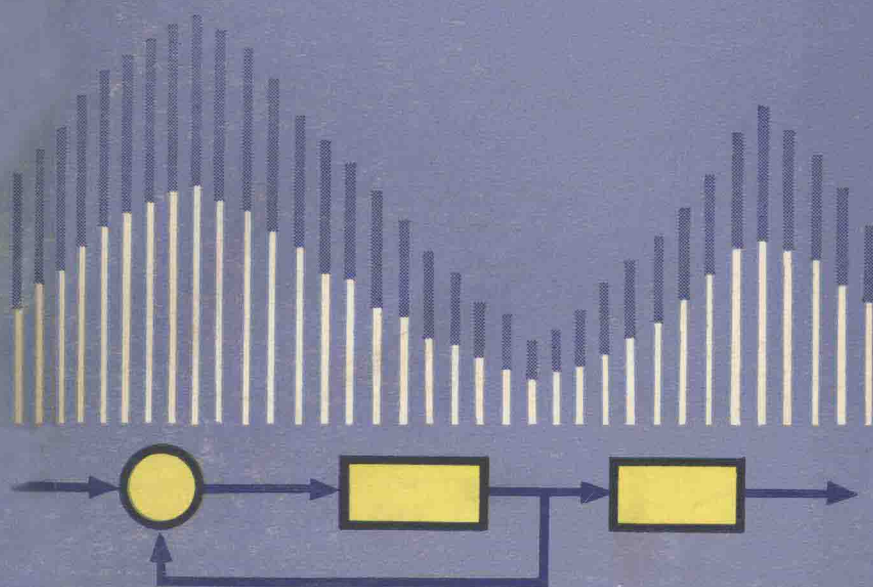


信号与系统

上册

郑君里 杨为理 应启珩 编



人民教育出版社

高等学校试用教材

信号与系统

上册

郑君里 杨为理 应启珩 编

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书讨论确定性信号经线性时不变系统传输处理的基本理论和基本分析方法。从输入输出描述到状态描述,从连续到离散,从时域到变换域,共包括十一章。上册一至六章讨论连续时间信号与系统。下册七至十章讨论离散时间信号与系统,第十一章讨论系统状态变量分析(包括时域与变换域、连续与离散)。配合正文,有较丰富的例题和习题。

本书可作为无线电技术或自动化类有关专业信号与系统(或信号与线性系统)课程的试用教材。也可供有关科技人员参考。

本书责任编辑 王忠民

高等学校试用教材

信号与系统

上 册

郑君里 杨为理 应启珩 编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 19 字数 460,000

1981年5月第1版 1981年11月第1次印刷

印数 00,001—15,500

书号 15012·0326 定价 1.90 元

前 言

近年来,作者为无线电电子学系开设信号与系统课程,同时编写了这方面的参考教材。现将该教材整理、扩充,编成本书。

本课程的任务在于研究信号与系统理论的基本概念和基本分析方法。初步认识如何建立信号与系统的数学模型,经适当的数学分析求解,对所得结果给以物理解释、赋予物理意义。由于本学科内容的迅速更新与发展,它所涉及的概念和方法将十分广泛,而且还在不断扩充。本书试图在规定的要求与范围之内,使选材适当充实、丰富。在用作教材时,可以灵活选取所需内容。

本书的范围限于确定性信号(非随机信号)经线性、时不变系统传输与处理的基本理论。从时间域到变换域,从连续到离散,从输入-输出描述到状态描述,力求以统一的观点阐明基本概念和方法。

为学习本课程,读者应有一定的数学基础和电路分析基础。书中涉及的数学内容主要包括微分方程、差分方程、级数、复变函数、线性代数等。除对差分方程作适当讲解之外,其它方面将直接引用有关结论。在运用这些数学工具时,注重解决工程问题,加强物理概念的解释。本课程与先修课“电路分析基础”联系密切,虽有某些重复,但分析问题的着眼点有所不同。在那里,从电路分析的角度研究问题,而本书则以系统的观点进行分析。

通过本课程的学习希望激发起学生们对信号与系统学科方面的学习志趣和热情,使他们有信心也有能力逐步适应这一领域日新月异发展的需要。首先要适应几门重点后续课程的需要,这些

课程是,电子线路(也可并行学习)、网络理论、通信系统、控制理论、数字信号处理,等等。

全书共包括十一章。一至六章讨论连续时间信号与系统,七至十章讨论离散时间信号与系统(第七章时域分析、第八章 Z 变换与 Z 域分析、第九章离散傅里叶变换及其快速算法、第十章沃尔什变换),第十一章集中研究系统的状态变量分析(包括连续与离散,时域与变换域)。

本书篇幅稍大,涉及的问题比较广泛,直接用全书材料组成一门一学期的课程是不适当的。可以根据先修与后续课程的不同情况按以下几种方式(序号表示章号)选择所需部分,组成深度和学时有区别的课程

$$1-2-3-4-5-\begin{cases} -6 \\ -6-7-8 \\ -6-7-8-11 \\ -6-7-8-9-11 \\ -6-7-8-9-10-11 \end{cases}$$

在每章内还安排有一些加宽加深的内容,标有“*”号,舍去这些小节,不影响后续部分的学习。除内容选择方面机动性之外,在讲授顺序上也可以作灵活调整。例如,绪论中的1.5、1.6节可移至第三章开始时讲授;又如,讨论傅氏变换与拉氏变换原理和应用的第三至六章,可改按3-6-4-5或4-5-3-6的顺序使用(这时要对第6.1、6.3、6.8或4.2、4.13等节作调整)。

配合基本理论与分析方法的学习,书中备有一定数量的例题和习题,可酌情选用,部分难度稍大或比较繁复的习题标有“*”号,不应作为对学生的一般要求。书末附有习题答案,仅供参考。在应用计算机方面,考虑到目前的实际情况,没有给出计算程序,但在某些基本原理的讲授中,已经注意到为这方面作一些准备(如卷积数值计算、拉普拉斯逆变换、快速傅里叶变换等)。

本书由郑君里同志主编。第三、八章由杨为理同志执笔,第十一章由应启珩同志执笔、其余各章由郑君里同志执笔。乐正友同志整理习题答案,张尊桥同志绘制插图。

常迺教授指导本书编写工作。冯重熙副教授对本书编写大纲的拟定提出宝贵意见。系负责同志以及通信、线路等教研组的有关同志对本书编写工作给予许多支持和帮助。

书稿承高等学校理科及工科基础课程教材编审委员会电路理论及信号分析小组委托南京工学院管致中教授,合肥工业大学芮坤生教授,北京工业学院李瀚荪副教授负责审阅,提出许多宝贵意见。作者在此表示衷心的感谢。

限于水平,书中难免有错误与不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

一九八一年元月

于清华大学无线电电子学系

目 录

第一章 绪论	1
1.1 信号与系统.....	1
1.2 信号的描述及其分类.....	4
1.3 奇异信号.....	13
1.4 信号的分解.....	26
1.5 正交函数.....	32
1.6 用完备正交函数集表示信号.....	40
1.7 系统模型及其划分.....	46
1.8 线性时不变系统.....	50
1.9 系统分析方法.....	53
参考书.....	55
习 题.....	56
第二章 连续时间系统的时域分析	60
2.1 引言.....	60
2.2 微分方程式的建立与求解.....	61
2.3 起始点的跳变——从 0^- 到 0^+	72
2.4 零输入响应与零状态响应.....	79
2.5 冲激响应与阶跃响应.....	85
2.6 卷积.....	89
2.7 卷积的性质.....	98
2.8 卷积积分的数值计算.....	103
2.9 用算子符号表示微分方程.....	108
*2.10 分配函数——奇异函数的进一步认识.....	116
参考书.....	123
习 题.....	124

目 录

第一章 绪论	1
1.1 信号与系统.....	1
1.2 信号的描述及其分类.....	4
1.3 奇异信号.....	13
1.4 信号的分解.....	26
1.5 正交函数.....	32
1.6 用完备正交函数集表示信号.....	40
1.7 系统模型及其划分.....	46
1.8 线性时不变系统.....	50
1.9 系统分析方法.....	53
参考书.....	55
习 题.....	56
第二章 连续时间系统的时域分析	60
2.1 引言.....	60
2.2 微分方程式的建立与求解.....	61
2.3 起始点的跳变——从 0^- 到 0^+	72
2.4 零输入响应与零状态响应.....	79
2.5 冲激响应与阶跃响应.....	85
2.6 卷积.....	89
2.7 卷积的性质.....	98
2.8 卷积积分的数值计算.....	103
2.9 用算子符号表示微分方程.....	108
*2.10 分配函数——奇异函数的进一步认识.....	116
参考书.....	123
习 题.....	124

习 题	355
第五章 s 域分析、极点与零点	366
5.1 引言	366
5.2 由系统函数零、极点分布决定时域特性	368
5.3 自由响应与强迫响应、暂态响应与稳态响应	376
5.4 由系统函数零、极点分布决定频响特性	392
5.5 一阶系统的 s 平面分析	399
5.6 二阶谐振系统的 s 平面分析	406
5.7 波特图	417
*5.8 全通函数与最小相移函数的零、极点分布	430
5.9 系统的稳定性	437
5.10 罗斯 - 霍尔维兹稳定性准则	445
*5.11 以系统稳定性的观点研究自激振荡	450
参考书	453
习 题	454
第六章 连续时间系统的傅里叶分析	472
6.1 引言	472
6.2 非周期信号激励下系统的响应	474
6.3 周期信号激励下系统的响应	477
6.4 无失真传输	481
6.5 理想低通滤波器及其冲激响应	488
6.6 理想低通滤波器的阶跃响应、带宽与上升时间	490
6.7 系统的物理可实现性、佩利-维纳准则	496
6.8 可实现的典型滤波网络函数——巴特沃兹逼近 与切贝雪夫逼近	501
*6.9 希尔伯特变换	509
6.10 调制与解调	513
*6.11 调幅信号作用于带通系统	518
*6.12 频分复用与时分复用	520
*6.13 激励和响应的功率谱与能量谱	523
参考书	529

习 题	530
附录一 卷积表	538
附录二 常用周期信号的傅里叶级数表	540
附录三 常用信号的傅里叶变换表	544
附录四 拉普拉斯逆变换表	554
习题答案	560
上册索引	587

第一章 绪 论

1.1 信号与系统

人们相互问讯、发布新闻、广播图像或传递数据，其目的都是要把某些消息借一定形式的信号传送出去。信号是消息的表现形式，消息则是信号的具体内容。

很久以来，人们曾寻求各种方法，以实现信号的传输。我国古代利用烽火传送边疆警报。数百年后希腊人也以火炬的位置表示字母符号。这种光信号的传输构成最原始的光通信系统。利用击鼓鸣金可以报送时刻或传达命令，这是声信号的传输。以后又出现了信鸽、旗语、驿站等传送消息的方法。然而，这些方法无论在距离、速度或可靠性与有效性方面仍然没有得到明显的改善。十九世纪初，人们开始研究如何利用电信号传送消息。1837年莫尔斯(F. B. Morse)发明了电报，他用点、划、空适当组合的代码表示字母和数字，这种代码称为莫尔斯电码。1876年贝尔(A. G. Bell)发明了电话，直接将声信号(语音)转变为电信号沿导线传送。十九世纪末，人们又致力于研究用电磁波传送无线电信号。为实现这一理想，赫兹(H. Hertz)、波波夫(A. C. Попов)、马可尼(G. Marconi)等人分别作出贡献。开始时，传输距离仅数百米，1901年马可尼成功地实现了横渡大西洋的无线电通信。从此，传输电信号的通信方式得到广泛应用和迅速发展。如今，无线电信号的传输不仅能够飞越高山海洋，而且可以遍及全球并通向宇宙。

所谓电信号，一般指随时间而变化的电压或电流，也可以是电容的电荷，线圈的磁通以及空间的电磁波等等。电信号与非电信

号可以比较方便地互相转换。在实际应用中常常将各种物理量,如声波动、光强度、机械运动的位移或速度等转变为电信号,以利传输。经传输后在接收端再将此信号还原成原始的消息。

随着信号传输理论与技术的发展,又出现了所谓“信号处理”的新课题。什么是信号处理?这可以理解为对信号进行某种加工或变换。加工或变换的目的是:削弱信号中的多余内容;滤除混杂的噪声和干扰;或者是将信号变换成容易分析与识别的形式,便于估计和选择它的特征参量。近年来,由于高速数字计算机的运用,大大促进了信号处理研究的发展。而信号处理的应用已遍及许多科学技术领域。例如,从月球探测器发来的电视信号可能被淹没在噪声之中,但是,利用信号处理技术就可予以增强,在地球上得到清晰的图像。石油勘探、地震测量以及核试验监测中所得数据的分析都需要利用信号处理技术。此外还可应用于心电图、脑电图的分析,语音识别以及各种类型的数据通信。等等。

信号传输与信号处理有着密切的联系,但又形成了相对独立的学科体系。它们共同的理论基础是信号分析与系统分析。信号与系统分析的理论研究将服务于解决信号传输与信号处理方面的实际问题。

所谓“系统”就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。

在无线电电子学领域中,常常利用通信系统、控制系统、计算机系统与指挥系统进行信号的传输与处理,有时,又需要将这几种系统共同组成一个复杂的整体,例如,一个宇宙航行系统,它就是涉及通信、控制、计算机与指挥几方面的综合系统^①。

^① 由于通信(*communication*)、控制(*control*)、计算机(*computer*)、指挥(*command*)这四个字的第一个英文字母都是“c”,因此,当这些系统共同组合时可称为“两c系统”、“三c系统”或“四c系统”。例如,宇宙航行系统是一个四c系统。

通常,组成通信与控制系统的主要部件中包括大量的、多种类型的电路。电路也称为电网络或网络。当研究一般性的抽象规律时多用网络一词,而讨论一些指定的具体问题时又称之为电路。

信号、网络与系统之间有着十分密切的联系。离开了信号,网络与系统将失去意义。信号作为待传输消息的表现形式,可以看作运载消息的工具,而网络与系统则是为传送信号或对信号进行加工处理而构成的某种组合。系统所关心的是,对于给定信号形式与传输、处理的要求,系统能否与其相匹配,它应具有怎样的功能和特性,而网络问题的着眼点则在于,为实现系统功能与特性应具有怎样的结构和参数。有时认为系统比网络更复杂、规模更大的组合体,然而,更确切地说,系统与网络二词的主要差异应体现在观察事物的着眼点或处理问题的角度方面。系统问题注意全局,而网络问题则关心局部。例如,仅由一个电阻和一个电容组成的简单电路,在网络分析中,注意研究其各支路、回路的电流或电压,而从系统的观点来看,可以研究它如何构成具有微分或积分功能的运算器。

近年来,由于大规模集成化技术的发展以及各种复杂系统部件的直接采用,使系统、网络、电路以及器件这些名词的划分发生了困难,它们当中的许多问题互相渗透,需要统一分析、研究和处理。通常,勿需严格区分各名词之差异。在研究系统的基本理论时,所谓系统常常就是指网络本身。在本书中,系统、网络与电路等名词通用。

广义讲,系统的概念不仅限于无线电电子学方面,它所涉及的范围十分广泛,应当包括各种物理系统和非物理系统,人工系统以及自然系统。

通信系统、电力系统、机械系统可称为物理系统;政治结构、经济组织、生产管理等则属于非物理系统。计算机网、交通运输

网、水利灌溉网以及交响乐队等是人工系统；而自然系统的例子小至原子核，大如太阳系，可以是无生命的，也可是有生命的（如动物的神经组织）。

随着科学技术的发展，人工系统之规模日益庞大，内部结构也越来越复杂。人们致力于研究将系统理论用于系统工程设计，以期使较复杂的系统最佳地满足预定的要求。以此为背景，出现了一门新兴的边缘技术科学，这就是系统工程学。

在系统或网络理论研究中，包括系统分析与系统综合（网络分析与网络综合）两个方面。在给定系统的条件下，研究系统对于输入激励信号所产生的输出响应，这是系统分析问题。系统综合则是按某种需要先提出对于给定激励的响应，而后根据此要求设计（综合）系统。分析与综合二者关系密切，但又有各自的体系和研究方法，一般讲，学习分析是学习综合的基础。

本书的讨论范围仅限于系统分析，不讨论系统综合，也不涉及系统工程学方面的问题。我们以通信系统和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，着重基本概念和基本分析方法。

1.2 信号的描述及其分类

描述信号的基本方法是写出它的数学表达式，此表达式是时间的函数，绘出函数的图像称为信号的波形。为便于讨论，在本书中常常把信号与函数两名词通用。除了表达式与波形这两种直观的描述方法之外，随着问题的深入，需要用频谱分析或其他正交变换的方式来描述和研究信号。

对于各种信号，可从不同角度进行分类。

确定性信号与随机信号 若信号被表示为一确定的时间函数，对于指定的某一时刻，可确定一相应的函数值，这种信号称为

确定性信号或规则信号。例如,我们熟知的正弦信号。但是,实际传输的信号往往具有未可预知的不确定性,这种信号称为随机信号或不确定的信号。如果通信系统中传输的信号都是确定的时间函数,接收者就不可能由它得知任何新的消息,这样也就失去了通信的意义。此外,在信号传输过程中,不可避免地要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着密切的联系,在一定条件下,随机信号也会表现出某种确定性。例如乐音表现为某种周期性变化的波形,电码可描述为具有某种规律的脉冲波形等等。作为理论上的抽象,应该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。本书只讨论确定性信号的分析。

周期信号与非周期信号 在规则信号之中又可分为周期信号与非周期信号。所谓周期信号就是依一定时间间隔周而复始,而且是无始无终的信号,它们的表示式可以写作

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

满足此关系式的最小 T 值称为信号的周期。只要给出此信号在任一周期内的变化过程,便可确知它在任一时刻的数值。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 趋于无限大,则成为非周期信号。

连续时间信号与离散时间信号 按照时间函数取值的连续性与离散性可将信号划分为连续时间信号与离散时间信号(简称连续信号与离散信号)。如果在所讨论的时间间隔内,对于任意时间值(除若干不连续点之外),都可给出确定的函数值,此信号就称为连续信号。例如正弦波或图 1-1 所示的矩形脉冲都是连续信号。连续信号的幅值可以是连续的,也可以是离散的(只取某些规

定值)。对于时间和幅值都为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名词往往不予区分。与连续信号相对应的是离散信号。离散信号在时间上是离散的,只在某些不连续的规定瞬时给出函数值,在其它时间没有定义,如图 1-2。

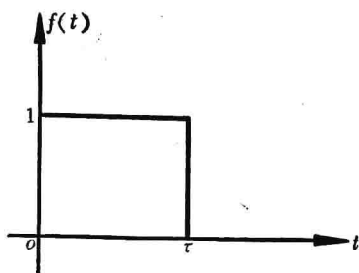


图 1-1 矩脉冲

此图对应的函数 $f(t_k)$ 只在 $t_k = -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ 等离散时刻给出函数值 $2, 1, -1, 1, 2, 0, 4, 3, -2, \dots$ 等。给出函数值的离散时刻之间间隔可以是均匀的(如图 1-2),也可以是不均匀的。一

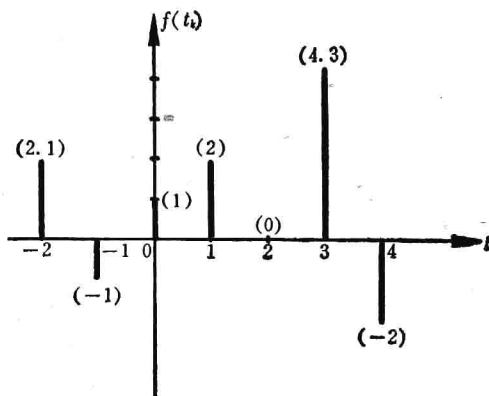


图 1-2 离散信号(抽样信号)

般情况都采用均匀间隔。如果离散时间信号的幅值是连续的,则又可取名为抽样信号,例如图 1-2。另一种情况是离散信号的幅值也被限定为某些离散值,也即时间与取值都具有离散性,这种信号又称为数字信号,例如在图 1-3 中,各离散时刻的函数取值只能是“0”和“1”二者之一。此外,还可以有幅度为多个离散值的多电平数字信号。

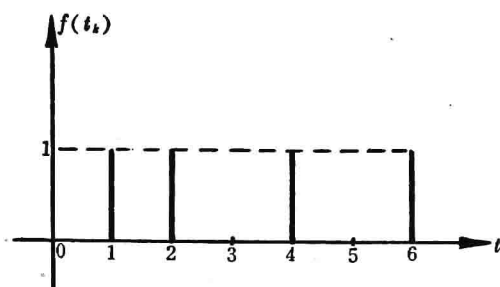


图 1-3 离散信号(数字信号)

除以上划分方式之外, 还可将信号分为能量受限信号与功率受限信号(见第 3.12 节), 以及调制信号、载波信号和已调信号(见第 6.10 节)等等。在本书中将根据各章的需要陆续介绍。

下面, 我们给出一些典型信号的表达式和波形, 今后, 我们要经常遇到这些信号。此处, 只限于连续信号, 有关离散信号的研究将从第七章开始。

(一) 指数信号

指数信号的表示式为

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

式中, a 是实数。若 $a > 0$, 信号将随时间而增长, 若 $a < 0$, 信号则随时间衰减, 在 $a = 0$ 的特殊情况下, 信号不随时间而变化, 成为直流信号。常数 K 表示指数信号在 $t = 0$ 点的初始值。指数信号的波形如图 1-4。

指数 a 的绝对值大小反映了信号增长或衰减的速率, $|a|$ 越大, 增长或衰减的速率越快。通常, 把 $|a|$ 的倒数称为指数信号的时间常数, 记作 τ , 即 $\tau = \frac{1}{|a|}$, τ 越大, 指数信号增长或衰减的速率越慢。

实际上, 较多遇到的是衰减指数信号, 例如图 1-5 的波形, 其