

自适应控制

A Textbook for Adaptive Control

韩正之 陈彭年 陈树中 编著

Han Zhengzhi Chen Pengnian Chen Shuzhong

自适应控制

A Textbook for Adaptive Control

张纪岳 张纪岳 编

清华大学出版社

本书是作者在多年从事自适应控制教学与科研工作的基础上编写而成的。全书共分八章，主要内容包括：自适应控制的基本概念、模型参考自适应控制、自激自适应控制、自适应跟踪控制、自适应辨识、自适应鲁棒控制、自适应模糊控制、自适应神经网络控制等。本书可作为高等院校自动化专业及相关专业的教材，也可供从事自适应控制工作的工程技术人员参考。



清华大学出版社



自适应控制

A Textbook for Adaptive Control

韩正之 陈彭年 陈树中 编著

Han Zhengzhi Chen Pengnian Chen Shuzhong

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书是自适应控制的基础教材。全书分成四部分：第1章是引论，对自适应控制做了简单介绍。第2章和第3章介绍学习自适应控制必需的线性控制系统理论。紧接着的3章是自适应控制的经典内容，包括递推最小二乘估计、模型参考自适应控制和自校正调节器理论。本书遵循自适应控制发展的线索叙述，在讲清自适应控制经典内容的基础上，帮助读者了解本领域经典作者的创造性思维方式。最后3章讲述自适应观测器设计、自适应跟踪设计和鲁棒自适应控制。这是自适应控制理论中比较新的研究课题，而且研究成果相对完整，读者不但可以了解这些领域的主要结论和主要研究方法，而且可以由此体会科学研究是怎样逐步深入展开的。附录给出随机过程的基础知识，有助于读者理解书中提及的有关随机变量和随机过程的基本概念和基本结论。

全书内容相对完整，讲述循序渐进，论证深入浅出，语言简洁明了，对初学者容易产生困难的地方都有比较细致的诠释。

本书前6章内容可以作为自动控制专业本科生的专业基础课教材，后3章内容可以作为选修课或者硕士研究生的教材，全书也可供从事自动控制教学和科研工作的人员参考。

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/韩正之,陈彭年,陈树中编著. —北京:清华大学出版社,2011.4

ISBN 978-7-302-24160-7

I. ①自… II. ①韩… ②陈… ③陈… III. ①自适应控制—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 240371 号

责任编辑：王一玲

责任校对：梁毅

责任印制：王秀菊

出版发行：清华大学出版社

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编：100084

社 总 机：010-62770175

邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62795954, jsjjc@tup.tsinghua.edu.cn

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

印 装 者：北京嘉实印刷有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185×260 印 张：13.25 字 数：331 千字

版 次：2011 年 4 月第 1 版 印 次：2011 年 4 月第 1 次印刷

印 数：1~3000

定 价：25.00 元

至今为止自适应控制技术还是应用最为广泛的一种控制技术。

一个控制理论工作者或者一个控制工程师，“反馈”两个字应该对他刻骨铭心，就像歌词唱的：“从来不需要想起，永远也不会忘记。”Robert Weiner 于 20 世纪 40 年代发现了它，并指出反馈原理是自然界的基本规律之一。自此之后，“反馈”便是控制人士的神灵。正是由于反馈技术，我们可以不必对被控对象有精确的了解，也可以不必精细地设计控制律，只要根据控制的结果和控制目标之间的误差，来不断地调整控制策略，就能达到预定的目标。因此，反馈降低了设计难度和精度的要求。这是目前简单的线性控制很有市场的根本原因。然而人类总是不会满足现状的，进取应该说是生命的追求，在达到初步的控制目标之后，非常自然的进步是能够在设计的时候就考虑到系统的不确定性，制定针对不确定性的策略。这就是自适应控制诞生的理由。

“知己知彼，百战不殆”是兵法。一个控制过程就像一场战役。尽管被控的对象没有智能，但是它必定在变化，甚至会有出其不意的变化。因此在一个成功的控制过程中，控制者一定要根据一切可以利用的信息去分析和琢磨对象的各种可能的变化，制定能够应对对象变化的制胜策略。自适应控制就是这样设计的，它先辨识对象的变化，然后利用掌握的变化来调整控制策略，以便最大程度地发挥控制的效率。这种做法符合客观规律，因此广为采纳，久盛不衰。

早先，从大处分类，现代控制理论被分成系统辨识(又称建模)、线性系统理论和最优控制三大板块。自适应控制是放在系统辨识这一个板块里的。这是因为实现自适应控制必须先辨识对象的变化，故而系统辨识是前提。自适应控制技术早期的迅速发展，应当归功于系统辨识的研究成果为之奠定了扎实的基础。在进入 20 世纪 80 年代以后，由于实际需要的驱动，自适应控制的发展超出了系统辨识的发展，而逐渐反客为主地成为一门阵营强大的独立学科分支，堂皇地进入了大学课堂，甚至风靡一时。在 20 世纪 90 年代前后，国内外重点大学的自动化专业、化学工程专业、电子电气专业纷纷开设自适应控制课程，更是这些专业的研究生必修课程，一批经典的教材应运而生。同时自适应仪表、自适应系统如同雨后春笋，层出不穷。丰富的成果使得自适应控制的发展发生分化，呈现出向理论与技术发展的两个趋势，理论发展主要围绕随机系统的收敛性，技术发展则是各式各样自适应控制律的设计，各式各样自适应系统的构造。本书主要是介绍自适应控制理论，但是作者认为这些理论只能算作应用基础理论，没有做过于严谨的数学推导，因此可以作为一本技术类课程的基础教材。

作者在 20 世纪 80 年代初涉足现代控制理论，90 年代前后在学校里讲授过自适应控制课程。相隔近 20 年，又重新回到热衷的教室，给学生讲述自适应控制课程。但是近 20 年的变化，光阴不再。学生已经不是 20 年前的学生，教材不是 20 年前的教材，自适应控制也不是 20 年前的自适应控制。大学从精英教育发展到大众化教育，自动化的学生从 2P(Paper

and Pencil)时代进入到网络时代,教材从屈指可数的几本到了人人可编的火爆年代。

当再次需要遴选教材的时候,我们困惑了。首先,科学在发展,技术在进步,当面向大学生或者硕士研究生系统讲述自适应控制课程的时候,应该怎样讲呢?讲述最前沿的发展,还是讲述这门课程的经典?就像今天讲述《普通物理学》要不要从 Newton 力学三大定律开始,要不要讲解 Maxwell 的电磁场方程?尤其是像自适应控制这样至今还是炙手可热的学科,研究成果多如牛毛,就说模型参考自适应控制,提出的反馈律不少于百种,应该如何遴选?经过反复讨论,认真研究,我们认为面向大学生、硕士研究生,作为他们的入门教程,还是要抓住根本:根本的方法、根本的结论,最好还有根本的思想。根本源于经典,应该首先讲解那些经典作家是如何会提出以他们的名字命名的设计方案的,讲述这些方案是怎样被他人所发展的;然后再涉及最近的一些发展动向,便于学生做进一步的探究。在这样的立意下,15年前的教材是可用的,但是且不说采购有困难,学校教务部门也不大会同意。那就在近年出版的书中选一本吧,看了也用了几本,不知是作者的原因还是编辑的原因,各式各样的错误几乎令我等都不能卒读,何况学子?于是乎产生了自己编一本书的愿望。

编书时的设计分为三大部分:基础部分,概括介绍讲述自适应控制需要的前提课程的结论,帮助教学方便地进行,那是第1章到第3章;主体部分,模型参考自适应和自校正控制是自适应控制的经典内容,没有这两部分就不能算自适应控制的基础教材了,我们计划是沿着发展进程讲解这两块内容,以经典作家的贡献为里程碑来介绍经典结论。我们恪守 Newton 的见解,只有立在巨人的肩膀上才能看得更远。为了介绍模型参考自适应和自校正控制器,必须先介绍参数辨识,这是这两部分知识的基础工具。主体部分在第4章到第6章。后面3章是专题部分。现代自适应控制的成果浩如烟海,撮其精华介绍几个专题。我们极力介绍得细一些,推导详尽些。

我们为自己定的要求:叙述简洁、推导仔细、结论明确、评判得当。凡是当初学习时感到困难的地方,或者我们在教学中学生觉得困难的地方,都给以解释推演。绝不语焉不详或者“忽悠”过去。可以肯定,书中给出的结论90%不是我们建立的,书中论证的方法90%不是我们提出的,但是我们可以自信地说,书中一切100%经过我们的思辨,用我们认为合适的语言表达出来。

本书可以作为大学高年级学生专业课的教材,建议用40学时左右,在快速回顾了前3章以后,主要讲授第4章到第6章;如果作为研究生教材,可以用30学时左右讲述前6章的内容,再花18学时左右讲述后3章。

本书写作历经两年,尽管作者反复审核,书中的错误想来还是存在,敬请读者赐教。我们的电子邮件信箱分别为:

韩正之 zzhan@sjtu.edu.cn

陈彭年 pnchen@mail.hz.zj.cn

陈树中 szchen@cs.ecnu.edu.cn

韩正之的博士研究生谢七月协助完成了部分仿真,特此致谢。

编者

2010年8月

第 1 章 引论	1
1.1 什么是自适应控制	1
1.2 两种主要的自适应控制技术	3
1.3 自适应控制研究的主要问题	4
1.4 自适应控制系统的历史	5
第 2 章 线性控制系统	7
2.1 数学描述	7
2.1.1 线性控制系统的输入输出描述	7
2.1.2 线性控制系统的状态空间描述	9
2.2 能控性和能观性	12
2.2.1 线性控制系统的能控性	12
2.2.2 线性控制系统的能观性	12
2.2.3 线性控制系统的对偶性	13
2.2.4 线性控制系统的 Kalman 分解	14
2.3 极点配置和观测器设计	16
2.3.1 线性控制系统的标准型	16
2.3.2 线性控制系统的极点配置	19
2.3.3 线性控制系统的渐近状态观测器	20
2.3.4 线性控制系统的分离设计	21
2.4 实现理论	22
2.4.1 线性控制系统实现理论	22
2.4.2 线性控制系统实现算法	24
练习	26
第 3 章 控制系统的稳定性	30
3.1 稳定性的定义	30
3.1.1 Lyapunov 稳定性定义	30
3.1.2 输入输出稳定性定义	32
3.2 稳定性判据	33
3.2.1 Lyapunov 定理	33
3.2.2 线性连续系统的 Lyapunov 稳定性	35

3.2.3	线性离散系统的 Lyapunov 稳定性	35
3.2.4	Barbalat 引理	36
3.3	超稳定性理论	37
3.3.1	控制系统的超稳定性	37
3.3.2	正实函数和正实函数性质	38
3.3.3	正实矩阵和正实性引理	40
3.3.4	超稳定性判据	41
3.3.5	离散系统的正实性	44
练习	.....	44
第 4 章	系统参数辨识	47
4.1	最小二乘估计	47
4.1.1	最小二乘估计问题的提法	48
4.1.2	递推最小二乘估计	49
4.1.3	指数加权递推最小二乘估计	51
4.2	最小二乘估计的统计特征	52
4.2.1	最小二乘估计的统计性质	52
4.2.2	残差的统计性质	54
4.2.3	计算顺序	55
4.3	广义最小二乘法	56
4.3.1	问题的提出	56
4.3.2	广义最小二乘法的计算	59
练习	.....	60
第 5 章	模型参考自适应控制	63
5.1	基于频域模型的模型参考自适应控制	63
5.1.1	问题的描述	63
5.1.2	对象模型已知的模型参考控制器设计	64
5.1.3	MIT 方案	68
5.2	基于状态空间模型的模型参考自适应控制	70
5.2.1	应用状态空间的模型参考自适应控制器的设计	70
5.2.2	应用增广误差的模型参考自适应控制器的设计	72
5.3	基于误差模型的模型参考自适应控制	75
5.3.1	误差模型和标称系统	75
5.3.2	应用误差模型的自适应律	77
5.3.3	$n-m \geq 2$ 时的修正	79
5.4	离散系统的模型参考自适应控制	83
5.4.1	应用误差模型的离散系统模型参考自适应控制	83
5.4.2	基于超稳定性的离散系统模型参考自适应控制	86

练习	90
第 6 章 自校正调节器	92
6.1 最小方差预报和最小方差控制	93
6.1.1 最小方差预报	93
6.1.2 最小方差控制	97
6.1.3 最小方差控制系统的稳定性	100
6.2 自校正调节器	100
6.2.1 自校正调节器算法	100
6.2.2 自校正调节器的渐近性质	102
6.3 广义最小方差的自校正控制器	107
6.3.1 问题的描述	107
6.3.2 广义最小方差预报	108
6.3.3 广义最小方差控制	109
6.3.4 关于闭环稳定性的讨论	111
6.3.5 自校正控制器的递推算法	112
6.4 多变量自校正系统	113
6.4.1 多变量最小方差控制器	113
6.4.2 闭环的稳定性	115
6.4.3 多变量自校正调节器	117
练习	118
第 7 章 自适应观测器	120
7.1 参数模型和持续激励	120
7.1.1 参数化模型	120
7.1.2 持续激励信号	123
7.2 指数型状态观测器	126
7.2.1 指数收敛状态观测器的构造	126
7.2.2 收敛性的证明	127
7.3 非线性系统自适应状态观测器	133
7.3.1 问题的描述	133
7.3.2 滤波器和反馈正实性	134
7.3.3 自适应状态观测器	136
练习	140
第 8 章 非线性系统自适应跟踪控制	142
8.1 状态反馈的自适应跟踪控制	142
8.1.1 问题的描述	142
8.1.2 控制器设计	143

8.1.3	稳定性讨论	146
8.2	输出反馈的自适应跟踪控制	148
8.2.1	问题的描述	148
8.2.2	动态输出补偿	149
8.2.3	相对阶为 1 的情形	149
8.2.4	相对阶为 ρ 的情形	151
8.2.5	相对阶为 ρ 时的稳定性讨论	153
8.3	参数不确定系统的自适应控制	156
8.3.1	问题的描述	157
8.3.2	控制器构造	157
8.3.3	稳定性证明	159
练习	.....	162
第 9 章	鲁棒自适应控制	164
9.1	一个例子	164
9.2	模型参考鲁棒自适应控制	167
9.2.1	不确定性的分类	167
9.2.2	鲁棒性问题的描述	168
9.2.3	误差模型	169
9.2.4	鲁棒自适应律	170
9.3	鲁棒自适应控制的稳定性分析	171
9.3.1	$W(s)$ 严格正实时的稳定性分析	172
9.3.2	$W(s)$ 非严格正实时的稳定性分析	176
9.4	基于人工神经网络的自适应控制	180
9.4.1	问题的描述	180
9.4.2	预备知识	181
9.4.3	时变信号跟踪	181
9.4.4	应用反步法的设计	183
练习	.....	188
附录 A	概率论和随机过程基础	191
A.1	概率和随机变量	191
A.2	随机过程	194
A.3	随机序列的收敛性	195
A.4	线性离散时间系统分析	196
A.5	各态历经性	199
参考文献	.....	200
索引	.....	202

第1章 引论

本章的目的是对自适应控制作一个概括的介绍。

1.1 什么是自适应控制

所谓控制就是迫使被控对象按照控制者的意愿行事,实现控制者的愿望。自动控制就是在控制的过程中不再需要人——控制者的干预,对象在控制器的操纵下能够按照预定的规律自行地实现控制者的愿望。事先控制规律的设计和控制器制作是必须有人干预的,自动是指一旦设定了规律、造出了控制器,就不需要控制者再干预,被控对象会按照设计的规则自行运作,实现控制者的愿望。

然而,对象不是一成不变的,时间的推移、元件的老化、环境的变迁,变化是必然的。这会导致原先设计所依赖的模型变得不准确了,还会导致原先允许忽略的因素成为至关重要了。变化的对象,不变的控制规律,常人就能感觉到不合适,理论家更会嗤之违背唯物主义。变化的对象破坏了控制者的愿望,实现预定的控制目标就成为不现实了。于是一个自然而然的问题是如何对付对象的这种变化。

控制工作者对待没有实现预定目标的根本法宝是反馈。有人说过,学习控制的人可以忘记一切但不能忘记反馈。反馈不仅是一种方法,而且是一种思想,存在偏差是正常现象,但是不考虑反馈就是不正常了。反馈的基础是偏差,利用预定目标和实际目标之间的偏差来修正偏差,最好最终能消除偏差。

工程中,控制工作者有两种措施对待这种变化。一种“以不变应万变”,控制理论中称为“鲁棒控制”,“鲁棒”两个字主要来自英文 robust 的音译,两个字拆单看也正好都有强壮的意思。鲁棒控制的精髓是:控制者制定的控制律足以抵御对象的变化。尽管你变,总逃不出我的手心,对象还会达到预定的目标;或者即使有点偏差,也在允许范围之内。注意这里没有适应对象变化的反馈!可以想象,如果对象变化范围不大,鲁棒控制会奏效;如果变化很大,原有的控制律真的还有效吗?很多控制过程是不可再现的,例如“嫦娥一号”的奔月,一旦失去进入月球引力区机会,飞船就会掉入太空而不知所终。从万无一失的角度讲,这种鲁棒控制是否有点“玄”?于是鲁棒控制转而考虑“怎样的控制在对象变化时损失最小?”成为一种“最大最小”^①的博弈。这是一种折中,在很多多目标问题中,折中是必需的。

另一种是“你变我也变”,控制理论中称为“自适应控制”,其英文是 adaptive control,译成自适应控制真是天衣无缝。任何一个人都会感觉到这种“你变我也变”策略符合客观规

^① 博弈论术语:意思是最坏情况下争取最好的结果。数学用 $\max \min J(x)$ 表示, $J(x)$ 是目标函数。

律,具有可行性。然而,实现起来还真有点难。难点之一是如何辨析对象的变化?有时对象的变化是缓慢的、潜移默化的、不易觉察的,就像车轮的磨损,一旦你发现了变化,花纹可能已经磨平,那种缓慢的嬗变实在难以监测;有时对象的变化是感觉到了,但苦于没有合适的数字特征(指标)去刻画这种变化,比如发现精馏塔输出的液体浓度下降了,变化的结果是知道的,但是塔内哪些因素发生了改变?温度,催化剂,还是输入物的成分产生了变化?自动控制要在没有人的参与下由设备自动地检测、识别和记录这种变化,自然是困难的。难度之二是如何应对这种变化?面对千奇百怪的变化,预先设计好应付一切的策略,也许连“深蓝”^①都不能完成;更何况变化还分量变和质变,量变还好应付,一旦质变,景移物非如何控制得了?人类面对困难的一种有效选择是换一个视角去考虑问题,也许这样困难就容易解决了。在自适应控制中不去管具体哪些因素发生了变化,而只关注一个、最多几个性能指标,譬如精馏塔控制中,只关心输出的浓度变化,只要浓度变化控制律就开始实行;而不是去甄别温度变化或者是催化剂钝化,在这些现象证实后再实施控制。这便是目前自适应控制能做的一切。

概括地说,自适应控制是一种适应性控制策略,它是根据检测到的性能指标的变化,产生相应的反馈控制律,以消除这种变化,达到预定的控制目标。自适应控制必备的功能:能够从性能指标的变化检测到对象的变化,能够产生依赖这种变化的控制律,具有实现可变控制律的可调控制器。

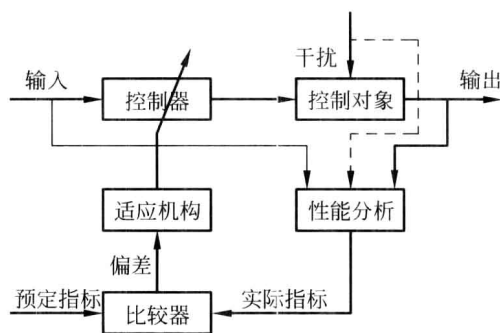


图 1.1.1 自适应控制系统

自适应控制系统的基本组成如图 1.1.1 所示。关于图 1.1.1 详细说明如下:由控制器和控制对象组成经典的控制系统结构,图中没有画出控制对象和控制器之间的精确联系,两者之间可以有各种传统的控制手段,如串联控制、反馈控制、前馈控制、局部反馈等;性能分析是根据输出、输入和可能检测到的干扰(也可能不能检测,因而用虚线表示)来计算各类性能指标,性能分析还有信息积累的功能,帮助适应机构产生控制律;比较器

产生偏差信号,启动适应机构产生自适应控制律;适应机构产生控制律,实现控制器整定。

自适应控制律分参数调节和结构调节两大类,参数调节只改变控制器的参数,例如 PID 参数整定,而结构调节会改变控制规律。很多自适应控制的经典作家认为,具有性能检测和根据性能指标偏离预定值的偏差实施反馈是自适应控制的特征。自适应控制并不直接去分辨控制对象的变化,而是去判别某个性能指标是否超出了满意的范畴。这看上去是一种妥协,实际更是一种突破,根据结果来改变策略,正符合控制论的主题。

^① Deep Blue, IBM 制造的计算机名。1997 年 5 月与俄国国际象棋世界冠军卡斯帕洛夫对垒,6 局 2 胜 3 平 1 负,深蓝胜出。深蓝在 3 分钟内能够比较 600 亿种可能的下法,而卡斯帕洛夫只能够比较 180 种,深蓝记录了世界所有著名的对局,而卡斯帕洛夫只能够记住几百局,深蓝在作这些比较后产生一种最优的决策。在战胜卡斯帕洛夫近半年后,1997 年 9 月 23 日 IBM 宣布深蓝退役。

1.2 两种主要的自适应控制技术

自适应控制的广泛应用,促使了自适应控制理论与技术的发展,至今建立了很多自适应控制律,而且不断地被创造出来。比较公认的基本类型有两种:模型参考自适应系统和自校正控制。本节分别给以简短的介绍。

1. 模型参考自适应系统

模型参考自适应系统的基本结构如图 1.2.1 所示。

模型参考自适应主路(图中粗线)由控制器和被控对象组成,与图 1.1.1 一样,尽管图 1.2.1 中的控制器和被控对象看上去只是串联关系,但是事实上可以有各种连接和补偿。与主路并联的是参考模型,参考模型是根据控制目的设计的理想系统,通常假定参考模型的输出完全达到设计目标。在控制器和被控对象都处于正常状态的时候,主路上控制器和被控对象的组合其输出也应该是理想的,这时偏差 $e=0$ 。然而当各种各样的原因使得控制器与被控对象产生了变化,偏离了原先的设计,造成 $e \neq 0$,偏差信号输入

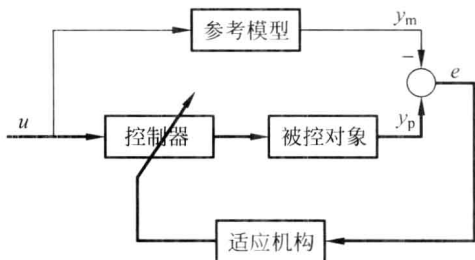


图 1.2.1 模型参考自适应系统

适应机构,适应机构按照预先制定的规则产生调节方案,改变控制器的参数或者结构,使得主路上的组合与参考模型趋于一致,输出 y_p 逼近对象输出 y_m ,也即 $e \rightarrow 0$ 。

从图 1.2.1 可以看出,参考模型是作为样板的,一旦主路组合偏离原先的状态,就用它来产生偏差,构成反馈。参考模型产生的是信号,在当前技术条件下主要是数字信号,而不是具体的物理量。在具体的设计过程中,一般是先设计参考模型然后设计控制器,因而在设计参考模型之前必须对被控对象和控制目标有相当的了解,这样才能保证存在控制器使得主路上的组合与参考模型一致。

图 1.2.1 给出的模型参考自适应控制是最基本的,设计的重点在适应机构上,尽管它的结构简单,但是应用极广,研究得也最多。本书将在第 5 章作详细介绍。

2. 自校正控制器

另一类常用的自适应系统称为自校正控制器。它与模型参考的出发点不尽相同。上面指出,采用模型参考自适应控制的基础是要对控制对象有相当的了解,否则不能保证控制器的存在和驱使 $e \rightarrow 0$ 。然而事实上,控制理论中多数假设对象是个“黑箱”,采用统计方法建立的对象模型,缺乏唯一性,精度难以保证,尤其是因为系统还会遭受到各式各样的随机扰动。因此从不精确模型基础上构造参考模型困难很大。**自校正控制器**的本质是设计统计意义上的最优控制律。为了达到最优,它需要在线辨识对象的模型,估计随机干扰对输出的影响。图 1.2.2 是具有自校正控制器的控制系统结构图。

自校正控制器的运行原理是:参数辨识单元按照被控对象的输入、输出数据,不断地修正对模型的估计,多数是对模型的参数估计,将修正过的参数送至适应机构,适应机构根据

现时参数修改控制器的参数,从而达到控制器最大程度地消除干扰的影响。在自校正控制器

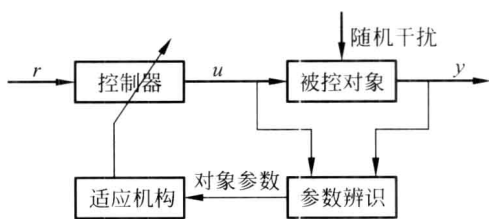


图 1.2.2 自校正控制器

器中,被控对象一般存在时间的延迟,控制量要经过几个观测周期才能对输出产生影响。控制的目标主要是使输出(注意:这是一个随机变量)是无偏的,而且具有最小方差。通常除了方差之外没有对其他性能指标的估计,因此就不检测对性能指标的偏差,也没有依赖偏差的反馈,这是因为控制器是根据对象当时的参数和性能指标设定的,已经具有最优性。自校正系统有两个显著的特

点:首先,因为控制器是按照确定系统的参数设定的,应用已知的设计方法,因而在自校正理论中多数是将已知的设计方法自适应化,使得它们能够适合参数变化;其次自校正系统总是考虑参数的自适应,不考虑结构的变化。

1.3 自适应控制研究的主要问题

由于自适应控制是针对变化提出的,因而要分析对象的不确定性,目前自适应控制的理论会涉及概率论及随机过程理论、控制系统理论。自适应控制的根本在于设计一个能够适应对象和环境变化的自适应控制律,与自适应控制律相关的理论问题有稳定性、收敛性和鲁棒性。

1. 稳定性

稳定是工程上对一个可以工作的控制系统的基本要求。本书将在第3章专门讲述稳定性问题,重点是 Lyapunov 理论,超稳定性理论。一个系统称为渐近稳定的,是指它在受到微量的冲击后,经过一段时间的运行仍然能够回到原先的工作状态。前文说到在模型参考自适应控制中,目的是使得 $e \rightarrow 0$,这就是要求 e 满足 Lyapunov 的渐近稳定性,因此稳定性是模型参考自适应控制的基础。进一步,在设计模型参考自适应控制中, Lyapunov 理论和超稳定性理论还是重要的设计工具。

2. 收敛性

在数学中稳定性就是一种收敛性, $e \rightarrow 0$ 就是收敛问题。在自适应控制理论中,收敛性更多的是讲算法的收敛性。在适应机构提出修正控制器的时候,或者在自校正的参数辨识过程中,都会出现递推算法,根据上一步的结果来计算这一步的控制律。设计过程要完成,这种递推的算法必须在有限步后结束。如果算法是收敛的,那么要计算的参数会收敛到一个确定值。从数学定义看,收敛会是一个无限的过程,实际中,可以指定一个递进误差,当对一个参数,两步计算所得之差小于这个误差的时候就认为已经收敛到极限值,停止计算,使得适应机构在有限时间内作出更改参数的决策。

3. 鲁棒性

1.1 节曾提到鲁棒控制和自适应控制是控制界对待不确定性的两大方法。然而随着研

究的深入,人们发现这两种方法是可以融合的,于是产生了鲁棒自适应控制。顾名思义,鲁棒性就是自适应控制律具有鲁棒性。如果对象或者环境的细小变化就引起自适应控制的行动,很多时候是没有必要的,而且过于频繁的启动—停止会极大地缩短设备的寿命,甚至会导致系统不稳定。因此希望适应机构对控制器所做的每一次改变都有一定的适用范围,环境和对象在这个范围内变化不需要再次启动适应机构。当前鲁棒自适应控制研究的重点:一个是鲁棒域估计,即估计能够达到预定设计目的的对象参数变动范围或外部扰动的强度范围;另一个是具有较强鲁棒性的自适应控制律的特征。

1.4 自适应控制系统的历史

这里给出在自适应控制发展中一些值得—提的事件,作为基础性教材,主要集中在它们的形成阶段,近年的发展读者可以参阅当前的学术刊物。下面分别对模型参考自适应和自校正两个方面作介绍。

1. 模型参考自适应控制

1958年,美国麻省理工学院(MIT)的Whitaker等人在飞机控制系统设计中提出了模型参考自适应方法^[37]。他们首次提出了建立参考模型,并利用误差最小为指标进行设计。由于Whitaker等是美国麻省理工学院的教师,因而人称MIT方法。MIT方法是基于传递函数的,讨论的是单变量系统,主要手段是局部参数优化,这种方法无法保证系统的稳定性。MIT方法问世以后,在控制界还是引起不少人的关注。在以后的将近7年内这种方法得到一些局部的改善,但没有突破性的进展。

为了解决稳定性问题,1965年前后,Shackcloth和Butchar、Parks等人独立地引进Lyapunov方法进行模型参考自适应控制律的设计^[29,34],按照他们的方法可以保证系统的稳定性。20世纪70年代前后Landau应用Popov超稳定性理论进行自适应控制系统设计^[21],将Lyapunov方法推广到具有非线性元件的自适应系统。现在已经有人证明,Lyapunov方法和Popov方法本质是一样的^[25]。

这两种方法在应用上都有局限,它们在反馈中都要用到偏差的导数(因此要对输出或状态进行微分),这给应用带来不便。1974年Monopoli提出广义误差信号法^[23],应用这种方法只要采用对象的输入和输出就可以完成设计,避免了微分运算。很多作者认为Monopoli的工作具有里程碑性的意义,他使得模型参考自适应方法变得实用,去掉了求微分运算增加了稳定性,更适合工程应用。此后的一些作者沿着Monopoli方法建立了全局稳定的模型参考自适应设计。

一般认为到了Monopoli工作完成以后模型参考自适应控制的奠基性工作已经完成。Landau^[20],Narendra和Peterson^[26]分别给出很好的综述介绍这个时期的已有成果。以后的发展都是在1974年的基础上向各个方向推进。特别需要提及的是Narendra等人的工作,他们关于误差模型的构造和收敛性的证明对自适应控制理论和设计的发展有着十分重要的推动作用^[24,27]。

2. 自校正控制器

自校正控制的思想可以追溯到Kalman。1958年Kalman在讨论CARMA(controlled

autoregressive moving average process, 受控自回归平移平均过程)时,用最小二乘估计模型参数,然后再设计最优控制器^[16]。他称这样的系统为自最优控制系统。自校正控制一开始就是以随机模型作为研究对象的。与模型参考自适应控制的开端相比, Kalman 的自最优设计思想的提出遭受到更冷落的待遇,几乎没有引起人们的响应,这与 Kalman 当时尚未成名可能有关。

1970年, IFAC 的辨识和参数估计专题研究会在布拉格召开, 捷克学者 Peterka 发表一篇论文^[30], 该文也考虑 CARMA 过程, 也用最小二乘估计参数, 但不是估计模型的参数而直接估计由模型导出的控制器参数, 当时他讨论的是单变量离散系统。这篇文章也只是理论性的推演, 缺乏应用实例, 因此也没有引起控制界的呼应。

突破性的工作是瑞典控制理论专家 Åström 和 Wittenmark 完成的, 他们提出最小方差自校正调节器^[4], 这种调节器容易实现, 可以在工业生产中应用。他们证明了参数估计收敛时, 设计的调节器将收敛到模型已知时设计的调节器。控制理论界几乎公认 Åström 和 Wittenmark 的工作奠定了自校正的基础。

由于 Åström 和 Wittenmark 的设计方法涉及零极点相消, 因此只适合最小相位系统, 而且可能由于控制器的增益太高而不易实现。为了克服这些不足, 英国学者 Clarke 和 Gawthrop 提出广义最小方差自校正控制器^[9,10], 他们发表了多篇文章, 不断改进设计, 直至这种控制器基本全部弥补了最小方差自校正调节器的局限^[8]。

此外英国学者在零极点配置方面的自校正技术也具有很大的影响^[12,36]。自校正技术在继续发展, 但是到 20 世纪 80 年代, 奠基性工作已经完成, 目前只是在继续完善中。

第2章 线性控制系统

本章叙述线性控制系统的基本概念和性质,这是研究自适应控制系统的基础。由于我们假定读者都学过经典控制理论和现代控制理论中的线性系统理论,因此这里只做要点概括,不进行深入讨论。读者希望对本节的内容有进一步了解可以参阅文献[7,15,40,45]。

2.1 数学描述

2.1.1 线性控制系统的输入输出描述

控制系统三个最基本的组成部分是输入、输出和被控对象(简称对象),它们的关系如图 2.1.1 所示。有时也将输入称为控制,将输出称为响应。假设它们分别是 m 维和 r 维的向量,而且都是时间 t 的函数。一个系统称为连续的,如果输入 u 和输出 y 都是时间 t 的连续或者分段连续函数。一个系统称为离散的,如果输入 u 和输出 y 都是定义在时间序列上的序列。

用 \mathcal{U} 和 \mathcal{Y} 分别表示输入 u 和输出 y 组成的集合, \mathcal{U} 和 \mathcal{Y} 分别称为输入空间和输出空间。那么对象 G 就可以看成是 \mathcal{U} 到 \mathcal{Y} 的一个映射,它将每一个输入 u 映射到输出 y ,即 $y=G(u)$ 。



图 2.1.1 控制系统

1. 传递函数矩阵描述

一个控制系统称为线性系统,如果对任意的两个输入 u_1, u_2 和任意的实数 α 成立

$$\begin{aligned} G(u_1 + u_2) &= G(u_1) + G(u_2), \\ G(\alpha u_1) &= \alpha G(u_1). \end{aligned}$$

一个控制系统称为因果系统,如果 t_1 时刻的输出 $y(t_1)$ 只依赖于 t_1 和 t_1 之前的输入,即 $y(t_1) = G[u(t), t \leq t_1]$ 。工程控制系统一般都是因果的。

一个控制系统称为在 t_0 时刻是松弛的,如果在 t_0 之后系统没有输入,则它的输出恒为 0。

对于连续系统,记 $U(s)$ 和 $Y(s)$ 分别是 $u(t)$ 和 $y(t)$ 的 Laplace 变换^①,那么一个在 $t_0=0$ 时刻是松弛的因果系统的线性系统就可以描述为

$$Y(s) = G(s)U(s). \quad (2.1.1)$$

其中, $G(s)$ 是一个 $r \times m$ 的矩阵,称为传递函数矩阵。大多数时候, $G(s)$ 是一个实有理函数

^① 离散系统进行的是 z 变换。如果 $a = \{a(0), a(1), a(2), \dots, a(k), \dots\}$ 是一个实数序列,那么 a 的 z 变换是 $z(a) = A(z) = a(0) + a(1)z^{-1} + a(2)z^{-2} + \dots + a(k)z^{-k} + \dots$ 。对于离散系统, $U(z)$ 和 $Y(z)$ 分别是 $u(t)$ 和 $y(t)$ 的 z 变换,那么 $Y(z) = G(z)U(z)$, $G(z)$ 称为脉冲传递函数矩阵,通常也是有理函数矩阵。离散系统的很多性质与连续系统相似,我们不再一一说明,只在不同时才指出。