

信号与系统

曾禹村 张宝俊 吴鹏翼 编著



北京理工大学出版社

TN 911.6-43

第 179

0637880

信号与系统

曾禹村 张宝俊 吴鹏翼 编著



21113000635949

北京理工大学出版社



(京) 新登字 149 号

内 容 简 介

本书深入浅出而又全面系统地论述了信号与系统分析的基本理论和方法。全书共九章。内容包括：信号与系统，连续时间系统的时域分析，离散时间系统的时域分析，连续时间信号的谱分析，连续时间系统的频域分析，离散时间信号与系统的频域分析，连续时间系统的复频域分析，Z 变换与离散时间系统的 z 域分析，连续与离散时间系统的状态变量分析。每章都有较多精选的例题和习题。

本书结构新颖，内容全面，论述严谨，联系实际，内容衔接的梯度小，便于自学。

本书可作为电子工程、通信工程、信息科学、生物医学工程、自动化和计算机类有关专业信号与系统课程的教材，也可供有关专业的研究生、教师和科技人员参考。

信 号 与 系 统

曾禹村 张宝俊 吴鹏翼 编著

*

北京理工大学出版社出版发行

各地新华书店经售

国防科工委印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本 15.875 印张 411 千字

1992 年 12 月第一版 1992 年 12 月第一次印刷

ISBN 7-81013-602-X/TN·33

印数：1-5000 册 定价：6.85 元

前 言

《信号与系统》是电子工程系各专业的一门主干课程。它的任务是研究信号与系统分析的基本理论与方法，为进一步研究信息处理，通信和控制等理论奠定基础。随着科学技术的发展，信号与系统的概念和分析方法已应用于许多不同领域与学科中。因此，它不仅是电子工程专业教学中一门重要的课程，而且也是工科各专业中一门非常有用的课程。

几年来，我们根据教学改革的需要、学科的发展以及在教学科研中积累的经验，编写了教材，已在几届学生中使用过。现将该教材修改、整理编成本书。

本书深入浅出而又全面系统地论述了信号与系统分析的基本理论和方法。全书共九章。内容包括信号与系统，连续时间系统的时域分析，离散时间系统的时域分析，连续时间信号的谱分析，连续时间系统的频域分析，离散时间信号与系统的频域分析，连续时间系统的复频域分析， Z 变换及离散时间系统的 Z 域分析，连续与离散时间系统的状态变量分析。每章都有较多精选的例题和习题。

本书特点：

(1) 在内容上，连续时间信号与系统和离散时间信号与系统并重；在教材体系上采取连续与离散并行的方法。这样处理不仅适应了当前超大规模集成电路和计算机技术广泛应用的大趋势，也有利于学生从离散与连续的对比中加深理解和掌握两种信号与系统分析的基本理论和方法。

(2) 结合学科发展，注意理论联系实际。这不仅可开阔学生的视野，激发学生学习的兴趣，而且通过适当应用可以加深学生

对所学基本理论的进一步理解。

(3) 内容衔接的梯度小，便于自学。内容取舍可浅可深，以适应不同层次教学与读者的需要。

本书由曾禹村主编。第五、八、九章由张宝俊编写，第二、七章由吴鹏翼编写，其余各章由曾禹村编写。李瀚荪教授对本书编写工作提出宝贵意见，校系负责同志和信号与系统课程组的有关同志对本书编写工作给予许多支持和帮助。

本书初稿承北方交通大学吴湘淇教授审阅，提出了许多宝贵意见，作者在此表示衷心的感谢。

限于水平和工作中的疏忽，书中难免有错误与不妥之处，诚恳地欢迎读者批评指正。

作 者
于北京理工大学
1991 年 12 月

目 录

第一章 信号与系统的基本概念

1. 1 引言	(1)
1. 2 信号的基本概念	(2)
1. 3 信号的分类	(5)
1. 4 信号的基本运算与波形变换	(8)
1. 5 基本连续时间信号	(14)
1. 6 基本离散时间信号	(23)
1. 7 系统的基本概念	(32)
1. 8 系统的特性与分类	(39)
1. 9 线性时不变系统的分析	(46)
习题	(48)

第二章 连续时间系统的时域分析

2. 1 引言	(54)
2. 2 LTI 系统的微分方程描述	(54)
2. 3 零输入响应和零状态响应	(60)
2. 4 用冲激函数表示任意信号 卷积积分	(66)
2. 5 卷积积分的运算和图解	(69)
2. 6 单位冲激响应的计算	(72)
2. 7 卷积积分的性质	(76)
2. 8 奇异函数	(83)
2. 9 卷积积分的数值解	(89)
2. 10 连续时间系统的模拟	(91)
习题	(94)

第三章 离散时间系统的时域分析

3. 1 引言	(100)
---------------	---------

3. 2	离散时间系统的差分方程	(100)
3. 3	LTI 离散时间系统的零输入响应	(107)
3. 4	用抽样序列表示任意序列 单位抽样响应	(111)
3. 5	LTI 离散时间系统的零状态响应 卷积和	(118)
3. 6	卷积和的图解	(123)
3. 7	用单位抽样响应表示系统的性质	(130)
3. 8	反卷积及其应用	(135)
	习题	(138)

第四章 连续时间信号的谱分析

4. 1	引言	(144)
4. 2	复指数函数的正交性	(146)
4. 3	周期信号的表示: 连续时间傅里叶级数	(148)
4. 4	波形对称性与傅里叶系数	(157)
4. 5	周期信号的频谱	(165)
4. 6	傅里叶级数的收敛性 吉伯斯现象	(172)
4. 7	非周期信号的表示: 连续时间傅里叶变换	(175)
4. 8	傅里叶级数与傅里叶变换的关系	(185)
4. 9	连续时间傅里叶变换的性质与应用	(189)
4. 10	能量频谱 非周期信号的帕色伐尔定理	(213)
	习题	(214)

第五章 连续时间系统的频域分析

5. 1	引言	(226)
5. 2	连续时间系统的频率响应	(227)
5. 3	傅里叶变换分析法	(236)
5. 4	连续时间傅里叶变换的极坐标表示 无失真传输	(241)
5. 5	系统的分解 级联和并联结构	(247)
5. 6	理想滤波器	(254)
5. 7	可实现滤波器的原理 巴特沃斯逼近	(260)
	习题	(268)

第六章 离散时间信号的谱分析及其系统的频域分析

6. 1	引言	(274)
6. 2	抽样定理	(275)

6. 3	周期的离散时间信号的表示 离散傅里叶级数	(283)
6. 4	LTI 离散时间系统对周期序列的响应	(292)
6. 5	非周期离散时间信号的表示 离散时间傅里叶变换	(295)
6. 6	离散傅里叶级数和离散时间傅里叶变换的关系	(303)
6. 7	离散傅里叶变换	(308)
6. 8	离散时间傅里叶变换的性质	(313)
6. 9	时域卷积定理及其应用 LTI 离散时间系统对非周期序列的响应	(318)
6. 10	周期卷积定理及其应用 用 DFT 计算两个有限长序列的卷积	(322)
6. 11	频域卷积定理及其应用	(326)
6. 12	离散时间傅里叶变换的性质小结	(329)
	习题	(333)
第七章 拉普拉斯变换 连续时间系统的复频域分析		
7. 1	引言	(341)
7. 2	拉普拉斯变换	(341)
7. 3	拉氏变换的性质	(350)
7. 4	常用拉氏变换对	(356)
7. 5	拉普拉斯反变换	(359)
7. 6	单边拉氏变换	(366)
7. 7	电路的 S 域模型	(370)
7. 8	系统的复频域分析法	(375)
7. 9	系统函数	(381)
7. 10	罗斯-霍尔维兹稳定准则	(391)
	习题	(394)
第八章 Z 变换 离散时间系统的 z 域分析		
8. 1	引言	(399)
8. 2	Z 变换	(399)
8. 3	Z 变换的性质	(406)
8. 4	常用序列 Z 变换表	(414)
8. 5	Z 反变换	(415)
8. 6	Z 变换分析法	(418)

8. 7 离散时间系统的系统函数	(421)
8. 8 由零极点图确定系统的频率响应	(427)
8. 9 Z 变换和拉氏变换的关系	(433)
8. 10 Z 变换在数字滤波中的应用	(438)
习题	(442)

第九章 连续时间与离散时间系统的状态变量分析

9. 1 引言	(448)
9. 2 状态变量和状态方程	(449)
9. 3 状态方程的建立	(455)
9. 4 状态方程的时域解法	(463)
9. 5 状态方程的变换域解法	(471)
9. 6 状态方程的数值解法	(478)
9. 7 系统的可控制性和可观测性	(485)
习题	(491)

主要参考文献

第一章 信号与系统的基本概念

1.1 引言

信号与系统的应用范围是十分广泛的。在通信、雷达、电视、图像处理、自动控制、计算机、集成电路、生物医学工程、遥感以及声学、核物理、地震学、振动学和化学过程控制等科学和技术领域中都有广泛的应用。例如，在电路中随时间变化的电流或电压是信号，电路本身是一个系统。而电路对输入信号的响应是输出信号；在汽车中，驾驶员脚踏油门产生压力使汽车加速，这时油门板上的压力是信号，汽车本身是一个系统，而汽车在油门板加压下产生加速度是响应，也即输出信号；在 X 光 CT（计算机断层）扫描机中，X 光透射人体组织观测体内病变，这时透射人体的 X 光是信号，CT 扫描机是系统，而观测到的体内病变（断层图像）是输出信号。可见，随着科学技术的发展，信号与系统的概念已应用于许多不同的领域与学科中。

多年来，《信号与系统》已成为培养电子工程高级专门人才的一门重要课程。该课程主要讨论信号与系统的基本理论和基本分析方法，为进一步研究通信理论、控制理论、信号处理和信号检测等学科内容奠定必要的基础。

本章从信号与系统的直观概念、数学描述与表示入手，讨论信号与系统的基本概念和基本分析方法，以便使广大初学这门课程的学生对信号与系统的概念和表示方法有一初步而概括的理解。

1.2 信号的基本概念

信号是反映信息的物理量，如光、电、声、位移、速度、加速度、力、温度、颜色等等。根据反映信息的物理量不同，信号可分为光信号、电信号、声信号、位移信号、……、等等。这些信号有的是相关的，有的是独立的，各有其不同的性质。但是，它们都有一种共同的表现形式，即在一定的条件下，其物理量值都随时间变化。若以时间为横坐标，物理量值为纵坐标，便可以得到一种变化的图形，这就是我们所说的信号波形。在一般情况下，信号所含的信息总是寄寓于变化的波形之中。例如，人的声道系统发出的语言信号就是声压随时间的起伏变化。图 1-1 是一个语音信号“您们好”的录音波形。从图中可见，不同语音信号波形不同，上面句子对应于一串特定的波形。上述信号波形可以通过实验测得。由于电信号具有便于测量、传送、变换与处理等优点，因此非电信号通常总是先变换为电信号再进行处理。例如，上述语音信号波形就是先通过话筒变为电信号再经过放大处理后测得的。通过信号波形可以得到有用的信息，处理出需要的结果。

在数学上，信号可以表示为一个或多个独立变量的函数。例如，语音信号可表示为声压 x 随时间 t 变化的函数，记为 $x(t)$ ；静止图像信号可表示为亮度（或称灰度） f 随二维空间坐标 x, y 变化的函数，记为 $f(x, y)$ ；活动图像信号可表示为亮度 f 随二维空间坐标 x, y 和时间 t 变化的函数，记为 $f(x, y, t)$ 等等。本书讨论范围仅限于一个独立变量的函数，而且为了方便，以后总以时间表示自变量，尽管在某些具体应用中，自变量不一定是时间。例如，在气象预报中，我们还关心气压、温度和风速随高度的变化等等。所以，时间函数 $x(t)$ 是本书所讨论信号的数学模型。

信号特性可以从时间特性和频率特性两方面来描述。信号的时间特性是从时间域对信号进行分析。例如，信号是时间的函数，

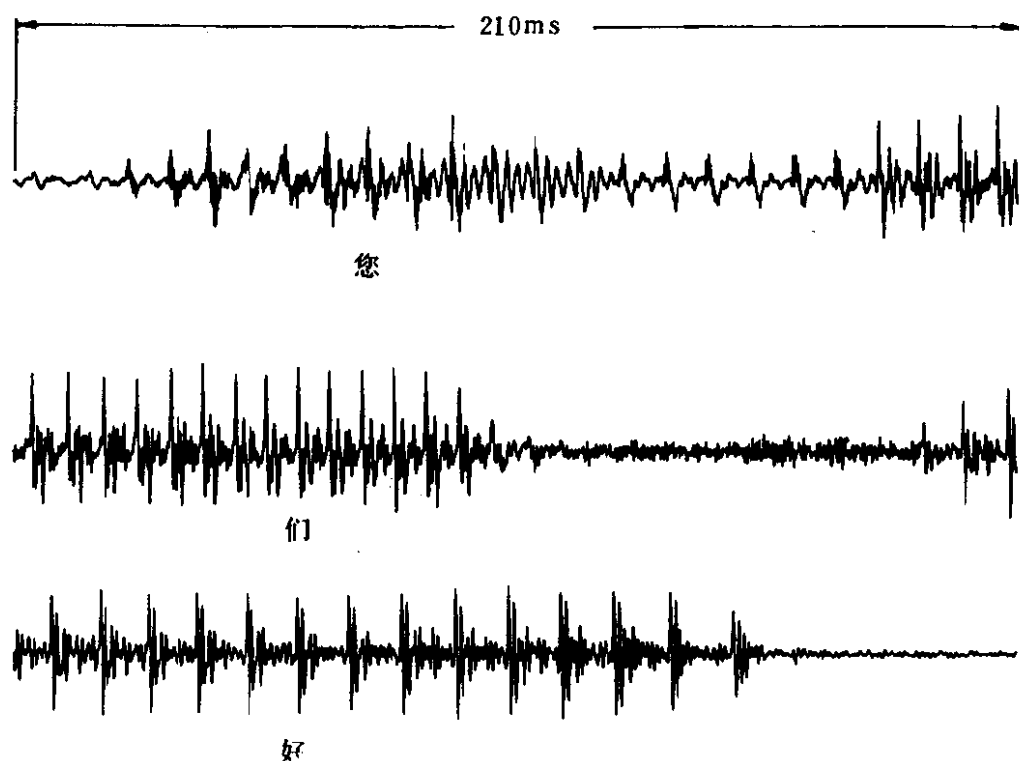


图 1-1 语音信号波形举例

它具有一定波形。早期的信号波形分析，只是计算信号波形的最大值、平均值、最小值；随后发展到波形的时间域分析，如出现时间的先后，持续时间的长短，重复周期的大小，随时间变化的快慢以及波形的分解和合成；现在已发展到对随机波形的相关分析，即波形与波形的相似程度等。信号的频率特性是从频率域对信号进行分析，例如任一信号都可以分解为由许多不同频率（呈谐波关系）的余弦分量组成的，而每一余弦分量则以它的振幅和相位来表征。图 1-2 (a)(b) 和 (c) 示出了一个信号 $x(t)$ 的波形分解、振幅频谱和相位频谱图。其中，振幅频谱表征该信号所具有那些谐波分量的振幅；相位频谱表征各谐波分量在时间原点所具有的相位。振幅频谱和相位频谱合在一起可以确定该信号的分

解波形和合成波形。例如从图 1-2 所示的频谱中可见，在 ω_0 和 $2\omega_0$ 处有两条谱线，其幅度相同，相位都为零。说明该信号可分解为由两个谐波合成的，一个谐波的角频率为 ω_0 ，另一个为 $2\omega_0$ ，它们的振幅相等，相位都为零。因此根据这些参数就可绘出该信号的分解波形和合成波形。

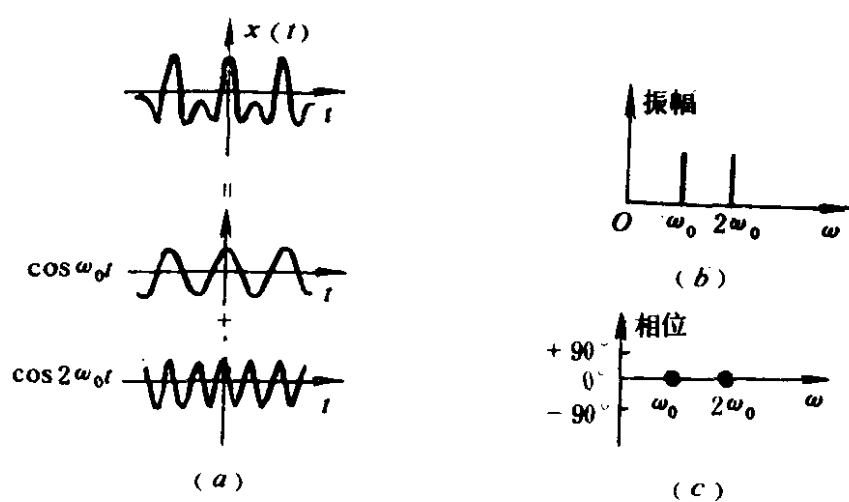


图 1-2 信号分解举例

可见，时域和频域反映了对信号的两个不同的观测面，即两种不同观察和表示信号的方法。图 1-3 (a) 和 (c) 就是从这两个不同观测面来观察和表示信号的。从时域上观察，其波形图 $x(t)$ 如图 1-3 (a) 所示，它是由若干个谐波组成的，这些谐波的波形图如图 1-3 (b) 所示。从频域上观测，其频谱图如图 1-3 (c) 所示，图中给出的信号频谱是和图 1-3 (b) 中的谐波一一对应的。总之，信号的时间特性和频率特性有着密切的联系，不同的时间特性将导致不同的频率特性，这种关系将在第四章进一步讨论。

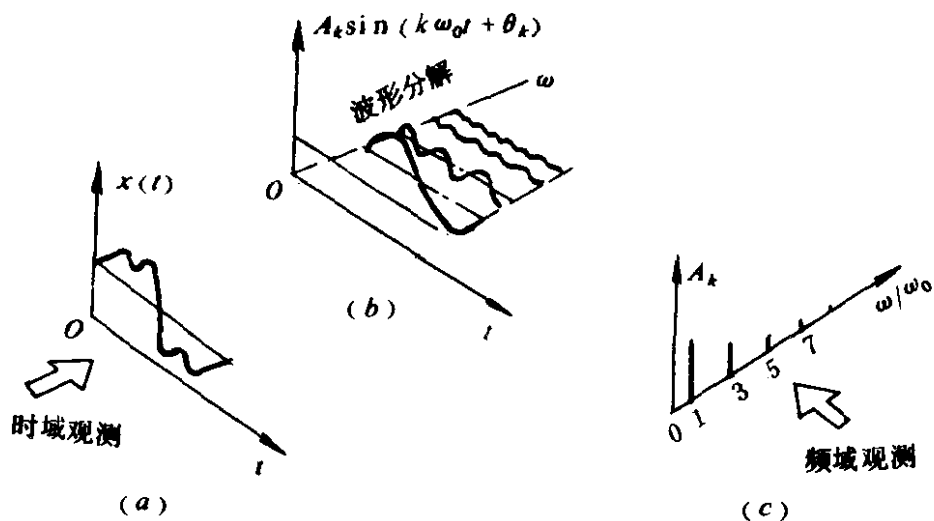


图 1-3 两种不同观测信号的方法

1.3 信号的分类

前面已经指出，时间函数 $x(t)$ 是信号的数学模型。按照 $x(t)$ 的不同性质，在工程上往往有下列几种分类方法。

按照 $x(t)$ 是否可以预知，通常把信号分为确定信号和随机信号两大类。确定信号预先可以知道它的变化规律，是时间 t 的确定函数。例如，在电路分析基础课程中讨论的正弦信号和各种形状的周期信号都是确定信号。随机信号不能预知它随时间变化的规律，不是时间的确定函数。例如，半导体载流子随机运动所产生的噪声和从目标反射回来的雷达信号（其出现的时间与强度是随机的）都是随机信号。所有的实际信号在一定程度上都是随机的，因为我们不能预知在未来时间实际信号将是什么样的。但是在一段时间内由于它的变化规律比较确定，可以近似为确定信号。所以，为了便于分析，我们首先研究确定信号，在此基础上根据随机信号的统计规律再研究随机信号。本课程只分析确定信号。

按照 $x(t)$ 的自变量 t 是否能连续取值，通常又把信号分为连续时间信号和离散时间信号两类。连续时间信号的自变量 t 可以

连续取值，除了若干个不连续点外，在任何时刻都有定义，记为 $x(t)$ ，如图 1-4 (a) 所示。离散时间信号的自变量 n 不能连续取值，即仅在一些离散时刻 (n 为整数值) 有定义，记为 $x[n]$ ，其中 $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ，如图 1-4 (b) 所示。为了区分这两种信号，这里除了用 t 表示连续时间变量，用 n 表示离散时间变量外，还用圆括号 $(\cdot)$ 把自变量括在里面表示连续时间信号，而用方括号 $[\cdot]$ 表示离散时间信号。此外，由于 $x[n]$ 仅仅在 n 为整数值上有定义，它在图上原是一系列点，为了醒目起见，这里画成一条条垂线，垂线高度就等于 $x[n]$ ，例如 $x[-1]$ 、 $x[0]$ 、 $x[1]$ 、 $x[2]$ ，……，等等。因此 $x[n]$ 是一个数字序列，简称为序列。

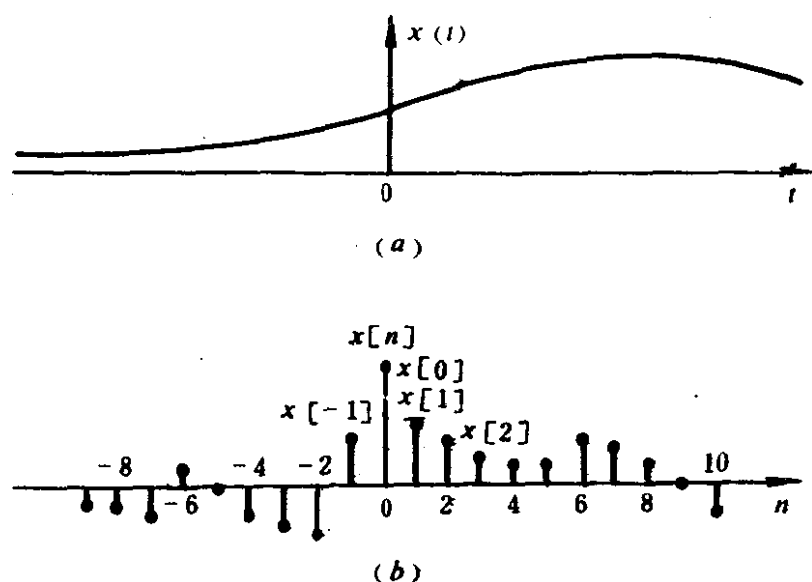


图 1-4 连续时间信号与离散时间信号

按照 $x(t)$ 是否按一定时间间隔重复，信号可分为周期信号和非周期信号两类。周期信号按一定的时间间隔重复变化，而非周期信号的变化则是不重复的。

按照信号的能量或功率为有限值，信号可分为能量信号和功率信号两类。不论电压信号或电流信号，信号平方的无穷积分总代表加到 1Ω 电阻上的总能量，简称为信号能量 W ，即

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt \quad (1-1)$$

而信号平方在有限时间间隔内的积分再除以该间隔则代表加到 1Ω 电阻上的平均功率，即

$$P = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t) dt \quad (1-2)$$

能量信号的总能量为有限值而平均功率为零；功率信号的平均功率为有限值而总能量为无限大。一般，周期信号都是功率信号，而非周期信号则可能出现三种情况：持续时间有限的非周期信号为能量信号，如图 1-5 (a) 所示的脉冲信号；持续时间无限、幅度有限的非周期信号为功率信号，如图 1-5 (b) 所示；持续时间无限、幅度也无限的非周期信号为非功率非能量信号，如图 1-5 (c) 所示的单位斜坡信号 $tu(t)$ 。

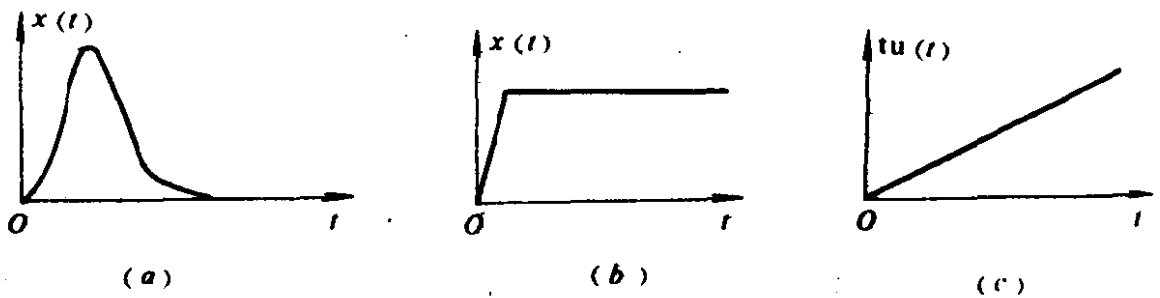


图 1-5 三种非周期信号

按照 $x(t)$ 是否等于它的复共轭 $x^*(t)$ ，信号又可分为实信号和复信号两类。实信号 $x(t) = x^*(t)$ ，它是一个实函数；复信号 $x(t) \neq x^*(t)$ ，它是一个复函数，即

$$x(t) = x_1(t) + jx_2(t) \quad (1-3)$$

其中， $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 都是实函数。实际信号一般都是实信号，但是为了简化运算，常常引用复信号并以其实部或虚部表示实际信号。例如，常用复指数信号 $e^{j\omega t} = \cos\omega t + j\sin\omega t$ 和 $e^{(-\sigma t + j\omega t)} = e^{-\sigma t}\cos\omega t + je^{-\sigma t}\sin\omega t$ 表示余弦、正弦信号和幅度衰减的余弦、正弦振荡信号等

等。

1.4 信号的基本运算与波形变换

在信号与系统中经常要对信号进行运算和波形变换,研究信号通过系统各部件后的波形变化。例如,通过加法器、乘法器、放大器、延时器、积分器和微分器等部件后的波形。因此,掌握信号的各种基本运算及其对应的波形是非常必要的。下面我们分别讨论信号的几种基本运算和波形。

1. 加法运算

任一瞬时的和信号值 $x(t)$ 或 $x[n]$ 等于同一瞬时相加信号瞬时值的和。即

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) \quad (1-4)$$

或

$$x[n] = x_1[n] + x_2[n] \quad (1-5)$$

2. 乘法运算

任一瞬时的乘积信号值 $x(t)$ 或 $x[n]$ 等于同一瞬时相乘信号瞬时值的积。即

$$x(t) = x_1(t)x_2(t) \quad (1-6)$$

或

$$x[n] = x_1[n]x_2[n] \quad (1-7)$$

3. 标乘

信号 $x_1(t)$ 或 $x_1[n]$ 和一个常数 a 相乘定义为

$$x(t) = ax_1(t) \quad (1-8)$$

或

$$x[n] = ax_1[n] \quad (1-9)$$

4. 反转

信号自变量的变换,将使信号波形产生变化。例如以变量 $-t$ 代替 $x(t)$ 中的独立变量 t 可得 $x(-t)$,它是 $x(t)$ 以 $t=0$ 为轴反转(折叠)而得的波形如图 1-6 所示。同理,以变量 $-n$ 代替 $x[n]$ 中的离散变量 n 可得 $x[-n]$,它是 $x[n]$ 以 $n=0$ 为轴反转而得的