

自适应控制器 设计及应用



Adaptive Controllers Design and Application

张云生 祝晓红 著

北京 国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

自适应控制器设计及应用

Adaptive Controllers Design and Application

张云生 祝晓红 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

自适应控制器设计及应用/张云生,祝晓红著. —北京:国防工业出版社,2005.5

ISBN 7-118-03749-4

I. 自... II. ①张...②祝... III. 自适应控制器
IV. TM571.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 001189 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 14 252 千字

2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:50.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	彭华良	蔡镭		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜	

前 言

自从系统地设计控制器以来,在对各种控制系统的研制与实践的基础上,人们就意识到控制器的设计问题即寻求适当的控制器结构与获得控制器参数。另外,人们也认识到在研究一个控制系统时,不仅仅要建立受控对象的模型,还需要考虑环境因素对对象的影响,所以要求控制器不仅仅对一个工作点进行调节,而且要求能对所有工作点的范围进行调节,即具有自适应能力。20 世纪 40 年代“控制论”问世至今,控制器参数的调节一直是研究讨论的主要内容,而从 50 年代开始,就已注意到控制器运行时对其静态和动态参数的在线自动调节体现了系统对环境变化的自适应。

50 年代明确提出的自适应控制在航天技术中得到成功应用,因此对自适应控制器的设计研究工作产生了强有力的影响。但是由于模拟器件的限制和缺乏完整的理论依据,也就限制了自适应控制器的实现,因而减弱了人们对这一领域的兴趣。

60 年代后,控制理论在许多方向上得到迅速发展。非线性系统理论、最优控制理论、最佳估计理论、系统辨识方法和递推方法都对自适应控制器的设计提供了有效的依据,人们对自适应控制有了更深刻的认识,并产生了更多的设计实例。

另一方面,自从 1962 年第 1 次将计算机用于控制系统以来,随着控制技术和计算机技术的进步,工业控制系统已从直接数字控制(DDC)系统、监督控制(SCC)系统发展到集散控制系统(DCS)、递阶控制系统(HCS)和现场总线控制系统(FCS),在大量生产过程自动化系统中,工业计算机已经变成标准设备,这样就可以在实际应用中设计和实现更为复杂的自适应控制器。1982 年第 1 个工业数字自适应控制器投入市场,紧接着一批数字自校正和自适应控制器应用到工业过程控制系统中。由于硬件资源越来越丰富又变得很便宜,更允许研究人员和工程技术人员开发和实现各种自适应控制器。

由于计算机系统已成为生产设备及过程控制系统的重要组成部分,它既可一定程度地代替人的思维进行复杂运算,又可直接与现场各种装置(如变送器、执行器)相连,对所连接的装置实施自适应控制,所以本书介绍应用工业计算机(以 PC 机为例)实现自适应控制的原理和方法。鉴于描述自适应控制原理的著述不少见,

但系统地阐述设计和实现自适应控制器的著述并不多见,本书的主要内容是介绍自适应控制器的基本原理、设计方法、理论分析、数字仿真、计算机软件和硬件实现以及实际应用。

由于自适应控制是在常规的控制环之外增加了非线性的自适应环节,自适应控制器面向的对象常常是非确定性的时变过程,所以大大增加了控制器的复杂性、计算量和操作执行时间。本书的目的侧重于介绍各种适于实际应用的新型自适应控制器的设计方法,寻求满足实时要求、结构简单、计算量小、控制性能稳定、容易实现的控制器算法及其组合形式。

第1章归纳各种不同的自适应控制方法,重点描述基于模型参数辨识的随机自适应控制器和基于参考模型的自适应控制器的特点。

第2章讨论离散时间领域的,基于过程辨识的自适应控制器。在介绍在线参数和非参数辨识方法,特别是闭环递推估计方法的基础上,给出各种先进控制技术,诸如比例积分微分(PID)控制、无差拍控制、最小方差控制、预测控制、动态矩阵控制中自适应控制器的设计方法,包括对确定性干扰及随机干扰的自适应控制系统的设计。

第3章讨论基于连续时间领域过程辨识的自适应控制器,同样也给出针对连续模型的在线参数估计和参数自适应控制方法,这一方法特别适用于通过理论建模已知过程模型结构的系统。

第4章介绍各种模型参考自适应控制器的实现方法,不仅给出连续时间过程,也给出离散时间过程的局部参数最优化方法,以及全局稳定的设计方法。

第5章讨论时变过程鲁棒参数自适应控制器的设计,同时对自适应控制算法的收敛性和稳定性进行分析。

第6章介绍多变量过程的自适应控制器,讨论各种模型结构、控制器和参数估计器的结合,实现多变量控制算法。

第7章考虑非线性过程的模型结构和非线性过程的自适应控制算法,研究非线性控制器的设计和实现问题。

第8章讨论复杂系统的非参数模型和无模型表述方法,特别是非线性系统转换为动态时变模型的自适应控制器和无模型控制器的递阶设计方法,以及在线自适应优化过程。

第9章介绍在工业生产过程中,采用成熟的工业计算机软、硬件产品,设计开发自适应控制器。通过应用实例,介绍在1个工作点上和多个工作点或整个范围之内,固定线性控制器在运行过程中的自校正作用,以及由于设备老化、温漂、磨损等等引起参数变化的过程中控制器的自校正作用。这分别说明了:线性控制器对

非线性或时变过程的自适应控制;非线性控制器对非线性过程的自适应控制或自校正控制;无模型情况下采用自适应前馈补偿的自动调节作用。这些实例显示,自适应控制算法可以应用于稳态和终值控制过程,以获得优化的控制效果。

本书的读者对象是从事自动控制理论和自动控制技术应用研究,从事计算机控制系统开发的工程技术人员;学习自动控制理论、控制器设计、控制计算机应用及相关专业的大学高年级学生和研究生。

在本书撰写过程中得到中国科学院自动化研究所戴汝为院士、清华大学自动化系郑大钟教授的热情关心和具体指导,昆明理工大学廖伯瑜教授和其他诸同事也给予诸多帮助,在此表示衷心感谢。

本书希望尽量突出重点,明了简洁。但由于作者研究水平和知识面所限,对上述内容的理解和阐述难免见树叶而不见树林,错误和不妥之处,敬请读者指正。

作 者

内 容 简 介

本书针对当前计算机控制系统中先进控制技术的应用,对自适应控制器的设计与应用做了全面论述。内容涉及自适应控制器的基本原理、设计方法、理论分析、数字仿真、计算机软件 and 硬件实现以及实际应用。重点介绍各种适于实际应用的新型自适应控制器的设计方法,寻求满足实时要求、结构简单、计算量小、控制性能稳定、容易实现的控制器算法及其组合形式。区别于描述自适应控制原理的一些著述,本书系统地阐述了自适应控制技术的实现,并结合作者在实际应用中采用的方法对线性控制器和 nonlinear 控制器的自适应进行了研究。

本书可供从事自动控制理论和自动控制技术应用研究、从事计算机控制系统开发的工程技术人员使用,也可作为自动控制理论、控制器设计、控制计算机应用及相关专业的研究生和大学高年级学生的参考书。

This book comprehensively describes the design and application of adaptive controller, aiming at the application of advanced control technique in computer control systems. The contents are related to basic principle, design method, theory analysis, digital simulation, computer software and hardware realization and application for adaptive controller. In this book, different kinds of design methods for new adaptive controllers which adapt to application are emphatically discussed. The controller algorithms satisfying the needs of real-time, simple structure, less calculation, stable control behaviour and ease realization, and these algorithms combinations are also discussed. Differ from other books of adaptive control theory, this book explains the realization of adaptive controller in a systematic way, and makes a special study of the adaptation for linear controller and nonlinear controller with the way we have used in application.

This book is suitable to use as the reference for engineers researching automatic control theory or application and developing computer control systems, and suitable to graduate students and high grade students.

目 录

第 1 章 自适应控制方法和自适应控制器	1
1.1 自适应控制方法	1
1.2 自适应控制器设计要素	2
1.2.1 前馈自适应控制器	2
1.2.2 反馈自适应控制器	3
1.2.3 二元自适应控制器	4
1.2.4 非二元自适应控制器	4
第 2 章 离散模型辨识自适应控制器	7
2.1 动态过程和随机信号的在线辨识	7
2.1.1 过程及信号模型	7
2.1.2 参数估计	9
2.1.3 递推参数估计器的统一描述	15
2.1.4 时变过程的参数估计	20
2.1.5 闭环在线辨识	21
2.1.6 各种参数估计方法的比较	27
2.2 控制器设计	27
2.2.1 一般线性控制器	28
2.2.2 补偿控制器	30
2.2.3 比例积分微分控制器	33
2.2.4 无差拍控制器	34
2.2.5 预测控制器	35
2.2.6 最小方差控制器	37
2.2.7 广义预测控制器	40
2.2.8 带观测器的状态控制器	43
2.3 参数自适应控制器设计	44
2.3.1 参数自适应控制器设计的基本方法	45
2.3.2 参数估计器和控制器的适当组合	47

2.3.3	随机参数自适应控制器	48
2.3.4	确定参数自适应控制器	51
2.3.5	参数自适应控制器的启动和设计参数的选择	55
2.3.6	自适应控制器的监测和协调	57
2.3.7	参数自适应前馈控制器	63
第 3 章	连续模型辨识自适应控制器	66
3.1	连续时间模型的在线辨识方法	66
3.1.1	过程模型	66
3.1.2	状态变量滤波	68
3.2	控制器的数字化设计	72
3.3	基于连续模型的参数自适应控制器	75
3.3.1	连续时间模型的闭环可辨识性	75
3.3.2	验前知识的应用	78
3.3.3	辨识和控制的异步组合	79
3.3.4	控制器设计	81
第 4 章	模型参考自适应控制器设计	83
4.1	局部参数最优化设计方法	83
4.1.1	连续时间模型参考控制	83
4.1.2	参数自适应	84
4.2	全局稳定的设计方法	86
4.2.1	连续时间 MRAS	86
4.2.2	离散时间 MRAS	89
第 5 章	关于自适应控制的收敛性和鲁棒性	93
5.1	递推估计器的收敛性	93
5.1.1	统一的递推估计算法	93
5.1.2	确定性情况下的收敛性	94
5.1.3	随机噪声情况下的收敛性	95
5.1.4	Martingale 理论随机噪声的收敛性	98
5.2	参数自适应控制的稳定性和收敛性	100
5.2.1	稳定性	100
5.2.2	收敛性	101
5.3	参数自适应控制的鲁棒性	103
5.3.1	DB 控制器的鲁棒性	103

5.3.2	MV 控制器的鲁棒性	104
5.3.3	状态空间控制器的鲁棒性	105
5.4	数字化过程的稳定性	106
5.4.1	离散状态控制器的稳定性	106
5.4.2	离散状态控制器的最优鲁棒性	108
5.4.3	离散状态观测器的稳定性和最优鲁棒性	110
5.4.4	LS 参数估计器的稳定性和最优边界	111
第 6 章	多变量过程的自适应控制器	113
6.1	多变量过程模型	113
6.1.1	确定性过程模型	113
6.1.2	随机过程模型和其稳态值	122
6.1.3	多变量过程模型的参数估计	124
6.2	多变量自适应控制器	124
6.2.1	多变量状态控制器	125
6.2.2	矩阵多项式控制器	128
6.2.3	含滞后过程的多变量控制器	130
6.2.4	稳态值计算及稳态误差	130
6.3	多变量参数自适应控制器的组合	131
6.3.1	多变量参数自适应控制器的控制性能	131
6.3.2	双筒蒸发器的多变量参数自适应控制器仿真	134
第 7 章	非线性过程的自适应控制器	138
7.1	非线性过程模型	138
7.1.1	非线性过程泛函理论分析	138
7.1.2	非线性参数过程模型	140
7.1.3	非线性过程的参数估计	150
7.2	非线性控制器设计	153
7.2.1	基于简化 Hammerstein 模型的非线性控制器	153
7.2.2	基于参数 Volterra 模型的控制器	155
7.2.3	基于 NDE 模型的控制器	165
第 8 章	非参数和无模型系统的自适应控制器	168
8.1	非参数模型自适应控制器	168
8.1.1	线性系统的非参数模型	168
8.1.2	非线性系统的非参数模型	169

8.1.3 非参数模型自适应控制器设计	172
8.2 无模型系统的辨识及控制器设计	176
8.2.1 无模型控制器问题	176
8.2.2 无模型控制器设计	176
8.2.3 多步滞后的控制器	180
8.2.4 控制器设计的合理性	180
8.2.5 多输入/多输出系统的无模型控制	183
第9章 自适应控制器在控制过程中的应用	186
9.1 控制器在过程中的自校正作用	186
9.1.1 用 PC 计算机进行自适应控制	186
9.1.2 自适应温度控制	186
9.1.3 自适应流速控制	188
9.1.4 自校正燃烧控制	190
9.2 线性控制器的自适应	192
9.3 非线性控制器的自适应	194
9.3.1 pH 值控制	194
9.3.2 液位控制	197
9.4 实现非线性自适应补偿作用的实例	198
参考文献	203

Contents

Chapter 1 Adaptive Control Approaches and Adaptive Controllers	1
1.1 Approaches to Adaptive Control	1
1.2 Essential Factors for Adaptive Controllers Design	2
1.2.1 Feedforward Adaptive Controllers	2
1.2.2 Feedback Adaptive Controllers	3
1.2.3 Duality Adaptive Controllers	4
1.2.4 Unduality Adaptive Controllers	4
Chapter 2 Adaptive Controllers Based on Discrete-time Process Model	
Identification	7
2.1 Online Identification of Dynamic Processes and Stochastic Signals	7
2.1.1 Process and Signal Models	7
2.1.2 Parameter Estimation	9
2.1.3 Unified Description for Recursive Parameter Estimator	15
2.1.4 Parameter Estimation of Time-varying Process	20
2.1.5 Online Identification in Closed Loop	21
2.1.6 Comparison of Different Parameter Estimation Methods	27
2.2 Controller Design	27
2.2.1 The General Linear Controller	28
2.2.2 The Cancellation Controller	30
2.2.3 The Proportional Integral Derivative Controller	33
2.2.4 The Deadbeat Controller	34
2.2.5 The Predictor Controller	35
2.2.6 The Minimum Variance Controller	37
2.2.7 The Generalized Predictive Controller	40
2.2.8 The State Controller with Observer	43
2.3 Parameter Adaptive Controller Design	44
2.3.1 Basic Approaches of Parameter Adaptive Controller Design	45

2.3.2	Suitable Combinations of Parameter Estimators and Controllers	47
2.3.3	Stochastic Parameter Adaptive Controllers	48
2.3.4	Deterministic Parameter Adaptive Controllers	51
2.3.5	Starting Parameter Adaptive Controllers and Choice of Free Design Parameters	55
2.3.6	Supervision and Coordination of Adaptive Controllers	57
2.3.7	Parameter Adaptive Feedforward Controllers	63
Chapter 3 Adaptive Controllers Based on Continuous-time Process		
	Models Identification	66
3.1	Online Identification Methods for Continuous-time Models	66
3.1.1	The Process Model	66
3.1.2	State Variable Filtering	68
3.2	Controller Digitized Design	72
3.3	Parameter Adaptive Controllers Based on Continuous-time Process Models	75
3.3.1	Closed-loop Identifiability of Continuous-time Models	75
3.3.2	Utilization of A Priori Knowledge	78
3.3.3	Asynchronous Combination of Identification and Control	79
3.3.4	Controller Design	81
Chapter 4 Model Reference Adaptive Controller Design		83
4.1	Design Methods of Local Parameter Optimization	83
4.1.1	Continuous-time Model Reference Control	83
4.1.2	Parameter Adaptive	84
4.2	Globally Stable Design Methods	86
4.2.1	Continuous-time MRAS	86
4.2.2	Discrete-time MRAS	89
Chapter 5 Convergence and Robustness in Parameter Adaptive Control		93
5.1	Convergence of Recursive Estimators	93
5.1.1	Unified Recursive Estimation Algorithm	93
5.1.2	Convergence in Deterministic Case	94
5.1.3	Convergence in Stochastic Noise Case	95

5.1.4	Convergence for Stochastic Noise by Martingale Theory	98
5.2	Stability and Convergence of Parameter Adaptive Control	100
5.2.1	Stability	100
5.2.2	Convergence	101
5.3	Robustness in Parameter Adaptive Control	103
5.3.1	Robustness of DB Controllers	103
5.3.2	Robustness of MV Controllers	104
5.3.3	Robustness of State-space Controllers	105
5.4	Stability of Digitized Process	106
5.4.1	Stability of Discrete State Controllers	106
5.4.2	Optimality Robustness of Discrete State Controllers	108
5.4.3	Stability and Optimality Robustness of Discrete State Observers	110
5.4.4	Stability and Optimality Margins for LS Parameter Estimators	111
Chapter 6	Adaptive Controllers of Multivariable Processes	113
6.1	Process Models for Multivariable Processes	113
6.1.1	Deterministic Process Models	113
6.1.2	Stochastic Process Models and Steady-state Values	122
6.1.3	Parameter Estimation of Multivariable Process Models	124
6.2	Multivariable Adaptive Controllers	124
6.2.1	Multivariable State Controllers	125
6.2.2	Matrix Polynomial Controllers	128
6.2.3	Multivariable Controllers for Processes with Hysteresis	130
6.2.4	Steady-state Value Calculation and Steady-state Error	130
6.3	Combinations of Multivariable Parameter Adaptive Controllers	131
6.3.1	Control Behaviour of Multivariable Parameter Adaptive Controllers	131
6.3.2	Analogue Simulation of Multivariable Parameter Adaptive Controllers for Twin Evaporator	134
Chapter 7	Adaptive Controllers of Nonlinear Processes	138
7.1	Nonlinear Process Models	138
7.1.1	Theory of Functionals for Analysis of Nonlinear Processes	138