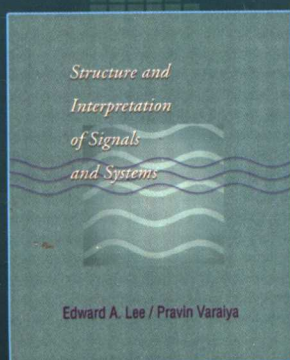


国外电子与通信教材系列



信号与系统 结构精析

Structure and Interpretation
of Signals and Systems



[美] Edward A. Lee 著
Pravin Varaiya

吴利民 杨瑞娟 等译
王振华 向家彬

吴利民 审校



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

信号与系统结构精析

Structure and Interpretation of
Signals and Systems

[美] Edward A. Lee 著
Pravin Varaiya

吴利民 杨瑞娟 王振华 向家彬 等译

吴利民 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是关于“信号与系统”的导论,它是以作者在美国加州大学伯克利分校几年来的成功教学讲稿为基础而编撰的,反映了当代数字世界的真实性。与大多数“信号与系统”教材不同的是,本书对信号与系统的分析方法做了较大的变革。全书从介绍实用的信号与系统出发,利用函数与集合的概念来重新定义了信号与系统,并提出了系统的统一建模方法;论述了状态机的基本原理及组成方法,扩展了线性时不变系统的含义;有机地结合了信号的频率分析及线性时不变系统的频率响应分析;总结了经典的傅里叶变换工具,探讨了信号与系统的频域分析方法与应用。书中的每章安排有小结及习题,其中习题还分为简单题、综合题及思考题。

本书适用于电气工程、通信、计算机科学与工程类的本科生,也可供相关的技术人员参考。

Simplified Chinese edition Copyright © 2006 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Structure and Interpretation Of Signals and Systems, ISBN: 0201745518 by Edward A. Lee & Pravin Varaiya. Copyright © 2003. All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Addison-Wesley.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和Pearson Education培生教育出版亚洲有限公司合作出版。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。

本书封面贴有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:01-2002-5697

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统结构精析 / (美)李(Lee, E. A.)等著;吴利民等译. - 北京:电子工业出版社, 2006.4
(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Structure and Interpretation of Signals and Systems

ISBN 7-121-02399-7

I. 信... II. ①李... ②吴... III. 信号系统-教材 IV. TN911.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第022023号

责任编辑:谭海平 特约编辑:王崧

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:26.5 字数:698千字

印 次:2006年4月第1次印刷

定 价:48.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。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。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

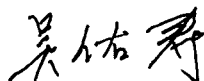
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择和自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

- | | | |
|-----|-----|--|
| 主任 | 吴佑寿 | 中国工程院院士、清华大学教授 |
| 副主任 | 林金桐 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师 |
| | 杨千里 | 总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长
中国通信学会常务理事 |
| 委员 | 林孝康 | 清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 徐安士 | 北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 樊昌信 | 西安电子科技大学教授、博士生导师
中国通信学会理事、IEEE 会士 |
| | 程时昕 | 东南大学教授、博士生导师、移动通信国家重点实验室主任 |
| | 郁道银 | 天津大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 阮秋琦 | 北京交通大学教授、博士生导师
计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 |
| | 张晓林 | 北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员 |
| | 郑宝玉 | 南京邮电大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 朱世华 | 西安交通大学副校长、教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 彭启琮 | 电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员 |
| | 毛军发 | 上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 赵尔沅 | 北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任 |
| | 钟允若 | 原邮电科学研究院副院长、总工程师 |
| | 刘彩 | 中国通信学会副理事长、秘书长 |
| | 杜振民 | 电子工业出版社原副社长 |
| | 王志功 | 东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会主任委员 |
| | 张中兆 | 哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院长 |
| | 范平志 | 西南交通大学教授、博士生导师、计算机与通信工程学院院长 |

译 者 序

Edward A. Lee 与 Pravin Varaiya 均为美国加州大学伯克利分校的著名教授。他们不仅在信号处理、通信、网络系统与控制、传输与混合系统、嵌入式软件、信息论以及工程教育等方面的研究颇有建树,而且还长期担任该校本科生的信号与系统结构分析等课程的教学工作。因此,本书就是基于作者过去四年里在加州大学伯克利分校给电气工程与计算机科学类学生授课的讲稿而改编的。它与大多“信号与系统”教材不同的是,本书提出的对信号与系统的研究方法并不拘泥于电路系统,它着重利用了声音与图像处理系统方面的应用来阐明这种新颖的研究方法。这就意味着它对传统的信号与系统分析方法做了较大的变革。本书着重从计算方法的角度来探讨信号与系统,也是专为电气工程、通信、计算机科学与工程类的那些对现代数字世界感兴趣的学生而编写的。本书最能使读者受益的是,书中采用的信号与系统的分析方法是适用于各种软件系统的。因此,该书被公认为是一本有关“信号与系统”教材内容改革方面的较新教材与工程参考书。

全书共分为 14 章和两个附录。其主要内容是从介绍实用的信号与系统出发,利用函数与集合的概念来重新定义信号与系统,并提出了系统的统一建模方法。论述了状态机的基本原理及组成方法,并将有限状态机用于线性系统的时域分析中。扩展了线性时不变系统的含义,构成混合系统,并证实了统一建模方法的独特优越性。通过对滤波特性的探讨,将信号的频率分析以及线性时不变系统的频率响应分析,有机地结合在一起。总结了经典的傅里叶变换工具,利用频域分析法对信号的抽样及恢复进行了探讨。并深入探讨了信号与系统的频域分析法(如 Z 变换、拉普拉斯变换)及其应用。最后对系统的组成方式及反馈控制进行了总结探讨。本书在每章之后均安排有要点小结及习题,其中习题还分为简单题、思考题与多解题三种类型。

本书由中国人民解放军空军雷达学院信息与通信工程系的多位老师翻译完成。其中吴利民翻译了前言、第 1 章至第 4 章,并负责审校全书;杨瑞绢、秦江敏、肖玉芬、黄美荣、谢维华、赵光辉翻译了第 5 章至第 9 章以及附录部分;向家彬、谭宏翻译了第 10 章和第 11 章,王振华、王晗中翻译了第 12 章至第 14 章。此外,我们要特别感谢华中科技大学电子工程学院的余玉龙老师为我们的翻译工作提出了大量指导性的、细致的宝贵意见,并对所有在各方面给予本书翻译工作巨大帮助的人员深表谢意。由于该书内容新颖翔实,涉猎范围较宽,且原文作者叙述风格别致,加之译者时间仓促、水准有限,致使书中译文差错与疏忽也在所难免,恳请读者斧正并不吝赐教。若有任何批评意见或建议,欢迎发邮件至 wlmq@public.wh.hb.cn。

译者

2006 年于空军雷达学院

前 言

“信号与系统”是一门在电气工程(EE)领域扎根多年的课程。然而,正如我们所知的那样,电只是提供动力的一种形式,它并不给出“信号与系统”本身;加之我们面临现代机械工程与信号处理技术、应用数学与数字组网技术以及计算机科学技术的渗透应用,使得微机电系统(MEMS)在电气工程中占有如此重要的地位;再考虑到控制系统技术是如何有利地应用于航空、航天系统、结构工程、电气系统以及可选系统评估等方面的因素,电气工程(EE)也就失去了它与“电”的紧密关联。因此,随之而来的是“信号与系统”这门传统课程也以不可预料的方式变革着。本书正是基于这些事实来重新研究信号与系统的。

本书着重从计算方法的角度来探讨信号与系统,是专为电气工程、计算机科学与工程类的那些对现代数字问题感兴趣的学生而编写的。书中的探讨方法也特别适用于解决计算机组网、无线通信系统、嵌入式控制、音频与视频信号处理系统中的问题,当然也更适用于解决电路系统中的问题。

由于信号与系统这门学科来自于电路分析中的内容,因此,传统的信号与系统导论内容往往侧重于对电路的应用,它们几乎总是局限于讨论线性时不变系统。如先讨论它的连续时间系统模型,而后将离散时间系统模型作为一个较深的专题来探讨。然而,这些也已经改变了。因为即便是那些纯电气工程专业的毕业生,也更有可能会去从事软件编程,而不一定从事纯电路分析方面的工作,尽管他们仍被人们认为是电气工程师。

本书最能使学生受益的是,从开始就阐明了书中采用的信号与系统的分析方法是适用于软件系统的。最有趣的是,这些分析方法也可用于对那些在我们日常生活中应用普遍、功能重要的计算机与物理装置混合的实用系统的分析。这些物理装置主要有电路、机械控制系统以及实际的媒体。

本书提出的对信号与系统的研究方法是不拘泥于电路的,这也意味着对传统分析方法的一些变革。譬如,在保留信号的原始真实定义的基础上,即定义随时间变化的电压是一种信号,同时也把网络中的数据包序列定义为信号;在坚持认为 RLC 电路是一个系统的同时,又将应用于因特网中数字音频解码的计算机程序定义为系统;在一些系统的状态仍可由微分方程中的变量来完全描述及定义的同时,也将现今大量在计算机寄存器与存储器内存放的数值定义为状态。

本书对信号与系统研究过程中的一些基本限制也有不同。尽管人们仍然面临的是热噪声与光速的限制问题,但我们在考虑这些问题之前,还需考虑一些其他因素的限制。诸如,系统的错综复杂性、可计算性、不规则性以及一些最常见的人为因素的限制。譬如,一个语音频带数据调制解调器用于被设计成传输语音的电话网络中,后者的带宽已被人为地限制在 3 kHz,并且不可改变。然而,这类限制并不来源于系统自身的固有特性,而是由设计者当初强加的。类似地,在基于计算机处理的音频系统中,总会有延时响应及颤抖现象发生,这是由于它的操作系统影响所致。因此,书中也着重讨论系统的组成,以使我们弄清一个系统对另一个系统的限制及影响。

本书对研究信号与系统所要求的数学基础也有改变。虽然我们仍需用到微积分与微分方程,但还常常需要离散数学、集合论以及数理逻辑工具。这是因为,尽管前一类数学也在演变以适应描述现今的物理世界,但作为系统设计者的我们还常常会面临这样一种境地,那就是用传

统的数学工具并不能较好地描述反映系统的抽象特性。因此,书中也把对信号与系统的整个研究建立在一种通用性较强且扎根于基本集合论的基础上。

尽管这些基本的数学研究工具随着我们研究时采用的手段或方法的不同而不同,但对信号与系统的研究方法总是行之有效的。我们认为,正是这种研究系统的方法论,而不是在该过程中采用的某种方法或工具,规范了对信号与系统的研究领域。

本书是基于作者过去的四年里在加州大学伯克利分校给电气工程与计算机科学类 2000 多名学生讲授的课程而编写的,那一段教学经验无疑也给本书增添了一些与众不同的特色。首先,本书对那些即使没有电气工程与计算机科学方面基础知识的学生也适用。其次,读者只需具备一些有关微积分、基本的集合论、级数、一阶线性微分方程、三角学以及基本的复数知识。由于本书附录中包含有集合论与复数,因此对这方面的基础知识的要求相应也低一些。

方法

本书主要论述信号与系统的数学建模、分析方法及其应用,以及它们的数学模型与其计算实现之间的关系。书中探讨如下三个主题。第一个主题是,将集合与函数作为一种通用的语言来描述各种不同的信号与系统。譬如,声音、图像、比特序列这类信号可表示成具有一定的定义域与值域的函数,而系统也可表示成函数,但它们的定义域与值域就是信号的集合本身。譬如,一个调制解调器就可表示成一种将比特序列变换成声音信号的函数。

第二个主题是,复杂的系统可由简单的子系统利用级联、并联与反馈的标准方式连接而成。具体的连接方式确定了该互联系统的特性与子系统的不同。连接的一致性要求系统连接时的输入与输出信号。

最后一个主题是,尽力将数学方面的描述观点(是什么)与实际中如何运作的观点(怎样做)联系在一起。也就是说,把系统的数学分析与它们的具体实现相联系,这也是工程中至关重要的一点。在电路的物理特性已被数学充分描述的去,当电气工程整个仅就电路来考虑时,一切都易如反掌。今天,我们必须设法将系统的数学分析与其大不相同的实现(尤其是软件实现)相联系。书中通过对状态机的研究,对大量实用信号的考虑,已形成了这种结合。当然,这些实用信号并不像它们的数学抽象,它们几乎没有明显的可描述性结构。譬如,语音信号就远比正弦信号表现得丰富有趣。然而,在现今许多的信号与系统教科书中,仍只限于对这类正弦信号的分析。

内容

第 1 章将信号描述为函数。它着重刻画一些常见信号函数的定义域及域值。这类信号既有声音、图像、视频、弹道轨迹信号,又有常用于计算机中存储或运算信息的信号,如字、位序列信号。

第 2 章将系统描述为函数,其定义域与值域就是信号集合的本身。例如,在前一章介绍的电话话筒将声音转换成模拟电信号,后经电话中央控制局的线路插件系统转换成数据比特流,此乃该方面的事例。当然,一些系统也可连接在一起,以便构成一个更复杂的系统。因此,描述这些复杂系统的函数则是那些描述分系统函数的组合。

具体地刻画定义那些描述信号与系统的函数是本书的主要内容。因此,第 3 章开始采用所有定义在有限状态机范围内的状态、状态转移函数以及输出函数的概念来刻画描述系统。第 4 章着重论述状态机可通过不同的连接方式(如级联、并联以及反馈)来构成更有意义的系统。通过反馈控制在系统中的应用,又更加证实了状态机模型的功能。

第5章从一个较深的层次研究了基于时间的系统。它首先研究只需较简单数学理论的离散时间系统,接着研究连续时间系统。书中定义那些线性时不变(LTI)系统为具有零初始状态、线性状态转移函数与线性输出函数的无限状态机。因此,这些系统的输入输出特性即可完全由它们的冲激响应来确定。

第6章将第3章、第4章中涉及的有限状态机与第5章讨论的基于时间的系统相结合,并展示了它们可通过一些有用的方式来构成混合系统,这就大大地扩展了线性时不变系统的可应用性。当然,尽管现实中大多数系统并不是线性时不变的,但许多系统还是具有近似的线性时不变运作模式。本章还利用监控系统的原理来阐明了模态模型的概念。此外,本章也单独地论证了书中采用的统一建模方法的合理性。因为采用这种统一的建模方法远比单独运用状态机或线性时不变方法更有效地给出了系统的一般原理结构框图。

第7章与第8章分别介绍了信号的频率分析与线性时不变系统的频率响应。第9章则通过对滤波的讨论将前两章的内容较好地结合在一起。对这三章的探讨是为了将频域分析的概念作为一个辅助的工具。它虽不同于状态机的概念,但应用时也异常有效。信号频率分析的初衷是用于心理声学中,直到所有四种傅里叶变换(傅里叶级数、傅里叶变换、离散时间傅里叶变换以及离散傅里叶变换)被提出之后,它才逐渐得以发展。由于第一种傅里叶变换即傅里叶级数的概念相对较简单,所以本章先对其进行详细讨论。接着再简短地对其他几种傅里叶变换进行讨论,以作为傅里叶级数的扩展形式。由于在频域分析中用复指数作为本征函数的特点,致使这种分析方法最为适用于线性时不变系统。因此,后者也可完全由它的频率响应来描述,这也是频域分析法在滤波器与反馈控制系统的分析中占有重要地位的主要原因。

第10章包含了经典的傅里叶变换内容。它们主要是四种傅里叶变换的特性与基本信号的变换。第11章则将频域分析法应用到信号的抽样与混叠研究过程中。

第12章到第14章扩展了频域分析技巧,如包括Z变换与拉普拉斯变换。通过它们在信号处理与反馈控制中的应用,论证了这些技巧的基本概念与可用性。从数学的角度来看,Z变换与拉普拉斯变换实际上是对那些绝对不可求和与不可积分的信号进行离散时间与连续时间傅里叶变换的扩展。

书中介绍的统一建模方法可充分用于描述较宽范围内的信号与系统,并可包括那些基于离散事件和那些基于连续与离散并存的时间信号。采用状态机与频域分析法这两种互补的工具,可使对具体的信号与系统分析及实现成为现实。此外,混合系统与模态模型也提供了系统的方式来结合这两种互补工具。本书的研究思路与研究工具及方法可为后续课程(如数字系统、嵌入式软件、通信、信号处理、混合系统及控制等)的学习打下基础。

网站

本书提供一个支持网站:http://www.aw.com/lee_varaiya。它包括如下几个部分:

- **实验部分:**一套基于 MATLAB 与 Simulink 的练习,便于在说明性与执行性观点之间进行折中。MATLAB 属于一种执行性的编程语言,而 Simulink 属于一种方框图语言。在后者中,一个方框可连接那些实现起来较简单的子系统方框,以构成更有用的系统。采用这类配套的 MATLAB 和 Simulink 程序库,可快速构造有用的信号,与使用常规的编程语言如 C++、Java 与 Scheme 相比,这要容易得多。这些实验牵涉到那些比正弦信号更令人有趣的音频、视频与图像信号。
- **应用程序:**一套扩展的交互式应用程序使执行性论点更为鲜明,同时也论证了频率分析的

概念。包括有语音、音乐与图像的示例,以及能展示有限傅里叶级数近似以及复指数与相位复矢量图示的交互式程序。

- **对教师与学生的帮助:**根据讨论主题来安排的一整套网页内容可供教师任课与学生复习之用。由于这些网页集中了许多应用程序,因而可给出比用传统教学内容展示的更强交互式与动态感的展示内容。在加州大学伯克利分校,我们将其作为课堂内黑板教学的一个补充部分,有能力的教师还可以快速下载这些网页及应用程序,这样,即便是在无网络连接教室里也可使用。
- **附加的侧条:**网站还以侧条的方式包含了一些附加的主题,这些主题均超出了书中的内容。譬如,它有对常用于因特网中的图像编码方式的讨论。
- **习题解答:**本书的习题解答可由出版商提供给教师(索取方法请参见书后所附的“教学支持”说明)。

教学特点

本书在内容安排方面具有如下一些显著特点,这些特点使其成为信号与系统导论课程的一本较好教材书。

1. 书中标有“深入研究”的部分能简明地给读者介绍一些更有兴趣的有关主题的扩展、应用以及更高深的内容。它们主要为读者指明进一步研究探讨该主题的方向。
2. “基础知识”部分给读者提供一些不需要较多数学背景知识的基本分析工具与方法。
3. 附录 A 复习基本的集合论,以帮助建立在本书中通用的符号。
4. 附录 B 复习有关复数变量的知识。当然,对在这方面已具有较多知识的学生而言,这一部分是不必要的。
5. 在每章之后的习题中,习题前分别冠以 E, T 和 C 记号,以将它们分类。其中 E 表示简单题, T 表示思考题,而 C 则表示多解题。

符号表示法

本书中采用的符号表示法与通常的信号与系统教科书中的不同。为此,特做如下解释:

定义域与值域。在通常的信号与系统教科书中,总是采用函数自变量的形式来明确表示它的定义域。譬如, $x(n)$ 是一个离散时间信号,而 $x(t)$ 则是一个连续时间信号; $X(j\omega)$ 是连续时间傅里叶变换,而 $X(e^{j\omega})$ 是离散时间傅里叶变换。这样,在定义抽样信号时,它会导致一些明显的错误,如 $x(n) = x(nT)$;或当 $j\omega = e^{j\omega}$ 时,会出现 $X(j\omega) \neq X(e^{j\omega})$ 这类混淆。

因此,本书把一个函数的定义域处理为函数定义的一部分。这样,一个具有离散时间、实数值的信号就可记为一个函数 $x: \text{Integers} \rightarrow \text{Reals}$,且其离散时间傅里叶变换也是一个函数,记为 $x: \text{Reals} \rightarrow \text{Complex}$ 。因此,整个离散时间傅里叶变换本身也是一个函数 X ,它的定义域与值域就是这些函数的集合:

$$DTFT: [\text{Integers} \rightarrow \text{Reals}] \rightarrow [\text{Reals} \rightarrow \text{Complex}]$$

然后,我们就能毫不混淆地写出 $X = DTFT(x)$ 。

函数作为数值。大多数教科书常称表达式 $x(t)$ 是一个函数。其实,把 $x(t)$ 作为函数 x 的值域内的一个数值才是较为合理的。这是因为在讨论系统时,若采用前者的含义,也会引起一些明显的麻烦。为此,许多教科书不得不先费尽口舌地交待这样的概念,即利用表示法 $y(t) =$

$T(x(t))$, 一个系统可视为一个函数。然而, 这又使人容易误解成 T 只对数值 $x(t)$ 起变换作用, 而不是对整个函数 x 。

本书中采用的符号表示法还包括了函数的集合, 这样就可以把系统定义为具有这种定义域与值域集合的函数。譬如, 对于连续时间的卷积, 可记为

$$\text{Convolution} : [\text{Reals} \rightarrow \text{Reals}] \times [\text{Reals} \rightarrow \text{Reals}] \rightarrow [\text{Reals} \rightarrow \text{Reals}]$$

再引入速记符号 $*$, 则有

$$y = x * h = \text{Convolution}(x, h)$$

接着可定义卷积函数为

$$\forall t \in \text{Reals}, y(t) = (x * h)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\tau) y(t - \tau) d\tau$$

要注意上式中的括号。在比较传统的卷积记法中, $y(t) = x(t) * h(t)$ 好像总是意味着 $y(t - T) = x(t - T) * h(t - T)$, 但实际上并非如此。

本书中采用的符号表示法的一个最大优点是, 它适用于那类超出线性时不变特性之外的系统。事实上, 这类系统又不可避免地出现在实际应用中。例如, 离散事件与连续时间系统的混合就是这样的一种系统。

函数的名称。书中在一些需具体解释的场合, 也给函数与变量赋予长名称。这样, 在必要时, 我们倾向于书写 *Sound* 而不用 x 。这一点可遵从软件编写中由来已久的习惯, 因为在那里可读性是由长名称来改进的。有了一个如此丰富的名称集合, 也可帮助人们避免前述的一些容易混淆不清的方面。譬如, 我们可以这样来定义一个抽样音频信号:

$$\text{SampledSound} = \text{Sampler}_T(\text{Sound})$$

如此, 也可帮助填补在系统实现(常常是软件方面)与系统数学模型之间的空隙部分。如何弄清与处理这两者之间的空隙及差异, 也是本书要讨论的一个主要问题。

如何使用本书

在加州大学伯克利分校, 本书的前十一章可在一学期课程的 15 周之内讲完。尽管把拉普拉斯变换、 Z 变换以及反馈控制系统后三章内容留给后续的课程, 但这还是保留了相当精深的教学内容。每周由三次 50 分钟的授课、一小时的习题课与一次 3 小时的实验课组成。其中讲课与习题课由教师执行, 而做实验则通常是由研究生或有经验的高年级学生做助教来指导完成的。实验的基本任务是基于 MATLAB 与 Simulink 的, 它与授课内容紧密配合。书中并不提供任何有关 MATLAB 的教学内容, 但在实验室有这方面的丰富材料, 再结合网上查询就已足够运用了。书末的一些例子及一些习题也是基于 MATLAB 的。

在加州大学伯克利分校, 所有的电气工程与计算机科学类的学生都要选修这门课。在此之后, 还有一门更为传统的信号与系统课程, 它也包含了本课程的最后三章的内容以及频域分析法在通信系统中的应用。然而, 大多数计算机科学类的学生不再选修这门后续课程。而在这种纯电气与计算机工程类的教学安排中, 一种较为理想的方案是用两个季度或两个学期来学完本书的内容。因为本书中的符号表示法以及探讨方法的统一性要比上述这两种不连贯的课程好一些, 何况信号与系统导论课程采用现代的探讨方法, 而后续的课程仍采用传统的研究方法。

致谢

在本书的编写过程中, 我们的许多同事为此做出了贡献。Dave Messerschmitt 在担任加州大

学伯克利分校电气工程与计算机科学系主任期间,初期规划了本书基于的课程思路,后又为这门课程的发展提供了系统的资源。在 Randy Katz, Richard Newton 与 Shankar Sastry 分别担任系主任期间,他们又不断地为这门课程投入了大量资源,以使这门课能作为本科生的基础课程。显然,这样做是需要巨大勇气的,因为在当时对这门课程进行概念化探讨的可行性并未得到验证。

对本书的探讨方法最有影响的莫过于 Tom Henzinger。直到今天,我们仍会不时谈论该探讨方法的细节问题。尤其是对状态机,系统的组成与混合系统的概括大都该归功于 Tom。Gerard Berry 对于我们讨论同步组成的方法也给出了许多重要观点。

我们也深受 Harold Abelson 与 Gerald Jay Sussman 所提出的探讨方法的影响。他们在 *Structure and Interpretation of Computer Programs* 一书(MIT Press, 1996)中采用了这类方法,并且在他们的学科中也面临了类似的转型。正是因为受到了他们的影响,本书才取名为“信号与系统结构精析”。Jim McLellan, Ron Shafer 与 Mark Yoder 对本书也有一定的影响,我们主要借鉴了他们在 *DSP First, A Multimedia Approach* (Prentice-Hall, 1998)一书中关于传统“信号与系统”的开拓性变革思路。Ken Steiglitz 对本课程的实验部分影响重大,这应归功于他的 *DSP Primer: With Applications to Digital Audio and Computer Music* (Addison-Wesley, 1996)一书。

许多同事为本课程的方法应用、示例、实验室建设以及与本书内容相关的网页做出了贡献,包括 Brian, Evans 与 Ferenc Kovac。我们也非常感激 Christopher Hylands 为此提供的技术支撑。Jie Liu 为本书第 6 章提供了黏质块的示例, Yuhong Xiong 为本书的有关章节提供了技术上的股票交易示例。而本书中的其他示例及见解均来自于 Steve Neuendorffer, Cory Sharp 与 Tunc Simsek。

在过去的四年中,每一年均有大约 500 名伯克利分校的学生学习这一门课程,该课程为本书提供了动因。他们采用了本书的前后版本及网页内容。学生们对此课程的不同反馈帮助我们定义了本书的内容结构及讨论层次。由于本课程是在本科生助教的辅导下进行本科教学的,因此助教们的意见也为我们修订与该课程配套的实验课材料提供了较大的帮助。

还要感谢那些帮助过我们的同事,他们一直辛勤耕耘在电气与计算机工程学术领域。他们是:Panos Antsaklis, 圣母玛利亚大学; Gerard Berry, Esterel Technologies, P. R. Kumar, 伊利诺伊大学; Dawn Tilbury, 密歇根大学; Jeff Bier, BDTI 和 Xavier Rodet, 法国 IRCAM。

本书的一些部分经过了 30 多位同行专家的审阅,他们提出的批评意见与评论使我们克服了初期版本中的错误与不合理之处。当然,我们自己应对本书中所表达的观点和存在的错误负责。为此我们尤其要感谢以下各位: Jack Kurzweil, 加州圣何塞大学; Lee Swindlehurst, 杨伯翰大学; Malur K. Sundareshan, 亚利桑那大学; Stéphane Lafortune, 密歇根大学; Ronald E. Nelson, 阿肯色州(州立)理工大学; Ravi Mazumdar, 普度大学; Ratnesh Kumar, 肯塔基大学; Rahul Singh, 圣迭戈大学; Paul Neudorfer, 西雅图大学; R. Mark Nelms, 奥本大学; Chen-Ching Liu, 华盛顿大学; John H. Painter, 康涅狄格大学; James Harris, 加州技术大学; Frank B. Gross, 佛罗里达农机大学; Donald L. Snyder, 华盛顿大学; Theodore E. Djaferis, 马萨诸塞大学; Soura Dasgupta, 艾奥瓦大学; Maurice Felix Aburdene, 柏克诺大学; Don H. Johnson, 赖斯大学。

这些意见与评论是由 Brooks/Cole 公司的 Heather Shelstad, Morgan-Kaufmann 公司的 Denise Penrose 以及 Addison-Wesley 公司的 Susan Hartman 与 Galia Shokry 征求的。我们也非常感谢这些编辑对本书的兴趣以及对我们的鼓励。尤其要感谢 Susan Hartman, Galia Shokry 与 Nancy Lombardi, 他们的热情与处理技巧帮助我们和其他合作者使本书得以按期出版。

五年前我们就开始着手编写本书,但实际花去的时间比我们预期的要长得多。然而,这是值得的,因为随着我们与同行间的长期磋商与学习,我们之间的友谊得以深化。最后要感谢 Rhonda Lee Righter 与 Ruth Varaiya, 他们利用业余时间为本书做出了许多贡献。

目 录

第 1 章 信号与系统	1
1.1 信号	2
1.1.1 音频信号	2
1.1.2 图像	5
1.1.3 视频信号	7
1.1.4 表示物理特性的信号	10
1.1.5 序列	11
1.1.6 离散信号与抽样	12
1.2 系统	16
1.2.1 系统作为函数	17
1.2.2 电信系统	18
1.2.3 音频信号存储与检索	23
1.2.4 调制解调器协商	24
1.2.5 反馈控制系统	25
1.3 小结	28
习题	28
第 2 章 定义信号与系统	30
2.1 定义函数	30
2.1.1 说明型赋值	30
2.1.2 图形	32
2.1.3 表格	34
2.1.4 过程	34
2.1.5 组合	35
2.1.6 说明型与执行型	37
2.2 定义信号	39
2.2.1 说明型定义	39
2.2.2 执行型定义	39
2.2.3 物理建模	40
2.3 定义系统	41
2.3.1 无记忆系统与记忆系统	42
2.3.2 微分方程	43
2.3.3 差分方程	44
2.3.4 利用方框图组成系统	46
2.4 小结	49
习题	49

第 3 章 状态机	55
3.1 状态机的结构	55
3.1.1 更新函数	56
3.1.2 停顿	57
3.2 有限状态机	58
3.2.1 状态转换图	58
3.2.2 更新表	62
3.3 不确定状态机	65
3.3.1 状态转换图	65
3.3.2 集合与函数模型	67
3.4 模拟与双向模拟	69
3.4.1 关联行为	73
3.5 小结	75
习题	75
第 4 章 组合状态机	80
4.1 同步性	80
4.2 并列组合	81
4.3 级联组合	83
4.4 积形式输入和输出	86
4.5 一般前馈组合	88
4.6 分层组合	89
4.7 反馈	91
4.7.1 无输入的反馈组合	92
4.7.2 确定状态输出	95
4.7.3 有输入的反馈组合	97
4.7.4 反馈组合的构建过程	100
4.7.5 穷举搜索	103
4.7.6 不确定状态机	103
4.8 小结	104
习题	104
第 5 章 线性系统	109
5.1 无限状态机的工作	110
5.1.1 时间	111
5.2 线性函数	113
5.3 离散线性系统的 $[A, B, C, D]$ 表示	115
5.3.1 冲激响应	117
5.3.2 一维单输入单输出系统	118
5.3.3 零状态响应和零输入响应	122
5.3.4 多维 SISO 系统	124
5.3.5 多维 MIMO 系统	129

5.3.6 线性输入-输出函数	130
5.4 连续时间状态空间模型	130
5.5 小结	132
习题	132
第6章 混合系统	135
6.1 混合模型	136
6.2 模态模型	137
6.3 自动定时装置	139
6.4 更有趣的动力学	146
6.5 监控系统	150
6.6 形式模型	154
6.7 小结	156
习题	156
第7章 频域	159
7.1 频率分解	159
7.2 相位	162
7.3 空间频率	163
7.4 周期信号和有限长信号	164
7.5 傅里叶级数	166
7.5.1 傅里叶级数的单值性	171
7.5.2 周期信号、有限长信号和非周期信号	171
7.5.3 傅里叶级数对图像的近似	171
7.6 离散时间信号	173
7.6.1 周期性	173
7.6.2 离散时间傅里叶级数	174
7.7 小结	174
习题	174
第8章 频率响应	178
8.1 线性时不变系统	178
8.1.1 时不变性	178
8.1.2 线性	181
8.1.3 线性和时不变	183
8.2 频率响应的求法及应用	185
8.2.1 线性差分方程和线性微分方程	187
8.2.2 复指数傅里叶级数	192
8.2.3 举例	194
8.3 傅里叶级数系数的确定	194
8.3.1 负频率	196
8.4 频率响应与傅里叶级数	197

8.5	复合系统的频率响应	198
8.5.1	级联连接	198
8.5.2	反馈连接	199
8.6	小结	202
	习题	203
第9章	滤波	207
9.1	卷积	208
9.1.1	卷积和与卷积积分	208
9.1.2	冲激信号	211
9.1.3	信号作为加权 δ 函数的求和	212
9.1.4	冲激响应和卷积	214
9.2	频率响应与冲激响应	215
9.3	因果关系	218
9.4	有限冲激响应滤波器	219
9.4.1	FIR 滤波器的设计	220
9.4.2	分贝	222
9.5	无限冲激响应滤波器	224
9.5.1	设计无限冲激响应滤波器	225
9.6	滤波器的实现	226
9.6.1	MATLAB 实现	227
9.6.2	信号流图	228
9.7	小结	230
	习题	231
第10章	傅里叶变换	235
10.1	运算符号	235
10.2	傅里叶级数	235
10.3	离散傅里叶变换	239
10.4	离散时间傅里叶变换	242
10.5	连续时间傅里叶变换	244
10.6	傅里叶变换与傅里叶级数	247
10.6.1	有限信号的傅里叶变换	247
10.6.2	语音信号的傅里叶分析	247
10.6.3	周期信号的傅里叶变换	250
10.7	傅里叶变换的性质	252
10.7.1	卷积	255
10.7.2	共轭对称	256
10.7.3	时间平移	257
10.7.4	线性	259
10.7.5	常数信号	260
10.7.6	频移和调制	261