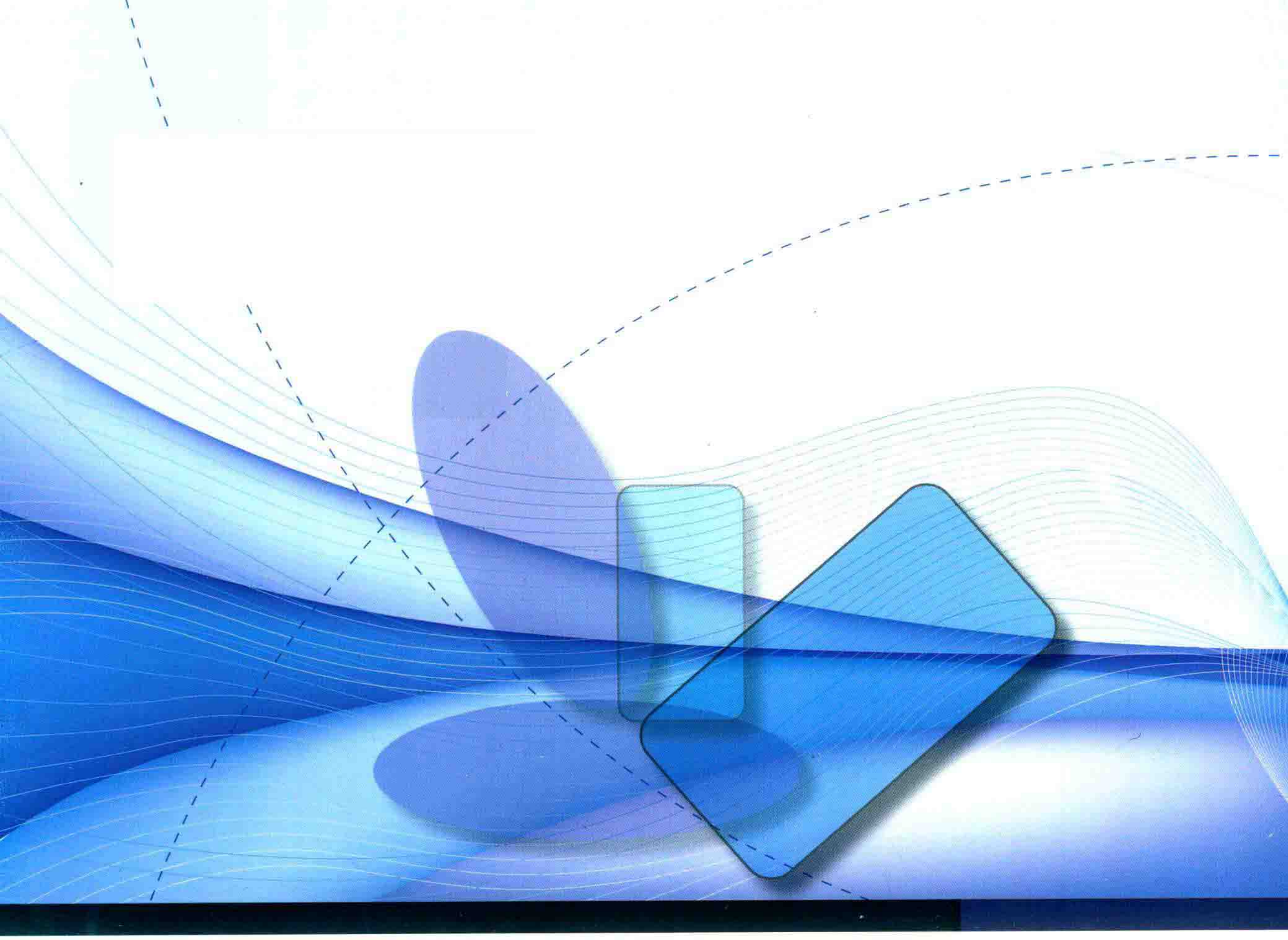
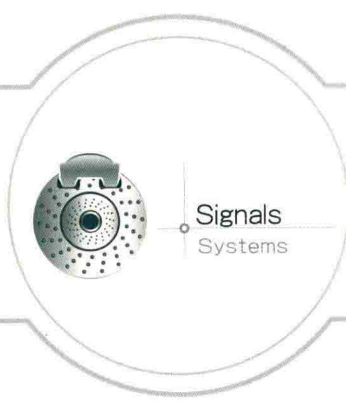


信号与系统基本理论

BASIC THEORY OF SIGNALS AND SYSTEMS

邵 英 主 编

刘建宝 侯新国 杨忠林 欧阳华 编



中国工信出版集团

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

信号与系统基本理论

邵 英 主 编

刘建宝 侯新国 杨忠林 欧阳华 编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内容简介

本书是根据军队综合性大学对“信号与系统”课程教学的需求而编写的。按照军队综合性大学对信息化人才培养的教学要求，将教学内容与实际应用相结合，从而提高了教学的有效性和针对性。

本书采用先连续后离散的布局安排知识内容，全书共 7 章：第 1 章介绍信号的基本概念；第 2 章介绍系统的基本概念；第 3 章介绍系统的时域分析；第 4 章介绍连续时间系统的频域分析；第 5 章介绍拉普拉斯变换及连续系统的 s 域分析；第 6 章介绍 z 变换及离散系统的 z 域分析；第 7 章介绍系统函数。

本书主要适用于通信和电子信息类专业的本科学生，也可供电子工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

信号与系统基本理论/邵英主编. —北京：电子工业出版社，2018.8

ISBN 978-7-121-34816-7

Ⅰ. ①信… Ⅱ. ①邵… 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（2018）第 174280 号

策划编辑：李　洁
责任编辑：李　洁　　特约编辑：曲　岩
印　　刷：三河市鑫金马印装有限公司
装　　订：三河市鑫金马印装有限公司
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：787×1 092　1/16　印张：18.75　字数：480 千字
版　　次：2018 年 8 月第 1 版
印　　次：2018 年 8 月第 1 次印刷
定　　价：55.00 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）88254888，88258888。

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。

本书咨询联系方式：lijie@phei.com.cn。

前　言

“信号与系统”是通信和电子信息类专业的核心基础课，其中的概念和分析方法广泛应用于通信、自动控制与信息处理、电路与系统等领域。由于军队综合性大学对课程教学的特殊性，很多地方高校同类教材的教学内容更偏重于基础理论，无法结合军队院校的实际应用需求进行介绍，影响教学效果。本书按照军队综合性大学对信息化人才培养的教学要求进行编写，将教学内容与实际应用相结合，从而提高了教学的有效性和针对性。

本书本着“理论够用为主，重在培养技能和应用”的原则，力求理论与实践紧密结合，突出应用性和针对性，加强实践能力的培养，旨在培养学生的应用能力和解决实际问题的能力。在内容安排上，为了突出实用性，设置了相关的 MATLAB 实验，课程的每一项主要内容都配合一定数量的习题，从而激发学生的学习兴趣，充分调动学生学习的主动性和积极性。

本书采用先连续后离散的布局安排知识内容，先掌握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概念，从而建立完整的信号与系统的概念。全书内容共 7 章：第 1 章介绍信号的基本概念；第 2 章介绍系统的基本概念；第 3 章介绍系统的时域分析；第 4 章介绍连续时间系统的频域分析；第 5 章介绍拉普拉斯变换及连续系统的 s 域分析；第 6 章介绍 z 变换及离散系统的 z 域分析；第 7 章介绍系统函数。

本书由邵英主编并统稿，其中邵英及欧阳华编写第 1～3 章，杨忠林及侯新国编写第 4、7 章，刘建宝编写第 5、6 章。

吴正国教授对本书的编写提出了许多宝贵的意见并对全书进行了仔细审阅，谨致以衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中难免存在缺点和疏漏，恳请广大读者批评指正。

编　者

2018 年 4 月

目　录

注：*为选讲内容。

绪　论

“信号与系统”是一门理论性和技术性都比较强的技术基础学科，它把反映事物本质的物理概念、数学概念和工程概念结合起来，以数学和物理学为基础，同时又与电路分析基础、电子学、数字信号处理、网络理论、计算方法、自动控制等相互渗透，相互交合和相互反馈，本书将这些学科的共同特征加以综合和概括，并紧紧围绕“信号”和“系统”这两个概念进行分析和讨论。

“信号与系统”这门学科自产生以来不断处于发展之中，尤其是伴随信息技术的革命性进步，信号与系统的内涵越来越丰富，并在各高新技术领域得到应用，如雷达、遥感、通信、语音处理、图像处理等。

信号，就是随时间和空间变化的某种物理量或物理现象，例如，在通信工程中，一般将通过某种方式传递的语言、文字、图像、数据等统称为消息，在消息中包含着一定的信息。通信就是从一方向另一方传送消息，给对方以信息。但消息必须借助于一定形式的信号（如光信号、电信号等）才能进行传送和各种处理。因而，信号是消息的载体，是消息的表现形式，是通信的客观对象，而消息则是信号的内容。

人类赖以生存的物理世界充满了各类信号，有些是自然界产生的，有些是人类自己的躯体产生的，还有些是人类为了满足某种需求运用智慧产生的。例如，我们用声带发声时气压的变化，一天中空气湿度的变化，在医院里医生给我们做心电图检查时仪器上显示的周期性信号。严格来讲，信号和函数是两个不同的概念，但在信号与系统的分析中，信号一般被描述成数学函数。信号是携带信息的真实物理现象，而函数是对信号的描述，信号表示为一个时间的函数。从广义上说，信号是随时间变化的某个物理量，只有变化的物理量才能携带信息。在信号和系统分析中不区分信号和函数的细微差别，而把它们混为一体。信号表现为电压、电流、电荷、磁链等，称为电信号，它是现代科学技术中应用最广泛的物理量。

随着信息技术的飞速发展，信号不再是单纯由电路所产生的电信号，声音信号、视频信号、图像信号以及网络通信过程中计算机产生的数据流，都是现代意义上的信号。系统的概念也不再拘泥于传统基于电路的系统，一个计算机程序、一个硬件电路或是两者的结合都可以称为系统。因此需要对信号与系统的概念和内涵不断进行修改和完善。从数学角度来看，由 E. A.LCC，和 P.Varaiya 用集合与函数的概念来定义信号，无论是语音图像信号，还是一帧数据，都可以用一个具有合适定义域和值域的函数来定义，从这个视角来看，系统可以定义为信号的函数，其定义域和值域都是信号函数。

由于数字计算机的快速发展，信号与系统的研究重点向离散、数字方向转移，因而也越来越多地与数字信号处理相融合。“信号与系统”和“数字信号处理”两门课程之间的界限越来越模糊，“信号与系统”主要研究信号经过线性时不变系统传输和处理所需要的基本概念和理论，研究内容既包括连续时间方面也包括离散时间方面；“数字信号处理”则是研究离散时间信号的处理方法，其中大量地运用了信号与系统中建立起来的基本概念和理论。对比 1985 年 A.V. O penheim 版本和 2002 年 W.K. Edward 版本的《信号与系统》教材，后者内容上除了信号与系统传统的概念和方法，还包括了转移函数、控制应用、数字滤波器和控制器设计应用等数

字信号处理课程的相关知识。

本书的研究对象是确定性的信号、系统以及确定性信号通过确定性系统的输出。研究的系统主要是线性时不变因果系统。通过本书的学习，读者对“信号”与“系统”的概念和分析方法将有深入的了解，能熟练掌握两个基本概念（信号、系统），掌握三个变换（傅里叶变换、拉普拉斯变换和 z 变换），为从事信号处理等方面有关的研究工作打下坚实的基础。

Chapter 1

第 1 章 信号的基本概念

要点

本章介绍了信号的概念、分类以及基本运算，重点强调了冲激信号和阶跃信号这两类在系统分析中占有重要地位的基本信号，以及卷积（包括连续信号的卷积积分和离散信号的卷积和）这一类在系统分析中占有重要地位的基本运算。

1.1 信号的分类及典型的连续时间信号

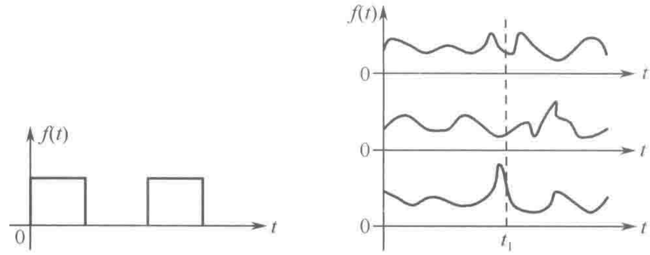
1.1.1 信号的分类

根据信号的属性可分为确定信号与随机信号、连续时间信号与离散时间信号、周期信号和非周期信号、能量信号和功率信号。

1. 确定信号与随机信号

按信号随时间变化的规律来分，信号可分为确定信号与随机信号。确定信号是指能够表示为确定的时间函数的信号。当给定某一时间值时，信号有确定的数值，其所含信息量的不同体现在其分布值随时间或空间的变化规律上。电路基础课程中研究的正弦信号、指数信号、各种周期信号等都是确定信号的例子，如图 1.1-1（a）所示。

随机信号不是时间 t 的确定函数，它在每一个确定时刻的分布值是不确定的，只能通过大量试验测出它在某些确定时刻上取某些值的概率分布。空中的噪音、电路元件中的热噪声、电流等都是随机信号的例子。如图 1.1-1（b）所示。



（a）确定信号　　（b）随机信号

图 1.1-1　确定信号与随机信号

实际传输的信号几乎都是随机信号。若传输的是确定信号，则对接收者来说，就不可能由它得知任何新的信息，从而失去了传送信息的本意。但是，在一定条件下，随机信号也会表现出某种确定性，例如，在一个较长的时间内随时间变化的规律比较确定，即可近似地看成是确定信号。

随机信号是统计无线电理论研究的对象。本书中只研究确定信号。

2．连续时间信号与离散时间信号

（1）连续时间信号。

对任意一个信号，如果在定义域内，除有限个间断点外均有定义，则称此信号为连续时间信号。连续时间信号的自变量是连续可变的，而函数值在值域内可以是连续的，也可以是跳变的。如图 1.1-2 中所示的斜坡信号，就是一个连续时间信号。

（2）离散时间信号。

对任意一个信号，如果自变量仅在离散时间点上有定义，称为离散时间信号。离散时间信号相邻离散时间点的间隔可以是相等的，也可以是不相等的。在这些离散时间点之外，信号无定义。

例如，一个离散时间信号，其波形图如图 1.1-3 所示，函数表示为

$$y(n)=\begin{cases} n, & n=0,1,2,3,\cdots \\ 1, & n=-1,-2,\cdots \end{cases} \tag{1.1-1}$$

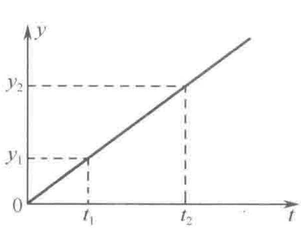


图 1.1-2　连续时间信号

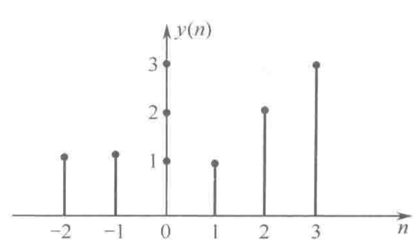


图 1.1-3　离散时间信号

定义在等间隔离散时间点上的离散时间信号称为序列，序列可以表示成函数形式，也可以直接列出序列值或写成序列值的集合。在工程应用中，常常将幅值连续可变的信号称为模拟信号；将幅值连续的信号在固定时间点上取值得到的信号称为抽样信号；将幅值只能取某些固定

的值，而在时间上等间隔的离散时间信号称为数字信号。

3．周期信号与非周期信号

周期信号是定义在（$-\infty$，∞）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 1.1-4 所示。连续周期信号可以表示为

$$f(t)=f(t\pm nT),\quad (n=0,\pm1,\pm2\cdots) \tag{1.1-2}$$

离散周期信号可表示为

$$f(n)=f(n\pm mN),\quad (m=0,\pm1,\pm2\cdots) \tag{1.1-3}$$

满足此关系式的最小 T（或 N）值称为信号的周期。

对于正弦序列（或余弦序列），如图 1.1-4（b）所示。

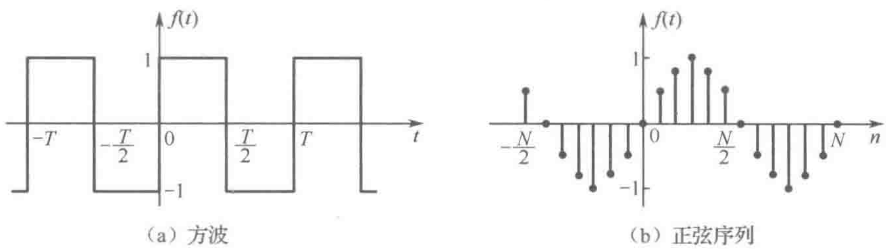


图 1.1-4　周期信号

$$\begin{aligned} f(n)&=\sin(\beta n)=\sin(\beta n+2m\pi)\\ &=\sin\left[\beta\left(n+m\frac{2\pi}{m}\right)\right]=\sin[\beta(n+mN)] \qquad m=0,\pm1,\pm2\cdots \end{aligned}$$

可以看出，当 $\frac{2\pi}{\beta}$ 为整数时，正弦序列具有周期 $N=\frac{2\pi}{m}$。图 1.1-4（b）画出了 $\beta=\frac{\pi}{6}$、周期 $N=12$ 的情形，它每经过 12 个单位循环一次。当 $\frac{2\pi}{\beta}$ 为有理数时（例如：$\frac{2\pi}{\beta}=\frac{N}{M}$，$N$ 与 M 均为无公因子的整数)，正弦序列仍具有周期性，其周期为 $N=M\frac{2\pi}{\beta}$。当 $\frac{2\pi}{\beta}$ 为无理数时，该序列不具有周期性，但是其样值的包络线仍为正弦函数。

【例 1.1-1】 判断下列序列是否为周期性的，如果是周期性的，确定其周期。

（1）$f_1(n)=\sin\left(\frac{\pi}{7}n+\frac{\pi}{6}\right)$；　（2）$f_2(n)=\cos\left(\frac{5\pi}{6}n+\frac{\pi}{12}\right)$；　（3）$f_3(n)=\sin\left(\frac{1}{5}n+\frac{\pi}{3}\right)$。

解：（1）$\beta_1=\frac{\pi}{7}$，$\frac{2\pi}{\beta_1}=14$，故 $f_1(n)$ 是周期序列，其周期 $N_1=14$。

（2）$\beta_2=\frac{5\pi}{6}$，$\frac{2\pi}{\beta_2}=\frac{2\times6\times\pi}{5\pi}=\frac{12}{5}=\frac{N_2}{M}$；$(M=5)$，故 $f_2(n)$ 是周期序列，其周期 $N_2=12$。

（3）$\beta_3=\frac{1}{5}$，$\frac{2\pi}{\beta_3}$ 为无理数，故 $f_3(n)$ 是非周期序列。

4．能量信号与功率信号

（1）能量信号

将一个电压或电流信号 $f(t)$ 加到单位电阻上，则在该电阻上产生的瞬时功率为 $|f(t)|^2$ 。在一段时间 $\left(-\frac{\tau}{2},\frac{\tau}{2}\right)$ 内消耗一定的能量，把该能量对时间区域取平均，即得信号在此区间内的平均功率。

定义 若将时间区域无限扩展，信号满足条件

$$E=\lim_{\tau\to\infty}\int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}}|f(t)|^2\mathrm{d}t<\infty \tag{1.1-4}$$

称为能量信号，即如果一个信号在无限大时间区域内信号的能量为有限值，则称该信号为能量有限信号或能量信号。

能量信号的平均功率为零。

（2）功率信号

定义 将时间区域无限扩展，信号满足条件

$$P=\lim_{\tau\to\infty}\frac{1}{\tau}\int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}}|f(t)|^2\mathrm{d}t=\lim_{\tau\to\infty}\frac{1}{\tau}E<\infty \tag{1.1-5}$$

称为功率信号，即如果在无限大时间区域内信号的功率为有限值，则称该信号为功率有限信号或功率信号。

功率信号的能量无穷大。

离散信号有时候也要讨论能量和功率，序列 $f(n)$ 的能量定义为

$$E=\lim_{N\to\infty}\sum_{n=-N}^{N}|f(n)|^2 \tag{1.1-6}$$

序列 $f(n)$ 的功率定义为

$$P=\lim_{N\to\infty}\frac{1}{2N+1}\sum_{n=-N}^{N}|f(n)|^2 \tag{1.1-7}$$

若 $E<\infty$，我们称 $f(n)$ 为能量有限信号，简称为能量信号，此时 $P=0$；若 $P<\infty$，则称 $f(n)$ 为功率有限信号，简称为功率信号，此时 $E=\infty$ 。

根据能量信号和功率信号的定义，显然可以得出：时限信号（在有限时间区域内存在非零值的信号）是能量信号，周期信号是功率信号；非周期信号可能是能量信号，也可能是功率信号。

1.1.2 典型的连续时间信号

下面给出几个常见信号的函数表达式及其波形图。在后续章节中可以看到，它们在信号与系统分析中有着极其重要的地位和作用。

1. 指数信号

指数信号的表达式为

$$f(t)=A\mathrm{e}^{st} \tag{1.1-8}$$

根据 A 和 s 的不同取值，有三种情况：

（1）当 $A=m$ 和 $s=\alpha$ 均为实数时，$f(t)$ 为实指数信号。

当 $\alpha>0$ 时，为指数递增信号；

当 $\alpha<0$ 时，为指数递减信号；

当 $\alpha=0$ 时，$f(t)$ 等于常数。

波形如图 1.1-5 所示。

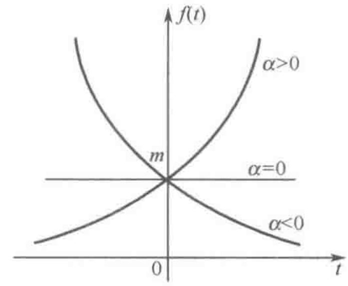


图 1.1-5　实指数信号

（2）当 $A=1$ 和 $s=\mathrm{j}\omega$ 时，$f(t)$ 为虚指数信号，即

$$f(t)=A\mathrm{e}^{st}=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}=\cos\omega t+\mathrm{j}\sin\omega t \tag{1.1-9}$$

显然，这是一个周期信号。

（3）当 A 和 s 均为复数时，$f(t)$ 为复指数信号。

设 $A=|A|\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}$，$s=\sigma+\mathrm{j}\omega$，则 $f(t)$ 可以表示为

$$\begin{aligned}f(t)=A\mathrm{e}^{st}&=|A|\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}\mathrm{e}^{(\sigma+\mathrm{j}\omega)t}=|A|\mathrm{e}^{\sigma t}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\varphi+\omega t)}\\&=|A|\mathrm{e}^{\sigma t}[\cos(\varphi+\omega t)+\mathrm{j}\sin(\varphi+\omega t)]\end{aligned} \tag{1.1-10}$$

当 $\sigma>0$ 时，$f(t)$ 的实部和虚部为幅度指数递增的正弦振荡信号；

当 $\sigma<0$ 时，$f(t)$ 的实部和虚部为幅度指数递减的正弦振荡信号；

当 $\sigma=0$ 时，$f(t)$ 的实部和虚部为幅度等幅的正弦振荡信号。

$f(t)$ 的实部在 $\sigma>0$、$\sigma<0$ 和 $\sigma=0$ 三种情况下的波形如图 1.1-6（a）、（b）、（c）所示。

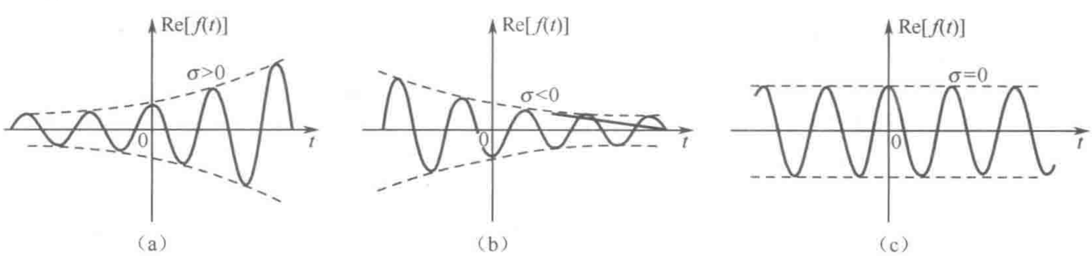


图 1.1-6　复指数信号

2．正弦信号

正弦信号的一般形式为

$$f(t)=A\sin(\omega t+\theta) \tag{1.1-11}$$

其中 A 为振幅，ω 为角频率，θ 为初相位，这三者被称为正弦信号的三要素。由这三个参数就可以唯一地确定一个正弦信号。

3．抽样信号

抽样信号定义为

$$\mathrm{Sa}(t)=\frac{\sin t}{t} \tag{1.1-12}$$

显然，当$t \to 0$时，式（1.1-12）右边是$\frac{0}{0}$型极限，运用罗必塔法则得

$$\lim_{t \to 0} \mathrm{Sa}(t) = \lim_{t \to 0} \frac{(\sin t)'}{t'} = \lim_{t \to 0} \frac{\cos t}{1} = 1 \tag{1.1-13}$$

首先来定性分析一下$\mathrm{Sa}(t)$波形的趋势，当t从 0 增大到$+\infty$，$\frac{1}{t}$的幅度越来越小（衰减的），而$\sin t$是周期振荡的，所以$\mathrm{Sa}(t)$总的趋势是衰减振荡的。显然$\mathrm{Sa}(t)$是偶函数，所以在负半轴的趋势是一样的。$\mathrm{Sa}(t)$的波形如图 1.1-7 所示。

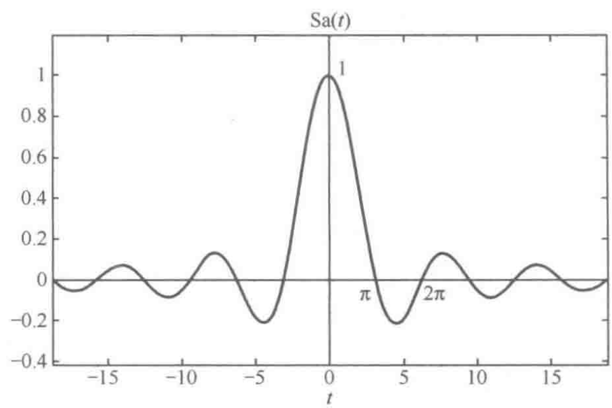


图 1.1-7 抽样信号

显然，$t = n\pi(n = \pm 1, \pm 2, \cdots)$是函数的零点，在任意零点两侧函数取值正负交替。此外有

$$\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{Sa}(t)\mathrm{d}t = \pi$$ 。

类似地，定义辛格函数为

$$\mathrm{sinc}(t) = \frac{\sin \pi t}{\pi t} \tag{1.1-14}$$

【例 1.1-2】 求$\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{sinc}(t)\mathrm{d}t$。

解：

$$\mathrm{sinc}(t) = \mathrm{Sa}(\pi t)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{sinc}(t)\mathrm{d}t = \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{Sa}(\pi t)\mathrm{d}t = \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{Sa}(t)\frac{\mathrm{d}t}{\pi} = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{Sa}(t)\mathrm{d}t$$

由 $\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{Sa}(t)\mathrm{d}t = \pi$

得 $\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{sinc}(t)\mathrm{d}t = 1$

显然$\mathrm{Sa}(t)$和$\mathrm{sinc}(t)$的关系为

$$\mathrm{sinc}(t) = \mathrm{Sa}(\pi t) \tag{1.1-15}$$