

张渭滨
编著

信号与线性系统

暨南大学出版社

信号与线性系统

张渭滨 编著

B448.1/02

暨南大学出版社

$\frac{117}{2}$
 $\frac{112}{2}$

图书在版编目(CIP)数据

信号与线性系统/张渭滨编著

—广州:暨南大学出版社,1998.6

ISBN7—81029—726—0

I. 信…

II. 张…

III. 电子通讯—信号系统

IV. TN 1

暨南大学出版社出版发行

(510632 广州 石牌)

华侨大学印刷厂印刷

新华书店经销

1998年6月第1版 1998年6月第1次印刷

开本:850×1168 1/32 印张:14.25

字数:382千 印数:1—1000册

定价:25.00元

内 容 提 要

本书对连续时间系统的时域分析、频域分析、复频域分析以及离散时间系统、状态变量分析进行了较深入的讨论。全书选材适当、编排合理、论述严谨、条理清楚。配合正文,有较多的例题和习题,大部分习题附有参考答案。

本书可作为无线电技术、通信、计算机、自动控制及电气工程等专业“信号与线性系统”课程的参考教材,也可供有关专业的科技人员参考。

前 言

二十世纪九十年代,由于信息高速公路计划的制定以及多媒体电脑、因特网应用的日益普及,“信息”这个词成了新闻媒介使用频率最高的词之一,信息高速公路成为未来社会的象征。信息与知识产业将成为二十一世纪的主导产业,这已成为科学家、政治家、企业家以及公众普遍接受的观点。

虽然在我国文化中,“信息”这个词的出现只有千年历史(南唐诗人李中在《暮春怀故人》一诗中有“梦断美人沉信息,目穿长路倚楼台”的诗句),但实际上,人类已同信息打了几十万年的交道。自古以来,人类就在不断寻找各种方法将信息具体化为信号,以实现信息的传输、记忆、处理、留传与再现。语言、文字、印刷术、无线电、电脑的出现被称为人类历史上的五次信息革命。人类在信息传输、处理技术方面的最大进步是与人类对电信号的研究分不开的。1831年的法拉第电磁感应定律、1837年的莫尔斯电报、1862年麦克斯韦尔电磁理论的建立、1876年的贝尔电话、1888年赫兹用实验方法产生了电磁波以及1901年马可尼横跨大西洋的无线电通讯等事件都是人类在发展电信号处理技术史上的里程碑。以1946年电脑出现为标志的第五次信息技术革命还将持续到二十一世纪,信息从来没有象今天这样渗透并影响社会生活的各个方面,这场革命将对人类发展进程有多大影响,现在仍仅仅是初见端倪,极有可能的是,这场信息技术革命最激动人心和最有益的应用目前还没有被人们所预料到。

信号是信息的物理表现,而系统是实现信号的产生、处理、传输、储存、留传以及再现的物理装置。因此,如果过去说“信号与系统”这门课程是无线电技术、通信、计算机、自动控制、光学、地学等学科的

专业基础课,现在则可以说,它是现代信息处理技术的一门重要的基础课。由于电信号具有其他信号所不能比拟的优越性,各种不同信号常常经过传感器转换成电信号,再由电子设备(如计算机)进行处理,因此,这门课对电子、通信、电脑和控制类工程技术人员尤为重要,但其原理和方法对其他学科的工作人员亦有参考意义。

本书范围限于研究确定性信号经过线性时不变系统传输与处理的基本理论,侧重于信号与系统的基本概念与基本分析方法,特别是注重各种概念的物理图象说明及结果的物理解释。全书分六章,第一章为预备知识,第二章为连续时间系统的时域分析,第三章为连续时间系统的频域分析;第四章为连续时间系统的复频域分析;第五章为离散时间系统的时域及 z 域分析;第六章为系统的状态变量分析。全书从时域到变换域,从连续系统到离散系统,从输入—输出描述法到状态变量描述法,力图以统一的观点阐明信号与系统的基本概念与研究方法。

限于水平,书中难免有不妥与错误,恳请读者批评指正,不吝赐教。

张渭滨

1997年6月

目 录

第一章 绪论

- § 1.1 信号与系统 (1)
- § 1.2 数学预备知识..... (14)
- 习题一 (21)

第二章 连续时间系统的时域分析

- § 2.1 连续时间系统微分方程的建立与求解..... (25)
- § 2.2 冲激响应与阶跃响应..... (33)
- § 2.3 卷积及其性质..... (40)
- § 2.4 卷积积分的图形解释..... (52)
- § 2.5 卷积积分的数值计算..... (54)
- 习题二 (58)

第三章 连续时间系统的频域分析

- § 3.1 引言..... (66)
- § 3.2 周期信号的频谱分析——傅立叶级数..... (67)
- § 3.3 非周期信号的频谱分析——傅立叶变换..... (78)
- § 3.4 傅立叶变换的基本性质..... (94)
- § 3.5 周期信号的傅立叶变换 (110)
- § 3.6 抽样定理 (114)
- § 3.7 连续时间系统的傅立叶分析 (123)
- § 3.8 信号的传输与滤波 (129)
- § 3.9 傅立叶分析方法在通信中的应用举例 (141)
- § 3.10 相关函数与功率谱..... (147)
- 习题三..... (155)

第四章 连续时间系统的复频域分析

§ 4.1 引言	(169)
§ 4.2 拉普拉斯变换	(170)
§ 4.3 拉普拉斯变换的基本性质	(175)
§ 4.4 拉普拉斯逆变换	(189)
§ 4.5 利用拉普拉斯变换分析电路	(198)
§ 4.6 系统函数与冲激响应	(212)
§ 4.7 由系统函数的零极点分布决定时域特性	(217)
§ 4.8 由系统函数的零极点分布决定频率特性	(229)
§ 4.9 系统的稳定性及罗斯—霍尔维兹准则	(241)
习题四	(248)

第五章 离散信号与离散时间系统

§ 5.1 引言	(270)
§ 5.2 离散时间信号——序列	(271)
§ 5.3 离散时间系统的数学模型——差分方程	(277)
§ 5.4 常系数线性差分方程的解法	(281)
§ 5.5 离散时间系统的单位样值响应与卷积和	(288)
§ 5.6 离散信号的 Z 变换	(294)
§ 5.7 Z 变换的性质	(301)
§ 5.8 逆 Z 变换	(307)
§ 5.9 离散时间系统的 z 域分析	(313)
§ 5.10 由系统函数的零极点分析系统的时域与频域特性	(317)
§ 5.11 数字滤波器的一般概念	(324)
习题五	(329)

第六章 系统的状态变量分析法

§ 6.1 引言	(345)
§ 6.2 连续时间系统状态方程的建立	(347)
§ 6.3 离散时间系统状态方程的建立	(360)
§ 6.4 连续时间系统状态方程的求解	(364)
§ 6.5 离散时间系统状态方程的求解	(377)
§ 6.6 由状态方程判断系统的稳定性	(387)
§ 6.7 状态方程的数值解法	(391)
习题六	(393)
附录一 卷积积分表	(402)
附录二 常见周期信号傅立叶级数表	(403)
附录三 常见信号的傅立叶变换表	(406)
附录四 拉普拉斯逆变换表	(413)
附录五 等比级数求和公式表	(416)
附录六 “卷积和”表	(417)
参考书目	(419)
习题答案	(420)

第一章 绪论

§ 1.1 信号与系统

1.1.1 信号

信号是传送或记录信息的手段或工具,或者说,信号是信息的物理表现。雷达荧光屏上出现光点信号表达了有飞机出现的信息,早晨八点钟教学楼的铃声响了,表达了同学们该进教室上课的信息。自古以来,人类就在不断寻找各种方法将信息具体化为信号,以实现信息的传输、记忆、处理、转化和留传。最原始的信息记忆方法是结绳记事,结绳作为一种信号无疑会产生歧义,但是它在人类进行信息提取上起着不可磨灭的作用。语言的出现是人类提高信息传输能力上的一次大飞跃,文字的出现则是人类在信息的记忆与留传能力上的大飞跃。当然,人类在信息传输、处理技术方面的最大进步是与人类对电信号的研究分不开的,以下几个重大事件是人类在发展信息处理技术史上的里程碑:1837年莫尔斯电报;1876年贝尔电话;1901年马可尼横跨大西洋的无线电通讯;尤其是1946年计算机的出现。当然,1831年法拉第发现电磁感应定律,1862年麦克斯韦尔电磁场理论的建立并预言电磁波的存在以及1888年赫兹用实验方法产生了电磁波,证实了麦克斯韦尔理论,这些事件无疑同样是人类在信息处理技术史上的里程碑。

1.1.2 系统

要产生信号,要对信号进行传输、处理、存贮和转化、再现,均需要有一定功能的物理装置,这一物理装置叫做系统。系统是由若干相互作用和相互依赖的事物组合而成的具有特定功能的整体。若干小的系统还可以构成一个大的系统。小的系统如收音机、电视机,大的

系统如著名的宇宙航行系统,它是通信系统、控制系统、计算机系统和指令系统共同构成的整体,这就是所谓的 4c 系统 (communication、control、computer、command)。

广义地讲,系统这一概念涉及的范围十分广泛。信息、系统这两个词显然已成为现代媒体中出现十分频繁的词语。系统可以分为物理系统与非物理系统,也可以分为自然系统与人工系统。通信、电力、机械、计算机是物理系统,政治结构、经济组织是非物理系统;计算机网络、通信网络、水利灌溉网络、交通运输网络等是人工系统,而原子核、分子、太阳系、神经网络、血液循环网络则是自然系统。

本课程的学习范围仅限于系统分析,不讨论系统综合与系统工程。我们将以通信系统与控制系统的某些基本问题为背景,研究信号经系统传输或处理的一般规律,着重基本概念与基本分析方法的学习。

1.1.3 信号的描述与分类

信号所包含的信息往往存在于某种变化方式之中,其变化规律一般可以用数学表达式表示,这些表达式一般只是时间的函数,给出函数的图像称为信号的波形。这种自变量为时间 t 的信号称为时间信号。我们用示波器观察放大器的输出电压时,它的波形是随时间变化的,它可以用时间函数来描述,例如 $f(t)=220 \cos 50t(\text{V})$,当 $t=0$ 时, $f(t)=220\text{V}$,而当 $t=\pi/100$ 秒时, $f(t)=0$ 。有些信号则随空间位置变化或同时随时间与空间位置变化,如传输线上的电流与电压。本课程只研究时间信号。

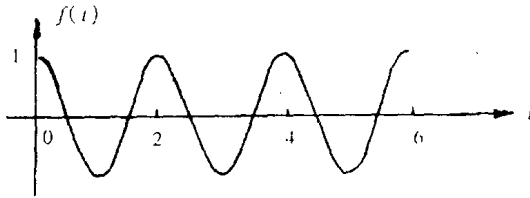
对于各种信号,可以从不同角度进行分类。

(1) 电信号与非电信号

信号按物理属性可以分为电信号与非电信号两类,两类信号之间可以互相转化。由于电信号容易产生、便于控制、易于处理,故电信号应用最为广泛,各种传感器就是实现不同类别信号之间转化的装置,如光电倍增管把光信号转化为电信号,扩音器话筒把声音信号转化为电信号。本课程只研究电信号。

(2) 连续信号与离散信号

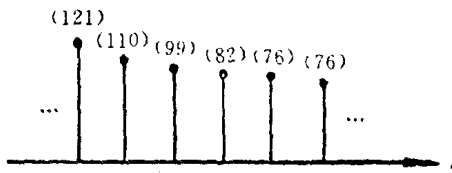
在某一时间范围内,除了个别间断点之外,表示信号的函数在该时间范围内的所有瞬间都有定义,则称此信号为连续信号。



(a)



(b)



(c)

图 1-1 连续信号与离散信号

(a) $f(t) = \cos \pi t$ ($0 < t < 6$) (b) 脑电波信号波形 (c) 某病人脉搏变化

图 1-1(a)所示信号 $f(t)$ 在 $0 < t < 6$ 范围内所有瞬间都有定义 $f(t) = \cos \pi t$, 故称 $f(t)$ 为连续信号, 尽管在 $t=0$ 及 $t=6$ 处为间断点, 例如在 $t=0$ 处, $f(0^-) = 0$, $f(0^+) = 1$, 突变值为 1。连续信号的函数值(幅值)可以是连续的, 也可以是离散的。对于时间和幅值都是连续的信号, 又称为模拟信号, 在实际应用中, 模拟信号与连续信号两个名词往往不予区别。图 1-1(b)为脑电波波形图, 显然也是一个连续信号。

与连续信号相对应的是离散信号,离散信号只在某些不连续的特定瞬时给出函数值,在其他时间则没有定义。图 1-1(c)为某病人定时测量的心跳速率记录图示。显然,它是一个离散信号。政府职能部门逐月逐年公布的各种统计数字,也是一些离散信号。离散信号各瞬时之间的间隔可以是均匀的,也可以是不均匀的,一般情况下,为方便起见,都采用均匀时间间隔。如果离散时间信号的幅值是连续的,则称之为抽样信号,如果幅值也被限定为某些离散值(量化),则称之为数字信号。

(3) 确定性信号与随机信号

若信号被表示为一个确定的时间函数,即对于任一指定的时刻,可确定为一相应的函数值,这种信号称为确定性信号或规则信号。而随机信号则具有未可预知的不确定性。实际传输的信号往往是随机信号,如果通信系统中传输的都是确定性信号,接收者就不可能获得任何新的消息,通信也就失去了意义。此外,在信号传输过程中,不可避免地受到各种干扰和噪声的影响,这些干扰和噪声都具有随机特性。对于随机信号,不能给出确切的时间函数,只可能知道它取某一数值的概率。确定性信号与随机信号有密切的联系,在一定条件下,随机信号也会表现出某种确定性。作为理论上的抽象,应首先研究确定性信号,在此基础上才能根据随机信号的统计规律进一步研究随机信号的特性。本课程只讨论确定性信号。

(4) 周期信号与非周期信号

在规则信号之中又可以分为周期信号与非周期信号。如果对所有的 $t(-\infty < t < \infty)$,存在一个常数 T ,使得 $f(t+nT)=f(t)$ (n 为任意整数),则称 $f(t)$ 为周期信号,满足上式的最小 T 值就称为信号的周期。非周期信号在时间上不具有周而复始的特性。若令周期信号的周期 T 趋于无穷大,则该周期信号就成为非周期信号。

(5) 因果信号与非因果信号

如果有一系统,在 $t < 0$ 时,该系统的激励信号为零,相应地该系统的输出信号也等于零,这种系统称为因果系统。实用中,常把 $t=0$

时接入系统的信号(即 $t < 0$ 时, 信号值为零)称为因果信号(或有起因信号)。对于因果系统, 激励若是因果信号, 则输出也必定是因果信号。

1.1.4 几种常见的连续信号

(1) 指数信号

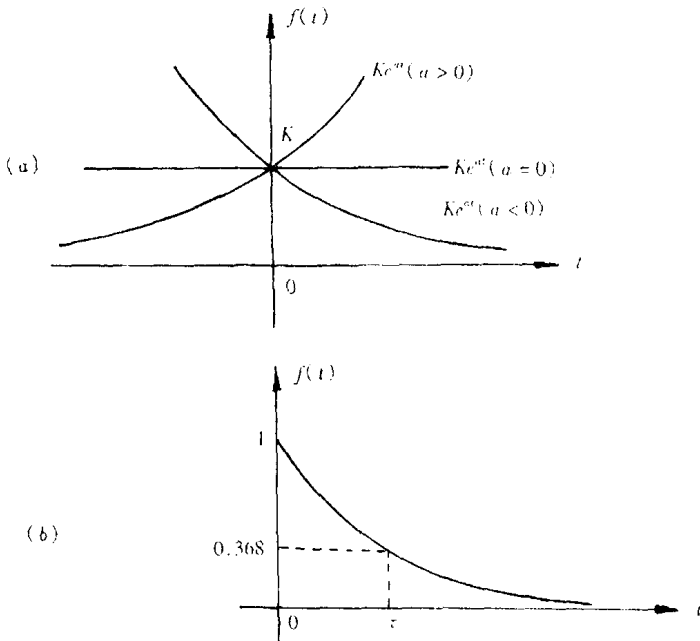


图 1-2 (a)指数信号 (b)单边指数衰减信号 $e^{-t/\tau}$

指数信号如图 1-2 所示, 其表达式为

$$f(t) = Ke^{at} \quad (1-1)$$

式中 a 是实数, 若 $a > 0$, 则信号随时间增加按指数规律增长, 若 $a < 0$, 则信号随时间增加按指数规律衰减。若 $a = 0$, 则信号不随时间变化而保持某一恒值 K , 此即为直流信号。常数 K 表示指数信号在 t

$=0$ 时的初始值, 指数 a 的绝对值大小反映了信号增长或衰减的速率。图 1-2(b) 为单边指数衰减信号, 它是实际上用得较多的信号。在信号与系统分析中, 指数信号是重要的基本信号之一, 其主要特性是它对时间的微分和积分都仍然是指数信号。

(2) 正弦信号

正弦信号与余弦信号之间仅在相位上相差 $\pi/2$, 因此统称为正弦信号, 其表达式为

$$f(t) = K\sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1-2)$$

式中 K 为振幅, ω_0 为角频率, φ_0 为初位相。正弦信号为周期信号, 周期 $T=2\pi/\omega_0$ 。在信号与系统分析中, 经常会遇到衰减的正弦信号, 其波形如图 1-3 所示。此正弦振荡的幅度按指数衰减, 其表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ Ke^{-\alpha t} \sin \omega_0 t & (t \geq 0) \end{cases} \quad (1-3)$$

与指数信号的性质相似, 正弦信号对时间的微分与积分仍是同频率的正弦信号。

(3) 复指数信号

如果指数信号的指数因子为一复数, 则称为复指数信号, 其表达式为

$$f(t) = Ke^{st} \quad (1-4)$$

式中 $s = \sigma + j\omega$, σ 为复数 s 的实部, ω 为虚部。借助于欧拉公式, 可将 (1-4) 式展开, 即

$$Ke^{(\sigma + j\omega)t} = Ke^{\sigma t} \cos \omega t + jKe^{\sigma t} \sin \omega t \quad (1-5)$$

当 $\sigma > 0$, 正弦, 余弦是增幅振荡, $\sigma < 0$ 时为衰减振荡, $\sigma = 0$ 时则为等幅振荡。而当 $\omega = 0$ 时, 复指数信号变成一般的指数信号; 若 $\sigma = 0, \omega = 0$, 则变成直流信号。也就是说, 可以用复指数信号描写前述各种基本信号 (即直流信号、指数信号、正弦信号以及衰减或增幅正弦信

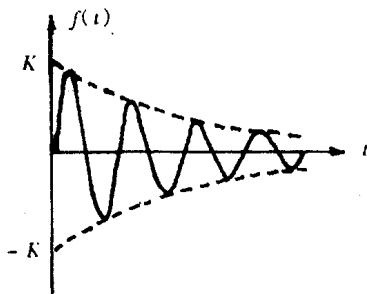


图 1-3 指数衰减的正弦信号

号)。

(4) 抽样信号 $Sa(t)$

由 $\sin t$ 与 t 之比构成的函数称为抽样信号, 以 $Sa(t)$ 表示, 即

$$Sa(t) = \sin t / t \quad (1-6)$$

其波形见图 1-4。

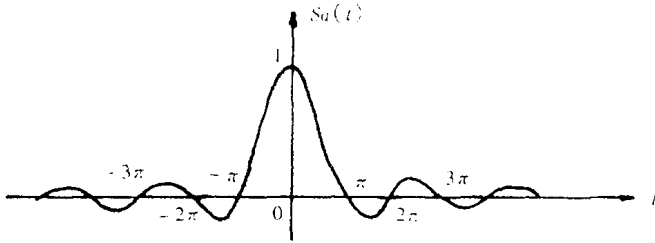


图 1-4 抽样信号 $Sa(t)$ 波形

$Sa(t)$ 是一个偶函数, 它在 t 的正负两方向振幅都逐渐衰减。当 $t = \pm n\pi$ ($n=1, 2, 3, \dots$) 时, $Sa(t) = 0$ 。此外有

$$\int_0^{\infty} Sa(t) dt = \int_{-\infty}^0 Sa(t) dt = \pi/2 \quad (1-7)$$

(5) 钟形脉冲信号(高斯函数)

钟形脉冲信号的定义为

$$f(t) = E e^{-\omega t^2} \quad (1-8)$$

其波形见图 1-5。

当 $t = \tau$ 时, $f(t) = E/e = 0.368E$ 。这表明, 参数 τ 是 $f(t)$ 由最大值 E 下降到 $0.368E$ 所经历的时间。钟形脉冲信号在随机信号分析中占有重要地位, 统计学中所谓高斯分布即指此分布规律, 它又称为高斯函数。

1.1.5 信号的运算

(1) 相加

若

$$x(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ \sin \pi t & (t \geq 0) \end{cases}$$

$$y(t) = -\sin \pi t$$

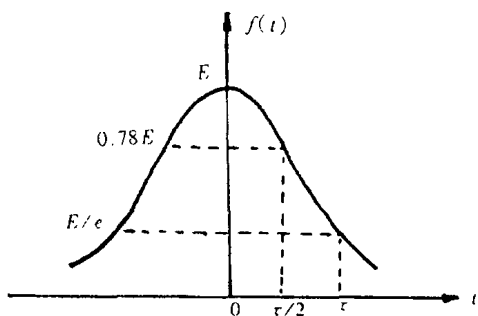


图 1-5 钟形脉冲信号

$$\text{则 } s(t) = x(t) + y(t) = \begin{cases} -\sin \pi t & (t < 0) \\ 0 & (t \geq 0) \end{cases}$$

(2) 相乘

如上 $x(t)$ 及 $y(t)$, 则有

$$z(t) = x(t) \cdot y(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ -(\sin \pi t)^2 & (t \geq 0) \end{cases}$$

通信过程中非常重要的调制技术就是信号相乘。

(3) 微分

连续时间信号 $f(t)$ 的微分 $\frac{df(t)}{dt}$ (也可以记为 $f'(t)$ 或 $f^{(1)}(t)$) 也是一个时间信号, 它表示信号随时间变化的变化率。电感的感生电压 $v_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$ 就是信号微分的一个典型例子。

(4) 积分

连续时间信号 $f(t)$ 的时间积分 $\int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau$ (也可以记作 $f^{(-1)}(t)$) 也是一个时间信号。电容的电量 $q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau$ 是信号积分的一个典型例子。

(5) 信号的展缩、平移与反转

以正的常数 a 展缩信号 $f(t)$ 的大小, 就是用常数 a 乘以各瞬时的信号值, 这相当于进行常数信号 $g(t) = a$ 与信号 $f(t)$ 的相乘运算。完成信号幅度展缩的系统叫做放大器或者衰减器, 这是信号处理中