

SHUZI XINHAO CHULI
JIANMING JIAOCHENG

数字信号处理 简明教程

吴有富 主编



西南交通大学出版社

数字信号处理简明教程

吴有富 主编



西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理简明教程 / 吴有富主编. — 成都:
西南交通大学出版社, 2015.8
ISBN 978-7-5643-4211-1

I. ①数… II. ①吴… III. ①数字信号处理—教材
IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 195892 号

数字信号处理简明教程

吴有富 主编

责任编辑 张宝华
特邀编辑 黄庆斌
封面设计 原谋书装

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区交大路 146 号)
发行部电话 028-87600564 028-87600533
邮政编码 610031
网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印 刷	成都蓉军广告印务有限责任公司
成 品 尺 寸	185 mm × 260 mm
印 张	13
字 数	322 千
版 次	2015 年 8 月第 1 版
印 次	2015 年 8 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-4211-1
定 价	35.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

统计学博士点建设文库

编委会

编委会主任 王 林 韦 维 吴有富

编委会副主任 童 红 索洪敏 吴兴玲 李伟明

编 委 田应福 黄介武 金良琼 王自强

前 言

本书较为系统地介绍了数字信号处理的基础理论、相应的算法及其软件实现。全书共 12 章，主要内容包括离散时间信号与离散时间系统的基本概念、 Z 变换及离散时间系统分析、离散傅里叶变换、傅里叶变换的快速算法、离散时间系统的相位与结构、数字滤波器设计（IIR、FIR 及特殊形式的滤波器）及数字信号处理的实现、小波分析的基本方法、自适应滤波器，最后介绍了数字信号处理中涉及的主要 Matlab 文件，并给出了具体使用实例。

本书章节安排合理，教程内容详细清楚，便于读者自学。除第 1 章及第 11、12 章外，其余各章均配有练习。

本书可作为理工科本科生、研究生的教材及参考书，也可作为工程技术人员的参考书。

编 者

2014.12

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 数字信号处理的发展及应用	1
1.2 数字信号处理技术及分析方法	4
参考文献	6
第 2 章 时域离散信号和时域离散系统	7
2.1 概 述	7
2.2 离散时间信号——数字序列	7
2.3 离散时间系统	10
2.4 用差分方程描述系统	16
练习	16
第 3 章 离散信号和系统的频域分析	17
3.1 离散时间信号和系统的频域描述	17
3.2 离散时间系统的频率响应	19
3.3 序列的 Z 变换	20
3.4 利用 Z 变换解差分方程的稳态解和瞬态解	42
3.5 系统函数	44
3.6 利用 Z 变换分析信号和系统的频域特性	46
练习	47
第 4 章 离散傅里叶变换	48
4.1 离散傅里叶变换的定义	48
4.2 离散傅里叶变换的基本性质	52
4.3 频率域采样	58
4.4 DFT 应用举例	60
练习	65
第 5 章 快速傅里叶变换 FFT	66
5.1 绪 言	66
5.2 直接计算 DFT 的运算量及减少运算量的根本途径	66
5.3 基 2FFT 算法	67
练习	73

第 6 章 时域离散系统的基本网状结构与状态变量分析法	74
6.1 用信号流图表示网状结构	74
6.2 无限长脉冲响应基本网络结构	75
6.3 有限长脉冲响应基本网络结构	78
练习	81
第 7 章 有限长脉冲响应数字滤波器的设计	82
7.1 线性相位 FIR 数字滤波器的条件和特点	82
7.2 利用窗函数法设计 FIR 滤波器	88
7.3 利用频率采样法设计 FIR 滤波器	93
7.4 IIR 和 FIR 数字滤波器的比较	96
练习	96
第 8 章 无限脉冲响应数字滤波器的设计	97
8.1 数字滤波器的基本概念	97
8.2 模拟滤波器的设计	100
8.3 用脉冲响应不变法设计 IIR 数字滤波器	102
8.4 用双线性变换法设计 IIR 数字低通滤波器	106
8.5 数字高通、带通和带阻滤波器的设计	109
练习	109
第 9 章 信号的小波变换	111
9.1 绪 言	111
9.2 小波变换基础	113
9.3 多分辨分析	121
9.4 快速正交小波变换	126
9.5 小波应用	128
练习	131
参考文献	131
第 10 章 自适应滤波器	132
10.1 概 述	132
10.2 有限自适应滤波器 (FIR ADF) 的实现	134
练习	138
参考文献	138
第 11 章 上机实验	139
11.1 系统响应及系统稳定性 (实验一)	139
11.2 时域采样与频域采样 (实验二)	144

11.3	用 FFT 对信号作频谱分析 (实验三)	150
11.4	IIR 数字滤波器设计及软件实现 (实验四)	156
11.5	FIR 数字滤波器设计与软件实现 (实验五)	163
11.6	数字信号处理在双音多频拨号系统中的应用 (实验六)	168
第 12 章	MATLAB 程序设计 (附件)	174
12.1	时域离散信号和时域离散系统	174
12.2	离散信号和系统的频域分析	178
12.3	离散傅里叶变换	180
12.4	快速傅里叶变换	181
12.5	时域离散系统的基本网状结构	183
12.6	无限长滤波器设计	186
12.7	有限长滤波器设计	189
12.8	小波分析	191

第1章 绪论

1.1 数字信号处理的发展及应用

1.1.1 数字信号简介

简单地说，数字信号处理就是用数值计算的方式对信号进行加工的理论和技术，其英文为 Digital Signal Processing，简称 DSP。另外，DSP 也是 Digital Signal Processor 的简称，即数字信号处理器，它是集成专用计算机的一种芯片，只有一枚硬币大小。有时人们也将 DSP 看作是一门应用技术，称为 DSP 技术与应用。

数字信号处理与模拟信号处理是信号处理的子集。数字信号处理的目的是对真实世界的连续模拟信号进行测量或滤波。在进行数字信号处理之前需要将信号从模拟域转换到数字域，这一般通过模数转换器来实现；而数字信号处理的输出经常也要变换到模拟域，这也是通过数模转换器实现的。

数字信号处理的算法需要利用计算机或专用处理设备如数字信号处理器（DSP）和专用集成电路（ASIC）等。数字信号处理技术及设备具有灵活、精确、抗干扰强、设备尺寸小、造价低、速度快等突出优点，是模拟信号处理技术与设备无法比拟的。

数字信号处理以众多学科为理论基础，涉及范围极其广泛。例如，在数学领域，微积分、概率统计、随机过程、数值分析等都是数字信号处理的基本工具，与网络理论、信号与系统、控制论、通信理论、故障诊断等也密切相关。近来一些新兴的学科，如人工智能、模式识别、神经网络，都与数字信号处理密不可分。可以说，数字信号处理是把许多经典的理论体系作为自己的理论基础，同时又使自己成为一系列新兴学科的理论基础。

1.1.2 数字信号处理的实现方法

DSP 的实现方法一般有以下几种：

- (1) 在通用的计算机（如 PC 机）上用软件（如 C 语言）实现；
- (2) 在通用计算机系统中加上专用的加速处理机实现；
- (3) 用通用的单片机实现，这种方法可用于一些不太复杂的数字信号处理，如数字控制等；
- (4) 用通用的可编程 DSP 实现，与单片机相比，DSP 芯片更加适合于数字信号处理的软件和硬件资源，可用于复杂的数字信号处理；
- (5) 用专用的 DSP 芯片实现。在一些特殊的场合，要求的信号处理速度极高，用通用

DSP 芯片很难实现,例如专用于 FFT、数字滤波、卷积等相关算法的 DSP 芯片,这种芯片将信号处理的算法用芯片硬件实现,无需进行编程。

上述几种方法中,第 1 种方法速度较慢,一般可用于 DSP 算法的模拟;第 2 种和第 5 种方法专用性强,应用受到很大的限制,第 2 种方法也不便于系统的独立运行;第 3 种方法只适用于实现简单的 DSP 算法;只有第 4 种方法才使数字信号处理的应用打开了新的局面。

1.1.3 数字信号的发展史

世界上第一个单片 DSP 芯片应当是 1978 年 AMI 公司发布的 S2811,1979 年美国 Intel 公司发布的商用可编程器件 2920 是 DSP 芯片的一个主要里程碑。这两种芯片内部都没有现代 DSP 芯片所必须有的单周期乘法器。1980 年,日本 NEC 公司推出的 μ PD7720 是第一个具有乘法器的商用 DSP 芯片。

最成功的 DSP 芯片当数美国德州仪器公司 (Texas Instruments, TI) 的一系列产品。TI 公司在 1982 年成功推出其第一代 DSP 芯片 TMS32010 及其系列产品 TMS32011、TMS320C10/C14/C15/C16/C17 等,之后相继推出了第二代 DSP 芯片 TMS32020、TMS320C25/C26/C28,第三代 DSP 芯片 TMS320C30/C31/C32,第四代 DSP 芯片 TMS320C40/C44,第五代 DSP 芯片 TMS320C5X/C54X,第二代 DSP 芯片的改进型 TMS320C2XX,集多片 DSP 芯片于一体的高性能 DSP 芯片 TMS320C8X 以及目前速度最快的第六代 DSP 芯片 TMS320C62X/C67X 等。TI 将常用的 DSP 芯片归纳为三大系列,即:TMS320C2000 系列 (包括 TMS320C2X/C2XX)、TMS320C5000 系列 (包括 TMS320C5X/C54X/C55X)、TMS320C6000 系列 (TMS320C62X/C67X)。如今, TI 公司的一系列 DSP 产品已经成为当今世界上最有影响的 DSP 芯片, TI 公司也成为世界上最大的 DSP 芯片供应商。

1.1.4 数字信号特征和分类

信号 (signal) 是信息的物理体现形式,或是传递信息的函数。而信息则是信号的具体内容。信号可分为模拟信号和数字信号,数字信号 (Digital Signal) 是时间和幅度上都离散 (量化) 的信号,可用一序列的数来表示,而每个数又可表示为二进制码的形式,适合计算机处理。

从数学的角度分,其又可分为:一维 (1D) 信号:一个自变量的函数;二维 (2D) 信号:两个自变量的函数;多维 (M-D) 信号:多个自变量的函数。

从处理内容上分有:滤波、变换、检测、谱分析、估计、压缩、识别等。

1.1.5 主要研究内容

本书主要研究离散时间信号和离散时间系统,特别是系统函数的设计;信号离散傅里叶变换,包含快速傅里叶变换;数字滤波器设计,如无限长滤波器 (IIR) 和有限长滤波器 (FIR) 等;现代谱估计;自适应滤波;小波变换;现代信号处理技术的应用等。

1.1.6 数字信号处理的主要应用

广义来说,数字信号处理是指用数字方法对信号进行分析、变换、滤波、检测、调制、解调以及快速计算的一门技术学科。但很多人认为数字信号处理主要研究有关数字滤波技术、离散变换快速算法和谱分析方法。随着数字电路与系统技术和计算机技术的发展,数字信号处理技术也得到相应发展,其应用领域十分广泛。

在数字控制、运动控制方面的应用主要有磁盘驱动控制、引擎控制、激光打印机控制、喷绘机控制、马达控制、电力系统控制、机器人控制、高精度伺服系统控制、数控机床。面向低功耗、手持设备、无线终端的应用主要有:手机、PDA、GPS、数传电台。现列举几个应用实例。

1. 处理系统

无论哪方面的应用,首先需要通过信息获取或数据采集手段得到所需的原始信号。如果原始信号是连续信号,还须经过抽样使之成为离散信号,再经过模数转换才能得到数字计算机或处理器所接受的二进制数字信号;如果所收集到的数据已是离散数据,则只需经过模数转换即可得到二进制数码。数字信号处理器的功能是将原始信号抽样转换得来的数字信号按照一定的要求,例如滤波的要求,加以适当的处理,得到所需的数字输出信号,经过数模转换先将数字输出信号转换为离散信号,再经过保持电路将离散信号连接起来成为模拟输出信号,这样的处理系统适用于各种数字信号处理的应用,只不过专用处理器或所用软件有所不同而已。

2. 语音信号处理

语音信号处理是信号处理中的重要分支之一,它包括语音的识别、语言的理解、语音的合成、语音的增强、语音的数据压缩等。语音识别是将待识别的语音信号的特征参数即时地提取出来,与已知的语音样本进行匹配,从而判定出待识别语音信号的音素属性;关于语音识别方法,有统计模式语音识别,结构和语句模式语音识别,利用这些方法可以得到共振峰频率、音调、噪音、噪声等重要参数。语音理解是人和计算机用自然语言对话的理论和技術基础。语音合成的主要目的是使计算机能够讲话,为此需要先研究清楚在发音时语音特征参数随时间的变化规律,然后利用适当的方法模拟发音的过程,合成为语言。其他有关语言处理问题也各有各的特点。语音信号处理是发展智能计算机和智能机器人的基础,是制造声码器的依据,也是迅速发展中的一项信号处理技术。

3. 图像信号处理

图像信号处理的应用已渗透到各个科学技术领域,譬如用于研究粒子的运动轨迹、生物细胞的结构、地貌的状态、气象云图的分析、宇宙星体的构成等。在图像处理的实际应用中,获得较大成果的有遥感图像处理技术、断层成像技术、计算机视觉技术和景物分析技术等。根据图像信号处理的应用特点,处理技术大体可分为图像增强、恢复、分割、识别、编码和重建等几个方面,这些处理技术各具特点,且正在迅速发展。

4. 振动信号处理

机械振动信号的分析与处理技术已应用于汽车、飞机、船只、机械设备、房屋建筑、水坝设计等方面的研究和生产。振动信号处理的基本原理是在测试体上加一激振力，作为输入信号，在测量点上监测输出信号，输出信号与输入信号之比称为由测试体所构成系统的传递函数（或称转移函数），根据得到的传递函数进行所谓模态参数识别，从而计算出系统的模态刚度、模态阻尼等主要参数，这样就建立起系统的数学模型，进而可以进行结构的动态优化设计。这些工作均可利用数字处理器来进行。这种分析和处理方法一般称为模态分析，实质上，它就是信号处理在振动工程中所采用的一种特殊方法。

5. 地球物理信号处理

为了勘探地下深处所储藏的石油和天然气以及其他矿藏，通常采用地震勘探方法来探测地层结构和岩性。这种方法的基本原理是在一个选定的地点施加人为的激震，如用爆炸方法产生一个振动波向地下传播，遇到地层分界面即产生反射波，在距离振源一定远的地方放置一列感受器，接收到达地面的反射波，从反射波的延迟时间和强度来判断地层的深度和结构，感受器所接收到的地震记录数据比较复杂，需要处理才能进行地质解释，处理的方法很多，有反褶积法，同态滤波法等，这是一个尚在努力研究的课题。

6. 生物医学信号处理

在生物医学方面，信号处理主要是用来辅助生物医学基础理论的研究，用于诊断检查和监护。例如，用于细胞学、脑神经学、心血管学、遗传学等方面的基础理论研究。人的脑神经系统约由 100 亿个神经细胞组成，是一个十分复杂而庞大的信息处理系统。在这个处理系统中，信息的传输与处理是并列进行的，并具有特殊的功能，即使系统的某一部分发生故障，其他部分仍能工作，这是计算机所做不到的，因此关于人脑信息处理模型的研究就成为基础理论研究的重要课题。此外，神经细胞模型的研究、染色体功能的研究等，都可借助于信号处理的原理和技术来进行。

信号处理用于诊断检查较为成功的实例，有脑电或心电的自动分析系统、断层成像技术等。断层成像技术是诊断学领域中的重大发明，X 射线断层的基本原理是 X 射线穿过被观测物体后构成物体的二维投影，接收器接收后，再经过恢复或重建，即可在一系列的不同方位计算出二维投影，经过运算处理即取得实体的断层信息，从而大屏幕上得到断层造像。信号处理在生物医学方面的应用正处于迅速发展阶段。

数字信号处理在其他方面还有多种用途，如雷达信号处理、地学信号处理等，它们虽各有其特殊要求，但所利用的基本技术大致相同，在这些方面，数字信号处理技术起着主要的作用。

1.2 数字信号处理技术及分析方法

1.2.1 数字信号处理技术

1. 模拟信号与数字信号的关系

数字信号与连续时间信号的转换关系如图 1.1 所示。

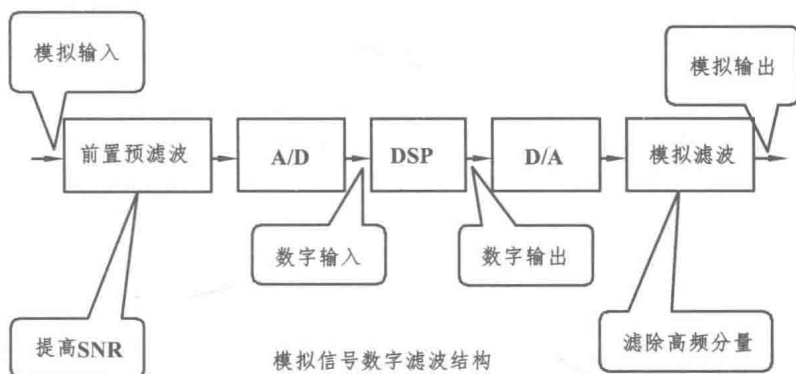


图 1.1 数模转换及处理关系

数字信号与连续时间信号关系如图 1.2 所示。离散信号经过插值可以无失真地重构出模拟信号；用一个等间隔的取样冲激串函数可将模拟信号变为离散信号。

间隔时间 T 抽样,如图 1.3 所示。抽样信号 $\hat{x}_a(t)$ 可以定义为用 T 为周期的冲激串函数 $p(t)$ 乘以 $x_a(t)$, 其中

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT)$$

$$\hat{x}_a(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_a(t)\delta(t-nT) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_a(nT)\delta(t-nT)$$

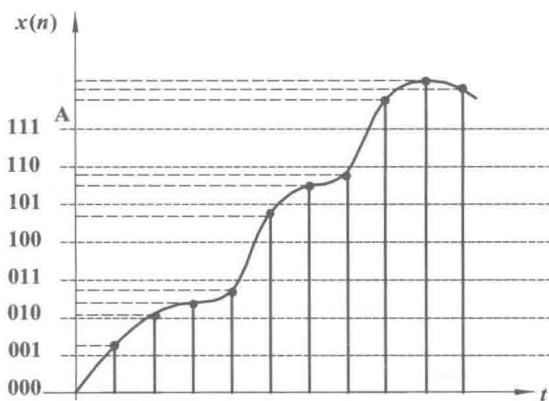


图 1.2 数字信号与连续时间信号的关系

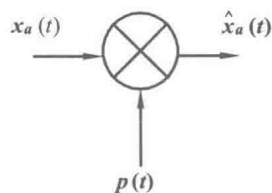


图 1.3 抽样示意图

2. A/D 变换的指标

经抽样后得到的是离散时间信号,若要得到数字信号,尚需进行量化编码。量化编码的性能由量化误差决定,信号处理的精度主要由信号的动态范围、信号的波形特点、量化位数和抽样频率决定。

1.2.2 数字信号的分析方法

数字信号的分析方法可分为时域分析和变换域分析。

1. 时域分析

时域分析的主要内容包括差分方程、单位冲激响应函数及卷积和量化误差分析等。

2. 变换域分析

变换域分析的主要内容包括 DFT、FFT、系统函数和频率响应函数等。

参考文献

- [1] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [2] 程乾生. 数字信号处理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010.
- [3] 郑君里, 杨为理, 应启珩. 信号与系统[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [4] [美]Steven A. Tretter. 离散时间信号处理导论[M]. 王平孙, 译. 北京: 高等教育出版社, 1982.
- [5] 王松林, 郭宝龙, 吴宪祥, 王辉. 信号与线性系统分析[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2007.

第2章 时域离散信号和时域离散系统

2.1 概述

信号通常分为两大类：连续时间信号和离散时间信号。如果信号在整个连续时间集合上都是有定义的，那么这种信号被称为连续时间信号。通常把时间连续、幅度也连续的信号称为模拟信号；把时间离散、幅度也离散的信号称为数字信号。

系统的作用是把信号变换成某种更合乎要求的形式。输入和输出都是连续时间信号的系统被称为连续时间系统；输入和输出都是离散时间信号的系统被称为离散时间系统；输入和输出都是模拟信号的系统被称为模拟系统；输入和输出都是数字信号的系统被称为数字系统。

本章主要讨论离散时间信号和离散时间系统的基本概念：序列的表示法和基本类型；线性非移变系统；系统的稳定性、因果性问题和线性常系数差分方程。

2.2 离散时间信号——数字序列

2.2.1 常见序列

在离散时间系统中，信号要用离散时间的数字序列 $\{x(n)\}$ 来表示，如图 2.1 所示。

$$x = x(n), \quad -\infty < n < \infty \quad (2.1)$$

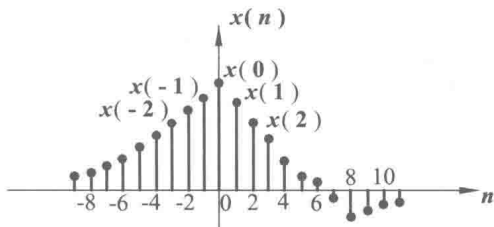


图 2.1 数字信号的图像表示

现将一些常见序列介绍如下：

1. 单位取样序列（离散冲激）

单位取样序列 $\delta(n)$ 是一个非常重要的序列，我们首先给出其定义。

定义 1:

$$\delta(n) = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

其图像表示如图 2.2 所示。

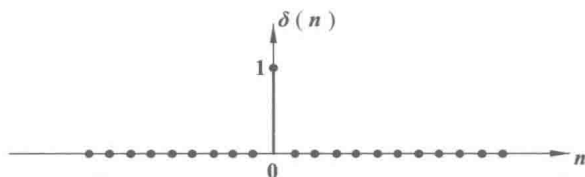


图 2.2 单位取样序列 $\delta(n)$

2. 单位阶跃序列

单位阶跃序列 $u(n)$ 定义如下:

定义 2:

$$u(n) = \begin{cases} 1, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

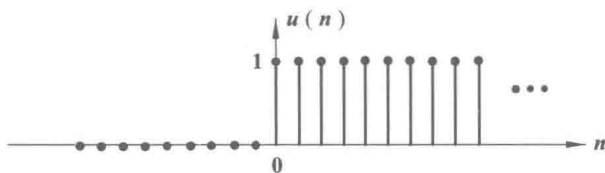


图 2.3 单位阶跃序列 $u(n)$

$u(n)$ 和 $\delta(n)$ 之间的关系是:

$$\delta(n) = u(n) - u(n-1) \quad (2.4)$$

$$u(n) = \sum_{k=-\infty}^n \delta(k) \quad (2.5)$$

$$u(n) = \sum_{k=0}^{\infty} \delta(n-k) \quad (2.6)$$

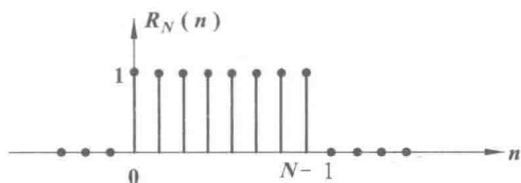
3. 矩形序列

一般矩形序列 $R_N(n)$ 定义如下:

定义 3:

$$R_N(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2.7)$$

$$R_N(n) = u(n) - u(n-N) \quad (2.8)$$

图 2.4 矩形序列 $R_N(n)$

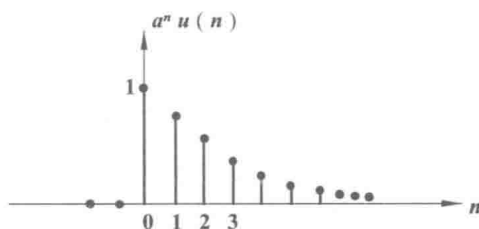
4. 实指数序列

$$x(n) = a^n, \quad -\infty < n < \infty \quad (2.9)$$

当 $n < 0$, $x(n) = 0$ 时, 上式可表示为:

$$x(n) = a^n u(n) = \begin{cases} a^n, & -\infty < n < \infty \\ 0, & n < 0 \end{cases}$$

当 $0 < a < 1$ 时, $a^n u(n)$ 的图形如图 2.5 所示。

图 2.5 实指数序列 $a^n u(n)$

5. 复指数序列

$$x(n) = e^{(a+jw)n} \quad (2.10)$$

这里 w 为数字域频率, 单位为弧度。当 $a = 0$ 时, (2.10) 式可表示成:

$$x(n) = e^{jwn} \quad (2.11)$$

式 (2.10) 还可写成:

$$x(n) = e^{an} \cos(wn) + je^{an} \sin(wn)$$

6. 正余弦型序列

正余弦型序列可分别用以下式子定义:

$$x(n) = A \sin(wn + \varphi) \quad (2.12)$$

$$x(n) = B \cos(wn + \varphi) \quad (2.13)$$

7. 周期序列

如果对所有 n 存在一个最小整数 N , 都有

$$x(n) = x(n + N) \quad (2.14)$$

则称 $x(n)$ 为周期序列, 记为 $\bar{x}(n)$, 其最小周期为 N 。如正余弦型序列均为周期为 2π 的周期序列。