

高等学校规划教材

信号与系统

XINHAO YU XITONG

● 于慧敏 主编



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校规划教材

信号与系统

于慧敏 主编

凌明芳 胡中功 副主编

化学工业出版社
教材出版中心
·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

信号与系统/于慧敏主编. —北京: 化学工业出版社, 2002.6

高等学校规划教材

ISBN 7-5025-3636-1

I. 信… II. 于… III. 信号理论-高等学校-教材
IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 032819 号

高等学校规划教材

信号与系统

于慧敏 主编

凌明芳 胡中功 副主编

责任编辑: 唐旭华

责任校对: 郑捷

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市云浩印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 25¹/₂ 字数 632 千字

2002 年 7 月第 1 版 2002 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3636-1/G·977

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

本书为通信、信息和电子工程类、自控类专业的专业基础课程信号与系统的教材。由于作为该书核心的一些重要的基本概念、原理和方法，对于其他所有工科类以及理科的专业也是很重要的，因此，本书也可作为其他工科或理科信号与系统课程的教材。

本书论述的基本宗旨，遵守以讲述确定性信号经由线性时不变系统处理或变换的基本概念、原理和方法为主，内容包括连续时间信号与系统和离散时间信号与系统。通过本书的学习，读者能够较全面掌握信号与系统分析方法和基本综合技术。

为了用统一概念来处理全书，在连续时间信号与系统和离散时间信号与系统的内容安排上，采用并行的方式，以一种统一的方式将两者概念糅合在一起。在教材内容安排上，将原来分散的内容，通过其共性内在联系，安排在一起讲述。这样做，一方面可以用统一方法处理一些有内在联系的重要概念和分析方法，另一方面可以使教材更为紧凑。为了适应日益发展的信号与系统分析、设计和实现技术及其应用范围，书中加强和增加了一些具有广泛应用背景的重要概念与方法，以适应信号与系统课程教学和内容安排上的发展。

要全面掌握信号与系统这门课程，没有一定数量且能应用这些基本方法的习题是不能达到的。因此，各章均安排一定数量的习题。习题主要以各章的基本概念和方法的应用为主，辅以一定数目的程度提高习题，以综合各章所提到的基本概念和方法。

本书的编写，假定读者已具有基本微积分方面的知识，有进行复数运算能力，接触过微分方程方面的基本内容以及学习过电路原理课程。

全书分为9章。第1章信号与系统的基本概念，论述了信号与系统的数学描述极其相关的基本概念。第2章线性时不变(LTI)系统的时域分析，着重论述了线性时不变系统的卷积表示方法，还讨论了线性时不变系统的时域经典求解方法以及响应的零状态响应和零输入响应分解。第3章连续时间信号与系统的频域分析和第4章离散时间信号与系统的频域分析，全面论述了连续和离散时间线性时不变系统的频域分析方法。针对计算机应用和数字信号分析，在第4章中用相当的篇幅，介绍了离散傅里叶变换(DFT)和它的快速算法——FFT，以及FFT在系统中的应用。第5章采样、调制与通信系统，是建立在第4章和第5章讨论的基础之上的，利用傅里叶变换的调制特性，研究了连续时间和离散时间信号的时域和频域的采样定理、通信系统中的调制和复用。在第5章还讨论了连续时间信号的离散化处理和表示，以及现代通信中信号的正交表示。第6章信号与系统的复频域分析，全面论述了连续时间线性时不变系统的 S 域分析方法。第7章 Z 变换，全面论述了离散时间线性时不变系统的 Z 域分析方法。第8章系统函数，在前几章论述的基础上，针对线性时不变系统分析和综合中的一些基本问题，进一步讨论系统函数应用中的一些基本方法和概念。第9章状态变量分析，在该章中，较全面地介绍了现代系统与控制理论的状态变量分析法。

本书较全面地论述了信号与系统所涉及的相关内容，通过本书的学习能为学生后续课程的学习打下很好的基础。全书内容丰富，有利于授课教师选材，同时在教材的内容论述与表达上，也考虑了读者自学的要求。授课教师可根据课程要求，按照不同章节的选取与组合，构成深度和学时不同的课程。从目前国内高等院校的教学需要来看，推荐以下三种组课方案

供参考（下列数字为章节）：

- ① 1-2-3-4-5-6-7，其中第4章中的有关离散傅里叶变换（DFT）可不讲授；
- ② 1-2-3-4-5-6-7-8；
- ③ 1-2-3-4-5-6-7-8-9。

上述方案中，第2章中有关时域经典求解方法内容可适当删减。第3章和第4章中有关电路的变换域求解方法应注重基本方法的讲授，有关内容可适当删减。第一种方案适合于课时少，本课程后又开设数字信号处理课程的相关专业。第二种方案适合于课时较充裕的信号与系统课程的教学。第三种方案适合于本课程后不再开设控制理论课程的相关专业。

本书由于慧敏主编，凌明芳和胡中功为副主编，第1章和第6章由凌明芳执笔，第7章和第9章由胡中功执笔，其余各章由于慧敏执笔。

荆仁杰教授与作者共同研讨并审阅了全书，提出了许多指导性修改意见，保证了书稿的编写质量，作者表示衷心的感谢。

本书是在仇佩亮教授的支持下完成编写的，仇佩亮教授在百忙之中指导了书稿提纲的编写，帮助作者确定了书稿的编写目标，并审阅了部分章节，作者表示由衷的感谢。

作者感谢浙江大学信息科学与工程学院信息与电子工程系黄达谏教授、刘济林教授对本书编写的支持，以及作者同事金文光副教授、杭国强副教授对本书编写的支持。

由于作者的水平有限，书中的内容、体系安排、文字表述等方面难免有不妥和错误之处，敬请读者指正。

作 者

2002年3月于浙江大学求是园

目 录

1 信号与系统的基本概念	1
1.0 引言	1
1.1 信号与系统的基本概念	1
1.1.1 信号的描述与信号的分类	1
1.1.2 系统的表示与分类	5
1.2 基本的连续时间信号	6
1.2.1 连续时间复指数信号与正弦信号	6
1.2.2 奇异信号	8
1.2.3 其他连续时间信号	12
1.3 基本的离散时间信号	13
1.3.1 单位冲激序列和单位阶跃序列	13
1.3.2 离散时间复指数信号与正弦信号	14
1.4 信号的运算与自变量变换	17
1.4.1 信号的基本运算	17
1.4.2 信号的自变量变换	18
1.5 系统的描述	21
1.5.1 系统的模型	21
1.5.2 系统的互联	21
1.6 系统的基本性质	22
1.6.1 线性系统和非线性系统	22
1.6.2 时变系统和时不变系统	22
1.6.3 增量线性系统	23
1.6.4 记忆系统与无记忆系统	23
1.6.5 因果性与因果系统	24
1.6.6 可逆性与可逆系统	24
1.6.7 系统的稳定性	25
习题 1	25
2 线性时不变 (LTI) 系统的时域分析	29
2.0 引言	29
2.1 连续时间 LTI 系统的时域分析	29
2.1.1 信号的脉冲分解: 用 $\delta(t)$ 表示连续时间信号	29
2.1.2 连续时间 LTI 系统的卷积积分与单位冲激响应	31
2.1.3 卷积积分的图示	33
2.1.4 卷积积分的性质	36
2.2 离散时间 LTI 系统的时域分析	41

2.2.1	离散时间信号的单位脉冲分解：用 $\delta[n]$ 表示离散时间信号	41
2.2.2	离散时间 LTI 系统的卷积和与单位脉冲响应	42
2.2.3	卷积和的性质	44
2.3	单位冲激/脉冲响应与 LTI 系统性质	46
2.3.1	LTI 系统的可逆性与可逆系统	46
2.3.2	LTI 系统的稳定性	48
2.3.3	LTI 系统的因果性	49
2.3.4	LTI 系统的单位阶跃响应	49
2.4	LTI 系统的微分、差分方程描述	50
2.4.1	连续 LTI 系统微分方程描述及其经典解法	50
2.4.2	离散 LTI 系统的差分方程描述及其经典求解	57
2.5	LTI 系统的响应分解：零状态响应和零输入响应	59
2.6	用微分方程、差分方程表征的 LTI 系统的框图表示	66
	习题 2	69
3	连续时间信号与系统的频域分析	76
3.0	引言	76
3.1	连续时间 LTI 系统的特征函数	77
3.2	连续时间周期信号的谐波复指数信号的表示：连续时间傅里叶级数	78
3.2.1	连续时间傅里叶级数	78
3.2.2	典型周期信号的傅里叶级数展开	81
3.2.3	连续时间傅里叶级数的收敛与周期信号的傅里叶级数的近似表示	84
3.3	非周期信号的复指数信号的表示：连续时间傅里叶变换	87
3.3.1	非周期信号的傅里叶变换的导出	87
3.3.2	连续时间傅里叶变换的收敛	89
3.3.3	典型连续时间信号的傅里叶变换对	90
3.4	连续时间周期信号的傅里叶变换	93
3.5	连续时间傅里叶变换的性质	95
3.5.1	线性	96
3.5.2	时移性质	96
3.5.3	频移特性	97
3.5.4	共轭及共轭对称性	97
3.5.5	微分与积分	99
3.5.6	时间与频率的尺度变换	101
3.5.7	对偶性	102
3.5.8	帕斯瓦尔定理 (Parseval)	104
3.5.9	时域卷积性质	105
3.5.10	调制性质 (频域卷积)	106
3.6	连续时间 LTI 系统的频域分析	109
3.6.1	连续时间 LTI 系统的频率响应	109
3.6.2	连续时间 LTI 系统的零状态响应的频域求解	111

3.6.3	用线性常系数微分方程表征的 LTI 系统	112
3.6.4	周期信号激励下的系统响应	114
3.6.5	电路系统的频域求解	115
3.6.6	信号的不失真传输	117
3.6.7	信号的滤波与理想滤波器	119
习题 3		122
4	离散时间信号与系统的频域分析	130
4.0	引言	130
4.1	离散时间 LTI 系统的特征函数	130
4.2	离散时间周期信号的谐波复指数信号的表示：离散时间傅里叶级数 (DFS)	131
4.3	非周期信号的复指数信号的表示：离散时间傅里叶变换	134
4.3.1	离散时间傅里叶变换的导出	134
4.3.2	离散时间傅里叶变换的收敛	137
4.3.3	典型离散时间非周期信号傅里叶变换对	138
4.4	离散时间周期信号的傅里叶变换	141
4.5	离散时间傅里叶变换的性质	143
4.5.1	离散时间傅里叶变换的周期性	143
4.5.2	线性	143
4.5.3	时移与频移性质	143
4.5.4	共轭与共轭对称性	144
4.5.5	时域差分与求和	144
4.5.6	时域扩展	145
4.5.7	频域微分	146
4.5.8	卷积特性	147
4.5.9	调制特性	148
4.5.10	帕斯瓦尔定理	148
4.6	对偶性	152
4.6.1	离散时间傅里叶级数的对偶性	152
4.6.2	离散时间傅里叶变换和连续时间傅里叶级数之间的对偶性	153
4.7	离散时间 LTI 系统的频域分析	155
4.7.1	离散时间 LTI 系统的频率响应	155
4.7.2	离散时间 LTI 系统的零状响应的频域求解	157
4.7.3	用线性常系数差分方程表征的 LTI 系统	159
4.7.4	离散时间信号的滤波与理想滤波器	160
4.8	离散傅里叶变换 (DFT)	161
4.8.1	从 DFS 到 DFT	161
4.8.2	离散傅里叶变换的性质	163
4.8.3	快速傅里叶变换 (FFT)	166
4.8.4	IDFT 的快速算法 (IFFT)	170

4.8.5	用 FFT 实现时域卷积和的快速计算 (快速卷积)	171
	习题 4	173
5	采样、调制与通信系统	186
5.0	引言	186
5.1	连续时间信号的时域采样定理	187
5.1.1	冲激串采样: 采样定理	187
5.1.2	用样值序列重建或表示连续时间信号	190
5.1.3	零阶保持采样	193
5.2	欠抽样与频谱混叠	193
5.3	离散时间信号的时域采样定理	195
5.3.1	脉冲串采样	195
5.3.2	离散时间的抽取与内插	198
5.4	频域采样定理	201
5.5	连续时间系统的离散时间实现	203
5.6	正弦载波幅度调制	209
5.6.1	双边带正弦载波幅度调制 (DSB) 与同步解调	209
5.6.2	频分复用	211
5.7	脉冲幅度调制 (PAM)	212
5.7.1	自然采样与时分复用 (TDM)	213
5.7.2	平顶采样 (零阶保持采样) 形式的脉冲幅度调制	214
5.8	希尔伯特变换与信号的正交表示	215
5.9	离散时间信号正弦幅度调制	218
	习题 5	220
6	信号与系统的复频域分析	228
6.0	引言	228
6.1	拉普拉斯变换	228
6.1.1	从傅里叶变换到拉普拉斯变换	228
6.1.2	拉普拉斯变换的收敛域	229
6.1.3	拉普拉斯变换的几何表示: 零极点图	230
6.1.4	$x(t)$ 的时域特性与其拉普拉斯变换 $X(s)$ 的收敛域的关系	231
6.2	常用信号的拉普拉斯变换	234
6.3	双边拉普拉斯变换的性质	236
6.4	周期信号与抽样信号的拉普拉斯变换	240
6.5	拉普拉斯反变换	241
6.6	单边拉普拉斯变换	245
6.7	系统的复频域分析	247
6.7.1	系统函数	247
6.7.2	S 域的元素模型	251
6.7.3	全响应的求解	254
6.7.4	系统函数代数属性和方框图表示	255

习题 6	257
7 Z 变换	261
7.0 引言	261
7.1 双边 Z 变换	261
7.2 Z 变换收敛域	263
7.3 Z 变换的几何表示: 零极点图	266
7.4 Z 变换性质	267
7.5 常用信号的 Z 变换对	272
7.6 Z 反变换	273
7.6.1 幂级数展开法 (长除法)	273
7.6.2 部分分式展开法	275
7.6.3 围线积分法 (留教法)	276
7.7 单边 Z 变换	277
7.8 单边 Z 变换性质	278
7.9 LTI 系统的 Z 域分析	281
7.9.1 系统函数与系统性质	281
7.9.2 线性常系数差分方程的 Z 域分析	283
7.9.3 系统函数的方框图表示	286
习题 7	288
8 系统函数	292
8.0 引言	292
8.1 系统函数与时域特性	292
8.2 系统函数与稳定系统的频域特性	298
8.2.1 二阶系统	301
8.2.2 最小相移函数	308
8.3 理想滤波器的逼近与频率变换	310
8.3.1 巴特沃思滤波器	311
8.3.2 频率变换	313
8.4 因果系统的稳定性准则	316
8.5 线性反馈系统的根轨迹分析法	319
8.5.1 线性反馈系统	319
8.5.2 闭环极点方程	320
8.5.3 根据迹的端点: $K = 0$ 和 $ K = +\infty$ 时的闭环极点	321
8.5.4 角判据: 根轨迹的相角条件	321
8.5.5 根轨迹的性质	323
8.6 奈奎斯特稳定性判据	329
8.6.1 围线映射的基本性质	329
8.6.2 连续时间 LTI 反馈系统的奈奎斯特判据	330
8.6.3 离散时间 LTI 反馈系统的奈奎斯特判据	333
习题 8	335

9 状态变量分析	343
9.0 引言	343
9.1 系统的状态与状态变量	343
9.2 系统的信号流图表示	344
9.3 连续时间系统状态方程的建立	349
9.3.1 根据电路图直接建立状态方程	350
9.3.2 根据高阶微分方程来建立状态方程	352
9.3.3 根据系统函数来建立状态方程	354
9.4 连续时间系统状态方程的求解	358
9.4.1 用拉氏变换求解状态变量与输出响应	358
9.4.2 状态方程的时域解法	361
9.5 离散时间系统状态方程的建立	364
9.6 离散时间系统状态方程的求解	367
9.7 由状态方程判断系统的稳定性	370
9.8 状态矢量的线性变换	371
9.9 系统的可控制性和可观测性	374
习题 9	377
附录 1 部分分式展开	382
附录 2 波特图	389
参考文献	394

1 信号与系统的基本概念

1.0 引言

随着以微电子技术为基础的计算机技术、信息技术和通信技术的快速发展和广泛应用，人们已进入了信息化时代，这是一个通过信息的流通、信息的积累、信息的处理以及信息的利用导致经济社会形态均发生质的变化的社会。通过信息高速公路连接的四通八达的网络，高速的信息处理系统及高度可靠的信息管理系统为各种社会团体和个人提供多种多样的信息服务，以满足各类人的生产经济、社会活动、生活质量提高的需要。今天人们已认识到信息是一种资源、一个资产，是现代社会中与能源、材料同样重要的、生存发展必不可少的三大资源之一。信息像其他资源一样，要使它产生经济或社会效益，形成人们的有形或无形资产，需要一个完整的运作环节，那就是采集和生成信息，处理和加工信息，存储和管理信息，传送和交换信息以及操作和应用信息等。信息的表现形态无非有数据、文字、声音、图像四种，但它不能直接传送，必须把它转换成易传输和处理的信号，因此信号是信息的载体。

信号有各种不同的表现形式，古代烽火传送的光信号，击鼓鸣金的声信号，无线电广播和电视发射的电磁波信号等等。在各种信号中电信号是最便于存储、传输、处理和再现的，应用也最广泛，在实际应用中，常通过各类传感器将各种物理量如声波、光波强度、机械运动的位移或速度转变为电信号。

对信息，即对信号的处理、管理、存储是通过不同的系统来实现的。

有关信号和系统分析的概念和方法在很多科学和技术领域起着极其重要的作用。尽管在通信、航空与宇航、生物工程、化学过程控制与语音等方面各个领域中信与系统的物理性质各不相同，但全都具有两个基本的相同点，即作为一个或几个独立变量函数的信号都包含了有关某些现象特性的信息，系统总是对给定的信号作出响应产生出另一种期待的信号。

信号和系统的分析方法不仅可用于已有系统的分析，还可用于系统的设计，有时也需要从设计的系统中提取信号中某些特定的信息，如人们可从一组以往的经济数据来预测它将来的趋势和其他一些特性，从而对走向作出判断。此外它还可用来改变或控制某一已知系统的性能。如通过安装各种传感器来检测化工厂内某生产线上温度、湿度、化学成分等物理信号，控制系统根据测得的这些传感器信号调节像流速和温度这些量以控制正在进行的化学过程。

本章将对本课程要用到的有关信号与系统的基本概念如信号、系统分类、常用基本信号、系统的模型、线性时不变系统 (linear time invariant-LTI) 的性质作简要的叙述，以便先建立一个总轮廓，然后在后面各章中分别详细讨论。

1.1 信号与系统的基本概念

1.1.1 信号的描述与信号分类

广义地说信号是随时间或某几个自变量变化的某种物理量，是携带信息的载体。信息是不能直接传送的，必须借助于一定形式的信号（如光信号、电信号等）才能远距离快速传输并进行各种处理。本课程将主要讨论目前应用广泛的电信号，一般是随时间、位置变化的电

流或电压，有时也可以是电荷或磁通。随时间或位置变化的信号，在数学上可以用一个时间或表示位置变化的多变量的函数来表示。例如，一个语音信号可以表示为声压随时间变化的函数；一张黑白照片可以用亮度随二维空间变量变化的函数 $I(x, y)$ 表示，而彩电屏上显示图像的亮度则是一个既与红、绿、蓝三色，又与时间和二维坐标有关的函数，即 $I = [I_r(x, y, t), I_g(x, y, t), I_b(x, y, t)]$ ，本书仅限于对单一变量函数的分析，通常是对时间变量 t 的讨论，并把信号与函数视为同义词。

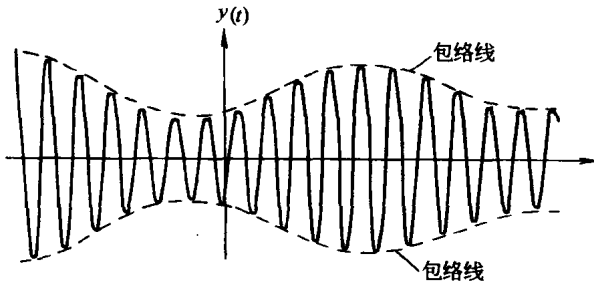


图 1-1 调幅波信号波形

图 1-1 中表示的是一个幅值随时间变化的高频正弦信号，即为调幅波信号，其中调制信号是音乐或语音信号。图 1-2 是个语音信号的录音波形，该信号代表“Should we chase”这句话的声压随时间的变化波形。

信号的特性通常可以从两个方面来描述，一是时间特性，二是频率特性。信号是时间 t 的函数，具有一定的波形，故表现出一定的时间特性，如信号出现时间的先后、持续时间的长短、重复周期的大小以及随时间变化的快慢等。此外很大一类的信号又总是可以分解为许多不同频率的正弦分量之和，因而表现出具有一定的频率特性，如各频率分量的相对大小，主频分量占有的范围，不同的信号形式就在于它们有不同的时间特性和频率特性，而信号的时间特性与频率特性间有着密切的关系，即不同的时间特性就会导致不同的频率特性。

信号有很多种分类方法。

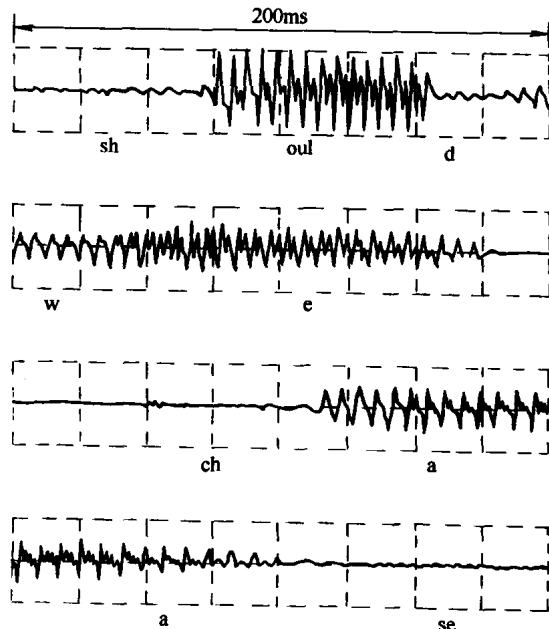


图 1-2 语音信号的波形

(1) 确定性信号与随机性信号

确定信号可用时间 t 的确定函数表示，对于指定的某一时刻，都有一确定的函数值相对

应，电路原理课程中学过的正弦信号就是确定性信号。随机信号则不是时间 t 的确定函数，例如雷达发射机发射一系列脉冲到达目标又反射回来，接收机收到的回波信号有很大的随机性，因为它与目标性质、大气条件和外界干扰等种种因素有关，不能用确定的函数式表示而只能用统计规律来描述。图 1-3 表示的是随机信号，实际传输的信号几乎都具有不可预知的不确定性，因此都是随机信号。如果传输的都是确定信号，那对接受者来说，就不可能从中获知任何新的信息，这就失去了信息传输的意义。但在一定条件下，随机信号也会表现出某种统计确定性，可以近似地看成确定信号，使分析简化，以便于工程上的实际应用。在传输信息过程中，除了人们所需要的带有信息的信号外，还夹杂着干扰和噪声，它们通常有更大的随机性。由于对确定性信号的分析是研究随机信号的基础，本书只分析确定性信号，随机信号则留到后续课程中研究。

(2) 连续时间信号与离散时间信号

信号按自变量的取值是否连续可以分为连续时间信号和离散时间信号。简称连续信号、离散信号。连续信号在任何时刻除了若干个不连续点外都有定义，图 1-2 表示的语音信号就是连续时间信号；离散时间信号仅在一些离散时刻有定义。一般自变量只取整数值，通常也称它为序列，因为它实质上是一组按顺序排列的数据。图 1-4 表示的美国某段时期内周道琼斯指数的变化信号就是离散信号。

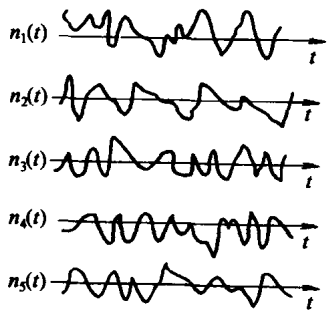


图 1-3 随机信号

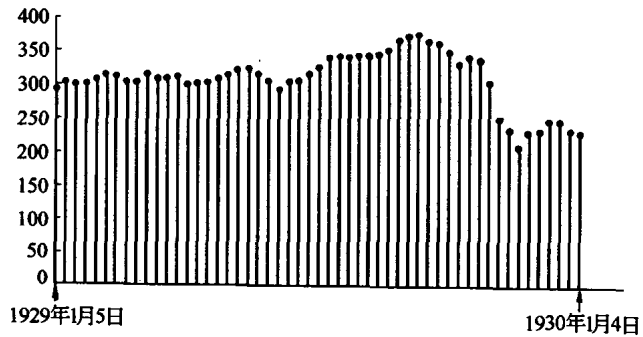


图 1-4 美国周道琼斯指数变化的离散信号

如果将离散信号加以量化，并用编码表示，这种经量化后的信号称之为数字信号。为了区分连续、离散这两类信号，用 t 表示连续时间变量，而用 n 表示离散时间变量，连续信号用圆括号 (\cdot) 把自变量括在里面，而离散信号则用方括号 $[\cdot]$ 来表示。有些很重要的离散信号是通过连续信号的采样（抽样）而得到的，这时该离散信号 $x[n]$ 则代表了一个自变量是连续变化的连续信号在相继的离散时刻点上的样本值。许多实际系统如数字自动驾驶仪或一般的数字音频系统都是利用代表连续信号经采样后的离散时间信号样本序列来实现其功能的。本书将并行介绍这两类信号，以便使人们能加深这两种信号概念的理解。

(3) 周期信号与非周期信号

连续信号与离散信号按信号随时间变量 t 或 n 变化的规律都可分为周期信号与非周期信号。连续周期信号可表示为

$$x(t) = x(t + mT), \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{1-1}$$

$x(t)$ 对周期为 $2T, 3T, 4T, \dots$ 都是周期的，把能使上式成立的最小正值 T 称为 $x(t)$ 的基波周期 T_0 。

同样离散周期信号也可表示为

$$x[n] = x[n + mN], \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1-2)$$

其中周期 N 是正整数。把能使上式成立的最小正整数 N 称为 $x[n]$ 的基波周期 N_0 。不

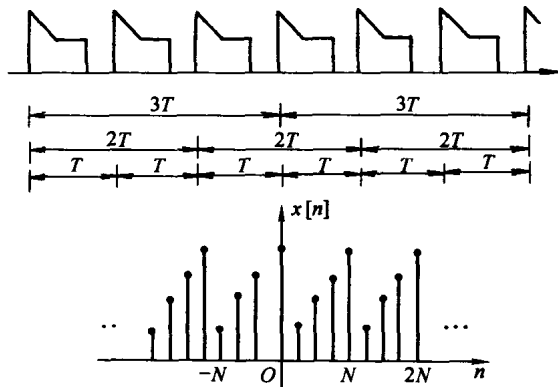


图 1-5 周期信号

满足上述关系的信号则称为非周期信号。图 1-5 中表示的是周期信号。只要给出此信号在任一周期内的变化过程，便可知它在任一时刻的数值。若令周期信号的周期趋于无限大，则它即成为非周期信号。

(4) 奇信号与偶信号

按信号是关于原点对称或关于坐标纵轴对称，又可分为奇信号与偶信号，即满足

$$x(t) = -x(-t)$$

$$\text{或} \quad x[n] = -x[-n] \quad (1-3)$$

为奇信号；满足

$$x(t) = x(-t)$$

$$\text{或} \quad x[n] = x[-n] \quad (1-4)$$

或为偶信号。

图 1-6 中分别表示奇连续时间信号与偶连续时间信号。

任何一个信号都可分解成奇分量与偶分量之和。其中偶分量为偶函数，满足

$$x_e(t) = x_e(-t) \quad (1-5)$$

其中奇分量为奇函数，满足

$$x_o(t) = -x_o(-t) \quad (1-6)$$

又因为

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{1}{2}[x(t) + x(t) + x(-t) - x(-t)] \\ &= \frac{1}{2}[x(t) + x(-t)] + \frac{1}{2}[x(t) - x(-t)] \\ &= x_e(t) + x_o(t) \end{aligned} \quad (1-7)$$

故

$$x_e(t) = E_v\{x(t)\} = \frac{1}{2}[x(t) + x(-t)] \quad (1-8)$$

$$x_o(t) = O_d\{x(t)\} = \frac{1}{2}[x(t) - x(-t)] \quad (1-9)$$

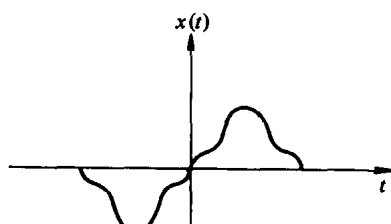
以上分解方法同样适用于离散时间信号，即

$$x_e[n] = \frac{1}{2}\{x[n] + x[-n]\}$$

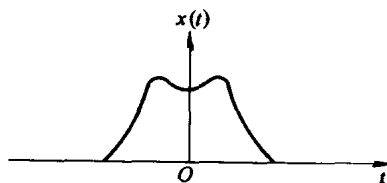
$$x_o[n] = \frac{1}{2}\{x[n] - x[-n]\} \quad (1-10)$$

图 1-7 中表示了离散时间信号分解的例子。

(5) 功率信号和能量信号



(a) 奇连续时间信号



(b) 偶连续时间信号

图 1-6 奇信号与偶信号

一个信号的能量和功率是这样定义的，设信号电压或电流为 $x(t)$ ，则它在电阻为 1Ω 上的瞬时功率为 $p(t) = |x(t)|^2$ ；在 $t_1 \leq t \leq t_2$ 内消耗的能量为 $E = \int_{t_1}^{t_2} |x(t)|^2 dt$ 。当 $T = (t_2 - t_1) \rightarrow \infty$ 时，总能量 E 和平均功率 P 分别定义为

$$E = \lim_{t_2 - t_1 \rightarrow \infty} \int_{t_1}^{t_2} |x(t)|^2 dt \quad (1-11)$$

$$P = \lim_{t_2 - t_1 \rightarrow \infty} \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |x(t)|^2 dt \quad (1-12)$$

由于 (1-11) 式、(1-12) 式中被积函数是 $x(t)$ 的模的平方，故信号的能量 E 和功率 P 都是非负实数。

如果信号 $x(t)$ 的能量 E 满足： $0 < E < \infty$ ，而 $P = 0$ ，则称 $x(t)$ 为能量有限信号（简称能量信号）；如果信号 $x(t)$ 的功率满足： $0 < P < \infty$ ，而 $E \rightarrow \infty$ ，则称 $x(t)$ 为功率有限信号（简称功率信号）。图 1-8 (a) 中表示了一个能量信号，图 1-8 (b) 则表示了一个功率信号。

一般地，周期信号都是功率信号，非周期信号则不定，属于能量信号的非周期信号也称为脉冲信号，它除了在有限时间范围有一定数值而在其余时间范围数值均为 0 或很小可以忽略不计。

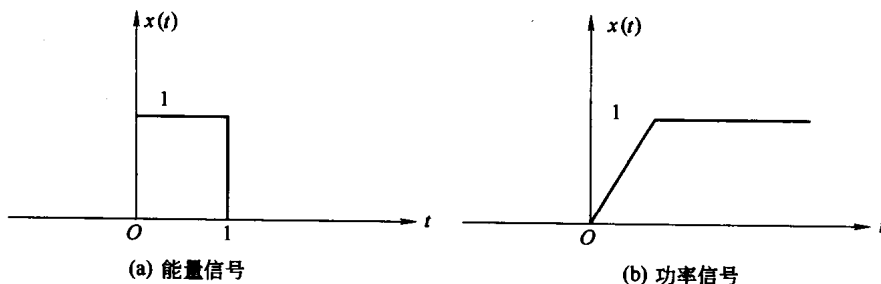


图 1-8 能量信号与功率信号

1.1.2 系统的表示与分类

什么是系统？广义地说系统是由一组相互间有联系的事物组成，小至一个原子，大至一个工厂，一个社会都是一个系统。本书主要讨论的是物理系统。一个实际的物理系统可以是一个简单的 RC 电路，也可以是一个包含了成千上万个元件的系统，如卫星通信系统，就包含有发射机、接收机、卫星、计算机、天线等，而每一个部件又单独构成一个系统。对一个实际的物理系统来说，它可以看做是一个过程，完成人们所赋予的功能。如将信号无失真地从一个地方传送到另一个地方的通信系统，音频信号录制系统将输入的音频信号进行录制，并能重现原输入信号。系统的这种功能可用图 1-9 表示。一个实际的系统通常是由不同功能的子系统组合而成，图 1-10 表示的是一个通信系统的信号变换过程的示意图。电视摄像机中的光电传感器（摄像头）将图像（人、场景）转换成视频信号，话筒则将声音信号转换成音频信号。视频信号和音频信号一起送入发射系统，该系统将它们转换成适合于天线发射和传播的信号（调制波），这个新信号中仍包含有图像和声音的信息，这些信号经一定

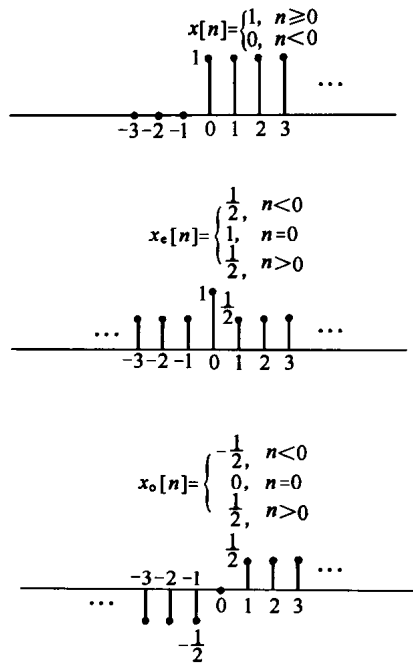


图 1-7 离散时间信号分解

的信道传播（如大气、光纤、电缆、卫星）后由家用接收天线接受到这种电信号，在接收系统中实现了把经调制的信号又转换成原来进入发射机的视频电信号与声频电信号，并分别送往显像管和扬声器，从而恢复了图像和声音信号。

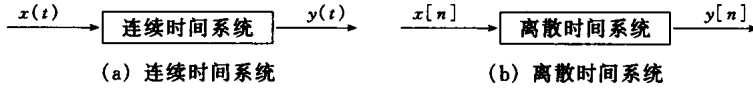


图 1-9 输入、输出系统

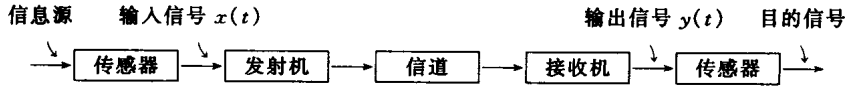


图 1-10 通信系统的信号变换过程

综上所述，系统是一个能实现某种功能的整体，现在对系统的理解又有了新的认识，它不只是指某种装置（硬件），目前大量使用的数字系统，大量采用软件实现信号处理的功能，它们都是系统。故系统的概念已引申到对信号执行某些操作的软件或算法的总称。因此，系统也可以看做是对一组输入信号或数据进行变换或处理的过程，并产生另一组信号或数据作为输出。

系统有各种分类方法：如按系统的用途可分为电力系统、通信系统、金融系统等。如按系统的特性来分则可分为连续时间系统和离散时间系统——简称连续系统和离散系统，线性系统和非线性系统，因果系统和非因果系统，可逆系统和不可逆系统，记忆系统和无记忆系统，时变和时不变系统，稳定系统和非稳定系统。连续系统是指输入和输出均为连续信号的系统，它作用的对象是连续信号。离散系统则是指输入输出均为离散信号的系统，它作用的对象是离散信号。许多应用系统通常是一个混合系统，它既包含连续系统，又包含离散系统，例如，现代通信系统就是一个典型的混合系统。

1.2 基本的连续时间信号

上节已经指出，信号是一个或几个变量的函数，通常是时间的函数，因此可以用数学表达式或用波形来描述，在本节中将介绍在信号与系统分析中用得较多的基本信号，它们不仅经常会出现，更重要的是用这些基本信号可构成许多其他的信号。

1.2.1 连续时间复指数信号与正弦信号

连续时间复指数信号具有下列形式

$$x(t) = Ce^{st} \quad (1-13)$$

式中 C 和 s 一般为复数。 $s = \sigma + j\omega$ 。根据这些参数值的不同，复指数信号可分为以下几种。

(1) 实指数信号

图 1-11 中表示的是连续时间实指数信号， C 和 s 均为实数，如 s 为正实数，即 $\omega = 0$ ， $s = \sigma$ ，那 $x(t)$ 随 t 的增加而指数增长，如 s 为负实数，则 $x(t)$ 随 t 而指数衰减，当 $\sigma = 0$ 时， $x(t) = C$ 成为直流信号。指数 σ 的绝对值大小反映了信号增长或衰减的速率， $|\sigma|$ 越大，增长或衰减的速率越快。

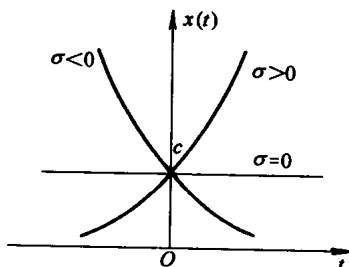


图 1-11 连续时间实指数信号

通常把 $\frac{1}{|\sigma|}$ 记作指数信号的时间常数 τ ， τ 越大指数信号增长