这种信号称为“数字信号”。数字信号代表的是时间上和幅度上都量化以后的信号,它本质上只是一序列的“数”,而每个数则是用有限个数码来表示的。

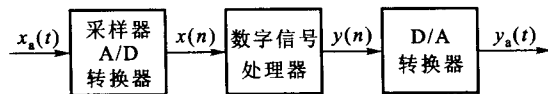


图 1 采样信号处理系统简单框图

数字信号序列用 $x(n)$ 来表示,自变量 n 是一个整型变量,它表示这个数在序列中的次序位置,为了形象起见,总是用一根线段来表示其数值的大小,如图 2(c)所示。数字信号序列 $x(n)$ 经过数字处理并按一定的要求加工以后,转变为另一组输出 $y(n)$ [如图 2(d)]。然后,再在数/模(D/A)转换器中,将数码反过来转换成模拟电压(或电流),这些电压(或电流)在时间点 $0, T, 2T, \dots, nT$ 上的幅度,应该等于序列 $y(n)$ 中相应数码所代表的大小。最后,通过一定的滤波器,滤去这些模拟量中不需要的一些高频成分,就得到系统所需要的输出,这就是模拟信号 $y_a(t)$,如图 2(e)所示。

实际上一个系统并不一定都需要图 1 中所有的三个部分,很多系统就不需要最后的 D/A 转换,终端可以直接以数字形式打印,或用数码管显示,例如雷达和声呐系统,最终可以直接显示目标的方位、距离等参数。另外,有一些系统,其本身的输入就是数字量,如磁卡阅读器,这样,开始的 A/D 转换器当然也就不需要了,这种系统有时也称为“纯数字系统”。

从图 1 可以看到,在这样一个采样信号处理系统中最核心的部分是数字信号处理器,这种处理器也称为数字系统,例如,数字滤波器就是最常用的一种线

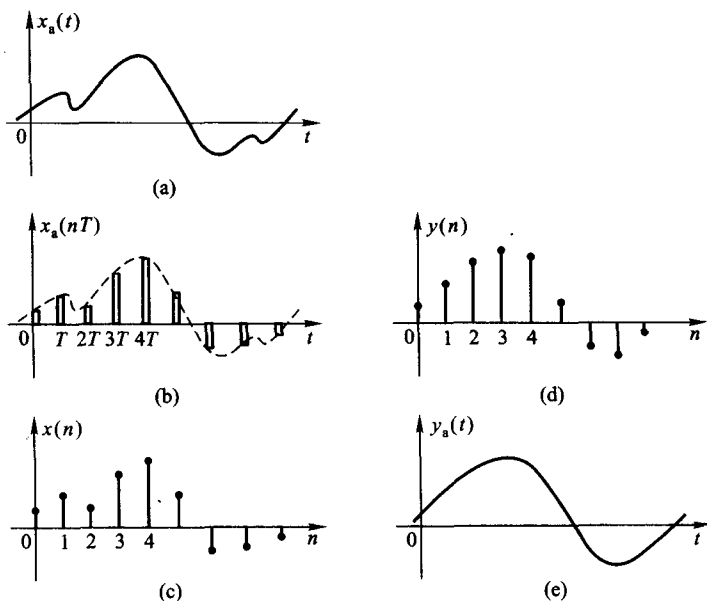


图 2 数字信号处理过程

性数字系统。一般来说,数字系统的输入是一个数字序列,输出是另一个数字序列,所以本质上数字系统只是一个序列的运算加工器。数字系统用来完成这种运算加工的基本功能部件是存储单元(包括存储器、移位寄存器等)、加法器、乘法器等数字硬件,以及用来指挥它们协调工作的控制设备。

2. 数字信号处理的特点

与模拟信号处理相比,数字信号处理有如下特点:

(1) 精度高

模拟网络中,处理元件,如电阻、电感和电容等,其数值精度很难达到 10^{-3} 以上。而数字系统,17 位字长便可达到 10^{-5} 精度,这是很普通的。因此,在很多高精密的系统中,数字处理是很有效的工具,甚至有时只有采用数字处理,才能达到精度的要求。

(2) 可靠性强

模拟系统的各种参数都有一定的温度系数,易受温度的影响。电磁辐射、振动、压力等外界环境也会对参数产生影响,导致系统性能下降,甚至不能正常工作。而数字系统中的参数受这些因素的影响要小得多。

(3) 灵活性好

模拟系统一旦构成,想改变其性能是很困难的。实现数字系统的器件往往都是可编程的(在线可编程或离线可编程),只要改变它们的软件,即可完成不同的功能,从而得到不同的系统。

(4) 时分复用

使用一套数字信号处理器同时处理几条通路的信号称为“时分复用”,其原理如图3所示。同步器控制多路信号按先后顺序分别将各路值输入到处理器,在第1路与第2路采样之间的间隙,处理器把第1路的值进行处理并输出处理结果,接下来处理第2路、第3路,依此类推。因此,对于每一通路来说好像单独占用处理器一样。处理器的运算速度越高,它所能同时处理的信号通路也越多。这与每一路都必须花费一套硬件的模拟系统比起来,可大大降低成本。

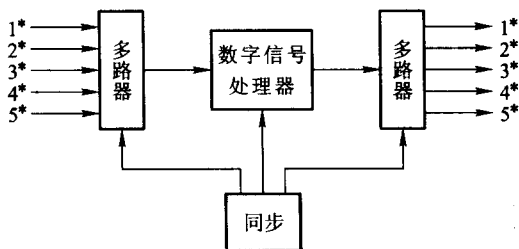


图3 时分多路数字信号处理系统

(5) 集成度高

数字部件由逻辑与记忆器件构成,具有高度的规范性,便于大规模集成,大规模生产,且数字电路主要工作在截止和饱和状态,对电路参数要求不严格,因此产品成品率高,价格日趋下降。而模拟电路的集成化虽然在近几年取得了很大的进展,但尚未达到广泛应用的水平。

与模拟系统相比,数字系统的主要缺点是处理速度还不很高,目前还不能处理频率很高的信号。另外,数字系统的结构较复杂,价格较贵,对一般要求不高的系统,还不便使用。但随着微电子技术和大规模集成电路的发展,这些问题将逐步得到解决。

3. 本课程的性质、任务和重点内容

本课程是高等学校电子信息类专业的一门重要的专业基础课,通过本课程的学习,尽可能使学生系统地了解数字信号处理的基础知识和基本理论,掌握实现理论所提出的行之有效的算法以及这些理论与算法用于工程实践时的软件与硬件,并学会运用数字信号处理的两个基本工具——快速傅里叶变换和数字滤

波器,为今后深入学习信息技术某些领域内容和从事数字信号处理工作打好基础。

数字信号处理在理论上涉及的范围相当广泛。在数学领域中,微积分、高等数学、随机过程、线性代数、复变函数等都是它们的分析工具。网络理论、信号与系统等均是它们的理论基础。在科学发展上,数字信号处理又是通信理论、最优控制、测量技术等的基础。在算法实现上,它又和计算机技术和微电子技术密不可分。因此可以说,数字信号处理是以经典的理论(如数学、系统)作为理论基础,以计算机与微电子技术作为技术支撑的一门新学科。同时,它又是许多新兴学科的理论基础,并与它们相互交叉、相互融合、相互促进。

本书作为供本科教学使用的教材,仅介绍数字信号处理的基本概念、基本方法和基本算法。所涉及的主要内容有:离散时间信号与系统分析、离散傅里叶变换、数字滤波器和数字信号处理实现及应用。

(1) 离散时间信号与系统分析

本书第1章着重讨论了离散时间信号与系统的分析方法,阐明了时域与频域之间内在联系以及不同信号频谱的变化规律,对分析离散时间信号与线性系统的重要工具—— z 变换做了详细的介绍,并强调了它在简化运算和系统分析过程中所起的桥梁作用。从理论和实践两方面深入讨论了采样定理及其应用。

(2) 离散傅里叶变换

除了作为序列的一种傅里叶表示式在理论上相当重要之外,由于存在计算离散傅里叶变换的有效算法,离散傅里叶变换在实现各种数字信号处理算法时也起着核心作用。用于谱分析以提取信号的各种特征是离散傅里叶变换最广泛的应用,卷积、相关和过滤等许多技术都可以使用离散傅里叶变换在计算机上实现。本书第2章从理论上阐述了周期序列离散傅里叶级数的分析方法,根据有限长序列与周期序列之间的内在联系导出离散傅里叶变换,详细讨论了离散傅里叶变换的各种性质及应用特点,着重介绍了基2时间抽取和频率抽取的快速傅里叶变换算法,分析了它们的特点和实际应用中有参数的选择。

(3) 数字滤波器

在信息领域,滤波是一种最基本的,无处不在的信息处理技术。滤波器能够允许或阻挡信号中的某些分量通过,或者从噪声中提取感兴趣的信号。数字滤波器的作用可以理解为用一个计算程序或算法,将代表输入信号的数字序列转换为代表输出信号的序列,并在转换过程中,使信号按照预定的形式改变。本书的第3、4、5、6章主要以频率选择模拟滤波器与数字滤波器的设计为基础,通过大量的实例介绍了有限脉冲响应和无限脉冲响应数字滤波器的设计与具体实现。

(4) 数字信号处理器(DSP)及应用

数字信号处理技术的出现改变了信号与信息处理技术的整个面貌。而数字信号处理器作为数字信号处理的核心技术,其应用已广泛深入到航空、航天、雷达、声呐、通信、自动控制、家电等各个领域,成为各种电子系统的核心。本书第7章阐述了 DSP 芯片的结构特征、软件开发、硬件实现等方面的基础知识,介绍了 DSP 芯片的开发工具及使用方法,讨论了快速傅里叶变换和数字滤波器等常用数字信号处理算法的 DSP 实现。

第 1 章 离散时间信号与系统

内 容 提 要

作为数字信号处理的基础,本章将介绍离散信号及离散系统的基本概念、基本分析方法。首先介绍一些常用的离散信号及其运算,然后讨论离散系统的描述及特征表征,最后阐述离散信号和系统在频域(或复频域)中的重要分析工具——傅里叶变换及 z 变换。

1.1 离散时间信号——序列

信号大致可分为连续时间信号和离散时间信号。连续时间信号 $x_a(t)$ 是指对任意时刻 $t (-\infty < t < \infty)$, 信号 $x_a(t)$ 总是有定义的; 离散时间信号 $x(n)$ 是指在某些不连续时刻 $n (n$ 为整数) 给出信号的值得 $x(n)$, 而在其他时刻没有定义。通常把在整个定义域 n 内 $x(n)$ 集合构成的一组有序数列的组合, 称为一个序列, 表示为

$$x = \{x(n)\} \quad -\infty < n < \infty \quad (1.1.1)$$

或用波形表示成图 1.1.1 的形式。虽然横坐标画成一条线, 但 $x(n)$ 在整数 n 上才有定义, 对非整数 n , $x(n)$ 并不为零, 只是没有定义。而纵轴线段的长短则代表各序列值的大小。

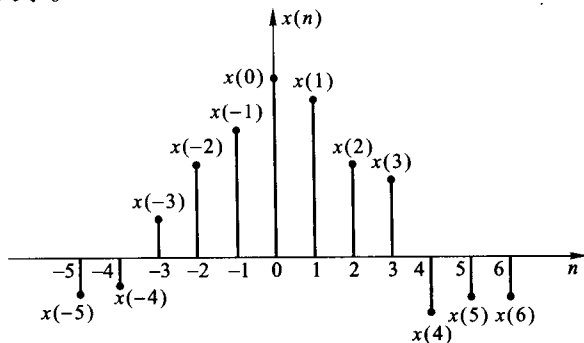


图 1.1.1 序列的图形表示

式(1.1.1)中, $x(n)$ 是第 n 项的序列值, 后面标出的是 n 的定义域, $\{\cdot\}$ 表示集合。序列也可写成

$$x = \{x(-\infty), \dots, x(-1), x(0), x(1), \dots, x(\infty)\}$$

更简化一些, 用序列的通项式来表示序列, 记作 $x(n)$ 。

1.1.1 常用的序列

本节介绍几种常用的离散时间序列, 它们在以后的讨论中有着重要的作用。

1. 单位脉冲序列 $\delta(n)$

单位脉冲(抽样)序列 $\delta(n)$ 定义为

$$\delta(n) = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ 0 & n \neq 0 \end{cases} \quad (1.1.2)$$

如图 1.1.2 所示。

它与模拟信号中的单位冲激信号 $\delta(t)$ 类似, 但 $\delta(t)$ 在 $t=0$ 处的值为 ∞ , 只是其积分(面积)为 1, 是不可实现的数学极限, 并非任何现实的信号。而离散时间系统中的 $\delta(n)$ 在 $n=0$ 处值为 1, $\delta(n)$ 是可实现的。

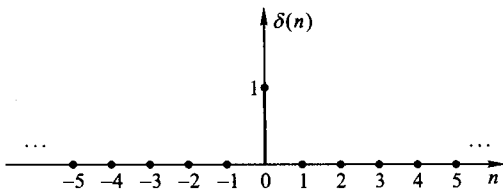


图 1.1.2 离散时间单位脉冲序列

2. 单位阶跃序列 $u(n)$

单位阶跃序列 $u(n)$ 定义为

$$u(n) = \begin{cases} 1 & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases} \quad (1.1.3)$$

如图 1.1.3 所示。

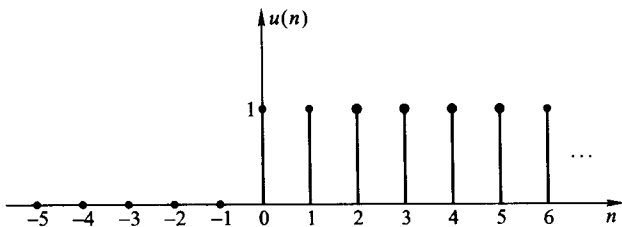


图 1.1.3 单位阶跃序列

它类似于模拟信号中的单位阶跃信号 $u(t)$, 但在 $n=0$ 处有确定的取值 $u(0)=1$ 。

离散时间单位脉冲序列和单位阶跃序列之间存在着密切的关系。离散时间单位脉冲是离散时间单位阶跃的一次差分, 即