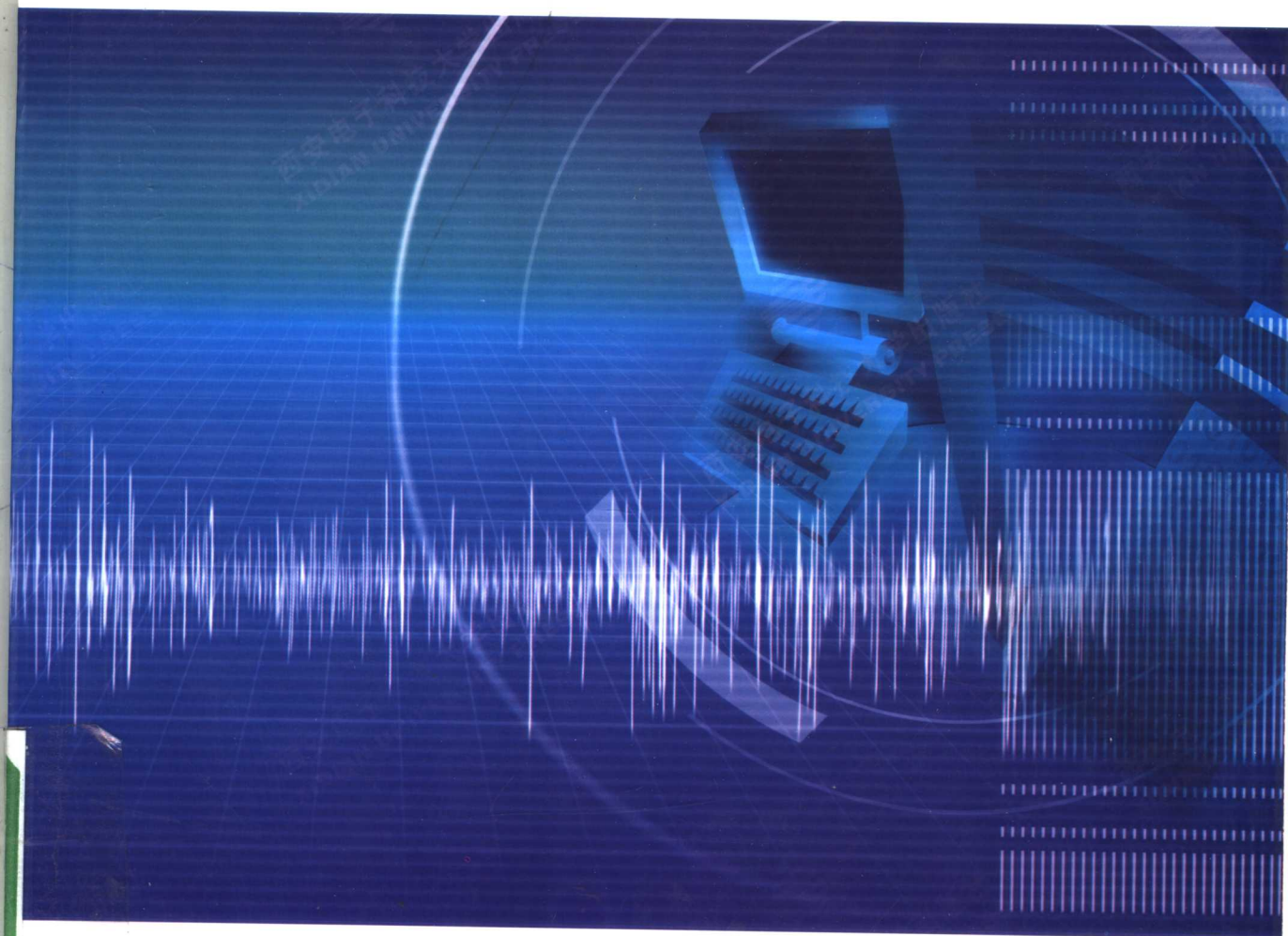


21 世纪

高等学校电子信息类系列教材

信号与线性系统

□ 主编 张卫钢 副主编 郑 晶 徐 琨 徐建民



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

21 世纪高等学校电子信息类系列教材

信号与线性系统

主 编 张卫钢

副主编 郑晶 徐琨 徐建民

西安电子科技大学出版社

2005

内 容 简 介

“信号与线性系统”是高等学校本科电子、信息、控制及通信类专业的一门重要的专业基础课程。它不仅是本科生培养计划中的必修课,而且也是不少专业研究生入学考试的必考科目。

本书是专门针对高等学校电子、信息、控制及通信类专业而编著的本科生教材,共分11章,主要内容包括信号、系统、连续系统的时域分析、连续系统周期信号的实频域分析、连续系统非周期信号的实频域分析、连续系统的复频域分析、连续系统的模拟与稳定性分析、离散信号与离散系统分析、连续系统的状态空间分析、双端口网络和系统综合概述。全书共有例题140余道。

从内容的广度上看,本书不但基本涵盖了当前国内外一些经典教材的所有内容,而且还略有补充;从内容的深度上看,本书与当前国内外一些经典教材大致相当。就风格而言,本书在内容的编排、叙述和插图等方面有其独到之处。

经过教师适当摘选,本书也适用于大专学生的教学,同时也可作为研究生和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

信号与线性系统/张卫钢主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2005.8

(21世纪高等学校电子信息类系列教材)

ISBN 7-5606-1558-9

I. 信... II. 张... III. ① 信号理论—高等学校—教材

② 线性系统—高等学校—教材 N. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 078701 号

策 划 公立实

责任编辑 张晓燕 王 瑛

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2005年8月第1版 2005年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 25

字 数 589千字

印 数 1~4 000册

定 价 26.00元

ISBN 7-5606-1558-9/TN·0311

XDUP 1849001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前言

“信号与线性系统”(以下简称“信号与系统”)是高等学校本科电子、信息、控制及通信类专业的一门重要的专业基础课程。它不仅是本科生培养计划中的必修课,而且也是不少专业研究生入学考试的必考科目。因此,了解、掌握这门课程对学生而言是非常重要的。

从课程内容上看,“信号与系统”与其说是一门专业课,不如说是一门具有专业特色的数学课更准确。所谓“信号”,实际上就是数学中的函数,不过赋予了“电压”、“电流”等物理意义罢了。而“系统”则可以看作为一个对信号(函数)具有某种变换(处理或运算)作用的“变换”(运算)模块。

“信号与系统”课程的主要内容就是研究信号被一个给定系统变换前后之间的关系,或者说一个函数(也可能是多个函数)被一个运算模块处理前后之间的关系。在这里,变换前的信号被称为“输入”或“激励”,经过系统变换处理后的信号被称为“输出”或“响应”,或者说“激励”是原因,“响应”是结果。用数学概念描述的话,就是自变量(输入函数)通过模块(系统)运算,得到因变量(响应)。我们用图 0-1 来解释这种关系。

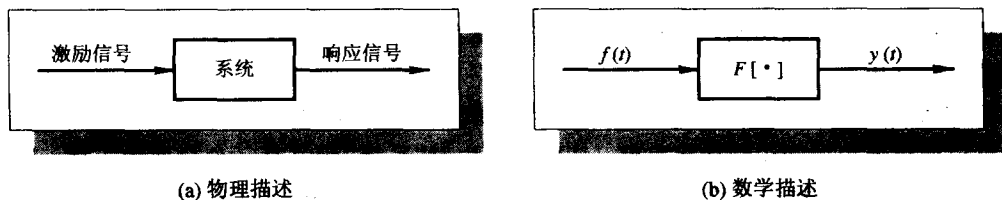


图 0-1 信号、系统和响应之间的关系

由于“信号与系统”中的信号与系统之间的关系实际上是用数学模型(数学表达式)来描述的,即 $y(t)=F[f(t)]$, 因此,该课程自始至终贯穿着一条主线——求解数学模型。围绕着这条主线派生出不同的求解方法,并由此构成全书的内容,如图 0-2 所示。

因为本书讨论的系统是线性时不变系统(LTI 系统),其数学模型是线性微分方程(或差分方程),所以可以这样说,“信号与系统”的核心内容就是在时域和变换域(实频域、复频域、 z 域)中对微分方程(或差分方程)的求解。

通过上述介绍,我们可以清楚地看到“数学”这个科学工具在“信号与系统”课程中所处的重要地位。这里所用到的数学知识主要包括级数的展开与求和、微分方程的求解、代数方程组的求解、部分分式的展开以及基本的微积分运算。除此之外,该课程所涉及的专业知识主要是“电工学”(或“电路”)、“模拟电路”以及“数字电路”的部分基础知识。建议学生在学习本课程之前,对上述基础知识做一个简单的复习,这对掌握本课程的内容将大有裨益。

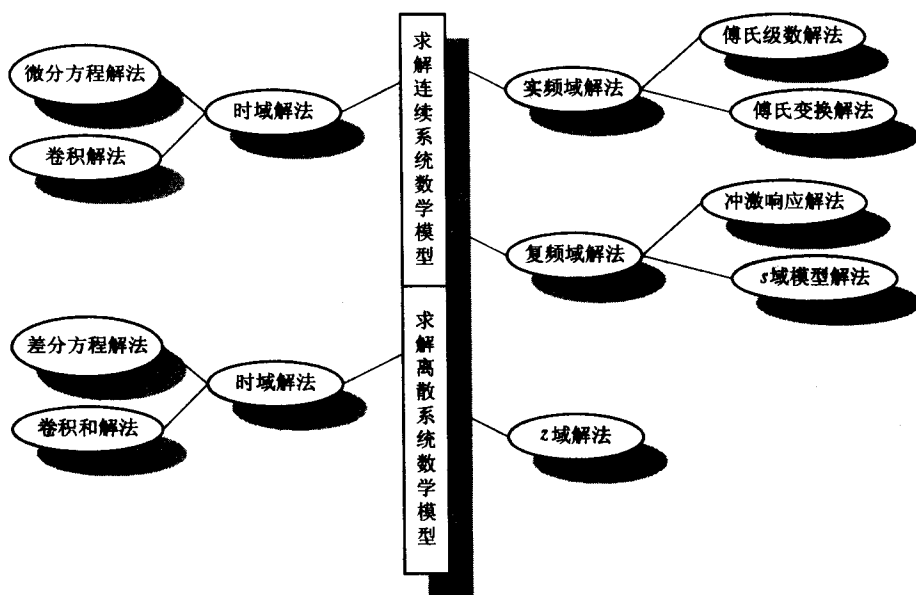


图 0-2 “信号与系统”内容构成

对“系统”的研究主要有两个方面：一是在给定系统(数学模型)的前提下，研究任意激励下的系统响应，通常称之为“系统分析”，也就是大多数此类教材的内容；另一个是在给定激励与响应关系的基础之上，研究怎样的系统(数学模型)可以实现这样的信号变换或如何实现给定的信号处理功能，通常称之为“系统综合”，这部分内容一般不在“信号与系统”课程的范畴之内。

根据教学实践，我们认为应该在“信号与系统”课程中对“系统综合”给予简要的介绍，这样可以使该课程的知识结构更完整，从而使学生对“系统”研究有一个全面的了解。鉴于此，我们在传统的传授内容之外，又增加了两章“双端口网络”和“系统综合概述”。其中“双端口网络”是为“系统综合概述”进行必要的基础知识铺垫。

“信号与系统”既是一门概念性很强的专业基础课，又是一门需要大量计算的数学课。为了使學生能够在较短的时间内更好地掌握课程内容，我们刻意加大了例题的数量(约有140余道)，帮助学生开拓视野，触类旁通，提高解题能力。同时，安排了150余道习题，并附有绝大部分习题答案，为学生掌握和巩固所学知识提供了有力保证。本书中加边框的公式为重要公式。

本书共分11章，主要内容包括信号、系统、连续系统的时域分析、连续系统周期信号的实频域分析、连续系统非周期信号的实频域分析、连续系统的复频域分析、连续系统的模拟与稳定性分析、离散信号与离散系统分析、连续系统的状态空间分析、双端口网络和系统综合概述。

从内容的广度上看，本书不但基本涵盖了当前国内外一些经典教材的所有内容，而且还略有补充；从内容的深度上看，本书与当前国内外一些经典教材大致相当。就风格而言，本书在内容的编排、叙述和插图等方面有其独到之处。

本课程的教学参考时数为 60 学时左右,实施时可根据具体情况适当调整,但不应低于 48 学时。

本书是作者多年教学经验的总结,由张卫钢教授担任主编,统稿并执笔了第 7、8、9 章;郑晶执笔第 1、2、3 章;徐琨执笔第 4、5、6 章并编写了全部习题;徐建民执笔第 10、11 章。郑晶、徐琨、徐建民还同时担任本书的副主编工作。本书的全部插图由刘军制作;附录由熊建芳、靳瑾完成;靳瑾、穆丹、林晓燕和信卫军整理了全部习题答案。

感谢书中引用著作的编、著、译者,并恳请广大读者斧正。

编著者
2005 年 6 月
于西安

目 录

第 1 章 信号	1
1.1 信号的概念	1
1.2 信号的分类	1
1.2.1 周期信号与非周期信号	1
1.2.2 能量信号与功率信号	2
1.2.3 模拟信号与数字信号	3
1.2.4 确定信号与随机信号	5
1.3 基本连续时间信号	5
1.3.1 直流信号	6
1.3.2 正弦型信号	6
1.3.3 指数信号	7
1.3.4 符号信号	8
1.3.5 单位斜坡信号	8
1.3.6 单位阶跃信号	9
1.3.7 单位冲激信号	10
1.4 基本连续时间信号运算	14
1.4.1 算术运算	14
1.4.2 时移变换	16
1.4.3 翻转变换	16
1.4.4 尺度变换	18
1.4.5 信号作图	19
习题	19
第 2 章 系统	24
2.1 系统的概念	24
2.2 系统的状态	24
2.3 系统的分类	27
2.3.1 线性系统和非线性系统	27
2.3.2 常参数系统和时变参数系统	31
2.3.3 动态系统和非动态系统	32
2.3.4 连续系统和离散系统	32
2.3.5 因果系统和非因果系统	33
2.3.6 稳定系统和非稳定系统	33
2.3.7 集中参数系统和分布参数系统	34
2.4 系统模型	34
2.4.1 系统模型的概念	34

2.4.2 系统基本运算模型框图	37
习题	39
第3章 连续系统的时域分析	42
3.1 系统时域分析方法	42
3.1.1 经典解法	42
3.1.2 零输入响应—零状态响应解法	45
3.1.3 微分算子与传输算子	53
3.2 冲激响应和阶跃响应	56
3.2.1 冲激响应	56
3.2.2 阶跃响应	58
3.3 卷积积分及其应用	61
3.3.1 卷积积分的概念	61
3.3.2 卷积积分的性质	63
3.3.3 卷积积分在 LTI 系统分析中的应用	67
习题	71
第4章 连续系统周期信号的实频域分析	76
4.1 正交函数的概念	76
4.1.1 正交函数集	76
4.1.2 三角函数集	77
4.1.3 复指数函数集	77
4.2 傅里叶级数	77
4.2.1 函数的对称性与傅里叶系数的关系	79
4.2.2 傅里叶级数的指数形式	83
4.2.3 傅里叶级数的性质	85
4.3 频谱的概念与典型周期信号的频谱	89
4.3.1 频谱的概念	89
4.3.2 典型周期信号的频谱	90
4.4 周期信号作用下的系统分析	94
4.4.1 系统函数	94
4.4.2 周期信号激励下的系统响应	94
习题	96
第5章 连续系统非周期信号的实频域分析	101
5.1 傅里叶变换	101
5.1.1 傅里叶变换的概念	101
5.1.2 典型非周期信号的频谱	103
5.2 傅里叶变换的性质	110
5.3 非周期信号作用下的系统分析	123
5.4 希尔伯特变换	127
习题	128

第 6 章 连续系统的复频域分析	133
6.1 拉普拉斯变换	133
6.1.1 拉普拉斯变换的引入	133
6.1.2 常用信号的拉普拉斯变换	136
6.1.3 拉普拉斯变换的性质	137
6.1.4 拉普拉斯逆变换	148
6.2 系统函数与复频域分析法	152
6.2.1 系统函数	152
6.2.2 复频域分析方法	154
6.3 采用拉氏变换解微分方程	155
6.4 电路的 s 域模型	158
习题	163
第 7 章 连续系统的模拟与稳定性分析	169
7.1 系统模拟	169
7.1.1 基本运算器	169
7.1.2 系统的框图模拟	170
7.1.3 系统的流图模拟	175
7.2 系统的稳定性分析	187
7.2.1 系统的自然频率	187
7.2.2 系统的稳定性	187
7.2.3 系统函数 $H(s)$ 的零、极点分析	189
7.2.4 系统稳定性的判定	195
习题	201
第 8 章 离散信号与离散系统分析	207
8.1 离散时间信号与基本离散时间信号	207
8.1.1 正弦序列	208
8.1.2 复指数序列	211
8.1.3 指数序列	211
8.1.4 单位阶跃序列	211
8.1.5 单位脉冲序列	212
8.2 离散信号的运算	213
8.2.1 四则运算	213
8.2.2 时移变换	214
8.2.3 翻转变换	215
8.2.4 累加和	216
8.2.5 差分	216
8.2.6 卷积和	218
8.3 离散系统的时域分析	221
8.3.1 离散系统的描述	222
8.3.2 离散系统的时域经典分析法	226

8.3.3 离散系统的单位响应	228
8.3.4 离散系统的响应分解分析法	230
8.4 z 变换	235
8.4.1 z 变换的概念	235
8.4.2 z 变换的性质	238
8.4.3 逆 z 变换	243
8.4.4 s 域和 z 域之间的关系	245
8.5 离散系统的 z 域分析	245
8.5.1 差分方程的 z 域解法	246
8.5.2 系统函数	249
8.6 离散系统的模拟与稳定性分析	251
8.6.1 离散系统的模拟	251
8.6.2 离散系统的稳定性分析	253
8.7 离散系统的频率特性	254
习题	256
第 9 章 连续系统的状态空间分析	265
9.1 系统的描述	265
9.2 系统的状态方程	267
9.3 状态方程的建立	268
9.3.1 电路图建立法	269
9.3.2 模拟图建立法	271
9.3.3 数学模型或系统函数建立法	273
9.4 状态方程的解	277
9.4.1 状态方程的频域解	277
9.4.2 状态方程的时域解	282
9.4.3 e^{At} 的计算	284
9.5 稳定性判别	285
习题	286
第 10 章 双端口网络	294
10.1 网络及双端口网络的概念	294
10.2 双端口网络的方程与参数	296
10.2.1 Z 方程与 Z 参数	296
10.2.2 Y 方程与 Y 参数	300
10.2.3 A 方程与 A 参数	302
10.2.4 H 方程与 H 参数	304
10.2.5 A' 方程(A' 参数)与 G 方程(G 参数)	306
10.3 双端口网络的网络函数	307
10.3.1 策动函数	307
10.3.2 传输函数	309
10.4 双端口网络的等效	312
10.4.1 Z 参数等效电路	312

10.4.2 Y 参数等效电路	314
习题	317
第 11 章 系统综合概述	321
11.1 无源系统综合的可实现条件	321
11.2 连续系统无源单端口网络综合	323
11.2.1 RC 综合	323
11.2.2 RL 综合	325
11.2.3 LC 综合	326
习题	329
习题答案	330
附录	374
参考文献	387

第1章 信 号

1.1 信号的概念

我们知道,通信就是信息的传递,而信息的传递是以信号的传输为基础的。换言之,通信任务的完成必须以信号的传输为前提。信号是信息的载体,在通信技术中扮演着极为重要的角色。从通信的角度上讲,信号泛指能够携带某种信息的客观物理现象,比如远古的烽火、抗日战争时期的“消息树”、舰船上的灯语和旗语以及我们所熟悉的变化电流和电压等等。

在“信号与线性系统”(以下简称“信号与系统”)这门课程中,我们研究和讨论“信号”的重点不在于其传递信息的特性,而只是把它作为一种可物理实现并在人们社会生产实践中有所用途的数学函数看待,并认为它是对实际物理信号的概括和抽象,具有广泛的代表性和一般性,比如各种力、电流、电压的数学表达式等。因此,从研究的角度上看,把本课程中的“信号”称之为“函数”更为准确。但由于对此类函数的研究涉及到具体的生产实践,有特定的物理意义,因此我们还是把这类函数称为“信号”。这样,本书出现的术语“信号”可以理解为“函数”,同样“函数”也可以理解为“信号”。

描述信号的方法主要有两种:一是写出它的数学表达式,此表达式一般是时间的函数;二是根据表达式绘出函数与自变量(时间)的关系图,我们称之为信号的波形。

在本课程中,我们还要熟悉信号的另两种表现形式,即变换域的表达式和图形。此时,信号的自变量不是时间而是实频率、复频率或其他参数(比如: z)。信号变换域形式是时间域形式的补充,是研究信号的辅助工具,通常只在研究过程中或特定的情况下使用。

1.2 信号 的分 类

信号有各种形式,根据其表现特征可从不同角度进行分类。

1.2.1 周期信号与非周期信号

周期信号就是按照一定的时间间隔周而复始变化的信号,如图1-1所示。

周期信号的数学表达式可写为

$$f(t) = f(t + nT) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots (n \text{ 取任意整数})$$

满足上述关系式的最小 T 称为该周期信号的周期。只要给出周期信号在任一完整周期内的函数表达式或波形,即可确定它在任一时刻的数值。例如,正弦函数 $f(t) = A \sin(\omega t + \theta)$ 就是我们最熟悉的周期信号实例。

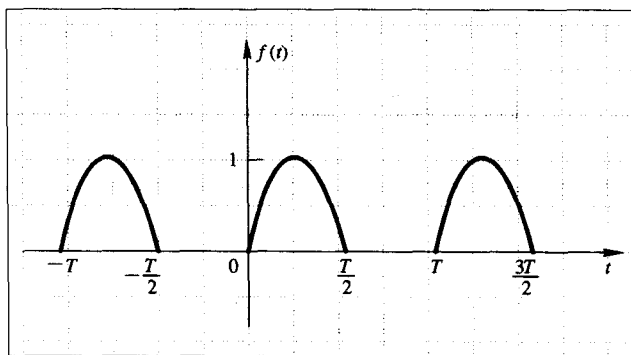


图 1-1 周期信号

不具有周期性的信号称为非周期信号。比如，指数信号 $f(t) = Ae^{at}$ 。若令周期信号的周期 T 趋于无穷大，也就是说信号没有重复出现，则周期信号就变成非周期信号了。这个概念非常重要，它揭示了周期信号与非周期信号的内在关系。在介绍傅里叶变换时，我们要用到这个概念。

1.2.2 能量信号与功率信号

为了解信号(电流信号、电压信号)的功率或能量特性，我们常研究信号在一个单位电阻上所消耗的能量或功率。信号 $f(t)$ 在一单位电阻上的瞬时功率为 $|f(t)|^2$ ，在区间 $(-T, T)$ 的能量为

$$\int_{-T}^T |f(t)|^2 dt$$

平均功率为

$$\frac{1}{2T} \int_{-T}^T |f(t)|^2 dt$$

信号能量 E 定义为区间 $(-\infty, \infty)$ 上信号的能量，即

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T |f(t)|^2 dt$$

单位为 J(焦耳)。

信号功率 P 定义为区间 $(-\infty, \infty)$ 上信号的平均功率，即

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

单位为 W(瓦特)。

若信号 $f(t)$ 的能量 $0 < E < \infty$ (这时 $P = 0$)，则称其为能量有限信号，简称能量信号；若信号 $f(t)$ 的功率 $0 < P < \infty$ (这时 $E = \infty$)，则称其为功率有限信号，简称功率信号。一个信号不能既是能量信号又是功率信号，但可以既不是能量信号又不是功率信号。

比如： $f(t) = e^{-2|t|}$ ，其能量为

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T |e^{-2|t|}|^2 dt = 2 \int_0^{\infty} e^{-4t} dt = \frac{1}{2}$$

功率为

$$P = 0$$

所以, $f(t)$ 是能量信号。

再比如: $f(t) = e^{-2t}$, 其能量为

$$\begin{aligned} E &= \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T (e^{-2t})^2 dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{4} (e^{4T} - e^{-4T}) \right] = \infty \end{aligned}$$

功率为

$$\begin{aligned} P &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E}{2T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{e^{4T} - e^{-4T}}{8T} \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{e^{4T}}{8T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{4e^{4T}}{8} = \infty \end{aligned}$$

所以, $f(t)$ 既不是能量信号也不是功率信号。可见, 按能量信号和功率信号进行分类, 从理论上并未包含所有信号。

1.2.3 模拟信号与数字信号

1. 模拟信号

在连续的时间范围内(除若干不连续点之外)有定义的信号称为连续时间信号, 简称连续信号。图 1-1 所示的半波整流信号和图 1-2 所示的斜坡信号都是连续信号。连续信号的幅值可以连续也可以不连续(只取某些规定值)。时间和幅值都连续的信号称为模拟信号。

模拟信号的特点是: 自变量的取值是连续的, 因变量的取值也是连续的; 其图形是一条连续曲线。

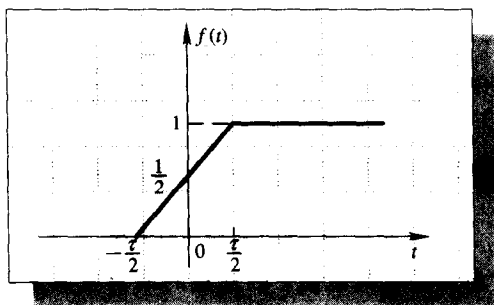


图 1-2 斜坡信号

2. 离散信号

在一些离散的瞬间才有定义的信号称为离散时间信号, 简称离散信号。也就是说, 离散信号是定义在一些离散时刻 $t_n (n=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 上的信号, 在其余的时间内, 函数没有定义。如图 1-3 所示, 信号 $f(t_n)$ 只在 $t_n = -3, -1, 0, 2, 3, 4, \dots$ 等离散时刻给出了函数值 $1.5, -1, 1, 2, 2.5, -1.5, \dots$

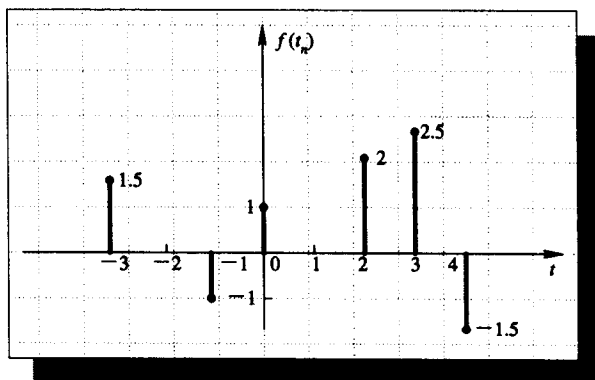


图 1-3 离散信号

时刻 t_n 和 t_{n+1} 之间的间隔 T_n 可以是常数 T , 也可以是 n 的函数。当 $T_n = T$ 时, 离散信号 $f(t_n)$ 只在均匀离散时刻 $t = \dots -2T, -T, 0, T, 2T, \dots$ 时有定义, 可表示为 $f(nT)$, 简记为 $f(n)$, 并将这种均匀分布或采样 (相当于在纵轴方向抽取样值) 的离散信号称为序列。如图 1-4 所示的单边指数序列 $f(n)$:

$$f(n) = \begin{cases} 0 & (n < 0) \\ e^{-\alpha n} & (n \geq 0) \end{cases}$$

式中 $\alpha > 0$, 序列值可能取 $[0, 1]$ 区间的任何值。

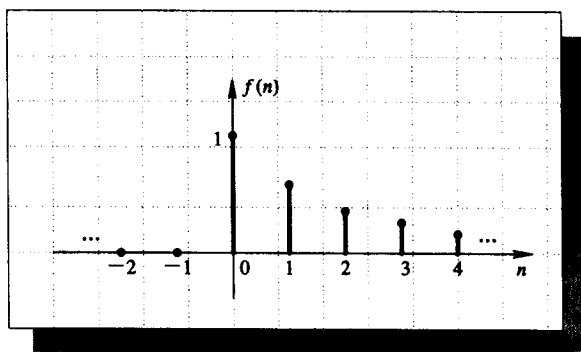


图 1-4 单边指数离散信号

离散信号的特点是: 自变量取离散值, 因变量的取值可以是连续的, 即有无穷个可能的取值; 其图形是一系列垂直线段, 也称为谱线。

3. 数字信号

如果离散信号的幅值也被限定为某些离散值, 则这种信号称为数字信号。如图 1-5 所示, 数字信号 $f(n)$:

$$f(n) = \begin{cases} 0 & (n < 0) \\ 1 & (n \geq 0) \end{cases}$$

数字信号的序列值只取 0 或 1。

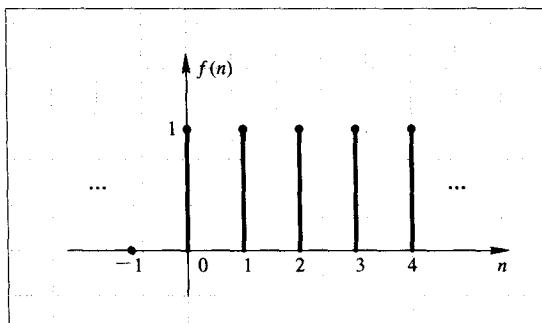


图 1-5 数字信号

数字信号的特点是：自变量取值离散，因变量取值个数有限（通常对于二进制数字信号只取两个值，比如 0 和 1）；其波形与离散信号相似，区别就是垂直线段只有两个长度（对于二进制数字信号而言）。

将离散信号幅度上无限个可能的取值变为有限个，这个过程称为“量化”。那么，数字信号又可表述为时间上离散化，幅度上量化的信号。

1.2.4 确定信号与随机信号

工程中遇到的信号根据其变化规律，可粗略地划分为确定信号和随机信号两大类。如果信号的未来值可以用某个函数准确地描述，则这类信号就称为确定信号。比如正弦信号，它可以用正弦函数来描述，对给定的任一时刻都可确定相应的函数值，所以是确定信号。如果在给定的任一时刻信号的值是随机的，即信号的未来值不能用精确的时间函数来描述，无法准确地预测，则称该类信号为不确定信号或随机信号。由于这类信号的未来值随时间的推移随机地变化，因此多用概率分布来描述，或用统计平均值来表征，所以又统称为统计时间信号。

随机信号存在多种形式，除幅度是随机的外，也可以表现为频率或相位等参量是随机变化的。严格地说，客观存在的信号基本上都是随机信号，如语音信号、图像信号、生物电信号、地震信号等等，只有那些供分析和测试用的基本信号，如正弦型信号、矩形和三角形等周期信号才是确定信号。

1.3 基本连续时间信号

现实生活中，信号的种类繁多，要想逐个研究是不可能的。因此，人们从各种信号中抽象出一些基本信号加以研究，而这些基本信号可以通过数学手段去精确或近似表征其他信号，比如傅里叶级数的基本形式是正弦和余弦函数，但它可以表示绝大多数不同形式的周期信号。可见，研究讨论基本信号的特点与性能，是研究其他信号的基础。本节将向大家介绍几种常用的基本连续时间信号，离散时间信号将在后面的章节介绍。

1.3.1 直流信号

一般而言, 只有一个方向变化的电流或电压就是直流信号。而人们通常所说的直流信号多是指信号值不随时间变化的信号, 也就是恒压信号或恒流信号。其表达式为

$$f(t) = C \text{ (常数)}$$

直流信号的波形如图 1-6 所示。

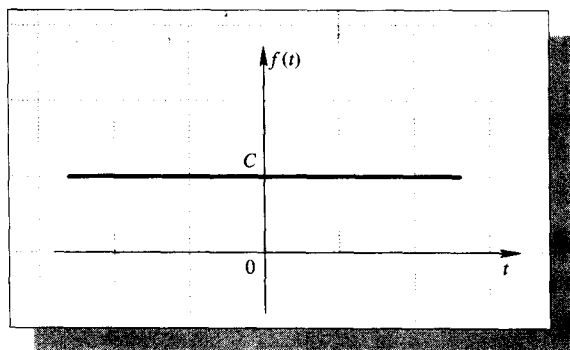


图 1-6 直流信号

1.3.2 正弦型信号

正弦型信号一般泛指我们所熟悉的正弦和余弦信号, 因为余弦信号实际上是正弦信号相移 $\pi/2$ 而成, 所以将正弦和余弦信号统称为正弦型信号, 记作 $f(t) = K \sin(\omega t + \theta)$ 或 $f(t) = K \cos(\omega t + \theta)$, 式中 K 为振幅, ω 为角频率, θ 称为初相位。其波形如图 1-7 所示。

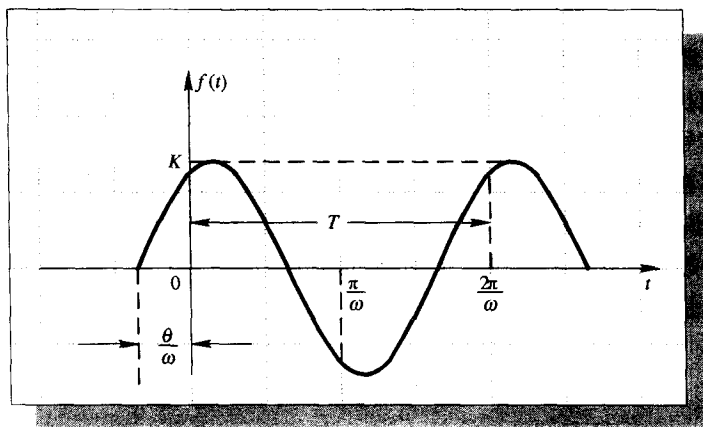


图 1-7 正弦型信号

在信号与系统分析中, 正弦型信号常借助欧拉公式表示为复指数信号。

欧拉公式如下:

$$e^{j\omega t} = \cos\omega t + j \sin\omega t$$

$$e^{-j\omega t} = \cos\omega t - j \sin\omega t$$

故有