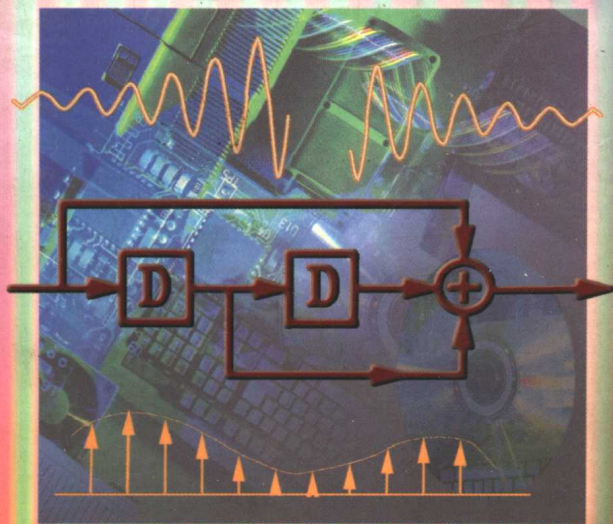


# 信号与系统

## 理论、方法和应用

徐守时 编著



中国科学技术大学出版社

# 信号与系统

· 理论、方法和应用 ·

徐守时 编著

中国科学技术大学出版社

· 合 肥 ·

## 内 容 简 介

本书系统地讲述了信号与系统的基本理论、方法及其主要应用,形成一个完整的内容体系。与国内外同类图书相比,本书具有如下鲜明的特色:全书逐章逐节都以对偶和类比的方式,完全并行地展开连续时间信号与系统和离散时间信号与系统两大部分内容,以信号与系统问题的输入输出描述方式为主,以先时域后变化域(频域复频域)的次序,介绍和讨论“系统的分析和综合”与“信号的分析 and 处理”之一整套概念、理论和方法,及其在通信和信号处理等领域的主要应用。最后在简要介绍状态变量描述方式下的基本概念和方法的同时,着重于两种描述方式之间的联系:在信号和系统的变换域表示法的命题下,以统一的数学框架介绍连续和离散时间傅里叶变换、拉普拉斯变换和 Z 变换,并着重突出这些变化的性质在信号与系统理论、方法和应用中的作用;全书以两大类系统,即有良好性能的线性时不变系统和用微分方程或差分方程描述的系统作为研究和讨论的主要对象,并特别强调基本信号和基本系统在信号与系统理论和方法中的作用。

全书共 9 章,内容包括:绪论、信号和系统的数学描述及基本性质、信号的卷积和线性时不变系统的时域分析、用微分方程和差分方程描述的系统、信号和系统的变换表示法、变换的性质及其揭示的时域、频域和复频域之间的关系、系统的变换域分析、信号与系统理论和方法的主要应用,以及系统的状态变量分析。每章都有足够数量的精选例题,兼顾基本练习和解题与分析技巧,章末还配有大量内容丰富多彩的习题。本书可作为通信和电子工程、自动化、计算机类以及全部电类各专业“信号与系统”课程的教材,并可作为所有工程专业研究生有关课程的参考书,也可以供从事信息获取、转换、传输和处理、信息系统等领域工作的其他专业本科生、研究生、教师和科技工作者参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

信号与系统:理论·方法和应用/徐守时 编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,1999.9

ISBN 7-312-00915-8

I.信… II.徐… III.信号系统-高等学校-教材 IV.TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 29851 号

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 38 字数: 1022 千

1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月第 1 次印刷

印数: 4000 册

ISBN 7-312-00915-8 / TN·24 定价: 42.00 元

# 序

徐守时教授在中国科学技术大学电子工程与信息科学系长期讲授“信号与系统”课程，积多年之教学经验，经反复修改写成本书。

这是一本很有特色的本科生教材，非常值得教师和学生认真研究与参考。与国内外同类著作相比较，本书在以下几方面显示突出特点：

(1) 在全书的每一章及至每一节完全并行展开连续时间和离散时间信号与系统的讨论，注重按照二者的对偶特性把事物的内在规律展示给读者。

(2) 将傅里叶变换、拉普拉斯变换和Z变换也完全并行讲授。不是按三种变换划分章目，而是在同一章内讲述三种变换的定义和收敛性，在另外两章内分别讲述它们的性质和利用三种变换方法进行系统分析。

(3) 集中在一章内讲授信号与系统数学方法在通信和信号处理领域中的主要应用。

在本课程中，连续时间和离散时间信号与系统讲授顺序的争执已持续多年。实践表明，很难说某种顺序显示突出的先进性而代表改革方向，从国内外大量教材和各校教学计划来看，多种形式并存的局面将长期持续。而徐守时教授的讲述方式具有新意，特色鲜明。

上述第(2)条特点在同类教材中尚属罕见，具有创新精神。最后一条特点也不失一处值得推敲的尝试。

本书的出版对于繁荣我国信息科学领域的教学改革与学术交流以及推动学术争鸣将会作出有益的贡献。

多年来，作为同行和校友，我与徐守时教授坦诚交换意见，探讨“信号与系统”课程和教材的改革方向，在争议之中共同受益，愿我们的友谊长存。

预祝本书出版成功。

郑君里

1999.4.28 于清华园

---

郑君里先生现任清华大学电子工程系教授、博士生导师、全国政协委员、中国电子学会电路与系统学会委员、中国神经网络委员会委员、教育部电工课程教学指导委员会副主任、全国高校通信与信息专业教学指导委员会副主任、全国高校电脚信号系统教学研究会理事长、中国通信学会会士、《电子学报》常务编委等职。——编者

# 前 言

信号与系统问题的研究可以追溯到 17 世纪牛顿时代，但发展成为专门的信号与系统学科，形成一整套理论和方法，并作为高等学校电类各专业的一门基本课程，仅有三四十年历史。开始时叫做“电路、信号与系统”，它以电路和网络问题为形容对象，以输入输出描述为基础，介绍模拟信号与系统(连续时间信号与系统)的概念、理论和方法；后来逐步加入离散时间信号与系统的内容，此后又产加了从系统的状态的变量描述出发的有关信号与系统内容，相应的著作和教材在内容的安排上，基本上是先连续时间，后离散时间。此类教材相当广泛。1983 年，美国麻省理工学院(MIT)A. V. Oppenheim 教授等编著的《Signals and Systems》一书，在内容安排上作了新的尝试，基本上并行地展开连续时间和离散时间两大部分内容，以另一种方式揭示了两者之间的一系列对偶或类比关系。十多年来，上述两种教材成为我国大部分高校“信号与系统”课程采用的主流教材，这两种内容安排各有千秋，可以使使学生从不同的角度来认识和掌握信号与系统的概念、理论和方法。

本书积作者多年之心血，特别是连续为中国科学技术大学电子工程与信息科学系学生讲授“信号与系统”课程已达 15 年之久，并在此基础上逐渐形成了本书的内容体系。在此过程中，作者借鉴了上面提到的两类教材的优点，但在内容安排上作了一些新的尝试，这些安排及其主要考虑是：

(1) 在信号与系统领域中，连续时间信号与系统和离散时间信号与系统的内容之间，从它们的数学描述到它们各自的一整套概念、理论和方法，都存在着近于完美的对偶关系或很好的类比性。充分利用这种对偶关系或类比性，完全并行地展开连续时间和离散时间信号与系统这两大部分内容，把它们相互对偶或类比的东西更紧密地展示给读者，不仅便于更好地联系和对比，也将更符合信号与系统内容体系本身的内在规律。因此在本书的内容安排上，不再是先连续时间后离散时间，也不再把连续和离散时间傅里叶变换、拉普拉斯变换和 Z 变换分章讨论，而是先时域后变换域，对偶和类比地介绍和讨论连续时间和离散时间信号与系统的一整套概念、理论和方法，并在本书的每一章中完全并行地展开。

(2) 顾名思义，“信号与系统”有两个研究对象：一个是信号，另一个是系统。实际上，信号和系统两者之间有着密不可分的关系，这就导致在“系统分析与综合”和“信号分析与处理”的概念、理论和方法之间，也是紧密相关的。其实它们就是“信号与系统”一整套完整的概念、理论和方法的两个方面，在研究系统的分析或综合时，将从另一个侧面获得有关信号分析与处理的概念、理论和方法，反过来也是这样。因此，有关基本的信号分析与处理的概念、理论和方法，在“信号与系统”课程的内容中就应该建立起来了。正因为这样，本书将把“信号分析与处理”的概念、理论和方法，提到和“系统分析与综合”同样的高度和地位加以介绍和讨论。

(3) 在信号与系统的基本内容中，主要涉及两类系统，一类是所谓线性时不变系统，另一类是用线性常系数微分方程或差分方程描述的系统。前者是具有良好性能的一类比较理想的



系统, 后者更接近于实际的系统, 因为任何实际系统所建立的数学描述, 基本上都是微分方程(组)或差分方程(组)。在相当宽松的条件下, 用线性常系数微分或差分方程描述的系统可以归结为线性时不变系统, 因此本书用更多的篇幅讨论线性时不变系统。但是, 这两类系统仍有不同的分析方法, 例如在时域中, 前者的分析方法是卷积方法, 后者是方程解法; 在变换域中, 前者是傅里叶方法、双边拉氏变换或  $Z$  变换方法, 后者是单边拉氏变换或单边  $Z$  变换方法。因此, 本书在第三、四章分别讨论这两类系统及其不同的时域分析方法, 同时阐明这两类系统之间的联系, 并在第七章和第九章中, 也分别介绍这两类系统的变换域分析方法和状态变量分析方法。

(4) 在信号与系统中涉及的变换, 包括连续和离散时间傅里叶变换、拉普拉斯变换和  $Z$  变换, 其中拉氏变换和  $Z$  变换又有双边与单之分。但它们都是信号的变换域表示法, 其作用是建立信号与系统的变换域解析体系。按照信号空间的概念, 连续和离散时间傅里叶变换与双边拉氏变换或双边  $Z$  变换之后的差别仅是各自的基信号集不同, 前者是  $\{e^{j\omega t}, \omega \in R\}$  和  $\{e^{j\Omega n}, \Omega \in R\}$ , 后者是  $\{e^{st}, s \in C\}$  和  $\{z^n, z \in C\}$ , 且  $\{e^{j\omega t}, \omega \in R\}$  和  $\{e^{j\Omega n}, \Omega \in R\}$  分别是  $\{e^{st}, s \in C\}$  和  $\{z^n, z \in C\}$  的子集。因此, 双边拉氏变换和双边  $Z$  变换分别是连续和离散时间傅里叶变换的推广或一般化, 或者说, 连续和离散时间傅里叶变换分别是双边拉氏变换和双边  $Z$  变换的特例, 可以在统一的数学框架下先后对偶地讨论, 这就是本书第五章要介绍的内容。此外, 本书在第六章以专门的一章讨论上述四种变换的性质, 不仅介绍这些性质的数学表示及统一和对偶的关系, 更注重这些性质揭示的物理含义, 因为, 每一个性质都在系统分析与综合和信号分析与处理中有着重要的应用, 它们是信号与系统概念和方法的重要组成部分。至于单边拉氏变换和单边  $Z$  变换, 它们分别是双边拉氏变换和双边  $Z$  变换的特例, 而且, 它们只能作为一类因果时间信号和序列的复频域表示, 不能作为整个时域上定义的所有信号和序列的一种变换域表示, 它们的作用仅在于分析所谓因果系统, 包括线性时不变的因果系统, 以及用线性常系数微分或差分方程描述的因果系统, 特别是后者, 单边拉氏变换或单边  $Z$  变换提供了有效的分析方法, 这就是历史上研究出微分或差分方程的算子解法的根本原因。正是这一理由, 本书主要基于双边拉氏变换和双边  $Z$  变换来讨论信号和系统的复频域方法, 而把单边拉氏变换和单边  $Z$  变换作为因果系统的分析工具, 在第七章的 7.2 节中介绍。

(5) 信号与系统这一学科的内容极为丰富, 并且还在不断发展, 但按照目前国内高校工科电气与信息类“信号与系统”课程的教学大纲, 或者以信号与系统的基本概念、理论和方法而言, 本书的前七章加上最后一章“系统的状态变量分析”就完全覆盖了。编写第八章“信号与系统理论和方法的主要应用”, 有两个主要目的: 一方面是为了让学生了解信号与系统理论和方法的主要应用方法, 以便丰富和加深对信号与系统的基本概念、理论和方法的理解和认识; 另一方面, 通过由这些应用所产生的一系列极为有用的技术的入门性介绍, 使学生获得寓意于其中的思想和方法论方面的认识, 对学生而言, 这可能比具体的技术更重要。

(6) 要全面深入地掌握信号与系统的概念、理论和方法, 离开一定数量有关习题的练习是不可能完全做到的。因此除第一章外, 在每一章末都收集和设计了总数近 300 道各类习题。其中许多习题是对各章所涉及的基本概念和方法的训练; 也有不少习题本身就是从某些实用技术中抽象出来的, 要求学生应用信号与系统的有关概念和方法去解决实际问题; 另有一些则要求学生通过深入的思考来扩展本书的有关概念和方法; 还有一些是精心设计的综合性习

题,此外,不少习题并非只有一种解法,这些都要求学生综合运用信号与系统的有关概念和方法。

在上述的几点考虑下,本书的内容是这样安排的。在简短的第一章“绪论”之后,第二章到第四章介绍和讨论信号与系统在时域中的概念、理论和方法。第二章主要介绍信号和系统的数学描述,与此有关的概念、一些基本信号和基本系统、信号和系统的主要性质等,建立了信号与系统的时域分析体系;第三章首先以时移单位冲激为基本信号,介绍连续时间和离散时间信号的表示法,然后,在此基础上介绍和讨论信号的卷积运算以及线性时不变系统的时域分析方法,并简要地推广到线性时变系统,特别强调卷积运算的性质和单位冲激响应在信号与系统时域方法中的重要作用,最后,通过历史上出现过的杜哈米尔积分的介绍,和有关奇异函数及其离散时间对偶的讨论,把线性时不变系统的卷积方法提升到一般化的程度;第四章主要讨论用线性系数微分或差分方程描述的系统,首先讨论这类系统数学描述的特点,并简洁地介绍它们的时域解法——经典的微分或差分方程的解法,包括差分方程的递推算法,然后,通过对这类系统性质的讨论,得出这类实际的因果系统是一类所谓增量线性时不变系统,并在非常宽松的条件(所谓“起始松弛”条件)下,可以归结为线性时不变系统,在此基础上,介绍这类实际的因果系统的零状态响应和零输入响应分析方法,并介绍用微分或差分方程表示的因果线性时不变系统单位冲激响应的确定方法,最后介绍系统模拟和仿真的概念,并讨论这类因果线性时不变系统的一种综合方法——用三种基本系统单元的直接型实现结构。

第五章到第七章则在变换域介绍和讨论信号与系统的另一套概念、理论和方法。在第五章中,首先讨论线性时不变系统对复指数信号(包括虚指数信号)的响应,然后在此基础上,以统一的数学框架,先后分别以虚指数信号和一般复指数信号为基本信号,介绍连续和离散时间傅里叶级数、傅里叶变换,以及双边拉氏变换和 $Z$ 变换的信号表示法,并把周期信号的傅里叶级数表示法统一到傅里叶变换表示法中,还介绍和讨论了信号和系统的频域和复频域表示的有关概念,建立起信号与系统变换域方法的解析体系;第六章信中介绍和讨论连续和离散时间四种变换的性质,先介绍和讨论四种变换共有和对偶的大部分性质,然后介绍和讨论傅里叶变换和双边拉氏变换或 $Z$ 变换各自特有的性质,在介绍和讨论这些性质时,特别强调它们所揭示的有关信号和系统的时域、频域和复频域表示之间的关系;第七章介绍和讨论连续和离散时间系统的变换域方法及有关概念,首先介绍线性时不变系统的变换域分析方法,再介绍用微分或差分方程描述的一类因果系统的复频域分析方法,即用单边拉氏变换或 $Z$ 变换的零状态响应和零输入响应复频域解法,然后着重讨论系统的频响应和系统函数的有关概念及其在系统的变换域分析中的作用。在此基础上,进一步介绍在系统分析与综合中有重要意义的一阶和二阶系统、全通系统和最小相移系统等。最后,以系统函数或频率响应为依据,介绍因果线性时不变系统的另一类综合方法——系统的级联和并联实现结构,并引出一种很有用的系统表示法——系统的信号流图表示法。

到第七章止,基本上比较完全地介绍和讨论了输入输出描述方式下、信号与系统的概念、理论和方法。第八章主要从通信和电子工程、信号处理和自动化等领域中,选择一些有代表性的实际问题和应用,作入门性的介绍和讨论,包括信号的无失真传输和处理、均衡、信号设计和信号加窗、滤波和滤波器、调制和解调、频分复用、时分复用和正交及码分复用、连续时间和离散时间信号之间的转换、连续时间信号的离散时间处理、多抽样率信号处理和信

号的分析/合成、连续时间和离散时间系统之间的变换(S平面和Z平面间的变换)等。其中,有些是信号与系统概念、理论和方法的一些新近的应用和发展。

最后一章简要介绍系统的状态变量分析方法,包括因果线性时不变系统和起始不松弛的因果线性系统。首先,把前面在单输入单输出系统下形成的信号与系统的概念和方法,推广到多输入多输出系统,随后在介绍与系统状态变量描述有关概念的基础上,较全面地介绍和讨论几种规范的建模方法,然后简单地介绍用状态变量描述之系统的时域和复频域求解方法,并讨论了状态空间中状态矢量的线性变换,最后讨论状态变量描述下系统的两个特有的性质——可观察性和可控制性。在介绍和讨论这一章的内容时,强调利用在输入输出描述下已建立起来的概念和方法,并着重于两种描述方式下信号与系统概念和方法之间的联系。

由于计算机技术和数字信号处理技术的飞速发展,离散时间信号与系统变得越来越重要,在实际的技术实现中,甚至有取代原来连续时间信号与系统所占的统治地位之势。面对21世纪技术发展的挑战,学生需要对信号与系统的一整套概念、理论和方法有完整和深入的了解,因此,以连续时间和离散时间信号与系统并重和并行地展开为特色的上述内容,形成80~100学时的课程是必要的。同时,上述内容安排(包括章末的习题)也给教师在组织课堂教学内容的取材上,有相当的灵活性和尽可能大的可用性,可以用不同的组合方式形成几种不同的教学内容。例如:仅包括前七章的内容;前八章的内容;或者前七章加上最后一章等。此外,在一些章节中,带“\*”的内容也可以按不同需要而取舍。

作者在中国科学技术大学电子工程与信息科学系长期讲授“信号与系统”课程,本书是在从事该课程20年教学实践的基础上写成的。中国科学技术大学有重视教学的优良传统,非常重视优秀教材的建设,以及学生勤奋好学的精神等,都给写成本书有很大鼓励和支持。学校内开放、严谨、活跃的学术气氛也对本书的形成有很大的影响。

我有幸在清华大学电子工程系度过本科和研究生共9年的学习生活,1978年开始的第二次研究生生活中,又有一半是在清华度过的。长期沐浴在清华园的阳光和蓝天下,深受清华教学风格的熏陶,特别是得到常迥教授、马世雄教授、吴佑寿教授、陆大钧教授、冯子良教授、冯重熙教授、冯一云教授等先生的真传。故本书要献给我清华的领导、老师和同学,感谢他们的培养、关心和爱护。在本人讲授“信号与系统”课程期间,一直以美国M. I. T.的A. V. Oppenheim教授的《Signals and Systems》一书作为主要参考书,1980年夏,在清华还亲自听过他讲授的“数学信号处理”课,深受启迪。在我讲授“信号与系统”课程的过程中,多次得到我的老师——清华大学电子工程系郑君里教授的指导和建议,这些都对讲稿的演变和本书的形成产生了重大的影响。需要特别说明的是:郑君里教授对本书的出版给予了极大的关心,在百忙中审阅了本书的全部内容,并欣然为本书作序。此外,我的许多同事和学生为本书的众多插图、公式和文字输入等,做了大量的工作,在此一并向他们表示衷心的感谢。

作者

1999年5月18日



# 目 次

序 .....	( I )
前言 .....	( Ⅲ )
<b>第一章 绪论</b> .....	( 1 )
1.1 信息、信号和系统 .....	( 1 )
1.2 系统分析与综合和信号分析与处理 .....	( 3 )
1.3 信号与系统的内容体系 .....	( 4 )
<b>第二章 信号和系统的数学描述及其性质</b> .....	( 6 )
2.1 信号的数学描述和分类 .....	( 6 )
2.1.1 信号的数学描述 .....	( 6 )
2.1.2 信号的分类 .....	( 7 )
2.2 信号的运算和变换 .....	( 10 )
2.2.1 信号的基本运算 .....	( 10 )
2.2.2 自变量变换导致的信号变换 .....	( 12 )
2.3 基本的连续时间和离散时间信号 .....	( 16 )
2.3.1 单位阶跃与单位冲激信号 .....	( 17 )
2.3.2 复指数信号与正弦信号 .....	( 21 )
2.4 信号的时域特性 .....	( 26 )
2.4.1 信号的周期性、周期信号与非周期信号 .....	( 26 )
2.4.2 信号的时域对称性质 .....	( 27 )
2.4.3 信号的大小、能量和功率 .....	( 29 )
2.5 信号的内积和相关函数 .....	( 31 )
2.5.1 用一个信号来近似另一个信号 .....	( 31 )
2.5.2 信号的内积 .....	( 33 )
2.5.3 相关函数和相关序列 .....	( 34 )
* 2.6 信号空间 .....	( 39 )
2.6.1 信号与矢量的类比 .....	( 39 )
2.6.2 信号空间 .....	( 41 )
2.7 系统的数学描述和分类 .....	( 46 )
2.7.1 系统的数学模型和描述方法 .....	( 46 )
2.7.2 系统的分类 .....	( 50 )
2.8 系统的相互联接、系统的等价或等效 .....	( 51 )
2.8.1 系统的基本连接方式 .....	( 52 )
2.8.2 系统的等价和等效 .....	( 54 )
2.9 连续时间和离散时间基本系统 .....	( 54 )
2.10 系统的性质 .....	( 57 )
2.10.1 无记忆性和记忆性 .....	( 57 )
2.10.2 因果性、非因果和反因果 .....	( 58 )
2.10.3 稳定性 .....	( 59 )
2.10.4 可逆性与逆系统 .....	( 60 )

2.10.5	时不变性	(61)
2.10.6	线性性质和增量线性系统	(62)
2.11	线性时不变系统和用微分或差分方程描述的系统	(63)
	习题	(64)
<b>第三章</b>	<b>信号的卷积和 LTI 系统的时域分析</b>	<b>(75)</b>
3.1	引言	(75)
3.2	分析线性时不变系统的基本思想和方法	(75)
3.3	用单位冲激表示信号的表示法	(76)
3.4	连续时间和离散时间 LTI 系统的卷积关系	(78)
3.4.1	卷积和与卷积积分	(78)
3.4.2	卷积的求解和计算	(80)
3.5	卷积的性质及其在 LTI 系统分析中的作用	(87)
3.5.1	卷积的代数运算规则	(87)
3.5.2	涉及单位冲激的卷积及卷积的时移性质	(90)
3.5.3	卷积的微分或差分与积分或叠加	(91)
3.5.4	卷积与相关函数的关系	(93)
3.6	卷积的收敛和周期卷积	(94)
3.6.1	卷积积分及卷积和的收敛	(94)
3.6.2	周期卷积	(96)
3.7	线性时变系统和时变卷积	(98)
3.8	单位冲激响应及其表征的 LTI 系统的性质	(99)
3.8.1	LTI 系统的单位冲激响应	(99)
3.8.2	单位冲激响应表征的 LTI 系统性质	(100)
* 3.9	杜哈米尔积分和 LTI 系统的单位阶跃响应	(104)
3.9.1	杜哈米尔积分及其离散时间对偶	(104)
3.9.2	LTI 系统的单位阶跃响应	(105)
* 3.10	奇异函数及其在信号与系统理论和方法中的作用	(106)
3.10.1	奇异函数	(106)
3.10.2	LTI 系统卷积关系的一般化	(110)
	习题	(112)
<b>第四章</b>	<b>用微分方程和差分方程描述的系统</b>	<b>(123)</b>
4.1	引言	(123)
4.2	递归系统和非递归系统的级联	(123)
4.3	经典的时域分析方法:微分方程和差分方程解法	(125)
4.3.1	线性常系数微分方程所描述系统的方程求解	(125)
4.3.2	线性常系数差分方程所描述系统的方程解法	(128)
4.3.3	线性常系数差分方程的递推算法	(132)
* 4.4	用微分方程和差分方程所描述系统的性质	(134)
4.4.1	记忆性和无记忆性	(135)
4.4.2	线性性质和增量线性系统结构	(135)
4.3.3	时不变性和因果性	(136)

4.5	用微分或差分方程描述的因果系统:零状态响应和零输入响应	(139)
4.5.1	实际因果系统的数学描述	(139)
4.5.2	起始条件转换到初始条件	(140)
4.5.3	零输入响应和零状态响应	(141)
4.6	微分和差分方程表征的因果 LTI 系统的单位冲激响应	(142)
4.6.1	两个 LTI 系统级联的方法	(143)
4.6.2	方程两边函数项匹配的方法	(145)
4.6.3	FIR 系统和 IIR 系统	(148)
* 4.6.4	微分和差分方程表征的因果 LTI 系统的稳定性和可逆性	(148)
4.7	微分和差分方程表征的因果 LTI 系统的直接实现结构	(150)
4.7.1	系统的模拟和仿真	(150)
4.7.2	差分方程表征的因果 LTI 系统的直接实现结构	(151)
4.7.3	微分方程表征的因果 LTI 系统的直接实现结构	(153)
	习题	(155)
<b>第五章</b>	<b>信号和系统的变换域表示法</b>	<b>(159)</b>
5.1	引言	(159)
5.2	LTI 系统对复指数信号的响应	(160)
5.2.1	LTI 系统对复指数输入的响应	(161)
5.2.2	频域和复频域	(163)
5.3	周期信号的频域表示法:连续和离散傅里叶级数	(165)
5.3.1	连续和离散傅里叶级数	(165)
5.3.2	连续和离散傅里叶级数的收敛	(170)
5.3.3	周期信号和序列的频谱	(172)
5.3.4	LTI 系统对周期输入的响应	(177)
5.4	非周期函数和序列的频域表示法:连续和离散时间傅里叶变换	(178)
5.4.1	连续和离散时间傅里叶变换	(178)
5.4.2	傅里叶变换的收敛	(181)
5.4.3	连续和离散时间傅里叶变换的典型例子	(183)
5.4.4	非周期信号的频谱和 LTI 系统的频率响应	(187)
5.4.5	傅里叶变换的极坐标表示与波特图	(189)
5.5	周期信号和序列的傅里叶变换表示法	(192)
5.5.1	周期信号和序列的傅里叶变换	(193)
5.5.2	离散傅里叶变换(DFT)	(198)
5.6	奇异函数及其离散时间对偶的傅里叶变换	(199)
5.7	时间函数和序列的复频域表示法:拉普拉斯变换和 Z 变换	(205)
5.7.1	拉氏变换和 Z 变换	(205)
5.7.2	拉氏变换和 Z 变换的零、极点分布	(209)
5.7.3	拉氏变换和 Z 变换收敛域的性质	(214)
5.7.4	反拉氏变换和反 Z 变换	(220)
5.8	信号的复频谱和 LTI 系统的系统函数	(226)
	习题	(229)

<b>第六章 变换的性质及其揭示的时域、频域、复频域之间的关系</b> .....	(241)
6.1 引言 .....	(241)
6.2 线性性质 .....	(242)
6.3 时移和频移性质 .....	(245)
6.3.1 时移性质 .....	(245)
6.3.2 频移性质 .....	(247)
6.4 变换的对称性质 .....	(250)
6.4.1 对称性质 .....	(251)
6.4.2 时域的对称特性与频域和复频域对称特性之间的关系 .....	(254)
6.5 卷积性质 .....	(259)
6.5.1 时域卷积性质 .....	(259)
6.5.2 频域卷积性质 .....	(260)
* 6.5.3 复频域卷积性质(复卷积定理) .....	(262)
6.6 时域微分或差分 and 积分或累加, 变换域微分和积分 .....	(263)
6.6.1 时域微分或差分与积分或累加性质 .....	(263)
6.6.2 频域及复频域的微分和积分性质 .....	(268)
6.7 抽样定理 .....	(271)
6.7.1 时域抽样定理 .....	(271)
6.7.2 频域抽样定理 .....	(277)
6.8 尺度变换性质 .....	(282)
6.8.1 连续时间尺度比例变换 .....	(282)
6.8.2 离散时间的尺度变换特性: 抽取和内插 .....	(285)
6.9 相关定理和帕什瓦尔的定理、能量谱与功率谱 .....	(290)
* 6.10 希尔伯特变换 .....	(294)
6.10.1 因果时间函数或序列傅里叶变换的实部或虚部自满性 .....	(294)
6.10.2 解析信号的希尔伯特变换表示法 .....	(297)
6.10.3 希尔伯特变换及其性质 .....	(301)
6.11 傅里叶变换和傅里叶级数的对偶性 .....	(303)
6.11.1 连续傅里叶变换的对偶性 .....	(304)
6.11.2 离散傅里叶级数(DFS)的对偶性 .....	(309)
6.11.3 离散时间傅里叶变换与连续傅里叶级数之间的对偶性 .....	(311)
6.12 拉氏变换与 Z 变换的初值和终值定理 .....	(316)
6.12.1 初值定理 .....	(316)
6.12.2 终值定理 .....	(316)
6.13 拉氏变换与 Z 变换之间的类比关系 .....	(317)
习题 .....	(320)
<b>第七章 系统的变换域分析</b> .....	(332)
7.1 LTI 系统的变换域分析方法 .....	(332)
7.1.1 LTI 系统的变换域求解 .....	(332)
7.1.2 用微分方程和差分方程描述的 LTI 系统的变换域分析 .....	(338)
7.1.3 部分分式展开求反变换的方法 .....	(341)

7.2	用微分方程和差分方程描述的因果系统的复频域分析	(347)
7.2.1	单边拉氏变换和单边 Z 变换	(348)
7.2.2	零状态响应和零输入响应的复频域求解	(354)
7.3	由系统函数和频率响应表征的 LTI 系统性质	(358)
7.3.1	频率响应和系统函数表征的 LTI 系统之性质	(358)
7.3.2	LTI 系统互联的频率响应和系统函数	(363)
7.4	系统函数收敛域和零极点分布反映的时域特性	(366)
7.4.1	收敛域和零、极点分布反映的时域分布特性	(366)
7.4.2	收敛域和极点决定单位冲激响应组成分量的函数形式	(367)
7.4.3	自由响应与强迫响应, 暂态响应与稳态响应	(369)
7.5	系统零、极点分布确定 LTI 系统频率响应	(371)
7.5.1	频率响应的几何求值	(371)
7.5.2	全极点系统和全零点系统	(374)
7.6	一阶系统和二阶系统	(375)
7.6.1	一阶系统	(375)
7.6.2	二阶系统	(381)
7.7	全通系统和最小相移系统	(392)
7.7.1	全通函数和全通系统	(392)
7.7.2	最小相移函数和最小相移系统	(395)
7.8	系统的实现结构和方框图表示	(399)
7.8.1	直接型实现结构	(399)
7.8.2	级联型实现结构	(401)
7.8.3	并联型实现结构	(404)
* 7.9	系统的信号流图表示法	(407)
	习题	(413)
<b>第八章</b>	<b>信号系统理论和方法的主要应用</b>	<b>(425)</b>
8.1	引言	(425)
8.2	信号无失真传输或处理、均衡	(425)
8.2.1	信号无失真传输和处理的条件	(425)
8.2.2	频域均衡和时域均衡	(428)
8.3	滤波和滤波器	(433)
8.3.1	滤波	(433)
8.3.2	理想选择性滤波器	(434)
8.3.3	用微分方程和差分方程描述的非理想频率选择性滤波器	(439)
8.3.4	低通、高通和带通等不同类型的变换	(447)
8.4	信号设计和信号加窗	(450)
8.4.1	信号设计	(450)
8.4.2	信号加窗和窗函数	(455)
8.5	调制与解调	(457)
8.5.1	正弦幅度调制和解调	(458)
8.5.2	正弦幅度调制的某些应用	(466)



8.5.3	脉冲幅度调制	(471)
8.6	多路复用	(473)
8.6.1	频分复用和时分复用	(473)
* 8.6.2	正交复用和码分复用	(477)
8.7	连续时间与离散时间信号之间的转换	(480)
8.7.1	连续时间与离散时间信号的相互转换	(480)
8.7.2	离散时间信号到数字信号的转换和量化	(483)
8.7.3	零阶保持抽样和重建、抗混叠滤波器	(484)
8.8	连续时间信号的离散时间处理	(487)
* 8.9	抽样率的转换、离散时间多抽样率处理	(492)
8.9.1	抽样率转换	(492)
8.9.2	整数倍增抽样和减抽样	(493)
8.9.3	有理比 $L/M$ 的抽样率转换	(499)
8.9.4	多抽样率数字信号处理和多抽样率系统	(501)
8.10	连续和离散时间系统之间的变换	(508)
8.10.1	冲激响应不变法	(508)
8.10.2	微分方程的后向差分近似	(511)
8.10.3	双线性变换	(512)
	习题	(514)
<b>第九章</b>	<b>系统的状态变量分析</b>	<b>(531)</b>
9.1	引言	(531)
9.2	系统状态变量描述的概念和术语	(533)
9.3	系统状态变量描述的数学模型	(536)
9.3.1	离散时间系统的状态变量描述	(536)
9.3.2	连续时间系统的状态变量描述	(538)
9.4	建立系统状态变量数学描述的方法	(540)
9.5	系统状态变量描述的编写	(542)
9.5.1	直接规划法	(543)
9.5.2	级联和并联规划法	(553)
9.5.3	多输入多输出系统的状态空间模型的编写	(561)
9.5.4	系统状态变量描述到输入输出描述的转换	(565)
9.6	用状态变量描述的系统的求解方法	(569)
9.6.1	矢量微分方程和差分方程的时域解法	(569)
9.6.2	矢量微分方程和差分方程的变换域解法	(575)
9.7	状态矢量的线性变换	(578)
* 9.8	系统的可控制性和可观察性	(583)
9.8.1	系统的可控制性	(584)
9.8.2	系统的可观察性	(587)
9.8.3	$A$ 矩阵对角化状态变量描述下系统的可控性和可观性	(588)
	习题	(591)
	参考文献	(594)

# 第一章 绪 论

## 1.1 信息、信号和系统

### 1.1.1 信息、信号和系统

当今社会已进入信息时代，其主要标志之一是信息对人类，已处于举足轻重的地位。人们每时每刻可以从各种媒体获得许多信息，这些信息以日益深入的程度影响着人们的日常生活和各种活动，人们经常谈论信息、信息处理、信息系统和信息网等问题。那么，信息究竟是什么？控制论的创始人维纳认为，信息是人和物体与外部世界交换内容的名称，“内容”是事物的原形，“交换”即信息载体将事物原形映射到人或其它物体的感觉器官，人们把这种映射的结果认为获得了“信息”。通俗地说，“信息”指人们得到的“消息”，即原来不知道的知识。实际上，不仅人类能接受信息，其它生物也能接受信息，非生物也都受到信息的作用，只是在不同领域中，通常不称其为信息，而称为刺激、激励或影响因素等。

信息是多种多样、丰富多采的，它们的具体物理形态也千差万别。例如：语声信息(话音或音乐)是以声压变化表示的；视觉信息是以亮度或色彩变化表示的；文字和数据信息是字符串表示的；影响物体运动的信息由作用于物体上的外力表示；影响经济运行的信息表现为投资及各个产业的统计数据等。通常人们把信息的具体物理表现形式称为信号，或者说，信息是信号包含的具体内容。表现各种不同信息的信号都有一个共同点，即信号总是一个或多个独立变量的函数，它一般都包含了某个或某些现象性质的信息。信号不同的物理形态并不影响它们所包含的信息内容，且不同物理形态的信号之间可以相互转换。例如，以声压变化表示的语声信号可以转换成以电压或电流变化表示的语声信号，甚至可以转换为一组数据表示的语声信号，即所谓数字语声。它们仅在物理形态上不一样，但都包含了同样的语声信息。

系统这一术语在众多的工程领域、甚至社会经济和文化领域广泛地使用着，例如各种通信系统、导航、定位和跟踪(雷达)系统、各种自动化系统、各种计算机系统、因特网(Internet)、各种信息管理系统、电力系统和电力网、交通运输系统、控制系统、机械系统、航空和宇航系统、遥测和遥感系统、软件系统、生态系统、神经系统、视觉和听觉系统、消化系统、血液循环系统、气象或天气系统、水文系统、经济预测(系统)、决策系统、出版系统等。所谓系统，就是由若干个相互关联又相互作用的事物组合而成的、具有某种或某些特定功能的整体。例如：电路就是由电阻、电感、电容、开关和连接导线(有时还包括电源)组成的一种系统，它在外加电压或电流的激励下，电路内部的各个支路电流和所有元件两端的电压都将发生变化，这些电压或电流的变化称为电路的响应，在某种激励下电路有什么样的响应，就是该电路系统的特定功能；电力网是十分复杂的电路系统，它由多个发电机、各种变压器、不同等级的输电线路和众多的用电负载组成，其特定功能是进行能量的输送和分配；

由一个发射机、传输媒质(信道)和一个接收机可以组成一个最简单的通信系统,复杂的通信系统(如通信网)则由多个收发终端、复用设备、交换机、多种传输媒质(信道)以及负责通信网运行管理的计算机(硬件和软件)等组成,它的特定功能是在任何两个终端之间进行通信,即相互传递包含信息的信号;实际上,组成通信系统或通信网的各个不同部分本身就是一个系统,它们也都由元件、器件和部件组成,并有各自特定的功能;相互关联和相互作用的若干物体可以构成一个动力学系统(机械系统),作用于系统中各个物体上的外力(激励)将使其中的物体发生运动,物体运动的速度或加速度就是系统的响应;自动诊断心电图的计算机程序也可看作一个系统,给其输入一组心电图数据,它就能给出诸如心跳率等参数估值;某一地区的各个产业部门及其市场、金融机构和相应的管理部门等构成了该地区的经济系统,诸如市场需求、投资、各种经济政策、各个产业的产出等各种因素,将影响经济系统的运行;另外,研究经济系统的运行规律,就可以在有些诸如作物欠收、新兴产业、金融风暴等潜在的、不能事先预见的情况出现时,更好地预测它们对本地区经济造成的影响,这就是经济预测系统;天气预报是与经济预测系统类似的系统,还可以举出更多的系统例子。系统可以小到一个电阻或一个细胞,甚至基本粒子,也可大或复杂到诸如人体、全球通信网,乃至整个宇宙,它们可以是自然的系统,也可以是人为的系统。但是,众多领域各不相同的系统也都有一个共同点,即所有的系统总是对施加于它的信号(激励、影响因素等)作出响应,产生出另外的信号。施加于它的信号称为系统的输入信号或激励,由此产生的另外的信号称为系统的输出信号或响应,系统的功能就体现为什么样的输入信号产生怎样的输出信号。

### 1.1.2 信号与系统问题

上面各个不同领域、不同研究场合的有关信号、信息和系统的例子,还说明了这样一个事实,即信号(或信息)和系统两者之间是紧密地联系在一起。一方面,任何系统都接受输入信号,产生另外的输出信号,系统的特定功能就是用其输入/输出信号的变换关系来描述的。

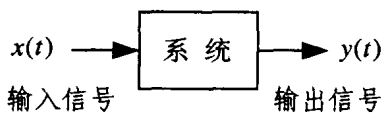


图 1.1 系统的输入输出模型

另一方面,任何信号的改变,无论是物理形态的改变,还是包含信息内容的变化,都是通过某种系统实现的。例如各种各样的信号(或信息)获取、转换、压缩、编码、传输、交换、分析、计算、处理、特征提取、识别、融合、测量、预测、监视、控制、记录、存储、显示和检索等,都是由相应系统实现的。因此所有的信号与系统问题可表示为图 1.1 的框图,信号和系统的上述关系就形成了所谓“信号与系统”问题,它极为广泛地存在于各种工程和科学领域中。这类问题的广泛性,必然形成专门研究信号与系统问题普遍共有的概念、理论和方法的学科,即信号与系统学科。当然,不同工程和科学领域中的信号与系统问题有一定的特殊性,有各种专门的研究和分析方法,例如,“电路分析”课程介绍和讨论电路系统的概念、理论和方法;“动力学原理”和“机械学原理”等课程介绍和讨论力学和机械系统的理论和方法。从历史上看,最先形成现代信号与系统的概念和方法,并使其获得应用的是通信、信号处理等电子工程、控制和自动化等领域,这些领域至今仍是信号与系统概念、理论和方法施展其影响和作用的舞台。随着科学技术的不断发展和相互渗透,特别是电子技术和计算机技术在各个领域中的广泛应用,信号与系统的概念、理论和方法已成为许多工程和科学领域中最基本的概念

和方法之一，并几乎在各个科学和技术领域中起着越来越重要的作用。本书不刻意针对具体那个领域中的信号与系统问题，而是就所有信号与系统问题共有的概念、理论和方法进行研究和介绍，尽管书中的应用实例大部分来自于通信、信号处理和电路问题，但这并不影响它们的普遍性。因此本书介绍的信号与系统的基本概念、理论和方法，对各种不同的信号与系统问题都有普遍的指导意义，换言之，它们是普遍适用的。

## 1.2 系统分析与综合和信号分析与处理

就工程学科而言，信号与系统学科主要研究和解决两方面的问题，或者说有两个基本目的，即“系统分析与综合”和“信号分析与处理”。因此，本书介绍和讨论信号与系统的基本概念、理论和方法，既包括系统分析与综合的一整套概念、理论和方法，又包括信号分析与处理的一整套概念、理论和方法。

### 1.2.1 系统分析与综合

系统的分析与综合又包括两个方面，即系统分析和系统综合。

所谓系统分析，就是在给定系统的情况下，研究系统对输入信号所产生的响应，并由此获得对系统功能和特性的认识。一般说来，系统分析包括以下三个步骤：首先必须针对研究的系统建立合适的、便于分析的数学描述，例如系统满足的方程或系统的输入输出信号变换关系，即所谓系统的建模问题。然后，利用数学工具求解系统，即对给定的激励或输入信号，确定其响应或输出信号。到此为止，系统分析并未结束，最后还需对求解的结果作出合理的解释，并根据它对不同的输入产生的不同响应，提高或深化为对系统功能和特性，甚至全部行为的认识。系统综合又可叫做系统的设计或实现，它指在给定了系统功能或特性的情况下，或者已知系统在什么样的输入时应有什么样的输出，设计和实现这样的系统。

通常，系统分析是针对已有的系统，系统综合往往意味着做出新系统，这是工程问题中更富于创造性的环节。显然，前者属于认识世界的问题，后者则是改造世界的问题，且是人们追求的最终目的。一般说来，系统分析是系统综合的基础，只有精于分析，才能善于综合。尽管本书侧重于系统分析，但并非只介绍系统的一整套分析方法，也涉及到系统综合和实现的许多基本概念、思想和方法。至于不同领域系统的具体设计或实现方法，将是各个专门课程的任务。

### 1.2.2 信号分析与处理

信号分析与处理是信号与系统学科的另一主要研究领域，它也包括两个方面，即信号分析和信号处理。信号分析是把信号分解成它的各个组成分量或成分的概念、理论和方法，例如信号空间表示法或其各种线性组合表示法、信号谱分析、信号的时频分析和多尺度分析等。信号处理则指按某种需要或目的，对信号进行特定的加工、操作或修改。信号处理涉及的领域非常广泛，就其功能或目的而言，有诸如信号滤波、信号中的干扰或噪声抑制、信号平滑、信号锐化、信号增强、信号的数字化、信号的恢复和重建、信号的编码和译码、信号的调制和解调、信号加密和解密、信号均衡或校正、信号的特征提取、信号辨识或目标识别、信息融合及信号的控制等等。现在信号分析与处理已不再是电子工程、自动化和计算机技术