



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材
电子信息学科基础课程系列教材



信号与系统

徐守时 编著



清华大学出版社



“十一五”国家级规划教材



教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材
电子信息学科基础课程系列教材

信号与系统

徐守时 编著

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、较为完整的、具有鲜明特色的信号与系统课程内容体系。

全书共十一章,按次序先后为: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运算;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;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;在通信系统和技术中的应用;信号和系统的复频域表示法;系统的变换域分析和综合;在信号分析和处理中的应用;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的分析技巧,章末配有相当数量丰富多彩的习题,书末还附有大部分习题的答案。

本书可作为高等院校通信和电子工程、自动化、计算机等电子信息类专业“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”科目的考试内容的范围和要求,可作为该科目的考研参考书。本书也可供任何从事信息获取、转换、传输和处理等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. —北京:清华大学出版社,2008.10

(电子信息学科基础课程系列教材)

ISBN 978-7-302-17481-3

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(2008)第 058534 号

责任编辑:王敏稚 陈志辉

责任校对:焦丽丽

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

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

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:45.25 字 数:1018 千字

版 次:2008 年 10 月第 1 版 印 次:2008 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:59.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:024246-01

《电子信息学科基础课程系列教材》

编 审 委 员 会

主任委员

王志功(东南大学)

委员 (按姓氏笔画)

马旭东(东南大学)

邓建国(西安交通大学)

王小海(浙江大学)

王诗宓(清华大学)

王 萍(天津大学)

王福昌(华中科技大学)

刘宗行(重庆大学)

刘润华(中国石油大学)

刘新元(北京大学)

张 石(东北大学)

张晓林(北京航空航天大学)

沈连丰(东南大学)

陈后金(北京交通大学)

郑宝玉(南京邮电大学)

郭宝龙(西安电子科技大学)

柯亨玉(武汉大学)

高上凯(清华大学)

高小榕(清华大学)

徐淑华(青岛大学)

袁建生(清华大学)

崔 翔(华北电力大学)

傅丰林(西安电子科技大学)

董在望(清华大学)

曾孝平(重庆大学)

蒋宗礼(北京工业大学)

《电子信息学科基础课程系列教材》

丛书序

电子信息学科是当今世界上发展最快的学科,作为众多应用技术的理论基础,对人类文明的发展起着重要的作用。它包含诸如电子科学与技术、电子信息工程、通信工程和微波工程等一系列子学科,同时涉及计算机、自动化和生物电子等众多相关学科。对于这样一个庞大的体系,想要在学校将所有知识教给学生已不可能。以专业教育为主要目的的大学教育,必须对自己的学科知识体系进行必要的梳理。本系列丛书就是试图搭建一个电子信息学科的基础知识体系平台。

目前,中国电子信息类学科高等教育的教学中存在着如下问题:

- (1) 在课程设置和教学实践中,学科分立,课程分立,缺乏集成和贯通;
- (2) 部分知识缺乏前沿性,局部知识过细、过难,缺乏整体性和纲领性;
- (3) 教学与实践环节脱节,知识型教学多于研究型教学,所培养的电子信息学科人才不能很好地满足社会的需求。

在新世纪之初,积极总结我国电子信息类学科高等教育的经验,分析发展趋势,研究教学与实践模式,从而制定出一个完整的电子信息学科基础教程体系,是非常有意义的。

根据教育部高教司 2003 年 8 月 28 日发出的[2003]141 号文件,教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会(基础课分教指委)在 2004—2005 两年期间制定了“电路分析”、“信号与系统”、“电磁场”、“电子技术”和“电工学”5 个方向电子信息科学与电气信息类基础课程的教学基本要求。然而,这些教学要求基本上是按方向独立开展工作的,没有深入开展整个课程体系的研究,并且提出的是各课程最基本的教学要求,针对的是“2+X+Y”或者“211 工程”和“985 工程”之外的大学。

同一时期,清华大学出版社成立了“电子信息学科基础教程研究组”,历时 3 年,组织了各类教学研讨会,以各种方式和渠道对国内外一些大学的 EE(电子电气)专业的课程体系进行收集和研究,并在国内率先推出了关于电子信息学科基础课程的体系研究报告《电子信息学科基础教程 2004》。该成果得到教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会的高度评价,认为该成果“适应我国电子信息学科基础教学的需要,有较好的指导意义,达到了国内领先水平”,“对不同类型院校构建相关学科基础教学平台均有较好的参考价值”。

在此基础上,由我担任主编,筹建了“电子信息学科基础课程系列教材”编委会。编委会多次组织部分高校的教学名师、主讲教师和教育部高等学校教学指导委员会委员,进一步探讨和完善《电子信息学科基础教程 2004》研究成果,并组织编写了这套“电子信息学科基础课程系列教材”。

在教材的编写过程中,我们强调了“基础性、系统性、集成性、可行性”的编写原则,突出了以下特点:

(1) 体现科学技术领域已经确立的新知识和新成果。

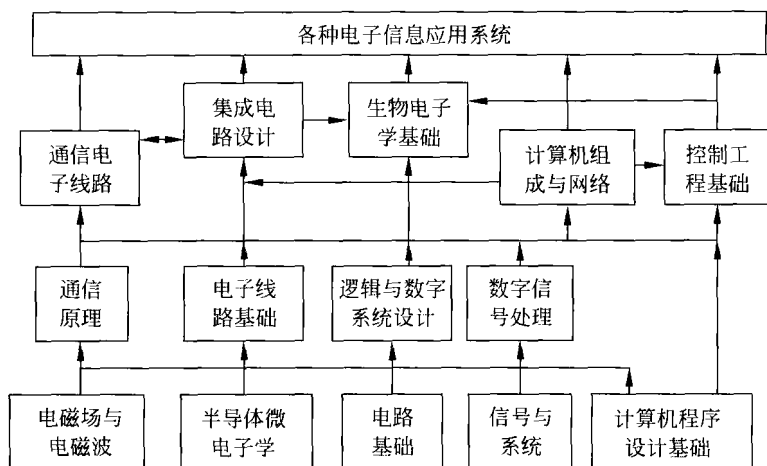
(2) 学习国外先进教学经验,汇集国内最先进的教学成果。

(3) 定位于国内重点院校,着重于理工结合。

(4) 建立在对教学计划和课程体系的研究基础之上,尽可能覆盖电子信息学科的全部基础。本丛书规划的 14 门课程,覆盖了电气信息类如下全部 7 个本科专业:

- 电子信息工程
- 通信工程
- 信息工程
- 计算机科学与技术
- 自动化
- 电气工程与自动化
- 生物医学工程

(5) 课程体系整体设计,各课程知识点合理划分,前后衔接,避免各课程内容之间交叉重复,目标是使各门课程的知识点形成有机的整体,使学生能够在规定的课时数内,掌握必需的知识和技术。各课程之间的知识点关联如下图所示:



即力争将本科生的课程限定在有限的与精选的一套核心概念上,强调知识的广度。

(6) 以主教材为核心,配套出版习题解答、实验指导书、多媒体课件,提供全面的教学解决方案;实现多角度、多层面的人才培养模式。

(7) 由国内重点大学的精品课主讲教师、教学名师和教指委委员担任相关课程的设计和教材的编写,力争反映国内最先进的教改成果。

我国高等学校电子信息类专业的办学背景各不相同,教学和科研水平相差较大。本系列教材广泛听取了各方面的意见,汲取了国内优秀的教学成果,希望能为电子信息学科教学提供一份精心配备的搭配科学、营养全面的“套餐”,能为国内高等学校教学内容

和课程体系的改革发挥积极的作用。

然而,对于高等院校如何培养出既具有扎实的基本功,又富有挑战精神和创造意识的社会栋梁,以满足科学技术发展和国家建设发展的需要,还有许多值得思考和探索的问题。比如,如何为学生营造一个宽松的学习氛围?如何引导学生主动学习,超越自己?如何为学生打下宽厚的知识基础和培养某一领域的研究能力?如何增加工程方法训练,将扎实的基础和宽广的领域才能转化为工程实践中的创造力?如何激发学生深入探索的勇气?这些都需要我们教育工作者进行更深入的研究。

提高教学质量,深化教学改革,始终是高等学校的工作重点,需要所有关心我国高等教育事业人士的热心支持。在此,谨向所有参与本系列教材建设工作的同仁致以衷心的感谢!

本套教材可能会存在一些不当甚至谬误之处,欢迎广大的使用者提出批评和意见,以促进教材的进一步完善。



2008 年 1 月

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。起初叫做“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,有些教材还加进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,首先促使国外有名高校纷纷开设“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、理论各方法,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。该书出版近十年来,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,在课程内容安排的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,本书作为清华大学出版社组织编写的“电子信息学科基础课程系列教材”之一,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 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 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从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,即是所谓“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“电子信息学科基础课程系列教材”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总数三百多道各类习题。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。本书各章中的大部分习题的答案由出版社另外提供,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章到第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 Z 变换;然后,讨论双边拉普拉斯变换和 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 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 Z 变换的特例的角度,简要介绍单边拉普拉斯变换和 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 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至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章至第9章,并舍弃第4、9章中状态变量部分的内容;

(3) 第1章至第6章、第8章至第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、系统的信号流程图表示法、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、陆大铨教授、冯子良教授、冯重熙教授、茅于海、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作古的先生的纪念,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,我的一些研究生为本书附录中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

选题,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 年经国家教育委员会组织专家评审,确定为普通高等教育“十一五”国家级重点教材立项选题。

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王敏稚、陈志辉等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

2007 年 12 月 31 日

于中国科学技术大学,合肥

第 1 章 绪论	1
1.1 信息、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 卷积积分和卷积和的收敛	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动态系统的状态变量描述	157
4.7.2 动态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