



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

信号与系统分析 (第2版)

赵录怀 高金峰 刘崇新 编著



高等教育出版社
Higher Education Press



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

信号与系统分析 (第2版)

Xinhao yu Xitong Fenxi

赵录怀 高金峰 刘崇新 编著



高等教育出版社·北京

HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是在2003年出版的《信号与系统分析》基础上修订而成的,内容满足教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会制定的“信号与系统课程教学基本要求”,介绍确定性信号与线性时不变系统的基本概念和基本分析方法。

本书内容编排上采用从信号到系统、从时间域到变换域、从连续到离散、从基本数学方法到工程实际应用举例。全书内容共分七章:绪论、连续时间域分析、频域分析、复频域分析、离散时间域分析、离散傅里叶变换、 z 域分析。与第1版相比较,第2版增加了双边 z 变换的有关内容,模拟滤波器与数字滤波器分别在复频域分析与 z 域分析中介绍。

本书可作为高等学校工科各专业“信号与系统”课程的教材,也可供科研与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统分析/赵录怀,高金峰,刘崇新编著. —2
版.—北京:高等教育出版社,2010.3

ISBN 978-7-04-028851-3

I. ①信… II. ①赵… ②高… ③刘… III. ①信号理论—高等学校—教材②信号系统—高等学校—教材
IV. ①TN911.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第017930号

策划编辑 杜 炜 责任编辑 柳秀丽 封面设计 张 志 责任绘图 尹 莉
版式设计 王艳红 责任校对 殷 然 责任印制 韩 刚

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 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京民族印务有限责任公司

开 本 787×960 1/16
印 张 22.25
字 数 410 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2003年2月第1版
2010年3月第2版
印 次 2010年3月第1次印刷
定 价 26.30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 28851-00

第2版前言

本书第1版是在我国高等教育拓宽专业口径的教学改革背景下,为电气工程与自动化、测控技术与仪器、计算机等专业“信号与系统”或“信号分析与处理”课程编写的教材。为适应课程教学的改革和发展,编者根据电子信息科学与工程电气信息类基础课程教学指导委员会“信号与系统课程教学基本要求”,并结合编者教学实践中的体会和读者意见,对原教材进行了全面修订,主要修订内容如下:

(1) 对原书编排体系进行了调整,突出了傅里叶变换在课程中的核心地位,连续时间信号与离散时间信号各自独立成章,教师在教学时可根据自己的意愿对这两大类内容选择先后或并行的顺序讲授。

(2) 除绪论一章外,其余各章内容基本按信号分解、数学方法、工程应用举例的次序编写,以突出信号与系统理论和方法的实际应用,有助于强化物理概念。经适当删减,第2版中模拟滤波器与数字滤波器的概念分别编排在复频域分析与 z 域分析中介绍。

(3) 根据一些教师的反馈意见,第2版中增加了调制与解调、频分复用与时分复用的初步知识,系统的 z 域分析拓展至双边 z 变换,以使本教材适合所有电类专业使用。

第2版由赵录怀(西安交通大学)、高金峰(郑州大学)、刘崇新(西安交通大学)修订。在教材编写与初稿试用过程中得到了刘晓明老师的大力协助,西安交通大学阎鸿森教授为本书的编写提出了宝贵的建议和意见,在此表示诚挚的感谢。

本教材受西安交通大学“十一五”本科教材项目资助。

书稿承西北工业大学段哲民教授仔细审阅并提出宝贵修改意见,谨致以衷心感谢。

欢迎广大教师和读者对本书批评指正。

编 者

2009年11月

第1版前言

随着信息技术的迅速发展和计算机的广泛使用,学科之间的融合已是大势所趋。加强素质培养、淡化专业、拓宽基础,提倡不同专业领域的交叉与渗透已是21世纪高等教育培养适用人才的必由之路。把传统上仅在通信类专业开设的“信号与系统”课程作为所有电类专业乃至部分机械、动力、力学专业的技术基础课已形成共识。本书正是为适应这一需要而编写的少学时“信号与系统”教材。

本书在构筑课程内容的结构体系时,力图增加连续与离散两大类信号与系统的对比,加强变换法与时域法之间的联系,突出系统函数的概念,注重连续时间与离散时间傅里叶变换的关系,以清晰的结构用比较小的篇幅介绍信号与系统的基本概念和分析方法。为此,采用连续时间信号与系统和离散时间信号与系统基本并行、从时域到变换域、先复频域后频域并适当兼顾实际应用的教材结构体系。

本课程的一些教学内容与“电路”和“自动控制”联系比较紧密。考虑到各课程理论体系的相对完整性,而又尽可能避免内容上的重复,对这两门课中的一些必讲内容,如微分方程的经典解法、信号流图、状态方程、Bode图等本书不予专门介绍,而是将重点放在信号与系统课程内容本身上。尽管国内电气工程专业以往的“电路”课程中对冲激响应、卷积积分、拉普拉斯变换等内容有一定程度的介绍,但考虑到这些内容在系统分析中所处的重要地位,同时也考虑到各课程之间内容的整合,本书对这些内容还是作了比较细致的叙述。

信号与系统的概念和方法有相当广阔的应用背景,但作为该领域的入门课程,并考虑到本科有关专业先修课程的设置情况,书中主要将“电路”作为“系统”的对象来说明有关分析方法,而未过多涉及其他对象,以免由于读者对相关知识的缺乏而造成学习上的障碍。使用本书的教师可以视学生的具体专业情况增加一些有关应用实例和系统对象。学习本课程所需要的基础为“高等数学”、“电路”或“电工技术”。

在本课程学习中利用一些通用软件,如MATLAB对信号与系统进行辅助分析不仅有助于读者对一些概念的深入理解,而且能为今后工程问题的解决掌握一种有用工具。为了不分散读者学习基本内容的注意力,同时考虑到计算机软件版本的翻新速度,使用MATLAB软件进行信号与系统分析的内容将另有配套

教材介绍。尽管如此,为兼顾本课程“理论性”与“实用性”的统一,书中对一些计算机数值方法作了一定程度的介绍,如连续时间信号卷积的计算,连续时间信号的频谱分析等。

全书共7章。第一章是关于典型连续、离散时间信号,连续、离散时间系统描述和性质的基本概念,属于信号与系统课程的基础内容。第二章介绍线性时不变系统的时域分析方法。时域分析方法具有直观、物理概念清楚等优点,是各种变换域分析方法的基础。本章分别从连续时间系统的单位冲激响应和离散时间系统的单位样值响应入手,分别给出了线性时不变系统任意信号输入下零状态响应的卷积求解方法。叙述过程中力求通过典型例题理清思路,强化基本概念,而不追求解题技巧的训练。

第三、四两章分别是分析连续时间系统和离散时间系统的拉普拉斯变换方法和 z 变换方法。这两章在分别给出拉普拉斯变换和 z 变换的意义、定义及性质的基础上,引出连续时间系统和离散时间系统的系统函数概念。通过对系统函数的讨论,分别给出连续时间系统及离散时间系统的稳定性、频率响应与系统函数零、极点分布之间的关系。既突出了变换域方法在系统响应分析中的优势,又使变换域所蕴涵的物理意义得到了进一步的阐明。

第五章是连续时间信号与系统的傅里叶分析。本章首先将信号与矢量进行类比,对信号的正交分解进行了一般性地讨论。从信号的正交分解出发,把周期性信号展开为指数形式的傅里叶级数,并引出周期信号的离散频谱概念。从频域对信号进行分析的实质性内容在给出典型信号的傅里叶变换及对傅里叶变换的性质进行讨论时得到了充分地展现,在教材的内容叙述中始终贯彻信号的时域特征与频域特征之间的对应关系。通过对傅里叶变换与拉普拉斯变换之间的关系的讨论,对两种变换域分析方法在连续时间系统分析与设计中的特点及适用性进行了说明。本章还利用信号频谱分析的优势,对线性系统的无失真传输条件、理想滤波器、时域、频域抽样定理及其物理意义进行了讨论。

第六章讨论离散时间信号与系统的傅里叶分析问题。该章首先给出离散傅里叶级数、离散时间傅里叶变换的定义和性质,建立了传统意义下的离散时间信号与系统的傅里叶分析框架。在对各种傅里叶变换的时域、频域规律进行总结的基础上,定义了离散傅里叶变换。最后从实用的角度出发详细阐述了使用离散傅里叶变换进行频谱分析的方法和应用要点,给出了离散傅里叶变换的性质和在卷积计算中的应用。

第七章为模拟滤波器和数字滤波器的一些初步知识。在介绍几种典型逼近函数和模拟滤波器的一般概念之后,给出了从低通到其他类型滤波器的频率变换方法,以及有源滤波器的分析方法。数字滤波器部分首先介绍设计 IIR 数字滤波器的冲激响应不变法和双线性变换法,其次介绍设计 FIR 数字滤波器的窗

函数法,最后讨论数字滤波器的结构实现问题,本章内容的取舍综合考虑了非通信类专业不单独开设数字信号处理类课程的因素。

信号与系统课程理论性强,又有广阔的工程背景,为了配合概念的理解与掌握,每章都精选一定数量的例题和习题,书末附有习题参考答案。为便于查阅常见信号的变换式和一些有关数学公式,书中还给出了四个附录。

本书内容也可采用其他讲授顺序。如像大多数教材那样将频域分析内容(第五、六章)放在复频域分析内容(第三、四章)之前讲授;变换法内容也可采取先连续时间信号与系统、后离散时间信号与系统的讲授方式。对学时数比较少的专业,也可将第七章滤波器的一些内容放在前面章节中讲授,以增加变换法在实际应用中的例子。

本书由赵录怀(第一、七章)、高金峰(第五、六章)、刘崇新(第三、四章)、陈燕(第二章)编写,赵录怀对各章内容作了修改和补充。

西北工业大学段哲民教授仔细审阅了书稿并提出宝贵修改意见,在此表示衷心感谢。

限于水平,书中错误和不妥之处恳请读者批评指正。来信请寄西安交通大学电气工程学院赵录怀(邮编710049),或郑州大学电气工程学院高金峰(邮编450002)。

编 者

2002年12月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 信号运算	2
1. 对因变量实施的运算	2
2. 对自变量实施的运算	3
1.2 系统举例	6
1. 电路	6
2. 机电系统	6
3. 反馈控制系统	8
4. 通信系统	8
1.3 系统分类	9
1. 记忆性	9
2. 线性	10
3. 时不变性	11
4. 因果性	12
1.4 离散时间信号与系统	13
1.5 信号与系统分析概述	15
1. 信号的奇偶分解	15
2. 信号的脉冲分解	16
3. 信号的正弦分解	17
4. 系统分析	18
习题 1	20
第 2 章 连续时间域分析	24
2.1 基本信号	24
1. 正弦信号	24
2. 复指数信号	25
3. 阶跃信号	26
4. 冲激信号	29
2.2 系统的微分方程描述	32
1. 输入输出微分方程	32

2. 零输入响应与零状态响应	36
2.3 系统的冲激响应描述	38
2.4 卷积	42
1. 卷积公式	42
2. 卷积计算	44
2.5 卷积性质	49
1. 与冲激函数的卷积	49
2. 交换律、分配律、结合律	49
3. 时间移位	50
4. 卷积后信号的长度	51
5. 微积分性质	51
习题 2	52
第 3 章 频域分析	58
3.1 信号的能量和功率	58
3.2 周期信号的傅里叶级数与频谱	62
1. 三角形式的傅里叶级数	62
2. 指数形式的傅里叶级数	64
3. 频谱	66
4. 对称信号的傅里叶级数	68
3.3 傅里叶变换	69
1. 从傅里叶级数到傅里叶变换	69
2. 一些常用信号的傅里叶变换	72
3.4 傅里叶变换的性质	75
1. 奇偶虚实性	75
2. 缩展	75
3. 移位	77
4. 微分	78
5. 对偶性	80
6. 卷积	83
7. 帕斯瓦尔定理	84
3.5 周期信号的傅里叶变换	87
3.6 频率响应函数与理想滤波器	90
1. 系统的频率响应函数	90
2. 无失真传输	92
3. 理想滤波器	94

3.7 抽样定理	97
1. 时域抽样	97
2. 频域抽样	105
3.8 幅度调制、解调与多路复用	106
习题3	113
第4章 复频域分析	121
4.1 拉普拉斯变换	121
1. 拉普拉斯变换的定义	121
2. 极零点	124
3. 存在性与收敛域	125
4.2 逆拉普拉斯变换	126
4.3 拉普拉斯变换的性质	132
1. 微分	132
2. 积分	134
3. 移位	134
4. 初值定理	136
5. 终值定理	137
6. 卷积	138
4.4 利用拉普拉斯变换求解线性微分方程	140
4.5 利用拉普拉斯变换分析线性电路	142
1. 电路的复频域模型	142
2. 利用拉普拉斯变换分析电路	145
4.6 系统函数	151
4.7 系统的稳定性	154
1. 稳定性判据	154
2. 劳斯稳定性判据	157
3. 正弦稳态响应	160
4.8 系统的频率响应	161
4.9 反馈系统简介	169
4.10 模拟滤波器简介	174
1. 滤波器的频率响应	174
2. 确定系统函数的一般方法	175
3. 二阶有源滤波器	178
习题4	185
第5章 离散时间域分析	193

5.1 序列的基本运算	193
1. 对因变量实施的运算	193
2. 对自变量实施的运算	196
3. 序列运算的框图表示	198
5.2 基本序列	199
1. 样值序列	199
2. 阶跃序列	200
3. 正弦序列	201
4. 复指数序列	203
5.3 离散时间系统的分类	205
1. 线性	205
2. 时不变性	206
3. 因果性	206
5.4 离散时间系统的时域描述	207
1. 差分方程描述	207
2. 样值响应描述	211
5.5 卷积	213
5.6 卷积性质	216
1. 交换律、结合律和分配律	216
2. 时间移位	217
3. 卷积后序列的长度	218
5.7 卷积的数值计算	220
习题5	221
第6章 离散傅里叶变换	228
6.1 引言	228
6.2 离散时间傅里叶变换	229
6.3 离散时间系统的频域分析	233
1. 离散时间傅里叶变换的性质	233
2. 离散时间系统的频域分析	234
6.4 离散傅里叶变换	236
1. 离散傅里叶级数	236
2. 离散傅里叶变换	239
6.5 信号频谱的数值计算	241
1. 周期信号的频谱分析	241
2. 非周期信号的频谱分析	243

3. 数据截断问题	248
6.6 离散傅里叶变换的性质	250
1. 圆周移位	250
2. 圆周卷积	251
3. 奇偶虚实性	256
6.7 快速傅里叶变换简介	257
习题 6	261
第 7 章 z 域分析	264
7.1 z 变换	264
1. z 变换的定义	264
2. z 变换的收敛域	266
7.2 逆 z 变换	270
1. 幂级数展开法	270
2. 部分分式法	272
7.3 z 变换的性质	275
1. 时域移位	275
2. 时域翻转	277
3. z 域缩展	278
4. z 域微分	278
5. 初值定理与终值定理	279
6. 时域卷积定理	280
7.4 利用 z 变换求解差分方程	283
7.5 离散时间系统的系统函数	285
1. 系统函数的定义	285
2. 系统的稳定性	287
3. 离散时间系统的结构实现	288
7.6 离散时间系统的频率响应	293
1. 频率响应曲线的定性绘制	295
2. 数字滤波器的一般概念	297
7.7 设计 IIR 数字滤波器的冲激响应不变法	300
1. s 域到 z 域的映射	300
2. 冲激响应不变法	302
7.8 设计 IIR 数字滤波器的双线性变换法	305
7.9 FIR 数字滤波器	310
1. 窗函数法	310

2. FIR 滤波器的结构实现	317
习题 7	320
附录 一些有用的数学公式	326
A. 三角函数与虚指数函数	326
B. 求和	327
C. 积分	327
习题参考答案	329
参考文献	341

第1章 绪 论

电子技术、计算机技术和通信技术使当今的人们生活在信息的海洋中。人们通过收听广播和观看电视可以获取天气预报和国内国际新闻,利用固定电话和手机可以远距离通话,利用互联网可以在浩瀚的资源中快速查阅资料,也可以接收和发送电子邮件。现代通信技术突破了人们之间远距离交流的障碍,实现了信息的快速传递。

广义地讲,用以描述被研究对象属性的物理量都是信号。例如,人耳听到的声音可用空气对耳膜的压力描述,这种随时间变化的压力就是声音信号;一幅数码黑白图片可用像素的亮度描述,这种随空间坐标变化的亮度的数据就是图像信号;心脏跳动的强度医学上用电压描述,这种电压就是心电信号。电信号容易用电路手段存储和处理,借助电缆、光缆和空间便于远距离传输,信号也可以专指电信号。实际中,非电信号常转换为电信号,有关转换装置称为传感器。

信号用实自变量的单值数学函数表示,文字叙述中的“函数”一词有时也指该函数所表示的“信号”。本书所涉及的信号只有一个自变量,为了便于叙述,假定自变量为时间,用符号 t 表示。信号随自变量的变化蕴含着信息,信息以信号为载体进行传递与处理。

若信号的值具有某种随机性,如噪声,这种信号称为随机信号。随机信号用概率统计的方法描述。即使在相同的条件下,随机信号呈现出的波形不可预测,每次观测到的波形都不一样。

在定义域内任一时刻都有唯一确定值的信号称为确定信号。一般来说,用数学函数表示的信号是确定信号。在完全相同的条件下,确定信号的波形能够再现。例如,一个理想 RC 放电电路,电容上任一时刻的电压取决于元件参数和电容上的初始电压,电容电压的波形与起始时间无关。本书只涉及确定信号的理论和方法。

除上述两种信号外,还有一种称之为混沌的信号,这种信号对初始值非常敏感,波形永不重复,信号的长期波形不能精确确定,但信号总是在一定的范围内变化,它的表象既有确定性又有随机性。

系统一词用于各种领域,如电气工程、电子信息工程、机械工程、经济、生物等。广义地讲,系统是由相互关联、相互作用的事物组成的具有特定功能的整体。由于电系统易于实现,实际中多采用电系统完成信号处理,处理的硬件可以

是电路、计算机和专用集成芯片。被处理的信号称为输入或激励,处理后的信号称为输出或响应。本书主要涉及信号处理系统,它是按照某种需要能够把输入信号变成输出信号的装置。

1.1 信号运算

信号处理实际上就是对信号实施的各种数学运算,复杂运算由一些基本运算的组合实现。

1. 对因变量实施的运算

(1) 数乘运算

$$y(t) = ax(t)$$

其中 a 为常数。当 $a > 1$ 时信号的幅值增大,如实际中的信号放大器;当 $0 < a < 1$ 时信号的幅值减小。

(2) 积分运算

$$y(t) = \int_{-\infty}^t x(\tau) d\tau$$

信号 $x(t)$ 在(滑动)积分运算后,其波形将变得比较平滑,如图 1-1 所示,尽管信号 $x(t)$ 在 $t = -1, 0, 1$ 时的值发生跃变,但经积分运算后信号 $y(t)$ 的值是连续的。

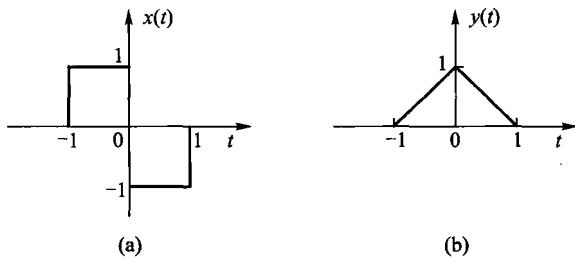


图 1-1 信号的积分

(3) 微分运算

$$y(t) = \frac{dx(t)}{dt}$$

实际中,信号的微分运算具有突出信号拐点的作用,求导后在拐点时刻的值发生跃变。

(4) 加法与减法运算

$$y(t) = x_1(t) \pm x_2(t)$$

音频混响装置对音乐信号与声音信号实施的就是信号的加运算。

(5) 乘法运算

$$y(t) = x_1(t) \cdot x_2(t)$$

实际中,音频信号无法远距离直接传输,采取的方法是把它与一频率较高的正弦信号相乘,当音频信号的值大于零时,正弦信号的振幅就按音频信号变化,由于较高频率的信号能够远距离传输,从而可以解决音频信号的传输问题。

2. 对自变量实施的运算

对自变量的基本运算有三种:时间移位、时间翻转和时间伸展。

(1) 时间移位

信号 $x(t)$ 在传输后如果波形的形状保持不变,仅仅是延迟了 t_0 时间 ($t_0 > 0$),则延迟后的信号为 $x(t-t_0)$,其波形是把 $x(t)$ 右移 t_0 时间;类似地, $x(t+t_0)$ 的波形是把 $x(t)$ 左移 t_0 时间,如图 1-2 所示。

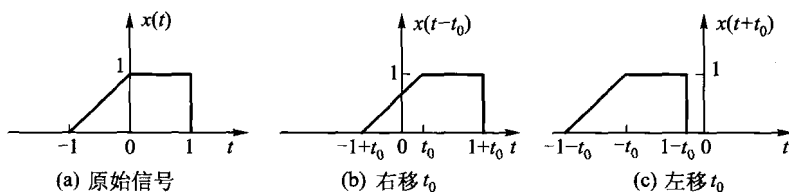


图 1-2 时间移位

(2) 时间翻转

如果将信号 $x(t)$ 的自变量用 $(-t)$ 置换,信号 $x(-t)$ 的波形就是 $x(t)$ 以 $t=0$ 为轴的翻转。图 1-2(a) 所示信号,翻转后的波形如图 1-3 所示。

(3) 时间伸展

如果把 $x(t)$ 的自变量 t 替换为 at 得到 $x(at)$,称为时间伸展运算(也称时间尺度运算)。若 $a > 1$,信号 $x(at)$ 的波形是将 $x(t)$ 以纵坐标为轴收缩 a 倍,若 $0 < a < 1$, $x(at)$ 的波形是将 $x(t)$ 以纵坐标为轴伸展 $1/a$ 倍,如图 1-4 所示。

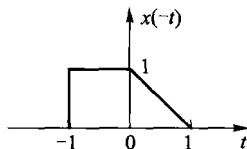


图 1-3 时间翻转

当 $x(t)$ 是一盘录制在磁带上的声音信号时, $x(2t)$ 相当于以 2 倍速度放音的信号,放音时间减少一倍;而 $x(t/2)$ 相当于原磁带放音速度降至一半的信号,放音时间增加一倍。

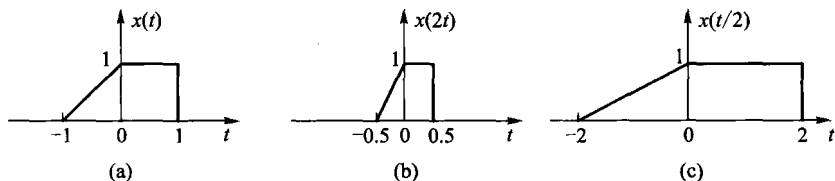


图 1-4 时间缩展

综合运用以上给出的时间移位、时间翻转、时间缩展三种运算,由给定的 $x(t)$ 的波形能够绘出 $y(t) = x(at+b)$ 的波形,其中 a, b 为实数。由 $y(t)$ 与 $x(t)$ 的关系式,容易得出

$$y(0) = x(b)$$

$$y\left(-\frac{b}{a}\right) = x(0)$$

例 1-1 已知 $x(t)$ 的波形如图 1-5 所示,试绘出 $y(t) = x(-2t+1)$ 的波形。

解 若依次采用以下运算顺序:

左移: $y_1(t) = x(t+1)$

翻转: $y_2(t) = y_1(-t) = x(-t+1)$

缩展: $y(t) = y_2(2t) = x(-2t+1)$

即可得到 $y(t) = x(-2t+1)$ 的波形,如图 1-6 所示。

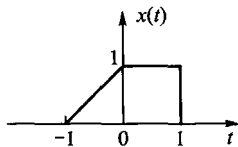


图 1-5 例 1-1 图

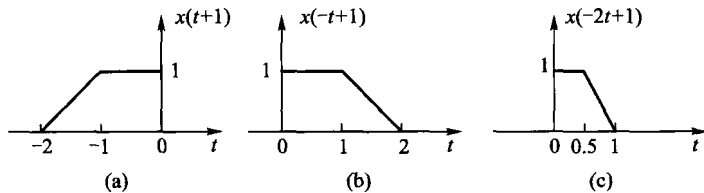


图 1-6 移位-翻转-缩展

也可以采用其他运算顺序,例如:

缩展: $z_1(t) = x(2t)$

左移: $z_2(t) = z_1(t+0.5) = x(2(t+0.5)) = x(2t+1)$

翻转: $y(t) = z_2(-t) = x(-2t+1)$

每一步骤的波形如图 1-7 所示。

以上给出的信号运算中,有些无法实时实现。例如,信号的左移运算,任何形式的信号实时运算装置都不能实现这一功能,这是因为运算后的信号不可能