高等院校“十三五”规划教材

高等学校电气工程及其自动化专业应用型本科系列规划教材

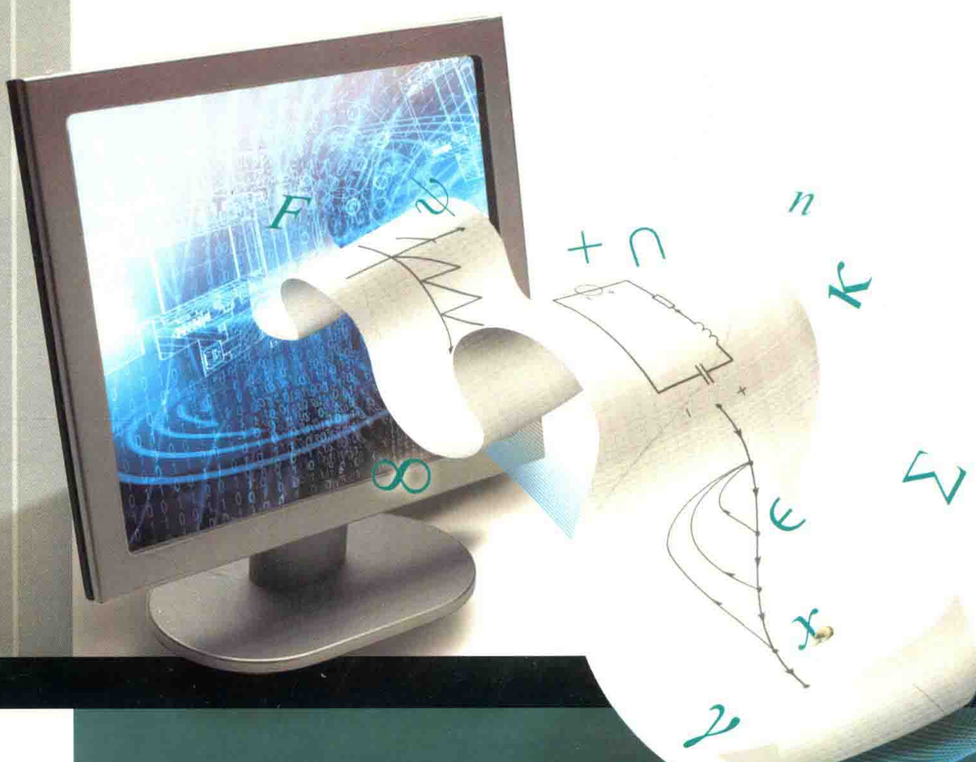
XINHAO YU XITONG

信号与系统

（第二版）

主　编　胡沁春　刘刚利

副主编　肖菊兰



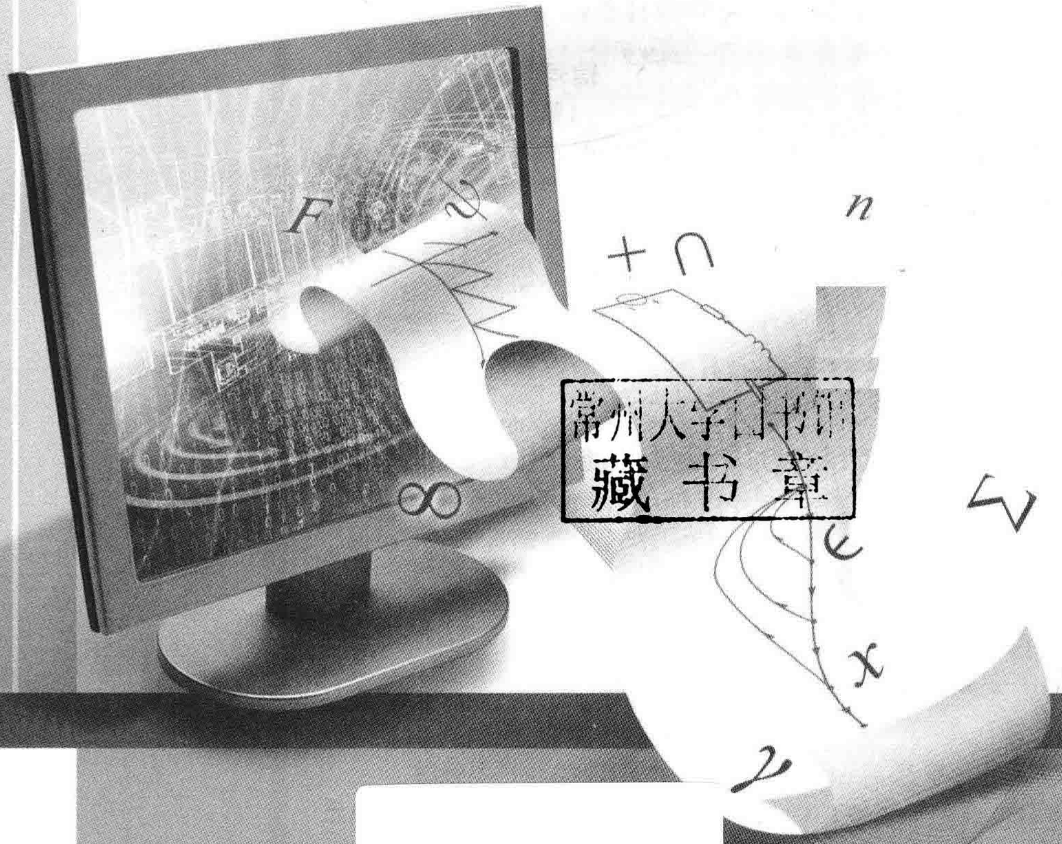
重庆大学出版社

高等院校

信号与系统

（第二版）

主　编　胡沁春　刘刚利
副主编　肖菊兰
参　编　高　燕　刘炳甫



重庆大学出版社

内容提要

本书采用先时域分析后变换域分析、先连续系统分析后离散系统分析的结构体系，系统地介绍信号与系统的基本概念、基本理论和基本分析方法。全书共分7章，其内容包括信号与系统概论、连续系统的时域分析、连续系统的频域分析、连续系统的复频域分析、离散系统的时域分析、离散系统的 z 域分析及系统的状态变量分析。全书结构新颖，重点突出，面向应用，内容符合教育部的相关类专业教学指导委员会颁布的《高等学校信号与系统课程教学基本要求》，满足培养应用型人才的需要。与本书配套使用的有刘刚利主编的《信号与系统学习指导及习题集》。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化、电子信息工程、通信工程、电子科学与技术、计算机科学与技术、测控技术与仪器等本科专业的教材，也可供工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

信号与系统／胡沁春，刘刚利主编. --2版. --重庆：重庆大学出版社，2018.2
高等学校电气工程及其自动化专业应用型本科系列规划教材
ISBN 978-7-5689-0922-8

Ⅰ.①信… Ⅱ.①胡… ②刘… Ⅲ.①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(2017)第325166号

信号与系统
（第二版）
主　编　胡沁春　刘刚利
副主编　肖菊兰
责任编辑:曾显跃　　版式设计:曾显跃
责任校对:谢　芳　　责任印制:赵　晟
*
重庆大学出版社出版发行
出版人:易树平
社址:重庆市沙坪坝区大学城西路21号
邮编:401331
电话:(023) 88617190　88617185(中小学)
传真:(023) 88617186　88617166
网址:http://www.cqup.com.cn
邮箱:fxk@cqup.com.cn（营销中心）
全国新华书店经销
重庆升光电力印务有限公司印刷
*
开本:787mm×1092mm　1/16　印张:16.5　字数:391千
2018年2月第2版　2018年2月第3次印刷
印数:3 501—6 500
ISBN 978-7-5689-0922-8　定价:38.00元

前言

21 世纪的人类社会已全面进入信息化时代，与信息相关的基本理论和技术成为科学研究者和工程技术人员的必备知识。作为一门基础理论课程，“信号与系统”讲授的内容和分析方法在电子信息、通信、自动化、电气工程、计算机科学、生物电子等领域应用广泛。

本书主要讨论确定性信号的特性和线性时不变系统的基本理论和基本分析方法，采用先时域分析后变换域分析、先连续系统分析后离散系统分析的结构体系，并列对连续系统与离散系统进行了研究，按照时域分析、变换域分析和状态变量分析的次序来划分章节，在强调连续系统与离散系统共性的基础上突显了它们各自的特点。全书大致分为 4 部分，共 7 章。第 1 部分为信号与系统概论，包含第 1 章，介绍了信号与系统的基本概念与分析方法，包括信号分类与基本运算、阶跃信号与冲激信号、系统的描述、分类与性质等内容。第 2 部分为连续系统分析，包含第 2 章至第 4 章，介绍了连续系统的时域分析、频域及复频域分析，包括连续系统的数学模型、微分方程求解、冲激响应与阶跃响应、卷积积分、周期信号的傅里叶级数与频谱、傅里叶变换及其性质、连续系统的频域分析、采样定理、拉普拉斯变换及其性质、拉普拉斯逆变换、连续系统的复频域分析、系统函数与系统特性、连续系统的表示等内容。第 3 部分为离散系统分析，包含第 5 章、第 6 章，介绍了离散系统的时域分析、z 域分析，包括离散信号的描述与基本运算、离散系统的时域分析、单位序列响应与单位阶跃响应、卷积和、z 变换及其性质、逆 z 变换、离散系统的 z 域分析等内容。第 4 部分为系统的状态变量分析，包含第 7 章，介绍了系统的状态变量分析、状态变量和状态方程、连续系统和离散系统状态方程的求解等内容。

本书是根据教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会对该门课程的基本要求及本科应用型人才培养目标而编写的，在内容上详略得当，重点突出，着重于信号分析和系统分析，突出基础性、系统性和实用性。本书适用于不同学时的教学课程，教师可根据不同学时和教学要求，灵活组合授课内容。

本书由胡沁春、刘刚利担任主编，肖菊兰担任副主编。胡沁春编写了第1章、第7章，刘刚利编写了第2章、第4章，肖菊兰编写了第5章、第6章，高燕编写了第3章，刘炳甫编写了习题和附录。全书由胡沁春统稿。

鉴于编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编　者

2017年10月

目录

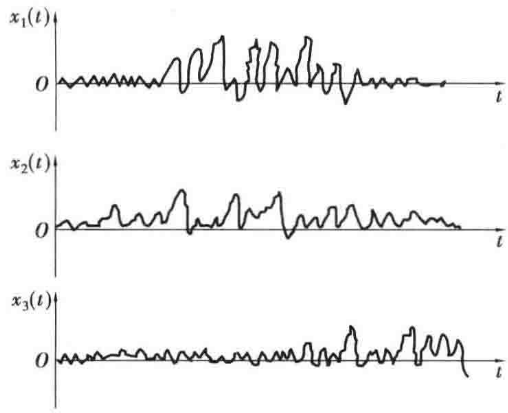
第1章 信号与系统概论

1.1 信号与系统的概念

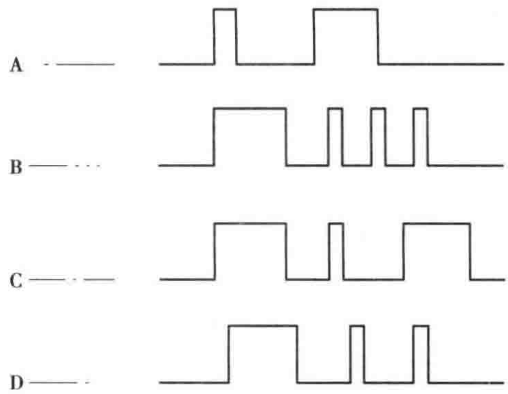
在现代社会的日常生活和生产实践中，人们不断地密切接触各种各样载有信息的信号，并应用相关系统对信号进行处理。从广义的概念出发，信号是物质运动的表现形式，即宇宙中的一切事物都处于不停的运动中，物质的一切运动或状态的变化都是一种信号。信号是描述范围极为广泛的一类物理现象，它所含的信息总是寄寓在某种形式的波形之中。例如，人的声道系统所产生的语言信号就是一种声压的起伏变化；机械振动产生振动信号；大脑、心脏运动分别产生脑电和心电信号；电气系统随参数的变化产生电磁信号等。从狭义的概念出发，信号是载有信息的物理变量，是传输信息的载体与工具。信息是事物存在状态或属性的反映，信息蕴涵于信号之中。按物理属性可将信号分为电信号和非电信号，两种信号可以相互转换。电信号容易产生、控制和处理。本书所指的信号，在一般情况下均为电信号。由于信号随时间而变化，人们可以借助示波器或其他测量仪表对信号进行观察与记录。为了对信号进行分析和研究，可使用数学语言来对信号进行描述，通过对信号进行数学变换，改变信号的形式，便于识别、提取信号中有用的信息。信号常表示为时间函数，该函数的图形称为信号的波形。在进行信号分析时，信号与函数两个词常互相通用。图 1.1.1 所示为几种实际信号波形。

在自然科学、工程应用等诸多领域中，系统的概念与方法被广泛采用，如用电路系统产生、处理信号。若干相互作用、相互联系的事物按一定规律组成具有特定功能的整体，称为系统。它是产生、传输或处理信号的客观实体。数据采集与处理系统、通信系统、雷达系统、计算机系统等都称为系统。

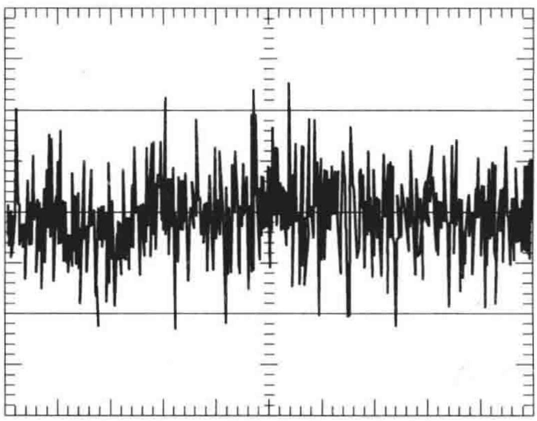
本书所研究的是系统对信号进行处理、传输的基本理论和基本分析方法，其框图表达如图 1.1.2 所示。图 1.1.2 中，系统的输入信号（激励）为 $f(\cdot)$，系统的输出信号（响应）为 $y(\cdot)$，系统特性为 $h(\cdot)$。“·”是信号的自变量，自变量可以是连续变量，也可以是离散变量。



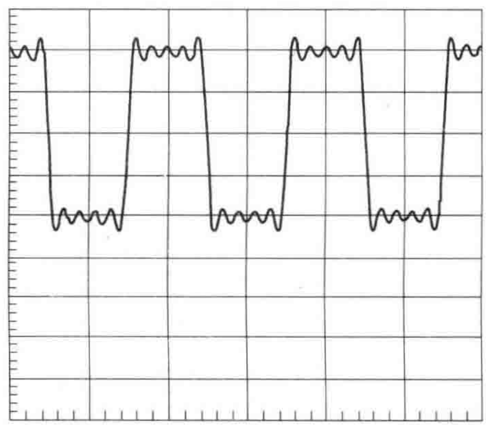
(a) 不同语音所对应的不同声压信号



(b) 电报信号



(c) 音乐信号



(d) 方波的谐波信号

图 1.1.1　几种实际信号波形

按照处理的信号是连续时间信号或离散时间信号,系统也分为连续时间系统和离散时间系统两种。本书采用先连续、后离散的顺序对信号与系统分析进行编排。在图 1.1.2 所示的信号与系统框图中,描述输入信号(激励)、系统特性、输出信号(响应)三者之间的关系可在时域、变换域(频域、复频域和 z 域)中进行分析。本书主要就是对时域、变换域中的信号与系统进行研究。

图 1.1.2　信号与系统框图

1.2　信号及其分类

按照各种信号的不同性质与数学特征,信号有多种不同的分类方法。例如,按照信号的物理特性,可分为光信号、声信号和电信号等;按照信号的用途,可分为雷达信号、图像信号和语音信号等;按照信号的数学对称性,可分为奇信号、偶信号和非对称信号等;从能量的角度出发,可分为功率信号与能量信号等。

1.2.1　连续时间信号和离散时间信号

(1)连续时间信号

在连续时间范围内($-\infty<t<\infty$)有定义的信号称为连续时间信号,简称为连续信号。这里的"连续",是指函数的定义域——时间或其他量是连续的,至于信号的值域可以是连续的,也可以不是连续的。例如,常见的正弦信号如图 1.2.1(a)所示,其表达式为

$$f(t)=10\sin\pi t\qquad -\infty<t<\infty \tag{1.2.1}$$

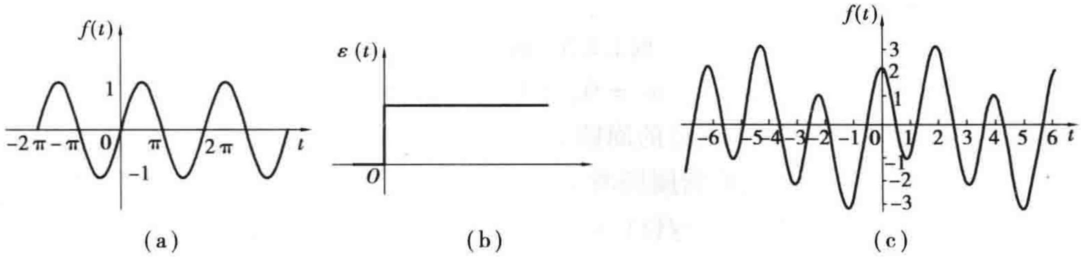


图 1.2.1　连续时间信号

其定义域($-\infty,\infty$)和值域$[-10,10]$显然,都是连续的,因此,该信号为连续信号。图1.2.1(b)所示的信号在定义域($-\infty,\infty$)是连续的,但其函数值只取 0,1 两个离散的数值,该信号仍为连续信号;图 1.2.1(c)所示的信号,其定义域($-\infty,\infty$)和值域$[-3,3]$都是连续的,显然该信号为连续信号。

(2)离散时间信号

仅在一些离散的瞬间才有定义的信号称为离散时间信号,简称离散信号。这里的"离散",是指信号的定义域——时间或其他量是离散的,它只取某些规定的值。通常离散信号用 $f(n)$来表示,其中 n 一般取整数。图 1.2.2 所示为离散信号的几个例子。

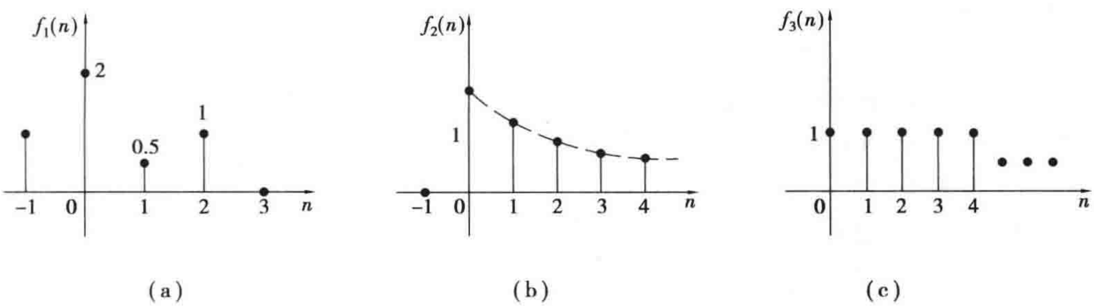


图 1.2.2　离散时间信号

1.2.2　周期信号和非周期信号

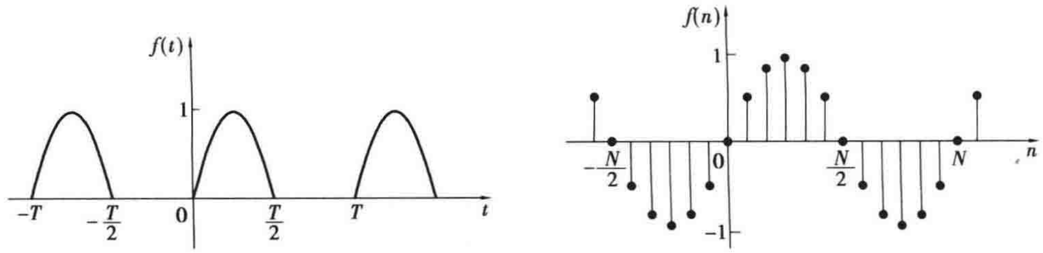
(1)周期信号

周期信号是时间定义在($-\infty,\infty$)区间,每隔一定时间 T(或整数 N),按相同规律重复变化的信号,如图 1.2.3 所示。

连续周期信号可表示为

$$f(t)=f(t+mT)\qquad m=0,\pm1,\pm2,\pm3,\cdots,-\infty<t<\infty \tag{1.2.2}$$

离散周期信号可表示为



(a)连续周期信号　　　(b)离散周期信号

图 1.2.3　周期信号

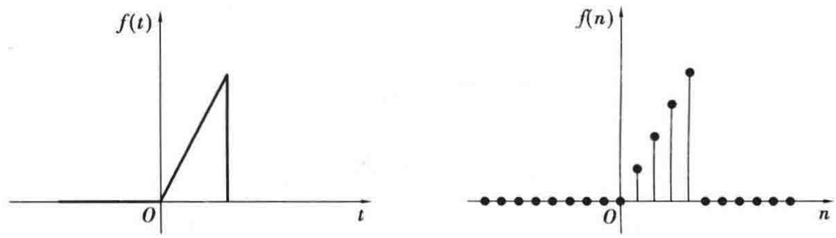
$$f(n) = f(n + mN) \qquad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \cdots, -\infty < n < \infty \tag{1.2.3}$$

如果两个周期信号$f_1(t)$和$f_2(t)$的周期具有公倍数，则它们的和$f(t)$仍然是一个周期信号，且$f(t)$的周期是$f_1(t)$和$f_2(t)$的周期的最小公倍数，即

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) \tag{1.2.4}$$

(2)非周期信号

能用确定的数学关系式表达，但取值不具有周期重复性的信号，称为非周期信号。图 1.2.4 所示为几个非周期信号的例子。



(a)　　　(b)

图 1.2.4　非周期信号

例 1.1　试判断下列信号是否为周期信号。若是，其周期为多少？

1) $f(t) = \sin(3t) + \cos(2t)$　　　2) $f(t) = \sin(2t) + \cos(\pi t)$

解　1)因为$f_1(t) = \sin(3t)$是周期为$T_1 = 2\pi/\omega_1 = 2\pi/3$的周期信号；因为$f_2(t) = \cos(2t)$是周期为$T_2 = 2\pi/\omega_2 = 2\pi/2 = \pi$的周期信号。又因为$T_1$和$T_2$的最小公倍数为$2\pi$。可知，$f(t)$也是一个周期信号，其周期为$T = 2\pi$。

2)在信号$f(t) = \sin(2t) + \cos(\pi t)$中，$\sin(2t)$和$\cos(\pi t)$显然都是周期信号，其周期分别为$T_1 = \pi, T_2 = 2$。由于一个无理数与一个有理数不存在公倍数，故$f(t)$不是一个周期信号，或者说，其周期无穷大。

1.2.3　能量信号和功率信号

(1)能量信号

为了研究信号能量或功率特性，常常研究信号$f(t)$（电压或电流）在单位电阻上消耗的能量或功率。若信号$f(t)$在区间$(-\infty, \infty)$的能量满足

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 \mathrm{d}t < \infty \tag{1.2.5}$$

时,则信号的能量有限,称其为能量有限信号,简称能量信号。实际信号大多是持续时间有限的能量信号。

(2)功率信号

若信号$f(t)$在区间$(-\infty,\infty)$的能量无限,不满足式(1.2.5)条件,但满足其平均功率有限,即

$$P=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T}|f(t)|^2\mathrm{d}t<\infty \tag{1.2.6}$$

则称信号为功率信号,如各种周期信号、阶跃信号等,它们的能量无限,但功率有限。

1.2.4 非确定信号与确定信号

(1)非确定性信号

在工程测试中,存在大量非确定性信号,如电路系统的热噪声、机械振动信号等,其幅值的大小、最大幅值出现的时间等,均无法由数学公式来对它进行精确描述、计算、预测,即实际测量的结果每次都不相同,这种性质称为“随机性”,故也称这种非确定性信号为随机信号。随机信号无法用公式表示因而也无法预见任一时刻此信号的大小,最多只可用统计数学的方法指出在某一时刻此信号取得某一个值的概率,如图1.2.5所示。随机信号可分为平稳性随机信号和非平稳性随机信号两类。如果描述随机信号的统计数学参数(如平均值、均方根值、概率密度函数等)都不随时间的变化而变化,则这种信号称为平稳性随机信号;反之,如果在不同采样时间内测得的那些统计数学参数不能看成常数,则这种信号就称为非平稳性随机信号。

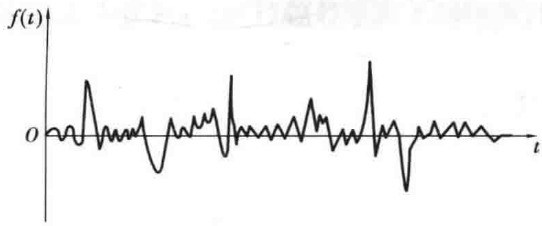


图1.2.5 非确定性信号

(2)确定信号

能够用明确的数学关系式描述的信号,或者可用实验的方法以足够的精度重复产生的信号,称为确定信号。例如,电路分析中常用的正弦、余弦信号就是确定信号。从信息量的角度出发,确定信号不具有信息量或新的信息。但确定信号作为理想化模型,其基本理论与分析方法是研究随机信号的基础,在此基础上根据统计特性可进一步研究随机信号。本书的研究只涉及确定信号。

1.2.5 因果信号与非因果信号

按信号所存在的时间范围,可以将信号分为因果信号与非因果信号。当$t<0$时,连续信号$f(t)=0$,信号$f(t)$是因果信号;反之,则为非因果信号;当$n<0$时,离散信号$f(n)=0$,则信号$f(n)$是因果信号;反之,则为非因果信号。

1.2.6 常用信号

(1)实指数信号

实指数信号的表达式为

$$f(t) = Ke^{\alpha t} \tag{1.2.7}$$

其中,K 和 α 为实数。$\alpha=0$ 时,信号不随时间变化,成为直流信号;$\alpha>0$ 时,信号随时间增长;$\alpha<0$ 时,信号随时间衰减。$|\alpha|$的大小反映信号随时间增、减的速率。通常将 $\tau=\frac{1}{|\alpha|}$称为指数信号的时间常数。τ 越大,指数信号的增长或衰减速率越慢;τ 越小,指数信号的增长或衰减速率越快。K 为信号在 $t=0$ 时刻的初始值。实指数信号如图 1.2.6 所示。

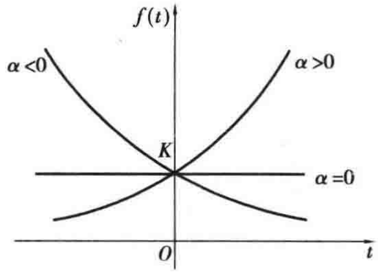


图 1.2.6 实指数信号

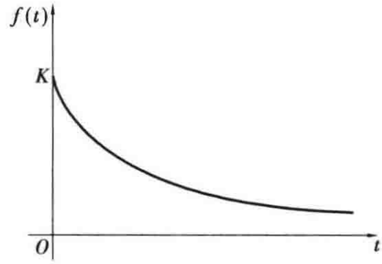


图 1.2.7 单边指数信号

实际中用得比较多的是单边指数信号,其信号波形如图 1.2.7 所示,表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t<0 \\ Ke^{-\frac{t}{\tau}} & t>0 \end{cases} \tag{1.2.8}$$

(2)正弦信号

正弦信号的一般表达式为

$$f(t) = K\sin(\omega t+\theta) \tag{1.2.9}$$

其中,K 是振幅,ω 是角频率,θ 是初相,周期 $T=\frac{2\pi}{\omega}$,频率 $f=\frac{1}{T}$。正弦信号的波形如图 1.2.8 所示。

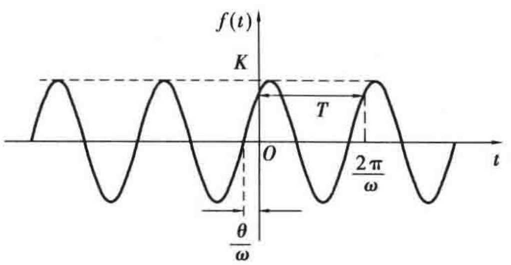


图 1.2.8 正弦信号

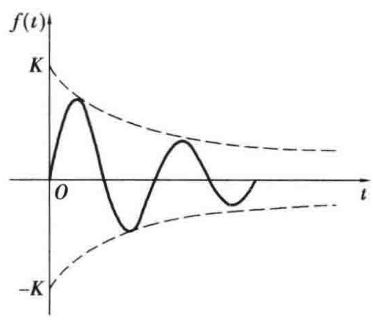


图 1.2.9 单边正弦减幅振荡信号

(3)复指数信号

当实指数信号中的 α 为复数时,$f(t)$为复指数信号,即

$$f(t) = Ke^{st} \tag{1.2.10}$$

其中,$s=\sigma+j\omega$,σ 是复数 s 的实部,ω 是复数 s 的虚部。根据欧拉公式

$$e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j\sin(\omega t) \tag{1.2.11}$$

式(1.2.10)展开为

$$f(t) = Ke^{\sigma t}\cos(\omega t) + jKe^{\sigma t}\sin(\omega t) \tag{1.2.12}$$

式(1.2.12)表明,复指数信号可分解为实部与虚部。实部为振幅随时间变化的余弦函数,虚部为振幅随时间变化的正弦函数。可分别用波形画出实部、虚部变化的情况。指数因子 s 的实部 σ 表征了正弦和余弦函数的振幅随时间变化的情况。若 $\sigma > 0$,正弦、余弦信号是增幅振荡;若 $\sigma < 0$,正弦、余弦信号是减幅振荡。指数因子 s 的虚部 ω 是正弦、余弦信号的角频率。

综上所述,复指数信号具有以下特性:

①若 $\sigma = 0$,即 s 为虚数时,则正弦、余弦信号为等幅振荡;

②若 $\omega = 0$,即 s 为实数时,则复指数为一般的指数信号;

③若 $\sigma = 0$ 且 $\omega = 0$,即 $s = 0$ 时,则复指数变为直流信号。

在实际中,虽然没有复指数信号,但其概括了多种情况,因而复指数信号成为一种非常重要的信号,在信号分析理论中,能用它来描述各种基本信号。图 1.2.9 所示为 $\sigma < 0$ 且 $\omega \neq 0$ 时的单边正弦减幅振荡信号。

(4)采样信号

采样信号 $Sa(t)$ 常在通信等领域的信号处理中应用,其信号定义为

$$Sa(t) = \frac{\sin t}{t} \tag{1.2.13}$$

其信号波形如图 1.2.10 所示。可以证明 $Sa(t)$ 信号是偶函数,当 $t \to \pm\infty$ 时,$Sa(t)$ 信号振幅衰减,且 $Sa(\pm k\pi) = 0$。其中,k 为整数。$Sa(t)$ 信号还有下列性质,即

$$\int_0^{\infty} Sa(t)\,dt = \frac{\pi}{2} \tag{1.2.14}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} Sa(t)\,dt = \pi \tag{1.2.15}$$

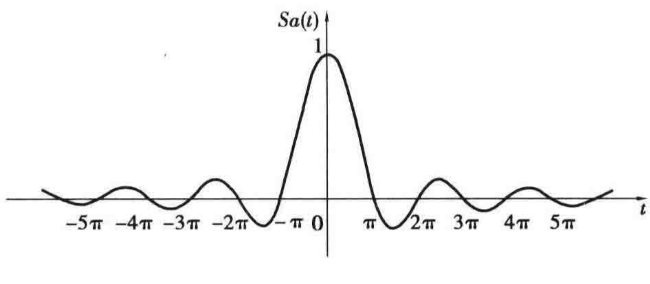


图 1.2.10　采样信号 $Sa(t)$

(5)矩形脉冲信号

幅度为 1,脉冲宽度为 τ 的矩形脉冲信号常用 $g_\tau(t)$ 表示,其定义为

$$g_\tau(t) = \begin{cases} 1 & |t| < \dfrac{\tau}{2} \\ 0 & |t| > \dfrac{\tau}{2} \end{cases} \tag{1.2.16}$$

其信号波形如图 1.2.11 所示。由于其形状像一扇门,它又常被称为门函数。

(6) 符号函数 $sgn(t)$

符号函数是在 $t>0$ 时为 1，$t<0$ 时为 -1 的函数，其定义为

$$sgn(t) = \begin{cases} 1 & t > 0 \\ -1 & t < 0 \end{cases} \tag{1.2.17}$$

其信号波形如图 1.2.12 所示。

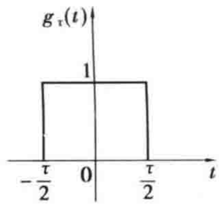


图 1.2.11 门函数

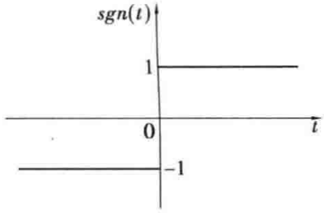


图 1.2.12 符号函数 $sgn(t)$

1.3 信号的基本运算

在系统分析中，常遇到信号的一些基本运算——加、乘、平移、反转及尺度变换等。

1.3.1 相加和相乘

(1) 相加

信号 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 之和是指同一瞬间两信号的函数值相加所构成的信号，即

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) \tag{1.3.1}$$

图 1.3.1 所示为信号 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 之和。

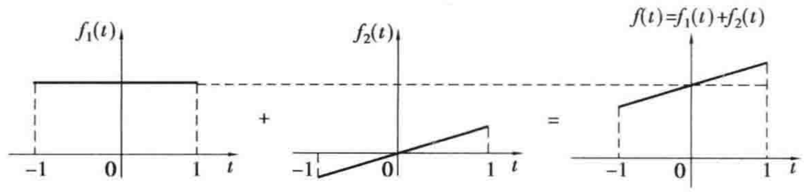


图 1.3.1 信号相加

(2) 相乘

信号 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 相乘是指同一瞬间两信号的函数值之积所构成的信号，即

$$f(t) = f_1(t) \cdot f_2(t) \tag{1.3.2}$$

图 1.3.2 所示为信号 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 之积。

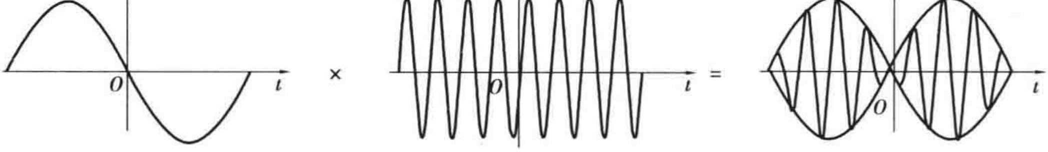


图 1.3.2 信号相乘

1.3.2　平移、反转和尺度变换

(1)平移

若将信号$f(t)$的波形沿时间轴向右平移$t_0(t_0>0)$时间,则得到信号$f(t-t_0)$。若沿时间轴向左平移t_0时间,则得到信号$f(t+t_0)$,如图1.3.3所示。

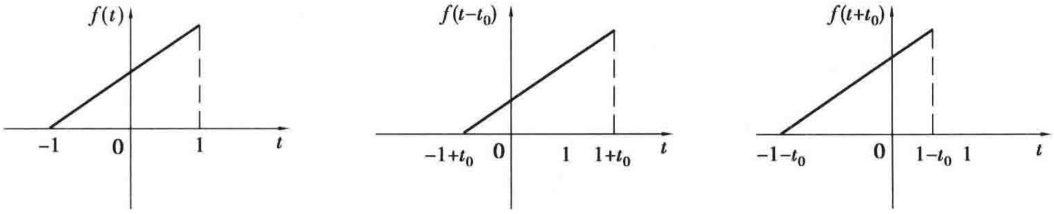


图1.3.3　信号的平移

(2)反转

信号的反转,又称为信号的倒置。在数学上,信号的反转就是将信号$f(t)$中的自变量t换为$-t$,从而得到反转信号$f(-t)$;从几何图形上看,$f(t)$的波形与$f(-t)$的波形关于纵轴对称,即将信号$f(t)$以纵坐标轴为对称轴反转得到$f(-t)$,如图1.3.4所示。

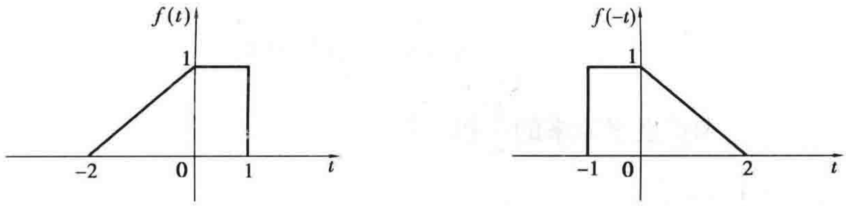


图1.3.4　信号的反转

如果将平移与反转相结合,就可得到信号$f(-t-t_0)$和$f(-t+t_0)$。

例1.2　已知$f(t)$的波形如图1.3.5所示,求$f(-t-t_0)$和$f(-t+t_0)$。

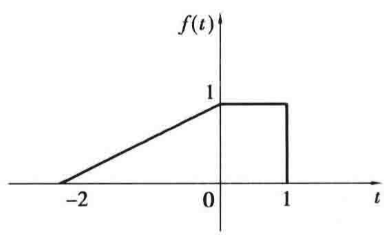


图1.3.5　例1.2用图

解　方法1:先反转后平移

$$f(t)\rightarrow f(-t)\rightarrow f(-t-t_0)=f[-(t+t_0)]$$

和

$$f(t)\rightarrow f(-t)\rightarrow f(-t+t_0)=f[-(t-t_0)]$$

信号变化过程如图1.3.6所示。

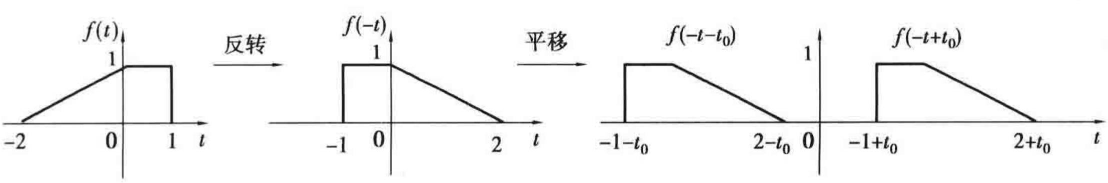


图1.3.6　先反转后平移

方法 2:先平移后反转

$$f(t) \to f(t-t_0) \to f(-t-t_0) = f[-(t+t_0)]$$

和

$$f(t) \to f(t+t_0) \to f(-t+t_0) = f[-(t-t_0)]$$

其信号过程如图 1.3.7 所示。

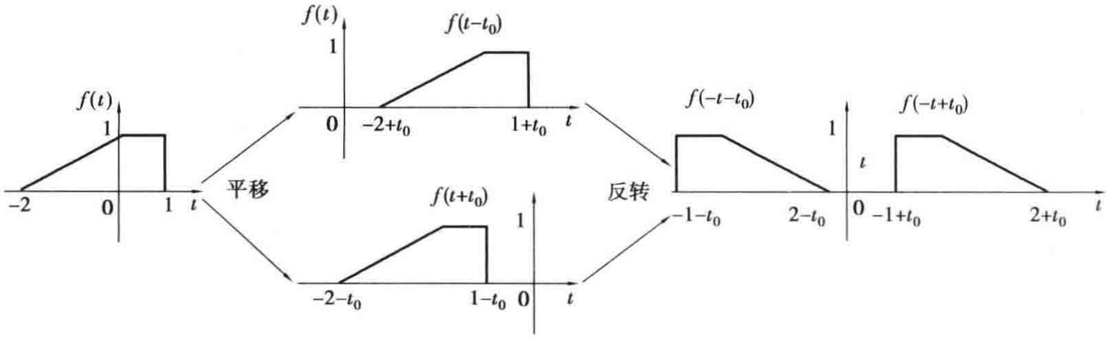


图 1.3.7　先平移后反转

比对两种方法,最后得到的 $f(-t-t_0)$ 和 $f(-t+t_0)$ 的波形相同。

(3)尺度变换

将信号 $f(t)$ 的自变量 t 乘以一个常数 $a(a>0)$ 所得的信号 $f(at)$,称为 $f(t)$ 的尺度变换信号。若 $a>1$,$f(at)$ 的波形是将 $f(t)$ 的波形沿 t 轴压缩至原来的 $\frac{1}{a}$ 倍;若 $0<a<1$,$f(at)$ 的波形是将 $f(t)$ 的波形沿 t 轴扩展至原来的 $\frac{1}{a}$ 倍。例如,$f(t)$ 为录音带信号,则 $f(2t)$ 相当于以 2 倍速度快速播放;$f\left(\frac{1}{2}t\right)$ 是以一半的速度慢速播放。信号 $f(t)$ 的波形如图 1.3.8(a)所示,图 1.3.8(b)和图 1.3.8(c)分别为 $f(2t)$ 和 $f\left(\frac{t}{2}\right)$ 的波形。

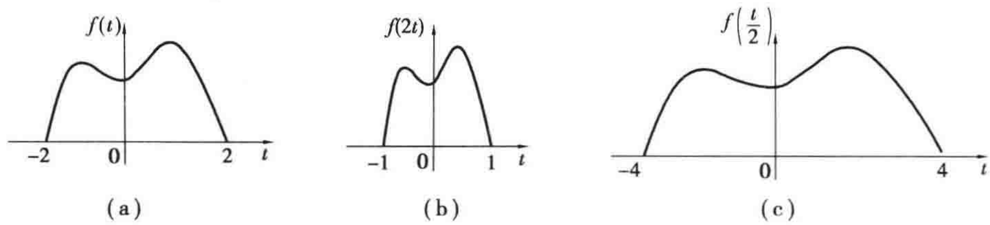


图 1.3.8　信号的尺度变换

例 1.3　信号 $f(t)$ 的波形如图 1.3.9(a)所示,画出信号 $f(-2t+4)$ 的波形。

解　先反转求出 $f(-t)$,如图 1.3.9(b)所示;然后向右平移 4,求得 $f(-t+4)$,如图 1.3.9(c)所示;最后尺度变换,即压缩为原来的 $\frac{1}{2}$,求得 $f(-2t+4)$ 如图 1.3.9(d)所示。

例 1.4　$f(t)$ 的波形如图 1.3.10(a)所示,画出 $f(-2(t-1))$ 的波形。

解　首先反转求得 $f(-t)$,如图 1.3.10(b)所示;再压缩求得 $f(-2t)$,如图 1.3.10(c)所示;最后平移求得 $f(-2(t-1))$,如图 1.3.10(d)所示。