

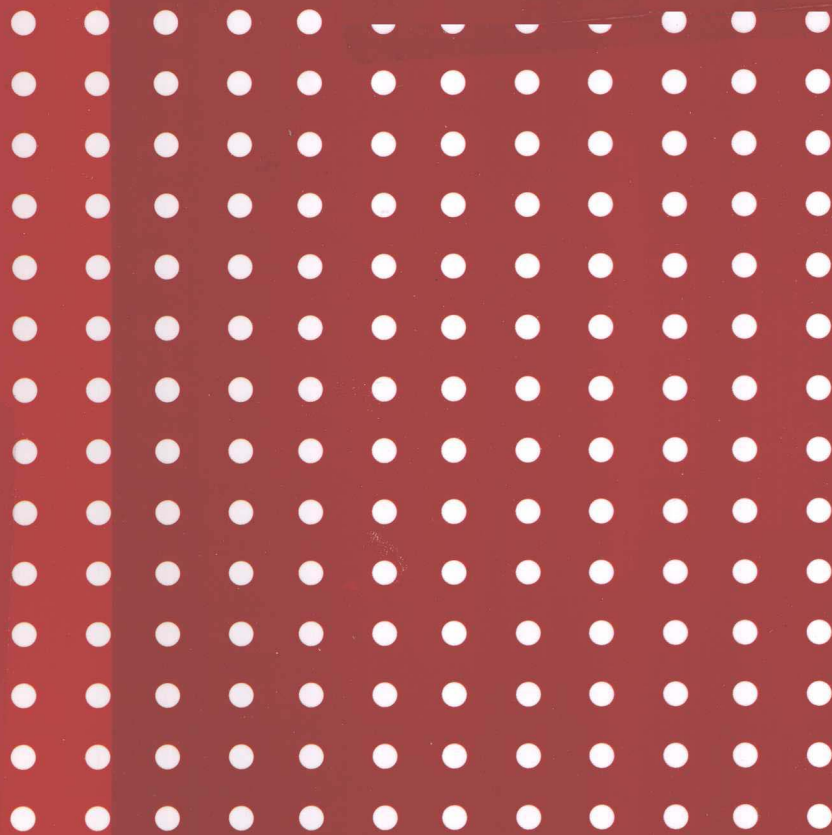
21世纪高等学校电子信息工程规划教材

可下载教学资料
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

数字信号处理原理和算法实现

——学习指导与习题解答

俞玉莲 胡之惠 李莉 编著



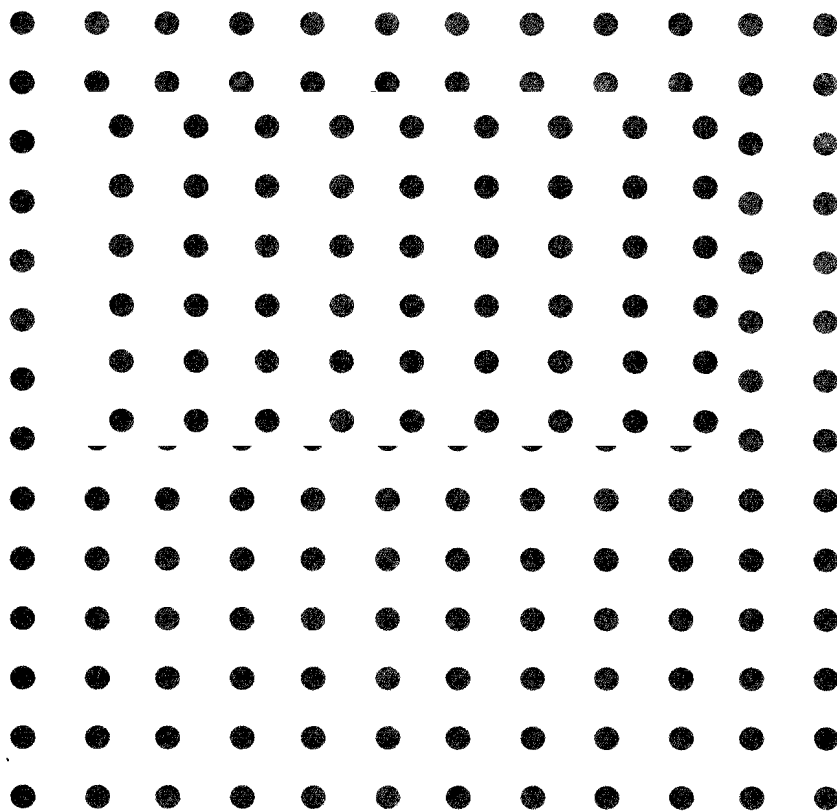
清华大学出版社



21世纪高等学校电子信息工程规划教材

数字信号处理原理和算法实现 ——学习指导与习题解答

俞玉莲 胡之惠 李莉 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是《数字信号处理原理和算法实现》(李莉主编,清华大学出版社,2010年出版)一书的配套辅导材料,与主教材各章对应,又相对独立,除绪论和第8章外,其余各章分“重点内容”和“习题解答”两部分。“重点内容”部分简要归纳了主教材各章的主要内容、应掌握的基本概念和算法,“习题解答”部分给出了主教材习题的详细参考解答,对进一步理解和巩固所学理论、提高分析解决问题的能力有很大帮助。

本书既可作为通信、电子信息、计算机应用技术、自动控制等相关专业本科生教学用书,也可作为从事数字信号处理工作的工程技术人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理原理和算法实现——学习指导与习题解答/俞玉莲,胡之惠,李莉编著.
—北京:清华大学出版社,2010.8

(21世纪高等学校电子信息工程规划教材)

ISBN 978-7-302-22372-6

I. ①数… II. ①俞… ②胡… ③李… III. ①数字信号—信号处理—高等学校—教学参考资料 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 060299 号

责任编辑:魏江江 徐跃进

责任校对:梁毅

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京市人民文学印刷厂

装 订 者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:11 字 数:261千字

版 次:2010年8月第1版 印 次:2010年8月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:19.50元

产品编号:035325-01

出版说明

随着我国高等教育规模的扩大和产业结构调整的进一步完善,社会对高层次应用型人才的需求将更加迫切。各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,合理调整和配置教育资源,在改革和改造传统学科专业的基础上,加强工程型和应用型学科专业建设,积极设置主要面向地方支柱产业、高新技术产业、服务业的工程型和应用型学科专业,积极为地方经济建设输送各类应用型人才。各高校加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的力度,从而实现传统学科专业向工程型和应用型学科专业的发展与转变。在发挥传统学科专业师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势的同时,不断更新其教学内容、改革课程体系,使工程型和应用型学科专业教育与经济建设相适应。

为了配合高校工程型和应用型学科专业的建设和发展,急需出版一批内容新、体系新、方法新、手段新的高水平电子信息类专业课程教材。目前,工程型和应用型学科专业电子信息类专业课程教材的建设工作仍滞后于教学改革的实践,如现有的电子信息类专业教材中有不少内容陈旧(依然用传统专业电子信息教材代替工程型和应用型学科专业教材),重理论、轻实践,不能满足新的教学计划、课程设置的需要;一些课程的教材可供选择的品种太少;一些基础课的教材虽然品种较多,但低水平重复严重;有些教材内容庞杂,书越编越厚;专业课教材、教学辅助教材及教学参考书短缺,等等,都不利于学生能力的提高和素质的培养。为此,在教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议下,清华大学出版社组织出版本系列教材,以满足工程型和应用型电子信息类专业课程教学的需要。本系列教材在规划过程中体现了如下一些基本原则和特点:

(1) 系列教材主要是电子信息学科基础课程教材,面向工程技术应用培养。本系列教材在内容上坚持基本理论适度,反映基本理论和原理的综合应用,强调工程实践和应用环节。电子信息学科历经了一个多世纪的发展,已经形成了一个完整、科学的理论体系,这些理论是这一领域技术发展的强大源泉,基于理论的技术创新、开发与应用显得更为重要。

(2) 系列教材体现了电子信息学科使用新的分析方法和手段解决工程实际问题。利用计算机强大功能和仿真设计软件,使电子信息领域中大量复杂的理论计算、变换分析等变得快速简单。教材充分体现了利用计算机解决理论分析与解算实际工程电路的途径与方法。

(3) 系列教材体现了新技术、新器件的开发应用实践。电子信息产业中仪器、设备、产品都已使用高集成化的模块,且不仅仅由硬件来实现,而是大量使用软件和硬件相结合的方法,使产品性价比很高,如何使学生掌握这些先进的技术、创造性地开发应用新技术是本系列教材的一个重要特点。

(4) 以学生的知识、能力、素质协调发展为宗旨,系列教材编写内容充分注意了学生创新能力和实践能力的培养,加强了实验实践环节,各门课程均配有独立的实验课程和课程

设计。

(5) 21 世纪是信息时代,学生获取知识可以是多种媒体形式和多种渠道的,而不再局限于课堂上,因而传授知识不再以教师为中心,以教材为唯一依托,而应该多为学生提供各类学习资料(如网络教材,CAI 课件,学习指导书等)。应创造一种新的学习环境(如讨论,自学,设计制作竞赛等),让学生成为学习主体。该系列教材以计算机、网络和实验室为载体,配有多种辅助学习资料,可以提高学生学习兴趣。

繁荣教材出版事业,提高教材质量的关键是教师。建立一支高水平的以老带新的教材编写队伍才能保证教材的编写质量和建设力度,希望有志于教材建设的教师能够加入到我们的编写队伍中来。

21 世纪高等学校电子信息工程规划教材编委会

联系人: 魏江江 weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前 言

随着信息技术的发展,数字信号处理基础知识已成为通信、电子信息、计算机应用技术等相关专业本科学生必须学习和掌握的专业基础知识。许多院校都在相关学科、专业开设了数字信号处理类课程。本书是《数字信号处理原理和算法实现》(李莉主编,清华大学出版社,2010年出版)的配套辅导材料,以方便学习这类课程、参考这类教材的各类人员更好地掌握教材基础知识并学习用基础理论分析问题的方法和基本运算技能。本书也可作为教师授课时的教学参考。

本书各章与主教材各章一一对应。本书除绪论和第8章外,其余各章分“重点内容”和“习题解答”两部分。其中“重点内容”部分的公式、图、表等以本书的章节为序编号,使本书既与主教材有密切关系,又具有相对的独立性;“习题解答”部分给出了主教材中所有习题的参考解答,许多习题是通过 MATLAB 软件编程实现计算和绘图,希望起到抛砖引玉的作用,提倡读者去探索其他多种解法。

本书由李莉负责统稿、审阅,其中“重点内容”部分由胡之惠编写;“习题解答”部分由俞玉莲编写。

由于编者水平有限,书中难免有错漏和不妥之处,敬请使用教材和本书的老师和读者不吝指正。

编 者

2010年2月于上海

目 录

绪论	1
0.1 重点内容	1
0.1.1 概述	1
0.1.2 数字信号处理的特点	1
0.1.3 数字信号处理学科的内容	1
0.1.4 数字信号处理的实现	2
0.1.5 数字信号处理系统的应用领域	2
第 1 章 离散时间信号和系统	3
1.1 重点内容	3
1.1.1 概述	3
1.1.2 时域离散信号	3
1.1.3 离散时间系统	6
1.1.4 线性常系数差分方程	8
1.1.5 模拟信号数字处理方法	8
1.2 习题解答	10
第 2 章 离散时间信号和系统的变换域分析	19
2.1 重点内容	19
2.1.1 概述	19
2.1.2 序列的离散时间傅里叶变换	19
2.1.3 周期序列的 DFS、DTFT	20
2.1.4 DTFT 和 CFT 之间的关系	21
2.1.5 Z 变换	21
2.1.6 用 ZT 分析系统的因果性、稳定性和频响特性	25
2.2 习题解答	26
第 3 章 离散傅里叶变换	36
3.1 重点内容	36
3.1.1 引言	36
3.1.2 DFT 的定义	37

3.1.3	DFT 的性质	38
3.1.4	频域取样	41
3.1.5	用 DFT 对连续时间信号进行谱分析	41
3.1.6	用 DFT 对离散时间信号进行谱分析	42
3.1.7	DFT 应用中的问题与参数选择	43
3.2	习题解答	44
第 4 章	快速傅里叶变换	59
4.1	重点内容	59
4.1.1	概述	59
4.1.2	基-2 FFT	59
4.1.3	矩阵形式的 FFT	62
4.1.4	FFT 应用于长序列卷积	64
4.1.5	Chirp-Z 变换	67
4.1.6	离散哈特莱变换	68
4.2	习题解答	70
第 5 章	数字滤波器的结构	73
5.1	重点内容	73
5.1.1	概述	73
5.1.2	信号流图表示网络结构	74
5.1.3	IIR 滤波器的基本网络结构	75
5.1.4	FIR 滤波器的基本网络结构	78
5.1.5	格型结构	83
5.2	习题解答	84
第 6 章	IIR 数字滤波器设计	96
6.1	重点内容	96
6.1.1	基本概念	96
6.1.2	模拟滤波器的设计	98
6.1.3	IIR LPF 设计: 脉冲响应不变法	104
6.1.4	IIR LPF 设计: 双线性变换法	106
6.1.5	IIR HPF、BPF、BSF 设计	107
6.1.6	IIR 滤波器直接设计法	109
6.2	习题解答	110
第 7 章	FIR 滤波器设计	125
7.1	重点内容	125
7.1.1	FIR 滤波器的线性相位条件和特点	125

7.1.2	窗函数法设计 FIR 滤波器	127
7.1.3	频率取样法	131
7.1.4	优化技术设计	132
7.1.5	IIR 和 FIR 滤波器的比较	134
7.2	习题解答	135
第 8 章	数字信号处理器应用实现	153
8.1	重点内容	153
8.1.1	引言	153
8.1.2	DSP 芯片	153
8.1.3	DSP 系统设计	158
8.1.4	DSP 实现与应用实例	159
参考文献	162

绪 论

0.1 重点内容

数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)是把信号用数字或符号表示成序列,通过计算机或通用(专用)信号处理设备,用数值计算方法进行各种处理,以达到提取有用信息便于应用的目的。

对于 DSP,可狭义理解为 Digital Signal Processor 数字信号处理器;广义理解为 Digital Signal Processing,译为数字信号处理技术。在此讨论的 DSP 的概念是指广义的理解。

0.1.1 概述

信号(signal)是一种物理体现,或是传递信息的函数。而信息是信号的具体内容。

数字信号:时间和幅度都经过“量化”的信号。

系统:反映或表示信号处理输入输出(I/O)关系的器件或运算的物理设备。

数字信号处理系统的基本组成参见图 0-1,系统首先把模拟信号变换成数字信号,之后用数字技术进行处理,然后再还原成模拟信号。



图 0-1 数字信号处理系统的基本组成

0.1.2 数字信号处理的特点

- (1) 灵活性强。
- (2) 高精度型和稳定型。
- (3) 便于大规模集成。
- (4) 数字信号易于存储、传输、处理。

0.1.3 数字信号处理学科的内容

- 信号的采集:包括 A/D 与 D/A 技术、抽样定理、量化噪声理论等。

- 离散信号分析：离散时间信号时域及频域分析、离散傅里叶变换(DFT)理论。
- 离散系统分析。
- 信号处理的快速算法：谱分析与快速傅里叶变换(FFT)、快速卷积与相关算法。
- 滤波技术。
- 信号的估计：各种估值理论、相关函数与功率谱估计。
- 信号的压缩：包括语音信号、图像信号的压缩。
- 信号的建模：包括 AR、MA、ARMA 等各种模型。
- 其他特殊算法：同态处理、抽取与内插、信号重建等。
- 数字信号处理的实现。
- 数字信号处理的应用。

0.1.4 数字信号处理的实现

软件实现方法：按原理和方法编程序在通用计算机上实现。

硬件实现方法：按要求和算法，设计硬件结构图，用乘法器、加法器、延时器，辅以控制器、存储器、I/O 接口实现。

数字信号处理的实现分别有以下方法：

- 采用大、中型计算机和微机：工作站和微机上各厂家的数字信号软件，如各种图像压缩和解压软件。
- 用单片机：可根据不同环境配不同单片机，能达到实时控制，但数据运算量不能太大。
- 利用通用 DSP 芯片：DSP 芯片较之单片机有着更为突出的优点，如内部带乘法器、累加器，采用流水线工作方式及并行结构，多总线速度快。配有适于信号处理的指令(如 FFT 指令)等。美国德州仪器公司 Texas Instrument(IT)、Analog Devices、Lucent、Motorola、AT&T 等公司都有生产。
- 利用特殊用途的 DSP 芯片：市场上推出专门用于 FFT、FIR 滤波器、卷积、相关等专用数字芯片。其软件算法已在芯片内部用硬件电路实现，使用者只需给出输入数据，可在输出端直接得到数据。

0.1.5 数字信号处理系统的应用领域

数字信号处理大致可分为信号分析和信号滤波。

信号分析涉及信号特性的测量。它通常是一个频域的运算，主要应用于谱(频率和/或相位)分析、语音分析和识别、目标检测等。

信号滤波就是在形形色色的信号中提取所需要的信号，抑制不需要的信号或干扰信号。例如消除信息在传输过程中由于信道不理想所产生的失真；滤除不需要的背景噪声；去除干扰；频带分割，信号谱的成形。

数字信号处理广泛地应用于数字通信、雷达、遥感、声纳、语音合成、图像处理、测量与控制、高清晰度电视、多媒体物理学、生物医学、机器人、地球物理、地质勘探、航空航天等领域，并有效地推动了众多工程技术领域的技术进步和学科发展。

第 1 章 离散时间信号和系统

1.1 重点内容

1.1.1 概述

信号通常是一个自变量或几个自变量的函数。

- 一维信号：仅有一个自变量。
- 多维信号：有两个以上的自变量。
- 离散时间信号：对时域连续信号抽样得到。
- 数字信号：幅度量化了的时域离散信号。例如，数字序列 $x(n)$ 。

1.1.2 时域离散信号

1. 模拟信号的采样、序列

对模拟信号 $x_a(t)$ ，在时刻 $t = nT$ 进行采样，采样间隔 T ，采样输出就是时域离散信号：

$$x_a(t) \equiv x_a(nT) = x_a(t) |_{t=nT}, \quad -\infty < n < \infty \quad (1.1.1)$$

$x_a(nT)$ 是一个有序的数字序列： $\dots, x_a(-T), x_a(0), x_a(T), \dots$ ，此时 nT 代表的是前后顺序。为简化，可写成 $x(n)$ 。

特别提示： n 是采样信号的顺序号，是整数，无量纲。

序列的值等于模拟信号的抽样值，可以有量纲。

2. 常用典型序列

1) 单位采样序列

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

波形如图 1-1 所示。

2) 单位阶跃序列

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

波形如图 1-2 所示。

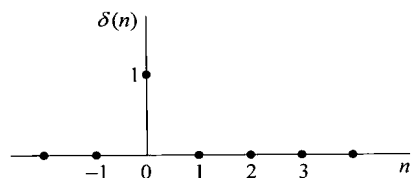


图 1-1 单位采样序列

3) 矩形序列

$$R_N(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & n < 0, n \geq N \end{cases} \quad (1.1.4)$$

序列 $R_4(n)$ 波形如图 1-3 所示。

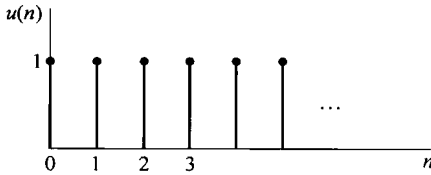


图 1-2 单位阶跃序列

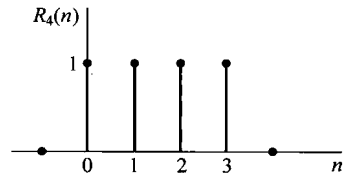


图 1-3 矩形序列

4) 实指数序列

$$x(n) = a^n u(n), \quad a \text{ 为实数} \quad (1.1.5)$$

波形如图 1-4 所示。

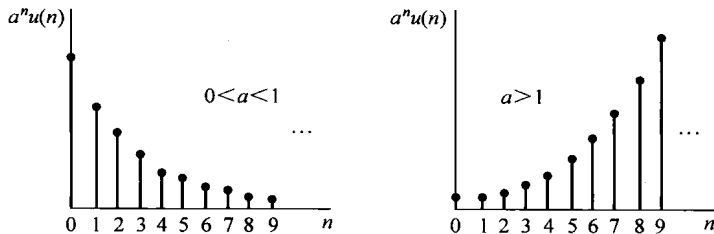


图 1-4 实指数序列

5) 正弦序列

$$x(n) = \sin(n\omega_0) \quad (1.1.6)$$

序列 $x(n) = \sin(\pi n/4)$ 的波形如图 1-5 所示。

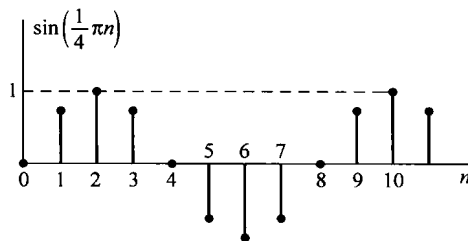


图 1-5 正弦序列

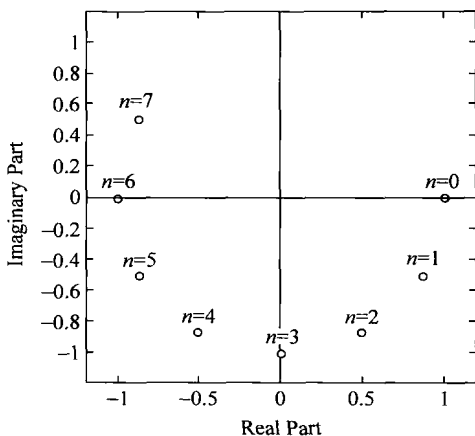
6) 复指数序列

$$x(n) = e^{(\sigma + j\omega_0)n} \quad (1.1.7)$$

式中 ω_0 为数字域频率, 因 n 为整数, 当 $\sigma = 0$ 时,

$$e^{j(\omega_0 + 2\pi M)n} = e^{j\omega_0 n}$$

复指数序列 $x(n) = e^{-j\pi n/6}$ 前 8 个数据点在复平面上的位置如图 1-6 所示, 可理解为序列值的极坐标表示。

图 1-6 $x(n) = e^{-j\pi n/6}$ 复指数序列(在复平面上的前 8 个值)

7) 周期序列

$$x(n) = x(n + N), \quad -\infty < n < \infty \quad (1.1.8)$$

数字序列中,正弦序列并不都是周期序列。

(1) 正弦序列的周期性:

$$\sin[\omega_0(n + N)] = \sin[\omega_0(n + \omega_0 N)]$$

当 $\omega_0 N = 2\pi k$ 时,该序列是周期性的,周期是 $N = 2\pi k / \omega_0$, N, k 均为整数。

当整数 N 不存在时,该正弦序列是非周期的。

(2) 复指数序列:

$$e^{(\sigma + j\omega_0)n} = e^{\sigma n} (\cos \omega_0 n + j \sin \omega_0 n)$$

$\sigma = 0$ 时,周期性与正弦序列的情况相同。

特别提示:上述两种序列中,不管序列是否有周期性,参数 ω_0 叫数字频率。一般地,取 $0 \leq \omega_0 \leq 2\pi$ 。

8) 任意序列

$$x(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m) \delta(n - m) \quad (1.1.9)$$

加权系数是序列各点的值 $x(m)$ 。其中

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

3. 序列的运算

1) 乘法、加减法

序列之间的乘法、加减法,是指同一序号的序列值对应相乘或加减所得的新序列。

2) 移位、翻转、尺度变换

移位:

$$y(n) = x(n - n_0), \quad n_0 \text{ 为整数} \quad (1.1.10a)$$

$n_0 > 0$, 序列 $x(n)$ 右移 n_0 个抽样间隔(延时);

$n_0 < 0$, 序列 $x(n)$ 左移 n_0 个抽样间隔(超前)。

翻转:

$$y(n) = x(-n) \quad (1.1.10b)$$

以纵轴为对称线, 左右翻转。

尺度变换:

$$y(n) = x(mn) \quad (1.1.10c)$$

$y(n)$ 是 $x(n)$ 每隔 m 点取一点所得, 相当于时间轴压缩了 m 倍。

3) 累加

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^n x(k) \quad (1.1.11)$$

$y(n_0)$ 等于在这一个 n_0 上的 $x(n_0)$ 值与 n_0 以前所有 n 上的 $x(n)$ 之和。

4) 序列的能量 ϵ

$$\epsilon = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |x(k)|^2 \quad (1.1.12)$$

序列各抽样值的平方和。

1.1.3 离散时间系统

1. 线性

当 $y_1(n) = T[x_1(n)]$, $y_2(n) = T[x_2(n)]$, 若 $T[ax_1(n) + bx_2(n)] = aT[x_1(n)] + bT[x_2(n)] = ay_1(n) + by_2(n)$ 成立, 则该系统是线性的。

2. 时不变性

当 $T[x_1(n)] = y_1(n)$, 若 $T[x_1(n-k)] = y_1(n-k)$ 成立, 则该系统是时不变的。

特别提示: 输入序列先移位后变换的结果和先变换再移位的结果是一样的。

3. 系统输入输出关系

线性时不变系统的输出 $y(n)$, 等于输入序列 $x(n)$ 和该系统的单位抽样响应 $h(n)$ 的卷积和。

$$y(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)h(n-m) = x(n) * h(n) \quad (1.1.13)$$

4. 卷积和

1) 计算方法

序列 $x(n)$ 与 $h(n)$ 的卷积和 $y(n)$ 是指两个序列的离散卷积,

$$y(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)h(n-m) = x(n) * h(n)$$

卷积和的基本运算是加、乘、延时,具体步骤如下:

- (1) 画出 $x(m)$ 、 $h(m)$ 、 $h(m)$ 相对 $m=0$ 的垂直轴反摺,得 $h(-m)$;
- (2) 移位 n ,得 $h(n-m)$, $n>0$ 序列右移, $n<0$ 序列左移;
- (3) $x(m)$ 、 $h(n-m)$ 序列对应 m 点值分别相乘;
- (4) 各点结果相加得到 $y(n)$,即序列的线性卷积。

2) 基本规律

- (1) 交换律:

$$h(n) * x(n) = x(n) * h(n) \quad (1.1.14)$$

- (2) 结合律:

$$[x(n) * h_1(n)] * h_2(n) = [x(n) * h_2(n)] * h_1(n) = x(n) * [h_1(n) * h_2(n)]$$

级联(串联)系统的变换结果与各级联子系统的次序无关。

总的单位抽样响应=各子系统单位抽样响应的线性卷积。

- (3) 分配律:

$$y(n) = x(n) * [h_1(n) + h_2(n)] = x(n) * h_1(n) + x(n) * h_2(n)$$

并联系统总的单位抽样响应=各并联子系统单位抽样响应的和。

特别提示:

- 子系统及其串并联系统单位抽样响应间的关系,仅对线性时不变系统成立。
- 任意序列可用单位抽样序列的移位加权和表示,序列与单位抽样序列的卷积为序列本身。

$$x(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)\delta(n-m) = x(n) * \delta(n) \quad (1.1.15)$$

$$x(n-n_0) = x(n) * \delta(n-n_0) \quad (1.1.16)$$

5. 系统的因果性和稳定性

1) 因果性

加入输入序列后才有输出序列。LTI 系统具有因果性的充要条件:

$$h(n) = 0, \quad n < 0$$

2) 稳定性

若系统输入是有界的,则系统输出也是有界的,称系统是稳定的。LTI 系统稳定的充要条件:单位抽样响应绝对可和。

$$S = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |h(k)| < \infty \quad (1.1.17)$$

3) 稳定的因果系统

稳定因果系统的 $h(n)$ 既是单边的, 又是有界的:

$$h(k) = 0, \quad k < 0 \quad (1.1.18)$$

且 $S = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |h(k)| < \infty$ 。

1.1.4 线性常系数差分方程

1. 线性常系数差分方程

1) 定义

LTI 系统的输出 $y(n)$ 可由当时的输入 $x(n)$ 和 M 个过去的输入, N 个过去的输出计算:

$$y(n) = \sum_{r=0}^M \frac{b_r}{a_0} x(n-r) - \sum_{k=1}^N \frac{a_k}{a_0} y(n-k) \quad (1.1.19a)$$

或写成

$$\sum_{k=0}^N a_k y(n-k) = \sum_{r=0}^M b_r x(n-r) \quad (1.1.19b)$$

2) 方程(系统)的阶(次)

差分方程中输出的最高和最低序列号的差值。

3) 一些相关概念

(1) 常系数: 差分方程中 $y(n-k)$ 、 $x(n-r)$ 项的系数都是常数。

(2) 线性: 差分方程中 $y(n-k)$ 、 $x(n-r)$ 项都是一次幂, 且无互相乘的项。

(3) 齐次: 将非 $y(n-k)$ 、 $x(n-r)$ 项都移到方程左边, 右边 $= 0$ 。

(4) 解的唯一性: 差分方程只有给定输入 $x(n)$ 和附加条件(初始条件、边界条件等), 解 $y(n)$ 才是唯一的。

特别提示: 因果系统的初始条件, $n < n_0$ 时, 如果 $x(n) = 0$, 则 $n < n_0$ 时, $y(n) = 0$ 。

2. 线性常系数差分方程的求解

(1) 经典法。分别写出差分方程的齐次解和特解形式, 用边界条件求待定系数。

(2) 时域离散法。

- 递推法: 写出递推形式的差分方程, 求数值解(适合计算机求解)。

- 卷积和法: 求零状态解 $h(n)$, $y(n) = h(n) * x(n)$ 。

(3) 变换域法。把差分方程经 ZT, 在 Z 域求解。

1.1.5 模拟信号数字处理方法

1. 模拟信号数字处理方法

1) 抽样

抽样输出信号 $x_p(t)$, 由输入的连续信号 $x_a(t)$ 与幅度为 1, 脉宽为 τ , 周期为 T 的抽样脉冲序列 $p_\tau(t)$ 相乘得到。

$$x_p(t) = x_a(t) p_\tau(t) \quad (1.1.20)$$

2) 理想抽样

抽样脉冲取脉宽 $\tau \rightarrow 0$, 强度为 1 的冲激函数序列 $p_\delta(t)$, 抽样角频率 $\Omega_s = 2\pi f_s = 2\pi/T$ 。

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