

SIGNALS AND SYSTEMS

(SECOND EDITION)

逐章逐节、以完全并行的方式展开连续时间和离散时间这两
大部分内容，形成全新的信号与系统内容体系和讲述方式

信号与系统

(第2版)

徐守时◎编著

Xu Shoushi

清华大学出版社



SIGNALS AND SYSTEMS

(SECOND EDITION)

信号与系统

(第2版)

徐守时◎编著

Xu Shoushi

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书采用先时域后变换域的顺序,以对偶和类比的方式逐章逐节、完全并行地介绍和讲述连续时间和离散时间信号与系统的一系列基本概念、理论和方法,以及它们在通信、信号处理和反馈与控制等领域中的主要应用,还包含数字信号处理和系统的状态变量描述的基本概念和方法,形成了一个“系统分析和综合”与“信号分析和处理”两方面知识并重、较为完整并具有鲜明特色的“信号与系统”课程内容体系。

全书共 11 章,次序先后为:“绪论”、“信号和系统的数学描述及性质”、“LTI 系统的时域分析和信号卷积”、“用微分方程和差分方程描述的系统”、“信号和系统的频域表示法:各种傅里叶变换和级数”、“傅里叶变换和傅里叶级数的性质及其揭示的时域和频域间的关系”、“信号与系统在通信系统和技术中的应用”、“信号和系统的复频域表示法:拉普拉斯变换和 Z 变换”、“系统的变换域分析和综合”、“信号与系统在信号分析和处理中的应用”和“信号与系统在反馈和控制中的应用”。各章都有足够数量的精选例题,兼顾基本练习和解题及分析技巧,章末配有相当数量丰富多彩的习题。书末附有各章除证明题外的习题答案,大部分综合性习题还给出了解题思路或基本求解过程。

本书可作为通信和电子工程、自动化、计算机等电子信息类专业本科“信号与系统”课程的教材。本书内容符合国内研究生入学考试“信号与系统”科目的考试内容范围和要求,也可作为该科目的考研参考书。本书还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研究生、教师 and 广大科技工作者参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统/徐守时编著.--2 版.--北京:清华大学出版社,2016

ISBN 978-7-302-41561-9

I. ①信… II. ①徐… III. ①信号系统 IV. ①TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 216542 号

责任编辑:文 怡 柴文强

封面设计:李召霞

责任校对:时翠兰

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:50.75

字 数:1174 千字

版 次:2008 年 10 月第 1 版 2016 年 6 月第 2 版

印 次:2016 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:99.00 元

产品编号:064882-01

信号与系统问题的研究可以追溯到公元 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,并作为高等学校电子信息类大部分专业必修的一门基本课程,还不到半个世纪。在此期间,随着技术的发展,“信号与系统”课程内容和教材经历了几次不同程度的改革。起初叫作“电路、信号与系统”,它以电路和网络问题为研究对象,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,以及其在通信和电子系统中的应用。此后,为了面向更广的工程应用领域,逐渐淡化了电路系统的背景,有些教材还加入了基于系统状态变量描述和分析的有关概念和方法。20 世纪 70 年代被称为通信和计算机“结婚”的年代,数字技术和数字信号处理快速兴起,并获得广泛应用。这一技术发展,一方面,首先促使国外著名高校纷纷开设“数字信号处理”课程,我国在改革开放以后,国外优秀的“数字信号处理”教材被引入,“数字信号处理”课程也逐渐列入我国高校电子信息类各专业的教学计划,并开设至今;另一方面,也催生和导致“信号与系统”课程内容的一次重大改革,即在原来连续时间信号与系统内容的基础上,加入离散时间信号与系统的内容,既介绍和讲述“系统分析与综合”的概念、理论和方法,又涵盖“信号分析与处理”的概念、理论和方法,逐渐形成包括连续时间和离散时间信号与系统两大部分内容、“系统分析与综合”和“信号分析与处理”并重的课程内容体系。

在“信号与系统”课程内容的安排上,早期的教材基本上是先连续时间、后离散时间的讲述顺序。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,在内容安排上进行了革新,在时域部分完全并行,而在变换域部分逐章并行地展开连续时间和离散时间两大部分内容。本人认为:不仅因为在连续时间和离散时间信号与系统的概念、理论和方法之间的一系列内在的对偶和类比关系;而且,正是人们利用了两者之间的这种内在的对偶和类比关系,借鉴了连续时间信号与系统的概念、理论和方法,使得数字系统和数字信号处理的理论和技术能在短短的几十年内飞速发展,走完连续时间信号与系统一个多世纪发展历史。因此在信号与系统教材的内容安排上,并行地展开和讲述连续时间和离散时间这两部分内容已成为一种趋势,近十年内新出版的教材或原有教材的改版都以不同程度和方式反映了这种趋势。1999 年,由中国科学技术大学出版社出版的、本人编著的《信号与系统:理论、方法和应用》一书作了新的尝试,从输入输出描述到状态变量描述、从时域到变换域,采用逐章逐节完全并行地展开连续时间和离散时间这两部分内容的讲述方式。该书出版十几年来,获得广大读者的良好反映,特别是许多考研的读者反映该书使他们耳目一新,认为这样的并行展开

和讲述方式,不仅促使读者从更高的层次上审视“信号与系统”课程的内容体系,更好地掌握其一整套概念、理论、方法和应用;而且可以激发学生思维的潜能,促进学生养成思考问题的良好习惯。当然,在课程内容安排上,多种不同方式可以百花齐放,它们也各有千秋,这不仅符合教育部有关高等学校教材出版的方针,也可以使学生从不同角度、不同层次来认识和掌握信号与系统的概念、理论、方法和应用。

基于上述理由和认识,本书仍采用全书逐章逐节完全并行地展开连续时间和离散时间的讲述方式,但在具体内容的组织上做了一些调整和充实。主要调整和充实及其考虑如下:

(1) 与国内新近出版或改版的信号与系统教材一样,本书也把离散傅里叶变换(DFT)和快速傅里叶变换(FFT)及其应用,数字滤波器的分析和设计等原本“数字信号处理”的内容综合进来,并把DFT作为一般的离散时间傅里叶变换的一个特例,即有限长序列的傅里叶变换来对待。其主要理由是:数字信号和系统分别是序列值和系统参数都为整数的一类离散时间信号和系统,把这部分内容综合进来,可以更好地体现信号与系统的连续时间和离散时间两部分内容的对偶与类比关系,让读者更为完整地获得包含“系统分析与综合”和“信号分析与处理”两方面的一整套概念、理论、方法和应用;也符合国内考研对本科目的考试范围要求。

(2) 在先时域后变换域的顺序、逐章逐节完全并行地展开连续时间和离散时间内容的框架下,与在时域部分介绍和讲述信号和系统的数学描述、建立信号与系统时域方法的解析体系相呼应,在变换域部分,先后用两章,即“信号和系统的频域(傅里叶)表示法”和“信号和系统的复频域表示法”,分别综合介绍和讲述各种傅里叶变换(包括级数)和拉普拉斯变换与 Z 变换,以便建立信号与系统的变换域(频域和复频域)解析体系。在处理双边和单边拉普拉斯变换与 Z 变换的关系上,按照现代的观点,单边拉普拉斯变换与 Z 变换可以分别看作一类所谓“因果”时间函数和序列的拉普拉斯与 Z 变换,并且仅在分析用微分方程和差分方程描述的一类因果系统中,起到双边变换不可替代的作用;而且,双边拉普拉斯和 Z 变换可以分别看成连续傅里叶变换和离散时间傅里叶变换的一般化。鉴于这些理由,本书将以双边拉普拉斯和双边 Z 变换为主,介绍和讲述信号与系统的复频域方法,而把单边拉普拉斯变换与单边 Z 变换分别作为双边变换的一个特例来对待。

(3) 鉴于各种变换(包括级数)的性质在形成信号与系统的概念和方法,以及在产生灵活有效的分析技巧和众多实际技术中的突出作用,本书把连续傅里叶变换(包括连续傅里叶级数)、离散时间傅里叶变换(包括离散傅里叶级数)及其特例——离散傅里叶变换(DFT)的性质融合在一起,集中在一章中讲述。在讲述性质的次序上,把变换的卷积性质提到前面,并强调其他大部分性质可以分别看作卷积性质的特例,突出卷积性质对大部分其他性质的统帅作用。不仅介绍每个性质的数学描述及有关概念,还通过丰富的例题,着重强调这些性质在形成傅里叶分析的概念和方法及其应用,以及掌握灵活有效的分析技巧方面的作用,为后面有关应用的各章做铺垫。而且,有了两章篇幅分别详细、深入讲述各种傅里叶变换及其性质为基础,充分利用双边拉普拉斯变换和 Z 变换与连续和离散时间傅里叶变换之间、双边与单边拉普拉斯变换和 Z 变换之间的关系,在一章中

介绍和讲述双边和单边拉普拉斯变换与 Z 变换及其性质,而把系统(LTI 系统和用微分方程与差分方程描述的系统)的变换域(复频域和频域)分析与综合的有关概念和方法,融合在另外一章中介绍和讲述。这样的考虑和安排,使得变换域部分的内容既层次分明,又详简有度,达到压缩篇幅的目的。

(4) 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(LTI)系统,另一类是用线性常系数微分方程和差分方程描述的实际系统,即所谓“因果”系统。由于在相当宽松的条件下,用线性常系数微分方程或差分方程描述的系统可以归结为 LTI 系统,因此,本书用更多的篇幅讨论 LTI 系统。但是,这两类系统仍有不同的基本分析方法,例如,在时域中,前者的分析方法是卷积方法,而后者则是方程解法;在变换域中,前者是傅里叶方法、双边拉普拉斯变换方法或 Z 变换方法,而后者却是单边拉普拉斯变换方法或单边 Z 变换方法。因此,本书在第 3、4 章分别介绍和讲述 LTI 系统、用微分方程和差分方程描述的系统时域分析与综合的概念和方法,而这两类系统的变换域分析与综合的概念和方法,则融合在第 9 章一起介绍和讲述。鉴于这样的安排,本书把系统的状态变量分析的时域和变换域(复频域)方法部分,分别放到第 4 章和第 9 章中介绍和讲述,尝试着用另一种方式展示从系统的输入输出描述到状态变量描述的有关概念与方法之间的内在联系。

(5) 根据教材应面向本学科各个专业领域的要求,并体现信号与系统的概念、理论和方法在实际应用中的指导作用,进一步激发学生的兴趣,本书先后用 3 章分别介绍信号与系统概念、理论和方法在通信系统和技术、信号分析和处理,以及在反馈与控制中的主要应用。由于信号与系统在通信系统和技术中的应用主要涉及信号与系统的时域方法和傅里叶(频域)方法,故把它放到拉普拉斯变换与 Z 变换方法之前介绍和讲述,使学生早一点感受到信号与系统概念和方法在实际应用中的巨大作用。其余两个领域中的应用都需要复频域的概念和方法,将在最后两章中分别介绍和讲述。编写这三章主要有如下目的:①使学生通过了解信号与系统概念和方法的主要应用,反过来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掌握;②对由这些应用所产生的一系列极为有用技术的入门性介绍,使学生获得寓意于其中的思想和方法论方面的熏陶,对学生而言,这可能比这些具体技术更为重要。

(6) 本书的大部分章节都配有较为丰富、通过精心选择的例题,如果学生留意这些例题分析,特别是同一问题的不同求解方法,就会悟出有关信号与系统问题的一些行之有效的解题技巧。更何况有关应用的三章内容可以看作面向实际问题的综合层次的例题分析,即针对许多具体的实际问题,综合运用信号与系统的有关概念、理论和方法进行分析,找到解决这些问题的具体方法和技术。此外,要使学生熟练地掌握信号与系统的知识,并把它们变成自己成套的、有条理的概念、理论和方法,离开一定数量的习题练习是不可能达到的。因此,本书除第 1 章外,每章末都收集和设计了各类习题,总数三百多道。其中,许多习题是对各章所涉及的概念和方法的基本训练;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。除此之外,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。本书后面附有各章中的大部分习题的答案,希望能对学生解题有所助益。

(7) 在国内外的电子信息类专业课程的教材中,近年来纷纷引入 MATLAB 练习的内容,似乎成为时尚和趋势。本人不反对把 MATLAB 练习引入有关专业课程(包括本课程),更不否认它带给学生多方面的帮助,但本课程在电子信息类专业基础课程中的地位,决定它最根本和重要的是本学科有关专业领域的基本概念、思想和方法,这需要学生投入更多的时间和精力,认识和掌握 MATLAB 可以在其他更为具体和实际的专业课程或选修课程中实现。基于这一认识,也出于篇幅的限制,没有在本书中再加入或附上有关 MATLAB 练习的内容。

基于上述几点考虑,本书的内容安排为:在简短的第1章“绪论”后,第2~4章介绍信号与系统在时域中的概念、理论和方法。其中,第2章主要介绍信号和系统的数学描述及与此有关的概念、一些基本信号和基本系统以及信号和系统的主要性质等,建立起信号与系统的时域解析体系。第3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;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,特别强调卷积运算的性质和单位冲激响应在信号与系统的时域方法中的重要作用;最后,通过对奇异函数与其离散时间对偶的讨论,把线性时不变系统的卷积方法一般化。第4章主要讨论用线性常系数微分方程和差分方程描述的系统。首先简洁地介绍它们的时域解法——经典的微分方程和差分方程的解法,包括差分方程的递推算法;然后,说明它们属于所谓“增量线性时不变系统”,并在非常宽松的条件(“起始松弛”)下,可以归结为 LTI 系统,在此基础上,依次讲述这类实际因果系统的零状态响应和零输入响应分析方法、用微分方程和差分方程表示的因果 LTI 系统单位冲激响应的确定方法;接着介绍这类因果 LTI 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;最后介绍和讨论因果的动态系统的状态变量描述的基本概念和方法,并基于系统的直接型实现结构,介绍和讲述称为“直接规划法”的系统状态变量编写方法。

从第5章开始,转入信号与系统变换域概念、理论和方法的介绍和讨论。在第5章中,首先通过 LTI 系统对复正弦信号(虚指数信号)响应的讨论,引入信号和系统的频域表示法;然后,先后介绍和讲述连续和离散傅里叶级数、连续和离散时间傅里叶变换、离散傅里叶变换(DFT)等信号的变换域表示法,并把周期信号的傅里叶级数统一到傅里叶变换表示法中,建立起信号与系统傅里叶分析(频域分析)的解析体系;最后讲述离散傅里叶变换的快速算法——快速傅里叶变换(FFT)。第6章统一讲述各种傅里叶变换(包括级数)的所有性质,先后讲述它们的线性性质、时域和频域卷积性质、时移和频移性质、时域的微分和差分与积分和累加性质、频域的微分和积分性质、时域和频域抽样定理、对称性质、尺度变换性质、相关定理和帕什瓦尔定理、几种希尔伯特变换,以及在各种傅里叶变换和级数中呈现的四种对偶性质。在讲述这些性质时,特别强调它们所揭示的信号和系统时域和频域表示之间的关系,以及利用变换的性质求取变换或反变换的分析技巧。在第7章中结合时域方法,介绍和讲述信号与系统的频域方法在通信系统和技术中

的应用,主要涉及信号无失真传输、几种常用的幅度调制和解调(正弦幅度调制、调幅(AM)、单边带调制和脉冲幅度调制等)和解调、正弦幅度调制在通信中的其他应用、多路复用(频分复用、时分复用和正交复用等)、信号设计(频带限制下的信号波形设计和匹配滤波器——相关接收条件下的信号设计),以及均衡(频域均衡和时域均衡)等概念和方法。第8章介绍并讨论信号和系统的复频域表示法。首先从连续和离散时间傅里叶变换的推广和一般化的角度,引入和介绍双边拉普拉斯变换和双边Z变换;然后,讨论双边拉普拉斯变换和双边Z变换像函数的零、极点分布和收敛域特性,建立起信号和系统的复频域表示法;接着讨论双边拉普拉斯变换和双边Z变换的各个性质及其揭示的时域与复频域之间的关系;最后,从双边拉普拉斯变换和双边Z变换的特例的角度,简要介绍单边拉普拉斯变换和单边Z变换及其特有的几个性质。第9章介绍和讲述系统的变换域(复频域和频域)分析和综合的有关概念和方法。首先介绍和讨论LTI系统的变换域分析方法,以及用微分方程和差分方程描述的一类因果系统的复频域分析方法,即使用单边拉普拉斯变换和单边Z变换的零状态响应和零输入响应复频域解法;然后,着重讨论系统的频率响应和系统函数的一系列有关概念及其在系统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;接着,基于系统函数,介绍因果LTI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;最后,依次介绍和讲述因果动态系统的另外两种状态变量描述的编写方法——级联和并联规划法、用状态变量描述的系统之变换域解法和状态矢量的线性变换等。第10章介绍和讨论信号与系统的时域和变换域的概念和方法在信号分析和处理中的应用。首先,在简要介绍和比较实际应用中的两类信号分析和处理——连续时间(模拟)信号分析和处理及离散时间信号(数字)分析和处理后,依次介绍和讲述连续时间信号的离散时间处理的有关概念和方法、离散傅里叶变换(DFT)在信号分析和处理中的应用;然后,着重介绍和讲述滤波及滤波器设计和实现的有关概念和方法,主要包括连续时间和离散时间理想滤波器及其特性、模拟滤波器及无限冲激响应(IIR)和有限冲激响应(FIR)数字滤波器的特性及其设计和实现方法、不同类型滤波器之间的频率变换的概念和方法等;最后简要介绍离散时间信号多抽样率处理的有关概念和方法。第11章介绍和讨论信号与系统的概念和方法在反馈控制系统中的应用。首先,介绍和讨论线性反馈系统的一系列基本特性及其应用;然后着重介绍和讲述线性反馈系统稳定性分析的几种常用方法,即根轨迹法、奈奎斯特稳定性判据和增益裕度及相位裕度的有关概念和方法。

本书内容丰富、篇幅较大,可以按照有关章节的选取和组合,构成深度和学时不同的讲授课程。鉴于目前国内多数高校电子信息类专业课程设置的情况,推荐以下三种基本组课方案:

- (1) 第1~6章、第8、9章和第11章,其中,在第5章中可提及,但舍弃DFT和FFT的内容,在第6章的各节中舍弃有关DFT性质的内容;
- (2) 第1~9章,并舍弃第4、9章中状态变量部分的内容;
- (3) 第1~6章、第8~10章,并舍弃第4、9章中状态变量部分的内容。

其中,第一方案适合于在本课程后还开设“通信原理”和“数字信号处理”课程,但不设置“自动控制原理”课程的专业;第二方案适合于课程设置与第一方案相反的情况,如自动控制和自动化专业;第三方案则适合于在本课程后不再开设“通信原理”和“数字信号处理”等课程的情况,如计算机技术类专业。这些组课方案的内容都可以在每周4学时的一学期内完成。即使按照上述推荐方案组织教学,对于所属每章中各节的内容仍有灵活选取的余地,以适应不同层次院校的教学要求。例如,虽然第7、10章未列入第一方案的要求中,但其中的一些主要的基本概念和方法,可以在第6章介绍傅里叶变换的有关性质时引申或作为其应用来介绍,例如,滤波和滤波器的概念和方法可在讲述时域卷积性质时引入,调制与解调、频分和时分多路复用等的概念和方法可在讲述频域卷积性质和频移性质时简要介绍,无失真传输和均衡的概念和方法可在讲述时移性质时引申,连续时间信号的离散时间处理的概念和方法,这可在讲述连续时域抽样定理后作为其应用做简要介绍等;对于一般本科院校,还可舍弃或简化部分章节中一些深入的内容,例如,奇异函数及其离散时间对偶、线性常系数差分方程解法、周期信号的傅里叶变换表示法、频域抽样定理、离散时间抽取和内插的频域和复频域性质、希尔伯特变换、单边带调制、正交复用和码分复用、匹配滤波器——相关接收条件下的信号设计、均衡、系统的信号流图表示法、离散时间信号的多抽样率处理等,以及第4、9章中有关系统状态变量描述和分析及第11章中后三节的内容。当然,授课教师还可根据学生的能力和培养计划的要求,设计其他的内容选组方案和讲授深浅的程度。但是无论哪种方案,都不宜按照教材照本宣科,书中的许多内容应当留给学生自学并组织讨论。

本书的编写也充分考虑到自学的需求,只要有微积分、微分方程、线性代数和复变函数方面的数学基础,完全可以自学本书。这将有助于在职科研和工程技术人员自学和知识更新。

中国科学技术大学“红专并进,理实交融”的优良校风,以及开放、严谨、活跃的学术气氛也对本书的形成有很大的影响。

本人有幸在清华大学电子工程系度过本科和研究生9年的学习生活,1978年开始的第二次研究生学习中,又有一半时间在清华园度过。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、陆大綏教授、冯子良教授、冯重熙教授、茅于海教授、冯一云教授、朱雪龙教授等的真传,以及系领导、特别是李传信书记的关爱。本书作为对他们中已故先生的纪念,并献给我清华的领导、老师和同学,感谢他们的培养和关爱。

本人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,中国科学技术大学素有重视教学的优良传统,校、院、系各级领导对优秀教材建设的高度重视,以及学生勤奋好学的精神等,都对成就本书有很大鼓励和支持,在此特表感谢。还要感谢我的年轻同事谭勇、郭武,在编写过程中经常与他们商讨,他们也提出不少具体有益的建议;此外,我指导的一些研究生为本书的习题答案做了大量的工作,在此一并向他们表示衷心的感谢。

本书第1版是“电子信息学科基础课程系列教材”中的一本,该系列教材由清华大学出版社策划,东南大学王志功教授领衔的编审委员会共同组织编写,并于2006年经教育部组织专家评审,确定为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

清华大学电子工程系陆大铨教授在本书编写时和成稿后给作者提供了一些很好的指导性建议和意见,为本书的质量提供了保证,在此表示衷心的感谢。清华大学出版社电子信息教材编辑室各位编辑与作者进行了和谐、愉快的合作,为本书的出版做出了贡献,这里对他们付出的艰辛和体现的专业精神表示敬意和感谢。

受水平和视野的限制,书中难免有不妥或错误,恳请读者指正。

作 者

第 1 章 绪论	1
1.1 信号和系统	2
1.1.1 信息、信号和系统	2
1.1.2 信号与系统问题	3
1.2 系统分析和综合、信号分析和处理	4
1.2.1 系统分析和综合	4
1.2.2 信号分析和处理	5
1.3 信号与系统的内容体系	5
第 2 章 信号和系统的数学描述及性质	8
2.1 引言	9
2.2 信号的数学描述和分类	9
2.2.1 信号的数学描述	9
2.2.2 信号的分类	10
2.3 系统的数学描述和分类	13
2.3.1 系统的数学模型和描述方法	13
2.3.2 系统的分类	18
2.4 信号的基本运算和变换、基本系统	19
2.4.1 信号的基本运算及其实现的基本系统	19
2.4.2 自变量变换导致的信号变换及其实现的基本系统	23
2.5 基本的连续时间和离散时间信号	28
2.5.1 单位阶跃和单位冲激信号	28
2.5.2 复指数信号和正弦信号	33
2.6 信号的时域特性和主要特征	39
2.6.1 信号的周期性、周期信号和非周期信号	39
2.6.2 信号的时域对称特性	40
2.6.3 信号的大小、能量和功率	41
2.7 信号的正交和相关函数	44
2.7.1 信号的相关系数和正交	44
2.7.2 信号的相关函数和相关序列	46
2.8 系统的相互连接与系统的等价和等效	51
2.8.1 系统的基本连接方式	52

目录

2.8.2 系统的等价和等效	54
2.9 系统的性质	54
2.9.1 无记忆性和记忆性	55
2.9.2 因果性、非因果和反因果	55
2.9.3 稳定性	57
2.9.4 可逆性和逆系统	58
2.9.5 时不变性	59
2.9.6 线性性质和增量线性系统	60
2.10 线性时不变系统、用微分方程和差分方程描述的系统	62
习题	63
第3章 LTI系统的时域分析和信号卷积	73
3.1 引言	74
3.2 用时移单位冲激的线性组合表示信号的方法	75
3.3 连续时间和离散时间 LTI 系统的卷积关系	77
3.3.1 卷积和与卷积积分	77
3.3.2 卷积的计算方法	79
3.4 卷积的性质及其在 LTI 系统分析中的作用	87
3.4.1 卷积的代数运算规则	87
3.4.2 涉及单位冲激的卷积和卷积的时移性质	90
3.4.3 卷积积分的微分和积分性质、卷积和的差分和叠加性质	91
3.4.4 卷积与相关函数的关系	93
3.5 卷积的收敛和周期卷积	95
3.5.1 卷积积分与卷积和的收敛问题	95
3.5.2 周期卷积	96
3.6 LTI 系统的特性和单位冲激响应之间的关系	98
3.6.1 LTI 系统的单位冲激响应	98
3.6.2 单位冲激响应表征的 LTI 系统性质	100
3.6.3 LTI 系统互联的单位冲激响应	103
3.7 LTI 系统的单位阶跃响应	103
3.7.1 用单位阶跃信号分析 LTI 系统	104
3.7.2 LTI 系统的单位阶跃响应	105

3.8 奇异函数及其在信号与系统理论和方法中的作用	106
3.8.1 奇异函数	106
3.8.2 奇异函数的离散时间对偶和 LTI 系统卷积关系的一般化	109
习题	112
第 4 章 用微分方程和差分方程描述的系统	123
4.1 引言	124
4.2 系统看作递归系统和非递归系统的级联	124
4.3 经典的时域分析方法: 微分方程和差分方程的解法	126
4.3.1 线性常系数微分方程所描述系统的方程解法	126
4.3.2 线性常系数差分方程所描述系统的方程解法	130
4.3.3 线性常系数差分方程的递推算法	134
4.4 用微分方程和差分方程描述的因果系统: 零状态响应和零输入响应	137
4.4.1 实际因果系统的增量 LTI 系统结构	137
4.4.2 起始条件转换到初始条件	139
4.4.3 零输入响应和零状态响应	140
4.5 用微分方程和差分方程表征的因果 LTI 系统的单位冲激响应	141
4.5.1 单位冲激响应的求法	141
4.5.2 离散时间 FIR 系统和 IIR 系统	148
4.5.3 微分方程和差分方程表征的因果 LTI 系统的稳定性和可逆性	149
4.6 用微分方程和差分方程表征的因果 LTI 系统的直接实现结构	150
4.6.1 系统的模拟和仿真	150
4.6.2 差分方程表征的因果 LTI 系统的直接实现结构	151
4.6.3 微分方程表征的因果 LTI 系统的直接实现结构	154
4.7 实际动态系统的状态变量描述	156
4.7.1 连续时间和离散时间因果动态线性系统的状态变量描述	157
4.7.2 因果动态线性系统状态变量描述的直接编写法	163
习题	174
第 5 章 信号和系统的频域表示法	179
5.1 引言	180
5.2 LTI 系统对复正弦信号的响应	181

目录

5.3	周期信号的频域表示法：连续和离散傅里叶级数	183
5.3.1	连续和离散傅里叶级数	183
5.3.2	连续和离散傅里叶级数的收敛	188
5.3.3	周期信号和序列的频谱	191
5.3.4	LTI 系统对周期输入的响应	196
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	197
5.4.1	连续和离散时间傅里叶变换	197
5.4.2	傅里叶变换的收敛	200
5.4.3	连续时间和离散时间傅里叶变换的典型例子	202
5.4.4	非周期信号的频谱和 LTI 系统的频率响应	206
5.4.5	傅里叶变换的极坐标表示与波特图	209
5.5	周期信号和奇异函数及其离散时间对偶的傅里叶变换	213
5.5.1	周期信号和序列的傅里叶变换表示	213
5.5.2	奇异函数及其离散时间对偶的傅里叶变换	218
5.6	有限长序列的离散傅里叶变换(DFT)表示法	223
5.7	快速傅里叶变换(FFT)	227
5.7.1	快速傅里叶变换(FFT)算法	227
5.7.2	FFT 算法的矩阵表示	233
习题		237
第 6 章	傅里叶变换和傅里叶级数的性质及其揭示的时域和频域间的关系	247
6.1	引言	248
6.2	线性性质	249
6.3	卷积性质	250
6.3.1	时域卷积性质	250
6.3.2	频域卷积性质	255
6.4	时移和频移性质	257
6.4.1	时移性质	257
6.4.2	频移性质	259
6.5	时域的微分和差分与积分和累加性质、频域的微分和积分性质	261
6.5.1	连续时域的微分和积分、离散时域的差分 and 累加性质	261
6.5.2	频域的微分和差分与积分和累加性质	265

6.6	抽样和抽样定理	268
6.6.1	连续时间的时域和频域抽样定理	268
6.6.2	离散时间的时域和频域抽样定理	274
6.7	对称性质	278
6.7.1	傅里叶变换和级数的对称性质	278
6.7.2	时域和频域上的对称分布特性之间的关系	281
6.8	尺度比例变换性质	286
6.8.1	连续时间尺度比例变换性质、时宽-带宽乘积	286
6.8.2	离散时间的尺度变换特性：抽取和内插的频域特性	288
6.9	相关定理和帕什瓦尔定理、能量谱与功率谱	293
6.10	希尔伯特变换	297
6.10.1	因果时间函数和序列傅里叶变换的实部或虚部自满性	297
6.10.2	复解析信号——实信号的希尔伯特变换表示	300
6.11	傅里叶变换和傅里叶级数的对偶性	304
6.11.1	连续傅里叶变换的对偶性	306
6.11.2	离散傅里叶级数(DFS)的对偶性	310
6.11.3	离散傅里叶变换(DFT)的对偶性	315
6.11.4	离散时间傅里叶变换和连续傅里叶级数之间的对偶性	315
习题		321
第7章	信号与系统在通信系统和技术中的应用	334
7.1	引言	335
7.2	信号的无失真传输和处理	335
7.3	调制和解调	339
7.4	正弦幅度调制和相干解调	340
7.5	调幅和检波	342
7.6	单边带调制	344
7.7	正弦幅度调制的其他应用	347
7.7.1	混频、交调和互调	347
7.7.2	可变中心频率的带通滤波器	350
7.7.3	实现低通和带通滤波器之间的转换	350
7.8	脉冲载波调制和脉冲编码调制	352

目录

7.8.1	脉冲幅度调制	353
7.8.2	脉冲编码调制	358
7.9	多路复用	359
7.9.1	频分复用和时分复用	359
7.9.2	正交复用和码分复用	363
7.10	信号设计	367
7.10.1	频带限制条件下的信号波形设计	367
7.10.2	匹配滤波器——相关接收条件下的信号设计	370
7.11	均衡	373
7.11.1	线性失真、符号间干扰和信号均衡	373
7.11.2	频域均衡	376
7.11.3	时域均衡和横向滤波器	377
习题		380
第 8 章	信号和系统的复频域表示法：拉普拉斯变换和 Z 变换	389
8.1	引言	390
8.2	LTI 系统对复指数信号的响应、频域和复频域	390
8.2.1	复指数输入和 LTI 系统的系统函数	390
8.2.2	连续时间和离散时间频域和复频域	391
8.3	双边拉普拉斯变换和双边 Z 变换	392
8.3.1	双边拉普拉斯变换和 Z 变换及其与傅里叶变换的关系	392
8.3.2	拉普拉斯变换和 Z 变换的零、极点分布	397
8.3.3	双边拉普拉斯变换和 Z 变换收敛域的性质	401
8.3.4	反拉普拉斯变换和反 Z 变换	407
8.4	双边拉普拉斯变换和双边 Z 变换的性质	413
8.4.1	线性性质	414
8.4.2	卷积性质	416
8.4.3	时移和复频移性质	417
8.4.4	时域微分和差分及积分和累加性质、复频域微分性质	420
8.4.5	对称性质	423
8.4.6	尺度变换性质	425
8.4.7	因果函数和序列的拉普拉斯变换和 Z 变换之初值和终值定理 ...	428

8.5	拉普拉斯变换和 Z 变换之间的类比关系	428
8.6	单边拉普拉斯变换和单边 Z 变换	432
8.6.1	单边拉普拉斯变换和单边 Z 变换的定义	432
8.6.2	单边拉普拉斯变换和单边 Z 变换的性质	436
	习题	440
第 9 章	系统的变换域分析和综合	445
9.1	引言	446
9.2	LTI 系统的变换域分析方法	446
9.2.1	LTI 系统的变换域分析	447
9.2.2	LTI 系统的变换域表示比其时域表示更容易得到	449
9.2.3	用微分方程或差分方程描述的 LTI 系统的变换域分析	451
9.2.4	变换域解卷积	454
9.2.5	求反变换的部分分式展开法	455
9.3	用微分方程或差分方程描述的因果系统的复频域分析	460
9.4	系统函数和频率响应表征的 LTI 系统特性	465
9.4.1	LTI 系统的性质	465
9.4.2	LTI 系统互联的系统函数和频率响应	469
9.5	系统函数与 LTI 系统时域和频域特性的关系	472
9.5.1	系统函数的零、极点分布和收敛域反映的时域特性	472
9.5.2	系统函数的极点决定单位冲激响应组成分量的函数形式	473
9.5.3	自由响应和强迫响应、暂态响应和稳态响应	475
9.5.4	LTI 系统的零、极点分布确定频域特性、频率响应的几何求值	478
9.6	一阶系统和二阶系统	481
9.6.1	一阶系统	481
9.6.2	二阶系统	486
9.7	全通系统和最小相移系统	494
9.7.1	全通函数和全通系统	494
9.7.2	最小相移系统	497
9.8	系统的信号流图表示法	501
9.9	LTI 系统的级联和并联实现结构	507
9.9.1	级联实现结构	508