



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 信号与系统

陈后金 主编

陈后金 胡 健 薛 健 编著

Higher Education Press  
高等教育出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

TN911.6/39=3

2007

# 信号与系统

陈后金 主编

陈后金 胡 健 薛 健 编著



高等教育出版社  
Higher Education Press

## 内容简介

本教材主要阐述确定性信号的时域分析和变换域分析,线性非时变系统的描述与特性以及信号通过线性非时变系统的时域分析与变换域分析;并简要介绍信号与系统的基本理论在生物神经网络和通信系统中的应用。本书采用连续和离散并行、先时域后变换域的结构体系,突出以信号分析为基础的理念,从信号表示的角度引入信号的频谱。强调基本理论、基本概念和基本方法,淡化计算技巧,引入 MATLAB 作为信号与系统分析的工具。同时,本书还配有大量例题和习题,注重难点和重点的解释与分析。

本教材于 2006 年被列入“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。本教材可作为电子信息工程、通信工程、信息工程、自动化、生物医学工程、计算机等专业的本科生教材,也可供有关科技工作者自学参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

信号与系统/陈后金主编. —北京:高等教育出版社,2007.12

ISBN 978-7-04-022523-5

I. 信... II. 陈... III. 信号系统-高等学校-教材 IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 166674 号

策划编辑	刘激扬	责任编辑	孙 薇	封面设计	张志奇
责任绘图	宗小梅	版式设计	马敬茹	责任校对	胡晓琪
责任印制	毛斯璐				

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100011  
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 北京未来科学技术研究所  
有限责任公司印刷厂

开 本 787×960 1/16  
印 张 26.75  
字 数 500 000

购书热线 010-58581118  
免费咨询 800-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2007 年 12 月第 1 版  
印 次 2007 年 12 月第 1 次印刷  
定 价 29.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 22523-00

# 前 言

本教材于2006年被列入“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”，是北京交通大学国家电工电子教学基地和实验教学中心的系列教材，也是首批国家精品课程“信号与系统”的主教材。教材的特点体现在如下几个方面：

1. 在教材的观念上，体现教材不仅是人类知识的载体，也是人类思维方法和认知过程的载体。教材不应只是人类知识的简单再现，应展现科学的思维方法和认知过程。学生在学习教材时，不仅能够获得知识，更能够提高认知能力。因此，在教材编写过程中，对教材的体系和内容进行了科学组织，体系结构条理清晰，内容叙述深入浅出，更加符合学习的认知过程。

2. 在教材体系上，形成了信号与系统、数字信号处理的新体系。先时域分析再变换域分析，侧重时域分析与变换域分析的相互关系以及各自的适用范围。先信号分析再系统分析，突出信号分析是系统分析的基础，因为只有通过信号分析确定其特征，才能正确选择和设计相应的系统，对信号进行有效的处理。

3. 在教材内容上，体现经典与现代、连续与离散、信号与系统的辩证关系，适当反映IT的新理论和新技术。在信号分析中，突出基本信号的描述及信号的表示，强调Fourier变换、Laplace变换和 $z$ 变换的数学概念、物理概念和工程概念，淡化其数学技巧和运算。从信号表示的角度引入四种（连续周期、连续非周期、离散周期、离散非周期）信号的频谱，以全新的方式阐述了信号的抽样定理。在系统分析中，侧重系统的描述与特性分析，凸现系统函数的概念及作用。为了锻炼提高学生理论联系实际的能力，积极将教研与科研成果引入教材，简要介绍了信号与系统的理论在生物神经网络和通信系统中的应用，并利用MATLAB仿真工具进行了信号与系统的分析。

本教材由北京交通大学陈后金主编，陈后金、胡健、薛健编著。郝晓莉和钱满义等提供了许多素材。全书由吴湘淇教授负责审阅，并提出了许多宝贵意见，编者在此表示衷心的感谢。

限于水平，书中错误及不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者  
2007年7月

# 目 录

<b>第 1 章 信号与系统分析导论</b> .....	1
1.1 信号的描述及分类 .....	1
1.1.1 信号的定义与描述 .....	1
1.1.2 信号的分类和特性 .....	2
1.2 系统的描述及分类 .....	5
1.2.1 系统的数学模型 .....	5
1.2.2 系统的分类 .....	6
1.2.3 系统连接 .....	13
1.3 信号与系统分析概述 .....	14
1.3.1 信号与系统分析的基本内容与方法 .....	14
1.3.2 信号与系统理论的应用 .....	16
习题 .....	17
<b>第 2 章 信号的时域分析</b> .....	20
2.1 连续时间信号的时域描述 .....	20
2.1.1 典型普通信号 .....	20
2.1.2 奇异信号 .....	24
2.2 连续信号的基本运算 .....	33
2.2.1 信号的尺度变换、翻转与时移 .....	33
2.2.2 信号的相加、相乘、微分与积分 .....	37
2.3 离散时间信号时域描述 .....	42
2.3.1 离散时间信号的表示 .....	42
2.3.2 基本离散序列 .....	42
2.4 离散时间信号的基本运算 .....	48
2.4.1 序列的翻转、位移与尺度变换 .....	48
2.4.2 序列的相加、相乘、差分与求和 .....	49
2.5 确定信号的时域分解 .....	51
2.5.1 信号分解为直流分量与交流分量 .....	51
2.5.2 信号分解为奇分量与偶分量之和 .....	52
2.5.3 信号分解为实部分量与虚部分量 .....	53
2.5.4 连续信号分解为冲激信号的线性组合 .....	54
2.5.5 离散序列分解为单位脉冲序列的线性组合 .....	55

2.5.6 信号分解为正交信号集 .....	56
2.6 信号的 MATLAB 表示 .....	58
2.6.1 连续信号的 MATLAB 表示 .....	58
2.6.2 离散信号的 MATLAB 表示 .....	61
2.6.3 信号基本运算的 MATLAB 实现 .....	63
习题 .....	66
MATLAB 习题 .....	71
<b>第 3 章 系统的时域分析</b> .....	<b>73</b>
3.1 线性非时变系统的描述及特点 .....	73
3.1.1 连续时间系统的数学描述 .....	73
3.1.2 离散时间系统的数学描述 .....	75
3.1.3 线性非时变系统 .....	77
3.2 连续时间 LTI 系统的响应 .....	81
3.2.1 连续时间系统的零输入响应 .....	81
3.2.2 连续时间系统的零状态响应 .....	84
3.2.3 冲激响应 .....	85
3.2.4 卷积积分 .....	87
3.3 离散时间 LTI 系统的响应 .....	98
3.3.1 离散时间系统的零输入响应 .....	99
3.3.2 离散时间系统的零状态响应 .....	101
3.3.3 单位脉冲响应 .....	102
3.3.4 序列卷积和 .....	103
3.4 冲激响应表示的系统特性 .....	111
3.4.1 级联系统的冲激响应(脉冲响应) .....	111
3.4.2 并联系统的冲激响应(脉冲响应) .....	112
3.4.3 因果系统 .....	114
3.4.4 稳定系统 .....	116
3.5 利用 MATLAB 进行系统的时域分析 .....	117
习题 .....	123
MATLAB 习题 .....	129
<b>第 4 章 信号的频域分析</b> .....	<b>131</b>
4.1 连续时间周期信号的频域分析 .....	131
4.1.1 周期信号 Fourier 级数表示 .....	131
4.1.2 周期信号的频谱 .....	139
4.1.3 连续 Fourier 级数的基本性质 .....	144
4.1.4 连续周期信号的功率谱 .....	146
4.2 连续时间非周期信号的频域分析 .....	148

4.2.1	连续时间信号的 Fourier 变换及其频谱	148
4.2.2	常见连续时间信号的频谱	152
4.2.3	连续时间 Fourier 变换的性质	158
4.3	离散周期信号的频域分析	173
4.3.1	离散周期信号的离散 Fourier 级数及其频谱	173
4.3.2	离散 Fourier 级数的基本性质	176
4.4	离散非周期信号的频域分析	178
4.4.1	离散信号的离散时间 Fourier 变换及其频谱	178
4.4.2	离散时间 Fourier 变换的基本性质	183
4.5	信号的时域抽样和频域抽样	186
4.5.1	信号的时域抽样	187
4.5.2	信号的频域抽样	191
4.6	利用 MATLAB 分析信号频谱	195
	习题	201
	MATLAB 习题	209
<b>第 5 章</b>	<b>系统的频域分析</b>	<b>212</b>
5.1	连续时间 LTI 系统的频域分析	212
5.1.1	连续时间 LTI 系统的频率响应	212
5.1.2	连续非周期信号通过系统响应的频域分析	214
5.1.3	连续周期信号通过系统响应的频域分析	218
5.1.4	无失真传输系统	221
5.1.5	理想模拟滤波器	222
5.2	离散时间 LTI 系统的频域分析	226
5.2.1	离散时间 LTI 系统的频率响应	226
5.2.2	离散非周期序列通过系统响应的频域分析	227
5.2.3	离散周期序列通过系统响应的频域分析	229
5.2.4	线性相位的离散时间 LTI 系统	230
5.2.5	离散数字滤波器	230
5.3	信号的幅度调制与解调	231
5.3.1	连续信号幅度调制	232
5.3.2	同步解调	234
5.3.3	单边带幅度调制	236
5.3.4	频分复用	241
5.3.5	离散信号幅度调制	242
5.4	利用 MATLAB 分析系统的频率特性	245
	习题	251
	MATLAB 习题	256

<b>第 6 章 连续信号与系统的复频域分析</b> .....	258
6.1 连续时间信号的复频域分析 .....	258
6.1.1 从 Fourier 变换到 Laplace 变换 .....	258
6.1.2 单边 Laplace 变换的收敛域 .....	260
6.1.3 常用信号的 Laplace 变换 .....	260
6.1.4 单边 Laplace 变换的性质 .....	263
6.1.5 Laplace 反变换 .....	272
6.2 连续时间 LTI 系统的复频域分析 .....	278
6.2.1 连续时间 LTI 系统的系统函数 .....	278
6.2.2 连续时间 LTI 系统响应的复频域分析 .....	280
6.3 连续时间 LTI 系统的系统函数与系统特性 .....	284
6.3.1 系统函数的零极点分布 .....	284
6.3.2 系统函数与系统的时域特性 .....	285
6.3.3 系统函数与系统的稳定性 .....	287
6.3.4 系统函数零极点与系统频率响应 .....	287
6.4 连续时间系统的模拟 .....	290
6.4.1 连续系统的连接 .....	290
6.4.2 连续系统的模拟 .....	292
6.5 连续时间信号与系统复频域分析的 MATLAB 实现 .....	297
6.5.1 部分分式展开的 MATLAB 实现 .....	297
6.5.2 $H(s)$ 的零极点与系统特性的 MATLAB 计算 .....	299
习题 .....	300
MATLAB 习题 .....	306
<b>第 7 章 离散信号与系统的复频域分析</b> .....	308
7.1 离散时间信号的复频域分析 .....	308
7.1.1 单边 $z$ 变换的定义及收敛域 .....	309
7.1.2 常用序列的 $z$ 变换 .....	310
7.1.3 单边 $z$ 变换的主要性质 .....	311
7.1.4 单边 $z$ 反变换 .....	319
7.2 离散时间 LTI 系统的复频域分析 .....	323
7.2.1 离散时间 LTI 系统的系统函数 .....	323
7.2.2 离散时间 LTI 系统响应的复频域分析 .....	325
7.3 系统函数 $H(z)$ 与系统特性 .....	327
7.3.1 系统函数的零极点分布 .....	327
7.3.2 系统函数与系统时域特性 .....	328
7.3.3 系统函数与系统稳定性 .....	328
7.3.4 系统函数的零极点分布与系统频率响应 .....	329



7.4	离散时间系统的模拟 .....	331
7.4.1	离散系统的连接 .....	331
7.4.2	离散系统的模拟 .....	333
7.5	利用 MATLAB 进行离散系统的复频域分析 .....	336
7.5.1	部分分式展开的 MATLAB 实现 .....	336
7.5.2	$H(z)$ 的零极点与系统特性的 MATLAB 计算 .....	337
	习题 .....	339
	MATLAB 习题 .....	343
<b>第 8 章</b>	<b>系统的状态变量分析</b> .....	<b>345</b>
8.1	引言 .....	345
8.2	连续时间系统状态方程的建立 .....	347
8.2.1	连续时间系统状态方程的普遍形式 .....	347
8.2.2	由电路图建立状态方程 .....	348
8.2.3	由微分方程建立状态方程 .....	349
8.2.4	由系统模拟框图建立状态方程 .....	350
8.3	连续时间系统状态方程的求解 .....	355
8.3.1	连续系统的状态方程的时域求解 .....	355
8.3.2	状态方程的 $s$ 域求解 .....	358
8.4	离散时间系统的状态方程 .....	360
8.4.1	离散时间系统状态方程的一般形式 .....	360
8.4.2	由差分方程建立状态方程 .....	361
8.4.3	由系统模拟框图或系统函数建立状态方程 .....	361
8.5	离散时间系统状态方程的解 .....	364
8.5.1	离散状态方程的时域求解 .....	364
8.5.2	离散状态方程的 $z$ 域求解 .....	365
8.6	MATLAB 在系统状态变量分析中的应用 .....	367
8.6.1	微分方程到状态方程的转换 .....	367
8.6.2	状态方程系统函数矩阵 $H(s)$ 的计算 .....	368
8.6.3	利用 MATLAB 求解连续时间系统的状态方程 .....	369
8.6.4	利用 MATLAB 求解离散时间系统状态方程 .....	370
	习题 .....	371
<b>第 9 章</b>	<b>信号处理在生物神经网络中的应用</b> .....	<b>377</b>
9.1	神经元的生理结构和生化组成 .....	377
9.2	静息状态下的神经元等效电路 .....	379
9.3	激励状态下的神经元等效电路 .....	380
9.4	神经网络中神经元等效电路 .....	381
9.5	Hodgkin 和 Huxley 神经元数学模型 .....	383

---

9.6 神经网络中神经元数学模型 .....	387
9.6.1 离子电流 .....	387
9.6.2 化学突触电流 .....	388
9.6.3 电突触电流 .....	388
9.7 数值计算方法 .....	388
9.7.1 等间隔步长数值计算方法 .....	389
9.7.2 自适应步长数值计算方法 .....	391
9.7.3 混合数值计算方法 .....	392
习题 .....	394
部分习题参考答案 .....	397
参考文献 .....	413

# 第 1 章 信号与系统分析导论

本章介绍信号与系统的基本概念及信号与系统的分类与特性，重点讨论线性系统和非时变系统的特性，并以此为基础介绍信号与系统分析的基本内容和方法。

## 1.1 信号的描述及分类

### 1.1.1 信号的定义与描述

“信号”一词在人们的日常生活与社会活动中有着广泛的含义。严格地说，信号是指消息的表现形式与传送载体，而消息则是信号的具体内容。但是，消息的传送一般都不是直接的，需借助某种物理量作为载体。例如通过声、光、电等物理量的变化形式来表示和传送消息。因此，信号可以广义地定义为随一些参数变化的某种物理量。在数学上，信号可以表示为一个或多个变量的函数。例如：语音信号是空气压力随时间变化的函数，图 1-1 所示为语音信号的波形。

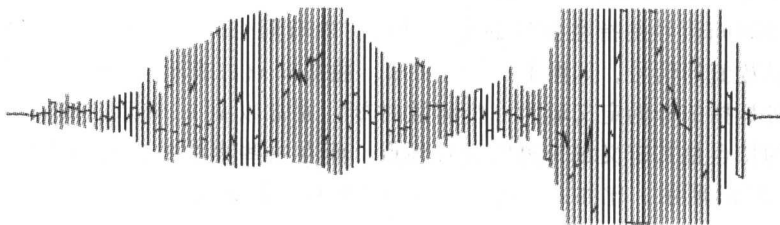


图 1-1 语音信号

在可以作为信号的诸多物理量中，电是应用最广的物理量。电易于产生与控制，传送速率快，也容易实现与非电量的相互转换。因此，本书主要讨论电信号。电信号通常是随时间变化的电压或电流（电荷或磁通）。由于是随时间而变化的，在数学上常用时间  $t$  的函数来表示，本书中“信号”与“函数”这两个名词常交替地使用。

### 1.1.2 信号的特性和分类

信号的分类方法很多。可以由不同的角度对信号进行分类。在信号与系统分析中,根据信号和自变量的特性,信号可以分解为确定信号与随机信号、连续时间信号与离散时间信号、周期信号与非周期信号、能量信号与功率信号等。

#### 1. 确定信号与随机信号

按照信号的确定性来划分,信号可分为确定信号与随机信号。

确定信号是指能够以确定的时间函数表示的信号,其在定义域内的任意时刻都有确定的函数值。图1-2(a)所示的双边指数信号就是确定信号的一个例子。随机信号也称为不确定信号,它不是时间的确定函数,其在定义域内的任意时刻没有确定的函数值。图1-2(b)所示的噪声信号就是随机信号的一个例子,它无法以确定的时间函数来描述,也无法根据过去的记录准确地预测未来的情况,而只能用统计规律来描述。

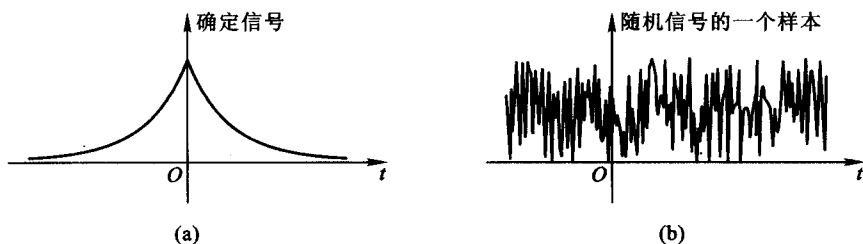


图1-2 确定信号与随机信号波形

#### 2. 连续时间信号与离散时间信号

按照信号自变量取值的连续性划分,信号可分为连续时间信号与离散时间信号。

连续时间信号是指在信号的定义域内,除有限个间断点外,任意时刻都有确定的函数值的信号,如图1-3(a)所示。通常以 $x(t)$ 表示连续时间信号。离散时间信号是指信号的定义域为一些离散时刻,通常以 $x[k]$ 表示。离散时间信号最明显的特点是其定义域为离散的时刻点,而在这些离散的时刻点之外无定义,如图1-3(b)所示。比如人口统计中的一些数据,股票市场指数等。

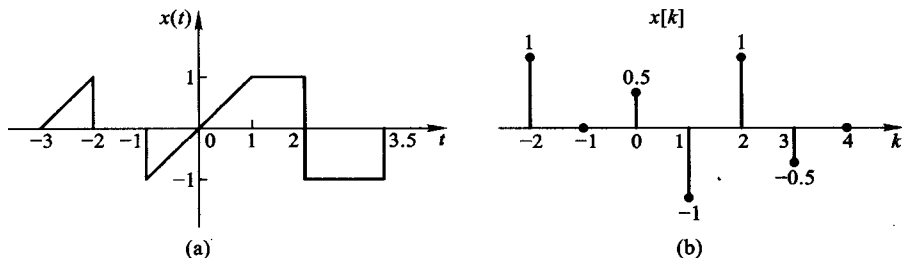


图1-3 连续时间信号与离散时间信号波形

连续信号的幅值可以是连续的,也可以是离散的。时间和幅值均连续的信号称为模拟信号。离散时间信号的幅值也可以是连续的或离散的。时间和幅值均离散的信号称为数字信号。

### 3. 周期信号与非周期信号

按照信号的周期性划分,信号可以分为周期信号与非周期信号。

周期信号都是定义在区间 $(-\infty, +\infty)$ 上,且每隔一个固定的时间间隔波形重复变化。连续周期信号与离散周期信号的数学表示式分别为

$$x(t) = x(t + T_0), \quad -\infty < t < \infty \quad (1-1)$$

$$x[k] = x[k + N], \quad -\infty < k < \infty, \quad k \text{ 取整数} \quad (1-2)$$

满足以上两式中的最小正数 $T_0$ 、 $N$ 分别称为周期信号的基本(基波)周期。

非周期信号就是不具有重复性的信号。

**【例 1-1】**判断离散余弦信号 $x[k] = \sin(\Omega_0 k)$ 是否是周期信号。

**解:**由周期信号的定义,如果 $\sin[\Omega_0(k + N)] = \sin(\Omega_0 k)$ ,则 $x[k]$ 是周期信号。

因为

$$\sin[\Omega_0(k + N)] = \sin(\Omega_0 k + \Omega_0 N)$$

要使其为周期信号,必须有

$$\Omega_0 N = m2\pi, \quad m \text{ 为整数}$$

或

$$\frac{|\Omega_0|}{2\pi} = \frac{m}{N}, \quad m \text{ 和 } N \text{ 为不可约的正整数}$$

因此,只有在 $\frac{|\Omega_0|}{2\pi}$ 为不可约的有理数时, $x[k] = \sin(\Omega_0 k)$ 才是一个周期信号。

### 4. 能量信号与功率信号

按照信号的可积性划分,信号可以分为能量信号与功率信号。

如果把信号 $x(t)$ 看做是随时间变化的电压或电流,则当信号 $x(t)$ 通过 $1 \Omega$ 的电阻时,其在时间间隔 $-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}$ 内所消耗的能量称为归一化能量,即为

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |x(t)|^2 dt \quad (1-3)$$

而在上述时间间隔 $-\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}$ 内的平均功率称为归一化功率,即为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |x(t)|^2 dt \quad (1-4)$$

对于离散时间信号  $x[k]$ , 其归一化能量  $E$  与归一化功率  $P$  的定义分别为

$$E = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=-N}^N |x[k]|^2 \quad (1-5)$$

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^N |x[k]|^2 \quad (1-6)$$

若信号的归一化能量为非零的有限值, 且其归一化功率为零, 即  $0 < E < \infty$ ,  $P = 0$ , 则该信号为能量信号; 若信号的归一化能量为无限值, 且其归一化功率为非零的有限值, 即  $E \rightarrow \infty$ ,  $0 < P < \infty$ , 则该信号为功率信号。

【例 1-2】判断下列信号是否是能量信号、功率信号。

- (1)  $x_1(t) = A \cos(\omega_0 t)$ ;                      (2)  $x_2(t) = e^{-t}$ ,  $t \geq 0$ ;  
 (3)  $x_3[k] = \left(\frac{1}{2}\right)^k$ ;                      (4)  $x_4[k] = C$ ,  $C$  为常数。

解: (1)  $x_1(t) = A \cos(\omega_0 t)$  是基本周期  $T_0 = \frac{2\pi}{|\omega_0|}$  的周期信号。其在一个基本周期内的能量为

$$\begin{aligned} E_0 &= \int_0^{T_0} |x_1(t)|^2 dt = \int_0^{T_0} A^2 \cos^2(\omega_0 t) dt \\ &= A^2 \int_0^{T_0} \frac{1}{2} [1 + \cos(2\omega_0 t)] dt = \frac{A^2 T_0}{2} \end{aligned}$$

由于周期信号有无限个周期, 所以  $x_1(t)$  的归一化能量为无限值, 即

$$E = \lim_{n \rightarrow \infty} n E_0 = \infty$$

但其归一化功率

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |x_1(t)|^2 dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n T_0} n E_0 = \frac{A^2}{2}$$

是非零的有限值, 因此  $x_1(t)$  是功率信号。

(2) 由式(1-3)可计算出信号  $x_2(t)$  的归一化能量为

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{<T>} |x_2(t)|^2 dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T e^{-2t} dt = \lim_{T \rightarrow \infty} -\frac{1}{2} (e^{-2T} - 1) = \frac{1}{2}$$

是有限值, 因此  $x_2(t)$  是能量信号。

(3) 由式(1-5)和式(1-6)可计算出  $x_3[k]$  的归一化能量和归一化功率分别为

$$\begin{aligned} E &= \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=-N}^N |x_3[k]|^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=-N}^N \left(\frac{1}{2}\right)^{2k} = \infty \\ P &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^N \left(\frac{1}{2}\right)^{2k} = \infty \end{aligned}$$

$x_3[k]$  的归一化能量是无限值, 归一化功率也是无限值, 因此既不是能量信号

也不是功率信号。

(4) 由式(1-5)和式(1-6)可计算出  $x_4[k]$  的归一化能量和归一化功率分别为

$$E = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=-N}^N |x_4[k]|^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=-N}^N C^2 = \infty$$

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^N C^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{C^2(2N+1)}{2N+1} = C^2$$

$x_4[k]$  的归一化能量是无限值，而归一化功率是有限值，因此  $x_4[k]$  是功率信号。

一个信号不可能既是能量信号又是功率信号，但却有少数信号既不是能量信号也不是功率信号。直流信号与周期信号都是功率信号。

## 1.2 系统的描述及分类

系统是指能够完成某些特定功能的整体。如通信系统、计算机系统、机器人、软件等都称之为系统。在各种系统中，电系统具有特殊的重要作用，这是因为大多数的非电系统可以用电系统来模拟或仿真。

### 1.2.1 系统的数学模型

要分析一个系统，首先要建立描述该系统基本特性的数学模型，然后用数学方法进行求解，并对所得结果做出物理解释、赋予物理意义。例如图 1-4 所示系统是由电阻、电容并联构成。若激励信号是电流源，系统响应为电容两端的电压，根据元件的理想特性与 KCL 可建立如下的微分方程

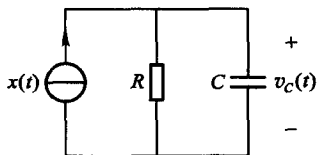


图 1-4 RC 并联电路

$$C \frac{dv_c(t)}{dt} + \frac{v_c(t)}{R} = x(t) \quad (1-7)$$

式(1-7)就是该系统的数学模型。

注：本书为与阶跃信号  $u(t)$  相区别，时域的电压信号用  $v(t)$  来表示。

在描述系统时，通常可以采用输入输出描述法或状态空间描述法。输入输出描述法着眼于系统输入与输出之间的关系，适用于单输入单输出的系统。状态空间描述法除了可以描述输入与输出之间的关系，还可以描述系统内部的状态，即可用于单输入单输出的系统，又可用于多输入多输出的系统。

除了利用数学表达式描述系统模型外，也可以借助框图表示系统模型。每

个框图反映某种数学运算，给出其输入与输出信号的约束条件。若干个框图组成一个完整的系统。图 1-5 示出了连续系统基本单元框图，图 1-6 示出了离散系统基本单元框图。利用这些基本的框图单元即可组成一个完整的系统，像式(1-7)所描述的一阶连续系统可以利用积分器、乘法器和加法器三个基本单元进行相应的连接而得到，如图 1-7 所示。

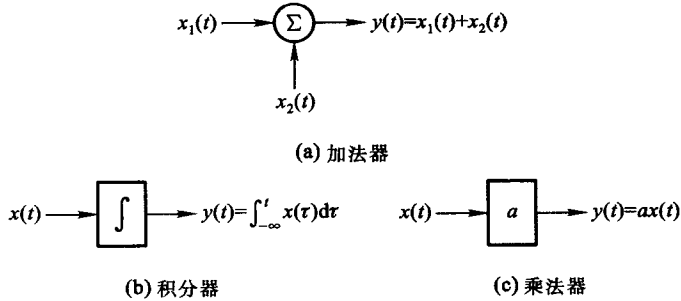


图 1-5 连续系统基本单元框图

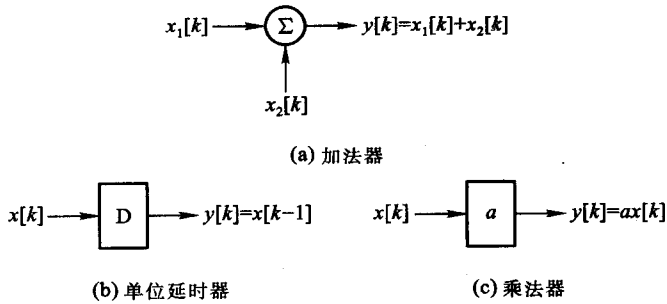


图 1-6 离散系统基本单元框图

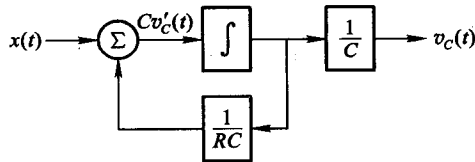


图 1-7 图 1-4 所示电路的框图表示

### 1.2.2 系统的分类

在信号与系统分析中，常以系统的数学模型和基本特性分类。系统可分为连续时间系统与离散时间系统；线性系统与非线性系统；时变系统与非时变系统；因果系统与非因果系统，稳定系统与非稳定系统等。



### 1. 连续时间系统与离散时间系统

如果一个系统要求其输入激励与输出响应都必须为连续时间信号, 则该系统称为连续时间系统。同样, 如果一个系统要求其输入激励与输出响应都必须为离散时间信号, 则该系统称为离散时间系统。如图 1-4 所示的  $RC$  电路是连续时间系统, 而数字计算机则是离散时间系统。一般情况下, 连续时间系统只能处理连续时间信号, 离散时间系统只能处理离散时间信号。但在引入某些信号变换的部件后, 就可以使连续时间系统处理离散时间信号, 离散时间系统处理连续时间信号。例如连续时间信号经过 A/D 转换器后就可以由离散时间系统处理。连续时间系统的数学模型是微分方程, 离散时间系统的数学模型是差分方程。

连续时间系统与离散时间系统常采用图 1-8 所示符号表示。连续时间激励信号  $x(t)$  通过系统产生的响应  $y(t)$  记为

$$y(t) = T\{x(t)\} \quad (1-8)$$

离散时间激励信号  $x[k]$  通过系统产生的响应  $y[k]$  记为

$$y[k] = T\{x[k]\} \quad (1-9)$$

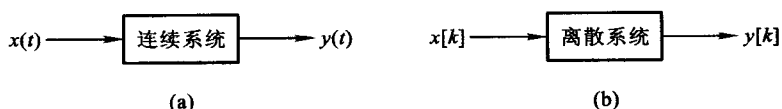


图 1-8 连续时间系统与离散时间系统的符号表示

### 2. 线性系统与非线性系统

线性系统是指具有线性特性的系统。线性特性包括均匀特性与叠加特性。均匀特性也称比例性或齐次性, 当系统的输入增加  $K$  倍时, 其输出响应也随之增加  $K$  倍。对于连续时间系统, 均匀性可表示为

若

$$y(t) = T\{x(t)\}$$

则

$$K \cdot y(t) = T\{K \cdot x(t)\} \quad (1-10)$$

叠加特性也称可加性, 当若干个输入信号同时作用于系统时, 其输出响应等于每个输入信号单独作用于系统产生的输出响应的叠加, 即

若

$$y_1(t) = T\{x_1(t)\}, y_2(t) = T\{x_2(t)\}$$

则

$$T\{x_1(t) + x_2(t)\} = y_1(t) + y_2(t) \quad (1-11)$$

同时具有均匀特性与叠加特性才称具有线性特性, 可表示为