

非线性 随机系统 故障检测

*Fault Detection
of
Nonlinear Stochastic
Systems*

◎ 路 阳 梁清梅 著

 中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

非线性随机系统故障检测

路 阳 梁清梅 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书致力于复杂系统模型随机发生非线性、随机时延及不完全知识转移概率等故障进行融合改进问题的研究,论述非线性马尔可夫跳跃系统故障检测研究、随机时滞非线性系统故障检测问题研究、基于模糊模型的非线性随机系统鲁棒故障检测、基于状态观测器的非线性随机系统容错控制,同时研究了具有随机丢包的时滞系统、具有信道衰落的离散系统、非线性系统的非脆弱 H_{∞} 滤波算法。最后探讨了随机模型故障检测技术在车辆导航系统中的应用。

本书可供高等院校计算机专业、自动化专业高年级本科生和研究生、相关科研工作者及工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

非线性随机系统故障检测/路阳,梁清梅著. —北京:电子工业出版社, 2016.5

ISBN 978-7-121-28440-3

I. ①非… II. ①路… ②梁… III. ①非线性系统(自动化)—故障诊断 IV. ①TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 060021 号

策划编辑:甄文全

责任编辑:甄文全

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订:北京季蜂印刷有限公司

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

开 本:720×1 000 1/16 印张:11 字数:210 千字

版 次:2016 年 5 月第 1 版

印 次:2016 年 5 月第 1 次印刷

定 价:45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

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。

本书咨询联系方式:(010) 88254760; QQ: 112670423。

前 言

随着石油化工、工业过程控制和航空航天对系统可靠性和安全性要求的提高,非线性随机系统的故障检测问题得到了控制理论界和控制工程界许多学者的极大关注.任何自适应控制系统中被控对象或过程所具有的非线性现象是普遍存在且无法彻底消除的.非线性的存在增加了系统的复杂性,同时给系统的分析与综合带来了本质的困难.绝大多数真实系统都会受到随机噪声的影响而成为复杂的随机系统.基于确定性系统的故障检测方法,如基于数据的方法,具有很大的局限性,很难适用于随机系统.因此,开展非线性随机系统的故障检测方法研究具有重要的理论意义和应用价值.

本书在作者近年来从事故障检测相关科研工作基础上,构造两个能量范数指标来反映扰动与故障敏感度之间的关系,设计了最优故障检测滤波器,通过发展新的局部优化故障检测滤波器算法,满足了故障检测动态系统随机稳定的要求,也满足了残差信号对扰动信号的鲁棒性指标与残差信号对故障信号的灵敏度指标的比率最小化要求.从定量的角度揭示出未知转移概率和非线性出现的概率对故障检测灵敏度的影响,为马尔可夫跳跃非线性随机系统的故障检测提供了理论依据.同时,建立了统一刻画时延及随机丢包的数学模型,解决了具有时延及随机丢包情形下的非线性随机系统的故障检测滤波器设计问题.以一个统一的框架建立起数据丢失过程,用 T-S 模糊模型逼近非线性离散系统,利用模糊参数依赖 Lyapunov 函数方法,实现了基于模糊模型的非线性随机系统的故障检测滤波器设计.将基于状态观测器的鲁棒故障检测滤波器设计问题转化为 H_∞ 优化设计问题,提出一种新的鲁棒 H_∞ 容错控制器设计方法,拓宽了基于状态观测器的故障检测范围,避免了基于状态观测器的容错控制的设计难点.同时,针对网络控制系统中存在的信道衰落、时滞、随机丢包、非线性、滤波器增益变化随机发生的现象,分别构建系统和滤波器模型,主要研究了网络化随机系统的非脆弱 H_∞ 滤波问题.建立基于衰落信道的统一测量模型,用能量范数指标描述外部干扰对估计误差的影响,研究离散时间系统非脆弱 H_∞ 滤波设计方法.将非脆弱滤波器设计思想应用到一类具有随机发生丢失测量现象的时滞系统,设计了增益随机发生变化的非脆弱 H_∞ 滤波器.将非脆弱滤波器设计思想推广到一类考虑信道衰落、随机发生非线性的离散系统,研究了随机发生增益变化的非脆弱 H_∞ 滤波器的设计问题.

全书共 10 章,黑龙江八一垦大学路阳编写第 1~6 章并统稿,梁清梅编写第 7~10 章。

本书的出版得到国家自然科学基金项目“基于无线网络的随机滤波理论研究及在油井故障检测中的应用”(61004067)“基于衰落信道的非线性随机系统分布式滤波及故障检测”(61374127)、黑龙江省自然科学基金“基于图像理解的智能诊断关键技术研究”(F201428)及黑龙江省政府博士后资助项目(LBH-Z15815)资助。

本书编写过程中,作者参考和引用了大量国内外有关著作、学术论文等资料,很多专家和学者提出了宝贵修改意见,在此向他们表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2015 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 非线性随机系统研究现状	4
1.2.1 非线性随机系统	4
1.2.2 马尔可夫跳跃系统	5
1.2.3 智能系统	6
1.2.4 随机系统	6
1.2.5 时滞系统	7
1.2.6 信道衰落	8
1.2.7 Kalman 滤波	8
1.2.8 H_∞ 滤波	9
1.2.9 非脆性	10
1.3 非线性随机系统故障检测研究背景	11
1.3.1 非线性随机系统稳定性分析	11
1.3.2 故障检测的主要方法	12
1.3.3 基于模型故障诊断的系统描述	19
1.4 主要工作	22
第 2 章 预备知识	25
2.1 主要符号	25
2.2 线性矩阵不等式	26
2.2.1 线性矩阵不等式的一般表示	26
2.2.2 可转化成线性矩阵不等式表示的问题	28
2.2.3 一些标准的线性矩阵不等式问题	30
2.2.4 求解线性矩阵不等式问题的算法	31
2.2.5 关于线性矩阵不等式的结论	31
2.3 随机变量	33
2.3.1 随机概率	34
2.3.2 伯努利分布	34
2.3.3 协方差	35
2.4 Lyapunov 稳定性理论	36

2.4.1	稳定性的概念	36
2.4.2	Lyapunov 稳定性定理	37
2.4.3	Lyapunov 函数的构造	38
2.5	相关引理	40
2.6	本章小结	42
第 3 章	马尔可夫跳跃非线性系统故障检测	43
3.1	引言	43
3.2	问题描述	44
3.3	主要结论	47
3.4	仿真算例	53
3.5	本章小结	58
第 4 章	随机时变时滞非线性随机系统故障检测	59
4.1	引言	59
4.2	问题提出	60
4.3	主要结论	62
4.4	仿真算例	67
4.5	本章小结	70
第 5 章	基于模糊模型的非线性随机系统故障检测	71
5.1	引言	71
5.2	问题描述	72
5.2.1	模型表示	72
5.2.2	丢包的通信信道	74
5.2.3	模糊故障检测滤波器	74
5.3	主要结论	76
5.4	仿真算例	81
5.5	本章小结	84
第 6 章	基于状态观测器的非线性随机系统容错控制	85
6.1	引言	85
6.2	物理描述	85
6.2.1	故障诊断观测器	86
6.2.2	通信链路	86
6.3	多包丢失故障的状态反馈容错控制问题	88

6.4	容错控制性能分析	88
6.5	容错控制器设计	91
6.6	仿真验证	93
6.7	本章小结	94
第 7 章	具有乘性和加性增益变化系统非脆弱 H_∞ 滤波	95
7.1	乘性增益变化离散系统非脆弱 H_∞ 滤波	95
7.1.1	问题描述	95
7.1.2	乘性增益变化的非脆弱 H_∞ 滤波器设计	96
7.1.3	数值算例	99
7.2	加性增益变化离散系统非脆弱 H_∞ 滤波	100
7.2.1	问题描述	100
7.2.2	加性区间类型增益变化的非脆弱 H_∞ 滤波器设计	101
7.2.3	加性范数有界增益变化的非脆弱 H_∞ 滤波器设计	105
7.2.4	数值算例	107
7.3	本章小结	108
第 8 章	具有信道衰落和时滞系统非脆弱 H_∞ 滤波	109
8.1	具有衰落信道离散系统非脆弱 H_∞ 滤波	109
8.1.1	问题描述	109
8.1.2	系统稳定性分析	111
8.1.3	H_∞ 滤波器设计	114
8.1.4	数值算例	117
8.2	具有随机丢包时滞系统非脆弱 H_∞ 滤波	119
8.2.1	问题描述	119
8.2.2	系统稳定性分析	121
8.2.3	H_∞ 滤波器设计	124
8.2.4	数值仿真	127
8.3	本章小结	129
第 9 章	具有信道衰落非线性系统非脆弱 H_∞ 滤波	130
9.1	问题描述	130
9.2	系统稳定性分析	132
9.3	H_∞ 滤波器设计方法	138
9.4	数值算例	142
9.5	本章小结	145

第 10 章 鲁棒非脆弱 H_∞ 滤波在车辆导航系统中的应用	146
10.1 引言	146
10.2 组合导航系统模型	146
10.2.1 INS 导航系统模型	146
10.2.2 GPS 导航模型	148
10.2.3 GPS/INS 组合导航的模型	148
10.3 鲁棒非脆弱 H_∞ 滤波器设计	149
10.4 实例仿真	151
10.5 本章小结	153
主要参考文献	154

第 1 章 绪 论

本章以网络控制系统为分析对象,介绍了非线性随机系统(包括非线性随机系统、马尔可夫跳跃系统、智能系统)的研究现状,同时介绍了控制领域中随机系统、时滞系统、信道衰落及 Kalman 滤波、 H_∞ 滤波、非脆性、非脆弱 H_∞ 滤波的相关研究进展、研究背景。

1.1 引 言

随着现代系统复杂性的逐渐增加和对其安全性要求的日益提高,复杂动态系统的故障检测技术得到了越来越多的关注,近三十年来取得了很多重要研究成果(Zhang et al., 2009; Hespanha et al., 2007; 钟麦英等, 2002)。然而,基于传统系统所设计的故障检测方法却不能保证其在非线性随机系统中的性能。结合非线性随机系统的自身特性,研究新的故障检测策略具有重要的理论和实际意义。“非线性随机系统故障检测问题研究”是从油田油气集输复杂控制系统中提炼出来的科学问题。现代化油田油气集输技术朝着大规模、复杂化的方向发展,以计算机为基础的各种实时应用控制系统,已广泛应用于各大油田采油、集输或无线巡检系统。而随着采油技术的不断发展,各种设备的结构越来越复杂,这类系统如果发生事故,将会给油田带来巨大损失。例如,1989年8月胜利油田大型原油罐区火灾爆炸事故,烧掉原油 3.6 万吨,烧毁油罐 5 座,事故造成直接经济损失 3500 多万元,造成 19 人死亡、60 多人受伤。1997 年北京东方化工厂发生乙烯装置起火保障事故,造成 9 人死亡、40 多人受伤,直接经济损失达 2 亿元。因此,保证采油井的各种设备的安全运行,消除事故,是十分迫切需要研究的问题。故障检测作为提高系统安全运行的重要组成部分,可以有效地减少故障事故的发生,从而在安全生产的前提下实现最大的经济效益。因此,研究故障检测问题并设计相应的检测策略对企业实现安全生产、提高经济效益具有重要的现实意义(董宏丽, 2012; 黄鹤, 2009; 吕彦平等, 2008)。

目前基于一般线性系统的故障检测理论已日臻完善。而在实际系统中,被控对象或过程所具有的非线性现象是普遍存在的且无法彻底消除。众所周知,非线性是影响系统性能的最主要因素之一,它的存在增加了系统的复杂性,同时给系统的分析带来巨大挑战。一方面,绝大多数真实系统都会受到随机噪声的影响而成为复杂的随机系统。例如,油田螺杆泵井本身属于复杂的非线性系统,其工作环境恶劣,温度、湿度变化大,随机干扰因素较多,使得系统本身存在严重的随机噪声干扰现

象 (Zhang et al., 2008; 彭晨等, 2007). 基于确定性系统的故障检测方法具有很大的局限性, 很难再适用于随机系统. 另一方面, 随着通信及网络技术的迅猛发展, 大量的通过传感器采集的测量信息需要经过通信网络来传递, 而网络信道带宽受限的本质约束, 诱发了基于网络的各种随机发生非线性的新现象, 如通信时滞、网络拥塞、数据包丢失及传输时序紊乱等, 这些问题可以归纳为信息不完全现象. 由于当前技术手段的限制, 对于这些网络诱导新现象发生规律的理解还不是很完全, 这种信息不完全性的内在特性以及对传统的故障检测可能产生的影响成为亟待解决的研究难题. 因此, 发展一种能在统计意义上更加充分利用具有随机特性不完全信息的新型非线性随机系统的故障检测方法成为一个极富挑战性也很有意义的方向, 具有重要的理论意义和应用价值.

在实际环境中, 几乎所有系统都受到某些噪声干扰的影响, 体现出一定随机特性, 因此采用随机系统为实际系统建模是合理的和有意义的. 网络控制系统 (Networked Control Systems, NCSs) 是指通过一个实时网络而构成的闭环控制系统 (于水情, 2013) (图 1.1).

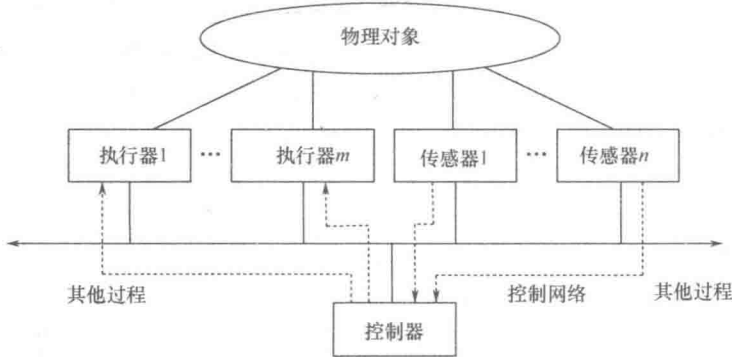


图 1.1 典型的 NCSs 的结构图

随着微电子技术、通信技术以及低功耗嵌入式技术的迅猛发展, 在社会生产及生活的方方面面, 具有感知、通信和计算能力的微型传感器得到了越来越多的应用. 无线传感器网络由一组计算、存储和能量有限的微小传感器节点 (Mouzakis et al., 2009) 以无线通信的方式构成, 其能够根据环境自主地完成指定任务, 这样的智能自治测控网络系统是一种全新的信息获取及处理技术. 在网络中, 传感器节点采集的数据经其他传感器节点逐跳地在网络内传输. 传输过程中数据可能被多个节点处理, 并经过多跳后路由至汇聚节点, 最后通过卫星或互联网抵达数据处理中心.

当今系统的规模逐渐庞大、系统复杂程度也逐渐增加, 对系统的安全性要求也不断提高. 作为一种崭新的获取信息平台, 无线传感器网络具有明显的部署便携性、信息源感知多样性以及系统鲁棒性等优势. 在一个无线传感器网络中, 大量节点在目标检测区域内协作, 这既提高了对目标的检测性能, 又在局部网络受到损坏时节

点迅速自组织成新的网络,从而满足上层应用的需求,实现指定复杂范围内的目标点检测与跟踪.此外,就具有变动/移动汇聚节点的传感器网络而言,分布式结构不仅能够进行局部独立估计,而且能够完成全局监视和评估,其在均衡利用能量、增加监测精度等方面具有明显的优势.现在,传感器网络已广泛应用于森林火灾监测、机动目标追踪、洪水监测、楼宇自动化系统、油罐液位、温度监测等领域.

理想情况下,无线通信系统中假定测量信号可以实时精确传输.然而,在实际环境中,无线信道的特性会制约传感器网络系统的性能,即无线信道环境的好坏直接影响通信质量好坏.一方面,信号在从发送机到接收机的传输过程中,由于受到物理地形或障碍物的影响,信号会发生反射、绕射、衍射等现象,所以到达接收机(Lian, 2000)的信号是由不同路径的来波组合成的,这种现象称作“多径效应”.不同路径的来波到达接收机的时间不同,使得相位也不相同.在接收端,不同相位的来波因同相叠加而增强,因反相叠加而减弱,造成的信号幅度的变化,称为衰落,这种由多径而引起的衰落称为“多径衰落”.另一方面,当发送机与接收机之间存在相对运动时,接收机接收到的信号频率与发送机发射的信号频率将不相同,这种现象称为“多普勒效应”.接收频率与发送频率之差称为“多普勒频移”,其产生的衰落会使接收机很难准确地解析出信号.多径衰落与多普勒频移引起的衰落是造成无线信道环境恶劣的两个传播机制,且相对独立.无线信道的特性主要包含了衰落,称这样的信道为“衰落信道”.在无线通信系统中,复杂的信道环境决定了数据传输时不免要遇到衰落信道问题.此外,电波在衰落信道的传播过程中,有用信号还会受到各种噪声(包括加性噪声、乘性噪声)的污染,出现不同情形的损伤,在恶劣情形下有用信号甚至难以恢复.因此,研究衰落信道环境下的滤波问题具有重要的现实意义.

稳定性问题作为随机系统研究的基础问题之一,对系统的性能表现有直接的影响.然而,实际系统并不能简单地用线性系统描述,因为被控对象或过程中具有普遍存在的非线性现象,并且无法彻底消除.因此,研究非线性随机系统的稳定性问题也显得十分重要.非线性的存在一方面增加了系统的复杂性,另一方面也给滤波问题的研究带来了本质的困难.

在 H_∞ 滤波问题研究中,大多数滤波器设计方法假定参数是可以精确执行的(Keel et al., 1997),然而在实际工程应用中,由于不精确数模转换,数值取整误差的存在、控制器增益重调、执行器老化等原因,所以在滤波器中存在参数波动.更需注意的是,某些设计方法设计的滤波器对其自身系数误差是敏感的(Yang et al., 2001),相对小的波动可能会导致系统性能下降,甚至不稳定.再者,传感器网络中的部分节点由于环境因素或故障发生失效,或者一些节点为了弥补失效节点、增加监测精度而补充到网络中,这些都会造成执行器参数的变化是随机突发的.因此,为增强设计方案的适用性,可以将研究注意力转向设计能够抵抗一定程度增益变化的非脆弱滤波器(Haddad et al., 1998).

综上所述,研究“非线性随机系统的故障检测问题”具有相当高的理论研究和广泛的应用前景,是一个极富挑战性的研究课题,其研究有一定的深度和难度.

1.2 非线性随机系统研究现状

1.2.1 非线性随机系统

在自然界中,随机现象是普遍存在的,很多实际系统都无法避免它的影响.因此,在很多学科领域和工程实际中随机系统都得到了广泛的应用.在实际生活中,绝大多数系统都会受到某种噪声的影响,而这样的噪声通常会表现出一定的随机性,常见于生物系统、化学反应过程、金融系统、物理电路、社会系统等.在20世纪中期,美籍匈牙利数学家 Rudolf E. Kalman 提出的 Kalman 滤波理论和美国数学家 Norbert Wiener 提出的 Wiener 滤波理论是随机系统理论的重要基础,具有重要的理论意义.之后随机系统理论得到学者广泛的关注,针对随机系统的建模、稳定性分析、控制和滤波等问题已经取得了一些研究成果,而相应的故障检测问题却研究较少(王永强等,2009; Fang et al., 2007).

故障检测与滤波理论息息相关.滤波问题是控制与信号处理领域中的研究热点之一,它是以测量输出为基础采用一定滤波方法估计出系统内部不可测量的信号或还原出受噪声干扰的真实信号.滤波在复杂工业过程、军事、医疗、自动控制等领域有广泛的应用.例如,用雷达跟踪飞机测得的飞机位置的数据中含有测量误差及其他随机干扰,如何利用这些数据尽可能准确地估计出飞机在每一时刻的位置、速度、加速度等,就是一个滤波问题,其控制过程也可看作一个复杂系统的故障检测问题.

在实际系统中,被控对象或过程大部分呈现非线性特征.非线性系统与线性系统相比,其最重要最本质的特性是不能采用叠加原理进行分析,从而决定了在研究上的复杂性.非线性现象普遍存在,如频率对振幅的依赖、跳跃谐振、频率捕捉及异步控制等,它反映了非线性系统运动本质,因此给非线性随机系统分析和设计带来实质性的困难.20世纪60年代以来,非线性随机系统研究进入了一个新阶段.混沌等非线性现象成为非线性系统理论中一个新的研究方向,尤其是数学方法,如微分几何方法、微分流形理论、非线性泛函分析等引入非线性系统,对非线性随机系统理论产生了重要影响(方勇纯,2009).20世纪90年代,非线性随机系统的滤波和控制问题成为研究热点,学者从多种角度对非线性系统进行了探讨,如稳定性问题、模糊控制问题、自适应控制问题以及故障检测和容错控制问题等.

许多文献中非线性被看作系统的一种干扰(朱芳来等,2010; Mao et al., 2010;

Pertew et al., 2007), 这种干扰可能来自外部非线性输入或者原始系统中高度非线性的线性化过程, 这是导致系统性能下降的一个重要因素. 有的研究 (Zhang et al., 2009) 中一些非线性现象被建模为具有外部干扰的非线性系统. 有的研究 (Zhang et al., 2008) 考虑了在不完全信息情形下随机发生非线性. 对于随机发生非线性可以定义为某一时刻, 可能由于带宽限制、子系统间的关联改变及非线性对象工作点的变化而引起非线性的类型及强度随机变化. 为了简化系统模型和研究的方便, 通常对非线性增加不同的约束条件, 如李普希兹 (Lipschitz) 条件. 在这些约束条件中, 一种以统计方式描述的随机非线性已经引起了学者特别的关注, 主要是因为它包含了几种常用的非线性约束条件, 更加具有一般性.

1.2.2 马尔可夫跳跃系统

马尔可夫跳跃系统 (Markovian Jump Systems, MJSs) 作为一类具有无限操作模式的内部随机系统, 在过去的二十年间引起了研究者的广泛关注 (Dong et al., 2012; Liu et al., 2011), 因为其广泛应用于电力系统、太阳能中心接收器控制系统、网络控制系统、制造业和金融业等领域. 到目前为止, 关于马尔可夫跳跃系统的研究成果覆盖范围很广, 包括稳定性分析、滤波器设计和控制器设计等. 不仅如此, 马尔可夫跳跃系统在相应的故障检测问题领域也引起了学者的注意, 主要由于其在多故障检测性能指标上具有更好的适应性. 在关于马尔可夫跳跃系统的已有文献中, 大多数成果都假定在跳变过程中的转移概率是完全可知的, 然而对于许多实际系统并不都是这样. 例如, 在网络控制系统中借助耗时和昂贵的统计实验, 精确获得所有的转移概率非常困难. 到目前为止, 对于马尔可夫跳跃系统的不完全转移概率研究才刚刚开始, 如对于不确定和未知转移概率问题. 进一步, 对于模式转移的精细统计的概念也刚被提出, 从而反映获取准确转移概率的有限性有不同级别. 非线性在实际系统中广泛存在, 有很多借助马尔可夫跳跃系统描述外部环境引起的非线性干扰研究. Dong 等 (2012) 将传感器饱和现象建模为具有 Markovian 跳跃系统的模型, 并研究其在有限时间范围的卡尔曼滤波问题. Liu 等 (2011) 借助概率和滑模观测技术研究马尔可夫跳跃系统的故障容错, 通过构建李雅谱诺夫函数并应用时滞相关处理方法. Dong 等 (2012) 对于具有随机时变的马尔可夫跳跃系统故障检测进行了研究, 依赖系统模态滤波器构造残差产生系统, 将故障检测问题转换为故障检测滤波器的设计及其滤波问题. 在现今的主流网络控制系统研究中, 非线性干扰自身也会由于随机变化遇到的随机突变以及由于网络诱导现象引起的跳跃失败, 导致产生随机变化非线性. 换句话说, 这种随机变化非线性的类型和密度以一定的概率密度改变. 不幸的是, 到现在为止对于具有随机变化非线性的离散时间马尔可夫跳跃系统的滤波、控制和故障检测问题还未被研究 (Dong et al., 2012), 这也促使我们进行此方面的研究.

1.2.3 智能系统

智能系统 (Intelligence System) 是指能产生人类智能行为的计算机系统。在控制领域主要是借助计算机智能实现控制的自组织和自适应 (Xu et al., 2012)。智能系统处理的对象, 不仅有数据而且还有知识。知识的表示、获取、存取和处理是智能系统主要研究的问题。在故障诊断过程中, 其往往采用人工智能的问题求解模式来获得结果。智能系统与基于模型的系统相比, 有三个比较明显的特征, 即其问题求解算法往往是启发式的、其问题求解在很大程度上依赖知识、智能系统的问题往往具有指数型的计算复杂性。

由于智能控制对象的复杂性、不确定性, 以及对控制系统实时性和对动态过程高控制性能要求等特点, 使得在智能控制系统中的知识表示和推理方面, 具有自己的特点。在智能控制系统中可以采用的推理方法包括: 基于规则的推理、模糊逻辑推理、基于神经网络的推理、定性推理、基于事例的推理以及基于规则、事例和模型的综合推理等 (张孝远等, 2010; Thumati et al., 2010; Wang et al., 2005; 周开利等, 2002)。实际生活中大多数物理系统都是非线性的, 对非线性特征建模的困难使得非线性系统的控制比线性系统困难得多。这使得人们寻求各种方便于控制的逼近模型来描述非线性系统, 而作为智能系统中的模糊系统能够以任意精度逼近任意光滑的非线性函数从而获得了广泛应用。Takagi 和 Sugeno 基于模糊逻辑提出了一种与以往模糊模型形式不同的模型——T-S 模糊模型, 并给出了根据输入输出数据将非线性系统辨识成 T-S 模糊模型的方法。模型的前件部分描述输入变量及其与模糊空间的关系, 后件部分给出每一种描述情形下输入输出之间的线性关系。Tanaka 和 Wang 证明了 n 维情形的 T-S 模糊模型的全局逼近特性, 因此 T-S 模糊模型自 20 世纪提出之后国内外学者给予了足够的重视, 各种针对 T-S 模糊模型的稳定性、性能分析及综合方法百花齐放。

1.2.4 随机系统

随机系统是指在输入输出及干扰有随机因素的系统, 或本身带有某种不确定性的系统 (杨立新, 2012)。为了控制一个随机系统, 首先要建立系统的数学模型 (Luo et al., 2014; 阚秀, 2013), 即随机系统辨识。在得到了系统数学模型后, 要依据测量进行估计系统的状态, 也就是随机系统的内差、滤波与外推问题, 而后对系统的演化进行控制。在随机系统中, 实现满足一定性能指标最优的控制, 称作随机控制问题 (胡艳梅, 2012)。对随机系统来讲, 也可以研究系统所确定的随机过程的分布类型, 如一类系统可通过 Markov 过程来描述, 相应地受控过程也称为马氏决策过程。

在实际中虽然有时可以忽略随机因素, 把系统近似地作为确定性来处理。然而, 为提高系统精度, 把动态系统如实地当作随机系统来研究是十分必要的。例如, 在

网络化系统控制和滤波问题中,对随机丢失测量现象已经有广泛的研究,其中一般的建模方法为采用二进制随机变量序列 (Shen et al., 2008; Wang et al., 2006, 2003). 又如, Wang 等 (2003) 研究了带有丢失测量的方差约束滤波问题,得到的滤波器可以确保每个状态估计误差的稳态方差小于一个给定界限值. Wang 等 (2006) 考虑了带有丢失测量现象的时滞系统鲁棒 H_∞ 滤波问题,并通过确定的线性矩阵不等式给出了解决方法. Shen 等 (2008) 研究了一类伴随丢失测量的非线性随机系统 H_∞ 滤波问题. 本书后面的几章研究同时考虑了无穷分布时滞、随机丢失测量、ROGVs 的离散系统的非脆弱 H_∞ 滤波问题.

由于温度变化、元件老化等,几乎每一个动态系统都经历一些参数和结构的变化 (Hu et al., 2012). 在有大量包的传输信道中,在某一瞬间会出现由有限带宽引起的网络堵塞,这样的现象可以由随机发生非线性 (Randomly Occurring Nonlinearities, RONs) 现象描述,使用伯努利分布的随机变量描述随机因素 (Hu et al., 2012),其中发生概率可以通过统计实验估计,强度和类型是随机变化的 (Shen et al., 2010). Zhang 等 (2012) 讨论了伴随不确定丢包的非线性网络控制系统的 H_∞ 滤波问题. Hu 等 (2013) 对一类伴随随机非线性、传感器时滞系统进行了增益约束递归滤波方法讨论. 胡军 (2013) 研究了一类网络环境下非线性随机系统的递推滤波及控制策略.

1.2.5 时滞系统

在控制工程和信号处理领域中,连接网络元件的通信电缆通常为有限带宽的,这将导致量化误差 (Dong et al., 2012)、通信时滞 (刘锦智, 2010; Zhou et al., 2008; 王武等, 2007)、非线性 (Wang et al., 2014; 李卓, 2009)、数据丢失 (Sun et al., 2008)、耦合时滞 (Wang et al., 2013) 等现象. 在多种时滞中,分布时滞具有独特的工程意义,得到越来越多学者的关注 (李旭光等, 2008; Gao et al., 2006). Yu (2008) 考虑了系统带有时变分布时滞的 H_∞ 滤波器设计. 在图像处理、运动材料热加工、联想记忆等实际系统中,也会存在无穷分布时滞. 从客观实际角度来说,无穷分布时滞 (Wei et al., 2014; 马大中等, 2009) 可以进一步描述事物本质,含无穷分布时滞的系统由 n 个含时滞的线性系统组成,因此离散时滞系统为无穷分布时滞系统的一类特殊情形 (赵宁宁, 2011). 近年来,针对无穷分布时滞已有关于连续时间系统的研究成果,其无穷分布时滞由有限或无穷积分描述. 王成 (2012) 研究了不确定随机时滞系统的分析与控制. 肖伸平 (2008) 研究了不确定线性时滞系统时滞相关非脆弱鲁棒控制. 然而,大多数现有的数字控制系统本质上都是离散的 (Wang et al., 2010). 关于设计具有无穷分布时滞的离散时间系统滤波器的研究成果还不是很多. 本书第 8 章对参考文献 (Wang 等, 2014) 的研究系统中无穷分布时滞研究模型、分析离散时滞系统的非脆弱 H_∞ 滤波问题进行讨论.

1.2.6 信道衰落

信道衰落是网络传输过程中不可忽略的信道特性,其引发的频率选择性衰落、信号多径衰落以及噪声干扰等信号损耗现象会使接收信号的质量严重恶化,降低通信的可靠性。一般来说,衰落影响的两个主要原因是多径传播和障碍物阴影效应。考虑到无线传感器网络通常部署在一些环境恶劣、人们难以抵达的区域,加上网络具有更加复杂的信道环境,因此导致的信道衰落问题将更为严重,这构成了系统整体性能恶化的一个潜在因素。

一方面,因为传感器节点的有限能量会限制传输的带宽,所以一般需要将传感器的测量量化后再进行发送;另一方面,因为传感器物理、技术及安全等因素的影响,其不能够产生被无限放大的信号,所以通常由它测量的输出将产生饱和现象。建立基于衰落信道的统一测量模型,需在充分利用有限的网络带宽的基础上,综合分析衰落信道具有的时变特性和其引发的多种信号损耗问题,以及考虑在传感器节点信息交互的过程中随机发生的信息不完全现象,如传感器饱和、信号量化等。信道衰落现象被广泛建模为一种反映传输信号相位、幅值随机变化的随机过程。在网络控制系统中,当测量在衰落信道中传输时,整个系统的性能会彻底地恶化,因此研究如何抑制信道衰落对网络控制系统动态性能的影响十分必要。近年来,在线性二次高斯(Linear Quadratic Gaussian, LQG)(Garone et al., 2012)控制和 Kalman 滤波问题(Quevedo et al., 2012)方面已取得了一些进展。Wang 等(2014)研究发现衰落信道模型中的信道系数不服从单一的高斯分布,而是可以遵循任意的概率分布。

1.2.7 Kalman 滤波

1960 年卡尔曼发表了一篇关于离散数据线性滤波递推算法的文章,这标志着卡尔曼滤波的诞生。卡尔曼滤波器的首次实现由斯坦利·施密特(Stanley Schmidt)完成,之后卡尔曼在 NASA 埃姆斯研究中心作访问时,发现这种方法对于解决阿波罗计划的轨道预测问题十分有用,后来阿波罗飞船的导航电脑使用了这种滤波器。而该滤波器的论文由 Swerling (1958)、Kalman (1960)、Kalman 与 Bucy (1961)发表。作为研究估计问题的重要工具, Kalman 滤波是一类时域方法,以状态空间模型和射影理论为基础,来解决状态估计问题,还可处理多变量、时变、非平稳时间序列等多种滤波问题。因此, Kalman 滤波已被广泛应用于通信与信号过程、目标跟踪、全球定位系统、惯性导航、制导系统等领域(Salvatore et al., 2010)。

卡尔曼滤波是一种广泛应用的滤波方法,但这种方法既需要假定系统为线性,又需要认为系统中的各种噪声与状态变量均服从高斯分布。这两条假设并不总是确切存在,限制了卡尔曼滤波器在现实中的应用范围;直到扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman Filter, EKF)的问世,使卡尔曼滤波的适用范围得到极大地拓宽。EKF 的基本思路是:假定卡尔曼滤波器对当前系统状态的估计值非常接近其真