

国外电子与通信教材系列

PEARSON

奥本海姆

Signals and Systems, Second Edition

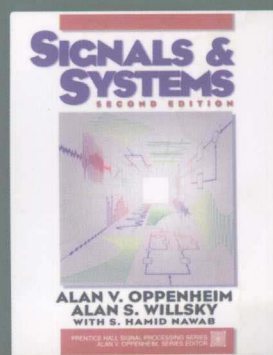
信号与系统 (第二版)

Alan V. Oppenheim

[美] Alan S. Willsky 著

S. Hamid Nawab

刘树棠 译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国外电子与通信教材系列

信号与系统

(第二版)

Signals and Systems

Second Edition

Alan V. Oppenheim

[美] Alan S. Willsky 著

~~S. Hamid Nawab~~

~~刘树棠 译~~



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是美国麻省理工学院(MIT)的经典教材之一,讨论了信号与系统分析的基本理论、基本分析方法及其应用。全书共分11章,主要讲述了线性系统的基本理论、信号与系统的基本概念、线性时不变系统、连续与离散信号的傅里叶表示、傅里叶变换以及时域和频域系统的分析方法等内容。本书作者使用了大量在滤波、采样、通信和反馈系统中的实例,并行讨论了连续系统、离散系统、时域系统和频域系统的分析方法,使读者能透彻地理解各种信号系统的分析方法并比较其异同。

本书可作为通信与电子系统类、自动化类以及全部电类专业信号与系统课程的教材,也可以供所有从事信息获取、转换、传输及处理工作的其他专业研究生、教师和广大科技工作者参考。

Authorized translation from the English language edition, entitled *Signals and Systems*, Second Edition, 9780138147570 by Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky, S. Hamid Nawab, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 1997 Alan V. Oppenheim and Alan S. Willsky.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY Copyright © 2013.

本书中文简体字版专有出版权由 Pearson Education(培生教育出版集团)授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书贴有 Pearson Education(培生教育出版集团)激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2012-1497

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统:第2版/(美)奥本海姆(Oppenheim, A. V.), (美)威尔斯基(Willsky, A. S.), (美)纳瓦卜(Nawab, S. H.)著;刘树棠译. —北京:电子工业出版社,2013.1

书名原文:Signals and Systems, Second Edition

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-19427-6

I. ①信… II. ①奥… ②威… ③纳… ④刘 III. ①信号系统-高等学校-教材 IV. ①TN911.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第008663号

策划编辑:马 岚

责任编辑:马 岚

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:39.25 字数:1105千字

印 次:2013年1月第1次印刷

定 价:69.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

译者序

Signals and Systems (A. V. Oppenheim, A. S. Willsky) 一书 1983 年在美国公开出版发行, 当年 8 月即由笔者从美国带回中国。1984 年 2 月笔者采用该书的中译本(油印讲义)在西安交通大学 1982 级“无线电技术”专业的“信号与系统”课中作为基本教材使用。1985 年由西安交通大学出版社正式出版该书中译本(老式铅字排版, 排版师傅非常辛苦)。1997 年原著第二版在美国问世, 1998 年该书第二版中译本与读者见面, 这就是业界熟知的十几年来各高等院校所采用的由西安交通大学出版社出版的第二版中译本。该书第一版中译本累计发行近 6 万册, 第二版中译本累计印刷 15 次, 发行近 13 万册。这样的销量是在当时国内“信号与系统”课程方面已有多本主流教材存在, 并在随后几年多达十几本甚或几十本自编教材的情况下取得的, 实属不易。其中西安交通大学出版社为此付出过诸多努力, 应该谢谢他们。这些数字表明该书已经在中国读者心中占有的份量和地位, 并已使广大读者受益。

现在, 本书原著出版商 Pearson 教育出版集团将该书的简体中文翻译出版权授予了电子工业出版社, 至此这本书的简体中文版和英文影印版归于了同一家出版社出版。电子工业出版社的“国外电子与通信教材系列”, 经过出版社编辑和许多译者的共同努力, 十多年来已逐渐成为引进颇具规模、精品相对集中的系列。Oppenheim 的这本巨著归入这个系列, 将使该系列在结构上更加完整。电子工业出版社的编辑根据笔者的译文对全书重新进行了排版和编辑加工, 并配合笔者根据网上查询到的多个勘误表, 对内容细节进行了改进。本书的英文影印版也将在下次重印时做相应调整, 相信两本书的配合勘误会使读者收获更多。笔者多年来翻译出版了十多本国外优秀教材, 确实是出自对这些教材的喜欢和偏爱, 将它们及时奉献给广大读者, 让大家受益、欣赏, 并从中悟出: 什么才称得上是一本好教材? 好教材是精心写出来的, 而不是“编”出来的。所译教材中绝大多数为国内教师教学采用, 多次重印并随着原著版本的更新而不断推出新版。许多美国顶尖大学的著名教授所写的名著, 都在国内取得较好反响, 笔者对此“乐此不疲”。正值新的中译本面世之际, 这是译者首先要说明的。

接下来, 笔者想就这本书本身及使用这本书的有关方面粗线条地谈几点意见, 与使用该教材的老师们和读者切磋, 不妥之处祈望给予批评指正。

第一, 该书从 1983 年面世至今将近 30 年, 在中国大陆中译本就发行了近 20 万册, 原著在中国台湾、香港和澳门地区及亚洲各国高校都有使用, 可以说几乎遍及世界各国, 实属一本得到普遍认可的经典教材。近 30 年使用过程中, 并未让人感受到内容的陈旧, 或组织结构方面的缺陷, 它所涵盖的基础内容和建立的教材体系仍然是十分合理和可取的, 对于任何行业从事信息分析和处理的人们来说, 这些都是必须具备的基础知识。有了这个铺垫, 就能够通过各种方式在各自的领域做些更深入和更前沿方面的研究。我校早已在全部电子和电气信息类专业开设了“信号与系统”课程, 我校电信学院信息与通信工程系任品毅教授早在 2005 年还首次在我校理学院的理科试点班, 接着于 2012 年在我校航空航天学院采用此书中译本为基本教材开设了“信号与系统”课程, 取得了很好的反响。笔者也曾在 20 世纪 90 年代与我校能源与动力工程的研究生讨论过他们所遇到的很有趣的数字滤波器问题。凡此种种都表明, 本书所涉及的基础内容是没有专业界限的, 直至经济、金融和社会学等领域。2011 年 12 月底 Oppenheim 教授访问我校, 译者与他有过近距离的交谈, 曾谈及该书第三版的事。Oppenheim 教授并未正面给出回应, 而是说正在写一本

深度介乎 *Signals and Systems* 和 *Discrete-Time Signal Processing* 之间的新书。看来, Oppenheim 教授还在关注构建他的课程体系, 估计短时间内不会有该书第三版的计划。

第二, 本书在内容取舍、例题选取、章节结构、排比技法与巧妙等方面都是经过精心策划与构思的, 讲过多遍的老师都会有自己的体会。用好这本教材, 一定要对该教材的整体情况有很好的掌握, 这样才能根据各个专业的具体要求和专业内已设置课程之间的关系重新做出合适取舍和组织。我不主张把一本教材按章、按节从头讲到尾来用, 应该将一本或两本教材作为主要参考书, 而不要作为教科书来用。不要把大学生当成中学生来教。

第三, 学生由于对离散时间信号比较陌生, 刚开始可能会对第 5 章的内容感到有点难度, 实际上这是一种误读。第 5 章是作者首次将离散时间傅里叶变换理论系统、严谨地反映到教材中的, 包括理论的系统化、符号的建立、名词的统一等, 都做出了贡献, 写得很成功。这一章在讲授时不要急于与采样概念挂钩, 只当成一个自然序列来研究, 让学生牢牢建立序列频谱的概念。有些难点可能要在后续章节中解决, 例如数字频率的量纲是弧度等重要概念。笔者认为本书写得最精炼、难度最大的是第 7 章, 篇幅很少, 但蕴含的概念很丰富, 要把这一章与第 3 章至第 5 章前后呼应结合起来讲, 力求概念的深化与贯通。第 9 章至第 11 章写得都很精炼, 也容易讲授, 第 9 章和第 10 章各用 3 个课时足矣。有关第 11 章的处理, 大多不在“信号与系统”课中讲授而不被采用。这一章其实是写得非常好的一章, 它用短短的一章篇幅把经典控制理论中所涉及的命题、基本概念和方法都进行了交待。在本书中它是作为全书基本理论在线性反馈系统中的应用来选取的。笔者曾建议过, 将该章包含进来, 而在“自动控制原理”课中不再讲授经典部分, 只讲近代控制理论。这样既保证了“信号与系统”课中基本理论与应用方面的完整性, 又可避免课程之间过多的内容重复, 还能提升“自动控制原理”课的档次。当然, 这不一定能由任课老师一人定夺, 涉及专业的课程内容和体系。译者曾用 50 个课时用完全全部内容。

第四, 全书涉及数学公式比较多, 如果对此处理不好会对学生产生误导。数学是一种描述和解释物理现象的工程语言, 精确、严谨而又简单, 切勿在课堂上进行过多推导。关键是要将过程和结果中所包含的物理内容说清楚。必要时可以借用 PPT 工具, 但我不主张从头到尾都用已做好的 PPT 课件的“拉洋片”式的授课方式。

第五, 本书的习题部分太多、太丰富, 不少都是课程内容的延伸。译者不主张做很多题, 在正常教学中选若干基本题做一点就可以了。很长一段时间以来, 不少学生为了考研, 将所有的题都做了一遍! 这既无必要, 也没有多少好处, 反而耽误了基本概念的理解与消化。

第六, 现在已经很少甚或没有传统意义上的硬件实验了, 大都在计算机上进行仿真。现在供做仿真实验的软件工具极为丰富, 功能强大, 而且带有很强的图形化功能。如果老师能精心拟定若干题目, 相当于一种不大不小的课程作业, 让学生课后自己设法完成, 在完成的过程中学生会任意改变一些参数, 可能会得出许多稀奇古怪、意想不到的结果, 将出现的这些结果都一一搞懂了, 都能自圆其说了, 就一定会得到许多从书本里、课堂上得不到的知识, 从而加深了对一些概念的理解和掌握。极力推荐并鼓励老师们都能这样做。

借新的中译本与广大读者见面之际写了上面几点粗浅意见与大家商榷, 共同将这本经典教材用好, 让广大大学生受益。

最后, 感谢电子工业出版社对这个中译本的认真编辑加工, 祝新的中译本发行成功, 并期望电子工业出版社能为读者提供更多、更优质的服务。

刘树棠
于西安交通大学
2012.7

前 言

本书适合作为大学本科“信号与系统”课程教科书。虽然这类课程通常属于电气工程类的课程，但作为该课程核心的一些基本概念和方法，对于所有工程类的专业来说都很重要。事实上，随着工程师们面临着需要对一些复杂过程进行分析或综合的新挑战，信号与系统分析方法潜在的和实际的应用范围都一直在扩大着。为此我们认为，信号与系统方面的课程不仅是工程教学中一门最基本的课程，而且也能够在工程类学生在大学教育阶段所修课程中最有得益而又引人入胜并且最有用处的一门课。

关于“信号与系统”课程的处理和论述的基本宗旨和看法，第二版与第一版相同，但是在内容的组织和选取上有较大的变化，基本上属于重写和重新组织，并有较多的补充。这些变化的目的在于更有助于教师讲授这门课和学生掌握这门课的内容。在第一版的前言中曾提到过，由于在信号与系统设计和实现手段上的持续发展，对于学生来说，需要对连续时间和离散时间系统的分析与综合技术都很熟悉，这一点越来越重要。当我们写第二版前言时，更坚定了这样的看法和指导原则。这样，学习信号与系统的学生就不仅要在基于物理学定律的那些课程上应该具有坚实的基础，而且在使用计算机进行现象分析和系统及算法的实现上也必须具备扎实的基础。结果，在现在的工程类课表中就反映出一些混杂的课程，有些是涉及连续时间模型的，而另一些又主要是针对计算机应用和离散表示的。因此，在工程类学生的教育及其所选定的领域中，为了给现在和将来的发展做准备，以一种统一的方式，在信号与系统课中将离散时间和连续时间的概念揉合在一起显得日益重要。

正是本着这些目的，该书以并行的方式建立了连续时间和离散时间信号与系统的分析方法。这一途径在教学上也是十分可取的，它可以利用连续和离散时间方法之间的共同点来分享各自所获得的理性和感性认识；而两者之间的差异又可用来加深理解各自不同的独特性质。

在材料组织方面（无论是第一版还是第二版），我们还认为本书所论述的基本方法在某些重要方面的应用也应该作为基本内容介绍给学生。这样做不仅让学生了解目前所学内容的某些应用方面和进一步研究的方向，而且还有助于加深对问题本身的理解。为此，就滤波、通信、采样、连续时间信号的离散时间处理，以及反馈等方面的内容都进行了入门性介绍。事实上，第二版的主要变化之一就是将在频域滤波概念更早地在傅里叶分析中引入。其目的既是为了给出讨论傅里叶分析这一重要论题的初衷，又可以对这一论题加深理解。另外，为了帮助愿意继续在信号与系统分析方法和应用方面深入学习的学生，书末还附有参考文献目录。

我们相信，要全面掌握这门课，没有一定数量且能应用这些基本方法的练习是不可能完成的。因此，在第二版中大幅增加了各章例题的数量。同时，还将第一版所具有的最为珍贵的一点——各章末丰富多彩、类型各异的习题，做了进一步加强，使得习题的总数多达600多道，其中大多数习题都是新的。这样就为教师安排课后作业提供了更多的灵活性。另外，为使学生和教师能更好地使用这些习题，对这些习题的组织安排上进行了一些调整。特别是把各章末的习题分成几种类型，其中每种类型的习题都覆盖了全章的内容，但具有不同的目的。前两部分习题着重于各章基本概念和方法的应用，其中第一类标以“基本题(附答案)”，答案(不是题解)在书末给出。这些答案以一种简单而即时的方式让学生验证其对内容的理解程度。这部分习题一般适合作为课后作业布置。另外，为了给教师布置课后作业提供一些灵活性，我们还提供了另一类不附答案的基本题。

各章末标以“深入题”的是第三类习题。这部分习题是根据教材内容的基本原理和真正内涵进行深入钻研和进一步发挥的习题。这些习题往往涉及一些数学推导,以及在各章中所提到的概念和方法的更深层次应用。某些章还列有称为“扩充题”类型的习题,这类习题或者涉及本章内容的扩充,或者涉及其他方面的应用(例如一些更高级的电路或机械系统),而这些都是超出课程内容的。在习题方面总的变化都是希望给学生提供一些途径来加深理解各章的内容;同时也为教师布置课后作业提供更多的灵活性,并对不同要求的学生提供因材施教的余地。^①

我们假定使用本书的学生已具有基本微积分学方面的基础,有进行复数运算的能力,并在微分方程方面也有某些接触。有了这些基础以后,本书就自成体系了,尤其是不需要事先具备系统分析、卷积、傅里叶分析或拉普拉斯变换和 z 变换等方面的知识。在学习“信号与系统”课程之前,大多数学生或许都上过针对电气工程师们的基本电路课,或针对机械工程师们的动力学原理之类的课程;这些课程都多少接触一些本书将要给予深入讨论的那些基本概念。在学习本书时,这些基础很显然对于学生深入理解本书内容会有很大的帮助。

紧随前言的是简短的绪论,其中概述了对“信号与系统”课程的出发点和看法,特别是我们对这一问题的观点和处置。第1章从介绍与信号和系统的数学表示有关的某些基本概念入手,特别是讨论了一个信号独立变量的某些变换(如时移和尺度变换),接着介绍了某些最重要的基本连续时间和离散时间信号,即实指数和复指数信号、连续时间和离散时间单位阶跃和单位冲激信号等。第1章还介绍了系统互联的方框图表示,并讨论了几个基本的系统性质,如因果性、线性和时不变性。第2章在上述最后两个性质的基础上,再结合单位脉冲的移位性质来建立离散时间线性时不变(LTI)系统的卷积和表示,以及连续时间线性时不变系统的卷积积分表示。这里采用从导出离散时间情况所得到的直观认识,来导出并理解在连续时间情况下所对应的结论。然后,把问题转到讨论由线性常系数微分及差分方程所表征的因果线性时不变系统上来。在初步讨论中复习了涉及解线性微分方程的一些基本方法(大多数学生对此都会有某些接触),并对线性差分方程的类似解法进行了讨论。然而,第2章讨论这些问题的主要着眼点不是在求解的具体方法上,因为稍后将要讨论的利用变换法求解将更为方便。我们的意图是首先让学生对这个极为重要的系统有某些了解,因为在以后的各章中将会经常遇到这类系统。最后,第2章以简短讨论奇异函数(阶跃、冲激和冲激偶等)及其在描述和分析连续时间线性时不变系统中的作用作为结束。在讨论中特别强调如何在卷积的意义下定义并解释这类信号,也就是说利用线性时不变系统对这些理想化信号的响应来理解这些奇异信号。

第3章到第6章完整地建立了连续和离散时间的傅里叶分析方法。这一部分在第二版中做了很大的重新组织和改写。正如前面已指出的,较早介绍频域滤波的概念是为了给傅里叶方法的讨论提供具体应用背景和初衷。与第一版相同的是,第3章一开始就指出傅里叶分析在连续和离散时间信号与系统研究中所起的重要作用,都是从强调并说明如下两个基本理由入手的:(1)相当广泛的一类信号都可以表示成复指数信号的加权和或加权积分;(2)线性时不变系统对复指数输入信号的响应就是同一复指数信号乘以该系统的复数特征值。然而,与第一版不同的是,第3章重点关注连续时间和离散时间周期信号的傅里叶级数表示。这样做的结果是,不仅介绍并研究了傅里叶表示的许多性质而无须另要求数学上的一般化,以得到非周期性信号的傅里叶变换,还能够在更早的时候引入滤波方面的应用。特别是,利用复指数是线性时不变系统的特

^① 采用本书作为教材的教师,可通过电子工业出版社获得本书习题解答,详见书末所附“教学支持说明”。采用本书作为教材的教师,若需与译者所在西安交通大学“信号与系统”教学团队沟通交流,可发邮件至 pyren@mail.xjtu.edu.cn。——编者注

征函数这一点,可以引入线性时不变系统频率响应,并利用它来讨论频率选择性滤波的概念,介绍理想滤波器以及由微分和差分方程描述的几个非理想滤波器的例子。以这种方式就可以用最少的数学准备知识,给学生展现傅里叶表示的内涵,使学生深入了解这个概念的重要性。

第4章和第5章建立在第3章讨论的基础上。首先,第4章研究了连续时间傅里叶变换,并以平行的方式在第5章研究了离散时间傅里叶变换。这两章都通过将一周期的信号的周期任意趋大时求其傅里叶级数的极限来导出非周期信号的傅里叶变换表示的。这种观点强调了傅里叶级数和傅里叶变换之间的密切关系,这种关系将在后续的几节中进一步讨论。这样就能够把在第3章所得到的傅里叶级数的直观认识转移到更为一般的傅里叶变换上来。这两章都讨论了傅里叶变换的很多性质,并且特别强调了卷积性质和相乘性质。特别是卷积性质给频率选择性滤波这样的论题提供了另一个审视角度,而相乘性质则是后续各章有关处理采样和调制的出发点。最后,第4章和第5章的最后一节都利用变换法来确定由微分和差分方程描述的线性时不变系统的频率响应,并用几个例子来说明傅里叶变换如何用来计算此类系统的响应。为了补充这些讨论(以及后面拉普拉斯变换与 z 变换的讨论),这个版本仍将部分分式展开法的讨论作为附录放在书末。

在这两章中是以平行的方式来处理傅里叶分析的。具体而言,在第5章的讨论中可以利用许多在第4章对连续时间情况下所获得的概念和细节,直到第5章结束都强调了连续时间和离散时间傅里叶表示的完全对偶关系;同时,也用对比两者的不同点来加深对各自特殊性质的理解。

熟悉第一版的人会注意到,第二版中第4章和第5章的篇幅大大少于第一版中对应的两章。这不仅仅是由于现在把傅里叶级数放在单独一章来讨论,而且还将几个论题移到了第6章。我们相信这样的安排有几个明显的好处。首先,在三个较短的章中讲授傅里叶分析的基本概念和结果,再与频率选择性滤波概念的引入结合在一起,应该有助于学生总结他们对这些内容掌握和理解的程度,建立有关对频域的某些直观认识并了解其潜在的应用价值。有了第3章到第5章的基础,就可以更详细地讨论几个重要的问题和应用。第6章比较深入地研究了线性时不变系统的时域和频域特性,介绍了频率响应的幅相特性及伯德图表示,并讨论了频率响应中的相位特性对线性时不变系统输出时域特性的影响。另外,还研究了理想和理想滤波器的时域和频域特性,以及两者之间如何折中,而这一点在实际应用中是必须重视的。我们还仔细地分析了一阶与二阶系统,以及它们在连续和离散时间复杂系统的综合和分析中作为基本构造单元所起的作用。最后,分别在连续时间和离散时间系统中讨论了几个较为复杂的滤波器例子。这些例子再与本章习题中所用的其他很多滤波方面的问题结合在一起,就能够给学生呈现出这样一个重要的领域是多么丰富多彩和饶有趣味。虽然第6章提出的问题在第一版中都提到了,但是我们相信在紧接着傅里叶分析基本建立之后将它们重新组织到单独一章中,既可简化在第3章到第5章引入这一重要论题的麻烦,又可以把时域和频域这一重要论题在第6章以一种更为紧密的关系呈现出来。

根据大多数使用第一版教材用户的意见和偏爱,这一版在傅里叶变换讨论中所用的符号已进行了一些修改,以便与大多数在连续时间和离散时间傅里叶变换中所用的符号更一致。具体而言,第3章一开始就将连续时间傅里叶变换记为 $X(j\omega)$,将离散时间傅里叶变换记为 $X(e^{j\omega})$ 。但是,就符号选取而言,对傅里叶变换用什么符号表示并不存在唯一的最好选择。不过,我们以及我们的大多数同行都感到这一版所用的符号更为可取。

第7章采样问题的处理主要着重在采样定理及其含义上。然而,为了正确提出这一问题,采用了从讨论连续时间信号的样本来表示信号和利用内插来重建信号的一般概念入手。在利用频域方法导出采样定理以后,对欠采样(Undersampling)下的混叠现象既从频域又从时域的角度都进行了直观的解释。采样的一种很重要应用是在连续时间信号的离散时间处理上,本章对这一

问题的阐述占据了一定的篇幅。紧接着把问题转向离散时间信号的采样,并用连续时间下讨论所采用的相同方式来建立离散时间采样的基本结果,以及这些基本结果在抽取和内插问题中的应用。连续时间和离散时间采样的其他各种应用仍将在习题中给出。

熟悉第一版的读者会发现这一版的另一个变化:采样与通信系统的提出次序颠倒了。在第二版中将采样放在通信系统之前,一方面是由于能够借助于采样的直观性来提出并描述采样过程和样本重建过程;另一方面也是由于这样的安排便于在第8章中更容易地谈及通信系统的类型,因为它们与采样密切相关,或者基本上依靠利用要被传送信号的采样结果。

第8章对通信系统的讨论包括在一定深度上探讨连续时间正弦幅度调制(AM)。首先,直接利用相乘性质来叙述正弦幅度调制在频域中的效果,并讨论了把原始调制信号恢复出来的原理。接着,讨论了与正弦调制有关的几个问题和应用,其中包括频分多路复用和单边带调制。在习题中还涉及更多的例子和应用。在第8章中还包括了其他几个论题,其中包括脉冲幅度调制和时分多路复用,这些与第7章采样问题有直接联系。的确,我们将这种联系体现得更明显,并且通过介绍和简短地讨论脉冲幅度调制(PAM)和码间干扰,初步涉猎数字通信这一重要领域。最后讨论了频率调制问题,这只是使读者对非线性调制问题有了初步接触。虽然频率调制系统的分析不像幅度调制系统那么直接,但是对频率调制的初步讨论指出了如何利用频域方法对频率调制信号和系统特性的实质有足够的了解。通过这些讨论,以及本章习题中的其他很多调制和通信系统方面的问题,我们相信,学生能够对通信领域的丰富内容以及信号与系统分析方法在其中所起的核心作用得出应有的评价。

第9章和第10章分别讨论拉普拉斯变换和 z 变换。虽然在这两章的最后一节也讨论了这两种变换的单边形式,及其在非零初始条件下求解微分和差分方程中的应用,但文中大部分篇幅都集中在双边变换上。其内容包括:拉普拉斯变换和 z 变换与傅里叶变换之间的关系,有理函数一类的变换及其零极点表示方法,变换的收敛域与被变换信号特性的关系,利用部分分式展开求逆变换,根据零-极点图对系统函数和频率响应进行几何求值,以及变换的基本性质等。另外,在每一章还分别利用这两种变换对线性时不变系统的系统函数的性质和应用进行了讨论,其中包括由微分和差分方程表征的系统及系统函数的确定;利用系统函数的代数关系来构成线性时不变系统的互联,以及具有有理系统函数的系统,其级联型、并联型和直接型方框图表示的构成等。

拉普拉斯变换和 z 变换工具是研究第11章反馈系统的基础。本章以反馈系统的几个重要应用及其性质入手,其中包括如何使一个不稳定的系统变得稳定,设计跟踪系统和降低系统灵敏度等方面的应用。在随后的几节中,将利用前面各章所获得的方法来研究在连续时间和离散时间反馈系统中具有重要意义的三个问题。它们是:根轨迹分析法,奈奎斯特图和奈奎斯特准则,以及对数幅/相图和稳定反馈系统的相位裕度和增益裕度的概念。

信号与系统这一学科的内容极为丰富,有各种可能的途径和方式来进行取材,以形成此类基本课程的内容。与第一版一样,第二版的意图是给教师在组织该方面课程教学时提供很大的灵活性。为使该书具有这样的灵活性和最大的可用性,我们对信号与系统方面的基本课程中的大多数核心内容都进行了全面而深入的讨论。为达到此目的,就有必要删去另外一些内容,如随机信号和状态空间方法的讨论,而这些内容有时也放在信号与系统方面的第一门课中。从传统上讲,很多学校不把这些内容放在这类基础性质的课程中,而是放在本科阶段的后续课程或专门研究这些问题的课程中进行更深入的讨论。虽然本书没有包括状态空间内容的介绍,但是讲授此类课程的教师可以很容易地将它们吸收到有关微分和差分方程问题的讨论中。特别是,在第9章和第10章有关有理系统函数的系统的方框图表示的讨论中,以及具有非零初始条件下单边变换在解微分和差分方程上的应用的讨论中,都可以很自然地引入状态空间表示的内容。

适当深度地选用本书第 1 章到第 5 章的有关内容(其中有些内容可根据教师本人的意见作些删除),再从余下的各章节中挑选一些论题就可以构成本科二、三年级程度的一学期课程的典型内容。例如,一种可能的作法是从第 6 章到第 8 章选取几个基本问题,再加上拉普拉斯变换和 z 变换的内容,或许再加一点有关系统函数的概念在分析反馈系统中的应用等。还有其他各种组成方式,其中包括涵盖状态空间的简单介绍,或者更多地侧重连续时间系统,而把第 5 章和第 10 章,以及第 3 章、第 7 章、第 8 章和第 11 章中有关离散时间的内容均放在次要地位,这些都是可能的。

除了上面提到的那些可能的剪裁方式以外,这本书还可用来作为两学期的线性系统课的基本教材。或者,将信号与系统方面第一门课中本书未用过的部分,再结合一些其他内容就可以形成一门后续课程的基本内容。例如,本书的很多内容都可以和诸如状态空间分析、控制系统、数字信号处理、通信系统及统计信号处理等方面的课程直接衔接。因此,本书的某些内容再结合某些补充材料,就能组成一门后续课程,以便作为一门或多门高年级课程的入门课。事实上,在麻省理工学院一直就是这样做的;并且已经证明,这类新的课程在我们的学生当中不仅仅成为一门受欢迎的课程,而且还是我们的信号与系统类课程中关键的一部分。

与第一版一样,本书写作过程中一直有幸得到很多同事、学生和朋友们帮助、建议和支持。构成本书核心部分的想法和观点一直是我们在讲授信号与系统课的亲身经历中,并在很多与我们共事的同事和学生们的影响下演变而成的。感谢 Ian T. Young 教授对本书第一版所做出的贡献,感谢并欢迎 Hamid Nawab 教在对第二版中例题和习题的重新组织、完善和扩充中所做的一切。感谢 Jason Oppenheim 为本书提供了他的一张原始照片,也感谢 Vivian Berman 为封面设计的完成所提供的设想和帮助。同样,正如在致谢页中所列出的,对于许多学生和同事为第二版的出版在多个方面付出的巨大努力,我们深表谢意。

对 Ray Stata 先生和 Analog Devices 公司通过“电气工程杰出教授席位(Distinguished Professor Chair in Electrical Engineering)”基金对信号处理和本书所做出的慷慨而持续不断的支持,我们表示最诚挚的感谢。感谢麻省理工学院所提供的支持,并为我们创造灵感提供了一个令人鼓舞的氛围。

感谢 Prentice Hall 特别是 Marcia Horton, Tom Robbins, Don Fowley 及其前任,感谢 TKM Productions 的 Ralph Pescatore 及 Prentice Hall 全体制作团队,他们的鼓励、技术支持和热忱帮助一直是这本第二版得以付诸实现的关键。

Alan V. Oppenheim
Alan S. Willsky
于剑桥市麻省理工学院

致 谢

在第二版的出版过程中，非常荣幸地得到很多同事、学生和朋友们的帮助，占用了他们大量的宝贵时间，我们对此表示衷心感谢。他们是：

Jan Maira 和 Ashok Papot 帮助制作和处理了很多图和照片图。

Babak Ayazifar 和 Austin Frakt 帮助更新和汇编了参考文献。

Ramamurthy Mani 准备了本书的习题解答，并帮助制作了不少图。

Michael Daniel 协调管理了第二版制作和修改过程中各版本的 LaTeX 文稿。

John Buck 仔细通读了第二版的文稿。

Robert Becker, Sally Bemus, Maggie Beucler, Ben Halpern, Jon Maira, Chirag Patel 和 Jerry Weinstein 制作了本书各版本的 LaTeX 文稿。

以下各位帮助仔细校对了清样：

Babak Ayazifar

Richard Barron

Rebecca Bates

George Bevis

Sarit Birzon

Nabil Bitar

Nirav Dagli

Anne Findlay

Austin Frakt

Siddhartha Gupta

Christoforos Hadjicostis

Terrence Ho

Mark Ibanez

Seema Jaggi

Patrick Kreidl

Christina Lamarre

Nicholas Laneman

Li Lee

Sean Lindsay

Jeffrey T. Ludwig

Seth Pappas

Adrienne Prahler

Ryan Riddolls

Alan Seefeldt

Sekhar Tatikonda

Shawn Verbout

Kathleen Wage

Alex Wang

Joseph Winograd

绪 论

信号与系统的概念出现在范围广泛的各种领域中,与这些概念有关的思想和方法在很多科学和技术领域起着重要的作用,例如在通信、航空航天、电路设计、声学、地震学、生物工程、能源产生与分配系统、化学过程控制及语音处理等方面。虽然在各个不同领域中所出现的信号与系统的物理性质很不相同,但全都具有两个基本的共同点:即作为一个或几个独立变量函数的信号都包含了有关某些现象性质的信息;而系统总是对给定的信号做出响应,从而产生另外的信号,或产生某些所需的特性。电路中作为时间的函数的电压和电流就是信号的例子,而一个电路本身就是一个系统的例子,这时该电路就会对外加电压和电流做出响应。另一个例子是,当汽车驾驶员踏油门时,汽车的反应就是加速,这时系统就是这部汽车,油门板上的压力就是系统的输入,汽车的速度就是响应。自动诊断心电图的计算机程序也可以看成一个系统,该系统的输入是数字化了的心电图数据,而输出就是参数估值,如心跳率等。一架照相机也是一个系统,该系统接受来自不同光源和物体反射回来的光信号而产生一幅照片。一个机器人手臂也是一个系统,它的动作就是控制输入的响应。

在出现的这些信号与系统的很多方面,存在各种具有重要意义的问题。在某些情况下,对某个特定的系统,我们关注的是怎样详细地知道系统对各种不同输入的响应。例如,对某一电路的分析是为了使该电路对不同的电压和电流源有定量的响应;既要根据飞行员的各种命令,又要根据不同的风力大小来确定一个飞行器的响应。

信号与系统分析的另一个问题不是分析已有的系统,而是把重点放在系统的设计上,所设计的系统要求以特定的方式来处理信号。出现这样问题的一个最普遍的场合是,要设计一个系统以便增强或恢复以某种方式被污损了的信号。例如,当领航员与地面空中交通控制塔通信时,信号就可能受到驾驶舱内严重背景噪声的影响。在这种或很多其他类似情况下,有可能设计出一种系统来保留所要求的信号(这时就是领航员的声音),而抑制掉(至少是近似地)不需要的信号,即噪声。在一般图像恢复和图像增晰的领域也能找到类似的目的。例如,由于摄像设备的限制,大气层的影响,以及在信号传回到地面过程中引起的误差等因素,来自大气深层空间或地球观测卫星所摄取的物景照片就会受到污损,因此照例总是要对从空间返回的图像信号进行处理,以补偿某些被污损的部分。另外,有时需要对这些照片的某些特征予以增强,例如增强河床或断层的线条,以及增强那些在颜色上或黑白程度上有较明显差别的区域边界等。

除了增晰和恢复外,在许多应用中需要设计一个系统用来提取信号中某种特定的信息。从心电图估计心率就是其中一种例子,经济形势预测则是另一种例子。例如,有一组以往的经济数据(如一组股票市场的平均值),希望从分析这组数据来预测未来趋势和其他一些特性,如周期性的变化,而这些变化可以用来对将来的走向进行预测。而在另外一些应用中,重点可能是放在具有某些特别性质的信号设计上。具体而言,在通信应用中,相当大的注意力放在设计信号以满足可靠传输所提出的限制和要求。例如,经由大气层的远距通信就要求使用电磁波频谱中某特别频率部分的信号。通信信号的设计还必须考虑经由大气层传输引起的失真和由其他用户发射的其他信号的干扰同时存在的条件下可靠接收的问题。

信号与系统分析概念和方法的另一类重要应用是用来改变或控制某一已知系统的性能,或者通过选择特定的输入信号,或者利用该系统与其他系统的组合来完成。用于调节化学处理工

厂的控制系统的的设计就属于这类应用的例子。这种类型的工厂安装了各种传感器来检测诸如温度、湿度、化学成分等这些物理信号，控制系统根据测得的这些传感器信号，调节流速和温度之类的量，以控制正在进行中的化学过程。飞机自动驾驶仪的设计和计算机控制系统代表了另一类例子。在这种情况下，飞机控制系统利用测得的飞行速度、高度和航向等信号来调节油门大小、方向舵和副翼的位置之类的变量，以保证飞机沿着指定的航线平稳地飞行并增强对驾驶员命令的反应程度。在以上两个例子中，称为“反馈”的核心概念起了很重要的作用，因为已测得的信号被回授并用来调节一个系统的响应特性。

以上提到的只是信号与系统概念极为广泛应用的几个方面。这些概念之所以很重要，不仅因为它们存在于各种现象和过程中，而且也由于这一整套概念、分析技术和方法论一直被（并持续发展着）用来解决涉及各种信号与系统方面的许多问题，它的发展历史可以追溯到很多个世纪以前。虽然大部分工作都是由某些具体应用促成的，但其中很多概念已在远比当初所预计的应用领域大得多的范围内证明是头等重要的。例如，作为信号与系统频域分析的基础，本书将详细讨论的傅里叶分析方法，其发展可以追溯到从古巴比伦人对天文学的研究直到十八和十九世纪在数学物理学方面的研究。

上面提到的例子中，有些信号是随时间连续变化的，而另一些信号则仅仅在离散时间点上有价值。例如，在电路分析和机械系统中遇到的信号都是随时间连续变化的；而另一方面，每天股票市场的收盘值（即每日停业前的值）就是一个在离散时间点上变化的信号。与连续变量函数的曲线不同，每日收盘的股票值是在给定的离散时间点上的一串序列值。由于对这两类信号的描述以及对这些信号做出响应或处理的系统的描述，都有明显的不同，从而导致了两种并行的信号与系统的分析范畴，其中一个是以连续时间描述的现象和过程，另一个则是以离散时间描述的现象和过程。

有关连续时间信号与系统和离散时间信号与系统的概念和方法，都有着悠久的历史，而且在概念上是戚戚相关的。然而，在历史上由于两者在应用上各行其道，因此它们大部分的研究和发展在一定程度上都是独自进行的。连续时间信号与系统在物理学方面，以及在近代电路理论和通信系统方面的应用有很深的渊源，而离散时间信号与系统方法却在数值分析、统计学，以及与经济学和人口统计学等数据分析应用有关的时间序列分析中有很深的根基。然而，在近几十年内，连续时间和离散时间信号与系统变得日益交织在一起，而在应用上也日益结合。造成这种变化的强大动力来自系统实现和信号产生技术取得的惊人进展。特别是，高速数字计算机、集成电路和尖端高集成度器件制造技术等持续取得进展，使得考虑用时间样本（即转换为离散时间信号）来表示和处理连续时间信号具有越来越多的好处。例如，一架近代高性能飞机的计算机控制系统就是将传感器输出的量（如速度）数字化，以产生一组已采样测量值的序列，然后交由控制系统来处理的。

鉴于连续时间信号与系统和离散时间信号与系统之间的相互关系日益密切，以及与各自有关的一些概念和方法之间的紧密联系，因此本书就选择了以并行的方式来讨论这两种类型的信号与系统。由于两者在很多概念上是类似的（但并不是完全一样），因此并行地处理可以做到在概念和观点上两者互为分享，而又能更好地把注意力放在它们之间的异同点上。另外，从以后的讨论中可以明显看到，某些概念从一种系统引入要比从另一种系统更容易让人接受；而一旦在一种系统中被理解之后，就很容易把它们用到另一系统中。再者，这种并行处理也非常便于理解在连续时间和离散时间结合在一起应用时的很多重要的实际问题，这指的是连续时间信号的采样和用离散时间系统来处理连续时间信号这种情况。

正如到目前为止我们已经叙述过的，信号与系统是一个极为普遍的概念。在这样的普遍意

义下，对于信号与系统的本质仅能做一些概括性的介绍，也只能在最基本的方面讨论它们的一些性质。另一方面，在处理信号与系统时，一种重要而基本的想法是精心地挑选一类子系统，它们都具有若干个特别的性质可资利用，并且可以深入地分析与表征这类信号与系统。本书的重点就是放在一种称为“线性时不变系统”的系统上，由定义这类系统的线性和时不变性引出的一套概念和方法，不仅在实践上具有重要意义，而且在理论上也是完整的。

正如在本绪论中已经强调过的，信号与系统分析已经有了一段很长的历史，并且从中产生出应用领域极为广泛的一套基本方法和基本理论。的确，面对着新问题、新技术和新机遇的挑战，信号与系统分析一直在不断地演变和发展着。我们完全可以期望，技术的进步使日益增长着的复杂系统和信号处理技术的实现成为可能，而且一定会加速这一进程。将来，我们一定会看到信号与系统分析方法和概念能够应用到更为广泛的领域中去。为此，我们感到信号与系统分析这一论题代表了科学家和工程师都必须关注的一整套知识。我们认为，本书所精选的一组内容，这些内容的提出和组织，以及每章习题的考虑，都会最有效地帮助读者在信号与系统方面打下坚实的基础，对其在滤波、采样、通信和反馈系统分析等最重要和最基本的应用方面有所了解，并在形成和解决复杂问题时能够做出明智的选择，采用某一种最有力且广泛适用的方法。

目 录

第 1 章 信号与系统	1
1.0 引言	1
1.1 连续时间和离散时间信号	1
1.1.1 举例与数学表示	1
1.1.2 信号能量与功率	4
1.2 自变量的变换	5
1.2.1 自变量变换举例	6
1.2.2 周期信号	8
1.2.3 偶信号与奇信号	9
1.3 指数信号与正弦信号	10
1.3.1 连续时间复指数信号与正弦信号	10
1.3.2 离散时间复指数信号与正弦信号	14
1.3.3 离散时间复指数序列的周期性质	16
1.4 单位冲激与单位阶跃函数	19
1.4.1 离散时间单位脉冲和单位阶跃序列	19
1.4.2 连续时间单位阶跃和单位冲激函数	21
1.5 连续时间和离散时间系统	24
1.5.1 简单系统举例	25
1.5.2 系统的互联	26
1.6 基本系统性质	28
1.6.1 记忆系统与无记忆系统	28
1.6.2 可逆性与可逆系统	29
1.6.3 因果性	30
1.6.4 稳定性	31
1.6.5 时不变性	32
1.6.6 线性	33
1.7 小结	36
习题	37
第 2 章 线性时不变系统	48
2.0 引言	48
2.1 离散时间线性时不变系统:卷积和	48
2.1.1 用脉冲表示离散时间信号	48
2.1.2 离散时间线性时不变系统的单位脉冲响应及卷积和表示	49
2.2 连续时间线性时不变系统:卷积积分	57
2.2.1 用冲激表示连续时间信号	57
2.2.2 连续时间线性时不变系统的单位冲激响应及卷积积分表示	59

2.3	线性时不变系统的性质	64
2.3.1	交换律性质	64
2.3.2	分配律性质	65
2.3.3	结合律性质	66
2.3.4	有记忆和无记忆线性时不变系统	67
2.3.5	线性时不变系统的可逆性	68
2.3.6	线性时不变系统的因果性	69
2.3.7	线性时不变系统的稳定性	70
2.3.8	线性时不变系统的单位阶跃响应	72
2.4	用微分和差分方程描述的因果线性时不变系统	72
2.4.1	线性常系数微分方程	73
2.4.2	线性常系数差分方程	76
2.4.3	用微分和差分方程描述的一阶系统的方框图表示	78
2.5	奇异函数	80
2.5.1	作为理想化短脉冲的单位冲激	80
2.5.2	通过卷积定义单位冲激	82
2.5.3	单位冲激偶和其他奇异函数	83
2.6	小结	86
	习题	86
第3章	周期信号的傅里叶级数表示	110
3.0	引言	110
3.1	历史回顾	110
3.2	线性时不变系统对复指数信号的响应	113
3.3	连续时间周期信号的傅里叶级数表示	116
3.3.1	成谐波关系的复指数信号的线性组合	116
3.3.2	连续时间周期信号傅里叶级数表示的确定	119
3.4	傅里叶级数的收敛	123
3.5	连续时间傅里叶级数性质	127
3.5.1	线性性质	127
3.5.2	时移性质	127
3.5.3	时间反转	128
3.5.4	时域尺度变换	128
3.5.5	相乘	129
3.5.6	共轭及共轭对称	129
3.5.7	连续时间周期信号的帕斯瓦尔定理	129
3.5.8	连续时间傅里叶级数性质列表	130
3.5.9	举例	130
3.6	离散时间周期信号的傅里叶级数表示	133
3.6.1	成谐波关系的复指数信号的线性组合	133
3.6.2	周期信号傅里叶级数表示的确定	134
3.7	离散时间傅里叶级数性质	139

3.7.1	相乘	140
3.7.2	一次差分	141
3.7.3	离散时间周期信号的帕斯瓦尔定理	141
3.7.4	举例	141
3.8	傅里叶级数与线性时不变系统	144
3.9	滤波	147
3.9.1	频率成形滤波器	147
3.9.2	频率选择性滤波器	151
3.10	用微分方程描述的连续时间滤波器举例	152
3.10.1	简单 RC 低通滤波器	153
3.10.2	简单 RC 高通滤波器	154
3.11	用差分方程描述的离散时间滤波器举例	155
3.11.1	一阶递归离散时间滤波器	156
3.11.2	非递归离散时间滤波器	157
3.12	小结	159
	习题	159
第4章	连续时间傅里叶变换	180
4.0	引言	180
4.1	非周期信号的表示:连续时间傅里叶变换	180
4.1.1	非周期信号傅里叶变换表示的导出	180
4.1.2	傅里叶变换的收敛	183
4.1.3	连续时间傅里叶变换举例	184
4.2	周期信号的傅里叶变换	187
4.3	连续时间傅里叶变换性质	190
4.3.1	线性性质	190
4.3.2	时移性质	191
4.3.3	共轭与共轭对称性	192
4.3.4	微分与积分	194
4.3.5	时间与频率的尺度变换	195
4.3.6	对偶性	196
4.3.7	帕斯瓦尔定理	197
4.4	卷积性质	199
4.4.1	举例	201
4.5	相乘性质	205
4.5.1	具有可变中心频率的频率选择性滤波	207
4.6	傅里叶变换性质和基本傅里叶变换对列表	208
4.7	由线性常系数微分方程表征的系统	210
4.8	小结	212
	习题	212