

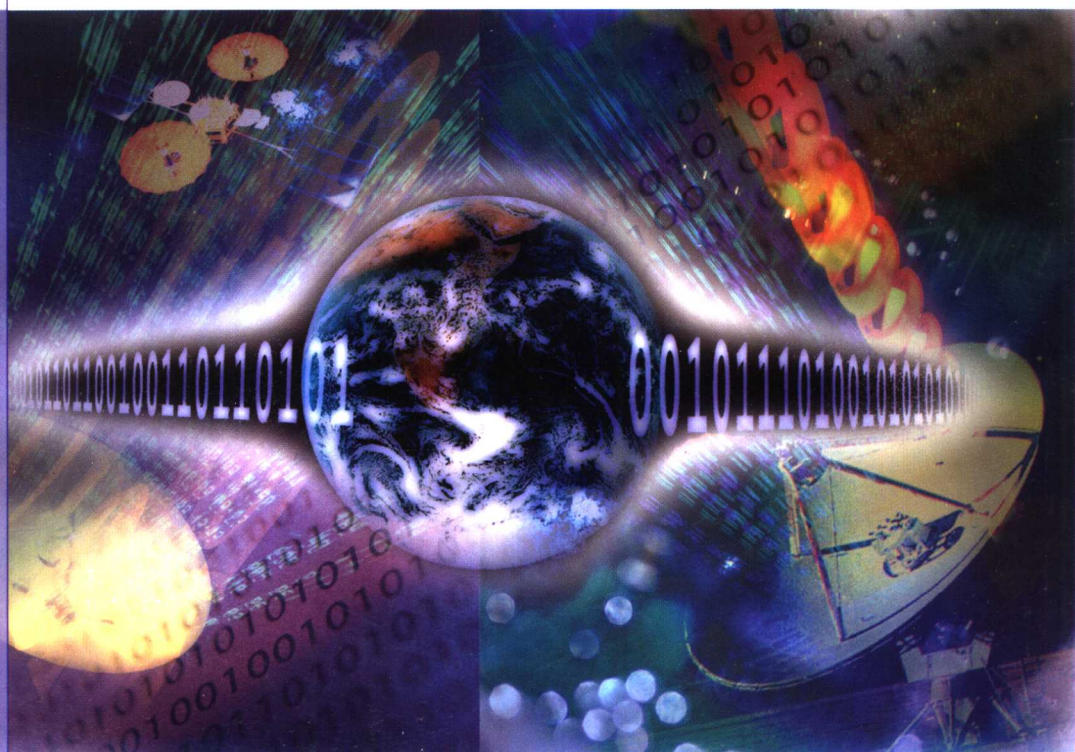


应用型本科人才培养创新教材出版工程

信号与系统

张维玺 编著

张宇飞 主审



 科学出版社
www.sciencep.com

● 应用型本科人才培养创新教材出版工程

信号与系统

张维玺 编 著
张宇飞 主 审

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面系统地论述了信号与系统分析的基本理论。全书分两个部分,即连续时间信号与连续时间系统部分和离散时间信号与离散时间系统部分,共13章,讨论了信号与系统的各种分析方法。本书内容丰富,论述周密,紧密结合专业应用和工程实际,注重物理概念的阐述。在内容的叙述方法、前后次序、习题的安排上应用了循序渐进、归纳对比、加强练习等教学法原则。

本书可作为电气信息、通信、自动控制、信息工程、电子工程等专业的应用型教材,也可供有关专业师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统/张维玺编著. —北京:科学出版社,2004

(应用型本科人才培养创新教材出版工程)

ISBN 7-03-013831-7

I. 信… II. 张… III. 信号与系统-高等学校-教材 IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 066744 号

责任编辑:许 远 余 丁/责任校对:钟 洋

责任印制:安春生/封面设计:王凌波

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年9月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2004年9月第一次印刷 印张:23 3/4

印数:1—4 000 字数:500 000

定价:33.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<环伟>)

前 言

随着微电子技术的迅速发展和电子计算机的广泛应用,系统理论的基本概念和研究方法非常迅速地进入了电子科学技术领域的各个学科,包括网络理论、通信工程、信息工程、自动控制、应用数学以及计算机技术等学科。不同学科之间相互影响、相互渗透、相互促进、共同发展是现代科学技术发展的重要特点。实际上,系统理论的引入已经使这些学科发生了深刻的变化。新概念、新理论、新方法和新技术的大量涌现,推动了电子科学技术的快速发展。“信号与系统”就是在上述学科发展基础上建立起来的一门新的理论课程,目前已成为电子科学技术领域各学科的共同理论基础课程。该课程的主要任务是研究信号和线性系统理论的基本概念和基本分析方法。

全书由连续时间信号和连续时间系统与离散时间信号和离散时间系统两部分组成。每部分的内容按照先信号分析后系统分析、先时间域分析后变换域分析、先输入—输出分析后状态空间分析的方式进行论述。这样,连续时间系统理论与离散时间系统理论之间,既保持了体系上的相对独立,又体现了内容上的并行特点。离散部分讨论采用与连续对照的方法进行,以避免概念阐述上不必要的重复;同时,也有利于学生对离散部分内容的理解和掌握,以及对连续内容的回顾和深化。

本书采用统一观点和方法阐述课程内容。我们认为,线性系统分析的理论依据是信号的分解特性和系统的线性特性。实现线性系统分析的统一观点和方法是任何实际信号都可以分解成众多基本信号分量的线性组合;线性系统对任一输入信号的响应可以看成是系统对众多基本信号分量分别作用时响应的叠加;不同的信号分解方式将导致不同的系统分析方法。由此可见,无论是连续时间系统的时间域、频率域和 S 域分析法,还是离散时间系统的时间域和 z 域分析法,它们在本质上都是“时间域”的,从而不难排除关于变换域分析的神秘感。实践表明,这种统一观点的处理方法,使学生对本课程中许多抽象概念的理解和分析方法的掌握变得规范化和简单化了。

由于冲激函数、阶跃函数等广义函数在本课程中的重要地位,因此给以严格的数学定义是必要的。书中对分配函数的概念和性质作了简要介绍,并从分配函数观点出发讨论了冲激函数及其性质。此外,在状态空间分析中引入了状态模型概念,以便使状态空间方程一般形式的引出更为合理。

全书共 13 章。第 1 章是绪论,介绍了信号与系统的一般概念和特性;第

2~6章集中讨论了连续时间信号的分解理论,将传统的卷积积分、傅里叶变换、拉普拉斯变换统一归结为实现信号分解的数学工具;第7~10章给出了连续时间系统传统的和近代的分析方法,其中第7~9章内容是与第3~6章内容相对应的,以便把信号分解方式与系统分析方法之间的关系清楚地呈现在读者面前;第11~13章讨论了离散时间信号的分析理论和离散时间系统的分析方法。每章后面编有一定数量的习题,主要用以检验、理解基本概念和熟练分析方法。

本书第1~9章由张维玺老师负责编写,其中朱幼莲老师编写了第3、4章,张俐老师负责了图形的绘制工作;第10章和第13章由李小玲老师编写,第11章由陈欣波老师编写,第12章由张春宇老师编写;张宇飞老师审阅了初稿并提出许多宝贵意见;全书由张维玺老师修改并统稿。在此特向他们致以衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 信号	1
1.2 常用信号	2
1.3 系统的表示	9
1.4 系统的状态	10
1.5 系统的零输入响应和零态响应	14
1.6 齐次性、可加性和叠加性	15
1.7 线性系统和非线性系统	15
1.8 时变系统和非时变系统	16
1.9 连续时间系统和离散时间系统	17
1.10 因果系统和非因果系统	17
1.11 瞬时系统和动态系统	18
1.12 典型系统的特性	19
本章小结	21
思考与练习	21
第 2 章 信号的正交分解	25
2.1 信号正交的概念	25
2.2 正交函数集	28
本章小结	30
思考与练习	30
第 3 章 周期信号的分解	32
3.1 三角形形式的傅里叶级数	32
3.2 指数形式的傅里叶级数	36
3.3 周期信号的频谱	37
本章小结	41
思考与练习	42
第 4 章 信号的时间域分解	45
4.1 单位阶跃信号	45
4.2 单位冲激信号	48
4.3 卷积	52

4.4 信号的时间域分解·····	59
本章小结·····	63
思考与练习·····	63
第5章 信号的频率域分解 ·····	67
5.1 傅里叶变换·····	67
5.2 常用信号的傅里叶变换·····	73
5.3 傅里叶变换的性质·····	81
本章小结·····	99
思考与练习·····	100
第6章 信号的复频率域分解 ·····	104
6.1 双边拉普拉斯变换·····	104
6.2 单边拉普拉斯变换·····	108
6.3 典型信号的单边拉普拉斯变换·····	122
6.4 单边拉普拉斯变换的性质·····	126
本章小结·····	140
思考与练习·····	140
第7章 连续时间系统的时间域分析 ·····	147
7.1 微分方程的建立·····	147
7.2 零输入响应的求法·····	152
7.3 零态响应的求法·····	157
7.4 响应的其他分解形式·····	166
本章小结·····	169
思考与练习·····	170
第8章 连续时间系统的频域分析 ·····	174
8.1 频率域分析基础·····	174
8.2 傅里叶级数分析法·····	180
8.3 无失真传输·····	182
8.4 理想滤波器·····	188
8.5 抽样定理·····	195
本章小结·····	200
思考与练习·····	201
第9章 连续时间系统的复频率域分析 ·····	205
9.1 引言·····	205
9.2 复频率域分析的另一种观点·····	209
9.3 系统方框图表示·····	218

9.4 系统的信号流图表示	223
9.5 连续系统的模拟	230
9.6 系统的稳定性	233
本章小结	248
思考与练习	248
第 10 章 连续时间系统的状态空间分析	253
10.1 引言	253
10.2 状态空间描述	254
10.3 状态空间方程的建立方法	259
10.4 状态方程的复频域解	271
10.5 连续系统状态方程的时间域解	276
10.6 连续时间系统的状态空间分析法	279
10.7 状态空间中系统稳定性的判断	280
本章小结	281
思考与练习	282
第 11 章 离散时间信号	285
11.1 离散时间信号	285
11.2 离散时间信号的时间域分解	291
11.3 z 变换	294
11.4 z 反变换	299
11.5 z 变换的基本性质	302
本章小结	308
思考与练习	309
第 12 章 离散时间系统的时间域分析	314
12.1 引言	314
12.2 离散系统的输入-输出描述	314
12.3 离散时间系统的零输入响应	323
12.4 离散时间系统的零态响应	329
12.5 离散时间系统的状态空间分析	334
本章小结	343
思考与练习	343
第 13 章 离散时间系统的 z 域分析	348
13.1 离散时间系统零输入响应的 z 域求解	348
13.2 离散时间系统的零态响应的 z 域求解	350
13.3 离散时间系统的频率响应	355

13.4 状态空间方程的 z 域求解	360
13.5 离散时间系统的稳定性	363
本章小结	368
思考与练习	369
参考文献	372

第 1 章

绪 论

学 习 目 的

通过对本章的学习,掌握信号、系统的定义与分类;熟悉常用信号的表示方法和原理;了解系统的模型和描述过程,熟练掌握线性系统的性质。从而为后面进一步学习信号与系统其他内容打下坚实的基础。

1.1 信 号

消息(Message)这一概念,对我们来说并不生疏,但是,在日常生活中,我们对消息的认识,还停留在感性认识阶段,要给消息下一个确切的定义,可不是件容易的事情。所谓消息,指的是通信系统的传输对象,说得形象一点,通信系统是一种传输系统,只不过它所传输的不是别的,而是消息。比如说,在电报中,电文是消息;在电话中,声音是消息;在电视中,图像是消息;在雷达中,目标的距离、高度、方位等参量是消息;在遥测和遥控系统中,一些测量的数据和指令是消息;如此等等。因此,把传输中的语言、文字、图像、数据等都称为消息。

消息给予受信者的新知识称为信息(Information)。受信者接受消息的目的是为了获取其中的信息。

信号(Signal)是指消息的负载者,它是反映消息的一种表现形式,或者说,信号是一种与物理系统状态有关的、随时间变化的量。这里的关键是随时间变化。例如,反映人体心血管状态随时间变化的心电图是信号,反映人声带振动状态的声音是信号,等等。不随时间变化的量不能构成信号。不妨设想一下,教师在给学生上课时,教师把全部时间都用来不停地念一个音符,这样一堂课下来能给学生一些什么新的知识?又例如,交通信号灯的光色不随时间变化,又将会导致什么样的后果?所以,作为能使受信者从消息中获取某些信息的信号,最终必定是一种随时间变化的量。在数学上,可以将信号视为以时间 t 为独立变量的函数,可记为 $f(t)$ 、 $y(t)$ 、 $g(t)$ 、 $h(t)$ 等。

1.2 常用信号

1.2.1 正弦波信号

设 A 、 ω 、 θ 为与时间 t 无关的常数, t 定义在 $(-\infty, \infty)$ 区间上, 我们把用

$$f(t) = A \sin(\omega t + \theta)$$

表示的信号称为正弦波信号(Sinusoidal Signal)。式中, A 称为振幅(Amplitude), ω 称为角频率(Angular Frequency), θ 称为相位(Phase)。正弦波信号示于图 1.1。

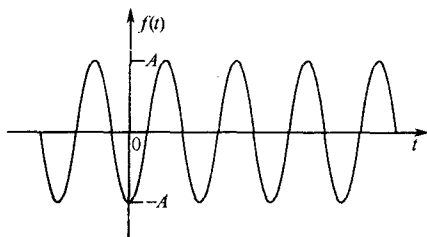


图 1.1 正弦波信号

1.2.2 脉冲信号

如果一个信号 $f(t)$, 它的能量集中在某一短的时间区间内, 则称它为脉冲信号(Pulse Signal)。更一般地说, 包括脉冲信号在内, 如果 $f(t)$ 的平方积分满足下式:

$$0 < \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt < \infty \quad (1.1)$$

则称 $f(t)$ 为孤立波。在图 1.2(a)、(b) 中所示的信号都是孤立波。

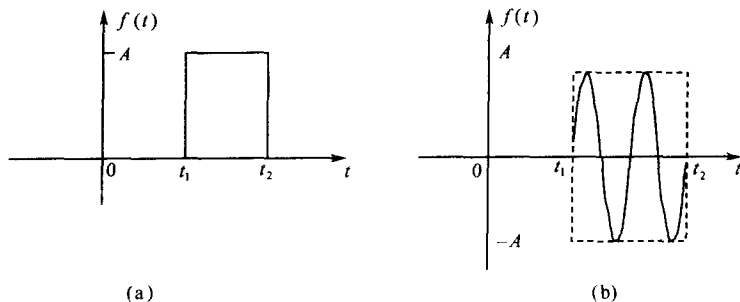


图 1.2 孤立波信号

1.2.3 周期信号

一个信号 $f(t)$, 若在 $(-\infty, \infty)$ 区间上, 对于最小的一个正常数 T , 有

$$f(t) = f(t + nT) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.2)$$

此时, 称 $f(t)$ 为周期信号 (Periodic Signal), T 称为周期 (Period)。在图 1.3 中的信号 $f(t)$ 都是周期信号。

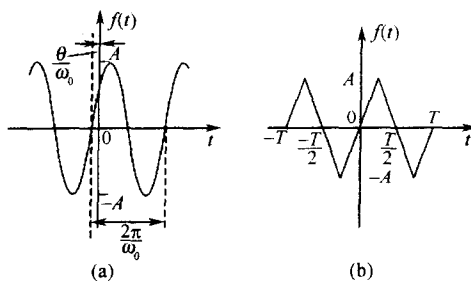


图 1.3 周期信号

周期信号 $f(t)$ 的平均值定义为

$$\frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt \quad (1.3)$$

周期信号的方均值定义为

$$\frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt \quad (1.4)$$

1.2.4 概周期信号

包含周期信号在内, 在更广泛的意义上可以定义概周期信号 (Almost-Periodic Signal)。通常, 我们把有限个周期信号的和称为概周期信号。周期信号本身也是一种概周期信号, 但是, 概周期信号不一定是周期信号。例如

$$f(t) = \sin t + \sin \sqrt{2}t$$

按照定义它是概周期信号, 不是周期信号。

概周期信号经常出现在已调信号或含有非线性器件的振荡系统中。

现在考虑由两个振幅都为 A , 角频率分别为 ω_1 和 ω_2 , 相位分别为 θ_1 和 θ_2 的正弦波 [图 1.4(a) 和 (b)] 合成的概周期信号:

$$A(t) = A \cos(\omega_1 t + \theta_1) + A \cos(\omega_2 t + \theta_2)$$

$$= 2A \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t - \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t + \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right)$$

这样的 $f(t)$ 称为已调波 (Modulated Wave), 式中:

已调波的包络线为

$$2A \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t - \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right)$$

已调波的载波为

$$\cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t + \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right)$$

已调波波形如图 1.4(c) 所示。

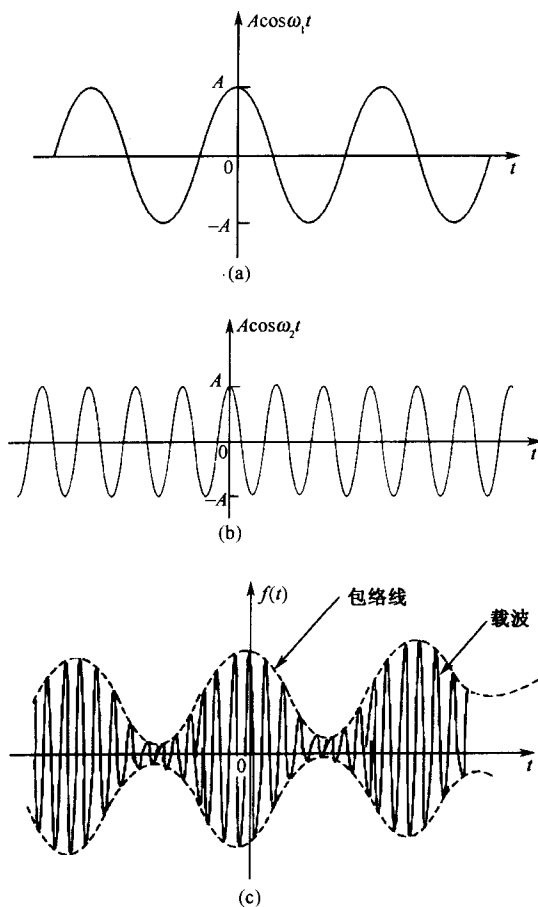


图 1.4 两个正弦波合成的已调波

概周期信号的平均值和方均值分别定义如下:

概周期信号 $f(t)$ 的平均值:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \quad (1.5)$$

概周期信号 $f(t)$ 的方均值:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f^2(t) dt \quad (1.6)$$

1.2.5 随机信号

若信号可以由一确定的数学表达式(时间函数式)确定的图形、曲线所表示,或者信号的波形是唯一确定的,这种信号就是确定性信号,如正弦信号。反之,如果信号不能用确定的图形、曲线或函数式来准确描述时,其具有不可预知的不确定性,则称之为随机信号或不确定性信号,如噪声信号。任意给定一个自变量(时间)的值,对确定性信号可以唯一确定其信号的取值;而对随机信号,其取值却都是不确定的。本书所讨论的信号一般都是确定性信号,而随机信号不在本书讨论范围之内。

1.2.6 具有其他特色的信号

除了正弦波信号、脉冲信号、概周期信号、周期信号、随机信号之外,还经常碰到一些具有其他特征的信号,下面分别叙述。

1. 带限信号

在第5章我们将看到:任何一个信号 $f(t)$ 都可以分解成许许多多不同振幅、不同角频率、不同相位的正弦波的线性组合。如果在这种分解中不包含 ω_m (ω_m 为某一正常数)以上的角频率成分的正弦波时,则称 $f(t)$ 为带限信号(Band-Limited Signal)。

2. 时限信号

若信号 $f(t)$ 在某一有限区间 (t_1, t_2) 之外恒为零,则称其为时限信号(Time-Limited Signal)。

3. 能量有限信号

对于正的常数 K ,若信号 $f(t)$ 的平方积分满足

$$0 < \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt < K < \infty \quad (1.7)$$

则称 $f(t)$ 为能量有限信号。如果 $f(t)$ 代表的是电压或电流, 则 $f(t)$ 的平方积分代表 $f(t)$ 在单位电阻上消耗的全部能量, 这就是“能量有限”名称的来由。

根据式(1.1), 从广义上说, 孤立波信号是能量有限信号。

4. 振幅受限信号

任意信号, 当它加在具有饱和特性的非线性器件上时, 其输出波形 $f(t)$ 在 $(-\infty, \infty)$ 区间上经常对于饱和值 $k > 0$, 有

$$|f(t)| < k$$

我们把这种在幅度上有上限的信号称为振幅受限信号, 简称幅限信号。

5. 复指数信号

复指数信号在网络理论、线性系统理论等中起着重要的作用。设 σ, ω 为实数, 用复数角频率 $s = \sigma + j\omega$ 表示的取复数值的信号 e^{st} 称为复指数信号。若使用 s 的共轭值 $s^* = \sigma - j\omega$, 则 e^{st} 的实部和虚部分别由下式给出:

$$e^{\sigma t} \cos \omega t = \frac{e^{st} + e^{s^* t}}{2} \quad e^{\sigma t} \sin \omega t = \frac{e^{st} - e^{s^* t}}{2j}$$

图 1.5 中给出了复数角频率 s 和复指数信号 e^{st} 的实部 $e^{\sigma t} \cos \omega t$ 之间的对应关系: $\omega = 0$ 时为单调指数函数 $e^{\sigma t}$; 若 $\omega \neq 0$, 则在 $\sigma = 0$ 时为正(余)弦波 $\cos \omega t$, 在 $\sigma > 0$ 范

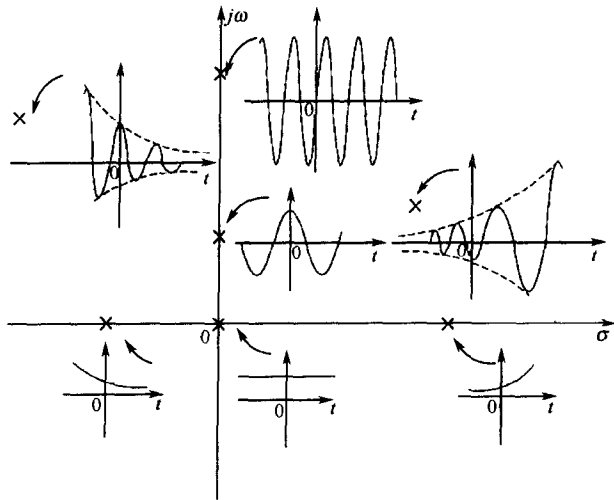


图 1.5 复指数信号的实部与 s 的关系

围内为随时间增长的正弦波,在 $\sigma < 0$ 范围内为随时间减小的正弦波。

引入这种取复数值的信号的最大优点是,信号用复数 s 的函数来表示,便于应用复变函数理论来分析信号。

6. 模拟信号

模拟信号(Analog Signal)是指:在规定的连续时间内,信号的幅值可以取连续范围内的任意数值。这样的连续时间函数所表示的信号就是模拟信号。例如,正弦波以及由传感器所产生的一些信号都属于模拟信号。

7. 连续时间信号

连续时间信号(Time Continuous Signal)是指在连续时间范围内所定义的信号,但信号的幅值可以取连续数值,也可以取离散数值。模拟信号只是连续时间信号的一个特例。实际上,“连续时间信号”与“模拟信号”这两个名词可以相互通用,并且经常用来说明同一信号。因为“模拟”与“模仿”容易混淆起来,所以在多数情况下采用“连续时间信号”为宜,只有当与“数字”相提并论时,才用“模拟”这个术语。

顺便指出:量化这个术语,是指利用一组数值来表示变量的过程;所谓量化变量实际上就是一组不同的数值。

在图 1.6(a)和(b)中的 $f(t)$ 都是连续时间信号的例子。图(b)中的信号 $f(t)$ 在时刻 t_0 上不连续。一般来说,为了强调这一不连续性,把具有不连续点的连续时间信号称为不连续信号(Discontinuous Signal)。

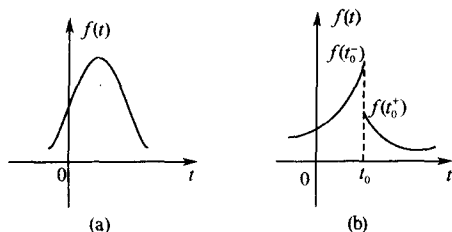


图 1.6 连续时间信号

8. 离散时间信号

离散时间信号是指:在一组特定的时间下表示函数数值的信号。也就是说,作为独立变量的时间 t 被量化了。如果离散时间信号的幅值取连续值,则有时又称为抽样数据(Sampled-Data)信号。抽样数据信号可以理解为在离散时间下对模拟信号的抽样。

9. 数字信号

数字信号(Digital Signal)是在时间上和幅度上都经过量化的信号。数字信号总可以用序列的数来表示,而每一个数又可用有限个数码来表示。

离散时间和数字这两个术语在实际应用中经常是指同一种信号。关于离散时间信号的一些理论也适用于数字信号,所以这两个术语无需严格区分。一般说来,“离散时间”这个词较多用于理论问题的讨论,而“数字”这个词习惯用于讨论硬件和软件设备。

10. 奇异信号

不连续信号 $f(t)$ 在不连续点上的微分 $df(t)/dt$ 取值不定,处理起来很不方便,为了避免这一不便,引入奇异信号(Singularity Signal)。奇异信号一般是指单位阶跃函数 $\varepsilon(t)$ 及其阶导数或积分所代表的信号。这里提到的单位阶跃函数 $\varepsilon(t)$ 定义为

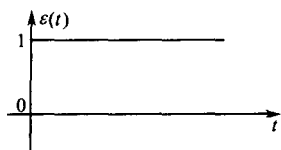


图 1.7 单位阶跃信号

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} 1 & t > 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

如图 1.7 所示。关于奇异信号将在后面章节中详细讨论。

在图 1.8 中,图(a)和(b)中的 $f(t)$ 是连续时间信号;图(a)中的 $f(t)$ 也是模拟信号;图(c)和(d)中的 $f(t)$ 是离散时间信号;图(c)中的 $f(t)$ 又称为抽样数据信号;图(e)和图(f)中的 $f(t)$ 是奇异信号。

为了便于读者记忆,这里我们将连续时间信号、模拟信号、离散时间信号、数字信号和抽样数据信号之间的区别和联系小结如下:

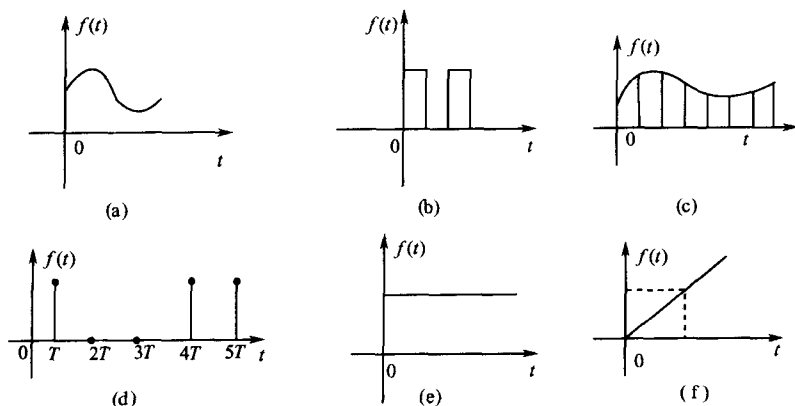


图 1.8 各种信号