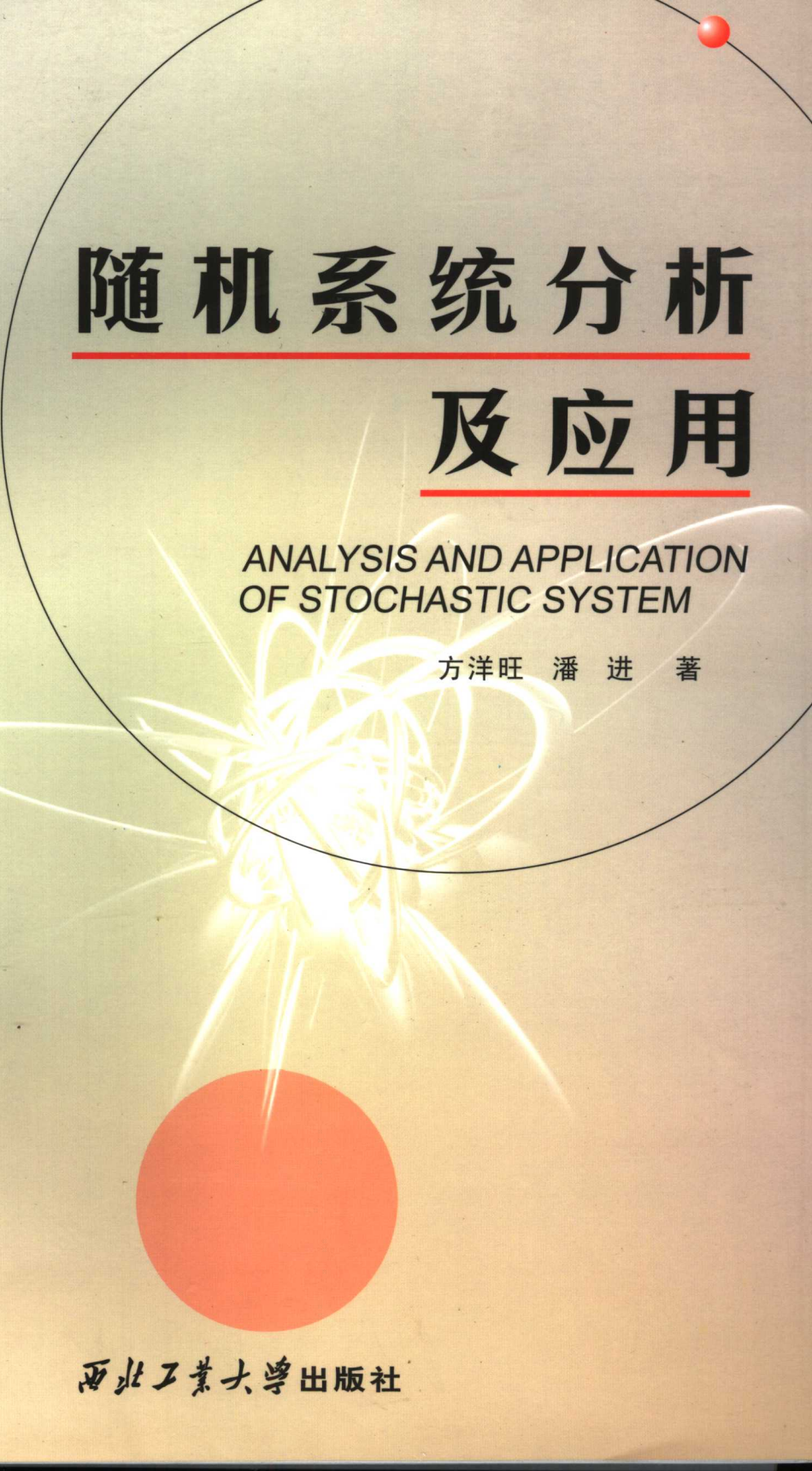




随机系统分析 及应用

ANALYSIS AND APPLICATION
OF STOCHASTIC SYSTEM

方洋旺 潘 进 著

西北工业大学出版社

随机系统分析及应用

方洋旺 潘 进 著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书全面介绍了国内外控制理论及信号处理专家在随机系统分析领域的最新研究成果。选材广泛,内容新颖,针对离散及连续时间随机系统模型,研究了随机线性及非线性系统的最优状态估计问题。特别重点介绍了俄罗斯(含苏联)学者在此领域研究的新进展。

本书可供从事信号处理、控制理论与控制工程等有关研究与应用的研究生和科技工作者参考使用,也可作为随机系统分析方面的专业教材。

图书在版编目(CIP)数据

随机系统分析及应用/方洋旺,潘进著. —西安:西北工业大学出版社,2006.9

ISBN 7-5612-2124-X

I. 随… II. ①方…②潘… III. 随机系统—系统分析 IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 106887 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印刷者:西安东江印务有限公司

开 本:787 mm×960 mm 1/16

印 张:19.125

字 数:410 千字

版 次:2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

定 价:28.00 元



作者简介

方洋旺，1966年1月生，空军工程大学教授，博士生导师。1998年获得西安交通大学控制科学与工程专业工学博士学位。1999.1—2001.5在西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室从事信号处理及无线通信技术方面的研究；2001.9—2004.6由国家公派到俄罗斯某著名军事航空技术大学从事航空兵器的学习及研究。已在IEEE Trans. on Signal Processing 和 IEEE Trans. on Neural Network 等多种国内外重要学术期刊上发表论文60余篇，其中，27篇被国际三大检索杂志收录。已出版专著《线性系统理论与应用》（西安交通大学出版社，2001）及《随机系统最优控制》（清华大学出版社，2005），出版教材5部。主要研究领域是随机最优控制、导弹制导与控制、非线性控制和智能信息处理等。



作者简介

潘进, 1959年11月生, 西安通信学院教授, 博士生导师。1990年7月在陕西师范大学数学系获理学硕士学位, 2001年12月在西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室获工学博士学位。现为西安通信学院教授, 网络安全与对抗研究室主任, 总参西安科技创新工作站进站专家, 陕西省信号处理学会理事, 西安电子科技大学博士生导师, 总参优秀中青年专家。研究成果获得军队科技进步奖两项, 完成专著三部, 论文40余篇, 其中被三大检索收录论文近20篇。目前的研究方向为智能信息处理和网络安全与对抗。

前言

随着电子计算机、军事和空间技术的发展,经典的 Wiener 滤波理论、Kalman 滤波理论和确定性最优控制理论已不能满足实际应用的需要,必须针对不同类型的随机系统模型,包括离散时间的、连续时间的、系统结构参数不准确的、非线性的以及一般的随机系统模型,来研究随机系统的最优状态估计与最优控制问题,对于这些问题的研究逐步发展成为随机系统分析理论与随机最优控制理论。随机系统分析理论既可自成体系,本身也具有非常广泛的应用。目前,随机系统分析理论已在控制理论与控制工程、导航与制导、信号处理、雷达跟踪、通信、图像处理、卫星测控、故障诊断、机器人等领域获得成功的应用,同时,它也是随机最优控制理论的重要基础理论部分。关于随机最优控制理论,作者已在专著《随机系统最优控制》(北京:清华大学出版社,2005 年版)有专门的介绍。

国内外已出版了一些有关随机系统状态估计及控制理论方面的著(译)作,而且其中不乏优秀之作,但是,这些著作一般要么将随机系统分析理论的内容作为其部分章节简单加以介绍,要么就是比较浅显地介绍其一般的很成熟的理论和方法,要么只论述某个专题(如基于现代时间序列分析方法的 Kalman 滤波、离散随机系统状态估计),迄今尚无一本全面深刻介绍随机系统分析的各种理论和方法方面的专著。本书旨在填补这一空白,为从事信号处理、控制理论与控制工程等有关研究与应用的研究生和广大科技工作者奉献一本选材广泛、内容新颖、可读性强的随机系统分析方面的教材。

本书全面介绍了国内外控制理论及信号处理专家以及本书作者在此领域研究的最新成果,特别重点介绍了国内关注较少的俄罗斯(含苏联)学者在此领域研究的新进展。全书内容的特点在于:

1. 选材广泛。书中的论述既针对离散时间随机系统模型,也针对连续时间随机系统模型;既研究随机线性系统最优状态估计问题,也研究随机非线性系统的最优状态估计问题;既研究了一般随机系统随机的最优状态估计问题,也研究了更为复杂的切换系统分析、离散时间和连续时间切换系统的结构辨识和最优状态估计。另外,还介绍了目前非常热门的有多传感器信息融合中的最优状态估计方面的最新研究成果。

2. 内容新颖。书中许多内容在国内都是首次被系统地介绍,如随机系统的条件最优状态估计、随机切换系统分析、离散时间和连续时间切换系统结构辨识和状态估计等。其他内容大都是近十年来的最新研究成果,如随机系统自适应最优滤波以及多传感器信息融合中的最优状态估计等。

3. 研究方法独特。在分析、研究问题中使用统计线性化方法来求解非线性随机系统的最

优状态估计问题;针对一般随机系统模型,研究非常有工程应用价值的条件最优估计问题。

4. 实用性强。本书不但用了大量篇幅介绍有关应用,而且在最后一章还专门讨论如何在航空、航天、海洋、电子、通信等领域使用随机系统分析理论实例等。

本书用大写字母表示随机变(向)量,小写字母表示确定性变(向)量。本书第1,3~11,13章由方洋旺执笔,第2,12章由潘进执笔。全书由方洋旺统稿。

在本书的撰写、出版过程中,得到清华大学张贤达教授、西安电子科技大学焦李成教授的推荐和帮助,在此向他们表示衷心的感谢。同时衷心地感谢西安交通大学韩崇昭教授,空军工程大学蔡凤震教授、杨晓铁教授、张凤鸣教授、于雷教授、肖明清教授等的关心、鼓励和帮助;还要感谢空军工程大学及工程学院领导、同仁的大力支持。博士生伍友利、周晓滨和硕士生王亚飞参与了部分书稿的录入及插图的绘制,在此一并表示感谢。感谢西北工业大学出版社的大力支持和帮助。在书中引用了一些作者的论著及其研究成果,在此,向他们表示深深的谢意。

最后,感谢国防预研重点基金的资助。

由于作者水平有限,书中缺点甚至错误之处在所难免,望读者批评指正。

空军工程大学工程学院 方洋旺
中国人民解放军西安通信学院 潘 进

2006年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 随机系统分析理论研究的历史与现状	1
1.2 随机系统分析的研究内容	4
1.3 本书内容	5
第 2 章 随机过程及分析	7
2.1 随机过程定义及基本类型	7
2.1.1 随机过程定义及分类	7
2.1.2 随机过程的概率描述	8
2.1.3 随机过程的数字特征	9
2.1.4 几类重要的随机过程	10
2.2 平稳过程	11
2.2.1 平稳过程的概念	11
2.2.2 平稳过程相关函数的性质	12
2.2.3 平稳过程的各态历经性	13
2.2.4 平稳过程的谱分析	14
2.3 Markov 过程	16
2.3.1 Markov 过程(链)的定义	16
2.3.2 Markov 过程的转移概率和概率分布	16
2.3.3 状态离散的纯不连续 Markov 过程	19
2.3.4 状态连续的纯不连续 Markov 过程	21
2.4 白噪声过程	22
2.4.1 白噪声的定义	22
2.4.2 带限白噪声和高斯白噪声	22
2.5 均方可积性和可微性	23
2.5.1 均方收敛性	24

2.5.2 均方连续性	24
2.5.3 均方可积性	25
2.5.4 均方可微性	26
2.5.5 Ito 随机积分和随机微分方程	27
第3章 随机线性系统分析	32
3.1 引言	32
3.2 随机线性系统数学模型	32
3.2.1 连续时间随机线性系统	32
3.2.2 离散时间随机线性系统	34
3.3 连续时间随机线性系统状态向量矩	36
3.3.1 问题描述	36
3.3.2 冲激响应函数法	37
3.3.3 概率矩微分方程	38
3.4 离散时间随机线性系统状态向量矩	41
3.5 随机线性系统状态向量分布函数	45
3.5.1 第一特征函数计算	45
3.5.2 概率密度函数计算	47
第4章 随机非线性系统分析	51
4.1 引言	51
4.2 随机非线性系统数学模型	51
4.2.1 连续时间随机非线性系统	51
4.2.2 离散时间随机非线性系统	52
4.3 随机非线性系统统计线性化	53
4.3.1 非线性函数的一般线性化	53
4.3.2 非线性函数的统计线性化	54
4.3.3 随机非线性系统统计线性化模型	58
4.4 随机非线性系统的矩分析	58
4.4.1 冲激响应函数法	59
4.4.2 逼近概率矩微分方程	60
4.4.3 离散时间随机非线性系统状态向量的矩	62
4.5 随机非线性系统的状态向量分布函数	65

4.6 状态向量分布转移函数	69
4.7 逼近概率特征	71
4.8 中心矩及累积量	78
第5章 随机跳变系统概率分析	81
5.1 随机跳变系统数学模型及分类	81
5.1.1 随机跳变系统模型	81
5.1.2 随机跳变系统分类	82
5.2 离散 Markov 结构参数过程	83
5.2.1 独立随机跳变系统	83
5.2.2 分散转移随机跳变系统	85
5.2.3 集中转移随机跳变系统	86
5.3 离散 Markov 结构参数序列(链)	86
5.4 分散转移随机跳变系统状态过程的概率密度函数	88
5.4.1 连续时间情形	88
5.4.2 离散时间情形	92
5.5 集中转移随机跳变系统状态过程的概率密度函数	93
5.6 随机跳变系统状态过程概率方程	96
5.7 随机跳变系统的概率矩方程	98
5.7.1 非线性随机跳变系统的概率矩	98
5.7.2 线性随机跳变系统的概率矩	101
第6章 随机线性系统最优估计	103
6.1 引言	103
6.2 Bayes 点估计理论	103
6.3 连续时间随机系统 Kalman 滤波	108
6.4 连续时间随机系统线性最优滤波器	110
6.4.1 相关噪声情形	110
6.4.2 有色量测噪声情形	113
6.4.3 惯性量测情形	118
6.5 连续时间随机线性最优滤波器的一般形式	120
6.6 连续时间随机线性最优预测与最优平滑	121
6.6.1 最优预测	121

6.6.2 最优平滑	122
6.7 H_∞ 滤波器设计	122
6.7.1 数学模型	123
6.7.2 H_∞ 滤波器设计算法	123
6.7.3 鲁棒 H_∞ 滤波器设计算法	126
6.8 离散时间随机系统最优滤波器	128
6.8.1 一般白噪声情形	128
6.8.2 惯性量测情形	131
6.8.3 有色噪声情形	132
6.9 离散时间随机系统最优预测和平滑	134
6.9.1 最优预测	134
6.9.2 最优平滑	136
第7章 随机非线性系统最优估计	141
7.1 引言	141
7.2 后验概率	142
7.3 后验概率密度函数方程	146
7.4 非线性滤波的逼近算法	152
7.5 Gauss 逼近法	154
7.6 准最优非线性滤波器	157
7.6.1 直接线性化法	157
7.6.2 统计线性化法	158
7.7 带有不完全确定参数的准最优线性滤波器	159
7.7.1 直接线性化法	159
7.7.2 统计线性化法	160
第8章 随机系统自适应最优滤波	162
8.1 基于 Bayes 方法的自适应滤波	162
8.1.1 一般 Bayes 自适应滤波方法	162
8.1.2 基于并行处理的参数自适应滤波	164
8.1.3 系统结构和参数自适应滤波	167
8.2 扩展状态的参数自适应滤波	169
8.3 基于噪声估计器的自适应滤波	172

8.3.1 定常噪声估计器情形	172
8.3.2 时变噪声统计估计器情形	175
8.4 基于白噪声估计器的自适应滤波	177
第9章 条件最优滤波器与最优预测器	181
9.1 引言	181
9.1.1 数学模型	181
9.1.2 条件最优滤波器的基本思想	182
9.1.3 可允许滤波器类	182
9.1.4 条件最优滤波和预测问题提法	183
9.2 条件最优滤波器	183
9.3 线性系统条件最优滤波器	188
9.4 条件最优预测器(外推)	191
9.4.1 一般条件最优预测器	192
9.4.2 线性条件最优预测器	192
第10章 连续时间随机跳变系统最优滤波	197
10.1 引言	197
10.1.1 数学模型	197
10.1.2 结构参数与状态向量的概率特性	198
10.1.3 结构参数与状态最优估计	199
10.2 后验概率密度方程	199
10.3 跳变时刻不确定的最优状态估计	206
10.3.1 问题提出	206
10.3.2 一般最优滤波结构及算法	207
10.3.3 Gauss 逼近最优滤波器	208
10.3.4 随机线性跳变系统的最优滤波算法	210
10.4 两结构随机跳变系统的最优状态估计	211
10.4.1 问题描述	211
10.4.2 最优滤波器的结构与算法	212
10.4.3 特例分析	213
10.5 跳变时刻确定的最优状态估计	214
10.6 跳变时刻可测定的两结构随机跳变系统状态估计	217

10.6.1	两结构最优滤波器结构与算法	217
10.6.2	特例分析	218
第 11 章	离散时间随机跳变系统最优滤波	219
11.1	引言	219
11.2	离散时间随机跳变系统的结构辨识和状态估计	220
11.3	逼近最优滤波器	224
11.4	线性随机跳变系统的最优滤波	225
11.4.1	一般线性随机跳变系统	226
11.4.2	特殊情形	228
11.4.3	实例研究	228
11.5	带有跳变干扰观测的随机系统的自适应滤波	232
第 12 章	多传感器信息融合中的最优状态估计	237
12.1	引言	237
12.1.1	信息融合的定义	238
12.1.2	信息融合的特点	239
12.1.3	多传感器信息融合的层次	240
12.1.4	多传感器信息融合的方法	241
12.1.5	多传感器信息融合的结构	242
12.1.6	多传感器信息融合的主要内容	243
12.1.7	多传感器信息融合的应用领域	244
12.1.8	多传感器信息融合的发展趋势	245
12.2	多传感器极大后验融合估计准则	245
12.3	集中式多传感器信息融合系统中的最优状态估计	247
12.4	分布式多传感器信息融合系统中的最优状态估计	250
12.5	混合式多传感器信息融合系统中的最优状态估计	251
12.6	多级式多传感器系统中的分层估计	252
12.7	多传感器信息融合稳态最优平滑器和预报器	254
第 13 章	随机系统分析应用实例	256
13.1	“空—空”导弹最优自寻的控制	256
13.1.1	数学模型	256

13.1.2 最优状态估计	258
13.2 在惯性导航初始对准中的应用	261
13.2.1 数学模型	261
13.2.2 最优状态估计应用	264
13.2.3 仿真研究	268
13.3 在舰船航迹估计中的应用	269
13.3.1 系统模型	269
13.3.2 船舶航迹最优估计	274
13.4 空战中机动目标角坐标估计	276
13.4.1 问题描述	276
13.4.2 数学模型	277
13.4.3 最优角坐标估计算法	278
名词索引	281
参考文献	283

第1章 绪论

1.1 随机系统分析理论研究的历史与现状

随机系统理论的起源可追溯到 1795 年 Gauss 在研究行星轨道问题时提出的最小二乘法。自从最小二乘法提出以来,其思想一直影响着统计理论的发展。第二次世界大战期间,由于军事技术的需要,A. H. Kolmogorov^[1]和 N. Wiener 相继提出平稳随机过程的最优线性滤波理论,通常称为 Wiener 滤波理论^[2]。这一理论除了计算复杂,不易推广到非平稳过程等缺点之外,最主要的缺点是必须把所用到的数据全部保存起来,并且每一时刻都要通过这些数据进行计算,才能得到所需的各种量的估计值,从而很难用于实时计算。20 世纪 60 年代以后,美籍匈牙利数学家 R. E. Kalman^[3]首先提出用一个状态方程和一个测量方程来完整地描述线性动态系统,并在最小均方误差准则下给出了滤波的递推算法。1961 年, Kalman 和 R. S. Busy^[4-5]把滤波方法推广到连续系统中,得到了著名的“Kalman - Busy 滤波理论”。这一理论克服了 Wiener 滤波理论的上述缺点,将滤波理论推到了一个新的阶段。

在 Kalman 和 Busy 提出线性连续时间系统的状态滤波解法后不久, Kushner^[6]和 Stratonovich^[7]分别就非线性滤波、预测的基础理论进行了研究。

在工程实际问题中,存在着大量的动力学系统,由于随机突变现象引起系统的跳变,诸如互联子系统的变化;环境条件等的突变;非线性系统经线性化后工作点的迁移;系统元件的故障;参数的改变;在跟踪问题中,在不同控制阶段环境对系统的影响不相同等都会使得系统在各个不同阶段引起随机的波动。人们通过大量的研究发现,这种随机变化的规律通常遵循 Markov 过程的变化规律。具有上述特征的系统,一般来讲,就是所谓的“混杂系统”(Hybrid system),即系统既包含了连续的状态,又包含了离散的状态,故此类系统又称为随机跳变系统。关于随机跳变系统的稳定性理论与控制理论的研究起源于 20 世纪 60 年代,随机跳变系统的稳定性理论是由 Kats I. Ya 和 Krasovskii N. N^[8]首先提出的,而随机跳变系统的控制理论由 Lidskil^[9]首先进行了研究。

从 20 世纪 60 年代起,随机系统分析开始沿着几个重要方向发展,例如随机线性系统分析、随机非线性系统分析、随机跳变系统分析、随机自适应滤波与控制、随机条件滤波与控制以及多传感器系统状态估计等。

1. 随机线性系统分析

1968 年 Wonham 首先提出并证明了分离定理^[10],根据此定理,可将随机线性系统最优控

制问题分成独立的两部分来求解,一部分是状态估计,另一部分是求解最优控制律。人们很快将确定性的最优控制理论推广到随机系统最优控制中,取得了一些重要成果^[11-12]。之后,对随机线性系统滤波和控制理论进一步完善的同时,人们将注意力集中在研究随机线性系统一些特殊情形,如广义随机系统的估计^[13-14],带有色噪声或有色乘积噪声线性随机系统的滤波^[15-17],随机线性系统的稳定性^[18-21]等。20世纪80年代提出 H_∞ 控制理论后,很快成为研究热点,不久,人们就将此理论应用到随机系统中,即随机 H_∞ 控制^[22-24]。与此同时,随机线性系统状态估计和滤波理论逐渐成熟,大量的研究著作和教材陆续出版^[25-31]。

2. 随机非线性系统分析

1967年苏联控制论专家 Казаков 提出了使用统计线性化方法研究随机非线性系统的控制问题^[32],并研究了线性化的逼近精度问题^[33]。后来,人们将线性化的思想加以推广,获得了很多关于非线性滤波和控制的逼近算法^[34-36]。关于非线性滤波的逼近算法,主要集中在按某种方法构成近似滤波器,即考虑如何合理地将逐次产生的高阶统计量在适当的阶截断。这是由于非线性滤波问题在理论上可以进行严密的推导,但得到的是一种无法实现的滤波器。因此,它在计算最优估计量时,要逐次产生无限高阶的统计矩,若不知道这些量,则无法计算。这就是它与线性滤波理论的主要区别。而线性滤波只要一阶和二阶统计矩,就可以完全由系统的最优估计值和其误差的均方差确定。按照滤波理论,在形成最优滤波值时,要考虑条件概率密度函数。对于非线性滤波理论,要考虑非 Gauss 概率密度函数,因此,当进行线性化处理时,就是以这种概率密度函数为对象进行的。目前,使用线性化的方法很多,归纳起来,主要包括以下一些方法:

(1)忽略二阶以上的高阶统计量,把这种方法叫做二阶矩滤波器。对于条件概率密度函数均值呈现对称性,且近似地可以看成 Gauss 分布时,或当输出水平较低时,不会引起显著的非线性特征时,这种方法较为适用。

(2)假设条件概率密度函数属于 Gauss 概率密度函数,则可以完全忽略奇数阶统计量,对于偶数阶统计量,只考虑到四阶,把更高阶的矩截去。这种方法虽然计算稍微复杂一些,但它考虑了一个高阶矩。

(3)把非线性函数进行 Taylor 展开的方法。

(4)把非线性函数按概率统计的方法进行线性化-统计线性化的方法。

(5)把非线性函数展开,保留二阶以下的矩,将高阶矩的影响用系数形式表示,构成伪线性函数进行滤波。

(6)广义 Kalman 滤波器,它是滤波轨迹的一种方法。

(7)按概率近似进行滤波的方法。

研究随机非线性系统的滤波和控制理论从20世纪80年代开始逐渐增多,特别是在90年代,对随机非线性系统的滤波和控制的研究成为热点,在随机非线性系统状态估计^[37]、随机非线性系统的稳定性^[38-40]、随机非线性系统最优控制^[41-46]、随机非线性系统自适应控制^[48-49]以及随机非线性系统的控制方面^[50]都取得了重要成果。

3. 随机跳变系统分析

随机跳变系统分析在 20 世纪 70~80 年代发展相对较慢,主要原因是由于随机跳变系统的滤波和控制算法非常复杂,计算量很大,而且当时的计算机技术无法确保这些算法的实时性,从而限制了其发展。但苏联控制论专家在随机跳变系统的概率分析^[51-54]、控制精度分析^[55-59]以及控制器设计^[60-66]等方面有比较多的研究成果。到了 20 世纪 90 年代,随着计算机技术快速发展和数学理论的不完善,使得对随机跳变系统的进一步研究成为可能,从而推动了研究随机跳变系统的热潮,并在诸多研究领域取得了重要成果。例如,在稳定性^[67-76]、状态估计^[77-88]、最优控制^[89-91]、控制^[92-95]以及其他控制算法^[96-99]等方面都有大量的文章发表。刘永清和他的学生们在随机跳变系统稳定性及镇定等方面做了大量的研究工作,取得了重要研究成果^[76,99]。近年来,人们在随机跳变系统的粒子滤波^[100]、对策控制^[101]、自适应控制^[102]和鲁棒控制^[103]等方面也有一定的研究。

4. 自适应滤波和控制

在实际应用中,大多数情况下系统模型和噪声统计是部分已知、近似已知或完全未知的。这样,若还使用上述理论来对不精确或错误的模型和噪声统计来设计最优滤波器,则可导致滤波器性能变坏,甚至使滤波器发散。为了解决这个矛盾,产生了自适应滤波。关于自适应滤波研究方法方面,主要使用相关法^[104-105]、Bayes 法^[106-107]、噪声估值法^[108]等方法。邓自立和他的学生们在基于噪声估值器的自适应滤波方面做了大量的研究工作^[109-115]。在随机系统的自适应控制方面,陈翰馥和郭雷等进行了非常深入的研究,取得了重要的成果^[116-119]。此外,在随机系统的自适应控制鲁棒控制方面也有研究^[120]。

5. 条件最优滤波和控制

条件最优滤波是 20 世纪 70 年代末由苏联学者 Пугачев(以下用英译名 Pugahev)首先院士提出的一种非线性滤波方法,即条件滤波方法^[121-122]。此种方法的优点在于基于可滤波的及可测量的过程向量的先验知识,来计算并构造非线性或线性滤波器。使用它可以设计任意形式的滤波器和包括可以选择它的结构以降低设计的复杂度等。20 世纪 80 年代,该方法在苏联研究较多,Pugahev 和他的学生们对此进行了深入的研究^[123-131],此后,Казаков 将此思想应用到随机系统控制器设计中,取得了重要研究成果^[132],同时,还将此理论应用到空-空导弹的自寻的控制中^[133]。自 20 世纪 90 年代以来,吴森堂和方洋旺对条件滤波方法做了进一步的研究,取得了一定的理论成果^[134-135,31]。

6. 多传感器信息融合状态估计

多传感器信息融合系统的最初应用可以追溯到第二次世界大战时期。当时,战场上的火炮系统除了使用雷达之外,还使用了光学测距系统。雷达系统和光学传感器信息极大地提高了系统的测距精度,增强了系统的抗干扰能力和精确打击能力。但是由于技术水平的限制,当时对信息的综合、处理和判断都是由人工完成的,这在一定程度上影响了信息处理的实时性和准确性。到 20 世纪 70 年代,高性能的武器系统和航空、航天技术的发展使得单一的传感器很难完成日趋复杂的作战指挥系统和航天控制任务的要求。为适应信息处理系统的这一需要,