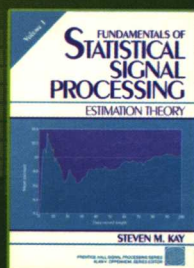


国外电子与通信教材系列

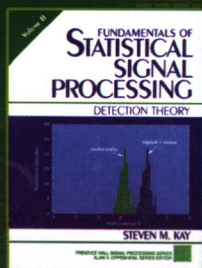


# 统计信号处理基础

## —— 估计与检测理论



**Fundamentals of  
Statistical Signal Processing**  
Volume I: Estimation Theory



**Fundamentals of  
Statistical Signal Processing**  
Volume II: Detection Theory

[美] Steven M. Kay 著

罗鹏飞 张文明 刘 忠 赵艳丽 等译

罗鹏飞 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

# 统计信号处理基础

## ——估计与检测理论

Fundamentals of Statistical Signal Processing

Volume I: Estimation Theory

Fundamentals of Statistical Signal Processing

Volume II: Detection Theory

[美] Steven M. Kay 著

罗鹏飞 张文明 刘忠 赵艳丽 等译

罗鹏飞 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内容简介

本书是一部经典的有关统计信号处理的权威著作。全书分为两卷,分别讲解了统计信号处理的估计理论和检测理论。

第一卷详细介绍了经典估计理论和贝叶斯估计,总结了各种估计方法,考虑了维纳滤波和卡尔曼滤波,并介绍了对复数据和参数的估计方法。本卷给出了大量的应用实例,范围包括高分辨率谱分析、系统辨识、数字滤波器设计、自适应噪声对消、自适应波束形成、跟踪和定位等;并且设计了大量的习题以加深读者对基本概念的理解。

第二卷全面介绍了计算机上实现的最佳检测算法,并且重点介绍了现实中的信号处理应用,包括现代语音、通信技术及传统的声呐/雷达系统。本卷从检测的基础理论开始,回顾了高斯、 $\chi^2$ 、 $F$ 、瑞利及莱斯概率密度;讲解了高斯随机变量的二次型,以及渐近高斯概率密度和蒙特卡洛性能评估;介绍了基于简单假设检验的检测理论基础,包括 Neyman-Pearson 定理、无关数据的处理、贝叶斯风险、多元假设检验,以及确定性信号和随机信号的检测;最后详细分析了适合于未知信号和未知噪声参数的复合假设检验。

本书可以作为电子信息类专业统计信号处理课程的研究生教材或教学参考书,也可供从事信号处理的教学、科研和工程技术人员参考。

Authorized translation from the English language edition, entitled *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume I: Estimation Theory*, ISBN: 0133457117 by Steven M. Kay, published by Pearson Education, Inc, publishing as Prentice Hall PTR, Copyright © 1993.

Authorized translation from the English language edition, entitled *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume II: Detection Theory*, ISBN: 013504135X by Steven M. Kay, published by Pearson Education, Inc, publishing as Prentice Hall PTR, Copyright © 1998.

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.

Simplified Chinese language edition published by Publishing House of Electronics Industry, Copyright © 2006.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China excluding Hong Kong, Macau and Taiwan.

本书中文简体专有翻译出版权由 Pearson 教育集团所属的 Prentice Hall PTR 授予电子工业出版社。其原文版权及中文翻译出版权受法律保护。未经许可,不得以任何形式或手段复制或抄袭本书内容。

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)发行与销售。

版权贸易合同登记号:图字:01-2002-4052 01-2002-4053

图书在版编目(CIP)数据

统计信号处理基础——估计与检测理论/(美)凯(Kay, S. M.)著;罗鹏飞等译.

北京:电子工业出版社,2006.7

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume I: Estimation Theory*

*Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume II: Detection Theory*

ISBN 7-121-02581-7

I. 统... II. ①凯... ②罗... III. 统计信号-信号处理 IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第075682号

责任编辑:冯小贝

印刷者:北京兴华印刷厂

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:56.5 字数:1446千字

印次:2006年7月第1次印刷

定价:89.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@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。

## 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<br>中国通信学会常务理事、博士生导师                                    |
| 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<br>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   |
|     | 樊昌信                        | 西安电子科技大学教授、博士生导师<br>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  |
|     | 郁道银                        | 天津大学副校长、教授、博士生导师<br>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<br>计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长<br>国务院学位委员会学科评议组成员                   |
|     | 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<br>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副主任委员<br>中国电子学会常务理事 |
|     | 郑宝玉                        | 南京邮电大学副校长、教授、博士生导师<br>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<br>教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员                            |
|     | 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<br>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<br>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兼秘书长，教授级高工<br>信息产业部通信科技委副主任   |
|     | 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<br>教育部高等学校电子电气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院长  |
| 范平志 | 西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长 |   |

## 译者序

Steven M. Kay 是美国 Rhode Island 大学电子与计算机工程系的教授，并且是信号处理方面的国际知名学者，一直致力于数学统计方法在数字信号处理中的应用研究。1989 年，由于他在参数谱估计与检测的理论和应用方面做出的突出贡献而被选为 IEEE 的高级会员。Kay 教授还承担了许多本科生和研究生的教学工作，他讲授的本科生课程有“线性系统”、“线性系统与信号”，研究生课程有“线性变换分析”、“数字信号处理”、“随机过程导论”、“通信理论”、“估计理论”、“调制与检测”和“信号处理中的高级专题（现代谱估计）”等。

本书的英文原版自出版之后，已被世界许多大学选为“统计信号处理”研究生课程的教材或教学参考书。作者以多年的教学经验为基础撰写了本书，并通过易于理解的方法介绍了估计理论和检测理论的基本思想。本书共分为两卷，每卷的第 1 章分别介绍了估计理论和检测理论的基本概念，并以浅显易懂的方式阐述了检测与估计的基本概念和方法，使读者在一开始就对统计信号处理的基本思想和原理有一个大致的了解。在随后的各章中又延续了这样一种指导思想，即在每章的开头就用一节来概述本章的内容和主要结论。本书最为突出的一个特点是提供了大量的实例，无论是讲解估计理论还是检测理论，作者都以几个简单而又常用的例子来阐述检测、估计的基本理论与方法，读者在阅读本书时可以通过这些例子来比较各种方法的异同，并加深对概念的理解和掌握。此外，每章在介绍完基本的理论方法后都给出了一个信号处理应用实例。这些例子的涉及面比较广，都是作者结合课题研究而编写的各个应用领域的人门例子。在雷达、通信、自动控制、语音信号处理、生物医学、时间序列分析与谱估计等应用领域遇到的许多统计信号处理问题，都可以在本书的例子或习题中找到解决问题的方法，甚至可以直接找到答案。本书的每一章都附有大量的习题，这些习题与每章的内容紧密结合，其中很多是书中结论的证明或进一步的解释，同时也是本书内容的重要组成部分。许多定理的证明都在每章的附录中给出，书中较少有算法的繁琐推导，而把主要的精力放在对基本概念的阐述上。

本书的每一卷都是作者针对一个学期约 50~60 学时的课程编写的，而在我国高校的电子信息类专业的研究生课程体系中，“统计信号处理”的课程一般是 50~60 学时，其中包括了检测、估计和最佳滤波的内容，因此在选用本书作为教材时需要对其进行一些取舍。译者承担了多年的“统计信号处理”研究生课程的教学，在近来年的教学中也参考了本书的许多内容。因此，译者可以为选用本书作为教材的教师提供一些参考意见，并且交流教学的经验与体会。

参加本书翻译工作的有罗鹏飞（前言；第一卷：第 1 章~第 6 章、第 13 章~第 14 章；第二卷：第 1 章~第 9 章、第 11 章）、张文明（第二卷：第 10 章、第 12 章~第 13 章）、刘忠（第一卷：第 7 章~第 8 章）、赵艳丽（第一卷：第 10 章~第 12 章、附录）、张亮（第一卷：第 15 章）、刘剑（第一卷：第 9 章）。参加翻译、校对和译稿资料整理的还有谭全元、陈瑛、罗佳莹、杨建华、王世希、杨世海、朱国富、田传艳、兰海滨、郭春、沈英春、肖旭、李盾、丹梅、谢小霞、徐振海、曾勇府。最后，由罗鹏飞对全书的译文进行了校对和整理。

由于译者的水平有限，文中难免有不当之处，敬请读者批评指正。



# 前 言

本书的第一卷(统计信号处理基础——估计理论)主要描述了从噪声中接收的信号里提取信息的统计参数估计的应用,第二卷(统计信号处理基础——检测理论)主要讲解了噪声中信号检测的统计假设检验的应用。这本书为读者提供了统计信号处理的理论和应用的全面介绍。

在有关统计学的许多著作中,参数估计和假设检验是必不可少的主题。这些著作既有统计学家撰写的,也有应用统计技术的专家编著的,前者注重理论的严密性,后者则更为强调实际的应用,本书则试图在两个方面达到平衡。这本书的读者群定位在从事信号处理算法的设计与实现的人员,我们把重点放在得到最佳估计算法和最佳检测算法上,并且这些算法可以在数字计算机上实现。因此,假定数据集为连续时间波形的采样或是一个数据点序列,并把那些是得到一个最佳估计器(检测器)和分析其性能的重要方法作为选择的主题。于是,本书省略了那些比较难懂的理论叙述,更多的内容请参见相关的参考文献。

通过一些很好的例子来理解和掌握参数估计理论和检测理论,这是作者认为的最好方法,因此本书运用了大量的实例来说明相关的理论。同时,书中还给出了其他一些例子,从而将理论应用到当前感兴趣的实际信号处理问题。本书还提供了大量的习题,这些习题包含了从理论性的简单应用到基本概念的发展。为了帮助读者更好地理解,在每章的开始便给出了这一章的小结部分。

## 统计信号处理基础——估计理论

第14章给出了所有基本估计方法的概述,以及选择一个特定估计量的基本原理。第2章~第9章首先讨论了经典的估计问题,接着在第10章~第13章讨论了贝叶斯估计问题。这样的结构安排对于分析两种基本方法的差异是有帮助的。最后,也是为了清晰起见,我们首先介绍标量参数的估计原理,然后扩展到矢量情况。这是因为矢量估计要求的矩阵代数有时可能会使主要的概念变得模糊。

## 统计信号处理基础——检测理论

我们广泛使用了MATLAB科学程序设计语言(4.2b版)来得到计算机产生的结果。同时书中也给出了部分MATLAB程序清单,这些程序对于读者肯定是有利的。第11章给出了所有基本检测方法的概述和选择一个特定方法的基本原理。第3章~第5章描述了基于简单假设检验的检测,而第6章~第9章给出了基于复合假设检验(适合于未知参数)的检测。其他章节介绍了非高斯信号的检测(第10章),模型变化的检测(第12章),以及在阵列处理中复/矢量数据的扩展(第13章)。

本书是根据Rhode Island大学估计理论和检测理论的研究生课程编写的,并且包含了更多的内容。必要的背景知识包括数字信号处理的基础、概率与随机过程、线性代数与矩阵理论。这本书也适用于自学,其中的概念对于学生和工程师都是很实用的。



# 目 录

## 第一卷:统计信号处理基础——估计理论

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 引言 .....                | 3  |
| 1.1 信号处理中的估计 .....            | 3  |
| 1.2 估计的数学问题 .....             | 7  |
| 1.3 估计量性能评估 .....             | 9  |
| 1.4 几点说明 .....                | 11 |
| 参考文献 .....                    | 12 |
| 习题 .....                      | 12 |
| 第 2 章 最小方差无偏估计 .....          | 14 |
| 2.1 引言 .....                  | 14 |
| 2.2 小结 .....                  | 14 |
| 2.3 无偏估计量 .....               | 14 |
| 2.4 最小方差准则 .....              | 17 |
| 2.5 最小方差无偏估计的存在性 .....        | 18 |
| 2.6 求最小方差无偏估计量 .....          | 19 |
| 2.7 扩展到矢量参数 .....             | 20 |
| 参考文献 .....                    | 20 |
| 习题 .....                      | 20 |
| 第 3 章 Cramer-Rao 下限 .....     | 23 |
| 3.1 引言 .....                  | 23 |
| 3.2 小结 .....                  | 23 |
| 3.3 估计量精度考虑 .....             | 23 |
| 3.4 Cramer-Rao 下限 .....       | 25 |
| 3.5 高斯白噪声中信号的一般 CRLB .....    | 29 |
| 3.6 参数的变换 .....               | 31 |
| 3.7 扩展到矢量参数 .....             | 33 |
| 3.8 矢量参数变换的 CRLB .....        | 38 |
| 3.9 一般高斯情况的 CRLB .....        | 39 |
| 3.10 WSS 高斯随机过程的渐近 CRLB ..... | 42 |
| 3.11 信号处理的例子 .....            | 44 |
| 参考文献 .....                    | 52 |
| 习题 .....                      | 53 |

|   |            |
|---|------------|
| 附录 3A 标量参数 CRLB 的推导 .....                             | 56         |
| 附录 3B 矢量参数 CRLB 的推导 .....                             | 59         |
| 附录 3C 一般高斯 CRLB 的推导 .....                             | 62         |
| 附录 3D 渐近 CRLB 的推导 .....                               | 66         |
| <b>第 4 章 线性模型</b> .....                               | <b>70</b>  |
| 4.1 引言 .....  | 70         |
| 4.2 小结 .....  | 70         |
| 4.3 定义和性质 .....                                       | 70         |
| 4.4 线性模型的例子 .....                                     | 73         |
| 4.5 扩展到线性模型 .....                                     | 79         |
| 参考文献 .....  | 81         |
| 习题 .....  | 82         |
| <b>第 5 章 一般最小方差无偏估计</b> .....                         | <b>85</b>  |
| 5.1 引言 .....  | 85         |
| 5.2 小结 .....  | 85         |
| 5.3 充分统计量 .....                                       | 85         |
| 5.4 求充分统计量 .....                                      | 87         |
| 5.5 利用充分统计量求 MVU 估计量 .....                            | 90         |
| 5.6 扩展到矢量参数 .....                                     | 97         |
| 参考文献 .....  | 102        |
| 习题 .....  | 102        |
| 附录 5A Neyman-Fisher 因子分解定理(标量参数)的证明 .....             | 106        |
| 附录 5B Rao-Blackwell-Lehmann-Scheffe 定理(标量参数)的证明 ..... | 108        |
| <b>第 6 章 最佳线性无偏估计量</b> .....                          | <b>110</b> |
| 6.1 引言 .....  | 110        |
| 6.2 小结 .....  | 110        |
| 6.3 BLUE 的定义 .....                                    | 110        |
| 6.4 求 BLUE .....                                      | 112        |
| 6.5 扩展到矢量参数 .....                                     | 115        |
| 6.6 信号处理的例子 .....                                     | 117        |
| 参考文献 .....  | 120        |
| 习题 .....  | 120        |
| 附录 6A 标量 BLUE 的推导 .....                               | 125        |
| 附录 6B 矢量 BLUE 的推导 .....                               | 127        |
| <b>第 7 章 最大似然估计</b> .....                             | <b>129</b> |
| 7.1 引言 .....  | 129        |
| 7.2 小结 .....  | 129        |
| 7.3 举例 .....  | 129        |
| 7.4 求 MLE .....                                       | 133        |

|               |                                  |            |
|---------------|----------------------------------|------------|
| 7.5           | MLE 的性质 .....                    | 135        |
| 7.6           | 变换参数的 MLE .....                  | 142        |
| 7.7           | MLE 的数值确定 .....                  | 145        |
| 7.8           | 扩展到矢量参数 .....                    | 150        |
| 7.9           | 渐近 MLE .....                     | 156        |
| 7.10          | 信号处理的例子 .....                    | 158        |
|               | 参考文献 .....                       | 164        |
|               | 习题 .....                         | 164        |
| <b>附录 7A</b>  | <b>蒙特卡洛方法 .....</b>              | <b>170</b> |
| <b>附录 7B</b>  | <b>标量参数 MLE 的渐近 PDF .....</b>    | <b>176</b> |
| <b>附录 7C</b>  | <b>EM 算法例题中条件对数似然函数的推导 .....</b> | <b>179</b> |
| <b>第 8 章</b>  | <b>最小二乘估计 .....</b>              | <b>182</b> |
| 8.1           | 引言 .....                         | 182        |
| 8.2           | 小结 .....                         | 182        |
| 8.3           | 最小二乘估计方法 .....                   | 182        |
| 8.4           | 线性最小二乘估计 .....                   | 185        |
| 8.5           | 几何解释 .....                       | 187        |
| 8.6           | 按阶递推最小二乘估计 .....                 | 192        |
| 8.7           | 序贯最小二乘估计 .....                   | 199        |
| 8.8           | 约束最小二乘估计 .....                   | 206        |
| 8.9           | 非线性最小二乘估计 .....                  | 209        |
| 8.10          | 信号处理的例子 .....                    | 214        |
|               | 参考文献 .....                       | 225        |
|               | 习题 .....                         | 226        |
| <b>附录 8A</b>  | <b>按阶递推最小二乘估计的推导 .....</b>       | <b>231</b> |
| <b>附录 8B</b>  | <b>递推投影矩阵的推导 .....</b>           | <b>234</b> |
| <b>附录 8C</b>  | <b>序贯最小二乘估计的推导 .....</b>         | <b>235</b> |
| <b>第 9 章</b>  | <b>矩方法 .....</b>                 | <b>238</b> |
| 9.1           | 引言 .....                         | 238        |
| 9.2           | 小结 .....                         | 238        |
| 9.3           | 矩方法 .....                        | 238        |
| 9.4           | 扩展到矢量参数 .....                    | 241        |
| 9.5           | 估计量的统计评价 .....                   | 242        |
| 9.6           | 信号处理的例子 .....                    | 246        |
|               | 参考文献 .....                       | 249        |
|               | 习题 .....                         | 250        |
| <b>第 10 章</b> | <b>贝叶斯原理 .....</b>               | <b>253</b> |
| 10.1          | 引言 .....                         | 253        |
| 10.2          | 小结 .....                         | 253        |

|                                       |                 |            |
|---------------------------------------|-----------------|------------|
| 10.3                                  | 先验知识和估计         | 253        |
| 10.4                                  | 选择先验 PDF        | 259        |
| 10.5                                  | 高斯 PDF 的特性      | 263        |
| 10.6                                  | 贝叶斯线性模型         | 266        |
| 10.7                                  | 多余参数            | 268        |
| 10.8                                  | 确定性参数的贝叶斯估计     | 270        |
|                                       | 参考文献            | 271        |
|                                       | 习题              | 271        |
| <b>附录 10A 条件高斯 PDF 的推导</b>            |                 | <b>275</b> |
| <b>第 11 章 一般贝叶斯估计量</b>                |                 | <b>277</b> |
| 11.1                                  | 引言              | 277        |
| 11.2                                  | 小结              | 277        |
| 11.3                                  | 风险函数            | 277        |
| 11.4                                  | 最小均方误差估计量       | 280        |
| 11.5                                  | 最大后验估计量         | 284        |
| 11.6                                  | 性能描述            | 291        |
| 11.7                                  | 信号处理的例子         | 295        |
|                                       | 参考文献            | 299        |
|                                       | 习题              | 299        |
| <b>附录 11A 连续时间系统到离散时间系统的转换</b>        |                 | <b>304</b> |
| <b>第 12 章 线性贝叶斯估计量</b>                |                 | <b>306</b> |
| 12.1                                  | 引言              | 306        |
| 12.2                                  | 小结              | 306        |
| 12.3                                  | 线性 MMSE 估计      | 306        |
| 12.4                                  | 几何解释            | 309        |
| 12.5                                  | 矢量 LMMSE 估计量    | 314        |
| 12.6                                  | 序贯 LMMSE 估计     | 316        |
| 12.7                                  | 信号处理的例子—维纳滤波器   | 322        |
|                                       | 参考文献            | 330        |
|                                       | 习题              | 330        |
| <b>附录 12A 贝叶斯线性模型的序贯 LMMSE 估计量的推导</b> |                 | <b>335</b> |
| <b>第 13 章 卡尔曼滤波器</b>                  |                 | <b>338</b> |
| 13.1                                  | 引言              | 338        |
| 13.2                                  | 小结              | 338        |
| 13.3                                  | 动态信号模型          | 338        |
| 13.4                                  | 标量卡尔曼滤波器        | 347        |
| 13.5                                  | 卡尔曼滤波器与维纳滤波器的关系 | 356        |
| 13.6                                  | 矢量卡尔曼滤波器        | 359        |
| 13.7                                  | 扩展卡尔曼滤波器        | 361        |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 13.8 信号处理的例子 .....                   | 364        |
| 参考文献 .....                           | 374        |
| 习题 .....                             | 375        |
| <b>附录 13A 向量卡尔曼滤波器的推导 .....</b>      | <b>379</b> |
| <b>附录 13B 扩展卡尔曼滤波器的推导 .....</b>      | <b>383</b> |
| <b>第 14 章 估计量总结 .....</b>            | <b>385</b> |
| 14.1 引言 .....                        | 385        |
| 14.2 估计方法 .....                      | 385        |
| 14.3 线性模型 .....                      | 391        |
| 14.4 选择一个估计量 .....                   | 394        |
| <b>第 15 章 复数据和复参数的扩展 .....</b>       | <b>397</b> |
| 15.1 引言 .....                        | 397        |
| 15.2 小结 .....                        | 397        |
| 15.3 复数据和复参数 .....                   | 398        |
| 15.4 复随机变量和 PDF .....                | 402        |
| 15.5 复 WSS 随机过程 .....                | 413        |
| 15.6 导数、梯度和最佳化 .....                 | 416        |
| 15.7 采用复数据的经典估计 .....                | 422        |
| 15.8 贝叶斯估计 .....                     | 428        |
| 15.9 渐近复高斯 PDF .....                 | 430        |
| 15.10 信号处理的例子 .....                  | 433        |
| 参考文献 .....                           | 440        |
| 习题 .....                             | 441        |
| <b>附录 15A 复协方差矩阵的性质的推导 .....</b>     | <b>445</b> |
| <b>附录 15B 复高斯 PDF 性质的推导 .....</b>    | <b>447</b> |
| <b>附录 15C CRLB 和 MLE 公式的推导 .....</b> | <b>451</b> |

## 第二卷:统计信号处理基础——检测理论

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| <b>第 1 章 引言 .....</b>         | <b>457</b> |
| 1.1 信号处理中的检测理论 .....          | 457        |
| 1.2 检测问题 .....                | 460        |
| 1.3 检测问题的数学描述 .....           | 461        |
| 1.4 检测问题的内容体系 .....           | 464        |
| 1.5 渐近的作用 .....               | 465        |
| 1.6 对读者的一些说明 .....            | 466        |
| 参考文献 .....                    | 467        |
| 习题 .....                      | 468        |
| <b>第 2 章 重要 PDF 的总结 .....</b> | <b>470</b> |
| 2.1 引言 .....                  | 470        |

|       |                                 |     |
|-------|---------------------------------|-----|
| 2.2   | 基本概率密度函数及其性质 .....              | 470 |
| 2.3   | 高斯随机变量的二次型 .....                | 479 |
| 2.4   | 渐近高斯 PDF .....                  | 480 |
| 2.5   | 蒙特卡洛性能评估 .....                  | 482 |
|       | 参考文献 .....                      | 485 |
|       | 习题 .....                        | 485 |
| 附录 2A | 要求的蒙特卡洛实验次数 .....               | 490 |
| 附录 2B | 正态概率纸 .....                     | 492 |
| 附录 2C | 计算高斯右尾概率及其逆的 MATLAB 程序 .....    | 494 |
| 附录 2D | 计算中心化和非中心化 $\chi^2$ 的右尾概率 ..... | 495 |
| 附录 2E | 蒙特卡洛计算机模拟的 MATLAB 程序 .....      | 500 |
| 第 3 章 | 统计判决理论 I .....                  | 501 |
| 3.1   | 引言 .....                        | 501 |
| 3.2   | 小结 .....                        | 501 |
| 3.3   | Neyman-Pearson 定理 .....         | 501 |
| 3.4   | 接收机工作特性 .....                   | 511 |
| 3.5   | 无关数据 .....                      | 512 |
| 3.6   | 最小错误概率 .....                    | 514 |
| 3.7   | 贝叶斯风险 .....                     | 516 |
| 3.8   | 多元假设检验 .....                    | 517 |
|       | 参考文献 .....                      | 520 |
|       | 习题 .....                        | 520 |
| 附录 3A | Neyman-Pearson 定理 .....         | 523 |
| 附录 3B | 最小贝叶斯风险检测器——二元假设 .....          | 524 |
| 附录 3C | 最小贝叶斯风险检测器——多元假设 .....          | 525 |
| 第 4 章 | 确定信号 .....                      | 526 |
| 4.1   | 引言 .....                        | 526 |
| 4.2   | 小结 .....                        | 526 |
| 4.3   | 匹配滤波器 .....                     | 526 |
| 4.4   | 广义匹配滤波器 .....                   | 534 |
| 4.5   | 多个信号 .....                      | 540 |
| 4.6   | 线性模型 .....                      | 547 |
| 4.7   | 信号处理的例子 .....                   | 550 |
|       | 参考文献 .....                      | 554 |
|       | 习题 .....                        | 555 |
| 附录 4A | 线性模型的简化形式 .....                 | 561 |
| 第 5 章 | 随机信号 .....                      | 563 |
| 5.1   | 引言 .....                        | 563 |
| 5.2   | 小结 .....                        | 563 |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| 5.3 估计器 – 相关器 .....                | 563        |
| 5.4 线性模型 .....                     | 573        |
| 5.5 大数据记录的估计器 – 相关器 .....          | 581        |
| 5.6 一般高斯检测 .....                   | 583        |
| 5.7 信号处理的例子 .....                  | 584        |
| 参考文献 .....                         | 590        |
| 习题 .....                           | 590        |
| <b>附录 5A 估计器 – 相关器的检测性能 .....</b>  | <b>596</b> |
| <b>第 6 章 统计判决理论 II .....</b>       | <b>598</b> |
| 6.1 引言 .....                       | 598        |
| 6.2 小结 .....                       | 598        |
| 6.3 复合假设检验 .....                   | 602        |
| 6.4 复合假设检验方法 .....                 | 606        |
| 6.5 大数据记录时 GLRT 的性能 .....          | 612        |
| 6.6 等效大数据记录检验 .....                | 616        |
| 6.7 局部最大势检测器 .....                 | 622        |
| 6.8 多元假设检验 .....                   | 624        |
| 参考文献 .....                         | 628        |
| 习题 .....                           | 629        |
| <b>附录 6A 渐近等效检验——无多余参数 .....</b>   | <b>633</b> |
| <b>附录 6B 渐近等效检验——多余参数 .....</b>    | <b>635</b> |
| <b>附录 6C GLRT 的渐近 PDF .....</b>    | <b>638</b> |
| <b>附录 6D LMP 检验的渐近检测性能 .....</b>   | <b>640</b> |
| <b>附录 6E 局部最优势检验的另一种推导 .....</b>   | <b>642</b> |
| <b>附录 6F 广义 ML 准则的推导 .....</b>     | <b>644</b> |
| <b>第 7 章 具有未知参数的确定性信号 .....</b>    | <b>646</b> |
| 7.1 引言 .....                       | 646        |
| 7.2 小结 .....                       | 646        |
| 7.3 信号建模和检测性能 .....                | 646        |
| 7.4 未知幅度 .....                     | 649        |
| 7.5 未知到达时间 .....                   | 654        |
| 7.6 正弦信号检测 .....                   | 656        |
| 7.7 经典线性模型 .....                   | 665        |
| 7.8 信号处理的例子 .....                  | 671        |
| 参考文献 .....                         | 679        |
| 习题 .....                           | 679        |
| <b>附录 7A 能量检测器的渐近性能 .....</b>      | <b>685</b> |
| <b>附录 7B 经典线性模型 GLRT 的推导 .....</b> | <b>687</b> |
| <b>第 8 章 未知参数的随机信号 .....</b>       | <b>689</b> |



|   |            |
|---|------------|
| 8.1 引言 .....  | 689        |
| 8.2 小结 .....  | 689        |
| 8.3 信号协方差不完全已知 .....  | 689        |
| 8.4 大数据记录的近似 .....  | 695        |
| 8.5 弱信号检测 .....   | 698        |
| 8.6 信号处理的例子 .....   | 699        |
| 参考文献 .....  | 708        |
| 习题 .....  | 708        |
| <b>附录 8A 周期高斯随机过程 PDF 的推导 .....</b>                           | <b>712</b> |
| <b>第 9 章 未知噪声参数 .....</b>                                     | <b>715</b> |
| 9.1 引言 .....  | 715        |
| 9.2 小结 .....  | 715        |
| 9.3 一般考虑 .....  | 715        |
| 9.4 白高斯噪声 .....   | 719        |
| 9.5 有色 WSS 高斯噪声 .....   | 725        |
| 9.6 信号处理的例子 .....   | 732        |
| 参考文献 .....  | 737        |
| 习题 .....  | 737        |
| <b>附录 9A 推导对于 <math>\sigma^2</math> 未知的经典线性模型的 GLRT .....</b> | <b>742</b> |
| <b>附录 9B 对具有未知噪声参数的一般线性模型的 Rao 检验 .....</b>                   | <b>745</b> |
| <b>附录 9C 信号处理例子的渐近等效 Rao 检验 .....</b>                         | <b>747</b> |
| <b>第 10 章 非高斯噪声 .....</b>                                     | <b>750</b> |
| 10.1 引言 .....   | 750        |
| 10.2 小结 .....   | 750        |
| 10.3 非高斯噪声的性质 .....   | 750        |
| 10.4 已知确定性信号 .....  | 753        |
| 10.5 未知参数确定性信号 .....  | 758        |
| 10.6 信号处理的例子 .....  | 765        |
| 参考文献 .....  | 768        |
| 习题 .....  | 769        |
| <b>附录 10A NP 检测器对微弱信号的渐近性能 .....</b>                          | <b>772</b> |
| <b>附录 10B IID 非高斯噪声中线性模型信号的 Rao 检验 .....</b>                  | <b>774</b> |
| <b>第 11 章 检测器总结 .....</b>                                     | <b>777</b> |
| 11.1 引言 .....   | 777        |
| 11.2 检测方法 .....   | 777        |
| 11.3 线性模型 .....   | 786        |
| 11.4 选择一个检测器 .....  | 792        |
| 11.5 其他方法和其他参考教材 .....  | 795        |
| 参考文献 .....  | 796        |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| <b>第 12 章 模型变化检测</b> .....           | 797 |
| 12.1 引言 .....                        | 797 |
| 12.2 小结 .....                        | 797 |
| 12.3 问题的描述 .....                     | 797 |
| 12.4 基本问题的扩展 .....                   | 802 |
| 12.5 多个变化时刻 .....                    | 805 |
| 12.6 信号处理的例子 .....                   | 809 |
| 参考文献 .....                           | 817 |
| 习题 .....                             | 817 |
| <b>附录 12A 分段的通用动态规划方法</b> .....      | 820 |
| <b>附录 12B 动态规划的 MATLAB 程序</b> .....  | 822 |
| <b>第 13 章 复矢量扩展及阵列处理</b> .....       | 824 |
| 13.1 引言 .....                        | 824 |
| 13.2 小结 .....                        | 824 |
| 13.3 已知 PDF .....                    | 824 |
| 13.4 具有未知参数的 PDF .....               | 831 |
| 13.5 矢量观测和 PDF .....                 | 833 |
| 13.6 矢量观测量的检测器 .....                 | 838 |
| 13.7 大数据记录的估计器 – 相关器 .....           | 844 |
| 13.8 信号处理的例子 .....                   | 850 |
| 参考文献 .....                           | 859 |
| 习题 .....                             | 859 |
| <b>附录 13A 复线性模型 GLRT 的 PDF</b> ..... | 864 |
| <b>附录 1 重要概念回顾</b> .....             | 865 |
| <b>附录 2 符号和缩写术语表</b> .....           | 878 |