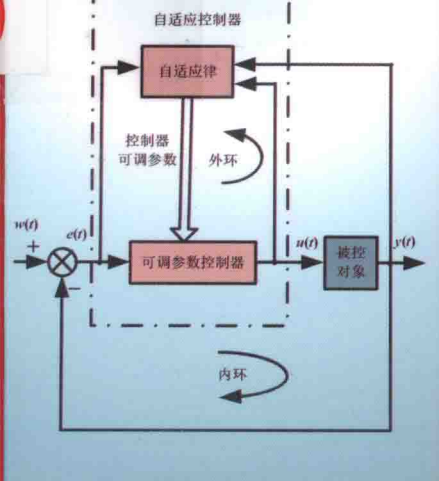




全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



Adaptive Control

自适应控制

柴天佑 岳恒 著
Chai Tianyou Yue Heng



清华大学出版社



全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划

Adaptive Control

自适应控制

柴天佑 岳恒 著
Chai Tianyou Yue Heng

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

自适应控制是针对具有不确定性被控对象的一种控制器设计方法。自适应控制器本质上是可以计算机实现的控制算法,它源于工业领域的实际需求,经过几代控制学者的不断深入研究,建成了相对完整的理论体系,成为理论和实践有机结合的具有勃勃生命力和应用前景的控制科学与控制工程中的重要研究领域。

本书对自适应控制理论和应用进行了系统的介绍,其中相当部分的内容取材于作者及其学生多年来在这一领域的研究成果。主要内容包括:动态模型与参数估计、自校正控制、模型参考自适应控制、多变量自适应控制、非线性自适应控制和自适应控制的应用。本教材的主要目的是使学生掌握自适应控制器的设计方法,因此将各种自适应控制器归结为可调参数控制器和自适应律,对可调参数控制器分控制问题描述(包括被控对象、控制目标)、控制器设计、性能分析进行了详细介绍,目的是使学生掌握这些在实际中已用的控制器设计方法,在此基础上突出各种自适应控制方法的结构、设计方法、设计案例。在本书最后介绍了自适应控制的工业应用,其中包括在工业当中已经投运的自适应控制系统。

本书的特点是结构严谨,论理明晰,深入浅出,既介绍了自适应控制的基础内容,也反映了该领域的最新研究成果。本书既可以作为高等院校控制科学与控制工程学科和相关学科的硕士研究生和博士研究生教材,也可作为从事自动化科学与技术研究人员的参考书,其基础内容也可以作为自动化专业本科生教材。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

自适应控制/柴天佑,岳恒著.--北京:清华大学出版社,2016

全国高等学校自动化专业系列教材

ISBN 978-7-302-42990-6

I. ①自… II. ①柴… ②岳… III. ①自适应控制—高等学校—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 030991 号

责任编辑:王一玲

封面设计:常雪影

责任校对:李建庄

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:三河市君旺印务有限公司

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印 张:23 字 数:489千字

版 次:2016年4月第1版 印 次:2016年4月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:49.00元

出版说明

《全国高等学校自动化专业系列教材》



为适应我国对高等学校自动化专业人才培养的需要,配合各高校教学改革的进程,创建一套符合自动化专业培养目标和教学改革要求的新型自动化专业系列教材,“教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会”(简称“教指委”)联合了“中国自动化学会教育工作委员会”、“中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会”、“中国系统仿真学会教育工作委员会”和“中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科委员会”四个委员会,以教学创新为指导思想,以教材带动教学改革为方针,设立专项资助基金,采用全国公开招标方式,组织编写出版了一套自动化专业系列教材——《全国高等学校自动化专业系列教材》。

本系列教材主要面向本科生,同时兼顾研究生;覆盖面包括专业基础课、专业核心课、专业选修课、实践环节课和专业综合训练课;重点突出自动化专业基础理论和前沿技术;以文字教材为主,适当包括多媒体教材;以主教材为主,适当包括习题集、实验指导书、教师参考书、多媒体课件、网络课程脚本等辅助教材;力求做到符合自动化专业培养目标、反映自动化专业教育改革方向、满足自动化专业教学需要;努力创造使之成为具有先进性、创新性、适用性和系统性的特色品牌教材。

本系列教材在“教指委”的领导下,从2004年起,通过招标机制,计划用3~4年时间出版50本左右教材,2006年开始陆续出版问世。为满足多层次、多类型的教学需求,同类教材可能出版多种版本。

本系列教材的主要读者群是自动化专业及相关专业的大学生和研究生,以及相关领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望本系列教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者和工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的参考资料。感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并欢迎提出批评和意见。

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

2005年10月于北京

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

顾问 (按姓氏笔画):

王行愚(华东理工大学)	冯纯伯(东南大学)
孙优贤(浙江大学)	吴启迪(同济大学)
张嗣瀛(东北大学)	陈伯时(上海大学)
陈翰馥(中国科学院)	郑大钟(清华大学)
郑南宁(西安交通大学)	韩崇昭(西安交通大学)

主任委员: 吴澄(清华大学)

副主任委员: 赵光宙(浙江大学) 萧德云(清华大学)

委员 (按姓氏笔画):

王雄(清华大学)	方华京(华中科技大学)
史震(哈尔滨工程大学)	田作华(上海交通大学)
卢京潮(西北工业大学)	孙鹤旭(河北工业大学)
刘建昌(东北大学)	吴刚(中国科技大学)
吴成东(沈阳建筑工程学院)	吴爱国(天津大学)
陈庆伟(南京理工大学)	陈兴林(哈尔滨工业大学)
郑志强(国防科技大学)	赵曜(四川大学)
段其昌(重庆大学)	程鹏(北京航空航天大学)
谢克明(太原理工大学)	韩九强(西安交通大学)
褚健(浙江大学)	蔡鸿程(清华大学出版社)
廖晓钟(北京理工大学)	戴先中(东南大学)

工作小组(组长): 萧德云(清华大学)

(成员): 陈伯时(上海大学) 郑大钟(清华大学)
田作华(上海交通大学) 赵光宙(浙江大学)
韩九强(西安交通大学) 陈兴林(哈尔滨工业大学)
陈庆伟(南京理工大学)

(助理): 郭晓华(清华大学)

责任编辑: 王一玲(清华大学出版社)

自动化学科有着光荣的历史和重要的地位,20世纪50年代我国政府就十分重视自动化学科的发展和自动化专业人才的培养。五十多年来,自动化科学技术在众多领域发挥了重大作用,如航空、航天等,两弹一星的伟大工程就包含了许多自动化科学技术的成果。自动化科学技术也改变了我国工业整体的面貌,不论是石油化工、电力、钢铁,还是轻工、建材、医药等领域都要用到自动化手段,在国防工业中自动化的作用更是巨大的。现在,世界上有很多非常活跃的领域都离不开自动化技术,比如机器人、月球车等。另外,自动化学科对一些交叉学科的发展同样起到了积极的促进作用,例如网络控制、量子控制、流媒体控制、生物信息学、系统生物学等学科就是在系统论、控制论、信息论的影响下得到不断的发展。在整个世界已经进入信息时代的背景下,中国要完成工业化的任务还很重,或者说我们正处在后工业化的阶段。因此,国家提出走新型工业化的道路和“信息化带动工业化,工业化促进信息化”的科学发展观,这对自动化科学技术的发展是一个前所未有的战略机遇。

机遇难得,人才更难得。要发展自动化学科,人才是基础、是关键。高等学校是人才培养的基地,或者说人才培养是高等学校的根本。作为高等学校的领导和教师始终要把人才培养放在第一位,具体对自动化系或自动化学院的领导和教师来说,要时刻想着为国家关键行业和战线培养和输送优秀的自动化技术人才。

影响人才培养的因素很多,涉及教学改革方方面面,包括如何拓宽专业口径、优化教学计划、增强教学柔性、强化通识教育、提高知识起点、降低专业重心、加强基础知识、强调专业实践等,其中构建融会贯通、紧密配合、有机联系的课程体系,编写有利于促进学生个性发展、培养学生创新能力的教材尤为重要。清华大学吴澄院士领导的《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会,根据自动化学科对自动化技术人才素质与能力的需求,充分吸取国外自动化教材的优势与特点,在全国范围内,以招标方式,组织编写了这套自动化专业系列教材,这对推动高等学校自动化专业发展与人才培养具有重要的意义。这套系列教材的建设有新思路、新机制,适应了高等学校教学改革与发展的新形势,立足创建精品教材,重视实

践性环节在人才培养中的作用,采用了竞争机制,以激励和推动教材建设。在此,我谨向参与本系列教材规划、组织、编写的老师致以诚挚的感谢,并希望该系列教材在全国高等学校自动化专业人才培养中发挥应有的作用。

吴恪迪 教授

2005年10月于教育部



《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会在对国内外部分大学有关自动化专业的教材做深入调研的基础上,广泛听取了各方面的意见,以招标方式,组织编写了一套面向全国本科生(兼顾研究生)、体现自动化专业教材整体规划和课程体系、强调专业基础和理论联系实际的系列教材,自2006年起将陆续面世。全套系列教材共50多本,涵盖了自动化学科的主要知识领域,大部分教材都配置了包括电子教案、多媒体课件、习题辅导、课程实验指导书等立体化教材配件。此外,为强调落实“加强实践教学,培养创新人才”的教学改革思想,还特别规划了一组专业实验教程,包括《自动控制原理实验教程》、《运动控制实验教程》、《过程控制实验教程》、《检测技术实验教程》和《计算机控制系统实验教程》等。

自动化科学技术是一门应用性很强的学科,面对的是各种各样错综复杂的系统,控制对象可能是确定性的,也可能是随机性的;控制方法可能是常规控制,也可能需要优化控制。这样的学科专业人才应该具有什么样的知识结构,又应该如何通过专业教材来体现,这正是“系列教材编审委员会”规划系列教材时所面临的问题。为此,设立了《自动化专业课程体系结构研究》专项研究课题,成立了由清华大学萧德云教授负责,包括清华大学、上海交通大学、西安交通大学和东北大学等多所院校参与的联合研究小组,对自动化专业课程体系结构进行深入的研究,提出了按“控制理论与工程、控制系统与技术、系统理论与工程、信息处理与分析、计算机与网络、软件基础与工程、专业课程实验”等知识板块构建的课程体系结构。以此为基础,组织规划了一套涵盖几十门自动化专业基础课程和专业课程的系列教材。从基础理论到控制技术,从系统理论到工程实践,从计算机技术到信号处理,从设计分析到课程实验,涉及的知识单元多达数百个、知识点几千个,介入的学校50多所,参与的教授120多人,是一项庞大的系统工程。从编制招标要求、公布招标公告,到组织投标和评审,最后商定教材大纲,凝聚着全国百余名教授的心血,为的是编写出版一套具有一定规模、富有特色的、既考虑研究型大学又考虑应用型大学的自动化专业创新型系列教材。

然而,如何进一步构建完善的自动化专业教材体系结构?如何建设基础知识与最新知识有机融合的教材?如何充分利用现代技术,适应现代大学生的接受习惯,改变教材单一形态,建设数字化、电子化、网络化等多元

形态、开放性的“广义教材”？等等，这些都还有待我们进行更深入的研究。

本套系列教材的出版，对更新自动化专业的知识体系、改善教学条件、创造个性化的教学环境，一定会起到积极的作用。但是由于受各方面条件所限，本套教材从整体结构到每本书的知识组成都可能存在许多不当甚至谬误之处，还望使用本套教材的广大教师、学生及各界人士不吝批评指正。

吴信 院士

2005年10月于清华大学



复杂工业过程中存在不确定因素,生产条件及工况频繁变化,造成被控对象的动态特性难以用精确数学模型来描述,因而使基于常规控制策略的控制系统无法投入运行,或运行效果不好,影响生产效率和产品质量。解决上述问题的关键,在于如何实现工业过程的自适应控制。因此,自适应控制成为近年来控制理论和控制工程界共同关注的热点研究领域。

自适应控制的内容十分丰富,本书力图在有限的篇幅内,使读者深入了解自适应控制的思想,掌握最基本的自适应控制器的设计方法,了解这一领域的近期研究成果。本教材以 Aström 的自校正调节器、Clarke 的自校正控制器和基于 Lyapunov 稳定性和 Popov 超稳定性的模型参考自适应控制这三种最重要的自适应控制方法为基础,将各种自适应控制器归结为参数可调控制器和自适应律。为了使读者不仅掌握自适应控制器的设计方法,而且还能掌握模型参数已知的控制器设计方法,详细介绍了模型已知的调节、控制、跟踪控制三种类型的控制器设计方法。在此基础上介绍了被控对象模型参数未知时的自适应控制器设计方法,并结合作者及学生多年来在自适应控制领域的研究成果,介绍了多变量自适应控制和非线性自适应控制,有助于立志从事自适应控制研究的读者开展研究工作。

为使读者对自适应控制方法有更深入的了解,在自适应控制应用这一章,详细介绍了最小方差自校正调节、广义预测自适应控制、模型参考自适应控制、多变量自适应解耦控制、非线性自适应切换控制的应用。在主要自适应控制方法的介绍中突出可调参数控制器和自适应控制器的控制问题描述、控制器设计、性能分析、仿真和应用案例,注重培养学生自适应控制系统的设计能力。

作为自动化专业本科生的教材,可以选择第 1 章绪论,第 2 章动态模型与参数估计,第 3 章的最小方差自校正调节器(3.2 节)、广义最小方差自校正控制器(3.4 节)、自校正 PID 控制器(3.7 节),第 4 章的基于模型参考的跟踪控制器(4.3 节)的内容。

作为控制科学与控制工程专业的硕士研究生教材,可以选择第 1 章绪论,第 2 章动态模型与参数估计,第 3 章自校正控制,第 4 章模型参考自适应控制,以及第 7 章自适应控制应用中最小方差自校正控制应用(7.2 节)、广义预测自适应控制应用(7.3 节)、模型参考自适应控制应用(7.4 节)的内容。

对于控制科学与控制工程专业的博士研究生,在选择上述内容的基础上,可以选择第5章多变量自适应控制,第6章非线性自适应控制,第7章的多变量自适应解耦控制应用和非线性自适应切换控制应用(7.5节和7.6节)的内容。

本书的出版得到了全国高等学校自动化专业系列教材出版基金的资助,作者表示衷心的感谢。本书介绍的研究成果得到了国家自然科学基金、国家973计划、国家863计划等支持,作者的学生王良勇副教授、富月副教授、周晓杰副教授、丁进良教授、周平博士、张亚军博士、贾瑶博士等参加了本书的编写、仿真、绘图等工作,在此一并致谢。

作 者

2016年1月

第 1 章 绪论	1
1.1 自适应控制的被控对象和特点	1
1.1.1 反馈控制的被控对象和特点	1
1.1.2 自适应控制的被控对象和特点	2
1.2 自适应控制的定义	3
1.3 自适应控制的主要类型	4
1.3.1 自校正控制器	4
1.3.2 模型参考自适应控制器	5
1.3.3 自校正控制与模型参考自适应控制的关系	6
1.4 自适应控制的理论问题	7
1.4.1 稳定性和收敛性	7
1.4.2 鲁棒性	8
1.4.3 其他的理论问题	8
1.5 自适应控制技术的应用概况	8
1.6 本书组织结构	9
参考文献	10
第 2 章 动态模型与参数估计	12
2.1 概述	12
2.2 离散时间随机线性模型	12
2.2.1 后移算子多项式	12
2.2.2 确定性线性模型	14
2.2.3 随机干扰模型	16
2.2.4 随机线性模型	18
2.3 参数估计	18
2.3.1 过程辨识简介	18
2.3.2 参数估计	20
思考题和习题	34
参考文献	36

第 3 章 自校正控制	37
3.1 概述	37
3.2 自校正调节器	38
3.2.1 最小方差调节器和最小方差控制器设计	38
3.2.2 自校正调节器设计	47
3.3 最小方差自校正控制器	51
3.3.1 控制问题描述	51
3.3.2 最小方差自校正控制器设计	52
3.4 广义最小方差自校正控制器	55
3.4.1 广义最小方差控制器设计	55
3.4.2 广义最小方差自校正控制器设计	60
3.4.3 仿真实验	62
3.5 自校正前馈控制器	65
3.5.1 广义最小方差前馈控制器设计	65
3.5.2 广义最小方差自校正前馈控制器设计	70
3.5.3 仿真实验	72
3.5.4 自校正前馈控制算法的全局收敛性分析	75
3.6 零极点配置自校正控制器	87
3.6.1 零极点配置控制器设计	87
3.6.2 零极点配置自校正控制器设计	92
3.6.3 仿真实验	97
3.6.4 其他几种零极点配置自校正控制器简介	99
3.7 自校正 PID 控制	100
3.7.1 PID 控制器设计	101
3.7.2 自校正 PID 控制器设计	103
3.7.3 仿真实验	104
3.8 广义预测自适应控制	106
3.8.1 引言	106
3.8.2 广义预测控制器设计	107
3.8.3 广义预测自适应控制器设计	114
3.8.4 仿真实验	116
思考题和习题	122
参考文献	124
第 4 章 模型参考自适应控制	126
4.1 概述	126

4.2	线性状态空间模型、Hurwitz 矩阵及伪逆	126
4.3	模型跟随控制器	128
4.3.1	控制问题描述	128
4.3.2	模型跟随控制器设计	129
4.3.3	稳定性和收敛性分析	131
4.3.4	仿真实验	131
4.4	基于 Lyapunov 稳定性理论的模型参考自适应控制器	133
4.4.1	模型参考自适应控制概述	133
4.4.2	Lyapunov 稳定性理论	135
4.4.3	基于 Lyapunov 稳定性的模型参考自适应控制器设计	139
4.4.4	仿真实验	145
4.5	基于 Popov 超稳定性理论的模型参考自适应控制器	147
4.5.1	正实性和正实引理	148
4.5.2	Popov 超稳定性理论	150
4.5.3	基于 Popov 超稳定性理论的模型参考自适应控制器设计	152
4.5.4	仿真实验	160
	思考题和习题	164
	参考文献	165
第 5 章	多变量自适应控制	167
5.1	概述	167
5.2	多变量离散时间随机线性模型与参数估计	168
5.2.1	多变量离散时间随机线性模型	168
5.2.2	参数估计	171
5.3	多变量广义最小方差自适应控制	172
5.3.1	多变量广义最小方差控制器设计	172
5.3.2	多变量广义最小方差自适应控制器设计	177
5.3.3	仿真实验	179
5.3.4	全局收敛性分析	180
5.4	多变量自适应解耦控制	182
5.4.1	多变量广义最小方差解耦控制器设计	182
5.4.2	多变量自适应解耦控制器设计	188
5.4.3	仿真实验	191
5.4.4	全局收敛性分析	194
	思考题和习题	201
	参考文献	202

第 6 章 非线性自适应控制	204
6.1 概述	204
6.2 非线性动态模型及参数估计	204
6.2.1 非线性动态模型	204
6.2.2 非线性模型辨识算法	206
6.3 基于未建模动态补偿的非线性切换控制器设计	210
6.3.1 控制问题描述	211
6.3.2 基于未建模动态补偿的非线性切换控制器	211
6.3.3 性能分析	215
6.3.4 加权多项式选择	219
6.4 基于未建模动态补偿的非线性自适应切换控制器设计	221
6.4.1 控制问题描述	221
6.4.2 基于未建模动态补偿的非线性自适应切换控制器	222
6.4.3 全局收敛性分析	226
6.4.4 仿真实验	233
6.4.5 非线性自适应切换控制算法改进	235
6.5 基于未建模动态补偿的非线性多变量切换控制器设计	237
6.5.1 控制问题描述	238
6.5.2 基于未建模动态补偿的非线性多变量切换控制器	239
6.5.3 性能分析	242
6.5.4 加权多项式矩阵选择	245
6.6 基于未建模动态补偿的非线性多变量自适应切换控制器设计	245
6.6.1 控制问题描述	245
6.6.2 多变量自适应切换控制器	246
6.6.3 全局收敛性分析	250
6.6.4 仿真实验	254
6.7 基于虚拟未建模动态驱动的多变量非线性自适应切换控制	257
6.7.1 引言	257
6.7.2 控制器驱动模型与虚拟未建模动态的概念	259
6.8 虚拟未建模动态驱动的非线性自适应控制器设计	262
6.8.1 控制问题描述	262
6.8.2 基于虚拟未建模动态驱动的多变量非线性控制器	262
6.8.3 全局收敛性分析	270
6.8.4 仿真实验	276
思考题和习题	284

参考文献	286
第7章 自适应控制应用	288
7.1 概述	288
7.2 自校正调节器在车辆悬架系统的应用	288
7.2.1 车辆悬架系统简介	288
7.2.2 控制问题描述	290
7.2.3 车辆悬架系统的最小方差自校正调节器	291
7.2.4 应用结果分析	292
7.2.5 调节器改进	296
7.3 广义预测自适应控制在太阳能集热器的应用	297
7.3.1 太阳能集热器简介	297
7.3.2 控制问题描述	298
7.3.3 太阳能集热器的广义预测自适应控制	299
7.3.4 应用结果分析	303
7.4 模型参考自适应控制在船舶自动驾驶仪的应用	305
7.4.1 船舶驾驶仪简介	305
7.4.2 控制问题描述	305
7.4.3 船舶驾驶的模型参考自适应控制	308
7.4.4 应用结果分析	312
7.5 多变量自适应解耦控制在工业电加热炉的应用	313
7.5.1 工业电加热炉简介	313
7.5.2 控制问题描述	314
7.5.3 工业电加热炉的多变量自适应解耦控制	314
7.5.4 应用结果分析	317
7.6 非线性自适应切换控制在单容水箱的应用	318
7.6.1 单容水箱简介	318
7.6.2 控制问题描述	319
7.6.3 单容水箱的非线性自适应切换控制器	319
7.6.4 实验结果分析	322
7.7 多变量智能解耦控制在钢球磨煤机制粉系统的应用	323
7.7.1 引言	323
7.7.2 钢球磨煤机制粉系统简介	324
7.7.3 钢球磨煤机制粉系统动态模型	325
7.7.4 智能解耦控制	329
7.7.5 工业应用	336

7.7.6 小结	343
参考文献	343
附录 A	346
A.1 几个重要引理	346
A.2 Martingale(鞅)及有关定理	349