



高等学校教材

Textbook for higher education

应用自适应控制

刘兴堂 主编

西北工业大学出版社

应用自适应控制

Applied Adaptive Control

主 编 刘兴堂

编 著 (以下按姓氏笔画为序)

万少松 王学智 王革命 王青歌 王曙钊

刘兴忠 李 云 李 刚 李小兵 吴晓燕

张双选 柳世考 赵 杰 赵玉芹

西北工业大学出版社

【内容简介】 自适应控制是控制科学与工程界最活跃的前沿领域之一,也是现代控制理论的重要组成部分和研究热点,其理论和技术日趋成熟,应用不断扩大。

本书旨在全面系统地研究自适应控制理论和技术的实际应用,故名曰“应用自适应控制”。全书分为三篇,共 18 章。基础篇论述自适应控制的概念、原理、理论基础、常用控制器及其他先进理论和技术;方法篇讨论各类自适应控制系统的设计方法及实现技术;应用篇通过大量实例研究自适应控制理论和技术的工程应用。

本书着眼于反映自适应控制的当前学术技术水平和展现新近科学研究成就,其内容丰富,取材新颖,具有理论密切结合实际的特色,适合于从事自动控制、实验工程及计算机应用的广大科学工作者和工程技术人员参考,亦可作为高等院校相关学科专业教师与研究生的教材或重要参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

应用自适应控制/刘兴堂主编. —西安:西北工业大学出版社,2003. 5
ISBN 7-5612-1594-0

I. 应… II. 刘… III. 自适应控制—研究 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 025958 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072 电话:(029)8493844

网 址: <http://www.nwpup.com>

印刷者:陕西友盛印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:32.5

字 数:811 千字

版 次:2003 年 5 月第 1 版 2003 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~5 000 册

定 价:40.00 元

序

工作在一定环境中的控制系统和环境构成一个整体,其工作过程和工作性能都必然要受到环境因素的影响。在空间、时间环境中的被控制对象本身的特性及参数也是在变化的。这些变化的因素,将影响控制系统的特性和品质。为了克服这些内在的和外来的因素对于控制系统工作的影响,人们一直在探索新的控制技术,以弥补古典的反馈控制系统的缺欠。适应控制技术是解决这个矛盾的新途径。适应控制与古典反馈控制的区别是,它不仅是对于某一个被控制量的反馈控制,而且是相对于某一优化的性能指标的反馈控制,它能够实时地、在线地测定自身的特性及环境干扰,根据不断丰富的信息,形成一个鉴别系统性能指标的度量,通过自适应调节环节,调整系统的控制策略,保证系统处于希望的状态。

人们经过了半个多世纪的不懈努力,致力于适应控制技术的研究,推动了它的发展。在理论上得到不断完善,并成功地应用在很多领域,但适应控制在理论和应用方面仍有许多工作要我们共同努力去完善它。

本书的出版,对于我们学习掌握适应控制的基本理论是有益的。本书的特点是内容比较丰富,作者还结合自己多年科研、教学的丰富经验,理论结合实际地给出了适应控制在航空、航天、国防工业及工业过程的应用实例。本书是一本理论联系实际的好书。

相信这本书的出版将对致力于适应控制研究的人士有所帮助。它不但可以作为大专院校教学中的教材,而且可作为科技工作者的参考书。

王子才*

2002年9月

* 王子才,中国工程院院士,哈尔滨工业大学教授。

前 言

控制理论发展同计算机技术进步相结合产生了控制科学与工程中的自适应控制。自适应控制以经典反馈控制和一般最优控制所不及的独特功能和控制性能得以迅速发展,应用范围不断扩大,正在吸引着广大科学工作者和工程技术人员。

自适应控制萌芽于 20 世纪 40 年代出现的控制器参数自动调整,50 年代初开始理论研究和早期应用。人们首先试图利用自适应控制来解决高性能飞机的自动驾驶仪设计问题。原因是这类飞机在使用飞行包线内的飞行高度和飞行速度的变化范围很宽,所以飞行中它的运动参数和控制参数都会有相当大幅度的改变,致使飞机动态特性发生很大变化。最初,想以自适应控制方法在飞机动态特性变化时,通过自动调节控制器参数来保证始终获得满意的自动驾驶仪控制品质和飞机飞行性能,于是曾提出了有名的 MIT 自适应控制律。然而,受当时控制理论发展和计算机能力的限制,利用 MIT 自适应控制律的自动驾驶仪飞行试验终于失败了。随之自适应控制的应用处于长时期的低谷阶段。在不少学者和专家的不断探索追求下,控制理论特别是稳定性理论的发展和计算机技术的进步给自适应控制注入了新的活力,使她在 20 多年后再度崛起,应用范围迅速扩大,以至成为现代控制理论的重要组成部分及应用热点。

进入 20 世纪 80 年代后,自适应控制理论及技术被越来越广泛地应用于国民经济和国防建设的各个工程技术领域,包括航空、航天、航海、机器人、工业过程(如冶金、化工、酿造、造纸等)、环境保护、生物工程、试验工程及现代兵器等。近年来,国内外学者、专家已逐步达成共识:“自适应控制对那些在工作范围内展现参数有极大变化的应用场合是必须的。”可以预料,随着科学技术的不断进步,尤其是计算机软硬件技术和其他先进理论和技术,如人工神经网络、人工智能、模糊集论、遗传算法、 H_∞ 控制、变结构控制等的成功应用,必将推动自适应控制理论及技术更迅速发展,自适应控制具有极其良好的应用和开发前景。

本书旨在反映自适应控制应用的当前学术技术水平和新近研究成果,帮助广大读者深入学习和掌握自适应控制的应用科学知识。本书的突出特点是理论密切结合实际,重点研究自适应控制理论及技术的工程应用,以促进这门高新技术尽快转化为生产力,为我国四个现代化建设服务。

本书分为三篇,共 18 章。基础篇为第 1~4 章,主要阐述自适应控制的概念、原理、结构与

分类,论述自适应控制的理论基础、常用控制器及其他先进理论与方法;技术篇为第5~13章,重点讨论各类自适应控制系统的设计方法及实现技术,其中包括:参数与非参数自校正控制、模型参考自适应控制、其他形式的自适应控制、多变量过程自适应控制、非线性系统自适应控制及全系数自适应控制等;应用篇为第14~18章,广泛研究了自适应控制理论及技术在国民经济、工业过程和国防科技领域内的实际应用,这里有部分工业过程的自适应控制,典型物理量(位移、速度、温度、压力、摩擦等)的自适应控制,以及自适应控制在航空、航天、导弹兵器 and 空中飞行模拟器等方面的应用。

本书由空军工程大学刘兴堂教授主持编著和统稿,并撰写了其中的第1,2,3,5,7,8,9,13,14,15,16,17章;万少松教授、李刚博士、王学智、柳世考、赵杰、赵玉芹、李小兵副教授和张双选、王革命、王青歌、刘兴忠讲师及李云硕士共同完成了第4,6,10,11,12,18章的编著工作,柳世考副教授还进行了整个书稿文字、公式及插图的统一规格化。王曙钊和吴晓燕教授对全书做了细致的校对工作。

应用自适应控制涉及多学科、多专业,知识面很广,而作者水平有限,书中难免有不妥或错误之处,恳请各位学者、专家和广大读者批评指正。

本书编著过程中得到了许多同行专家和教授们的热情鼓励与支持,特别是受到了中国工程院院士王子才、黄先祥教授的直接指导,王子才教授还特意为本书作序。尤其值得提出的是作者曾参考和引用了不少学者、专家的著作和论文,这里一并致谢。同时还要感谢空军工程大学“院士培养工程”基金的资助;感谢空军工程大学导弹学院首长的关怀和训练部机关的大力支持。感谢研究生董守贵、孙文、刘力等在打字、绘图及编辑等工作中给予的热情帮助和支持。最后,作者对西北工业大学出版社领导及同志们在本书出版中所付出的辛勤劳动表示崇高的敬意。

作 者

2002年10月于西安

目 录

基 础 篇

第 1 章 绪论	3
1.1 自适应控制及其系统的一般概念	3
1.1.1 问题的提出	3
1.1.2 各种提法	3
1.1.3 功能及特点	4
1.2 自适应控制系统的基本结构与分类	4
1.2.1 自适应控制系统的基本结构	4
1.2.2 自适应控制系统的方案分类	5
1.3 自适应控制技术的发展及应用	7
1.4 “应用自适应控制”的提出及其内涵	9
第 2 章 自适应控制的理论基础	10
2.1 李雅普诺夫稳定性理论	10
2.1.1 引言	10
2.1.2 稳定性的一般概念及定义	10
2.1.3 李雅普诺夫意义下的稳定性定义	10
2.1.4 李雅普诺夫函数与第二方法	12
2.1.5 李雅普诺夫稳定性定理	13
2.1.6 连续时域和离散时域内的稳定性理论关系	14
2.1.7 李雅普诺夫稳定性理论的应用	14
2.2 正实性与正动态系统	15
2.2.1 引言	15
2.2.2 正实函数与严格正实函数	16
2.2.3 正实矩阵与严格正实矩阵	17
2.2.4 卡尔曼—雅可波维奇—波波夫正实引理	17
2.2.5 正定积分核和正动态系统	18
2.2.6 连续时域和离散时域内的正动态系统理论的关系	18
2.3 超稳定性理论	19

2.3.1	引言	19
2.3.2	连续系统的超稳定性理论	19
2.3.3	离散系统的超稳定性理论	20
2.4	动态过程与随机信号的辨识	21
2.4.1	引言	21
2.4.2	过程与噪声模型	22
2.4.3	非参数及参数辨识方法	23
2.4.4	通用递推参数估计算法	27
2.4.5	修正递推估计算法	29
2.4.6	时变过程的参数估计算法	29
2.4.7	递推估计算法的收敛性分析	30
2.4.8	参数估计算法收敛性分析中的鞅理论	34
2.4.9	模型阶和时迟的确定方法	37
2.5	闭环在线辨识	38
2.5.1	引言	38
2.5.2	闭环系统的可辨识性概念及辨识方法	39
2.5.3	闭环系统可辨识性条件	40
2.6	鲁棒性概念、定义和有关定理	42
2.6.1	鲁棒性概念及分类	42
2.6.2	控制系统的鲁棒性定义及定理	43
2.6.3	自适应算法对干扰和未建模动态的鲁棒性问题	44

第3章 自适应控制的常用控制器 45

3.1	引言	45
3.2	一般线性控制器	45
3.3	PID 控制器	47
3.3.1	最优化设计	47
3.3.2	借助其他控制器设计	48
3.3.3	通过调整规律设计	48
3.3.4	变参数 PID 控制器的自寻优方法	49
3.3.5	PID 控制器修正	50
3.4	对消控制器	50
3.5	非周期控制器	53
3.6	预报控制器	54
3.7	最小方差控制器	56
3.7.1	基本最小方差控制器	56
3.7.2	各种广义最小方差控制器	56
3.7.3	最小方差控制器的特性	58
3.7.4	最小方差控制器同其他控制器的关系	60

3.7.5 非零均值干扰下的最小方差控制器.....	61
3.8 广义预报控制器.....	62
3.9 状态控制器、状态观测器及卡尔曼滤波器	65
3.9.1 基本状态控制器.....	65
3.9.2 最优状态控制器.....	67
3.9.3 状态观测器.....	68
3.9.4 卡尔曼(Kalman)滤波器	69
3.9.5 对偶原理.....	72
3.9.6 分离定理.....	73
3.9.7 参考信号和外干扰的状态控制器.....	75
3.10 谨慎控制器	77
3.10.1 谨慎控制概念	77
3.10.2 谨慎控制器的特点	77
3.10.3 谨慎控制器的设计方法	79
3.11 常用控制器的适应性算法及工作量比较	80
3.11.1 引言	80
3.11.2 适应性算法及适用特点	80
3.11.3 适应性控制算法工作量比较	84

第4章 用于自适应控制的新理论与新技术

4.1 概述.....	85
4.2 智能控制理论与技术.....	85
4.2.1 智能控制的概念.....	85
4.2.2 智能控制的性能和特点.....	87
4.2.3 智能控制的结构.....	88
4.2.4 智能控制系统的类型.....	90
4.2.5 智能控制发展概况.....	90
4.3 神经网络控制理论与技术.....	91
4.3.1 神经网络的概念.....	91
4.3.2 神经网络的特点.....	91
4.3.3 神经网络计算机理.....	92
4.3.4 常用的神经网络模型.....	97
4.3.5 神经网络模型辨识	102
4.3.6 神经网络控制	106
4.4 模糊控制理论与技术	109
4.4.1 引言	109
4.4.2 模糊控制的概念及原理	109
4.4.3 模糊控制器模式	110
4.4.4 模糊控制器设计	114

4.5 变结构控制理论与技术	118
4.5.1 引言	118
4.5.2 变结构控制概念	118
4.5.3 切换面及切换控制律	121
4.5.4 控制规律的构造方法	123
4.5.5 不变性条件与鲁棒性	124
4.5.6 变结构控制系统设计	125
4.5.7 变结构控制律的稳定性	127
4.6 鲁棒控制与 H_∞ 控制理论	127
4.6.1 概述	127
4.6.2 H_∞ 控制概念及定义	128
4.6.3 鲁棒稳定性与 H_∞ 性能指标的关系	131
4.6.4 H_∞ 标准控制设计方法及求解结论	132
4.7 自适应逆控制理论	136
4.7.1 自适应逆控制概念及原理	136
4.7.2 自适应逆控制的特点	137
4.7.3 逆对象模型的建立	137
4.7.4 模型参考对象的逆建立	139
4.7.5 有干扰时对象的逆建立	140
4.7.6 对象扰动和噪声的消除	140

方 法 篇

第5章 参数自校正控制	145
5.1 引言	145
5.2 参数自校正控制的基本方法	145
5.2.1 概述	145
5.2.2 参数自校正控制性能及策略	146
5.2.3 参数自校正控制设计原理	146
5.2.4 参数过程模型	146
5.2.5 参数估计与状态估计	147
5.2.6 参数控制器设计准则	147
5.2.7 参数自校正控制算法	147
5.3 参数估计与控制器的合理组合	148
5.3.1 各种组合方法	148
5.3.2 选择参数自校正控制器的考虑因素	149
5.4 随机性参数自校正控制	150
5.4.1 最小方差自校正控制	150
5.4.2 广义最小方差自校正控制(RLS—MV3,RELS—MV3)	152

5.5 确定性参数自校正控制	153
5.5.1 非周期自校正控制(RLS—DB)	153
5.5.2 状态参数自校正控制(RLS—SC)	153
5.5.3 PID 自校正控制	155
5.5.4 极点配置自校正控制	155
5.6 参数自校正控制仿真研究	158
5.6.1 仿真试验环境	158
5.6.2 仿真目的与方法	158
5.6.3 仿真结果与分析	159
5.7 参数自校正前馈控制技术	160
5.8 参数自校正控制的稳定性、收敛性及鲁棒性	162
5.8.1 稳定性	162
5.8.2 收敛性	162
5.8.3 鲁棒性	164
5.8.4 时变装置的鲁棒自校正控制	171
第6章 非参数自校正控制	173
6.1 引言	173
6.2 非参数自校正控制设计策略	173
6.3 非参数估计方法及算法	175
6.3.1 基本估计方法	175
6.3.2 常用估计方法	177
6.4 非参数控制器设计	181
6.4.1 非参数广义最小方差控制器(NGMVC)	182
6.4.2 非参数预报控制器(NPC)	183
6.4.3 LS 逼近参考控制器(ARC)	186
6.4.4 参数最优化控制器(i -PO- j)	187
6.4.5 非参数对消控制器(NCC)	187
6.5 非参数自校正控制系统设计	188
6.5.1 引言	188
6.5.2 确定性非参数自校正控制器(系统)设计	189
6.5.3 随机性非参数自校正控制系统设计	190
6.5.4 非参数自校正控制的闭环可辨识性条件	191
6.5.5 非参数自校正控制的设计参数选择	191
6.6 非参数自校正控制的起动和管理	192
6.6.1 起动过程	192
6.6.2 监控与管理问题	193

第 7 章 自校正控制运行方法与技术问题	195
7.1 引言	195
7.2 辨识与估计中的先验信息利用	195
7.3 自校正控制的起动技术	196
7.3.1 预辨识	196
7.3.2 自由设计参数选择	196
7.3.3 起动方法	197
7.4 自校正控制的管理与协调	198
7.4.1 管理任务与协调功能	198
7.4.2 管理和协调的起动	199
7.4.3 参数估计管理	199
7.4.4 控制器设计的管理	200
7.4.5 闭环回路的管理	201
7.5 具有 S&C 级功能的参数自校正控制	201
第 8 章 连续时间模型参考自适应控制系统	203
8.1 引言	203
8.2 连续时间 MRAS 的局部参数最优化设计方法	203
8.2.1 基本条件和设计思想	203
8.2.2 利用梯度法设计连续时间 MRAS 的自适应规律	204
8.2.3 梯度型 MRAS 的应用及稳定性分析	207
8.3 用李雅普诺夫稳定性理论设计 MRAS	212
8.3.1 引言	212
8.3.2 利用李雅普诺夫函数对失稳的 MIT MRAS 再设计	213
8.3.3 借助李雅普诺夫函数获取其他控制规律	214
8.3.4 用系统状态变量构成的自适应控制律	216
8.3.5 用被控对象的输入-输出构成自适应控制律	223
8.4 连续时间 MRAS 的超稳定性理论设计	231
8.4.1 引言	231
8.4.2 应用超稳定性理论设计 MRAS 的方法及步骤	232
8.4.3 用状态变量构成 MRAS 的自适应控制律	232
8.4.4 用被控对象输入-输出构成 MRAS 的自适应控制律	236
8.5 自适应模型跟随控制系统及其设计	241
8.5.1 线性模型跟随控制系统概念	241
8.5.2 自适应模型跟随控制系统方案设计	242
第 9 章 离散时间模型参考自适应控制系统	246
9.1 引言	246

9.2	离散时间 MRAS 的一般设计方法	246
9.3	离散时间 MRAS 的转换设计方法	249
9.4	用李雅普诺夫第二法设计离散时间 MRAS	251
9.5	用超稳定性理论设计离散时间 MRAS	253
9.5.1	用差分方程描述离散时间 MRAS	253
9.5.2	用状态空间描述离散时间 MRAS	257
9.6	MRAS 方案的鲁棒性分析	259
9.6.1	引言	259
9.6.2	MRAS 方案的统一形式	259
9.6.3	MRAS 方案的鲁棒性分析	260

第 10 章 其他形式的自适应控制 264

10.1	概述	264
10.2	智能自适应控制	264
10.2.1	智能自适应控制类型	264
10.2.2	自学习智能自适应控制	264
10.2.3	专家式智能自适应控制	265
10.2.4	分层递阶智能自适应控制	265
10.3	神经网络自适应控制	266
10.3.1	引言	266
10.3.2	神经网络自校正控制	267
10.3.3	神经网络模型参考自适应控制	268
10.3.4	神经网络自适应控制中存在的问题	270
10.4	模糊自适应控制	271
10.4.1	引言	271
10.4.2	模糊控制原理及控制器设计综述	272
10.4.3	自适应模糊控制器的构成及其设计	272
10.4.4	模糊自适应控制系统的设计考虑	275
10.4.5	模糊模型参考自适应控制设计	276
10.5	变结构自适应控制	278
10.5.1	引言	278
10.5.2	单变量变结构自适应控制	278
10.5.3	多变量变结构自适应控制	282
10.5.4	变结构模型参考自适应控制	283
10.6	鲁棒自适应控制	286
10.6.1	引言	286
10.6.2	H_∞ 自校正控制	286
10.6.3	慢变过程的鲁棒自适应控制器设计	288
10.7	自适应逆控制	290

10.7.1	引言	290
10.7.2	逆模型串接在对象输入端的自适应逆控制系统	290
10.7.3	逆模型串接在对象输出端的自适应逆控制系统	291
10.7.4	具有离线逆建模的自适应逆控制系统	291
10.7.5	一种显式模型跟随逆控制系统	292
10.8	混合自适应控制	292
10.8.1	引言	292
10.8.2	模型参考混合自适应控制	293
10.8.3	σ 校正混合自适应控制	298
10.8.4	积分式混合自适应控制	301
第 11 章	多变量系统的自适应控制	305
11.1	概述	305
11.2	多变量线性过程模型	305
11.2.1	P-规范型 I/O 模型	305
11.2.2	矩阵多项式模型	308
11.2.3	状态空间模型及其规范型	309
11.2.4	有噪声的 MIMO 过程模型	311
11.2.5	带迟后时间的过程模型	312
11.2.6	随机过程模型	313
11.3	多变量过程模型的参数估计	314
11.3.1	估计算法	314
11.3.2	可辨识性和收敛条件	314
11.3.3	传递函数矩阵参数估计方法	315
11.3.4	马尔可夫(Markov)参数估计方法	317
11.4	多变量控制器设计	317
11.4.1	确定型状态控制器	318
11.4.2	随机型状态控制器	320
11.4.3	状态变量重构	321
11.4.4	确定型矩阵多项式控制器	321
11.4.5	随机型矩阵多项式控制器	323
11.5	带迟后时间过程的多变量控制方法	323
第 12 章	非线性系统的自适应控制	325
12.1	概述	325
12.1.1	问题提法	325
12.1.2	控制规律选择	325
12.1.3	自适应控制规律选择	326
12.2	非线性参数过程模型	326

12.2.1	非线性过程模型的选取	326
12.2.2	参数 Volterra 模型	327
12.2.3	广义 Hammerstein 模型	329
12.2.4	简化 Hammerstein 模型	330
12.2.5	非线性过程的 NDE 模型	330
12.2.6	随机非线性过程模型	331
12.2.7	其他非线性过程模型	332
12.3	非线性过程的参数估计	334
12.3.1	估计算法	334
12.3.2	非线性过程的可辨识性	334
12.4	非线性控制器的设计与非线性控制算法	336
12.4.1	基于简化 Hammerstein 模型的控制器设计与算法	336
12.4.2	基于参数 Volterra 模型的控制器设计与算法	337
12.4.3	基于 NDE 模型的控制器设计与算法	344
12.5	基于强跟踪滤波器的非线性系统自适应控制器	347
12.5.1	一般模型控制(GMC)原理	347
12.5.2	强跟踪滤波器	349
12.5.3	基于参数估计的自适应 GMC 方法	350
12.5.4	基于输入等价干扰的自适应 GMC 方法	352
12.6	非线性系统的自适应模糊控制	353
12.6.1	引言	353
12.6.2	间接型自适应模糊控制器设计	354
12.6.3	直接型稳定自适应模糊控制	357
12.7	典型非线性系统的自适应控制	361
12.8	非线性自适应控制算法特点归纳	363
第 13 章	全系数自适应控制方法	365
13.1	概述	365
13.2	全系数之和等于 1 的概念	365
13.3	参数估计范围及新递推估计算法	366
13.3.1	差分方程各系数 α_i 范围计算	366
13.3.2	差分方程 β_j 值的估计	367
13.3.3	差分方程系数取值范围结论	368
13.3.4	新递推估计算法	368
13.3.5	参数估计的收敛性	370
13.4	全系数自适应控制方法的工程实现	371
13.4.1	设计方法	371
13.4.2	设计步骤及实现流程	372
13.5	一种典型的全系数自适应控制方案	374

13.5.1	前提假设	374
13.5.2	基本结构和工作流程	375
13.5.3	联合参数估计方法	375
13.5.4	控制器设计	376
13.6	多变量全系数自适应控制方法	377
13.6.1	引言	377
13.6.2	多变量规范型方程全系数阵结论	377

应 用 篇

第 14 章 典型物理量的自适应控制 383

14.1	概述	383
14.2	自适应温度控制	383
14.3	自适应流量控制	386
14.4	自适应压力控制	387
14.5	干摩擦影响的自适应补偿	388
14.6	自适应位移和速度控制	390
14.6.1	引言	390
14.6.2	机械手的自适应轨迹控制	390
14.6.3	机械手自适应控制规律的微机实现	393

第 15 章 自适应控制在工业过程中的部分应用 396

15.1	概述	396
15.2	造纸过程基重和水分(湿度)的自校正控制	396
15.2.1	被控对象分析	397
15.2.2	控制方案确立	397
15.2.3	系统软硬件配置与全系数自适应控制仿真	398
15.3	自校正燃烧控制	400
15.4	液位与 PH 值的非线性参数自适应控制	401
15.4.1	非线性液位自适应控制系统	401
15.4.2	PH 值自适应控制系统	401
15.5	直流电传动的自适应速度控制	403
15.5.1	直流电传动的控制方案	404
15.5.2	控制模型的建立	404
15.5.3	自适应控制结构的设计	405
15.6	异步电动机的非线性自适应控制	407
15.6.1	引言	407
15.6.2	异步电动机的简化数学模型	407
15.6.3	非线性辨识系统的设计	408

15.7 智能自适应控制器在电石炉上的应用·····	410
15.7.1 电石生产概述·····	410
15.7.2 控制方案·····	411
15.7.3 自适应控制设计·····	412
15.7.4 微机控制系统·····	413
15.7.5 运行结果·····	414
第 16 章 航空航天科技领域的自适应控制 ·····	415
16.1 概述·····	415
16.2 飞机的自适应驾驶仪·····	415
16.2.1 引言·····	415
16.2.2 斯佩里(Sperry)自适应控制系统·····	415
16.2.3 M-H 自适应控制系统·····	417
16.2.4 MIT 模型参考自适应控制系统·····	418
16.2.5 MH-90 自适应控制系统·····	419
16.3 飞行员自适应控制模型及其应用·····	420
16.3.1 引言·····	420
16.3.2 飞行员最优驾驶模型的建立·····	421
16.3.3 利用飞行员最优化驾驶模型预测飞行操纵品质·····	423
16.3.4 利用飞行员最优驾驶模型辅助飞控参数最优化设计·····	425
16.4 宇宙飞船的自适应控制·····	426
16.4.1 飞船的动力学及运动学数学模型·····	426
16.4.2 飞船的姿态调节与自适应姿态跟踪·····	427
16.5 卫星跟踪望远镜的 MRAS·····	428
16.5.1 系统组成及技术要求·····	428
16.5.2 自适应控制方案选取与设计·····	429
16.6 空间环境模拟器的自适应控制·····	430
16.6.1 引言·····	430
16.6.2 对象简化换热数学模型的建立·····	431
16.6.3 全系数自适应控制方案设计·····	432
16.6.4 设计方案的工程实现·····	432
16.7 基于自学习律的 PID 控制在运动模拟转台上的应用·····	433
16.7.1 引言·····	433
16.7.2 三轴运动模拟转台·····	433
16.7.3 自学习律的应用·····	434
第 17 章 自适应控制在导弹武器系统中的应用 ·····	436
17.1 概述·····	436
17.2 自适应控制在战术导弹设计中的应用·····	436