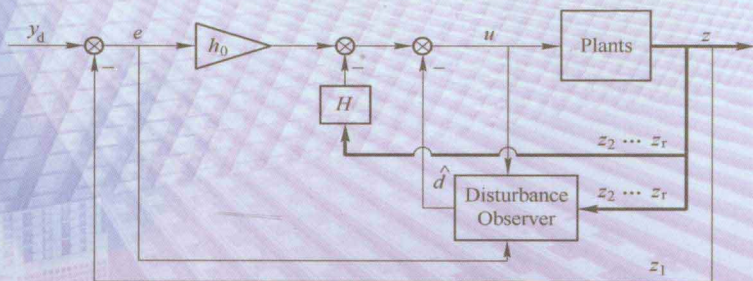


# 非线性

## 系统主动补偿控制及其应用

魏伟 著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

## 内 容 提 要

全书共5章,详细介绍了基于主动补偿的TC控制算法及其在非线性系统控制中的应用。主要内容包括三角结构不确定非线性系统的控制、统一混沌系统的混沌控制、超混沌Chen系统的混沌同步、Ghostburster神经元的混沌同步、燃烧室内抑制因热声耦合产生的燃烧振荡、冶金过程中的电炉炼钢电极控制问题的TC控制策略设计及应用。

本书可供自动控制领域工作的工程技术人员及相关领域工程技术人员、研究人员、高等院校相关专业的师生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

非线性系统主动补偿控制及其应用/魏伟著. —北京:冶金工业出版社, 2012. 7

ISBN 978-7-5024-5974-1

I. ①非… II. ①魏… III. ①非线性系统(自动化)—自适应控制系统—补偿—研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第144636号

出版人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号, 邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcbbs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 李 新 版式设计 葛新霞

责任校对 禹 蕊 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5974-1

三河市双峰印刷装订有限公司印刷; 冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销  
2012年7月第1版, 2012年7月第1次印刷

850mm×1168mm 1/32; 5.875印张; 170千字; 176页

25.00元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街46号(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

# 序

北京工商大学计算机与信息工程学院教师魏伟博士，在国家重点基础研究发展计划（2007CB210106）的资助下，基于他在北京科技大学的博士学位论文，以及近来的相关科研工作，撰写了专著《非线性系统主动补偿控制及其应用》。其出发点是研究开发简单、实用、有效的非线性系统控制的理论方法和实现技术。

全书共5章，详细论述了基于主动补偿的TC控制算法及其在非线性系统控制方面的应用。第1章简要介绍了非线性系统控制理论和方法的研究背景、意义和发展概况；第2章阐述三角结构不确定非线性系统的串级TC控制策略设计及应用；第3章阐述统一混沌系统的混沌控制，超混沌Chen系统的混沌同步，以及Ghostbuster神经元的混沌同步，利用基于主动补偿的TC控制获得了良好的混沌控制（同步）效果；第4章介绍了抑制燃烧室内的燃烧振荡的技术方案；第5章以冶金过程中的电炉炼钢电极控制问题为研究对象，介绍了设计基于主动补偿的TC控制方案，模拟各种工况以验证TC控制的有效性；后记是全书的主要内容总结及今后研究工作展望。

为了表示祝贺，赋诗一首：

魏伟博士有创新，  
研究协同非线性。  
主动补偿控制好，  
简单实用又高效。

中国人工智能学会 荣誉理事长  
北京人工智能学会 名誉理事长

涂序彦

2012年3月19日

# 前 言

线性系统控制理论与方法的发展已相对成熟，与之相比，非线性系统因本身的多样性和复杂性，其控制理论与方法的结果和应用相对较少。精确反馈线性化、奇异扰动理论、李亚普诺夫稳定性、反步（Backstepping）方法等已经成为非线性系统控制设计的经典。然而，当外部干扰存在时，基于模型的非线性控制方法的控制效果往往并不令人满意，甚至可能失控。因此，对于控制工程而言，尽可能少地依赖模型信息，实时主动地估计并补偿影响系统控制品质的各种不确定性具有重大的现实意义。

设计扰动观测器实现对各种扰动的实时估计和补偿，即主动抗扰，是基于主动补偿的非线性系统控制方法的显著特点。主动抗扰的控制思想最早在 18 世纪末 19 世纪初由法国学者 Jean-Victor Poncelet 提出，用以改善蒸汽机的控制品质。之后，苏联学者 Grigoriy Shipanov 在 Poncelet 思想的基础上提出了不变性原理，通过对扰动的量测或近似达到补偿扰动以提高控制性能的目的。20 世纪 60 年代，基于不变性原理又提出了双通道控制，而后因各种原因，不变性原理在 20 世纪 70 年代之后逐渐淡出了人们的视线。

20 世纪 80 年代末，中国科学院系统所韩京清研究员在反思控制理论究竟是模型论还是控制论之后，重温不变性原理，在数值实验的基础上于 90 年代中期提出了自抗扰控制技术。美国克利夫兰州立大学高志强教授对该技术的评价为：“自抗扰控制法：一个崭新的理念，基于仿真研究的实验科学方法，以及实用有效的控制算法。这样，一个富于活力的主动抗扰的理念，横跨东西，历经数百年，绵延不断，几经曲折，最后在中国落地、生根、开花、结果”。

与自抗扰控制同一时期提出的另一种基于主动补偿的控制算法是由意大利学者 Tornambe 提出的, 简称 TC 控制。该算法的核心思想也是利用扰动观测器估计和补偿系统的不确定性。目前, TC 控制的参数整定方法以及 TC 控制在热工、航空、电力、冶金等领域已有许多研究成果。

本书是作者在博士学习期间及近期研究工作中的总结和梳理, 以寻求简单、实用、有效的非线性系统控制方法为目的, 从控制工程应用的角度出发, 将作者所做的一些工作组织起来。本书可为自动控制领域工作的工程技术人员以及相关领域工程技术和研究人员、高等院校相关专业的师生提供参考。

在本书出版之际, 衷心感谢我的导师北京科技大学王京教授和清华大学李东海副教授、朱民教授。在攻读博士学位期间, 我得到了导师们的悉心指导和大力支持。他们渊博的知识、虚怀若谷的精神和严谨踏实的治学态度深深地影响了我, 让我终身受益。衷心感谢涂序彦教授一直以来的关心和帮助。涂先生精湛的学术造诣令人钦佩, 平易近人的学者风度令人崇敬, 深刻的人生观使我深受启发。衷心感谢北京工商大学计算机与信息工程学院的刘载文教授、薛红教授以及教研室各位同事的无私帮助。在此, 向所有关心、帮助支持我的老师、同学和朋友表示最崇高的敬意和感谢!

感谢涂序彦教授为本书作序。

本书研究内容得到了国家重点基础研究发展计划(2007CB210106)的资助。本书的出版得到了北京市属高等学校科学技术与研究生教育创新工程建设项目——学科与研究生教育(编号: PXM2011-014213-113634)的资助。

由于作者水平和经验有限, 书中难免有不妥和疏漏之处, 真诚欢迎广大读者批评指正。

魏 伟

2012年3月

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 非线性系统控制概述 .....	1
1.2 非线性系统控制经典方法 .....	3
1.3 非线性系统控制现代方法 .....	5
1.4 本书主要内容及结构 .....	10
<b>2 三角结构不确定非线性系统的串级 TC 控制</b> .....	14
2.1 单变量不确定非线性系统的串级 TC 控制 .....	14
2.1.1 单变量不确定非线性系统的数学模型 .....	14
2.1.2 控制算法设计 .....	15
2.2 多变量不确定非线性系统的分散串级控制 .....	16
2.2.1 概述 .....	17
2.2.2 多变量不确定非线性系统的数学模型 .....	18
2.2.3 控制算法设计 .....	20
2.2.4 仿真分析 .....	22
2.2.5 讨论 .....	54
2.3 本章小结 .....	55
<b>3 混沌系统的主动补偿控制</b> .....	56
3.1 统一混沌系统的控制 .....	56
3.1.1 概述 .....	57
3.1.2 统一混沌系统的动力学模型 .....	58
3.1.3 统一混沌系统控制方案 I .....	59
3.1.4 统一混沌系统控制方案 II .....	72
3.1.5 讨论 .....	81
3.2 超混沌 Chen 系统的同步 .....	81

· IV · 目录

3.2.1	概述	82
3.2.2	超混沌 Chen 系统的动力学模型	83
3.2.3	超混沌 Chen 系统同步方案 I	84
3.2.4	超混沌 Chen 系统同步方案 II	94
3.2.5	讨论	103
3.3	Ghostbuster 神经元同步	104
3.3.1	概述	104
3.3.2	Ghostbuster 神经元的动力学模型及其特性	105
3.3.3	控制算法设计及稳定性分析	111
3.3.4	仿真分析	117
3.4	本章小结	131
<b>4</b>	<b>燃烧室内火焰振荡抑制</b>	<b>132</b>
4.1	概述	132
4.2	纵向声波-火焰模型	134
4.3	控制算法设计	137
4.3.1	控制结构	137
4.3.2	闭环稳定性分析	138
4.3.3	燃烧振荡抑制能力分析	139
4.4	仿真分析	140
4.5	本章小结	149
<b>5</b>	<b>电弧炉炼钢电极控制系统</b>	<b>151</b>
5.1	概述	151
5.2	电弧炉电极系统模型及控制方案设计	153
5.3	仿真分析	155
5.4	本章小结	160
<b>附录</b>	<b>TC 控制律简介</b>	<b>161</b>
<b>参考文献</b>		<b>164</b>
<b>后记</b>		<b>175</b>

# 1 绪 论

## 1.1 非线性系统控制概述

控制理论发展主要经历了经典控制理论与现代控制理论两个阶段。经典控制理论主要以单输入单输出线性定常系统为研究对象，利用传递函数、频率特性、根轨迹方法进行研究。奈奎斯特 (H. Nyquist)、伯德 (H. W. Bode)、伊万斯 (W. R. Evans) 等人极大地推动了经典控制理论的发展。现代控制理论以状态空间方法为工具，研究多输入多输出时变系统的控制问题，卡尔曼滤波、庞特里亚金的极大值原理以及贝尔曼的动态规划奠定了现代控制理论的基础。

经典及现代控制理论经过几十年的发展，对于线性系统的分析和设计已经具有一套完整、成熟的理论体系。线性系统理论经过几十年的发展和完善，已经日益成熟，并且在计算机技术发展的推动下广泛应用于实际生产过程。然而，实际系统就其本质而言都是非线性系统，并且受到来自系统内部的未建模动态、参数不确定性以及来自系统外部的各种噪声、干扰等诸多不确定因素的影响。因此，不确定非线性系统的控制问题值得人们深入研究。起初，人们处理非线性系统的思路是希望能够将非线性系统经过一定的变换转化为近似的线性系统，然后利用成熟的线性系统理论对其进行综合。所以，利用泰勒展开，将非线性系统在平衡点附近近似为线性系统的方法应运而生。显然，这种方法是利用线性模型来逼近实际非线性系统的动力学特性，这在平衡点附近的小范围内是有效的，适用于控制精度要求不高的场合。对于被控对象本身是本质非线性、控制性能要求很高的系统，例如卫星定位与姿态控制、机器人控制以及精密数控机床的运动控制



等,要取得令人满意的控制效果必须考虑系统的非线性和不确定因素,对其进行有效补偿,进而实现对系统的有效控制。

另外,非线性现象(例如:混沌)不能用线性系统理论进行分析。非线性特性千差万别,对于非线性系统不可能存在普适的处理方法。此外,缺乏合适的数学工具对非线性系统进行分析,对于非线性系统一般不能求得完整解,故通常只能对非线性系统做一些估计,比如估计其稳定性、动态特性等,这些都给非线性系统的研究带来了极大的困难。

系统非线性和不确定性的普遍存在,以及人们在非线性系统理论研究所面临的巨大挑战,决定了非线性不确定系统的控制研究具有重要的理论和实际意义。因此,不确定非线性系统的控制研究也一直受到人们的广泛关注。

非线性系统的复杂性和多样性,决定了非线性系统的控制不可能具有普适的方法。通常是针对某个具体的非线性系统模型,在一定的假设条件下,运用现代数学工具,例如微分代数和微分几何等现代数学理论,获得某一类非线性系统特有的控制规律。精确反馈线性化、自适应、鲁棒控制、反步控制等控制方法就是此类控制方法,这些算法都未能摆脱对象或过程数学模型的束缚,而获取对象或过程的精确数学模型是一项昂贵且费时的工程,加之来自系统的内部变化和外部环境的未知作用,极大地降低了基于模型的控制算法的控制品质,限制了此类控制方法在控制工程中的广泛应用。因此,利用一种简单、有效、可行、易于实现且不依赖于精确数学模型的控制策略,获得对不确定非线性系统的有效控制具有重要的实际意义,值得深入研究。这里的简单易行是指无需使用微分几何、微分代数、反步方法等晦涩难懂的数学工具,就能解决实际问题,易于工程实现。

基于主动补偿的控制算法,其基本原理是利用扩张状态观测器,实现对非线性系统各种不确定性的主动估计和动态补偿,进而实现对系统的有效控制。它摆脱了对系统精确模型信息的依赖,因此基于主动补偿的控制算法是可行的解决方案。

基于主动补偿的控制算法以自抗扰控制和 Tornambe 控制 (简称 TC) 为代表。自抗扰控制是中科院系统所韩京清研究员在反思控制理论究竟是应该基于模型还是不完全依靠系统的模型 (参见《控制理论——模型论还是控制论》,《系统科学与数学》, 1984, 第 4 期) 之后, 于 20 世纪 90 年代提出的一种不依赖系统精确数学模型的控制算法。该算法利用被控对象的输入和输出信息重构系统状态, 同时获得系统的扩张状态, 对各种不确定因素予以估计并补偿。目前, 自抗扰控制在电力、热工、钢铁、化工等多个行业已有成功应用, 得到了众多控制领域学者及工程师的广泛关注。

TC 控制是意大利学者 Tornambe 提出的另一种基于主动补偿的控制方法, 其核心在于构造观测器获得对扰动的估计和补偿。清华大学李东海副教授的研究小组在 TC 控制的研究与应用上做了许多卓有成效的工作, 包括 TC 控制器参数整定规律以及 TC 控制器在飞行器控制、潜艇控制、直升机控制、航天器姿态控制、热工过程控制等领域的应用。

本书主要以 TC 控制为基础研究不确定非线性系统的控制问题。

## 1.2 非线性系统控制经典方法

非线性系统控制早期的研究主要以基本、特殊的非线性系统为研究对象。这一阶段主要有相平面法、描述函数法、绝对稳定性理论和李亚普诺夫稳定性理论等研究方法, 这些方法因受到当时的技术和人们知识水平的制约而并不完善, 但在各自适用的范围内均能获得很好的效果。特别是李亚普诺夫稳定性理论, 尽管李亚普诺夫并未给出构造李亚普诺夫函数的一般方法, 然而李亚普诺夫稳定性理论至今仍然是系统分析和综合过程中非常重要的理论依据。

相平面法是一种求解一阶、二阶非线性系统的图解方法, 其实质是利用作图的方法求解常微分方程, 获得系统在相平面上的

运动轨迹，然后根据系统的相轨迹分析系统的动、静态特性。相平面法可以给出系统在某一平衡状态的运动信息和系统运动的直观图像，可以看作是状态空间法在一阶和二阶情况下的应用，属于时域分析方法。该方法只适用于二阶及简单的三阶系统。

描述函数法又称一次谐波近似法，由英国的 P. J. Daniel 教授于 1940 年首次提出，其基本思想是利用谐波分析的方法，忽略非线性部件输出中的高次谐波成分，仅利用非线性部件输出信号中的基波分量与非线性部件输入信号之间的关系来近似描述非线性部件的特性。在将非线性部件输出的基波与输入之间的复数比值定义为非线性部件的描述函数，并用描述函数替代非线性部件以后，非线性系统就等效为一个线性系统，这样就可以利用线性系统理论中的频率响应法对系统进行频域分析。因此，描述函数法可以看成是线性系统频率响应分析法的某种推广，它将频率响应法中的某些方法和结论用来近似地研究非线性系统的稳定性和自持振荡问题，是非线性系统的一种工程近似方法。

绝对稳定性理论是由前苏联学者鲁里叶与波斯特尼考夫提出的。研究对象由一个线性环节和一个非线性环节构成，其中非线性部分满足扇形条件。两位学者利用二次型加非线性积分项构成的李亚普诺夫函数给出了判定此类非线性系统绝对稳定的充分条件。在此基础上，许多学者又做了大量研究工作，提出许多绝对稳定性判据，其中的代表性判据为波波夫判据和圆判据。

李亚普诺夫稳定性理论是俄国学者李亚普诺夫于 1892 年在《运动稳定性的一般问题》一文中建立的关于稳定性的一般理论。他将分析常微分方程组解的稳定性全部方法分成两类：第一类方法先求出常微分方程组的解，然后分析其解的稳定性，称为间接方法；第二类方法不必求解常微分方程组，而是借助于一个能量函数直接给出系统运动稳定性的信息，称为直接方法。李亚普诺夫第二类方法从能量观点出发分析系统的稳定性，即系统被激励后其储能随时间的推移而逐渐减小，到平衡态时系统的能量最小，则系统的这个平衡态是渐近稳定的，否则就是不稳定

的。显然第二类方法应用起来更为方便，尤其对非线性系统而言更显示出其优越性。李亚普诺夫间接方法研究非线性系统的一次近似数学模型的稳定性，给出了非线性系统平衡点附近局部稳定性的判据。它将“一个非线性系统与其线性逼近在一个小运动区域内应当有相似行为”的这种直觉严格化了。李亚普诺夫直接方法基于一个基本的物理现象：如果一个力学（或电学）系统的全部能量连续耗散，那么系统（不论是线性的还是非线性的）都将最终停止在一个平衡点处。因此，利用李亚普诺夫直接方法对非线性系统进行判稳时，关键在于构造一个能量函数，通过能量函数的一阶导数的符号特性来判断系统的稳定性。李亚普诺夫间接方法只能反映系统的局部稳定性信息，并且当非线性系统的一次近似获取不了任何有效信息时，李亚普诺夫间接方法也就失效了。相比而言，李亚普诺夫直接方法的优势在于它能够反映各类系统的全局和局部稳定性，遗憾的是至今仍然没有构造李亚普诺夫函数的普适性方法。目前，在控制器设计中又有一种新的思路，即设计控制律使闭环系统满足期望的稳定特性，产生了所谓控制李亚普诺夫函数（Control Lyapunov Function, CLF）的设计思想，CLF 是李亚普诺夫函数概念的一种推广。

### 1.3 非线性系统控制现代方法

非线性系统研究的一个重要突破是在 20 世纪 80 年代初。这一时期由于微分几何和微分代数等数学方法相继引入非线性系统控制的研究中，使非线性系统的研究模式摆脱了局部线性化和小范围运动分析的局限性，从而可以实现对非线性动态系统控制的大范围分析和综合。非线性系统的复杂性和多样性，决定了处理非线性系统的方法也是多样的。目前，人们研究得最多的一类非线性系统是仿射非线性系统，具有代表性的方法有以下几种：

(1) 反馈线性化方法。所谓反馈线性化方法，就是通过反馈的方式将原来的非线性系统化为对应的线性系统，然后利用各种线性系统理论完成系统综合的理论和方法。这里的反馈线性化

是指通过状态反馈或者状态变换将非线性系统化为线性系统或者近似的线性系统，与系统在平衡点附近的线性逼近不是一个概念。目前，关于反馈线性化已经有许多研究成果，代表性的有微分几何法、微分代数方法、逆系统法、直接反馈线性化、自抗扰控制（Active Disturbance Rejection Control, ADRC）与 TC 控制等。

(2) 鲁棒控制。鲁棒性是指系统存在不确定因素时仍能保持正常工作的一种属性。对于复杂的非线性系统，由于工作环境的不确定性、外部干扰的随机性以及系统自身的不确定性，促使人们不仅要考虑系统在标称参数下的控制性能，在各种不确定情况下系统的稳定性及控制性能也都必须考虑在内。鲁棒控制就是这样一种控制思想，设计控制器时不仅考虑标称参数下的数学模型，同时还考虑不确定因素对系统性能的最坏影响，使得闭环系统在不确定因素对系统控制品质影响最严重时也能满足基本设计要求。鲁棒控制的优点在于其处理不确定性的能力，但是它没有自学习的能力，设计时要求已知不确定因素的上界，以保守的设计来获取系统稳定。

(3) 自适应控制。与鲁棒控制不同，自适应控制模拟生物适应生存环境的能力而生，是一种具有自学习能力的控制算法，通过参数自适应律的学习和修正逼近参数的真实值，消除系统的不确定部分。这里的不确定一般是指参数的不确定性。迄今为止，模型参考自适应律与自校正调节器是两种较为成熟的自适应控制算法。线性系统的自适应控制理论已经比较成熟。对非线性系统而言，确定性等价设计已经不再适用，但非线性自适应控制也取得了大量成果。自适应控制对外部扰动和未建模动态敏感，扰动作用下的自适应控制闭环系统可能失稳。因此，在设计非线性系统自适应控制规律的同时兼顾系统的鲁棒性将是非常有意义的。

(4) 鲁棒控制与自适应控制相结合。鲁棒控制与自适应控制各有千秋，为充分发挥两者的优势，将鲁棒控制与自适应控制

有机结合，在鲁棒控制中引入自适应机制，利用自适应规律获取系统的不确定性信息，降低系统的不确定性程度以减少鲁棒控制的保守性；在自适应控制中引入鲁棒控制，提高系统对外界干扰和未建模动态的鲁棒性。鲁棒与自适应控制结合并应用于非线性不确定系统的控制之中具有非常重要的意义。

(5) 变结构控制。变结构控制是一种基于相平面法的现代控制综合方法。变结构控制的控制器由不同结构、不同参数的子系统组成，系统运行过程中根据某种函数规则在子系统之间切换，以使系统具有良好的动态性能。具有滑动模态的变结构控制（滑模变结构控制）是变结构控制理论中研究得较为完整的部分，也是目前非线性控制中较普遍、较系统的一种综合方法。构造滑模变结构控制器的核心是设计滑动模态，即切换函数的选择。变结构控制通过变换控制器结构使得闭环控制性能几乎不受被控对象本身参数变化、未建模动态、外部干扰等不确定因素的影响，具有很强的性能鲁棒性。变结构控制有许多优点，如实现简单、性能鲁棒性强等。但是也存在一些不足，主要是易引发系统未建模高频振荡，对此虽有一些消抖方法，但并未完全解决。

(6) 非线性频域控制理论。对非线性系统频域响应分析的研究是从 20 世纪 60 年代末 70 年代初开始的。通过对广义频率响应函数（Generalized Frequency Response Function, GFRF）的分析，研究非线性系统的频率特性，如频率响应的谐波特性、增益压缩扩张特性、互抑特性和相互调制特性等。广义频率响应函数是线性系统频率响应函数在非线性系统中的推广，能够直观地表示出非线性系统的许多频率特性，且便于实验，但计算上的困难，使其发展陷入困境。20 世纪 80 年代后，Billings 等人提出了非线性系统频率响应分析的一般性理论，导出了基本公式，发展了非线性系统高阶频率响应函数的计算方法。Billings 等人给出了从非线性自回归滑动平均（Nonlinear Autoregressive Moving Average with Exogenous Inputs, NARMAX）模型计算高阶频率响应函数的迭代算法，对于非线性积分微分方程又提出了一种计算其

广义频率响应函数的迭代算法，避免了计算工作量随非线性阶数增加而剧增的缺陷。这些结果使人们对非线性系统频率域的分析得以顺利进行。

(7) 反步控制。20 世纪 90 年代初，Kanellakopoulos 等学者提出了一种称作反步的控制方法，该方法引入虚拟控制的概念进行逐步递推设计，基于控制李亚普诺夫函数给出了保证系统稳定的控制律的设计方法。反步方法的提出为人们研究可反馈线性化、下三角结构、仿射非线性不确定系统提供了系统化的研究方法。利用这一方法，人们在非线性不确定系统的控制问题中获得了丰硕的成果。

上述非线性系统经典及现代控制方法见表 1-1。

表 1-1 非线性系统控制方法发展概况

非线性控制理论	非线性控制方法	时间	特点
经典理论	相平面法	19 世纪 80 年代	微分方程的图解法，只对一、二阶对象有效
	描述函数法	20 世纪 40 年代	利用基波分量近似描述对象的非线性特性，难以精确描述
	绝对稳定性分析法	20 世纪 40 年代	给出了判断一类非线性系统绝对稳定性的充分条件，但应用范围较窄
	李亚普诺夫方法	19 世纪 90 年代	通过构造能量函数判定系统的内部稳定性，但缺乏构造李氏函数的普适性方法
	有界输入有界输出方法	20 世纪 60 年代	能分析非线性对象的全局稳定性，但得到的结论较为笼统

续表 1-1

非线性控制理论	非线性控制方法	时间	特点	
现代理论	反馈线性化法	微分几何、微分代数方法	20 世纪 80 年代	只适用于仿射非线性系统, 要求已知对象精确数学模型
		逆系统方法	20 世纪 80 年代	通过反馈得到 I/O 为线性关系的伪线性系统, 要求对象模型已知并可逆
		直接反馈线性化方法	20 世纪 80 年代	利用 I/O 的微分方程得到 I/O 线性化结果, 要求已知对象模型
		自抗扰控制	20 世纪 90 年代	通过扩张状态实时补偿以实现动态反馈线性化, 无需对象精确数学模型
		TC 控制	20 世纪 90 年代	对内外干扰实时估计补偿实现动态反馈线性化, 无需对象精确模型
	鲁棒控制	20 世纪 70 年代	对象存在一定程度的不确定性时以保守性换取系统稳定及一定的性能品质	
	自适应控制	20 世纪 90 年代	通过实时辨识不确定参数获得消除参数不确定性, 但对外扰及未建模动态敏感	
	鲁棒控制与自适应控制结合	20 世纪 80 年代	克服了自适应在外扰及未建模动态时的不稳定, 加强了自适应控制的鲁棒性能	
	变结构控制	20 世纪 80 年代	利用控制器的快速切换提高系统的鲁棒性, 其抖振问题需要解决	
	非线性频域法	20 世纪 70 年代	将线性系统中的频率响应推广到非线性系统中, 但相对复杂	



续表 1-1

非线性控制理论	非线性控制方法	时间	特点
现代理论	反步方法	20 世纪 90 年代	对可反馈线性化, 下三角结构的仿射非线性系统设计控制律, 存在过参数估计
	增加幂次积分方法	2000 年	设计非仿射非线性系统的自适应控制律

## 1.4 本书主要内容及结构

本书以不确定非线性系统的控制为主题, 内容包括三角结构不确定非线性系统、统一混沌系统、超混沌 Chen 系统、Ghostburster 神经元、燃烧室内热声耦合振荡以及电弧炉电极调节系统的主动补偿控制研究。

(1) 提出串级 TC 控制策略, 并将其应用于具有下三角结构的单变量和多变量不确定非线性系统的控制中。仿真研究表明串级 TC 控制对于此类非线性系统具有良好的控制效果。

目前, 对于下三角结构不确定非线性系统的控制问题, 常用的控制算法是由 Kanellakopoulos 等人提出的基于控制李亚普诺夫函数的反步方法。此类方法的控制律由系统包含的非线性函数及参数构成, 而获得系统精确数学模型是非常困难的, 并且即便系统精确模型已知, 控制律所包含的复杂的非线性函数也为其实现带来了极大的困难。故一种控制结构简单, 不基于系统精确模型, 动态响应速度可调, 易于实现的控制策略是非常有价值的。串级 TC 控制正是这样一种控制策略, 它无需对象精确的模型信息, 通过调节控制器参数  $h_0$  和  $k_0$  便能获得良好的控制效果。与反步方法相比, 串级 TC 控制具有结构更为简单, 实现更为容易, 参数整定更为方便, 性能鲁棒性更强的优势。当系统所含非线性动态非常复杂时, 串级 TC 的优势则更为突出。本书给出了下三角结构单输入单输出和多输入多输出不确定非线性系统控制