

信号与系统



应自炉 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

信号与系统

应自炉 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统/应自炉编著. —北京:国防工业出版社,
2005.9

ISBN 7-118-04112-2

I. 信... II. 应... III. 信号系统 IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 094617 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 23 $\frac{3}{4}$ 544 千字

2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

内 容 简 介

本书系统介绍了信号与系统分析的基本理论和方法。全书共分7章,内容包括:信号与系统的基本概念,连续时间系统的时域分析,连续时间信号与系统的频域分析,连续时间信号与系统的复频域分析,离散时间信号与系统的时域与频域分析,连续时间系统和离散时间系统的状态变量分析,MATLAB软件在信号与系统分析中的应用。每章都有较多的例题与习题。

全书概念准确、结构清晰、文字精练、图文并茂、例题丰富,方便学生和教师使用。

本书可作为电子信息工程、通信工程、自动化和计算机科学与技术相关专业信号与系统课程的教材,也可供相关专业的本科生和工程技术人员学习参考。

序

1978年在武昌召开过一次大型的高校电子类专业教学改革方面的会议,我作为北京航空学院的代表出席了那次会议。记忆极深的是会上多所重点大学的代表提出了要加强通用性的专业基础课程设置,其中最受重视的是增设“信号与系统”课程,将分散于数学与专业课程中的相关知识汇集成一门专业基础课程。这是基于学科发展、教学实践以及培养学生解决问题能力的重要之举,我在会上曾是积极的倡议者之一,有幸得到了代表们的赞同。随后,一些系统的专业基础课程教材陆续出版,其中有管致中先生、李瀚荪先生和吴大正先生的著作出版。1980年我的拙著《维纳与卡尔曼滤波理论导论》由当时高等教育出版社出版,责任编辑是王忠民先生。次年该书重印审校时,王忠民先生提及了他最新编辑的清华大学郑君里先生所著的《信号与系统》一书,与北京航空学院毛士艺先生阅后甚为兴奋,认为确实是一本好的教科书,随即推荐并被评为全国优秀教材,使用至今。郑君里先生所著的《信号与系统》与美国奥本海姆的同名著作,出版时间虽有先后,但在中国同样受欢迎。

时隔20余年,信号与系统的基本概念和理论虽不断深化,但没有发生大的变化,然而教学的手段却发生了极大的变化,计算机的迅速发展与应用软件的不断创新,大大地推动了信号与系统课程的教学,教材也产生了变化。各种版本的《信号与系统》教材虽大同小异,但各有特点,是可喜之事。

应自炉老师1988年离开北京航空学院受聘于五邑大学信息学院,该学院有在校本科生近3000名,“信号与系统”是学院最重视的课程之一,所有本科生必修,是广东省教育厅确认的重点课程。积多年的教学经验,由应自炉老师执笔撰写的《信号与系统》,概念准确、结构清晰、文字精练、图文并茂、例题丰富,方便学生和教师使用。更重要的是教会学生使用“矩阵实验室(MATLAB)”软件。使用这套交互式高性能的数值计算和图形绘制软件,不但可以加深理解课程的内容,还为学生今后工作提供了一个强有力的工具。MATLAB强大的功能与数值计算能力、方便的图形绘制功能、开放和可延伸的构架、丰富的应用工具箱以及版本的不断更新,可为学生与使用者带来长期的受益。

IV

五邑大学 1985 年由国家教育委员会批准为综合性本科大学,今年迎来了 20 周年校庆。这所坐落在全国最大的著名侨乡广东省江门市的新型高等学府,在校学子已愈 15000 名。相信本书的出版是献给校庆的一份实实在在的礼物。

张有为

2005 年 7 月

目 录

第 1 章 信号与系统的基本概念	1
1.1 信号与系统	1
1.2 信号的描述与分类	2
1.2.1 信号的描述	2
1.2.2 信号的分类	3
1.3 典型信号	6
1.3.1 实指数信号	6
1.3.2 正弦信号	7
1.3.3 复指数信号	8
1.3.4 抽样信号	8
1.4 信号的基本运算	9
1.4.1 信号的相加与相乘	9
1.4.2 信号的微分与积分	10
1.4.3 信号的时移、反折与尺度变换	11
1.5 阶跃信号与冲激信号	14
1.5.1 单位斜变信号	14
1.5.2 单位阶跃信号	14
1.5.3 单位冲激信号	16
1.5.4 冲激偶信号	19
1.6 信号的分解	20
1.6.1 直流分量与交流分量	20
1.6.2 偶分量与奇分量	21
1.6.3 脉冲分量	23
1.6.4 实部分量与虚部分量	23
1.6.5 正交函数分量	24
1.7 系统模型与分类	25
1.7.1 系统模型	25
1.7.2 系统的分类	26
1.8 线性时不变系统及其特性	27
1.8.1 线性性质	27
1.8.2 时不变性	28
1.8.3 微分特性	28

1.8.4 稳定性	29
1.8.5 因果性	29
1.9 信号与系统分析法	31
习题	32
第2章 连续时间 LTI 系统的时域分析	37
2.1 引言	37
2.2 连续 LTI 系统的微分方程模型的建立	37
2.3 微分方程的经典求解法	39
2.3.1 齐次解	39
2.3.2 特解	40
2.3.3 完全解	41
2.4 起始点的跳变	42
2.5 零输入响应和零状态响应	48
2.5.1 零输入响应	48
2.5.2 零状态响应	49
2.6 冲激响应和阶跃响应	52
2.6.1 冲激响应	52
2.6.2 阶跃响应	54
2.7 卷积积分	56
2.7.1 用卷积积分求系统的零状态响应	56
2.7.2 卷积积分的定义及典型信号的卷积积分	57
2.7.3 卷积积分的图解法	58
2.8 卷积积分的性质	62
2.8.1 卷积代数	63
2.8.2 卷积积分的时移性质	64
2.8.3 卷积积分的微分性质与积分性质	65
2.8.4 与冲激信号及阶跃信号的卷积积分	66
习题	70
第3章 连续时间信号与系统的傅里叶分析	79
3.1 引言	79
3.2 周期信号的傅里叶级数展开	80
3.2.1 周期信号的傅里叶级数	80
3.2.2 周期信号的频谱与功率谱	85
3.2.3 周期信号的对称性与傅里叶系数	90
3.2.4 傅里叶级数的收敛性	93
3.2.5 有限项傅里叶级数	94
3.3 傅里叶变换	95
3.3.1 从傅里叶级数到傅里叶变换	95
3.3.2 非周期信号的能量谱	97

3.3.3 典型信号的傅里叶变换	97
3.4 傅里叶变换的性质	104
3.4.1 线性性质	104
3.4.2 共轭对称性	105
3.4.3 傅里叶正变换与反变换的对称性	105
3.4.4 尺度变换	107
3.4.5 时移性质	109
3.4.6 频移性质	110
3.4.7 时域卷积定理	111
3.4.8 频域卷积定理	112
3.4.9 时域微分	112
3.4.10 时域积分	113
3.4.11 频域微分	115
3.4.12 频域积分	115
3.5 周期信号的傅里叶变换	117
3.5.1 虚指数信号和正余弦信号的傅里叶变换	118
3.5.2 一般周期信号的傅里叶变换	118
3.5.3 傅里叶系数与傅里叶变换的关系	119
3.6 信号抽样与抽样定理	121
3.6.1 信号抽样	121
3.6.2 时域抽样定理	124
3.6.3 连续时间信号的重建	125
3.6.4 频域抽样与频域抽样定理	127
3.7 连续时间 LTI 系统的频率响应	128
3.7.1 连续时间 LTI 系统频率响应的定义	128
3.7.2 频率响应的性质	130
3.7.3 频率响应的计算	132
3.8 连续时间 LTI 系统的频域分析	133
3.8.1 连续时间 LTI 系统频域分析法	133
3.8.2 无失真传输系统	137
3.8.3 理想滤波器	140
3.9 调制与频分复用	144
3.9.1 正弦幅度调制与同步解调	144
3.9.2 AM 调制与非同步解调	146
3.9.3 频分复用	147
习题	148
第 4 章 连续时间信号与系统的复频域分析	159
4.1 拉普拉斯变换	159
4.1.1 拉普拉斯变换的定义	159

4.1.2	拉普拉斯变换的收敛域	161
4.1.3	常用信号的拉普拉斯变换	162
4.2	拉普拉斯变换的性质	165
4.2.1	线性性质	165
4.2.2	时移性	166
4.2.3	尺度变换	168
4.2.4	s 域频移特性	168
4.2.5	时域微分定理	169
4.2.6	时域积分定理	169
4.2.7	s 域微分定理	170
4.2.8	s 域积分定理	171
4.2.9	初值定理	171
4.2.10	终值定理	171
4.2.11	时域卷积定理	172
4.3	拉普拉斯反变换	173
4.3.1	部分分式展开法	173
4.3.2	留数法	177
4.4	连续时间 LTI 系统的复频域分析	178
4.4.1	微分方程的拉普拉斯变换求解法	178
4.4.2	拉普拉斯变换法分析电路和 s 域元件模型	182
4.5	连续时间 LTI 系统的系统函数	187
4.5.1	连续时间 LTI 系统的系统函数的定义	187
4.5.2	系统函数的求解	187
4.5.3	系统函数零极点与系统时域特性的关系	190
4.5.4	系统函数零极点分布与系统频率响应的关系	192
4.5.5	波特图	194
4.6	系统方框图和信号流图	197
4.6.1	系统方框图	197
4.6.2	信号流图	198
4.6.3	Mason 公式	199
4.6.4	系统模拟	201
4.7	连续时间 LTI 系统的稳定性	203
4.7.1	系统稳定性的概念	203
4.7.2	系统稳定性的判断	204
4.8	拉普拉斯变换与傅里叶变换的关系	206
	习题	208
第 5 章	离散时间信号与系统分析	219
5.1	离散时间信号	219
5.1.1	离散时间信号的描述	219

5.1.2	典型离散时间信号	220
5.1.3	离散时间信号的基本运算	222
5.2	离散时间系统	223
5.2.1	线性非移变系统	224
5.2.2	差分方程经典求解法	224
5.2.3	零输入响应和零状态响应	226
5.2.4	单位取样响应	228
5.2.5	用卷积和求零状态响应	229
5.2.6	系统的稳定性和因果性	234
5.3	离散时间信号和系统的频域描述	237
5.3.1	离散时间信号的傅里叶变换(DTFT)	237
5.3.2	DTFT 的性质	238
5.3.3	离散时间系统的频率响应	240
5.4	z 变换	242
5.4.1	z 变换的定义及收敛域	242
5.4.2	常用序列的 z 变换	244
5.4.3	z 变换的性质和定理	245
5.4.4	z 逆变换	248
5.4.5	z 变换与拉普拉斯变换的关系	254
5.5	离散时间系统的 z 变换分析法	256
5.5.1	离散时间系统函数	256
5.5.2	利用 z 变换求解差分方程	261
5.6	离散傅里叶变换(DFT)	262
5.6.1	DFT 的定义	262
5.6.2	DFT 与 DTFT 和 z 变换的关系	263
5.6.3	用 DFT 进行连续时间信号频谱分析	264
	习题	265
第 6 章	系统的状态变量分析	275
6.1	系统的状态变量分析	275
6.2	连续时间 LTI 系统状态方程的建立	277
6.2.1	连续时间 LTI 系统状态方程的一般形式	277
6.2.2	状态方程建立方法概述	278
6.2.3	由电路图建立状态方程	279
6.2.4	由信号流图建立状态方程	282
6.2.5	由输入输出的微分方程建立状态方程	283
6.2.6	由系统函数建立状态方程	284
6.3	连续时间 LTI 系统状态方程的求解	288
6.3.1	用拉普拉斯变换法求解状态方程	288
6.3.2	用时域法求解状态方程	290

6.3.3 由状态方程求系统函数	296
6.4 离散时间系统状态方程的建立	299
6.4.1 离散时间系统状态方程的一般形式	299
6.4.2 状态方程建立	300
6.5 离散时间系统状态方程的求解	302
6.5.1 用时域法求解状态方程	302
6.5.2 用 z 变换法求解状态方程	304
习题	305
第7章 MATLAB 软件在信号与系统中的应用	312
7.1 引言	312
7.1.1 MATLAB 软件简介	312
7.1.2 MATLAB 软件在信号与系统中的应用	312
7.2 MATLAB 使用入门	313
7.2.1 MATLAB 的环境介绍	313
7.2.2 MATLAB 的几个基本命令	313
7.2.3 MATLAB 的几个概念	314
7.2.4 MATLAB 语言使用入门	315
7.3 信号的产生、运算与波形绘制	320
7.3.1 信号波形绘制	320
7.3.2 信号波形变换	323
7.3.3 信号奇偶分解	325
7.4 连续时间 LTI 系统的时域分析	326
7.4.1 零输入响应	327
7.4.2 零状态响应	327
7.4.3 完全响应	328
7.4.4 冲激响应和阶跃响应	329
7.4.5 卷积积分	330
7.5 连续时间信号与系统的频域分析	333
7.5.1 周期信号的频谱分析	333
7.5.2 非周期信号的傅里叶变换	337
7.5.3 抽样信号频谱及频率混叠现象	341
7.5.4 连续时间 LTI 系统的频率响应	343
7.6 连续时间 LTI 系统的 s 域分析	344
7.6.1 拉普拉斯变换	344
7.6.2 连续时间 LTI 系统模型表示及转换	346
7.6.3 连续时间 LTI 系统时间响应分析	350
7.6.4 系统的频率特性曲线绘制	353
7.7 离散时间信号及 LTI 系统的 z 域分析	355
7.7.1 离散时间信号波形绘制	355

7.7.2 离散时间信号卷积	356
7.7.3 z 变换与逆变换	356
7.7.4 离散时间系统的分析	358
7.7.5 FFT 应用于信号频谱分析	359
7.8 系统的状态变量分析	362
参考文献.....	366

第1章 信号与系统的基本概念

1.1 信号与系统

当今社会是一个信息化的社会,人们经常谈论信息与信息处理等问题。那么,究竟什么是信息呢?控制论的创始人维纳认为,信息是任何物体与外部世界交换内容的名称,“内容”是事物的原形,“交换”则是信息载体将事物原形映射到人或其他物体的感觉器官,人们把这种映射的结果认为获得了“信息”。通俗地说,“信息”即人们得到的“消息”,即原来不知道的知识。

信息所表现的具体物理形态是多种多样的,例如,语音信息(话音或音乐)是以声压变化表示的;视觉信息是以亮度和色彩变化表示的;文字或数据信息是以字符串表示的;影响经济运行的信息表现为投资及各个产业的统计数据等。通常人们把信息的具体表现形式称为信号,或者说,信息是信号所包含的内容。信号总是一个或多个独立变量的函数,它包含了某个或某些物理现象性质的信息。信号不同的物理形态并不影响他们所包含的信息内容,不同物理形态的信号之间可以相互转换。例如,以声压变化表示的语音信号可以转换成一电压或电流变化表示的语音电信号,甚至可以转换为一组数据表示的语音信号,即数字化的语音信号。它们仅在物理形态上不一样,但都包含了同样的语音信息。

根据信号的具体物理形态,信号有声信号、光信号和电信号等不同形态。本书主要讨论对象是电信号,但所介绍的一些基本概念、分析方法和得出的一些结论也适用于其他物理形态的信号。同时,许多非电信号如温度、压力、位移、转矩等都可以通过传感器转换成电信号再进行分析处理,因此,研究电信号具有非常重要的普遍意义。电信号的具体形式表现为电路中的电压、电流、功率、电荷、电磁通等形式。研究信号包括了信号传输、信号交换和信号处理等理论。它们共同的理论基础是信号分析,即研究信号的基本性能,包括信号的描述、分解、变换、检测、特征提取以及信号设计等内容。本书主要讨论的是电信号分析基本理论。

系统是一个广泛应用的术语。例如,各种通信系统,导航定位和跟踪(雷达)系统,电力系统和电力网系统。系统的概念也不仅局限于电学领域,还可以用于社会经济各个方面,例如,生态系统,神经系统,视觉和听觉系统,消化系统等。那么,究竟什么是系统呢?所谓系统,就是由若干个相互关联又相互作用的事物组合而成的,具有某种或某些特定功能的整体。例如,电路是由电源、电阻、电感、电容、开关等元器件和连接导线组成的一种系统。在外加电压或电流的激励下,电路内部的各个支路电流和所有元器件两端的电压都将发生变化,这些电压或电流的变化称为电路的响应,在某种激励下电路有什么样的响应,就是该电路系统的特定功能;电力网系统由多个发电机、各种变压器、不同等级的输电线路和用电负载组成,其特定功能是进行能量的输送和分配;简单的通信系统由发射机、

传输媒体(通信信道)和接收机组成,复杂的通信系统则由多个收发终端、复用设备、交换机、多种传输媒体,以及负责通信网络运行管理的计算机等组成。通信系统的功能是进行信号的传输。

本书在应用举例时基本上只讨论简单的电路系统,但由此得出的许多结论可以适用于许多其他各种类型的系统。在仅局限于讨论电系统的情况下,“系统”、“电路”和“网络”等术语在本书中经常互换着使用。

系统总是对施加于它的信号作出响应,产生出另外的信号。施加于系统的信号称为系统的输入信号或激励,由此产生的另外的信号称为系统的输出信号或响应。系统的功能就体现于什么样的输入信号产生什么样的输出信号。或者说怎样的激励产生怎样的响应。

信号和系统两者之间是紧密地联系在一起的。一方面,任何系统都接受输入信号,产生输出信号,系统的特定功能就是实现特定的输入输出信号的变换关系。另一方面,任何信号的改变都是通过系统来实现的。例如,各种各样的信号转换、传输、处理、识别等,都需相应的系统来实现,因此,所有的信号与系统问题都可抽象地表示为如图 1-1 的框图所示。

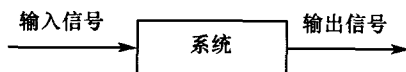


图 1-1 系统的模型图

1.2 信号的描述与分类

1.2.1 信号的描述

尽管信号能以多种多样的形式出现、存在或表现出来,但是一般来说,任何信号都可以用一个单变量或多变量的函数来表示。用不同的函数表示的信号就意味着它们包含了不同的信息。在用函数表示信号这个数学描述中,因变量可以是不同的物理量或数量,以体现具体信号所具有的不同物理形态。而自变量可以是时间、空间或其他量纲的变量。在不同物理形态信号的函数表达式中,信号值就具有各自不同的量纲。例如,电压信号的量纲为伏特(V),电流信号的量纲为安培(A)等。虽然本书一般仅限于讨论电信号与电系统,但本书讨论的不是各种具体的信号与系统问题,而是可应用于一般信号与系统问题的理论和方法,因此,本书中用函数表示信号时,一般不考虑信号具体的物理形态,而仅把它看成数学上的函数。所以,在本书中或一般的信号与系统的书中,“信号”和“函数”两个术语是同义的。本书在讨论与信号有关的问题时,“信号”和“函数”两个术语可以互相通用。在讨论具体的信号与系统问题的例子时,才把信号的物理形态和物理量纲考虑进去。

许多信号只需用一个自变量的函数表示。例如,电路中的电压或电流信号是随时间而变化的函数;气象观察中的气压、温度和风速等是高度的函数;统计学中的各个年度、月份和日期的人口、产量、股票指数值等统计数据,都是一个自变量函数的信号例子。在信号是一个自变量的函数的情况时,一般认为这个自变量是时间,虽然有时候不一定是时

间。也有许多信号要用多个自变量的函数来描述,典型的例子是二维图像信号。例如,一幅黑白照片必须用亮度随二维空间变量变化的函数来表示。视频图像是二维空间和时间变量共三个自变量的函数。现实的图形场景需用三维空间和时间四个变量的函数来描述。不管是单个自变量,还是多个自变量的情况,信号总可以用相应的单变量或多变量的函数来描述。本书讨论的信号主要是单变量的函数,没有特别说明,一般认为自变量是时间变量。

知道了信号和它的数学描述——函数之间的关系后,就可以把数学中函数的许多表示法作为信号的表示法。最基本的一种信号表示法是信号的函数表达式。例如,某个正弦信号的表达式为

$$f(t) = K \cos(\omega t + \theta) \quad (1-1)$$

在数学中,函数还常用几何图形来表示,同样也可用于信号,几何图形能更直观形象地表示信号。信号的函数图形通常称为波形,如图 1-2 所示图形就是两种常见信号的波形表示。

函数表达式与波形是信号的两种不同表示法,一个信号既可以用其表达式表示,也可以用它的波形表示。由信号表达式可以画出其波形,反之,也可以由信号的波形归纳出信号表达式。这是一种基本技巧,熟练地掌握它们,是学好信号与系统课程的基础。

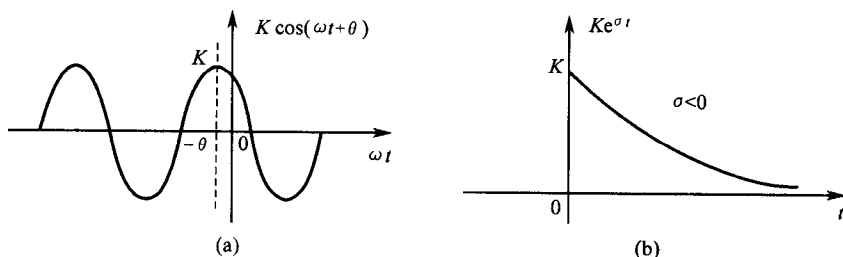


图 1-2 两种常见信号的波形表示
(a) 正弦信号; (b) 指数信号。

上面所述的信号的函数表达式描述或波形描述,都是对信号的原始特性进行描述,自变量可以是时间、空间或其他变量,但因为大部分信号的自变量都是时间,即使不是时间,一般都认为是时间,所以上述信号描述方法一般称为信号的时间域描述。由后面的章节内容知道,对信号进行变换或分析后,还可以从它所包含的频谱成分来对信号进行描述,这种描述方法称为信号的变换域描述或频谱描述。无论是信号的时间域描述或是信号的变换域描述,它们都是等价的,都包含了信号本身的全部信息。

1.2.2 信号的分类

根据信号的一些内在属性和特点,或者是对信号研究的兴趣侧重点的不同,或者是信号的应用领域的不同,可以对信号进行各种不同的分类。其实信号的名称或类别名称,也说明了信号的某一方面的特点或性质。例如,根据信号的物理形态不同,有电信号、光信号、声信号等;按信号的作用不同,有广播信号、电视信号、雷达信号等。下面讨论的一些信号分类是从信号的数学描述的性质进行的具有普遍意义的分类。它跟信号与系统讨论的一些概念与内容是紧密相关的。

1. 确定性信号与随机信号

按照信号取值是否确定,信号可以分为确定性信号与随机信号。

若信号可以表示为确定的时间函数,对于任一指定时刻,信号有确定的值,这种信号称为确定性信号,如正弦信号、周期脉冲等。图 1-3(a)所示的是一确定性信号。如果信号在某一时刻的取值是不确定的,它可能取不同的值,只以某一概率取某一值,这种信号称为随机信号,如噪声信号等。图 1-3(b)所示的是一随机信号,其中实线表示的是信号的一种可能取值情况,虚线表示的是信号的另一种可能取值情况。从该图可以看出,在任意时刻,信号的取值是不确定的,但有一定的概率模型。

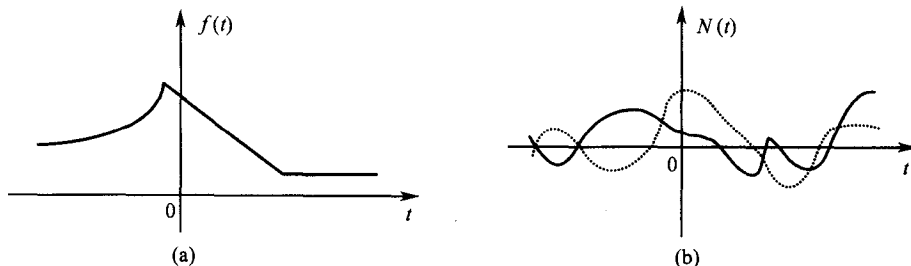


图 1-3 确定性信号与随机信号

(a) 确定性信号; (b) 随机信号。

通信系统中传输的信号几乎都具有不可预知的不确定性,因而都是随机信号。如果通信系统传输的是确定性信号,接收者就不可能由它得到任何新的信息,这样就失去了通信的意义。另外,信号在传输过程中会受到各种各样的干扰和噪声,这些干扰和噪声也是随机信号。本书只讨论确定性信号。

2. 连续时间信号和离散时间信号

按照信号定义域时间变量取值的连续性,信号可以分为连续时间信号和离散时间信号。

如果在讨论的时间区间内,除若干不连续点外,对于任意时间值都可以给出确定的函数值,此信号称为连续时间信号,简称为连续信号。如图 1-4(a)表示的是连续时间信号。只在某些不连续的时刻有定义,而在其他时刻没有定义的信号是离散时间信号,简称为离散信号。图 1-4(b)表示的是离散时间信号。以上只讨论了自变量时间的取值情

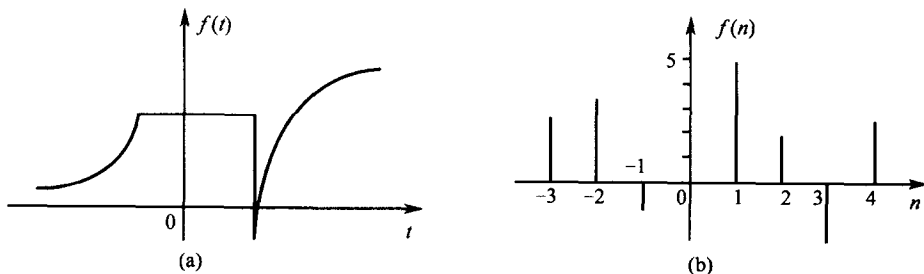


图 1-4 连续时间信号与离散时间信号

(a) 连续时间信号; (b) 离散时间信号。