

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

信号处理与软计算

*Signal Processing and
Soften-Computing*

史习智 等编著

高等教育出版社

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

信号处理与软计算

Signal Processing and
Soften-Computing

史习智 等编著

高等教育出版社

内容提要

本书按经典信号处理、现代信号处理和智能信号处理三部分组织全书内容。全书共 15 章,包括导论、信号系统和线性变换、离散傅里叶变换和快速算法、数字滤波器、MATLAB 语言和信号处理、相关分析和谱分析、现代谱估计、非平稳信号分析、非线性信号分析、混沌时间序列分析、神经网络和信号处理、模糊逻辑和信号处理、进化算法和最优化、数字信号处理器(DSP)和工程应用实例。

本书在选材与叙述上力求简明扼要,以尽可能少的篇幅较为系统地介绍了以上主题的基本概念、理论、算法和实现。它们也反映了近十年来信号处理领域的重要议题和发展趋势。

本书可作为机械、动力、海洋工程、宇航工程、生物医学工程、化工、力学、仪器工程等广泛专业的“信号处理”课的研究生教材,也可作为工程技术人员的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

信号处理与软计算/史习智等编著. —北京:高等教育出版社,2003.9 (2004 重印)

ISBN 7-04-013018-1

I. 信... II. 史... III. ①信号处理—研究生—教材
②信号处理—计算方法—研究生—教材

IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 078106 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷	潮河印业有限公司		
开 本	787×960 1/16	版 次	2003 年 10 月第 1 版
印 张	38	印 次	2004 年 12 月第 2 次印刷
字 数	640 000	定 价	52.00 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:13018-00

前 言

1980年,在改革开放的浪潮中,我所在的上海交通大学振动、冲击、噪声实验室率先为非电子信息专业背景的研究生开设了“工程信号处理”课,主要介绍经典信号处理理论及工程应用,为研究生的学习与研究开阔了视野。之后,在学科交叉的学术思想指导下,又先后开设了与信息技术相关的“线性系统分析”、“动态信号模式识别”和“故障诊断与远程技术”等课程。实践表明,对于大多数相关专业研究生来讲,这类课程不仅是必要的,而且,随着信息技术的快速发展,他(她)们都希望能以较少的学时获得更多的信号处理新知识,并将其用于各自的研究领域。所以,我们一直在补充和修改已有的教材,以期为广大具有机械工程、动力工程、宇航工程、仪器工程和海洋工程等背景的研究生以及科技人员提供一份内容较广泛而简练的新教材。教材内容的撰写定位于包括经典、现代和智能信号处理三部分的理论和方法,并应反映该领域有代表性的成果和进展。除了个人存书外,所列出的新近著作都能在国内的图书馆查阅到,有兴趣的读者可进一步查阅。

本书第10章1~7节由景志宏博士撰写,第8章1~4节的初稿由杨毓英博士提供,而工程应用实例则取材于近年的部分博士生论文。陈亮教授、张洪渊博士、杜海平博士、张亮博士、贾鹏博士以及博士生程国华、赵谊虹、丛丰裕和毛泰祥等为发展算法、验证部分程序和文档的输入做了大量工作,对此表示感谢。同时,要感谢教育部全国学位与研究生教育发展中心、上海市学位办公室、上海交通大学研究生院和振动冲击噪声国家重点实验室对本教材的关心和支持,使得本教材能够整理出版。我们还要感谢国家自然科学基金委员会对本书涉及的相关研究的支持,第15章的主要内容就取材于信息学部基金项目研究论文。最后,感谢袁保宗教授接受了担任本书主审的邀请,使本书作者减少了一份为学识疏浅而导致错误的担心。

史习智

振动冲击噪声国家重点实验室

上海交通大学

2003.1

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 前言	1
1.2 数字信号处理的进展与挑战	2
1.3 对学习本课程的建议	3
第 2 章 信号、系统与线性变换	5
2.1 信号与序列	5
2.2 线性非移变系统	8
2.3 连续信号的离散化与系统采样	11
2.4 傅里叶变换的一些性质	15
2.5 z 变换	19
2.6 逆 z 变换	23
2.7 z 变换的基本性质	27
2.8 拉普拉斯变换、傅里叶变换与 z 变换的关系	30
* 2.9 离散余弦变换	32
2.10 Hilbert 变换	40
习题	43
第 3 章 离散傅里叶变换与快速算法	45
3.1 前言	45
3.2 离散傅里叶级数	45
3.3 离散傅里叶变换	48
3.4 快速傅里叶变换(FFT)	56
3.5 快速算法中的其它考虑	63
3.6 快速卷积	68
习题	71
第 4 章 数字滤波器	72
4.1 前言	72
4.2 数字网络表示与基本结构	74
4.3 数字滤波器原理	77
4.4 模拟滤波器近似	81
4.5 无限冲激响应(IIR)数字滤波器	94
4.6 有限冲激响应(FIR)数字滤波器	98
* 4.7 自适应滤波器	113

习题	125
第 5 章 MATLAB 语言与信号处理	126
5.1 前言	126
5.2 系统的基本命令函数	126
5.3 信号分析	127
5.4 滤波器设计	139
习题	156
第 6 章 相关分析与谱分析	157
6.1 前言	157
6.2 相关函数	159
6.3 功率谱密度函数	161
6.4 谱分析	164
6.5 泄漏和加窗	166
6.6 频响函数和相干分析	168
6.7 高分辨率谱分析	171
6.8 倒谱	176
习题	179
第 7 章 现代谱估计	180
7.1 前言	180
7.2 估计理论的基本原理	180
7.3 参数建模与参数谱估计	188
7.4 自回归谱估计	193
7.5 AR 建模实例——主元自回归谱分析	202
习题	206
第 8 章 非平稳信号处理	208
8.1 前言	208
8.2 短时傅里叶变换(STFT)	216
8.3 Wigner 分布	218
8.4 小波变换	225
8.5 循环平稳信号处理	247
习题	257
第 9 章 非线性信号分析	258
9.1 前言	258
9.2 基本定义	259
9.3 高阶谱估计方法	272
9.4 高阶倒谱	278
9.5 信号恢复的非参数方法	287
9.6 基于高阶谱的时频分布	294

第 10 章	混沌时间序列分析	300
10.1	前言	300
10.2	时间序列的非线性检验	302
10.3	相空间方法	306
10.4	混沌动力学系统的 Lyapunov 指数	309
10.5	吸引子与分形维	312
10.6	主分量分析	318
10.7	混沌数据与噪声	320
10.8	随机共振	325
	习题	330
第 11 章	神经网络与信号处理	331
11.1	前言	331
11.2	学习过程	336
11.3	感知器和多层感知器	344
11.4	径向基函数网络	357
11.5	递归网络	367
11.6	神经网络用于信号处理	375
	习题	388
第 12 章	模糊逻辑与信号处理	390
12.1	前言	390
12.2	模糊集合	390
12.3	模糊关系、模糊映射与变换	396
12.4	模糊逻辑与模糊语言	403
12.5	去模糊化	417
12.6	模糊信号除噪	421
12.7	模糊系统和神经网络	425
12.8	应用例——一种复杂模糊系统生成方法	435
	习题	440
第 13 章	进化算法与最优化	442
13.1	前言	442
13.2	优化问题	444
* 13.3	遗传算法	447
* 13.4	进化策略	452
* 13.5	进化规划	454
13.6	应用例	457
第 14 章	数字信号处理器 (DSP)	466
14.1	前言	466
14.2	DSP 的基本结构	467

14.3 指令系统	478
14.4 汇编语言程序	485
14.5 输入/输出	487
14.6 信号处理应用实例	497
习题	503
第 15 章 工程应用实例	505
15.1 目标识别	505
15.2 结构缺陷的融合识别研究	513
15.3 盲信号分离	520
15.4 内燃机汽缸压力波形的恢复	527
15.5 时频分布与故障诊断	531
15.6 心电图 ECG 与室性早搏 PVC(Premature Ventricular Contraction) 诊断	539
附录 1 软件设计实例	545
1.1 凯泽滤波器设计实例	545
1.2 PCA-AR 谱计算程序	560
附录 2 MATLAB 部分命令名称	565
附录 3 TMS320C30 指令系统	572
索引	580
参考文献	584

第 1 章 绪 论

1.1 前 言

人们已经进入了一个数字信息年代。打电话、发送传真或使用信用卡使人们成为信息的发送者,而在 ATM 机上查询账单、听 CD 唱盘或使用各种数字设备使人们成为数字信息的用户。因此,人们会关心数字信息的建立、编码、存储、传输、处理和使用。什么是信息? 简单地说,信息是一个系统为完成某项任务所需要的量。既然定义为一个量,它就是可以测量的并可以以某种形式表示。例如,要给朋友打一个电话,作为系统的人就需要电话号码,这就是信息。

自然界中,一种重要的信息表现形式是连续的时间信号或图像。电压、电流和电磁是电信号,语音和声波是声信号,而压力、力、加速度、速度、位移和力矩是机械信号。借助于传感器可以将某类信号转换为其他类信号以达到进一步处理与控制的目的。

1948 年 C. E. Shannon 以题为“通信的数学理论”(A mathematical theory of communication) 的论文奠定了经典信息论的基础。从数学的观点来看,信息论包括信息源的数学结构、作为信息量的熵的理论、信道理论和编码理论。概率论和代数方法是信息论发展的主要数学工具。Shannon 和之后的 Kolmogorov 就系统的不确定性或信息所定义的 Shannon 熵和 Kolmogorov-Sinai 熵成为信息技术中最重要的一个度量。

第二次世界大战以后,随着数字计算机和微电子学的飞速发展,科学技术革命也反映在从经典信息论到现代信息理论的转变。从模拟量到数字量的转换加速了这一转变过程,信息技术在人们面前展示了一个广阔的、内容丰富的研究和应用领域。

现代信息技术中最活跃的领域之一是数字信息处理技术,它包括数字信号处理和数字图像处理。数字信号处理主要处理一维时间序列,而数字图像处理则着重于二维时间序列。当然,二者之间有许多共同的理论基础和处理方法,也有各自特定的技术。1965 年 Cooley 和 Tukey 提出的快速傅里叶变换算法(Fast Fourier Transform, FFT)突破了基于傅里叶积分的数字处理所受到的实时能力的制约,大大地推进了数字处理技术

在各个领域的应用。从雷达到声纳,从语音合成到数字音乐,从电站的状态监测系统到飞行器的故障诊断,从脑电图(EEG)机到核磁共振装置都反映了数字处理技术的强大功能和重要应用意义。即使在非工程技术领域中,例如金融活动,人们也在尝试使用数字信号处理方法从数据库的海量数据中挖掘和发现所希望获得的知识。可以说,数字信号处理影响了通信、语言处理、多媒体、运输、声学、生物医学等一系列领域,从而深入到人们的现代生活之中。

1.2 数字信号处理的进展与挑战

本节并非全面论述数字信号处理的新进展,而是针对本书的内容及相关技术的研究近况作一简要的概括,为读者提供一个学习和研究的参考。

1. 先进处理算法

它以非平稳和非线性信号处理为研究对象,包括非线性时频分布、小波变换、高阶统计量、混沌时间序列和盲处理等内容。与传统的数字信号处理内容相比较,这些处理算法在数学深度上和处理能力上都有了质的变化。

在20世纪80年代初由Morlet等在地震数据分析中引入的小波变换受到人们的普遍关注。连续小波和离散小波所具有的突出的信号紧致性质和有效的计算能力,使其可用于诸多技术领域,包括奇异值检测、信号或图像压缩、去除噪声和模式识别的特征提取等。由Coifman和Meyer提出的小波包是正交小波的广义化,它的优点在于可按照实际信号自适应地选择最好的小波基,从而提高时频分辨率。而小波变换所具有的多层次分解计算性质为并行计算提供了实现的前提。

与线性的有监督自适应滤波器相比,非线性的无监督自适应滤波器已显示了更强的处理能力,它的重要应用是信号源盲分离和盲解卷积(或盲辨识)。随着对信号源盲分离问题的可解性条件及分离原理的进一步理解,出现了改进的新算法。其中相当一部分分离算法是利用信号高阶统计量的代数结构。由高阶统计量对信号概率密度函数的近似所获得的对照函数的估计能给出未知的混合矩阵以实现盲分离。而将信号源盲分离算法推广到多输入多输出线性系统的盲解卷积问题将开辟更广泛的工程应用领域。

2. 多媒体信号处理

多媒体可定义为感知过程,通过对应于各个感知器组成内容的释放

来影响人的感觉过程。虽然限于技术的原因,当今的多媒体还只限于视觉和听觉效果,但是,将音频和视频环境引入常规的基于文本的信息服务已显示出十分吸引人的效果。将音频和视频信息输入计算机和数字通信网络的首要问题是音频和视频信息的数字化。但是,音频和视频产生的信息文件远远大于基于文本的文件。1 s 的立体声信息量约为 200 KB,1 s 的电视信息量约为 20 MB,而 1 s 的高清晰度电视信息量约为 240 MB,5 s 的 Hi-Fi 音频信号信息量相当于 330 页的字符表示信息量。所以,多媒体信号处理作为一项应用,其关键环节是如何最优地表示、存储和释放多媒体信息。信息压缩、大容量存储和高速网络技术在多媒体世界起了重要的作用,而信号处理技术是它的核心。多媒体信号处理涉及的课题包括:时间-频率和时间-尺度分析,寻找更有效的信号压缩和除噪方法;离散有限框架和信号重构,处理数据丢失问题;移动多媒体(包括语言、音乐、图像等模拟源和文本、测量数据等数字源)的鲁棒通信;语音拨号和面向任务的对话系统;宽带音频编码中的听觉掩蔽和感知编码等。

3. 智能信号处理

按照通常的定义,人工智能是一个让计算机模仿人的行为的技术领域。人工智能的目标是理解人的智能并发展智能系统。因为学习是人的最核心的智能行为,所以机器学习成为智能的重要组成部分。机器学习的内容包括理解人的学习、发展计算学习、解决分类与决策问题、为专家系统采集知识和发现知识等。与此相应的方法有规则归纳、人工神经网络、进化计算、基于案例的学习和解析学习等。由于知识多是隐含的和不明晰的,又需要使用模糊集合表示相关的概念和基于模糊规则的推理系统去自动地归纳模糊规则。而这一切决定信号处理必然要与人工神经网络、模糊逻辑和进化计算等理论和技术相结合才能达到智能水平。

1.3 对学习本课程的建议

本书是为非电子信息专业的广泛工程专业研究生的“信号处理”课而编写的。20 世纪 90 年代以来,很多研究生在研究中结合各自的课题提出了对信号处理技术的更高要求。涉及的内容已不限于经典的信号处理理论和方法,而对非平稳、非线性信号分析以及智能方法都有迫切的需求。在这种情况下,如何以简捷高效的方式将信号处理的新知识传授给学生,使学生能以更广阔的视野参与新世纪中的科技竞争,这是本课程的努力方向。

实际上,本教材包括了经典信号处理、现代信号处理和软计算三部

分,学时按 3~4 学分安排。

根据对硕士班、工程硕士班和博士班教学的初步体会,这里提出以下建议以供参考。对于以学习经典信号处理内容为主的学生,建议预习“信号与系统”的预备知识,讲课内容是第 2 章至第 7 章(不包括带 * 的内容),第 8 章和第 11 章可以以讲座形式介绍。对于以学习现代信号处理内容为主的学生,除了讲授第 8 章和第 11 章外,适当介绍第 9 章和第 14 章。而对于研究智能信号处理的学生,则增加第 12 章和第 13 章的主要内容。本书的第 10 章和第 15 章以及带 * 的内容供学习参考,不单独讲授。

第2章 信号、系统与线性变换

2.1 信号与序列

信号可以定义为一个承载有关一个物理系统状态或特性信息的函数。信号可以用许多方法表示,例如,信号可以表示为随时间变换的图形或随空间变换的图形的形式。在数学上,各种信号可表示为一个或几个独立变量的函数。习惯上把信号的数学表示式的独立变量作为时间,事实上,它可以不代表时间。

信号的数学表示式中的独立变量既可以是连续的也可以是离散的,时域连续信号是在时间连续集合上定义的信号,因而用连续函数表示。时域离散信号是在离散的时间上定义的信号,其独立变量仅取离散值,即时域离散信号可以表示成数字序列。在一定条件下,连续表示式和离散表示式是等效的。

不仅独立变量可以是连续的或离散的,而且信号的幅值也可以是连续的或离散的。时间和幅度两者都是连续的信号称为模拟信号,而时间和幅度两者都是离散的信号称为数字信号。

信号处理技术就是研究对信号进行变换以更有效地获取重要的信息,完成这一变换的系统就是相应的连续系统和离散系统。经典的系统理论是将模拟信号的冲激串作为时域离散信号序列以讨论时域离散系统。然而,在许多现代数字信号处理的应用中并非所有序列都是由一个时域连续信号取样产生的,所以,从一套适合于时域离散系统的体制和符号出发更便于讨论。

在时域离散系统理论中,信号是用离散时间的数字系列来表示的。以 $x(n)$ 表示一个数字序列 x 的第 n 个数字时,全部信号可写为

$$x = \{x(n)\}, -\infty < n < +\infty$$

时域离散信号的图形描述如图 2-1 所示。

由图可见,时域离散信号仅在自变量(时间)的离散值上被定义。通常时间的量化是均匀的,即 $t = nT$, 式中 T 为时域样点间隔。非整数点则作为没有定义的未定值点。

在数字信号处理中,常用的序列有单位采样序列、单位阶跃序列、指

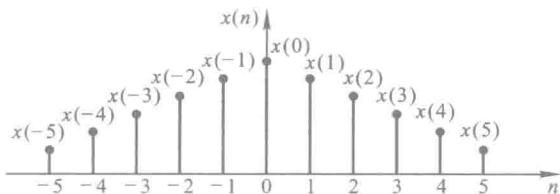


图 2-1 时域离散信号的图形表示

数序列以及正弦序列,如图 2-2 所示。

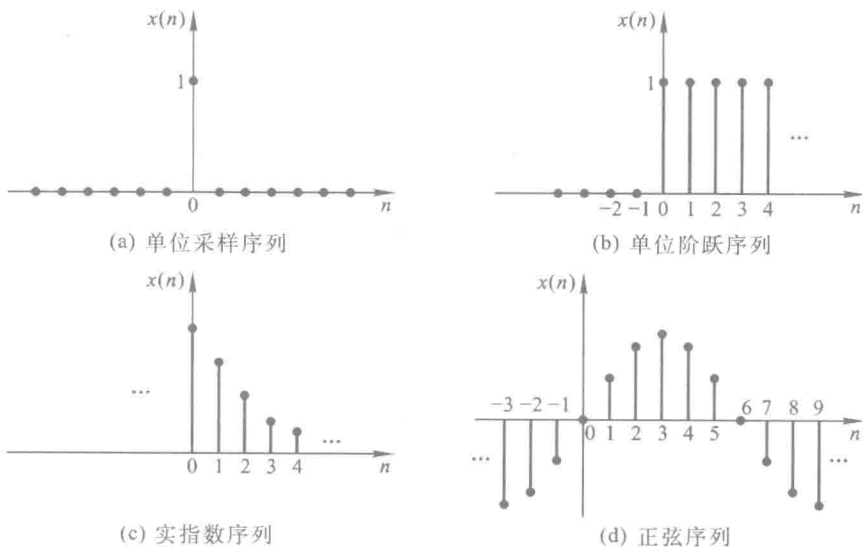


图 2-2 几种常用序列的图形

1. 单位采样序列

单位采样序列定义如下

$$\delta(n) = \begin{cases} 0, & n \neq 0 \\ 1, & n = 0 \end{cases} \quad (2.1-1)$$

单位采样序列在时域离散信号和系统所起的作用和单位冲激函数在时域连续信号和系统所起的作用相同,但其定义简单而精确。为方便起见,通常称该序列为离散冲激或简称为冲激。

2. 单位阶跃序列

单位阶跃序列 $u(n)$ 具有以下取值

$$u(n) = \begin{cases} 1, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases} \quad (2.1-2)$$

单位阶跃序列与单位采样序列之间的关系为

$$u(n) = \sum_{k=0}^{\infty} \delta(n-k) \quad (2.1-3)$$

和

$$\delta(n) = u(n) - u(n-1) \quad (2.1-4)$$

3. 实指数序列

实指数序列是一个值为 a^n 的任意序列,

$$x(n) = a^n u(n) \quad (2.1-5)$$

式中 a 为实数, 即

$$x(n) = \begin{cases} a^n & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases} \quad (2.1-6)$$

当 $|a| < 1$ 时, 该序列是收敛的; 当 $|a| > 1$ 时, 该序列是发散的。

4. 正弦序列

正弦序列的一般表达式为

$$x(n) = A \sin(\omega n T + \phi) = A \sin(n\omega_0 + \phi) \quad (2.1-7)$$

相应地, 余弦序列定义如下

$$x(n) = A \cos(\omega n T + \phi) = A \cos(n\omega_0 + \phi) \quad (2.1-8)$$

其中 $\omega_0 = \omega T$ 。

一个简单的正弦序列和余弦序列可用简单的基本复指数序列 $e^{j\omega_0 n}$ 和 $e^{-j\omega_0 n}$ 表示为

$$\begin{aligned} \sin n\omega_0 &= \frac{1}{2j} (e^{jn\omega_0} - e^{-jn\omega_0}) \\ \cos n\omega_0 &= \frac{1}{2} (e^{jn\omega_0} + e^{-jn\omega_0}) \end{aligned} \quad (2.1-9)$$

离散系统分析中, 序列的基本运算是两个序列 x 和 y 的积与和

$$\begin{aligned} x * y &= \{x(n)y(n)\} \\ x + y &= \{x(n) + y(n)\} \end{aligned}$$

以及序列的延迟或移位

$$y(n) = x(n - n_0)$$

式中 n_0 为整数。

由此, 任意序列 $x(n)$ 都可以表示为

$$x(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k) \delta(n-k) \quad (2.1-10)$$

因为

$$x(k) \delta(n-k) = \begin{cases} x(n), & k = n \\ 0, & k \neq n \end{cases} \quad (2.1-11)$$

2.2 线性非移变系统

数学上将系统定义为将输入序列 $x(n)$ 映射成输出序列 $y(n)$ 的变换或运算,记为

$$y(n) = T[x(n)] \quad (2.2-1)$$

如图 2-3 所示。

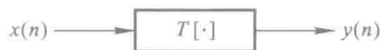


图 2-3 将 $x(n)$ 映射成 $y(n)$ 的变换表示

对变换 $T[\cdot]$ 加上种种约束条件就可以定义各类的时域离散系统。线性非移变系统在数学上易于表征,又可设计成实现多种信号处理功能,因此,这里将广泛地研究这类系统,线性系统只是它的一种特殊情况。

线性系统是满足叠加定理的一类系统。设 $y_1(n)$ 和 $y_2(n)$ 分别是 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 的响应序列,则线性系统满足如下的变换

$$\begin{aligned} T[ax_1(n) + bx_2(n)] &= aT[x_1(n)] + bT[x_2(n)] \\ &= ay_1(n) + by_2(n) \end{aligned} \quad (2.2-2)$$

式中 a 和 b 是任意常数。令 $h_k(n)$ 为系统对 $\delta(n-k)$ 的响应,而 $\delta(n-k)$ 为出现在 $n=k$ 处的一个单位采样,则

$$y(n) = T\left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)\delta(n-k)\right] \quad (2.2-3)$$

对于线性系统来说,式(2.2-3)可写成

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)T[\delta(n-k)] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)h_k(n) \quad (2.2-4)$$

对式(2.2-4)加上非移变的附加约束,则可得到更有用的结果。

时不变系统具有如下特征:如果 $y(n)$ 是系统对于 $x(n)$ 的响应,则 $y(n-k)$ 就是系统对于 $x(n-k)$ 的响应,其中 k 为正或负的整数。如果标号 n 与时间相对应,非移变就相当于时不变。非移变特性意味着,如果 $h(n)$ 是系统对于 $\delta(n)$ 的响应,则系统对于 $\delta(n-k)$ 的响应为 $h(n-k)$,式(2.2-4)可重写成如下形式

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)h(n-k) \quad (2.2-5)$$

通常把式(2.2-5)关系称为离散卷积和,即系统的输出序列 $y(n)$ 等于它的输入序列 $x(n)$ 与系统单位冲激响应的离散卷积。卷积一般表示为

$$y(n) = x(n) * h(n) \quad (2.2-6)$$

对式(2.2-5)进行变量替换,则得到卷积另一种表示

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)x(n-k) = h(n) * x(n) \quad (2.2-7)$$

这表明卷积结果与进行卷积的两个序列的先后次序无关。也就是说,输入 $x(n)$ 与单位冲激响应 $h(n)$ 交换位置以后,线性非移变系统的输出保持不变,符合交换律。

卷积除了理论上具有重要作用之外,还可用于实现线性系统。两个线性非移变系统可作为级联组合或并联组合以构成一个等效的线性非移变系统。图 2-4 和图 2-5 概括了这种性质。

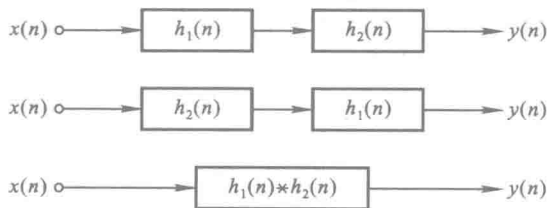


图 2-4 具有相同单位冲激响应的三个线性非移变系统

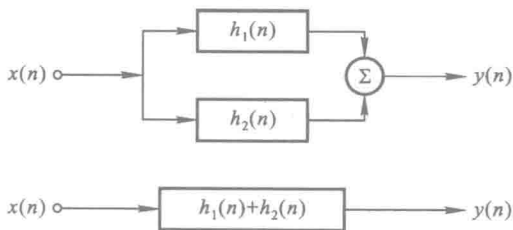


图 2-5 线性非移变系统的并联组合及其等效系统

例 2-1 已知系统的单位冲激响应为

$$h(n) = \begin{cases} a^n, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases}$$

其中 $a \leq 1$, 求对于输入

$$x(n) = u(n) - u(n-N)$$

的响应 $y(n)$ 。

解 先将冲激响应序列 $h(k)$ 沿时间轴反转为 $h(-k)$, 然后平移为 $h(n-k)$ 。再计算两序列 $x(k)$ 和 $h(n-k)$ 的乘积 $x(k)h(n-k)$, 将所得序列值相加, 就得到系统的响应序列 $y(n)$, 如图 2-6 所示。