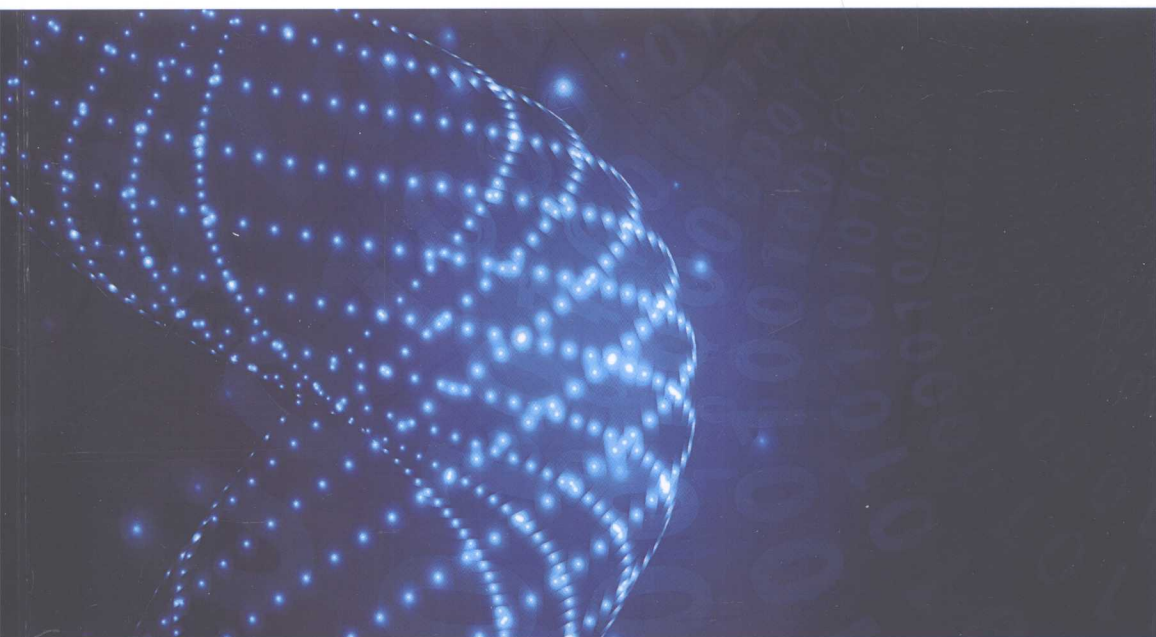


随机非线性系统的输出反馈控制

—— 一般性增长条件

郭龙川 © 著



科学技术文献出版社
SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION PRESS

随机非线性系统的输出反馈控制

——一般性增长条件

郭龙川 著



科学技术文献出版社
SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION PRESS

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

随机非线性系统的输出反馈控制：一般性增长条件 / 郭龙川著. —北京：科学技术文献出版社，2017.7

ISBN 978-7-5189-2773-9

I. ①随… II. ①郭… III. ①随机非线性系统—研究 IV. ①O211.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 128522 号

随机非线性系统的输出反馈控制——一般性增长条件

策划编辑：周国臻 责任编辑：王瑞瑞 责任校对：张叫咪 责任出版：张志平

出 版 者 科学技术文献出版社
地 址 北京市复兴路15号 邮编 100038
编 务 部 (010) 58882938, 58882087 (传真)
发 行 部 (010) 58882868, 58882874 (传真)
邮 购 部 (010) 58882873
官 方 网 址 www.stdp.com.cn
发 行 者 科学技术文献出版社发行 全国各地新华书店经销
印 刷 者 北京教图印刷有限公司
版 次 2017年7月第1版 2017年7月第1次印刷
开 本 710×1000 1/16
字 数 120千
印 张 9.5
书 号 ISBN 978-7-5189-2773-9
定 价 58.00元



版权所有 违法必究

购买本社图书，凡字迹不清、缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责调换

前 言

近年来,针对复杂系统的输出反馈控制问题,由于其具有重要的理论和实际意义而受到越来越多的关注。本书主要研究几类复杂系统在非线性和随机性、时滞性等多种因素综合作用下的输出反馈控制问题,借助随机系统的稳定性理论及相关控制器设计工具,得到满足特定控制性能指标的系统输出反馈控制器,并给出详细的设计过程,最后通过相关数值例子验证控制方案的有效性。

本书主要内容分为以下5个部分。

1. 满足幂次增长条件的随机非线性系统的输出反馈控制

本部分研究一类随机非线性系统,这类系统的非线性项完全依赖于不可量测状态,并将现有对非线性项的假设条件放宽为幂次增长条件,设计输出反馈控制器,通过得到观测器增益的最大取值区间,使闭环随机非线性系统在概率意义上满足渐近稳定性,更进一步解决了概率意义上的逆优镇定问题。本部分的结果推广了原先已有的成果,使得输出反馈控制器的适用范围更加普遍化和一般化,控制策略更加与普遍的随机非线性系统相适应。最终给出仿真数值算例以验证控制方案的有效性。

2. 满足多项式函数增长条件的随机非线性系统输出反馈实际跟踪控制

本部分针对一类随机非线性系统研究其输出反馈跟踪控制问题。已有成果中对于这类问题的研究大多针对非线性系统,本部分将其扩展到随机非线性系统中,并设定其非线性项满足输出多项式函数增长条件,构造出基于动态与静态相结合的输出反馈跟踪控制器,保证系统跟踪误差收敛到零点的小邻域中。最后通过数值算例验证了控制方案。

3. 满足多项式函数增长条件的带参数不确定性的随机非线性系统的输出反馈实际跟踪控制

本部分在上一部分内容基础上将系统推广到参数不确定系统中,研究这类满足输出多项式函数增长条件的随机非线性系统的输出反馈跟踪控制问题,设计输出反馈跟踪控制器,使闭环系统的所有状态为有界的,且在时间趋于无穷时,跟踪误差轨迹收敛到零点的小邻域中。最后通过数值仿真验证得到输出反馈控制器的可行性和有效性。

4. 满足幂次增长条件的带时变时滞项的随机非线性系统的输出反馈控制

本部分引入时变时滞因素,研究一类带时变时滞项的随机非线性系统的输出反馈控制器设计问题。设定这类系统的增长条件为幂次增长条件,借助随机非线性时滞系统的稳定性判断准则,选取新的 Lyapunov 能量函数,设计了输出反馈控制器。最后通过数值算例验证所得到的输出反馈控制器的有效性。

5. 带时变时滞项的高阶随机非线性系统输出反馈控制

本部分针对一类带时变时滞项的高阶随机非线性系统,研究其输出反馈控制问题,设定增长条件满足幂次增长条件,不同于以往文献中所定义的高阶系统阶次都是相同定常数的情况,在本部分中,将固定的相同阶次条件放宽成为变量阶次,并且通过数值算例验证高阶随机非线性时滞系统在输出反馈控制器作用下的稳定性。

最后,对本书做出总结,同时给出对未来研究工作的建议。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 研究动机及所研究的问题	2
1.2.1 非线性系统控制方法	2
1.2.2 非线性系统的增长条件	6
1.2.3 随机非线性系统的输出反馈控制	8
1.3 本书的研究内容结构	10
第 2 章 预备知识	14
2.1 随机非线性系统稳定性的相关概念与结论	14
2.2 随机非线性系统 Backstepping 控制器设计	17
2.3 重要的不等式	19
2.4 本书使用的符号	20
第 3 章 满足幂次增长条件的随机非线性系统的输出反馈控制	21
3.1 引言	21
3.2 问题描述	24
3.3 控制器设计	25
3.3.1 高阶增益观测器设计	25
3.3.2 Backstepping 方法设计输出反馈控制器	27

3.4	系统稳定性分析	36
3.5	逆最优镇定设计	38
3.6	仿真算例	40
3.7	小结	44
 第4章 满足多项式函数增长条件的随机非线性系统的输出反馈		
	实际跟踪控制	46
4.1	引言	46
4.2	问题描述	48
4.3	控制器设计	49
4.3.1	时变观测器设计	49
4.3.2	系统状态及增益的有界性判断	51
4.3.3	输出反馈跟踪控制器设计	55
4.4	仿真算例	57
4.5	小结	59
 第5章 满足多项式函数增长条件的带参数不确定性的随机		
	非线性系统的输出反馈实际跟踪控制	60
5.1	引言	60
5.2	问题描述	62
5.3	控制器设计	63
5.3.1	时变高阶增益观测器设计	64
5.3.2	闭环系统的 Lyapunov 分析	65
5.3.3	系统状态及增益的有界性判断	68
5.3.4	输出反馈跟踪控制器设计	76
5.4	仿真算例	77
5.5	小结	80

第 6 章 满足幂次增长条件的带时变时滞项的随机非线性系统的输出反馈控制	81
6.1 引言	81
6.2 带时变时滞项的随机非线性系统的稳定性理论	83
6.3 问题描述	86
6.4 控制器设计	87
6.4.1 高阶增益观测器设计	87
6.4.2 Backstepping 方法设计输出反馈控制器	90
6.5 系统稳定性分析	95
6.6 仿真算例	97
6.7 小结	100
第 7 章 带时变时滞项的高阶随机非线性系统的输出反馈控制 ...	101
7.1 引言	101
7.2 问题描述	102
7.3 控制器设计	104
7.4 系统稳定性分析	111
7.5 仿真算例	113
7.6 小结	116
第 8 章 总结及未来展望	117
8.1 总结	117
8.2 未来展望	119
参考文献	122

第1章 绪 论

1.1 研究意义

输出反馈控制问题是控制理论与控制工程领域中一个充满挑战、极具应用价值的研究方向。在经过多年发展以后,线性系统的输出反馈控制已经形成一套系统化和较为成熟的理论^[1-8],同时,该理论也已成功应用于实际的工程和社会经济系统中^[9-11]。输出反馈控制相较于状态反馈控制,明显的优势在于其并不需要完全知道系统的全部状态信息。随着实际工业自动化控制系统变得越来越复杂,现实控制系统已经不单局限于线性系统,且纯粹的线性系统在实际生产和工程应用中是不存在的。基于此,控制理论与工程界迫切需要研究适应于复杂系统或者称之为受多种因素影响(如非线性、随机性、时滞性)的系统的输出反馈控制理论及相关技术。本书主要研究系统非线性、随机性、时滞性这几种因素作用下的输出反馈控制问题,同时尽可能地使研究的系统更符合实际系统,放松和去除附加在系统上的严苛的假设条件,使最终结论更具一般性。本书的研究背景如下。

首先,在实际生产生活中所需要研究的系统,无论是工程系统还是社会经济系统等,大多呈现非线性的特征;而线性系统只是一种理想化的、为了研究方便而简化了的系统,如果需要反映真实系统的控制策略和控制性能,就必须考虑系统的非线性特性,它是影响系统控制策略和

控制性能的本质因素。基于此,研究非线性系统的输出反馈控制问题具有极其重要的理论意义与工程背景。

其次,随机现象在实际系统中亦是广泛存在的,随机性对于系统本身的干扰体现在许多方面:飞行器受到偶然天气变化(如气流风力)等的影响、通信信号在传输过程中受到的干扰、工业系统中各种传感装置的噪声影响、国民经济系统中价格水平受到外在不确定情况而产生的波动等。基于这种情况,在确定性系统框架下所建立起来的控制理论体系已经不再适用于随机系统。所以,借助相关随机控制理论及相关数学工具解决随机非线性系统的输出反馈控制问题对控制理论与工程界而言是一大挑战。

此外,在实际系统中存在着数据测量和执行机构的滞后性,有些时滞是不随时间变化而变化的,有些时滞是随时间变化而变化的,这些都增加了系统的复杂性,使得对该类系统的输出反馈控制问题研究充满了必要性和现实应用价值。

因此,本书针对基于宽松增长条件下的非线性随机及时滞系统,研究其输出反馈控制问题,该研究无论在控制理论还是在控制工程实践中都具有挑战与探索意义。

1.2 研究动机及所研究的问题

本节主要从非线性系统控制方法、非线性系统的增长条件及随机非线性系统的输出反馈控制等几个方面做一些介绍,针对每一方面的研究现状阐述研究动机,从而引出本书需要研究的问题。

1.2.1 非线性系统控制方法

人们对于系统认识是一个从简单到复杂的过程。随着科技水平的

日益提升,实际控制系统的复杂程度越来越高,系统性能往往受到非线性因素、随机不确定性因素和时滞因素的影响,这就迫切需要相应的控制理论在原有的基础上不断深化发展。具有非线性特性的系统在实际生产生活中有着大量的应用实例,如何在系统中引入非线性特征,从而通过非线性分析与设计方法,对非线性系统实现有效控制,以达到所需要的控制性能,这个研究命题自20世纪中叶以来,一直为广大研究者所关注,从中发展出来许多非线性控制理论和方法^[12-20]。然而,非线性系统的控制方法不同于线性系统的控制方法,它不存在一种普适性的、放之四海而皆准的控制器设计工具,具体到每一种特定的非线性系统,需要进行具体分析。

非线性系统控制问题的研究可大致归纳为两条主线:一条是系统分析;另一条则为系统设计。最早期的非线性系统控制问题主要是系统分析,即聚焦于系统本身,针对非线性系统,分析它的特性,发展出了一系列方法,如相平面法和描述函数法等^[15]。而由于非线性系统的复杂性使得单纯的系统分析难度较大,后来的研究者在系统分析的基础上,又提出了系统设计的概念,即针对非线性系统,设计相应的反馈控制器,以达到所期望的性能指标。非线性系统的设计发展至今已经产生了非常丰硕的成果,包括自适应控制设计、鲁棒控制设计和滑模控制等^[16,17]。

回顾早期的非线性控制方法,其大多是针对比较特殊的非线性系统,并不具备普遍性。庞加莱在19世纪发展出的相平面法,其内涵主要是将系统的轨迹体现在相平面内,再根据系统的轨迹的几何特征来研究系统的性能^[14]。Daniel在20世纪40年代提出描述函数法,其精髓主要是针对非线性系统,将非线性项线性化之后,用描述函数替代,再用线性系统理论中的频域法对线性化之后的系统进行分析^[14]。苏联学者鲁里叶与波斯特尼考夫在系统的非线性项满足扇形条件下,给出了判断系统稳定性的条件,从而发展出波波夫判据及圆判据^[1,14]。

随着现代控制理论不断发展,特别是包括非线性泛函和微分几何等多种数学工具的引入,极大地推动了非线性系统控制研究的广度与深度,尤其是 20 世纪 80 年代 Lyapunov 理论的提出给非线性系统稳定性的分析带来了深远的影响^[21,22]。自此之后,开启了通过构造性过程设计控制器的方法来实现非线性系统控制的大门,这种构造性的设计方法大大拓宽了非线性系统控制的思路,不再局限于早期非线性系统控制方法,设计的控制器的普适性也大大增强。

Kanellakopulos 和 Kokotovic 在 20 世纪 90 年代初首次提出了一种非线性系统通用的控制器设计工具——Backstepping 方法^[23],其实质是一种迭代递归设计方法。Backstepping 方法是一个广义的概念,它既包括传统的 Backstepping 方法,也含有后来推广的自适应 Backstepping 方法及鲁棒 Backstepping 方法^[23-33]。文献[23]首次把 Backstepping 方法用于解决非线性系统控制器设计问题,由此,Backstepping 方法渐渐为人们所使用,针对的对象也趋于多样化。文献[24-26]将 Backstepping 方法与自适应控制相结合,文献[27-29]将 Backstepping 方法与鲁棒控制相结合,扩展了 Backstepping 方法。文献[30]探讨了利用无源性设计 Backstepping 方法。文献[31-33]研究了 Backstepping 方法的逆优性。自 Backstepping 方法提出之后,这种控制器设计思路冲破了原来非线性项受多种匹配条件约束的限制,同时,众多研究者也将这种方法推广到其他复杂系统中,包括带不确定性参数的非线性系统^[34,35]。文献[34]研究了一类非线性系统,总结了使其转化为线性参数的严格反馈系统的充分条件,借助 Backstepping 方法以使系统跟踪误差收敛于零,同时在文献[34]中也提出了改进措施,克服了原有的控制器参数假设过于保守的缺点。Backstepping 方法也在实际控制系统中广泛应用^[36-38],文献[36,37]针对直升机的姿态控制系统,提出 Backstepping 鲁棒控制。文献[38]提出自适应 Backstepping 方法与神经网络相结合的方法,并应用

于飞行器模型中,以达到飞行路线跟踪期望轨迹的控制目标。

基于 Backstepping 方法的非线性系统控制器设计问题研究至今,成果丰硕,同时也产生了一些值得探讨的问题,即 Backstepping 方法针对的非线性系统对象也越来越呈现多样化的趋势,这是理论应用于实际中必然遇到的问题。不可能把复杂的系统过于简化,一个系统中,不仅包含非线性特征,同时也会伴生着诸如随机性、时滞性和参数不确定性等情况。实际系统中,系统必然是纷繁复杂的,系统的复杂程度的提升,也必然对控制器设计方法提出了更为精细的要求,或者是需要系统稳定,或者是需要系统在稳定的同时满足特定的性能指标,如轨迹跟踪控制问题。

一些文献研究了一类依赖于不可测状态变量的非线性系统的输出反馈稳定控制问题^[39-42]。其中,文献[39]针对基于线性增长条件下的非线性系统,借助于 Backstepping 技术设计了输出反馈控制器,并保证系统为指数稳定。文献[40]中,研究者设定非线性项的增长率为未知,在此条件下设计输出反馈控制器,从而推广了文献[39]中的研究成果。文献[41]研究了一类高阶非线性系统的控制器设计问题。文献[42]进一步放宽系统非线性项的增长条件并引入系统不确定性,研究这类非线性不确定系统的输出反馈控制器设计问题。

另外,一些文献针对非线性系统设计了具有动态增益的线性输出反馈控制器^[43-46]。其中,文献[43-45]针对一类观测规范型非线性系统且系统满足输入输出到状态稳定,构造得到全局收敛观测器,文献[46]推广了文献[43-45]中的结果,得到了更一般形式的非线性系统的输出反馈控制器设计方案。

在非线性鲁棒控制方面,相关文献针对非线性系统研究了输出反馈自适应鲁棒镇定、输出反馈跟踪和系统扰动抑制等问题^[47-51]。其中,文献[47-50]研究了广义输出反馈规范型非线性系统的稳定性和输出跟

踪问题,并且给出了全局自适应输出反馈跟踪控制器的 Backstepping 设计方法。文献[51]在解决参数依赖的 Lyapunov 不等式一致解问题基础上,将所得到的结果应用到非线性系统的控制器设计中。

在本书中,重点关注包含随机性和时滞性的非线性系统,这一类系统具有很强的实际应用背景。对于一个系统来说,它的输入输出很可能是随机信号,在实际中这种情况发生的概率也非常大,而且非线性特征与随机性特征相结合的系统是目前理论界比较关注的研究领域。时至今日,针对随机非线性系统的设计问题研究还非常的不完备,特别是基于 Backstepping 方法的研究还存在许多亟待解决的问题,例如,如何去除随机非线性系统本身较多的限制条件(1.2.2 节中将会详细讨论),如何形成一套比较完备的基于 Backstepping 方法的随机非线性控制器设计体系等。本书将针对上述问题进行进一步的研究,以填补目前研究中的一些空白。

1.2.2 非线性系统的增长条件

文献[52]中提出对于非线性系统的输出反馈设计过程中,无论是稳定性设计,还是跟踪控制设计,都势必要对非线性项中的不可量测的状态变量进行增长条件的限制性假设,否则无法进行控制问题的讨论。非线性的增长条件,其实是一个数学概念,简而言之,它是对非线性项的一种假设性限制,使其在一定的约束范围之内。

例如,存在常数 C ,使非线性项 $f(x)$ 满足:

$$|f(x)| \leq C(|x_1| + |x_2| + \cdots + |x_n|)。 \quad (1.2.1)$$

其中, x 为状态向量,即 $x = (x_1, x_2, \cdots, x_n)^T$ 。

式(1.2.1)就是一个典型的线性增长条件,实际是状态变量有限变化时,状态变量作为自变量的非线性函数有限增长,而且增长的速率满足一定约束条件。在非线性系统的输出反馈设计中,对非线性项随着状

态变量的改变的增长幅度进行假设是不可或缺的。作为最基本的线性增长条件,已经有相当多的研究成果使用了这种增长条件来作为控制器设计的基本假设条件^[53-64]。那么对于后来的研究者来说,就存在一个针对非线性项约束条件的很有挑战意义的工作,即如何进一步减弱对于非线性项的约束。这个命题一经提出,就吸引了众多研究者的注意,最新的研究热点则聚焦于研究非线性项满足幂次增长条件的情况下如何进行控制器设计的问题。在早期,对于满足一定增长条件的非线性系统,其系统自身的状态变量大多是可以量测或者是部分可以量测的。但是在实际系统中,系统的“黑箱”情况是普遍存在的,如何在输入与输出可测且状态变量不可测的情况下进行系统的设计,是非常具有实际价值的工作。文献[65-70]针对具有不可量测状态的非线性系统,研究了该类非线性系统的状态反馈和输出反馈控制问题,同时对于非线性项的约束条件也逐步加以放松。

根据1.2.1节中的陈述,大多非线性系统的输出输入项都会受到随机噪声的干扰,那么对于随机非线性系统的控制问题,再结合对于非线性增长条件的考虑,又会产生什么样的研究成果呢?文献[53]中,Deng和Krstić给出了一类随机非线性系统的输出反馈控制器设计结果,该非线性系统的状态皆为可以量测,在文献[53]的基础上,后来的研究者在减弱增长条件的方向上开展了许多研究工作。文献[71-78]假设非线性项满足幂次增长条件,在此条件下,针对随机非线性系统进行输出反馈镇定问题研究或者是输出跟踪问题研究,但是上述文献对幂次项做了诸多限制,例如,幂次项必须满足奇数条件或者非线性项不依赖于所有的系统状态等。文献[79-85]将非线性项的约束条件减弱为多项式函数增长条件。

存在常数 $\eta_1 > 0$ 和 $\eta_2 > 0$, 以及已知的整数 $p \geq 1$, 使得以下不等式成立:

$$|f(x)| \leq (1 + |x_1|^p)(\eta_1(|x_1| + \cdots + |x_i|) + \eta_2)。 \quad (1.2.2)$$

其中,与式(1.2.1)类似, x 为状态向量, x_1 为输出且为唯一可以量测的状态。通过式(1.2.2)表明,所有研究的系统受控于具有输出多项式函数增长率的系统。文献[79,80]研究了常数 $\eta_1 > 0$ 和 $\eta_2 > 0$ 在已知条件下系统的输出反馈跟踪问题,文献[81-83]进一步研究了不确定非线性系统的自适应输出反馈跟踪问题,利用幂次积分方法和反推方法,构造具有未知增长率的自适应输出反馈跟踪控制器。

基于以上的概况分析,可以总结得到,在对于非线性增长条件一步步减弱的基础上,对于影响系统不稳定因素的多种可能性也一步步被纳入研究范围内。目前文献中,针对非线性系统的输出反馈问题研究较多,对于其增长条件的减弱研究也形成了很多成果。但是,将系统延伸至随机非线性系统,甚至是受时滞影响的随机非线性系统,对于这类随机非线性及时滞系统的输出反馈控制问题研究中仍有一些不足,尤其是如何进一步放宽对非线性项的约束,在这一方面仍有很多可以探讨的地方,本书将着重于此做一些工作。

1.2.3 随机非线性系统的输出反馈控制

随机非线性系统的控制问题是控制理论与控制工程界比较热门的焦点问题之一,因为作为实际系统,外界的干扰是不可避免,且很多干扰又是随机出现的,这种系统特性加上系统本身固有的非线性特征,构成了实际系统最基本的两个特点:非线性与随机性,这在工程技术、社会经济管理等领域有着明显的体现,甚至延伸到大系统领域,故研究随机非线性控制问题有着很强的现实意义。系统的随机性特征有多重的体现方式:它可以由对系统各个状态的测量误差所形成,可以是系统输出输入或者是外界因素所造成,也可以是系统参数扰动所造成。如果当随机因素不足以较大地影响系统性能的时候,在系统分析与设计过程中,可