

信号分析与处理

主 编 钱冬宁

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

信号分析与处理

主 编 钱冬宁
副主编 黄家平 吴秋玲

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

信号分析与处理/钱冬宁主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2017. 1

ISBN 978 - 7 - 5682 - 3675 - 1

I. ①信… II. ①钱… III. ①信号分析②信号处理 IV. ①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 016791 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 19

字 数 / 446 千字

版 次 / 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 56.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 张鑫星

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前 言

“信号与系统”和“数字信号处理”是电子信息和通信工程专业的两门重要的专业基础课程。相比较其他课程，这两门课程所需的学时数较多。

编写本书的目的主要基于两方面的考虑：一是为了适应地方本科高校的转型发展，二是为电子信息类专转本学生提供合适的教材。

目前教育部提出了地方本科高校要向应用技术类型高校转型的发展要求。这是为了加强学生实践能力的培养，以适应国民经济发展的需要。这就要求在教学计划中压缩理论教学的课时数，同时增加实践教学环节。为了适应高校转型发展的需要，本书将“信号与系统”和“数字信号处理”这两门课程合并，并压缩提炼部分内容，以便更好地规划课时。

事实上，这两门课程在知识上是一气贯通的，在内容上确有部分重叠。所以将两门课程的内容提炼合并是十分必要的，也是可行的。

目前由于部分院校招收的电子信息类专科转本科学学生，他们的基础知识参差不齐，重新学习“信号与系统”和“数字信号处理”这两门课十分必要。但由于这类学生在校时间短，课时也必须压缩。本书可以满足这类学生学习的要求。

随着数字技术的高速发展，数字信号处理的理论和技术已被广泛应用到光电技术、电子科学、电力电子和自动控制等领域，为适应数字技术发展的需要，这些专业的学生也应该在学习“信号与系统”知识的同时掌握“数字信号处理”的基本知识。而本书可以满足这类专业的学生的学习需求。

为保证知识的完整性并考虑应用技术型高校的需求，本书具有以下几个特点：

(1) 由于两门课程的知识点较多，但课时数不多及篇幅的限制，为保证知识的完整和全面，因此一般知识点的推导或证明尽量简单或省略；

(2) 在讲授知识点的同时，尽可能地给出这些知识点的物理意义以及在实际中的应用；

(3) 尽可能多地给出例题或者实际应用的案例，让学生掌握解题的方法和在实际中如何应用这些知识；

(4) 将 MATLAB 和 Simulink 程序和仿真引入到课程中，使得学生在进行理论分析的同时可以形象生动的理解所讲授的理论问题。

全书共 9 章，第 1~4 章是连续时间信号、系统的时域和变换域分析，第 5 章是采样（也是连续到离散的转换）和滤波，第 6~7 章是离散信号、系统的时域和变换域分析，第 8~9 章是数字信号处理的内容，包括离散傅里叶级数（DFS）、离散傅里叶变换

(DFT) 和快速傅里叶变换 (FFT) 及滤波器的设计。本书的附录部分增加了复变函数的基础知识, 以便让没有学过“复变函数”课程的专转本的学生或者有着同样情况的学生学习参考。

参与本书的编写有钱冬宁、吴秋玲、黄家平、陈艳、马逸新及沈姗姗, 钱冬宁负责全书的统稿工作, 黄家平、吴秋玲为副主编。

限于水平, 书中难免有错误和不妥之处, 恳请读者批评指正。

编者

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 连续时间信号的时域分析	4
2.1 信号的分类	4
2.2 连续时间信号及其基本特性	6
2.2.1 常用信号的基本特性	6
2.2.2 单位阶跃信号和单位冲激信号	8
2.3 信号的运算	15
2.3.1 信号的加减和信号的相乘	15
2.3.2 信号的反褶、尺度变换与时移	16
2.3.3 信号的微分与积分	19
2.3.4 信号的卷积积分	19
2.4 信号的分解	24
2.5 利用 MATLAB 进行连续时间信号的时域分析	26
习题	31
第 3 章 连续时间系统的时域分析	35
3.1 系统及其表示	35
3.2 系统的分类	35
3.3 线性时不变系统及其分析方法	36
3.4 连续时间系统的时域分析	40
3.4.1 微分方程的建立	40
3.4.2 微分方程的求解	41
3.4.3 零输入响应和零状态响应	46
3.5 系统的冲激响应	49
3.6 连续时间系统的卷积积分	51
3.6.1 卷积积分的物理意义	51
3.6.2 卷积积分在线性时不变系统中的应用	52
3.7 利用 MATLAB 进行连续时间系统的时域分析	53
习题	55
第 4 章 连续时间信号及系统的变换域分析	58
4.1 周期信号的傅里叶级数	58

4.1.1	三角形式的傅里叶级数	58
4.1.2	指数形式的傅里叶级数	59
4.1.3	波形对称性与傅里叶系数的关系	60
4.1.4	周期信号的频谱及特点	61
4.1.5	吉布斯现象	63
4.2	非周期信号的傅里叶变换	64
4.2.1	傅里叶变换的导出	64
4.2.2	常见非周期信号的傅里叶变换	66
4.2.3	傅里叶变换的基本性质	70
4.3	周期信号的傅里叶变换	80
4.3.1	正弦和余弦信号的傅里叶变换	80
4.3.2	一般周期信号的傅里叶变换	80
4.4	拉普拉斯变换	83
4.4.1	从傅里叶变换到拉普拉斯变换	83
4.4.2	收敛域	84
4.4.3	单边拉普拉斯变换	85
4.4.4	常见信号的单边拉普拉斯变换	86
4.4.5	单边拉普拉斯变换的性质	87
4.5	单边拉普拉斯逆变换	93
4.5.1	利用单边拉普拉斯变换性质求解	93
4.5.2	部分分式展开法	94
4.6	用拉普拉斯变换求解线性时不变系统	97
4.6.1	微分方程的拉氏变换求解	97
4.6.2	电路系统的拉氏变换求解	97
4.7	连续时间系统的系统函数	100
4.7.1	系统函数	100
4.7.2	系统函数零极点分布与时域特性	102
4.7.3	系统稳定性分析	106
4.8	系统的频率响应特性	108
4.8.1	线性时不变系统的频率响应特性	108
4.8.2	频响特性的矢量作图法	109
4.9	系统的图形表示方法	112
4.9.1	系统框图	112
4.9.2	信号流图	112
4.9.3	梅森公式	114
4.9.4	系统模拟	115
4.10	连续时间信号及系统变换域的 MATLAB 分析	117
4.10.1	连续时间信号的变换域的 MATLAB 分析	117

4.10.2 连续时间系统的变换域的 MATLAB 分析	119
练习题	120
第 5 章 连续时间信号的滤波与采样	128
5.1 信号的传输与滤波	128
5.1.1 信号的无失真传输	128
5.1.2 信号的滤波	130
5.2 信号的采样——连续到离散的过程	133
5.2.1 采样的数学模型	134
5.2.2 冲激采样	134
5.2.3 时域采样定理	135
5.3 实际采样的过程	136
5.4 实际信号重建	137
5.5 MATLAB 在信息传输和采样中的应用	141
习题	145
第 6 章 离散时间信号及系统的时域分析	147
6.1 常用离散信号及基本特性	147
6.1.1 常用离散信号的基本特性	148
6.1.2 单位样值序列和单位阶跃序列	150
6.2 信号的运算	151
6.3 离散时间系统的时域分析	153
6.3.1 差分方程的建立	155
6.3.2 差分方程的求解	156
6.3.3 零输入零状态响应	159
6.4 系统的单位样值响应	161
6.4.1 单位样值响应	161
6.5 离散时间系统的卷积和分析	162
6.5.1 零状态响应: 卷积和	162
6.5.2 卷积和的性质	163
6.5.3 卷积和的计算	164
6.6 离散时间信号与系统的时域分析 MATLAB 实现	166
习题	169
第 7 章 Z 变换与离散时间系统的 Z 域分析	172
7.1 Z 变换及其基本性质	172
7.1.1 Z 变换的定义	172
7.1.2 Z 变换的收敛域	173
7.1.3 常用序列的单边 Z 变换	178
7.1.4 Z 变换的基本性质	180
7.1.5 Z 逆变换	184

7.2 离散时间系统的 Z 域分析	187
7.2.1 利用单边 Z 变换求解离散时间系统的响应	187
7.2.2 系统函数	188
7.2.3 系统的因果性和稳定性	190
7.3 离散时间系统的图形表示方法	193
7.4 本章相关的 MATLAB 命令及应用	195
7.4.1 单边 Z 变换函数和 Z 逆变换函数	195
7.4.2 部分分式展开转换函数	196
7.4.3 零极点形式转换函数	196
7.4.4 Simulink 在系统图形表示中的应用	196
习题	197
第 8 章 离散信号与系统频域分析及快速傅里叶变换	200
8.1 离散非周期序列的傅里叶变换 (DTFT)	200
8.1.1 离散非周期信号的傅里叶变换 (DTFT)	200
8.1.2 DTFT 的特性	201
8.1.3 DTFT 的性质	203
8.2 离散线性时不变系统的频域分析	204
8.2.1 离散线性时不变系统的频域表示	204
8.2.2 离散线性时不变系统的滤波特性	205
8.2.3 离散系统的频响特性的矢量作图法	205
8.3 离散周期信号的傅里叶级数 (DFS)	208
8.3.1 离散周期信号的傅里叶级数 (DFS) 表示	208
8.3.2 离散周期序列傅里叶级数 (DFS) 的性质	210
8.3.3 几种傅里叶变换的关系	211
8.4 离散傅里叶变换 (DFT)	213
8.4.1 有限长度序列与周期序列的关系	213
8.4.2 离散傅里叶变换 (DFT)	214
8.5 离散傅里叶变换 (DFT) 的性质	215
8.5.1 线性	215
8.5.2 序列的圆周位移特性	215
8.5.3 序列的圆周卷积和特性	216
8.5.4 DFT 的对称特性	217
8.6 用离散傅里叶变换 (DFT) 求线性时不变系统的响应	217
8.6.1 线性卷积和与圆周卷积和的关系	217
8.6.2 频域抽样理论	220
8.7 用离散傅里叶变换 (DFT) 进行信号频谱分析	221
8.7.1 防混叠失真与参数选择	221
8.7.2 频谱泄漏	223

8.7.3 栅栏效应	224
8.7.4 DFT 的滤波特性分析	224
8.8 快速傅里叶变换 (FFT)	226
8.8.1 快速计算 DFT 的改进途径	226
8.8.2 按时间抽取 (DIT) 的基 2 FFT 算法	227
8.8.3 按频率抽取 (DIF) 的基 2 FFT 算法	232
8.8.4 离散傅里叶逆变换 (IDFT) 的快速算法	235
8.9 快速傅里叶变换 (FFT) 的应用	235
8.9.1 信号频谱的 FFT 分析	235
8.9.2 利用 FFT 求线性时不变系统的响应	236
8.10 本章中的 MATLAB 程序	238
8.10.1 离散序列傅里叶变换 (DTFT)	238
8.10.2 离散傅里叶变换 (DFT)	239
8.10.3 快速傅里叶变换 (FFT) 应用	240
习题	241
第 9 章 滤波器设计	244
9.1 滤波器概述	244
9.1.1 滤波器的基本概念	244
9.1.2 滤波器的技术指标	245
9.1.3 滤波器通用设计步骤	246
9.2 模拟滤波器设计	247
9.2.1 Butterworth 模拟滤波器的设计	247
9.3 IIR 数字滤波器设计	250
9.3.1 冲激响应不变法设计 IIR 滤波器	251
9.3.2 双线性法设计 IIR 滤波器	254
9.3.3 频率变换法设计 IIR 滤波器	258
9.4 FIR 数字滤波器设计	261
9.4.1 FIR 数字滤波器的线性相位特点	262
9.4.2 FIR 数字滤波器的幅度函数特点和零点位置	263
9.4.3 窗函数法设计 FIR 滤波器	266
9.4.4 频率采样法设计 FIR 滤波器	271
9.4.5 FIR 滤波器与 IIR 滤波器的比较	272
9.5 本章相关的 MATLAB 命令及应用	272
9.5.1 IIR 数字滤波器设计	272
9.5.2 FIR 数字滤波器设计	273
9.5.3 FDAtool 在数字滤波器设计中的应用	274
习题	275
附录 A 复变函数的基本知识	277

A.1 复数和复变函数	277
A.1.1 复数及其运算	277
A.1.2 复变函数	279
A.1.3 解析函数	281
A.2 复变函数的积分	283
A.2.1 复变函数积分的概念	283
A.2.2 重要的积分定理	284
A.3 级数	285
A.3.1 复数项级数	285
A.3.2 复变函数项级数	286
A.4 留数	288
A.4.1 留数的定义	288
A.4.2 留数的计算	288
参考文献	289

第 1 章

绪 论

人类在漫长的发展进程中，为了能够共同进行狩猎等生产活动，需要进行相互沟通与交流，为进行这种沟通就产生了语言、图形和文字。正是由于人类具有语言、图形和文字，使得人类有别于其他动物，这些语言、图形和文字传达了各种消息或信息。正是通过不断地改善消息或信息接收和传播的方式方法，社会才不断地发展和进步。可以说，人类的历史也是信息技术的发展历史。

历史上共有六次信息技术的发展阶段。

第一次是语言的使用，距今 35 000~50 000 年。语言的使用是从猿转变到人的重要标志；

第二次是文字的创造，约在公元前 3500 年，开始出现文字，从而使得信息打破了时间和地域的限制；

第三次是活字印刷术的发明，约在公元 1000 年，从而使得信息的传播可以非常的广泛和迅速；

第四次信息技术的革命是电报、电话、广播及电视的发明和广泛应用，从而使得信息的传输有了革命性的变革，打破了时间和空间的限制，信息的传播更加迅速和便捷；

第五次是始于 20 世纪 60 年代，随着计算机的发明及计算机的广泛使用并与现代通信技术有机结合，使得现在信息的获取和传递变得更加精确、方便和快捷；

第六次信息技术革命是随着互联网、物联网技术、云计算、云存储、云媒体以及大数据等技术和概念的提出和发展，以及 4G 和 5G 手机通信技术的发展，使得信息的传播和获取已经成为人们生活中不可或缺的一个部分。

信息技术不管如何发展，总是包括信息的获取、信息的分析、信息的传递、信息的存储、信息处理及信息的分配和信息的重现等几个基本环节。

从古至今，信息技术都起着至关重要的作用。如“周幽王烽火戏诸侯”，周幽王为博美人一笑，错误的发出有敌来犯的烽火信息，丧失了诸侯的信任，最终导致国破家亡（这是信息提取应用的错误）；“吕子明白衣渡江”，吕蒙占领烽火台，切断了关羽的信息传递通道，夺回荆州，并使一代名将关羽兵败麦城，留下千古遗憾（这是由于信息传递出问题所致）；在第二次世界大战中，决定美日力量对比的中途岛之战，美军破译日军的密码，成功重创日军，英国的科学家图灵利用计算机成功破译德军密码，使英国对于德军的动向了如指掌，在战场上赢得了主动权（这是美、英在信息处理上的胜利或者说是日、德在信息处理上的失败），可以说，美国和英国的信息技术在取得二战胜利中居功至伟！历史上这样的例子不胜

枚举。现代社会中，信息技术更是与每个人、每个企业甚至和国家息息相关。

本书的名称“信号分析与处理”是什么含义？信号分析与信息技术有什么关系？信号处理与信息技术又有何种联系？

信号：信号一般都是由变化的物理量来表示，如光、声或者电磁波的变化。信号是消息的传播载体。消息是指能够被人的感知器官所接收的信息，如文字、语音、图像等，是信息的表现形式。信息是消息的内涵，是消息中包含的有用的东西，对于不同的接收者，同样的一条消息所包含的信息量是不同的。消息是外在的，信息是内在的，消息和信息都必须以信号为载体才能在通信系统中传输。信号与信息是相互依存的关系，信号是载有信息的，信号是信息的表现形式，所以信号是信息技术的基础。

本书所涉及的内容包括信号分析和信号处理两个方面，是信息技术的理论基础。

信号分析：信号的形式多种多样，有光学的、机械的、声学的、化学的、电子的信号，甚至有人文的和经济的信号等。由于电信号具有易于采集、传输、处理及存储等优点，所以一般都是采用不同的手段将这些信号转换为电信号，也就是变化的电压、电流、电荷或者磁通等，所以在本书中所有的信号都是指的电信号。信号分析就是对于信号的特性进行分析，其中包括时域特性的分析和频域特性的分析，时域特性的分析包括信号的波形、信号出现的先后次序、波形变换的快慢以及信号的周期特性等；频域特性的分析包括可以将信号分解成不同频率的正弦波以及各个频率分量的相对大小、主要频率分量所占有的频带宽度等特性。通过对信号时域特性和频域特性的分析，可以为更好地进行信息的获取、信息的分析、信息的传递、信息的存储、信息处理及信息的分配和信息的重现等信息技术方面的研究提供理论基础。事实上目前各种电视信号、广播信号以及有线和无线通信的信号形式，特别是 3G、4G 以及 5G 手机的信号都是根据信号的特性并在保证信号所载的信息能够足够保留的基础上设计信号的形式，以便能做到信号占有的频带宽度尽可能窄，而具有尽可能高的传输速率的特性。

信号处理：信号处理所涉及的方面很多，可以理解为对信号进行某种加工变换的过程，加工处理的目的主要包括：一是为了便于通过不同的媒介传输信号；二是加强信号的有用成分并削弱不需要的成分或者抑制噪声及干扰的影响；三是将信号变换成容易分析与识别的形式以便估计或提取其特征或者参量等。具体处理主要包括以下几个领域：

- (1) 连续和离散线性时不变系统的时域和变换域分析；
- (2) 信号的卷积、相关和谱分析；
- (3) 信号的采集、模数转换 (A/D) 及数模转换 (D/A) 等；
- (4) 信号的传输；
- (5) 频域滤波及广义滤波理论和技术；
- (6) 自适应信号处理；
- (7) 估计理论，包括功率谱估计和相关函数估计等；
- (8) 信号的压缩技术，包括语音压缩和图像压缩等；
- (9) 信号的加密与解密处理的理论与技术；
- (10) 信号的建模理论与技术；
- (11) 信号处理的应用与实现。

本书作为一本基础理论教材,不可能涵盖所有的信号处理内容,只能根据理论够用的基本要求,仅仅讨论信号处理领域中“连续和离散线性时不变系统的时域和变换域分析”“信号的卷积、相关和谱分析”“信号的采集和传输”“频域滤波器”和“信号处理的实现”等几个方面的内容,为相关专业后续课程的学习打下坚实的理论基础。而这些信号处理的任务是通过系统来实现的。所以,下面再简单讨论有关系统的问题。

系统:所谓“系统”是指由若干个相互联系、相互作用的单元(或事物)组合而成的具有某种特定功能的一个整体。系统可大到宇宙系统、太阳系统或地球系统,或者社会系统、政治系统及经济系统,又或者小到生物细胞系统。在本书中所讨论的均为电子系统,就是实现信号处理的电子系统。

最常见的简单的系统就是单输入单输出的系统,如图1-1所示。这里的系统可以是一段传输线或者一个电阻和电容构成的具有微分或者积分的简单系统,也可以是复杂的通信系统或者广播电视系统,构成系统的单元可大可小,可简可繁,而且各个系统还可以组合成一个大的复杂的系统。而电子学领域中的系统往往是由各种电子元器件所构成具有某些功能的电路。电路有时又称为网络(这个网络千万不要与目前非常广泛应用的互联网画等号!)。网络与电路的区别在于网络主要是从理论和抽象的角度来讨论系统,网络主要研究系统是否能满足信号处理的要求,或者讨论为满足信号处理的要求,系统的参数如何选择等问题。电路分析则是分析并得到各个支路的电流和电压的数值。二者所研究的角度是不一样的。

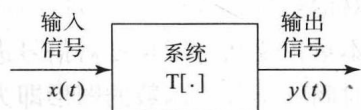


图 1-1 系统示意图

信号与系统二者之间有着十分密切的关系。没有信号,系统将空置而没有意义(类似于没有人住的空置房),如果只有信号而没有系统,信息发送者将无法将信息传送到信息接收者(类似于两个聋人相互对话,谁也听不到谁)。所以在一般的情况下,信号与系统之间要求相互匹配;在有些情况下,设计者要根据信号处理的要求来设计系统;而在另外的情况下,设计者要根据保留信息的要求和系统的特性来设计信号。而这些都是要在充分掌握了信号与系统的特性的基础上才能实现。

数字信号是指在时间上和幅度上均为离散的一类信号,而模拟信号则是在时间上和幅度上均为连续的信号。数字信号随着大规模集成电路和计算机的高速发展而广泛应用于当今社会的各个领域。为了适应这种发展的需要,发展出一个新的信号处理的学科门类:数字信号处理。下面简略讨论一下数字信号处理的基本概念。

数字信号处理:与传统的模拟信号处理相比,数字信号处理具有精度高、灵活性高、可靠性强、便于大规模集成、可以进行复杂的处理功能以及便于加密等特点,使得数字信号处理学科成为发展最快、新理论与新技术层出不穷、应用领域最广泛的学科之一。所以本书也将数字信号处理的基本知识包含其中,其中包括离散傅里叶级数(DFS)、离散傅里叶变换(DFT)及其优化算法快速傅里叶变换(FFT)以及数字滤波器的设计等,以满足通信、电子信息、自动控制等领域的要求。

第 2 章

连续时间信号的时域分析

信号的特性包括信号的时域特性和信号的频域特性，其中信号的时域特性表示信号随时间变化的特性，信号的频域特性表示信号随频率变化的特性，因此可从时域和频域两个角度对信号进行分析，信号的时域分析是信号的外在体现，信号的频域分析是信号的内在体现，本章主要从时域角度对信号进行分析。从时域来看，信号是随时间变化的，其数学表达式是时间的函数，函数的图形即为信号的波形，数学表达式与波形是信号的基本描述方法，本书中信号与函数两名词通用。

2.1 信号的分类

信号的种类很多，可从不同角度对信号进行分类。

1. 确定信号与随机信号

若一信号能表示为确定的时间函数，对于给定的某一时刻，信号有确定的函数值，这种信号称为确定信号。例如，电路课程中研究的正弦信号、指数信号等都是确定信号。

随机信号不是时间的确定函数，它在每一个确定时刻的取值是不确定的，只能通过大量实验测出某时刻取某一数值的概率。无线通信中的干扰与噪声、电路元件中的热噪声等，都是随机信号。

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，从而失去了传送消息的本意。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。本书中只研究确定信号。

2. 周期信号与非周期信号

根据信号在时间上是否具有周而复始的特性可将信号分为周期信号与非周期信号。周期信号是指每隔一定时间 T ，周而复始且无始无终的信号，其表达式常表示为

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

满足式 (2-1) 的最小 T 值称为该信号的周期，常见的周期信号如正余弦信号。若信号在时间上不具有周而复始的特性，则称该信号为非周期信号，如指数信号就是典型的非周期信号。非周期信号也可以看成周期 T 趋于无穷大的周期信号。

实际传输的信号大部分是非周期信号，本书将对这两种信号分别进行研究。

3. 连续时间信号与离散时间信号

根据时间函数取值是连续还是离散可将信号分为连续时间信号与离散时间信号。若在讨论的时间间隔内,除若干不连续点之外,对于任意时间值都可给出确定的函数值,此信号称为连续时间信号。连续时间信号的幅值可以连续也可以是离散的,若时间及幅值均连续称为模拟信号,如正弦信号,如图 2-1 (a) 所示。若幅值为有限个不连续点的连续时间信号称为量化信号,如图 2-1 (b) 所示。离散时间信号在时间上是离散的,只在一些特定的时间点上有函数值,其他时间点无定义。离散时间信号的幅值可以是连续的也可以是离散的,若时间及幅值均离散称为数字信号,如图 2-2 (a) 所示;若时间离散,幅值连续称为抽样信号,如图 2-2 (b) 所示,抽样信号是模拟信号数字化的中间结果。

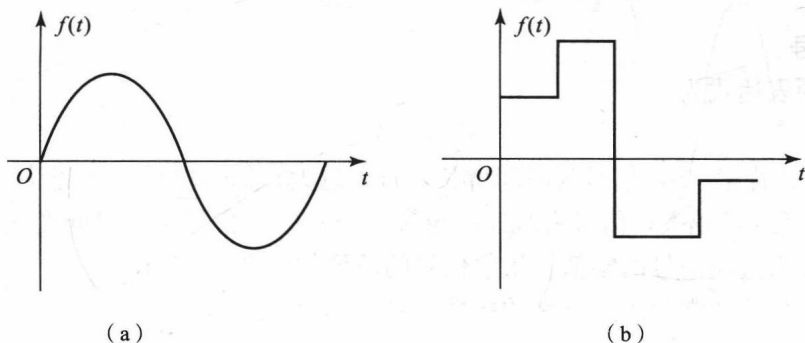


图 2-1 连续时间信号
(a) 模拟信号; (b) 量化信号

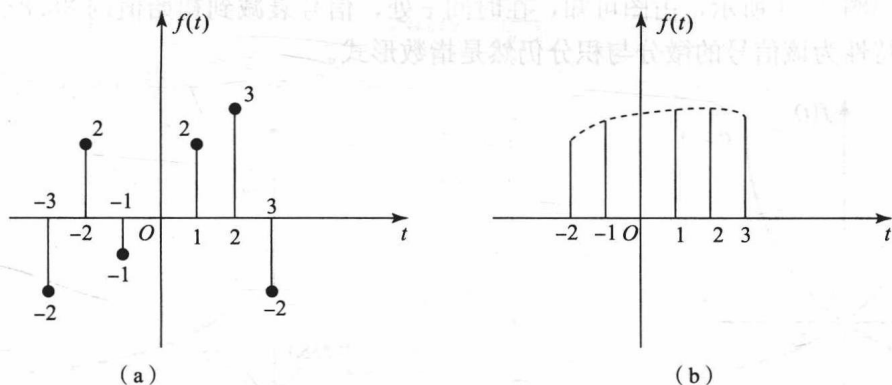


图 2-2 离散时间信号
(a) 数字信号; (b) 抽样信号

实际传输的信号可能是连续时间信号,也可能是离散时间信号。例如人的语音、乐器发出的声音等均为连续时间信号,而每天的天气预报结果、每天的存款利息等都是离散时间信号。本书将对这两种信号分别进行研究。

4. 一维信号与多维信号

根据时间函数的变量是一个还是多个可将信号分为一维信号与多维信号。一维信号的变量只有一个,如语音信号就是一维信号。多维信号的变量可以有多个,若变量为两个称为二

维信号，如黑白图像就是一个二维信号。若变量为三个称为三维信号，如黑白电视信号就是一个三维信号，本书为研究方便只研究一维信号。

信号的常见分类除以上形式外，还可将信号分为能量信号与功率信号、实信号与复信号，在此因篇幅限制不做一一阐述。

2.2 连续时间信号及其基本特性

本节主要讨论典型的连续时间信号的表达式、波形及特性。

2.2.1 常用信号的基本特性

1. 指数信号

指数信号的表达式为

$$f(t) = Ae^{at} \quad (2-2)$$

式中， α 为实数。若 $\alpha > 0$ ，信号随时间增长，且 α 越大，信号增长速度越快。若 $\alpha < 0$ ，信号随时间衰减，且 $|\alpha|$ 越大，信号衰减速度越快。若 $\alpha = 0$ ，信号不随时间变化，此时信号称为直流信号。 A 为直流信号的幅值，指数信号的波形如图 2-3 所示。

实际中的指数信号常为单边衰减的指数信号，其表达式为

$$f(t) = \begin{cases} Ae^{-at} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2-3)$$

式中， $\alpha > 0$ ， α 的倒数称为指数信号的时间常数，记为 τ 。单边信号指的是信号只在 $t \geq 0$ 有值，其波形如图 2-4 所示，由图可知，在时间 τ 处，信号衰减到初始值的 36.8%。指数信号最重要的特性为该信号的微分与积分仍然是指数形式。

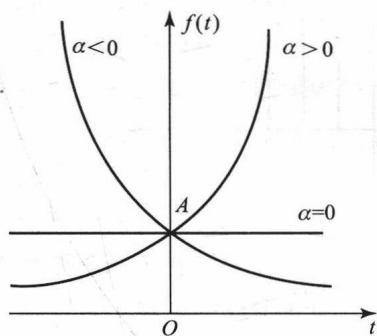


图 2-3 指数信号的波形

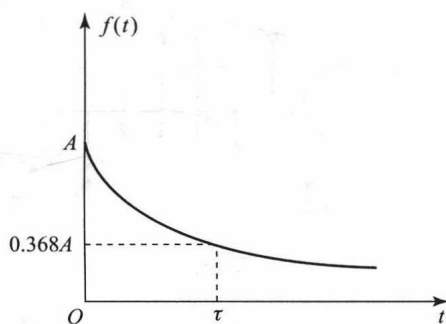


图 2-4 单边衰减的指数信号的波形

2. 正弦信号

正弦信号与余弦信号因相位上只相差 $\frac{\pi}{2}$ ，故一般可统称为正弦信号，其一般形式为

$$f(t) = A \sin(\Omega t + \theta) \quad (2-4)$$

式中， A 为振幅； Ω 为角频率； θ 为初相。