

信号、系统及推理

艾伦 V. 奥本海姆 (Alan V. Oppenheim)

麻省理工学院 (MIT)

[美]

乔治 C. 维基斯 (George C. Verghese)

麻省理工学院 (MIT)

著

李玉柏 崔琳莉 武畅 译

*Signals, Systems
and Inference*

SIGNALS, SYSTEMS
& INFERENCE



Alan V. Oppenheim & George C. Verghese.
Prentice Hall Signal Processing Series | Alan V. Oppenheim, Series Editor



机械工业出版社
China Machine Press

信号、系统及推理

艾伦 V. 奥本海姆 (Alan V. Oppenheim)

麻省理工学院 (MIT)

[美]

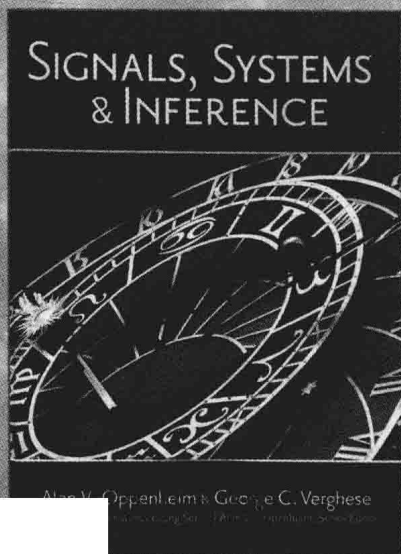
乔治 C. 维基斯 (George C. Verghese)

麻省理工学院 (MIT)

著

李玉柏 崔琳莉 武畅 译

*Signals, Systems
and Inference*



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

信号、系统及推理 / (美) 艾伦 V. 奥本海姆 (Alan V. Oppenheim), (美) 乔治 C. 维基斯 (George C. Verghese) 著; 李玉柏, 崔琳莉, 武畅译. —北京: 机械工业出版社, 2017.7 (国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文: Signals, Systems and Inference

ISBN 978-7-111-57390-6

I. 信… II. ①艾… ②乔… ③李… ④崔… ⑤武… III. 信号系统 IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 150002 号

本书版权登记号: 图字: 01-2016-3983

Authorized translation from the English language edition, entitled *Signals, Systems and Inference*, 9780133943283 by Alan V. Oppenheim, George C. Verghese, published by Pearson Education, Inc, Copyright © 2016.

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 CHINA MACHINE PRESS/HUAZHANG CO., Copyright © 2017.

本书中文简体字版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括台湾地区和香港、澳门特别行政区) 独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

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

本书共有 13 章。第 1 章和第 2 章简要概述了线性时不变系统的假定条件。第 3 章讨论了数字通信中脉冲幅度调制的应用。第 4 ~ 6 章专注于状态空间模型的研究, 主要讨论了单输入单输出的 LTI 情况。第 7 ~ 9 章简要概述了假定的概率前提条件, 包括对静态随机变量的估计和假设检验。第 10 ~ 13 章讨论了广义平稳随机信号, 以及这些信号经 LTI 滤波后的输出信号。第 12 章重点讨论的是线性最小方均误差的信号估计, 也就是维纳滤波。第 13 章的重点是匹配滤波相关的最佳方案的信号检测。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 张梦玲 王颖

责任校对: 李秋荣

印刷: 北京诚信伟业印刷有限公司

版次: 2017 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 23.5

书号: ISBN 978-7-111-57390-6

定价: 99.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

出版者的话

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出 Alan V. Oppenheim、Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Hassan K. Khalil、Gene F. Franklin、Rex Miller 等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气技术丛书”和“国外工业控制与智能制造丛书”为系列出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科、自动化、人工智能等建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息类、控制类、智能制造类等相关教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzsj@hzbook.com

联系电话：(010)88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

译者序

当决定翻译 Alan V. Oppenheim 教授等撰写的本书时，内心既很激动，又很忐忑。激动是因为能让国内更多的读者读到这本经典教材，真心兴奋。而忐忑不仅仅是因为本书有如此丰富而且精致的内容，更重要的是，本书所承载的 Alan V. Oppenheim 等知名学者的撰写 DNA，承载的 MIT 课程建设理念，承载的引领学生发现问题的精神，将这些一一呈现出来对于译者来说是一个非常巨大的挑战。

信号与系统的概念和基本原理对于电子类专业的大学生来说是最基础的。也正是 Alan V. Oppenheim 教授在 1989 年出版的经典教材《Signals and Systems》(1997 年推出了第 2 版)构架了信号与系统相关课程的信号表示、系统表征、响应分析的基础知识，以及时域描述和变换域处理的方法体系。

然而，随着现代技术的高速发展，电子技术类专业的大学生需要具有对复杂工程问题中信号、系统的表征和数学描述能力，掌握复杂工程问题中的信号分析和处理方法，因此仅仅学习“信号与系统”这门课程的内容是明显不够的。这就催生了“信号与系统”后续课程的诞生，以及针对信号与系统的知识体系的拓展和延伸。

本书系统地阐述了这种知识体系的拓展和延伸。

首先是概念的延伸，针对响应信号或者观测信号揭示系统内部存在的动态变化，不论是状态空间模型、可达性和可观测性等概念，还是微分方程、反馈控制的过程描述。这种描述的理论基础在于本书引入的一个概念——推理，其定义为“结合先验知识和可用的信号量测来归纳不确定性的存在性”。这里的先验知识可以是应用系统得到信号量测的某种输入输出描述，或者状态空间描述。推理可以是应用系统中参数和响应动态变化的推演、分析，或者是应用系统内部工作模型的推演、控制与改进过程。

其次是确定性分析到概率分析的拓展。获得被干扰、噪声或者其他不确定因素影响的应用领域的基础概念和基础理论，从而构架信号、系统和概率的知识体系组合。之所以说本书内容非常丰富，就是因为本书立足的由基本原理和概念所构架的信号、系统、概率的研究和应用非常丰富，支持的领域非常广泛，有着丰富的历史重要性。

最后是本书引入的观测器概念，可以将不确定的或者不可观测的系统响应与观测信号分开，同时给推理的算法实现赋予了设计系统来处理相应观测信号的新内涵。有基础的读者可能会联想到信号检测与估计理论，这里将信号与系统状态、模态结合起来，将观测器与滤波理论结合起来，无论是在状态估计还是信号检测上，构成的推理具有数学上的基础和普适性的应用。

尽管知识体系的延伸和应用拓展非常多，但本书的内容组织仍然非常精致。正如 Alan V. Oppenheim 教授在致谢中所说的，本教材的内容源于在 MIT 开展的二十余年课程的教学经验，以及不断丰富和完善的课程讲义，直到 2015 年才决定正式出版。在这个过程中不断有内容被选入，或者被移除，因为作者总是把那些能独立于各种各样繁杂应用的、基于数学和算法以及计算基础的知识组织起来。

正因为本书的内容组织精致，读者可能体会不到像 Alan V. Oppenheim 教授另外两本经典教材《Signals and Systems》和《Discrete-Time Signal Processing》里的那些事无巨细的说明与推导。虽然少了谆谆教导的风格，但本书还是保持了 Alan V. Oppenheim 教授的撰写 DNA：总会将离散和连续系统的分析一并呈现与处理，并讨论连续的离散实现；总是注重微分方程、差分方程以及状态空间的描述，并展示它们在通信、控制、网络、生物医

学和经济等领域中的应用；总是给出丰富的、从概念和应用中抽象出的习题，包括知识点的推导和深入理解的基础习题、高级习题，以及知识内容的扩展、更高级别的扩展习题。

感谢机械工业出版社华章公司引进这本重要的图书，感谢华章公司的王颖副总编委托我们翻译本书。本书第1~6章由武畅翻译，第7~9章以及开场白、前言、索引由崔琳莉翻译，第10~13章由李玉柏翻译，全书由李玉柏统稿。

记得2011年在西安的TI全球核心大学计划国际研讨会上，有幸和Alan V. Oppenheim就信号分析与处理类课程建设进行面对面交流，对Oppenheim奉行的“在大学，我们致力于发现解决方案中的问题；在产业界，我们致力于为问题找到解决方案”的理念印象深刻。因此我们希望每一位读者在信号处理、控制、通信、金融工程、生物医学、物理或其他领域中，能够运用本书的知识、理论和方法去发现问题，同时也希望读者能发现我们翻译的不足和理解上的偏差。恳请广大读者的批评指正，电子邮箱ybli@uestc.edu.cn。

电子科技大学 李玉柏

2017年4月19日于成都

前 言

本书基于大学本科课程内容并有适当的延伸和拓展，目前我们在 MIT 电气工程系和计算机科学系都开设了相应的课程。选课的学生大多是不同工程学科分支的大三和大学生，也有应用科学专业的本科生和研究生。学习这门课程一般要求学生修过两门先修课程：一门是关于信号与系统时域和频域分析方法的导论课程；另一门是关于概率的导论课程。大多数工程专业的学生都在学位课程的早期阶段完成了这两门课程的学习。“信号与系统”课程总是与微分方程相关，也涉及一些基本的线性代数知识。

在许多工程院系，对应用数学特别感兴趣的学生往往会选修一门控制、信号处理或者通信等更专业的本科生课程。除了专业性以外，这类课程通常研究的是确定性信号与系统。而我们的目标是融合信号、系统和概率的相关知识，构建更深入的基础知识体系，以引起更多学生的兴趣。因此对于工程院系和应用科学系来说，本书既可以是本科生的基础教材，也可以是更高阶本科课程的理论基础，甚至作为研究生课程的导论部分。

选择本书作为教材的课程中，关于信号与系统的描述对学生来说通常是新的，比如，通过相关函数和功率谱密度来描述的随机信号及其特征。课程中会介绍一些新的信号与系统特性，如状态空间模型、可达性和可观测性、最佳滤波器和群延迟。同时该课程还强调了基于模型的推理方法，特别是状态估计、信号估计和信号检测部分。

尽管现有的各种教材也涉及了该课程的部分内容，但我们始终没有找到一本覆盖所有想要讨论内容的教材。于是首先有了相关讲义，这也是比较容易实现的部分，然后最终形成了本书。在这个过程中，我们不断地尝试改进和完善课程内容，并调整它们之间的相互顺序。期间，我们也不时将某部分内容包括进来或者删除。多次尝试得出的结论是，我们甚至无法在一个学期的课程中讲授完信息论的基本概念，尽管这些概念对通信系统和推理（更一般情况下）来说非常重要。

正如本书开场白所述，信号、系统和概率一直并将继续是非常有用的知识体系组合，可用于研究信号处理、控制、通信、金融工程、生物医学，以及许多其他涉及连续时间或离散时间并且被干扰、噪声或不确定因素影响的动态变化过程领域。这也是构建全书结构和内容的基础与前提。

本书由 4 个部分组成。第 1 章和第 2 章简要概述了线性时不变 (Linear Time Invariant, LTI) 系统的假定条件，部分素材内容可能并不常见。这两章的关键目的是为后续章节建立起统一的标记符号和概念。第 3 章讨论了数字通信中脉冲幅度调制的应用。

第 4~6 章专注于状态空间模型的研究，主要讨论了单输入单输出的 LTI 情况。其内容很大程度上围绕这些系统的特征模式展开，并简单假设在不同的固有频率下。本书的这部分内容为 LTI 系统的状态观测器引入了基于模型的推理概念，也讨论了相关的反馈控制方案。

第 7~9 章简要概述了假定的概率前提条件，包括对静态随机变量的估计和假设检验。正如第 1 章和第 2 章一样，我们认为在回顾学生可能在早期概率课程中学过的知识的同时，建立本书独有的概率相关符号和概念非常重要。此外，这部分的部分内容，特别是假设检验，可能对一些学生来说比较陌生。

第 10~13 章讨论了广义平稳随机信号，以及这些信号经 LTI 滤波后的输出信号。相关函数和功率谱密度的特征和解释可以用来研究典型的信号估计和信号检测问题。第 12 章重点讨论的是线性最小均方误差的信号估计，也就是维纳滤波。第 13 章的重点是匹配

滤波相关的最佳方案的信号检测。

正如经常所说的，课程的目的是引导学生发现问题而不是解决掉所有问题。本着这种精神，每章的最后一节都给出了延伸阅读。在这些简短的小节中，我们不是一一罗列参考文献，而是对参考素材蕴含的丰富学习资源给出建议。我们给出的文献全部都是书籍而不是论文，而且每次引用都仅限于该书对应的部分。

每一章都包含大量的习题，分为基础习题、高级习题和扩展习题。基础习题对大多数学生来说比较容易；高级习题可能要求高些；扩展习题常常会涉及一些超出本章内容的问题。某些习题需要仿真或者采用合适的计算包来进行计算。鉴于这些计算包的多样性和普遍性，我们并没有围绕任何特定平台来构建计算习题。

本书的内容远多于一学期的课程所能教授的，所以教师或者自学者可以根据需要进行选择。这么多年，我们尝试过不同的选择。如果是更偏向于通信或者信号处理专业的课程，第4~6章(状态空间模型)可以略去，或者只做简单介绍。如果是更偏向于控制专业的课程，第3章、第9章和第13章可以考虑选修。

前面给出了两种选讲方案，接下来详细概述我们目前采用的课程安排。该课程每周两次大课，大约需要13周。大课与相同数量的小班讨论课交织进行，其中小班讨论课对大课中的特定问题进行更多交互式的讨论，并且解答每周的作业。除此之外，我们也会选择性指导小班讨论课。最后还组织了晚上“公共休息室”，每周多次允许学生聚集在教室里相互讨论；当他们做作业的时候，还会有一位教师在现场指导。

在教学过程中，我们总是强调习题更像是概念和知识体系进行学习与汇总的过程，而不是一次测验。我们希望学生本着这种精神对待课后习题。特别是，我们鼓励学生积极合作，分享见解和方法。我们对习题的划分主要是根据学生的反馈。课程安排一般会有一次期中测验和一次期末考试，章后习题会被优先用作测验或考试题目。如果需要的话，课堂上的很多素材也可以提炼成课程设计。

导论课的作用就像开场白在本书中的地位一样。因此，导论课的重点是关注学生可能并不熟悉的预备知识或科目，让学生自己复习余下的部分，这可以通过适当的作业题加以引导。然后就可以直接进入第4~6章的状态空间部分。即使学生之前接触过一些状态空间模型，这里也必定有他们第一次接触的东西，尽管他们通常能够很容易联想到对应的素材。我们不要求学生掌握详细的证明推导过程，如LTI观测器或者状态反馈的特征值的位置，而是期望他们能够理解相关的结论，并知道如何运用到实例中。关于状态空间观测器框架的一个重要知识点就是系统模型在从测量信号到系统推理中起到的作用。

然后我们的课程转向概率模型和随机信号。第7章对概率的回顾主要引出了第8章讨论的最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)和线性MMSE(Linear MMSE, LMMSE)估计。为了更快地开始随机信号的分析，而不是长时间回顾概率的预备知识，我们将第9章中假设检验的学习推迟到了课程末，把它作为第13章中信号检测的引子。这样做的部分依据是第9章和第13章都是关于离散随机量的推理，即假设；而第8章和第12章是关于连续随机变量推理的(L)MMSE估计。因此从第8章直接进入第10章学习随机信号，也就是随机过程，重点讨论广义平稳(Wide-Sense Stationary, WSS)过程的时域分析，以及对这些过程的LTI滤波。

第11章讨论的主题可与第1章的信号变换和能量谱密度联系起来，同时也建立起与第2章的全通滤波器和谱因式分解的关系。这些内容对于第12章中WSS过程的LMMSE(或维纳)滤波也是非常重要的。在大部分课程讲授中，我们省略了因果维纳滤波器的详尽推导，而只是讨论基于一个过程的过去值来预测该过程的将来值的情况。

强烈建议课程的最后一部分回归到第3章，用基于脉冲幅度调制的数字通信来进一步分析假设检验问题。回归到第3章的过程也会涉及第2章关于信道失真和群延迟的知

识。然后再在第9章讨论假设检验范例。这也是学习最后一章(即第13章)中信号检测的基础。

本书的广泛性,以及完成该书项目所涉及的不同背景,意味着我们有许多参考学习其他课程的地方。就如同向书中引用的参考文献学习一样,我们也向参与了很多课程建设工作的学生、助教和教职工同事学习。如果本书能够引导或者帮助有相似发现之旅的读者,能够对他们在构建自己的信号、系统和推理的分析主题上有所帮助,那么本书也就充分达到了预期目的。

关于封面^①

在设计原书封面的过程中，我们幸运地和 Krista Van Guilder 近距离合作。Krista Van Guilder 是一位很有天赋的艺术家，也是 MIT 电子研究实验室(RLE)媒体与设计的经理。封面设计源于我们期望以一种赏心悦目、耳目一新的方式展示出本书的主题。我们对封面的设计从选择图像开始，包括日晷、时钟和星盘。星盘(www.astrolabes.org)发明于两千多年前，盛行于 17 世纪，是许多天文计算的重要仪器，比如根据天体的活动范围和位置确定时间。受这些图像的启发，Krista 通过自己的研究拍摄了这张漂亮的天文钟照片，这个天文钟自 1410 年起就在布拉格(Prague)的老城广场上记录时间。时间(离散的和连续的)当然也是本书的中心。这个表面标记着星盘的天文钟，即 Prague Orloj，显示了太阳和月亮的位置，连同其他许多天文符号一起，被选为封面的主图像。

拍摄 Prague Orloj 的照片有很多，而封面上的这张特别吸引我们。这张照片由 Matteo Foadelli 拍摄于 2009 年，他是意大利贝加莫一位热爱摄影的计算机工程师。那时他与朋友到布拉格度假，带了一台新的数码单反相机。正如他向我们解释的：“我只是想拍一张与通常正面照不一样的天文钟照片。于是我试着接近一点并从侧面拍摄。”我们非常幸运地发现了这张照片，也很感激他同意将这张照片用作本书的封面。

装饰封底的图像^②由一个与众不同的相机——1990 年部署在轨道上的哈勃望远镜拍摄。这幅拍摄于 2001 年的图像，与天文钟形成显著对比，捕捉的是十亿年前银河系留下的光子迹象。如哈勃官方网站(www.hubblesite.org)描述的：

ESO 77-14 的这幅哈勃图像是一幅关于天际舞蹈的绝妙快照，灵感来自于一对大小相似的银河星系。星系间的引力争夺一方面形成连接它们的星际桥梁带，另一方面也造成星体间的断裂带。这个相互作用产生了印第安座和印度的星座，距离地球差不多 5.5 亿光年。两个星系中心间的尘埃带展示了最初的平圆盘(拉伸成了三维立体状)变形的程度。

从哈勃望远镜投射到精确轨道位置，以及随后的数据记录、检索和处理，到生成这样令人惊叹的图像，反映了自罗盘淡出使用 4 个世纪以来，人类获得的信号、系统及推理知识的重要性。然而，这幅图像也唤起了人们无尽的遐想空间。

① 此处介绍的是英文原书的封面，仅供参考。——编辑注

② 感兴趣的读者可从网上查看英文原书的封底配图，本中文版未体现。——编辑注

致 谢

本书的内容来自于二十多年前我们在 MIT 所规划、设计和教授的一门课程。经过不断的尝试以及对内容素材的完善和改进,才有了当前的这个版本。这门课程是电气工程和计算科学系(E ECS)五年制工程硕士学位课程的一部分。我们非常感激 Paul Penfield(时任系主任)、Jeffrey Shapiro(系副主任)和 William Siebert 对构建课程结构所提供的大力帮助。Jeffrey Shapiro 还和我们一起参与了最初课程内容的制定。我们同样感谢后续的部门主管——John Guttag、Rafael Reif、Eric Grimson、Anantha Chandrakasan,感谢他们在课程修订和管理方面给予的帮助。从更广泛的意义上讲,我们的学术生涯能够在这样高水平的学院和充满活力的部门度过,我们觉得非常幸运。MIT 通过科研促进教学的文化传统,以及对卓越教学的认同和追求,对我们都有重大影响。

和我们系里其他课程的教职员工一样,这门课程的教职员工既包括每周上两次大课的主讲教师(他们全权负责课程),也包括小班指导教师和助教(他们定期与小组学生当面对论)。这么多年来很多系里的同事都与我们一起承担过该课程的教学任务,或作为小班指导教师,或作为课程主讲教师。许多学生也曾是出色的、热心的助教。趁此机会,我们想感谢所有为开展这门课程做出各种贡献的人,以及体验过这门课程或内容的学生。

除了我们单独以及联合多次讲授或指导这门课程外,其他参与这门课程教学任务的同事有: Bernard Lesieutre、Charles Rohrs、Jeffrey Shapiro、Gregory Wornell 和 John Wyatt。在这个过程中,他们不仅为课程内容和课程讲义提供了有价值的反馈,还给出了新的见解,编写了新的测试和课后习题。

多年来,担任过小班课指导教师的不仅有才华横溢的教职员工,还有高年级的研究生,我们非常幸运地和他们一起工作。指导过小班课的有: Jinane Abounadi、Elfar Adalsteinsson、Babak Ayazifar、Duane Boning、Petros Boufounos、John Buck、Mujdat Cetin、Jorge Goncalves、Julie Greenberg、Christoforos Hadjicostis、Peter Hagelstein、Thomas Heldt、Steven Isabelle、Franz Kaertner、James Kirtley、Amos Lapidoth、Bernard Lesieutre、Steve Massaquoi、Shay Maymon、Alexandre Megretski、Jose Moura、Asuman Ozdaglar、Michael Perrott、Rajeev Ram、Charles Rohrs、Melanie Rudoy、Jeffrey Shapiro、Ali Shoeb、William Siebert、Vladimir Stojanovic、Collin Stultz、Russell Tredrake、Mitchell Trott、Thomas Weiss、Alan Willsky、Gregory Wornell、John Wyatt、Laura Zager 和 Lizhong Zheng。这些人为学生提供了丰富的学习体验,对课程内容和本书做出了很多贡献。

这段时期内,我们和班上的学生也受益于优秀的助教对该课程的奉献。这些助教是: Irina Abainov、Abubakar Abid、Anthony Accardi、Chalee Asavathiratham、Thomas Baran、Leighton Barnes、Soosan Beheshti、Ballard Blair、Petros Boufounos、Venkat Chandrasekaran、Jon Chu、Aaron Cohen、Roshni Cooper、Ujjaval Desai、Vijay Divi、Shihab Elborai、Baris Krkmen、Siddhartan Govindasamy、Hanhong Gao、James Geraci、Michael Girone、Carlos Gomez-Urbe、Christoforos Hadjicostis、Andrew Halberstadt、Nicholas Hardy、Everest Huang、Irena Hwang、Zahi Karam、Asif Khan、Alaa Kharbouch、Ashish Khisti、Lohith Kini、Alison Laferriere、Ryan Lang、Danial Lashkari、Adrian Lee、Karen Lee、Durodami Lisk、Karen Livescu、Lorenzo Lorilla、Zhipeng Li、Peter Mayer、Rebecca Mieloszyk、Jose Oscar Mur Miranda、Kirimania

Murithi、Akshay Naheta、Kenny Ng、Tri Ngo、Paul Njoroge、Ehimwenma Nosakhare、Uzoma Orji、Tushar Parlikar、Pedro Pinto、Victor Preciado、Andrew Russell、Navid Sabbaghi、Maya Said、Peter Sallaway、Sridevi Sarma、Matthew Secor、Mariam Shanchi、Xiaomeng Shi、Andrew Singer、Lakshminarayan Srinivasan、Brian Stube、Eduardo Sverdlin-Lisker、Kazutaka Takahashi、Afsin Ustundag、Kathleen Wage、Tianyu Wang、Keyuan Xu、HoKei Yee 和 Laura Zager。他们的贡献以各种方式贯穿于本书。

在教授该课程的多年中，同事 Frederick Hennie 一直引领着我们。Agnes Chow 对 EECS 系的行政管理战略和财政方案保证了我们和其他同事能够专注于教学。Lisa Bella 作为系教育主任助手，以令人难以置信的响应能力和耐心，几乎独自完成了每个学期全系百余教授和百余助教的行政方面的工作。我们还要感谢多次授课过程中的行政助理，他们是：Alecia Batson、Margaret Beucler、Dimonika Bray、Susan Davco、Angela Glass、Vivian Mizuno、Sally Santiago、Darla Secor、Eric Stratman 和 Diane Wheeler。

随着该课程在这二十年间的不断发展，伴随课程的讲义也在不断地完善和改进。而这个讲义又最终促使了本书的诞生。学生可以说是这个过程中的主要参与者，体现在问题、要求、挑战、建议、批评和鼓励方面。与 MIT 这些有天赋的、勤奋的、有思想的以及能自由发表意见的学生一起合作，也一直是我们的荣幸。

有时候我们也感叹，当前的版本其实是本书的第 4 版，而前面 3 个版本都没有正式出版过。然而，据任何教材作者所知，所有的教材从最初看上去还不错的课程讲义到最后润色出版，是一项非常艰巨的任务。我们要特别感谢 Leighton Barnes 和 Ballard Blair 所付出的努力，同时还有 Manishika Agaskar、Ganesh Ajjanagadde、Michael Mekonnen 和 Guolong Su。非常感谢 Laura von Bosau 愉快、高效和敏锐地将所有的内容片段拼接成一本书。

我们的系领导坚定地鼓励我们把课程讲义出版成书，而不仅仅是让讲义作为教辅资料存在，因此内容素材变得更加广泛和相对独立。近些年来 Anantha Chandrakasan 的激励更是促成本书的一个关键催化剂。同样一些出版商的热情也非常重要，非常感谢他们。Tom Robbins 早在该课程的前十年期间就看到了潜在的机会，并定期提供有用的建议，那时他就职于 Prentice Hall。Phil Meyler 也在稍后的一个阶段慷慨地提供了详细的反馈。出于对 Pearson 副总裁兼编辑主任 Marcia Horton 以及执行编辑 Andrew Gilfillan 的远见和诚意的尊重，我们选择了这家出版商。他们的耐心、决心和信心对我们意味着很多。特别感谢 Pearson 强大又随和的编辑和制作人员，尤其是高级主编 Scott Disanno、Jouve 的高级项目经理 Pavithra Jayapaul。

正如在关于封面中所说的，非常高兴有机会和 Krista Van Guilder 近距离合作。RLE 也是我们的研究基地，一个为研究者提供创造性环境的地方，也影响着我们的教学，包括本书的编写。Yoel Fink 和 Jeffrey Shapiro 直率的领导，以及 RLE 总部典型的竞争和友好氛围，奠定了 RLE 的基调。

要做好一本精装书，自然要能经受住一路上的各种挑战。其中一个不算最小的挑战是，我们需要就不定期产生的不同意见、直觉、方法和风格达成一致，有时针对的是许多小问题，有时针对的也可能是重大问题。我们像朋友一样开始，相互尊重，这样的关系在解决这些问题上很有帮助。同时，紧密合作、合著出书的经历，也加深了我们彼此之间的尊重和友谊。

在接下来的部分，我们想单独表达一些想法和致谢。

Alan V. Oppenheim

字面理解也好比喻也好，我对本书贡献的大部分 DNA 来自于我的母亲，她对我来说

是一个非凡的导师和榜样。直到现在我仍然惊讶于她的奋斗经历。她的父母从东欧经由埃利斯岛来到美国，作为一个贫穷移民家庭的十个孩子之一的她，设法上了大学，接着在 20 世纪 20 年代末进入了医学院。然后，作为一个单亲母亲，她在公共卫生领域全职工作的同时非常成功地养育大了三个孩子。

我进入 MIT，多少有点意外，1955 年作为一名新生入学，而就在不久之前刚给家里写了封信说可能会在第一学年末去个更有意思的地方。显然，在 MIT 变得对我来说有趣和令人满意之前的长时间里，这里已经是一个奇妙美好的地方，而我也在这里度过了我的整个学术生涯，一开始是作为一名学生，之后是作为一名教职员工。

我一生中 most 幸运的一天，是我走进了那时还年轻的一位助理教授 Amar Bose 的办公室，随后成为他的第一位助教。他最终也成为我的博士论文指导老师。几十年来我从他那里学到的关于教学、科研以及生活的经验对我的影响很大且难以描述。他为自己所做的每件事都设立了最高的标准，他作为教师、投资人和企业家取得的成就就是一个传奇。Tom Stockham 是在我攻读博士期间遇到的另一位年轻的助理教授。他对我的观点的激励和肯定给了我追求目标的勇气。他在 MIT 当教职员工和接着在 MIT 的林肯实验室当研究人员的这段时间内，是数字信号处理未知领域的先驱者之一。经过那段时期以及后来他在犹他大学的研究工作，Tom 成为广为人知的数字音频之父。Tom 是一位卓越的教师、研究者、实践工程师和朋友。我第一次遇见 Bernard (Ben) Gold 是我刚成为 MIT 教职员工不久，而那时他是 EECS 的一名访问学者。他在语音压缩方面的研究给数字信号处理领域带来了许多开创性的贡献。Ben 的智慧、创造力和谦逊的风格总是激励着我。他总是热切地向他身边的人学习，即使这些人是来请教他的。Amar、Tom 和 Ben 教会了我许多事情，包括每一个追求中激情和非凡标准的重要性。他们对我的影响融入了我的生活、职业和这本书中。我想念他们，他们的精神深深地影响着我。

所有的作者都知道，编写教材是一个漫长的、艰难的但又最终回报丰厚的过程。在我的职业生涯中，我有机会编写过一些书，其中部分书有过两个或三个版本。在那些过程中，我很幸运能够同其他非常优秀的合著者合作，除了 George Verghese，还有 Ron Schfer 和 Alan Willsky。这样重要的合作项目常常会拉近彼此的关系，而且我还要很高兴地说，所有的这些过程都伴随着强大的凝聚力和伟大的友谊。

我经常被问到是否热爱写作。我的回答通常是：“写作是艰巨的任务，甚至有时会让人感到痛苦，但是我享受写完的感觉。”完成这项工程不可避免地需要家人和亲密朋友的宽容、耐心、支持与理解，我极其幸运地在我的职业生涯中拥有这些，它们来自我的妻子 Phyllis 以及我们的孩子 Justine 和 Jason，他们总是我无尽快乐的源泉。同时我不胜感激 Nora Moran，感谢她在我写作本书期间给予的特别关怀和鼓励(和鸡汤)。

George C. Verghese

我的父母 George Sr. 和 Mary，分别是在印度喀拉拉邦距离仅有 15 英里(1 英里=1609.344 米)的两个小城镇长大的，但是他们却是在 2500 英里之外的埃塞俄比亚的亚的斯亚贝巴第一次相遇，在 20 世纪 50 年代早期，年轻、自信并富有冒险精神的他们到那里旅游，他们也都是教师。后来在更远的两个大洲，他们继续为我做出了优雅生活的榜样。我要感谢他们给予的一切，包括他们带给我的兄弟。

从小在家里啃着书籍长大，这必定与我能够进入马德拉斯的印度理工学院学习有很大的关系。那里有我最喜欢的教授 V. G. K. Murti(教授网络理论课程)和 K. Radhakrishna Rao(教授电路课程)。他们尊重学生，更是通过他们清晰、完整的思维和教学，以及平易近人的态度，赢得了学生对他们的无数尊重。他们可能也让我觉得成为教授是一个很有魅力的职业。

在纽约州立大学石溪分校，很幸运，Chi-Tsong Chen 介绍我去学习线性系统理论，我

现在仍然记得当时上第一堂课的激动心情，这门课是由所用教材的作者讲授的，非常优雅。几个月以后，我开车横跨全美国到斯坦福大学跟随 Thomas Kailath 工作，这之后的时期是我的人生转变期。那是一段非常美好的时光，尤其是在 Thomas Kailath 完成他的“线性系统”书稿的时候向他学习，同时还可以和他的学生们互动交流。40 年前他毫无疑问只是我的博士论文导师，然而 15 年后他已经成为我家庭的一部分。我继续在其他方面向他学习，仍然敬畏于他的敏锐、渊博、活力和宽宏大量。

当我加入 MIT 时，我想用两年的时间来看我是否会喜欢它。然而，我已经在这里待了 35 年多了。非常幸运能够在如此卓越的研究团队中工作，以及与造就这样团队的学生和教职员工一起共事。与 Alan Oppenheim 一起工作更是一大亮点。

我的朋友和大家庭帮助我专心于书稿写作工作，我非常感激他们。如果下次他们问我的时候，听到我不再是写作上一次提到的书，毫无疑问他们会大大地松了一口气。在完成这本书过程中，我亲爱的妻子 Ann 给予我非常大的耐心和理解，这远远超过我的预期。不过一旦触碰到她的底限，她就拖着我去休假，而我总是发现我比她更需要这样的放松。没有她的宽容，我是无法顺利完成这项任务的。我们的女儿 Deia 和 Amaya 已经开始了自己设计的人生，她们是我最大的幸福。

史瓦恩小一

开 场 白

信号、系统及推理

就本书所指的概念而言，至少人类从记录和分析数值数据开始就对信号感兴趣了，比如，跟踪气候、贸易、人口、疾病和天体运动。我们一直沉浸在信号之中，通过感官感受它们，通过仪器测量它们以及分析、改变和关联它们。

系统和信号是紧密联系在一起的。在许多情况下，理解那些产生令人感兴趣的信号的系统的行为是很重要的。而且，收集、解释、建模、变换和利用信号所带来的挑战，促使我们设计和实现系统，并产生新的信号来控制 and 操纵系统。

本书用到的推理，指的是结合先验知识和可用的信号量测值来归纳不确定性的存在性。先验知识可能是量测信号的部分指定模型。推理可能与这种模型的结构和改进有关系。推理算法的实现也需要设计系统来处理这些量测的信号。

涉及信号、系统及推理的概念和方法的应用，在自然科学、工程、医学和社会科学领域无处不在。然而，数学、算法和计算基础往往会演变成在很大程度上独立于特定的应用程序。这些常见的基础知识也是本书关注的重点。

一小段历史

星盘^[1]可以视为信号、系统及推理在几个世纪前的一个复杂实例，它是中世纪最受欢迎的天文仪器，除了用来绘制天体位置之外，还可以导航和记录时间。大概在公元 150 年，Alexandria 的 Ptolemy 就详细描述了球面投影，这也是形成星盘术的基础；由 Phodes 的 Hipparchus 提出的三角框架甚至发展得更早，大概是公元前 180 年。而仪器本身大概是在公元 400 年出现的，广泛使用则是在 17 世纪前十年。正如在关于封面中提到的，表面镶嵌星盘的 Prague Orloj 建造于 1410 年。

信号、系统及推理的相互影响也在 Carl Friedrich Gauss 关于谷神星(Ceres)位置的著名预言中很好地诠释过^[2]，几乎在整整一年后这颗小行星又再次消失。现在都知道谷神星是小行星带中最大的行星，和冥王星一起，被划分为矮行星。Plaermo 的天文学家 Giuseppe Piazzi 在 1801 年的新年第一天发现了这颗行星，但是只能在它消失于耀眼阳光下的六周前跟踪它在太空中只有几度弧线的运动轨迹。那时引起大家主要兴趣的是在火星和木星之间是否可能存在一个新的行星。24 岁的 Gauss 仅仅用了 Piazzi 的 3 次观测结果，并基于天体运动轨迹的开普勒模型衍生出的决策组合和简化方程，以及许多天的手工计算，就生成了对谷神星轨道的估计。其他天文学家(通常假设圆形而不是椭圆的运动轨迹)的预测是无法找到被目击到的这颗行星。然而，根据 Gauss 操作规范的成功观测已记录于那年的 12 月初和新年前夜。正如 Gauss 所说的，他是“还原瞬变来观测”。他把后期改进的观测方法归因于 Piazzi 的全部 19 次观测而不是只有 3 次，并把它应用于其他天体的运动中。Gauss 还用到了最小二乘法，这也是他在几年前就推导过的。本书第 8 章主要讨论与随机变量最小均方误差估计相关的主题，第 12 章将这部分内容扩展到随机信号的估计。

直到 1805 年，仍然受小行星轨道插值测量问题的启发，Gauss 开发了用于计算有限三角级数的有效算法^[3]。遗憾的是，他从来没有发表他的算法，尽管这个算法出现在了去世 60 年以后的作品集里。后来这个算法的变体被其他人独立地重新发现，用于解决在不同设置环境下调和级数的拟合问题，如表示气压或地下温度的变化，计算修正轮船上的

罗盘，从晶体中建立 X 射线衍射数据的模型。这些算法变体中最广为人知的，就是通常所说的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)，由 James Cooley 和 John Turkey^[4] 在 1965 年发表。当可编程数字计算机普遍应用于科学和工程领域的时代到来时，FFT 很快得到广泛应用，并产生了深远影响。

本书讨论的许多基本概念和分析工具既有确定性系统也有随机系统，如在第 1 章和第 7 章中所概述的，而这些都可以追溯到大概 Gauss 时代的数学家和科学家的工作，包括 Pierre-Simon Laplace 和 Jean-Baptiste Joseph Fourier，当然在他们之后也有很多杰出的贡献。现今 Laplace 通常是和拉普拉斯变换联系在一起，其实他对概率论有更重要的贡献，这是因为他在 1812 年发表了该学科的专著并且是中心极限定理的“发现者”。本书其他部分内容直接源于 1800 年后工程和应用科学领域取得的进展。

19 世纪 30 年代电报的发明引发了一场通信领域的技术变革^[5]，这场变革对本书所有主题相关的理论和实践都有重大影响。同时也引领了其他领域的发展，如交通运输和天气预报，部分原因是现今消息的传播速度比起马、火车和风暴快多了。几年之内由点和线构成的摩尔斯密码可以通过电缆跨大洲传输了。紧接着是 19 世纪 70 年代的电话、20 世纪前 10 年的无线电报和 AM 无线电、20 世纪 30 年代的 FM 无线电和电视，以及 20 世纪 40 年代的雷达。今天我们已经拥有了卫星通信、无线互联网和 GPS 导航。

这些变革技术促使和加强了我们在信号、系统及推理方面的研究，是电子工程领域各种技术创造性发展的重要催化剂。这需要有效地产生电子信号或者电磁波、表征传输介质(使得这些信号以可预测的方式传播)、设计各种中间阶段必需的滤波器和放大器，以及在嵌入信息的发射机和提取目标信息的接收机中开发适当的信号处理电路和系统。现今对工程学位课程中信号与系统的研究，以电路系统为系统的基本例子，开始于 20 世纪 30 年代和 40 年代。本书第 2 章描述的部分概念主要来自于通信电路和传输线。

与通信技术并行发展的有控制系统的分析和设计。其中包括模拟计算，其目的在于对建模不同系统的微分方程进行仿真。尽管这些概念在 50 多年前就已描述，但第一次实用的机械实现大概是在 1930 年由 Vannevar Bush 和其他工程师研制的微分分析仪。利用了运算放大器的更灵活和功能更强大的电子版本(也就是模拟计算机)从 20 世纪 50 年代开始广泛使用，直到它们被 20 世纪 80 年代出现的数字计算机取代。

借助反馈能够自动调整的仪器设计至少可以追溯到大约公元前 250 年，如 Alexandria 的 Ctesibius 的水时钟。工业时代最早也最重要的反馈应用是 1788 年瓦特(James Watt)用来调整蒸汽发动机速度的离心调速器，但是直到 1868 年，麦克斯韦(James Clerk Maxwell)^[6]才揭示了如何用这样的离心调速器来分析动态稳定性。反馈控制在 20 世纪初期开始普遍应用于工业系统。与此相关联的许多数学理论广泛应用于今天——相关的研究学者有 20 世纪 20 年代和 30 年代贝尔实验室的 Harold Black、Harry Nyquist 和 Hendrik Bode 等，而这些理论其实在设计通信和信号处理领域中稳定的、鲁棒的电子放大器和振荡器时就得以发展了。关于反馈控制其他方面的研究，受到工业生产、化学过程、发电技术、交通运输以及相似场景规范中伺服机制设计的启发。19 世纪 90 年代李雅普诺夫(Aleksandr Lyapunov)在线性和非线性系统稳定性方面的研究利用状态空间的形式加以描述，不过这项工作 在 20 世纪 60 年代前并不广为人知，而现今这已经成为系统和控制理论中的重要部分。这些状态空间模型和方法包括平衡状态、稳定性、状态估计的量测驱动仿真和反馈控制，分别在第 4~6 章中讨论。

反馈机制在生命系统中也扮演着重要角色，正如 1865 年生理学家 Claud Bernard 明确描述的那样。20 世纪早期，随着通信和控制领域中数学研究的发展，Norbert Wiener 和他的同事认识到反馈在心理学、生理学、生物学和社会科学等学科中的共性和重要性。随着有关动物和机器的控制和通信研究^[7]，最终在 20 世纪 40 年代有了 Wiener 对控制论的定义和详细阐述(1948 年)。

对于通信、控制及信号处理中的信号、系统及推理问题，不可避免地要处理由非理想和低性能器件引起的失真和误差。反馈通常正好用来克服这类不足。相关联的一个问题是随机干扰，它能给系统行为带来不确定性。这些随机干扰能够破坏通信信道或接收机中的信号，影响反馈控制系统的性能，也能影响推断结果的可靠性。通过展示如何以概率方式建立随机干扰模型，并在时域和频域表征它们，数学理论在这些应用中发挥了重要作用。从 20 世纪 20 年代开始，Wiener^[8]的研究工作奠定了在这些领域以及相关领域中工程应用的基础。在他的一篇关于时间级数^[9]的外插、内插和平滑处理的著名报告中，将傅里叶分析和随机过程的概念带入信号处理和推理的实践运用中，这是一个重大进步。在第 8~11 章的基础上，第 12 章讨论了一类与 Wiener 的名字相关的滤波问题，展示了如何通过随机过程的模型为滤波和预测提供基础。

1948 年香农(Claude Shannon)发表了引发技术革命的论文^[10]，本质上产生了信息论。他把信息源本身看作一个离散的随机过程，引入了信息、熵、信道容量和编码的概念，而至今这些概念仍然是该领域的参考框架。正如在前言中提到的，信息论已经超出了本书讨论的范畴。然而，香农的工作开启了数字通信时代。第 3 章关于脉冲幅度调制的素材内容涉及奈奎斯特(Nyquist)的主要贡献，这些贡献在数字通信中具有重要的实际意义。第 9~13 章所讨论的噪声中的信号检测也是数字通信及其他许多应用中的基本知识点。

如本开场白开始所指出的，有着悠久历史并与本书内容有关系的另一个研究领域是时间级数，这不仅体现在自然科学(如天文学、气象学)和工程领域，还体现在经济学和无处不在的社会科学领域。时间级数分析的一个典型目标是利用量测的噪声数据去构建因果动态的模型，然后去推知这些信号将来的值。其中一个特别关注点是检测和利用数据中可能潜在的任何趋势或周期性。这里所考虑的问题类似于那些激励 Wiener 和其他研究者的问题，需要的数学工具部分重叠，不过时间级数的研究文献更趋向于应用驱动型和以数据为中心。比如，第 11 章介绍的周期图的概念，首次出现在这类文献中的应用就是作为随机过程中检测潜在周期性的工具^[11]。

在过去的半个世纪中出现的实时数字计算能力对信号、系统及推理产生了重大影响，也由此产生了新的理论公式。实时计算的一个早期示例是彻底地改变信号处理和控制中心问题的卡尔曼滤波器，这将卡尔曼滤波推广到多个领域，大大拓展了它的应用。开创性的状态方程公式^[12]由 Rudolf Kalman 在 1960 年引入，用于研究信号滤波中利用递推最小二乘法对输出目标信号的系统进行状态估计。滤波器的计算算法与系统的操作并行运行，计算结果也可以纳入反馈控制律。卡尔曼滤波器最初应用于空间导航，而今已广泛使用了。卡尔曼滤波器和第 6 章讨论的状态观测器有联系，而与维纳滤波器的关系将在第 12 章阐述。

一点展望

21 世纪以来，信号、系统及推理中最引人注目的发展，当属巨大的分布式网络计算能力，包括小型、廉价和移动的运算终端。计算、通信、控制和信号处理领域的进步使得它们在很大程度上相互连接和作用，这在互联网之初的 20 世纪 60 年代仅有少数人能够预见，其中就有 J. C. R. Licklider^[13]。让这份憧憬变为现实的一个转变事件是 Tim Berners-Lee 在 1989 年发明的万维网。

连续和离散时间技术的紧密耦合变得越来越重要。数字信号、通信和计算通常相互作用于模拟物理对象之间，如汽车系统、娱乐活动、机器人学、人机接口、航空电子学、智能电网、医疗器械等。这也越来越难把一个给定的工程设备或组件划分给通信、控制、信号处理或者其他专用领域。这些领域会在不同的时间以不同的组合方式协同合作。“信息物理系统”一词通常描述用于联合监测与控制的嵌入式计算机和分布式物理过程之间的网络互联结合体^[14]。