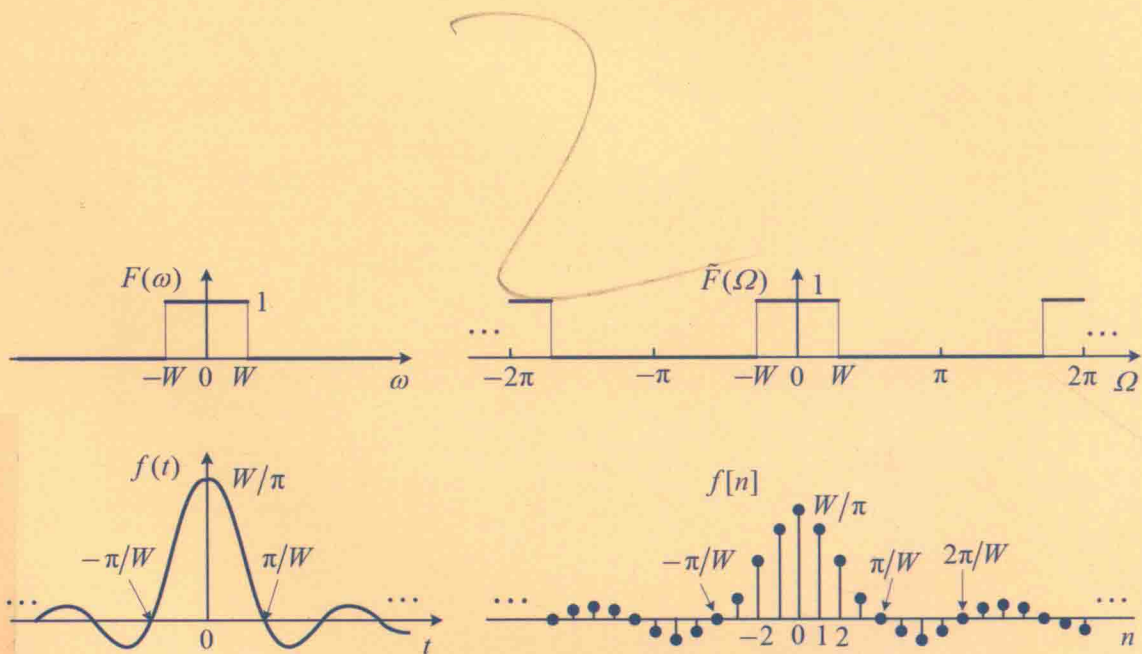


信号与系统 理论、方法和应用

第3版

徐守时 谭勇 郭武 编著





中国科学技术大学精品教材

信号与系统

理论、方法和应用

第3版

XINHAO YU XITONG
LILUN FANGFA HE YINGYONG

徐守时 谭勇 郭武 编著



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书采用先时域后变换域、从输入输出描述到状态变量描述的顺序和结构,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,包括数字信号处理方面的基本概念、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。

本书第3版在遵循前两版编写理念,保持原有鲜明特色的基础上,在对原有内容做适当调整和精练的同时,主要增加了离散傅里叶变换(DFT)、快速傅里叶变换(FFT)、模拟和数字滤波器设计与实现等数字信号处理方面的基本内容,以及信号与系统的概念、理论和方法在反馈和控制中的应用,并把它们有机地融入原有的内容框架,更完整地展现出一个“系统分析和综合”与“信号分析和处理”两方面知识既并重又相互交融,具有鲜明特色的信号与系统课程内容体系。全书共11章,各章都有足够数量的精选例题,兼顾基本练习和应用分析技巧,章末配有相当数量丰富多彩的习题,以帮助读者加深对理论和方法的理解与应用,使之在学术思想和方法论方面获得的启示终身受益。

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,且内容符合国内研究生入学考试中“信号与系统”科目考试的范围和要求,可以作为该科目的考研参考书以及供从事信息获取、转换、传输和处理、信息系统等领域工作的其他专业研究生、教师和科技工作者参考。

本书先后入选中国科学技术大学精品教材、“十一五”国家重点图书出版规划项目、中国科学院指定考研参考书目。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统:理论、方法和应用/徐守时,谭勇,郭武编著.—3版.—合肥:中国科学技术大学出版社,2018.12

(中国科学技术大学精品教材)

“十一五”国家重点图书出版规划项目

中国科学院考研指定参考书

ISBN 978-7-312-04429-8

I. 信… II. ①徐… ②谭… ③郭… 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(2018)第043652号

出版 中国科学技术大学出版社

安徽省合肥市金寨路96号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

<https://zgkxjdxcbstmall.com>

印刷 合肥华苑印刷包装有限公司

发行 中国科学技术大学出版社

经销 全国新华书店

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 39.75

插页 2

字数 1112千

版次 1999年10月第1版 2018年12月第3版

印次 2018年12月第6次印刷

定价 84.00元



编审委员会

主 任 侯建国

副主任 窦贤康 陈初升

张淑林 朱长飞

委 员 (按姓氏笔画排序)

方兆本 史济怀 古继宝 伍小平

刘 斌 刘万东 朱长飞 孙立广

汤书昆 向守平 李曙光 苏 淳

陆夕云 杨金龙 张淑林 陈发来

陈华平 陈初升 陈国良 陈晓非

周学海 胡化凯 胡友秋 俞书勤

侯建国 施蕴渝 郭光灿 郭庆祥

奚宏生 钱逸泰 徐善驾 盛六四

龚兴龙 程福臻 蒋 一 窦贤康

褚家如 滕脉坤 霍剑青

总 序

2008 年是中国科学技术大学建校五十周年。为了反映五十年来办学理念和特色，集中展示教材建设的成果，学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下，共组织选题 281 种，经过多轮、严格的评审，最后确定 50 种入选精品教材系列。

1958 年学校成立之时，教员大部分都来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员，他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时，根据“全院办校，所系结合”的原则，科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学，为本科生授课，将最新的科研成果融入到教学中。五十年来，外界环境和内在条件都发生了很大变化，但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针，并形成了优良的传统，才培养出了一批又一批高质量的人才。

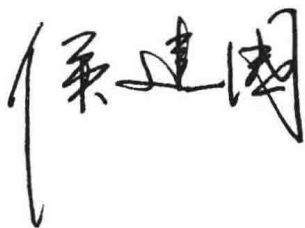
学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统，也是她特别成功的原因之一。当今社会，科技发展突飞猛进、科技成果日新月异，没有扎实的基础知识，很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初，华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行，亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德，带出一批又一批杰出的年轻教员，培养了一届又一届优秀学生。这次入选精品教材系列的绝大部分是本科生基础课或专业基础课的教材，其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响，因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初，学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习，他们在带回先进科学技术的同时，也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学，并以极大的热情进行教学实践，使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合”的方针得到进一步深化，取得了非常好的效果，培养的学生得到全社会的认可。这些教学改革影响深远，直到今天仍然受到学生的欢迎，并辐射到其他高校。在入选的精品教材中，这种理念与尝试也都有充分的体现。

中国科学技术大学自建校以来就形成的又一传统是根据学生的特点，用创新的精神编

写教材。五十年来，进入我校学习的都是基础扎实、学业优秀、求知欲强、勇于探索和追求的学生，针对他们的具体情况编写教材，才能更加有利于培养他们的创新精神。教师们坚持教学与科研的结合，根据自己的科研体会，借鉴目前国外相关专业有关课程的经验，注意理论与实际应用的结合，基础知识与最新发展的结合，课堂教学与课外实践的结合，精心组织材料、认真编写教材，使学生在掌握扎实的理论基础的同时，了解最新的研究方法，掌握实际应用的技术。

这次入选的 50 种精品教材，既是教学一线教师长期教学积累的成果，也是学校五十年教学传统的体现，反映了中国科学技术大学的教学理念、教学特色和教学改革成果。该精品教材系列的出版，既是向学校五十周年校庆的献礼，也是对那些在学校发展历史中留下宝贵财富的老一代科学家、教育家的最好纪念。

A handwritten signature in black ink, reading '何建国' (He Jianjun). The signature is written in a cursive style with a long vertical stroke on the left side.

2008 年 8 月

序 言

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，本书有以下几个突出特点：

(1) 在全书的每一章乃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它们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如何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)个特点在同类教材中尚属罕见，具有创新精神。最后一个特点也不失为一个值得推敲的尝试。

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，将会做出有益的贡献。

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年4月28日于清华园

郑君里先生，清华大学信息科学技术学院教授、博士生导师，曾任全国政协委员、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、全国高校电路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。

第3版前言

自1999年《信号与系统：理论、方法和应用》第一次出版至今已经近20年了。2008年本书被列入中国科学技术大学50周年校庆精品教材，并同时选为“十一五”国家重点图书出版规划项目和中国科学院指定考研参考书。10年过去了，根据学科发展和新形势下进一步深化教育教学改革的需要，决定对第2版教材进行全面修订和调整，以适应教育教学和新技术革命深入发展的需要。

在中国科学技术大学电子工程与信息科学学院本科的“信号与系统”课程教学实践中，历届学生对本书从内容体系和讲述方式到鲜明特色及体现的教学理念都大为赞赏，他们普遍认为从中获益匪浅，不仅对后续一系列专业课程的学习产生重大和深刻的影响，而且由此获得的有关思想和方法论的启示将使自己终身受益。由于各种原因，目前选用本书作为教材的高等院校不多，更多的是被推荐为参考书。深感欣慰的是本书受到全国考研复习学生的赞扬，很多读者纷纷来信表示：本书的内容体系和讲述方式独树一帜，读起来让人产生耳目一新的感觉；本书讲清楚了其他同类书籍中许多没有交代清楚的问题，突出了本课程有关知识点之间以及本课程与其他相关课程内容之间的联系与作用，这不仅促使读者在学习中深入思考，逐步领悟信号与系统有关知识的真正内涵，更使读者从中受到如何在更高层次上把知识融会贯通的有益启迪；许多读者在来信中也表示希望能将离散傅里叶变换(DFT)、快速傅里叶变换(FFT)、模拟和数字滤波器设计与实现等数字信号处理方面的知识纳入本书讲述。本课程长期教学实践的良好反映和学生及读者的各种意见和建议，成为本书改版的主要动力和追求的目标。

第3版在遵循前两版编写的相同理念、保持原有特色的基础上，在对第2版内容进行全面的审定并做了适当调整和精练的同时，主要增加了DFT、FFT、模拟和数字滤波器设计与实现等数字信号处理方面的基本内容，以及信号与系统的概念、理论和方法在反馈和控制中的应用，并把它们有机地融入原有的内容框架，更为完整地展现出一个“系统分析和综合”与“信号分析和处理”两方面知识既并重又相互交融，并具有鲜明特色的信号与系统课程内容体系。

第3版内容的主要调整和增删及其考虑如下：

(1) 第2版的第1章至第4章，以及第7章“系统的变换域分析”和最后1章“系统的状态变量分析”中的内容基本不变，只是做了小的调整和精练，分别成为第3版中的第1章至第4章，以及第8章和第11章。

(2) 在第2版的第5章“信号和系统的变换域表示法”中,增加了“有限长序列的频域表示法:离散傅里叶变换”和“快速傅里叶变换”的内容,仍然作为第3版第5章。

(3) 第2版的第6章“变换的性质及其揭示的时域与频域、复频域之间的关系”仍然作为第3版第6章。但是做了两方面的改动:一是把变换的卷积性质提到前面讲述,以便突出卷积性质对其他大部分性质的统领作用,强调其他大部分性质可以分别看作卷积性质的特例;二是在相应各节中不仅融入离散傅里叶变换的各种性质,而且增加了第2版中大部分被省略的连续傅里叶级数和离散傅里叶级数的性质。

(4) 第2版第8章“信号与系统理论和方法的主要应用”只涉及在通信和信号处理方面的主要应用。为了更完整地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,第3版根据电子信息领域的不同需求,分成3章分别介绍和讲述信号与系统概念、理论和方法在通信系统和技术、信号分析和处理,以及在反馈和控制中的主要应用。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,故把它作为第7章,放到“系统的变换域分析和综合”之前介绍和讲述,使读者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。其余两方面的应用需要运用复频域的概念和方法,因此被安排到第9章和第10章中分别介绍和讲述。

(5) 为了减少本书的篇幅,以便降低书价,在第3版中不仅把例题和习题用小五号字体排版,大部分有关推导和证明的内容也用小五号字体,并且排版尽量紧凑。由此给读者带来学习上的不便,恳请谅解。

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,并作为高等学校电子信息类大部分专业必修的一门基本课程,只有半个多世纪。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技术快速兴起,并获得广泛应用。这一技术发展,一方面,促使国外知名高校纷纷开设“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,既讲述“系统分析与综

合”的概念、理论和方法，又介绍“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”既并重又相互交融的课程内容体系。

鉴于上面所述的“信号与系统”课程内容变革的历史及其与“数字信号处理”课程内容之间的关系，借本书出版的机会，作者建议并呼吁对目前国内大部分高校电子信息类专业所开设的“信号与系统”和“数字信号处理”两门课程的设置及其课程内容进行改革，建议基本上按照本书的内容体系，组成一学期每周6学时或两学期每周3学时(总共120学时)的“信号与系统”课程，不再开设“数字信号处理”课程，或者在高年级开设更深入的“数字信号处理”课程，主要讲述有关数字信号处理的概念和方法以及新的应用、具体的实现算法、多抽样率处理和自适应信号处理等内容。

除了按照上述建议，选用本书作为“信号与系统”课程教材的方案外，为适应目前通行的课程设置情况，可以按照本书有关章节的选取和组合，构成深度和学时不同的讲授课程。这里推荐以下三种“信号与系统”课程基本组课方案：

(1) 主要讲授本书第1章至第6章，以及第8章、第10章和第11章的内容，但不含第5章有关DFT和FFT及第6章有关DFT性质的内容。

(2) 主要讲授本书第1章至第9章的内容。

(3) 主要讲授本书第1章至第6章，以及第8章至第10章的内容。

上述方案(1)适合在“信号与系统”课程后，还开设“通信原理”和“数字信号处理”课程，并且不设置“自动控制原理”课程的专业；方案(2)适合课程设置与方案(1)相反的情况，如自动控制和自动化专业；方案(3)则适合在本课程后不再开设“通信原理”、“数字信号处理”和“自动控制原理”等课程的情况，如计算机技术类专业。这些组课方案的内容基本上都可以在每周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章和第9章未列入方案(1)，但其中一些主要的基本概念和方法，可以在第6章介绍变换的有关性质时引申或作为其应用来介绍。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，可以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，在讲授时可舍弃或简化部分章节中一些深入的内容，把它们作为因材施教的资料，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 10 章后 3 节和第 11 章有关系系统状态变量描述和分析的内容。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讲，书中的许多内容应当留给学生自学并组织讨论。

本书内容符合国内大部分高校和科研院所研究生入学考试中“信号与系统”科目的考试内容范围和要求，可用作国内有关专业的考研参考书，特别是对本科学习时选用其他“信号与系统”教材的考生，可以使他们从不同角度、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。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。这将方便在职科研和工程技术人员自学和知识更新。

本书的知识结构、章节安排和编写提纲由徐守时制定，除第 5 章和第 6 章外，其余各章的改写或编写也由徐守时完成，第 5 章和第 6 章的内容分别由谭勇和郭武两位老师编写，并由徐守时对全书做最后统稿。

在本书出版之际，要特别感谢中国科学技术大学历年来听课的学生，他们的勤奋好学和对知识的不懈追求促使我们不断改进和完善授课内容和讲述方式。还要感谢多年来一直关心和支持本书的各兄弟院校老师、中国科学院有关研究院所的同行人和广大读者。

尽管我们非常努力，力争使本书在内容体系、知识完备性和讲述方式方面尽善尽美，但限于水平和视野，书中疏漏和不妥在所难免，恳请同行学者和读者指正。

作 者

2018 年 8 月 8 日

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，并作为高等学校电子信息类各专业的一门基本课程，仅有三四十年的历史。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；后来逐步加入离散时间信号与系统的内容，此后，又增加了基于系统的状态变量描述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。

本书积作者多年的心血，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，但在内容安排上做了一些新的尝试，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可类比性。充分利用这种对偶关系或可类比性，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，并成体系地展示给读者，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，本书在内容的安排上，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, 用线性常系数微分方程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、双边拉氏变换方法或双边 Z 变换方法, 而后者却是单边拉氏变换方法或单边 Z 变换方法。因此, 本书在第 3 章、第 4 章中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 7 章和第 9 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 变换又有双边与单边之分。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 变换之间的差别仅是各自的基信号集不同, 前者是 $\{e^{j\omega t}, \omega \in \mathbf{R}\}$ 和 $\{e^{j\Omega n}, \Omega \in \mathbf{R}\}$, 后者是 $\{e^{st}, s \in \mathbf{C}\}$ 和 $\{z^n, z \in \mathbf{C}\}$, 且 $\{e^{j\omega t}, \omega \in \mathbf{R}\}$ 和 $\{e^{j\Omega n}, \Omega \in \mathbf{R}\}$ 分别是 $\{e^{st}, s \in \mathbf{C}\}$ 和 $\{z^n, z \in \mathbf{C}\}$ 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 5 章要介绍的内容。此外, 本书在第 6 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 变换的另一种特例, 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方程的算子解法的根本原因。正是由于这一理由, 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 7 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, 或者就信号与系统的基本概念、理论和方法而言, 本书的前 7 章加上第 11 章“系统的状态变量分析”就已完全覆盖了。编写第 8 章“信号与系统理论和方法的主要应用”主要有两个方面的目的: 一是使学生通过了解信号与系统的理论和方法的主要应用, 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认识; 二是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, 离开一定数量的习题练习是不可能完全做到的。因此, 本书除第 1 章外, 每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。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。

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，并简要地推广到线性时变系统，其中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，通过历史上出现过的杜哈米尔积分，以及有关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提升到一般化的程度。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。在这一章中，我们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，并介绍用微分方程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5章到第7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5章中，我们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，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信号，介绍连续和离散傅里叶级数、连续和离散时间傅里叶变换，以及双边拉氏变换和双边Z变换的信号变换域表示法，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，同时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6章集中介绍和讨论连续和离散时间四种变换的性质。在此我们首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双边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7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，然后介绍用微分方程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单边Z变换的零状态响应和零输入响应复频域解法；接着讨论系统的频率响应和系统函数的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；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7章为止，基本上比较完整地介绍和论述了输入输出描述方式下、信号与系统的概念、理论和方法。第8章主要从通信和电子工程、信号处理等领域中，选择一些有代表性的实际问题和应用，做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。在这一章中,我们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世纪科技进步与发展的挑战,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,有相当大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7章的内容;前8章的内容;或者前7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,本书是作者在长期从事该课程教学实践的基础上写成的。中国科学技术大学素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帮助和支持;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。

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,又有一半是在清华园度过的。长期沐浴在清华园的蓝天和阳光下,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、陆大绘教授、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大学的领导、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MIT的A. V. Oppenheim教授的《Signals and Systems》一书作为主要参考书,1980年夏,在清华我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要的影响。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!

徐守时

1999年5月18日

目 次

总序	001
序言	003
第3版前言	007
前言	009
第1章 绪论	1
1.1 信息、信号和系统	1
1.1.1 信息、信号和系统	1
1.1.2 信号和系统问题	2
1.2 系统分析与综合和信号分析与处理	3
1.2.1 系统分析与综合	3
1.2.2 信号分析与处理	3
1.3 信号与系统的内容体系	4
第2章 信号和系统的数学描述及基本性质	6
2.1 引言	6
2.2 信号的数学描述和分类	6
2.2.1 信号的数学描述	6
2.2.2 信号的分类	7
2.3 系统的数学描述和分类	10
2.3.1 系统的数学模型和描述方法	10
2.3.2 系统的分类	14
2.4 信号的基本运算和变换、基本系统	15
2.4.1 信号的基本运算及其实现的基本系统	15
2.4.2 自变量变换导致的信号变换及其实现的基本系统	18
2.5 基本的连续时间和离散时间信号	22
2.5.1 单位阶跃信号与单位冲激信号	22
2.5.2 复指数信号与正弦信号	26
2.6 信号的时域特性和主要特征	31
2.6.1 信号的周期性、周期信号与非周期信号	31
2.6.2 信号的时域对称特性	31
2.6.3 信号的大小、能量和功率	33
2.7 信号的正交和相关运算	35
2.7.1 信号的相关系数和正交信号	35

2.7.2 信号的相关函数和相关序列	37
2.8 信号的函数空间表示法	41
2.8.1 信号的内积	41
2.8.2 信号和矢量的类比	42
2.8.3 正交信号空间	44
2.8.4 信号的广义傅里叶级数展开	46
2.9 系统的相互联接与系统的等价和等效	48
2.9.1 系统的基本连接方式	48
2.9.2 系统的等价和等效	50
2.10 系统的性质	50
2.10.1 无记忆性	50
2.10.2 因果性、非因果和反因果	51
2.10.3 稳定性	53
2.10.4 可逆性与逆系统	53
2.10.5 时不变性	54
2.10.6 线性性质和增量线性系统	55
2.11 线性时不变系统和用微分方程及差分方程描述的系统	56
习题	57
第 3 章 LTI 系统的时域分析和信号卷积	66
3.1 引言	66
3.2 用时移单位冲激的线性组合表示信号的表示法	67
3.3 连续时间和离散时间 LTI 系统的输入输出卷积关系	68
3.3.1 卷积和与卷积积分	69
3.3.2 卷积运算的计算方法	70
3.3.3 卷积积分与卷积和运算的收敛问题	76
3.4 卷积的性质及其在 LTI 系统分析中的作用	77
3.4.1 卷积代数的运算规则	78
3.4.2 涉及单位冲激的卷积及卷积的时移性质	80
3.4.3 卷积积分的微分和积分性质与卷积和的差分和叠加性质	81
3.4.4 卷积运算与相关函数之间的关系和匹配滤波器	82
3.5 周期函数和序列的周期卷积	84
3.5.1 周期卷积积分与周期卷积和运算	84
3.5.2 周期卷积运算的性质	85
3.6 线性时变系统和时变卷积	86
3.7 LTI 系统的特性与单位冲激响应之间的关系	87
3.7.1 LTI 系统的单位冲激响应	87
3.7.2 单位冲激响应表征的 LTI 系统性质	88
3.7.3 LTI 系统互联的单位冲激响应	91