

“十二五”国家重点图书出版规划项目

随机系统概论

——分析、估计与控制

(下册)

韩崇昭 等著
Han Chongzhao

Introduction to
Stochastic Systems:
Analysis, Estimation and Control



清华大学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

Introduction to
Stochastic Systems:
Analysis, Estimation and Control

随机系统概论

——分析、估计与控制

(下册)

韩崇昭 等著
Han Chongzhao

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

这是一本全面系统介绍随机系统的学术专著。首先从介绍随机系统的基本概念入手,然后介绍离散时间和连续时间线性动态随机系统的分析方法。在此基础上,介绍系统的参数估计理论,包括最小方差、极大后验、极大似然及最小二乘等经典估计方法,同时包括期望极大化(EM)估计方法等新的进展。研究随机系统的一个重要方面是对动态系统的状态估计,本专著除介绍卡尔曼滤波等经典内容外,同时包括了UKF、粒子滤波、混杂系统状态估计的多模型滤波等现代方法。随着信息技术的发展,动态系统状态估计的多源信息融合方法得到学术界的广泛重视,本专著还介绍了最新发展的多源信息融合理论,而典型的应用问题就是目标跟踪。随机系统理论研究的另一个方面就是随机系统辨识,即如何由试验数据构造系统的问题,本专著讨论了各种辨识算法。随机系统理论的最新发展也包括了随机系统的检测理论和随机系统信号的特征信息提取,此处介绍了随机检测问题的基本概念和各种检测方法,以及如何由随机系统输出信号中提取其包含反映系统本质属性的特征信息方法。对于随机系统理论的扩展,就是基于随机集和随机有限集的估计与决策理论,这是处理不确定性问题的一种新理论方法。研究随机系统更重要的目的在于实施随机最优控制,本专著介绍了各种随机系统控制方法,尤其是双重最优控制方法。在此基础上,还进一步介绍了随机系统的自适应控制与预测控制,包括参数自校正及多模型自适应控制技术等。最后介绍了随机系统的试验、仿真及评估等方法,以及随机系统理论在几个方面的具体应用。

本书汇集了作者们多年来在随机系统理论及应用科研和教学工作中的心得和体会,内容丰富、完整、新颖,既包括较完备的经典理论,也包括近年发展起来的新方法和新技术,特别是有机地融入了作者近年的若干研究成果和最新的一些研究进展。

本书可以作为从事随机系统估计、检测及控制等领域科技工作者和工程技术人员的参考资料,同时也可作为高等院校自动控制及其他相近专业研究生的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

随机系统概论:分析、估计与控制.上册/傅瑞学等著. —北京:清华大学出版社,2014
ISBN 978-7-302-33322-7

I. ①随… II. ①傅… III. ①随机系统—概论. ①O231

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第173523号



责任编辑:王一玲
封面设计:傅瑞学
责任校对:梁毅
责任印制:宋林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:26.5 字 数:659千字

版 次:2014年3月第1版 印 次:2014年3月第1次印刷

印 数:1~1500

定 价:69.00元

产品编号:052698-01

前 言

本书是我数十年从事科学研究的一本总结性论著。

记得 1968 年年末,在“文化大革命”尚未终结的时候,我刚从大学毕业,分配在西安的一家军工厂从事军工产品的研制生产工作。当时正值“援越抗美”时期,要求我们参与解决某航空产品中陀螺模拟计算的一个难题,所参考的文献是苏联提供的技术资料,其中多处提到“随机扰动”、“不确定性”等术语。大学刚毕业的我,虽然在学校学过《概率论》的简单知识,却难以理解这些术语的真正含义。在一些专家的带领下,我慢慢体会到“随机性”、“统计规律”的奥妙。原来以为难以预料的“偶然事件”却蕴涵着奇妙的“必然”。一对夫妻生儿育女是偶然的,但大量人口的男女出生概率却各占一半。明天的天气是阴是晴似乎是“偶然”的,但一年中该地区的阴天、晴天数之比却近似一个常值。许多原来以为毫无规律的事情似乎仍有规律可循,这启发我对“随机现象”产生了极大的兴趣。在后来的工作和学习中,便把“随机系统”作为主要的研究对象。记得 1981 年研究生毕业后回到我大学时代的母校西安交通大学,追随万百五先生和胡保生先生从事系统工程的教学和科研工作。当时应新时代出版社邀请,我和同学张平平合作出版了平生第一本著作《决策、对策与管理》,其中大量列举了决策中如何处理随机问题的例证。在此期间,对我影响最大的国内外学者分别是国际著名随机系统学者 K. J. 奥斯特诺姆(Åström),以及中科院系统所陈翰馥院士等,他们的论著对我起到启蒙作用,而且也是我大半生汲取知识的重要源泉。

20 世纪 80 年代初,我着手关于“非线性随机系统双重最优控制”的研究,得到国际著名学者美国哈佛大学何毓琦教授和康涅狄格大学 Y. Bar Shalom 教授的赞赏和鼓励。受英国学者 Billings 教授的影响,从 1990 年起开始非线性频谱分析理论的研究。关于用 Volterra 级数描述非线性动态系统稳定性的研究方面也做出了有价值的结果。特别在由微分方程和差分方程直接计算 Volterra 核、广义频率响应函数模型辨识、基于非线性频谱分析的动态系统故障检测与诊断方法等方面有独到学术见解,为此获得“基于非线性频谱分析的故障检测与诊断方法”国家发明专利。在国家自然科学基金项目等支持下,建立了一种非线性频谱分析方法,并用来对很大一类物理对象进行状态检测与故障诊断。实验结果表明这种算法非常有效,而且所获得的模型具有通用性和抗干扰能力。

在西安交通大学工作初期,所承担的科研项目大都与“随机现象”有关,也积累了大量相关的知识,随后在 1987 年,与万百五先生、王月娟教授合作出版了全国研究生统编教材《随机系统理论》,比较全面系统地表述了有关随机系统分析、系统的状态估计、随机最优控制、系统辨识与参数估计、线性离散时间随机系统的自适应滤波和参数自适应控制以及随机系统的试验与数字仿真等。

20 世纪 80 年代后期,“信息融合”的研究热在美国掀起,随之我与美籍华人学者新奥尔

良大学李晓榕教授建立了密切的合作关系,共同研究估计融合的基本理论问题。从2001年起,我多次承担了国家973项目的研究课题,包括复旦大学金亚秋院士主持的973项目“复杂自然环境时空定量信息的获取与融合理论、算法与应用”中的“多源数据融合理论、算法与应用”课题(编号:2001CB309403)以及“目标与环境共存时的信息获取”课题(编号:2001CB309405,部分);西安交通大学徐宗本院士主持的国家973项目“基于视觉认知的非结构化信息处理理论与关键技术”中的“基于多源异构信息融合的空中目标跟踪关键技术”课题(编号:2007CB311006);总参二部承担的GF973项目“ $\times\times\times$ 信息融合理论与应用研究”中的“ $\times\times\times$ 信息目标融合理论与方法研究”课题。最近,本人还以首席科学家的身份主持了GF973项目“ $\times\times\times$ 信息处理理论与方法研究”。在这些研究项目中,主要研究的是目标跟踪/识别问题,采用的主要方法论仍然是随机系统的分析与估计理论。

在完成国家973项目期间,突出贡献之一是发明了基于误差传递和差分消除的目标航迹估计方法,显著提高非合作目标的航迹估计精度;开发了空中目标航迹估计系统,应用于某重大型号任务,使得目标航迹估计精度比总装备部过去所用方法提高一个数量级以上。为此于2011年度获得国家科技进步二等奖。另一个突出贡献是模拟响尾蛇大脑顶盖条件信息融合模式,建立了多源异构信息的统一描述方法,重点是多源异构信息特征空间的描述、特征提取与异构特征的同化,从而达到非结构化信息互补集成的目的,提高目标识别的准确性与可靠性。

在国家973项目的支持下,初步研发了多平台协同目标探测、跟踪与识别方法。该方法是多平台之间的网络传输通道进行支持,多平台进行协同探测、协同攻击和协同防御的信息系统。该方法提出了如下三个关键技术:①对多平台之间的多源异构信息进行融合,形成编队一致的统一图像;②根据态势进行实时智能决策,形成对编队异构传感器和执行器的智能协同控制能力;③对传感器产生的大容量信息进行高质量压缩,提高各平台之间的信息共享能力。

2006年我与朱洪艳、段战胜博士等合作出版了《多源信息融合》专著,该书荣幸地于2007年获得国家新闻出版总署实施的“三个一百”原创出版工程称谓,认为是我国第一本全面系统地介绍信息融合理论与应用的原创著作。

时过30余年,随机系统的理论和技术有了很大的发展,从事随机系统相关研究的科技工著者也越来越多。此外,控制科学与工程等学科领域的同仁普遍认为,充分掌握随机系统的相关理论,对于从事科学研究和工程应用的工著者来说,比起过去更加重要和需要。换言之,随机系统的相关理论已经成为本学科科技人员必备的知识,是现代科研素质和科研能力的重要组成部分。

随着科学技术的不断发展和进步,在人类的生产和生活的许多方面涌现出了大量与自动化相关的问题,人们对自动化系统的要求也越来越高,这使得关于随机系统的分析和综合理论成为科学技术的前沿和热点领域。本书共分13章。由介绍随机系统基本概念入手,重点讨论确定系统和随机系统之间的联系和差异;随之对随机动态系统分析、参数估计理论、动态系统的状态估计、动态系统状态估计的多源信息融合方法、随机系统辨识、随机系统的检测理论、随机系统信号的特征信息提取、基于随机集和随机有限集的估计与决策理论、随机最优控制、随机系统的自适应控制与预测控制、随机系统的试验与数值仿真以及相关的应用系统进行系统论述。其中第4章“动态系统的状态估计”是在《随机系统理论》第3章“系

统的状态估计”(原来由王月娟教授执笔)的基础上修改补充完成;第6章“随机系统辨识”是在《随机系统理论》第5章“系统辨识与参数估计”(原来由万百五先生执笔)的基础上修改补充完成;本专著第5章“动态系统状态估计的多源信息融合方法”和第9章“基于随机集和随机有限集的估计与决策理论”是在《多源信息融合》(第二版)相关内容(原来由我和朱洪艳、段战胜、韩德强博士等执笔)的基础上修改补充完成,其中第9章中有关随机有限集理论及其应用部分由连峰博士提供;第7章“随机系统的检测理论”由西安交通大学蔡远利教授提供;第8章“随机系统信号的特征信息提取”由第二炮兵工程大学孔祥玉副教授提供;第10章“随机最优控制”中关于“双重最优控制的最新研究进展”一节由西安理工大学钱富才教授提供;第11章“随机系统的自适应控制与预测控制”中的“反步自适应控制”、“ H_∞ 鲁棒自适应控制”和“预测控制”三节由西安交通大学丁宝苍教授提供;第13章“应用随机系统”中部分内容由西安交通大学蔡远利教授提供;其余章节由我本人撰写。最后由我对全书进行统编和修改。

本书是关于含随机因素系统分析和综合理论及应用的学术著作,旨在全面系统地总结该领域的学术成就,力图为控制科学与工程等学科领域的科技工作者及工程技术人员提供全面、系统的参考,同时也希望成为高等院校师生的教学参考书。本书汇集了著者们近年来在随机系统理论及应用科研和教学工作中的心得和体会,内容丰富、完整、新颖,既包括较为完备的经典理论,也包括近年发展起来的新方法和新技术,特别是有机融入了著者们近年的若干研究成果和最新的一些研究进展。本书要求读者具备线性代数、现代概率论、随机过程、数理统计等预备知识,同时要在线性系统理论、最优化理论等有较深入的了解。作为完备性考虑,我们在书末附加了几个附录,给出了相关基础理论若干重要和主要的结论。本书可以作为从事随机系统估计、检测及控制等领域科技工作者和工程技术人员的参考资料,也可以作为工程学科研究生的教学参考书。

在本书的编写过程中,我们得到了国内外许多同行专家的支持和帮助,特别是西安交通大学郑南宁院士、管晓宏教授等对本书提出了宝贵的修改意见。著者的研究团队及硕士生和博士生们,对随机系统理论研究及应用做出了积极的贡献,他们还在书稿准备和完成过程中承担了大量事务性工作,在此对他们的辛勤工作表示诚挚的谢意。

著者最后还要感谢国家重点基础研究与发展规划(973)、国家安全重大基础研究计划(GF973)、国家863计划、国家自然科学基金等项目的资助。正是在相关项目的支持下,使得我们不断对随机系统理论及应用进行了持续、深入的探讨和研究。同时非常荣幸,本专著列为“十二五”国家重点图书出版规划。

本书在撰写的过程中虽然尽到最大努力,但错误和不妥之处仍然在所难免,希望广大读者不吝赐教,我们将不胜感激。

韩崇昭

2013年7月于西安交通大学

目 录

上 册

第 1 章 绪论	1
1.1 系统理论概述	1
1.1.1 系统的概念	1
1.1.2 控制系统简述	2
1.1.3 控制性能简述	4
1.2 随机系统引论	6
1.2.1 不确定性系统概念	6
1.2.2 随机系统概念的引入	7
1.2.3 随机系统的统计分析	7
1.2.4 系统估计与对象识别	9
1.2.5 系统的最优控制	10
1.2.6 系统仿真与重构	10
1.3 本书概貌	11
1.4 参考文献	15
第 2 章 随机动态系统分析	17
2.1 随机过程	17
2.1.1 向量随机过程的基本概念	17
2.1.2 某些特殊的随机过程	19
2.1.3 随机变量序列的收敛	24
2.1.4 连续时间过程对时间变量的微积分	26
2.1.5 随机微分方程与随机积分	30
2.1.6 伊藤微分法则	35
2.2 离散时间随机系统分析	39
2.2.1 离散时间随机过程作为系统输入时的响应	39
2.2.2 离散时间平稳过程的谱分解	42
2.2.3 离散时间受控随机系统的分析	48
2.2.4 离散时间随机系统的状态空间模型分析	51

2.2.5	离散时间状态空间描述的输入输出联系	55
2.3	连续时间随机系统分析	61
2.3.1	连续时间随机过程作为系统输入时的响应	61
2.3.2	连续时间平稳过程的谱分解	62
2.3.3	连续时间受控随机系统的分析	67
2.3.4	连续时间状态空间模型分析	69
2.3.5	连续时间状态空间描述的输入输出联系	75
2.4	线性连续时间随机系统的采样与离散化	79
2.4.1	状态空间模型的离散化	80
2.4.2	具有纯时延线性输入输出模型的离散化	83
2.5	小结	86
2.6	参考文献	87
第3章	参数估计理论	89
3.1	参数估计的基本概念	89
3.1.1	参数估计问题的一般描述	89
3.1.2	对估计的评价:无偏性、一致性、有效性及充分性	89
3.2	最小二乘估计	92
3.2.1	经典最小二乘估计	92
3.2.2	加权最小二乘估计	94
3.2.3	最小二乘估计的几何本质	95
3.2.4	递推最小二乘估计	96
3.2.5	正则化最小二乘问题	97
3.2.6	递推最小二乘(RLS)估计算法	99
3.3	最小二乘问题的变种	100
3.3.1	总体最小二乘判据	100
3.3.2	主成分(PC)估计	101
3.3.3	最小均方误差(LMS)估计	104
3.4	最大似然参数估计	105
3.4.1	最大似然(ML)参数估计方法	105
3.4.2	期望极大化(EM)估计方法	106
3.5	贝叶斯估计	109
3.5.1	贝叶斯点估计理论	109
3.5.2	线性无偏最小方差估计	114
3.5.3	线性无偏最小方差估计的几何解释	116
3.5.4	最大后验概率(MAP)估计	118
3.6	小结	120
3.7	参考文献	120

第 4 章 动态系统的状态估计	121
4.1 线性离散时间随机系统的状态估计	121
4.1.1 新息序列与伪新息序列.....	122
4.1.2 基本卡尔曼滤波方程.....	125
4.1.3 一般线性控制系统的卡尔曼滤波方程.....	129
4.1.4 受平稳噪声作用时线性定常系统的稳态滤波.....	134
4.1.5 最优预报与平滑.....	140
4.1.6 对偶定理.....	145
4.1.7 信息滤波器.....	147
4.2 线性连续时间随机系统的状态估计	149
4.2.1 对偶定理与卡尔曼-布西滤波方程	149
4.2.2 线性定常系统的稳态滤波及其与维纳滤波的关系.....	155
4.3 非线性随机系统的状态估计	161
4.3.1 离散时间系统的贝叶斯滤波.....	161
4.3.2 扩展卡尔曼滤波.....	164
4.3.3 非线性连续时间系统的采样滤波.....	168
4.3.4 无迹卡尔曼滤波器.....	175
4.4 基于随机抽样的过程估计理论与算法	177
4.4.1 传统贝叶斯估计面临的挑战与解决的新思路.....	177
4.4.2 蒙特·卡罗仿真的随机抽样.....	178
4.4.3 马尔可夫链-蒙特·卡罗抽样	180
4.4.4 粒子滤波的一般方法.....	184
4.5 混杂系统的状态估计	191
4.5.1 模型描述.....	191
4.5.2 多模型方法简述.....	192
4.5.3 定结构多模型估计.....	193
4.5.4 交互式多模型算法.....	196
4.5.5 变结构多模型(VSMM)算法概述	199
4.6 小结	203
4.7 参考文献	203
第 5 章 动态系统状态估计的多源信息融合方法	207
5.1 跟踪问题的目标运动随机模型	207
5.1.1 目标跟踪问题简述.....	207
5.1.2 基于随机过程的运动目标模型.....	208
5.1.3 基于运动学特性的运动目标模型.....	214
5.2 单平台目标跟踪	218
5.2.1 目标量测的随机模型.....	218

5.2.2	单平台目标跟踪的基本模型	220
5.2.3	跟踪门	221
5.2.4	基于量测模型线性化的目标跟踪	222
5.3	基于量测-航迹关联的单平台多目标跟踪	225
5.3.1	最近邻方法	225
5.3.2	杂波环境中单目标跟踪的概率数据关联法	225
5.3.3	交互式多模型概率数据关联法	229
5.3.4	多目标跟踪的联合概率数据关联法	231
5.3.5	基于粒子滤波联合概率数据关联的多目标跟踪	237
5.4	多平台协同目标跟踪	239
5.4.1	多平台协同目标跟踪问题描述	239
5.4.2	时空配准问题	239
5.4.3	数据关联问题	241
5.4.4	估计融合问题	242
5.5	时间与空间配准方法	244
5.5.1	常用坐标系	244
5.5.2	无误差量测的坐标转换	245
5.5.3	带误差量测在不同坐标系间的转换	247
5.5.4	时间配准算法	248
5.5.5	二维空间配准算法	249
5.5.6	精确极大似然空间配准算法	253
5.5.7	基于 ECEF 坐标系的空间配准算法	256
5.6	多平台多目标跟踪的联合概率数据关联	259
5.6.1	多平台多目标跟踪的联合概率数据关联问题描述	259
5.6.2	分布式航迹关联	262
5.6.3	多传感器之间的航迹关联	264
5.7	融合估计系统	266
5.7.1	集中式融合系统	266
5.7.2	分布式融合系统	269
5.8	最优线性估计融合与统一融合规则	278
5.8.1	问题描述	279
5.8.2	统一线性数据模型	279
5.8.3	线性数据模型的统一最优融合规则	281
5.8.4	一般最优线性融合规则	288
5.9	非线性分层融合算法	289
5.10	小结	291
5.11	参考文献	291

第 6 章 随机系统辨识	300
6.1 辨识问题概述	300
6.2 线性差分模型的最小二乘参数估计	301
6.2.1 单输入单输出系统的最小二乘参数估计	301
6.2.2 滤波型加权最小二乘估计与广义最小二乘算法	305
6.2.3 相关型加权最小二乘估计与辅助变量(IV)法	309
6.2.4 多输入多输出系统的最小二乘参数估计	313
6.3 离散差分模型的最大似然参数估计	314
6.3.1 最大似然原理及最小预报误差平方和准则	314
6.3.2 单输入单输出系统最大似然估计的牛顿-辛普森算法	318
6.3.3 多输入多输出系统最大似然参数估计的松弛算法	321
6.4 离散差分模型的递推参数估计	325
6.4.1 用于参数估计的递推最小二乘算法	325
6.4.2 渐消记忆的递推最小二乘算法	327
6.4.3 适用于有色噪声的改进递推最小二乘算法	328
6.4.4 递推算法的收敛性分析	333
6.5 差分模型的阶检验	337
6.5.1 损失函数检验法	337
6.5.2 预报误差的白性检验	338
6.5.3 随机检验	339
6.6 离散时间状态空间模型的辨识	340
6.6.1 标准随机状态空间模型	340
6.6.2 没有控制输入时的辨识问题	344
6.6.3 一般随机系统的辨识	349
6.7 线性系统非参数模型的辨识	350
6.7.1 估计脉冲响应的相关分析法	350
6.7.2 马尔可夫参数的估计和最小实现	356
6.8 闭环系统能辨识的条件	358
6.9 小结	362
6.10 参考文献	363
第 7 章 随机系统的检测理论	367
7.1 基本概念及数学描述	367
7.2 贝叶斯准则	368
7.2.1 似然比检验	369
7.2.2 最小错误概率决策	370
7.2.3 极大后验概率决策	370
7.2.4 极大似然决策	371
7.3 Min-Max 准则	373

7.4	Neyman-Pearson 准则	375
7.5	复合检验	377
7.6	序贯检测	380
7.7	小结	381
7.8	参考文献	382

下 册

第 8 章	随机系统信号的特征信息提取	383
8.1	基本概念	383
8.1.1	什么是随机系统信号特征信息提取	383
8.1.2	随机系统信号特征信息提取的应用	384
8.1.3	随机系统信号特征信息提取综述	384
8.2	随机系统信号主成分分析神经网络	386
8.2.1	Hebbian 和 Oja 学习规则	386
8.2.2	基于 Hebbian 规则的主成分分析	388
8.2.3	基于优化方法的主成分分析	391
8.2.4	有侧向连接的主成分分析	396
8.2.5	非线性主成分分析	398
8.3	次成分分析神经网络及性能分析	402
8.3.1	次成分分析方法	402
8.3.2	次成分分析神经网络与算法	404
8.3.3	次成分分析神经网络算法发散现象分析	408
8.3.4	高维数据流的次子空间跟踪神经网络算法	416
8.4	特征信息网络确定性离散时间系统	419
8.4.1	确定性离散时间系统概述	419
8.4.2	神经网络确定性离散时间系统	420
8.4.3	一种新的自稳定 MCA 算法及确定性离散时间系统分析	421
8.4.4	统一 PCA/MCA 算法的确定性离散时间学习分析	424
8.4.5	本节小结	429
8.5	双目的主/次子空间神经网络跟踪算法	429
8.5.1	双目的特征提取神经网络方法	429
8.5.2	一种新的双目的特征提取神经网络算法	432
8.6	特征信息提取神经网络与算法应用	437
8.6.1	主成分提取神经网络与算法的应用	437
8.6.2	次成分提取神经网络与算法的应用	444
8.7	小结	449
8.8	参考文献	449

第 9 章 基于随机集和随机有限集的估计与决策理论	454
9.1 随机集理论基础简介	454
9.1.1 一般概念	454
9.1.2 概率模型	457
9.2 粗糙集理论基础及其与随机集的关系	459
9.2.1 信息系统的一般概念	459
9.2.2 决策系统的不可分辨性	460
9.2.3 集合近似	462
9.2.4 属性约简	464
9.2.5 粗糙隶属度	468
9.2.6 广义粗集	470
9.2.7 随机集与模糊集(粗集)的转换	471
9.3 证据理论基础	471
9.3.1 概述	471
9.3.2 mass 函数、信度函数与似真度函数	472
9.3.3 Dempster-Shafer 合成公式	476
9.3.4 证据推理	478
9.3.5 证据理论中的不确定度指标	480
9.3.6 证据理论存在的主要问题与发展	481
9.4 证据理论与随机集的关系	483
9.4.1 随机集的 mass 函数模型	483
9.4.2 mass 函数的生成	485
9.5 基于随机集理论的多源异类信息融合方法论探讨	488
9.5.1 多源异类信息融合的一般概念	488
9.5.2 用随机集理论描述和解决多源异类信息融合的基本思路	489
9.6 随机有限集理论基础	504
9.6.1 基本概念	504
9.6.2 随机有限集的统计	505
9.6.3 广义有限集统计特性	507
9.6.4 基于随机有限集的多目标贝叶斯滤波	509
9.6.5 基于随机有限集理论的多目标跟踪方法	510
9.7 概率假设密度滤波器	511
9.7.1 概率假设密度即为一阶多目标矩密度	511
9.7.2 概率假设密度滤波器的递推公式	512
9.7.3 概率假设密度滤波器的序贯蒙特·卡洛实现及状态提取	515
9.7.4 概率假设密度滤波器的高斯混合实现	517

9.7.5	势概率假设密度滤波器	520
9.8	基于随机有限集理论的部分可分辨群目标跟踪	521
9.8.1	群目标跟踪问题简述	521
9.8.2	群目标概率假设密度滤波器	522
9.8.3	群目标势概率假设密度滤波器	529
9.9	基于随机有限集理论的联合的目标跟踪和多传感器空间配准算法	533
9.9.1	基于概率假设密度滤波器的联合的目标跟踪和 多传感器空间配准算法	533
9.9.2	一个应用举例	537
9.10	小结	544
9.11	参考文献	544
第 10 章	随机最优控制	552
10.1	引言	552
10.2	随机最优控制的一般理论	553
10.2.1	信息结构与容许控制律类	553
10.2.2	随机最优控制问题的一般表述与控制策略	555
10.2.3	最优性原理与随机贝尔曼方程	557
10.3	经典信息结构下离散时间系统的线性二次高斯(LQG)问题	565
10.3.1	线性二次高斯问题的求解与分离定理	565
10.3.2	定常线性二次高斯问题闭环最优控制的稳定性分析	569
10.4	经典信息结构下连续时间系统的线性二次高斯问题	570
10.4.1	问题求解与分离定理	571
10.4.2	定常系统闭环最优控制的稳定性分析	573
10.5	一步延时信息结构下离散时间系统的线性二次高斯问题	574
10.5.1	一步延时信息结构模式	574
10.5.2	状态估计与最优控制问题求解	575
10.6	经典信息结构下一般离散时间非线性随机系统的双重最优控制	580
10.6.1	闭环最优控制的结构特性	581
10.6.2	闭环最优控制律的特性:谨慎与探测	585
10.7	双重最优控制的近似计算	590
10.7.1	马尔可夫链控制	591
10.7.2	摄动法	597
10.8	双重最优控制的最新研究进展	606
10.8.1	带未知参数线性二次高斯问题的描述	606
10.8.2	名义双重最优控制方法	608
10.9	小结	609

10.10 参考文献	610
第 11 章 随机系统的自适应控制与预测控制	612
11.1 自适应滤波	612
11.1.1 贝叶斯自适应滤波方法	613
11.1.2 并行处理的自适应滤波算法	614
11.1.3 系统结构和参数自适应滤波	618
11.1.4 扩大状态变量的参数自适应滤波	621
11.2 自适应控制的一般概念	624
11.2.1 自适应控制的研究对象和分类	624
11.2.2 参数自适应控制问题的一般性讨论	626
11.3 单输入单输出系统的自校正控制	628
11.3.1 参数自适应控制的确定性等价近似与自校正控制器的结构	628
11.3.2 最小方差控制律和隐式自校正调节器	630
11.3.3 广义输出最小方差自校正控制器	633
11.3.4 显式极点配置自校正调节器	637
11.4 多输入多输出系统的自校正控制	639
11.4.1 多变量自校正控制的特殊问题	639
11.4.2 多输入多输出(MIMO)最小方差自校正调节器	640
11.4.3 多输入单输出(MISO)最小方差自校正调节器	642
11.4.4 多变量极点配置调节器	644
11.5 随机次最优参数自适应控制	646
11.5.1 确定性等价分量的计算	648
11.5.2 摄动分量的计算	649
11.6 反步自适应控制	654
11.6.1 反步法控制简介	654
11.6.2 反步法自适应控制	655
11.6.3 动态反步法自适应控制	657
11.6.4 扩展动态反步法自适应控制	662
11.7 \mathcal{H}_∞ 鲁棒自适应控制	667
11.7.1 \mathcal{H}_∞ 控制理论简介	667
11.7.2 \mathcal{H}_2 最优控制	668
11.7.3 \mathcal{H}_∞ 最优控制	670
11.7.4 线性离散时间系统 \mathcal{H}_∞ 自适应控制	671
11.8 预测控制	673
11.8.1 预测控制的一般描述	673
11.8.2 广义预测控制方法	675

11.8.3	MIMO 系统的广义预测控制方法	681
11.9	小结	685
11.10	参考文献	685
第 12 章	随机系统的试验与数值仿真	688
12.1	伪随机信号的生成	688
12.1.1	伪随机二位式序列(PRBS)的生成	688
12.1.2	伪随机数的生成	691
12.2	随机系统的试验	696
12.2.1	辨识试验的设计	696
12.2.2	辨识所得模型的适用性验证	701
12.2.3	工业对象辨识试验举例	702
12.3	随机系统的数字仿真	707
12.3.1	蒙特·卡洛法	707
12.3.2	数字仿真实例	709
12.4	小结	711
12.5	参考文献	711
第 13 章	应用随机系统	713
13.1	组合导航系统	713
13.2	基于多传感信息融合的道路车辆跟踪	715
13.2.1	引言	715
13.2.2	车载传感器数据关联的 D-S 实现	716
13.2.3	仿真示例	719
13.3	共同杂波环境中基于异类信息的多传感误差传递与校正	723
13.3.1	概述	723
13.3.2	问题描述与基本原理	724
13.3.3	目标 1 量测数据的误差标定与分离算法	725
13.3.4	从目标 1 量测数据到目标 2 量测数据的误差传递算法	726
13.3.5	目标 2 量测数据的误差校正算法	727
13.4	杂波环境中基于异类信息融合的目标跟踪	729
13.4.1	问题描述	729
13.4.2	概率生成模型	730
13.4.3	对于音频-视频数据的一个概率生成模型	730
13.4.4	基于音频-视频数据融合的参数估计与目标跟踪	733
13.4.5	融合与跟踪结果	735
13.5	飞行器姿态确定与估计	737

13.5.1	姿态确定问题	737
13.5.2	姿态运动方程	737
13.5.3	姿态敏感器量测方程	740
13.5.4	基于 KF 的姿态估计	742
13.6	探月飞行器轨道确定与估计	743
13.6.1	引言	743
13.6.2	探月飞行器的运动方程	744
13.6.3	探月飞行量测方程	745
13.6.4	轨道初值确定	746
13.6.5	广义状态估计	747
13.6.6	欧洲 SMART-1 月球探测器轨道确定	748
13.7	随机最优制导规律	750
13.7.1	引言	750
13.7.2	制导问题数学描述	751
13.7.3	交会状态估计	753
13.7.4	最优制导规律	753
13.8	小结	754
13.9	参考文献	754
附录 A 矩阵论和范数		758
A.1	基本知识	758
A.1.1	分块高斯消元法与 Schur 补	758
A.1.2	矩阵求逆引理	760
A.1.3	一些行列式恒等式	760
A.2	矩阵特征值和特征向量	761
A.2.1	特征值的特性	762
A.2.2	系统状态矩阵的特征值	763
A.3	矩阵的 Kronecker 乘积	763
A.4	矩阵的 QR 分解	765
A.5	矩阵的奇异值分解	765
A.6	矩阵的伪逆(广义逆)	767
A.7	向量和矩阵范数	768
A.7.1	范数的一般概念	768
A.7.2	向量范数	768
A.7.3	矩阵范数	769
A.7.4	谱半径	771
A.7.5	矩阵范数的一些关系式	771