普通高等教育“十二五”规划教材

◎ 电气与电子信息类基础课程 规划教材

信号与系统

（第二版）

◎ 张维玺　编著

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

普通高等教育“十二五”规划教材
电气与电子信息类基础课程规划教材

信号与系统

（第二版）

张维玺　编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

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 14 章，讨论了信号与系统的各种分析方法。书中内容丰富，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、习题的安排上遵循了循序渐进、归纳对比、加强练习等教学原则。本书配有免费电子课件。

本书可作为电子信息工程、通信工程、信息工程、电子科学与技术、光电信息工程、自动化等专业的教材，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. —2 版. —北京：电子工业出版社，2011.3
电气与电子信息类基础课程规划教材
ISBN 978-7-121-12681-9

I. ①信… II. ①张… 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(2010)第 259164 号

策划编辑：段丹辉
责任编辑：段丹辉　　特约编辑：王　纲
印　　刷：北京东光印刷厂
装　　订：三河市皇庄路通装订厂
出版发行：电子工业出版社
　　　　　北京市海淀区万寿路 173 信箱　　邮编　100036
开　　本：787×1092　1/16　印张：18.5　字数：485.4 千字
印　　次：2011 年 3 月第 1 次印刷
印　　数：4000 册　　定价：33.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

再版前言

本书是张维玺等编著的《信号与系统》一书的修订版本，根据我国高等教育的发展和应用型本科专业的需要，对原有的许多章节进行了重新编写和修改，并增加了第 14 章(离散时间系统的状态空间分析)和附录 A(部分习题答案)两部分。本书保持了第一版中最重要的特色——理论与实践密切结合的应用型特点，实例丰富，具有强烈的时代感。

本书从概念上可以分为信号分解和系统分析两部分，但二者又是密切相关的，根据连续信号分解为不同的基本信号，对应推导出线性系统的分析方法分别为时域分析、频域分析和复频域分析；离散信号分解和系统分析也是类似的过程。

本书在内容安排上采用先连续后离散的布局，学生可先集中精力学好连续信号与系统分析的内容，再通过类比理解离散信号与系统分析的内容。状态分析方法也结合两大块给出，从而建立完整的信号与系统的概念。

信号与系统课程研究信号与系统理论的基本概念和基本分析方法，初步认识如何建立信号与系统的数学模型，经适当的数学分析求解，对所得结果给以物理解释，赋予物理意义。

本课程范围限定于确定性信号(非随机信号)经线性、时不变系统传输与处理的基本理论，涉及的数学内容包括微分方程、差分方程、级数、复变函数、线性代数等。

本书的主要特点如下：

(1) 本书以单位冲激信号 $\delta(t)$ 的定义为主线，表示出了时域、频域、复频域、离散域的信号表示形式 $f(t)$ 、$F(j\omega)$ 、$F(s)$ 、$F(z)$ ，之后用线性系统的齐次性和可加性推导出时域、频域、复频域、离散域的冲激响应和系统函数，便于学生用统一的思维理解分析、比较记忆。

(2) 本书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进行讲解，做到了并行比较、重点突出，淡化理论，在归纳对比的基础上加深对基本理论的理解。

(3) 加深工程应用的概念，如滤波器、调制与解调、系统稳定性的各种定义等，通过实例加强对过程能力的培养。

(4) 注意离散时间信号与系统部分与数字信号处理课程内容的衔接关系，使后续课程不重复。在信号与系统课程中只讲到因果系统和单边 z 变换，这样在内容上避免了重复。

(5) 本书以傅里叶变换为核心研究线性系统和信号处理的相关问题，着重信号分析和信号通过线性系统的响应，加强系统的状态变量分析内容。

(6) 通过各种典型例题使初学者更好地消化本课程的基本理论。而求解一定数量典型而深入的习题，则是学好信号与系统课程不可缺少的手段，为此本书给出了习题参考答案便于学生自学研究。

本书共 14 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 章的内容是与第 3～6 章的内容相对应的，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 11～14 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。每章后面都有一定数量的习题，附录 A 给出了部分习题答案。

本书配有免费电子教学课件，读者可以登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)免费下载，或发送电子邮件至 duandh@phei.com.cn 咨询。

本书由张维玺、刘舒祺、张俐编写。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。作者邮箱：zwx@jstu.edu.cn。

作　者

目　录

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，对人们来说并不陌生，但是，在日常生活中，人们对消息的认识，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。形象地说，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。例如，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。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)。受信者接收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。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弹一个音符，这样一堂课下来能给学生一些什么新的知识？又如，交通信号灯的光色不随时间变化，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，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)。正弦波信号如图1.1所示。

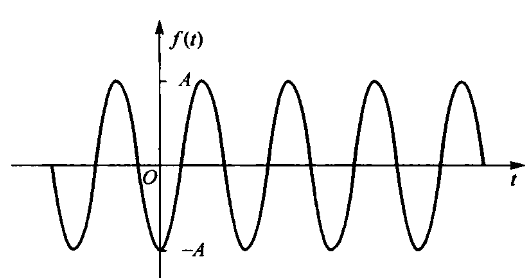

图1.1　正弦波信号

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

$$0<\int_{-\infty}^{\infty} f^2(t)\mathrm{d}t<\infty \tag{1.1}$$

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

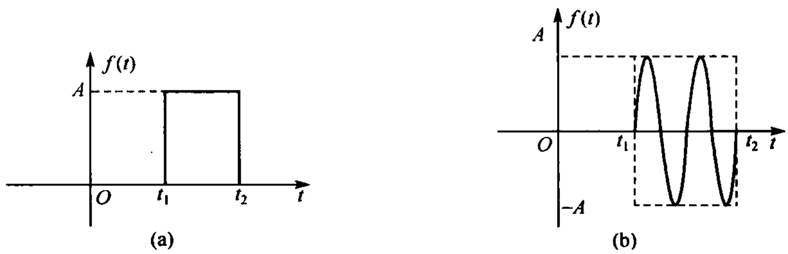

图 1.2 孤立波信号

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

$$f(t)=f(t+nT) \qquad n=0,\pm1,\pm2,\cdots \tag{1.2}$$

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。

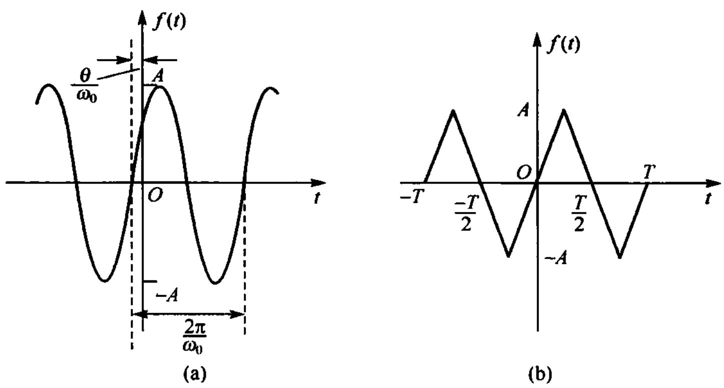

图 1.3 周期信号

周期信号 $f(t)$ 的平均值定义为

$$\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} f(t)\mathrm{d}t \tag{1.3}$$

周期信号的方均值定义为

$$\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} f^2(t)\mathrm{d}t \tag{1.4}$$

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，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［如图 1.4(a) 和图 1.4(b) 所示］合成的概周期信号。

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

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。

概周期信号的平均值和方均值分别定义如下。

概周期信号 $f(t)$ 的平均值定义为

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2}f(t)\mathrm{d}t \tag{1.5}$$

概周期信号 $f(t)$ 的方均值定义为

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}f^2(t)\mathrm{d}t \tag{1.6}$$

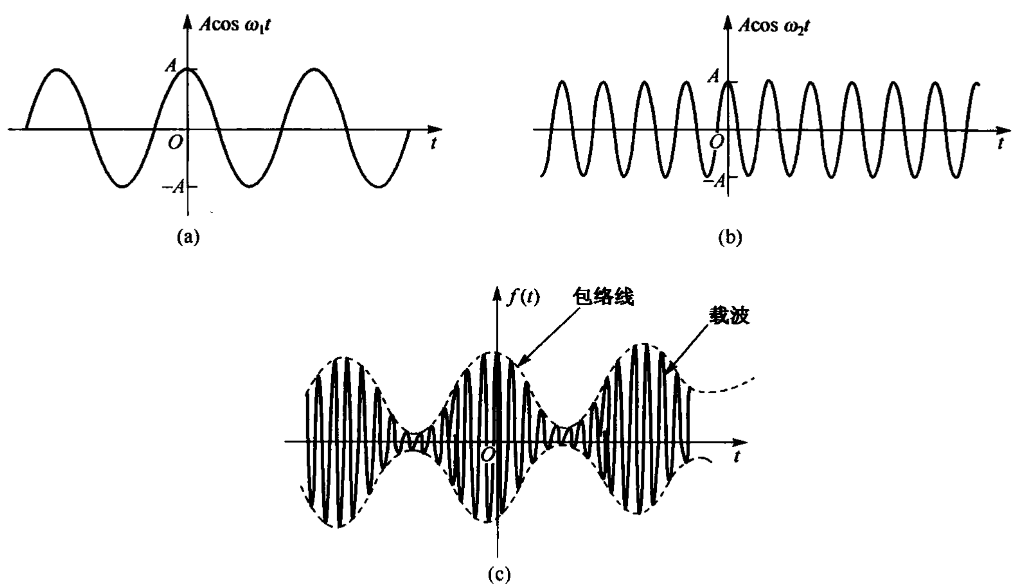

图 1.4　两个正弦波合成的已调波

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)或确定的图形、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，如正弦波信号。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，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 具有其他特征的信号

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，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

$$0 < \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t)\mathrm{d}t < K < \infty \tag{1.7}$$

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

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

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、线性系统理论等理论中起着重要的作用。设σ、ω 为实数，用复数角频率 $s=\sigma+\mathrm{j}\omega$ 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 $s^*=\sigma-\mathrm{j}\omega$，则 e^{st} 的实部和虚部分别由下式给出：

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

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

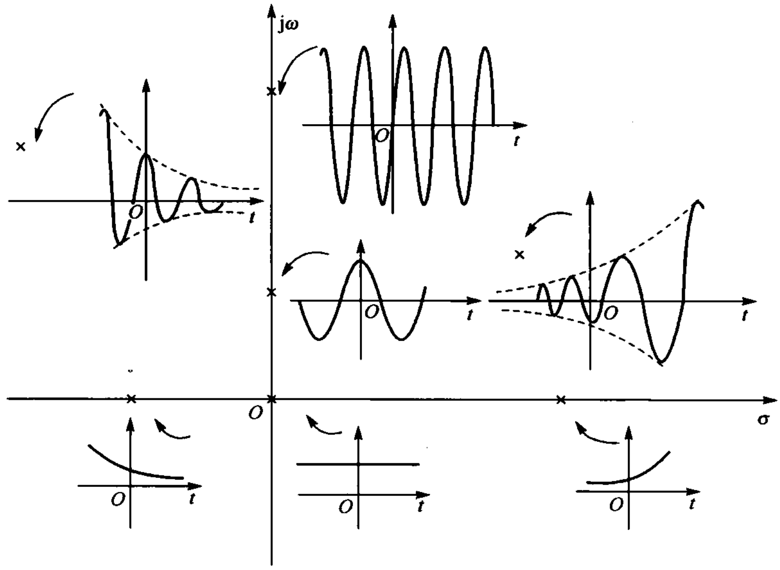

图 1.5　复指数信号的实部与 s 的关系

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 1.6(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)。

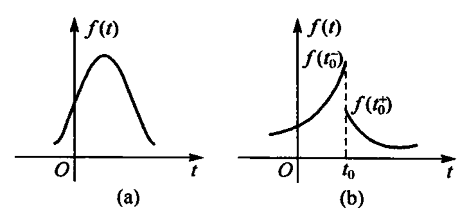

图 1.6　连续时间信号

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，所以这两个术语无须严格区分。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 $\mathrm{d}f(t)/\mathrm{d}t$ 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 $\varepsilon(t)$ 及其各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

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

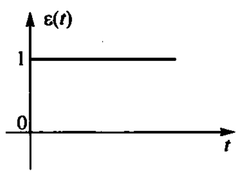

图 1.7　单位阶跃信号

单位阶跃信号如图1.7所示。关于奇异信号将在后面的章节中详细讨论。

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

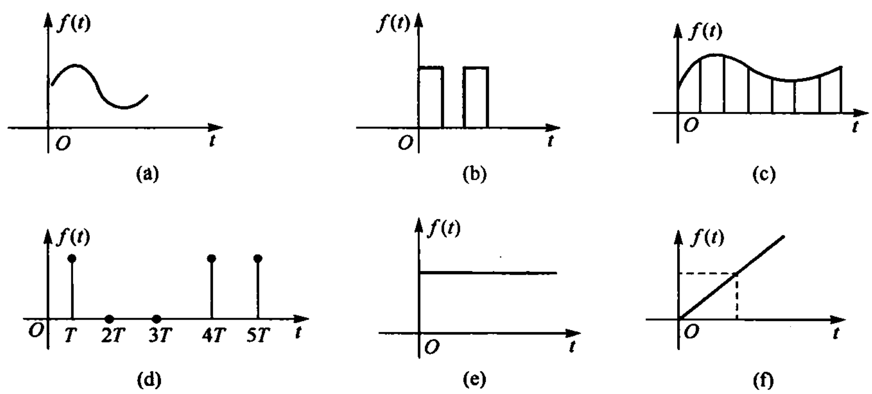

图 1.8　各种信号

为了便于读者记忆，这里将连续时间信号、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。

连续时间信号的幅值可以是被量化了的，也可以取连续值。当幅值未被量化，即可以取连续值，又可称为模拟信号。连续时间信号在时间上被量化，即只取离散时刻，则称为离散信号。

离散时间信号的幅值可以是被量化了的，也可以取连续值。前者称为数字信号，后者称为抽样数据信号。

11. 因果和反因果信号

把 $t<0$ 时 $f(t)=0$ 的信号称为因果信号。相反，把 $t>0$ 时 $f(t)=0$ 的信号称为反因果信号。

1.3　系统的表示

所谓系统(System)，是指由若干组成部分相互联系在一起完成某种功能的有机整体。它的组成部分，可以是电子、机械、控制等方面的物理实体，也可以是社会、经济、管理等方面的非物理实体。系统的功能可以通过对施加的一组激励信号(称为输入信号)所呈现的响应(或称为输出信号)来表征。