



南京航空航天大学
研究生系列精品教材

自适应控制

主 编 陈复扬
副主编 陶 钢 姜 斌



科学出版社

南京航空航天大学研究生系列精品教材

自适应控制

主 编 陈复扬

副主编 陶 钢 姜 斌

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书比较全面地阐述自适应控制的基本理论、应用及其研究进展。首先介绍 MIT 方案、基于李雅普诺夫稳定性理论设计 MRAC 系统、基于超稳定性理论设计 MRAC 系统、自校正调节器、自校正控制器、自校正调节器与自校正控制器的极点配置;其次从理论角度介绍模型参考自适应控制的研究进展;最后给出多个自适应控制技术的综合应用实例,附录给出多套历年考试试题及参考答案。

本书可作为高等院校控制科学与工程、兵器科学与技术、航空宇航科学与技术、机械工程等一级学科的研究生教材,也可供对自适应控制技术感兴趣的读者自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

自适应控制/陈复扬主编. —北京:科学出版社,2015. 11

ISBN 978-7-03-045621-2

I. ①自… II. ①陈… III. ①自适应控制 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 212704 号

责任编辑:余 江 张丽花 / 责任校对:桂伟利

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:304 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

自适应控制是在控制方式的发展过程中产生的,为了解决实际问题,控制方式从古典控制方式的开环控制发展到闭环控制,一直到从现代控制方式中的最优控制发展到容错控制、鲁棒控制、自适应控制、智能控制。

本编写团队长期从事自适应控制科学研究与教学改革工作,尤其是研究生课程教学改革,经过十多年的实施,效果明显。编写团队建设的“创建自动化专业系列课程双语教学体系,培养具有国际竞争力的创新型人才”获得了 2011 年江苏省高等教育教学成果二等奖。2009 年 6 月编写团队主编出版了本科教材《自适应控制与应用》,包括自适应控制的基础理论以及应用实例,内容深入浅出,适合本科高年级学生学习以及研究生参考,被多所高校列选为参考教材。本书是在此教材基础上进行完善的。

本书按照研究生课程教学大纲的要求编写,突出基础性、先进性、国际性、易读性,以工程应用为背景,全面阐述自适应控制基本理论、基本概念和基本方法,充分考虑教学模式的国际化,具有国外求学经历与工作经历的编写团队,积极引进国外的教学内容与教学方法,参考新加坡南洋理工大学、美国弗吉尼亚大学等国内外自适应控制理论及应用最新的发展方向,添加最新的自适应控制研究成果,编写中做到以学生为本,加强能力培养,内容叙述力求深入浅出、削枝强干、层次分明,以最基本的内容为主线,注重工程概念,便于研究生课后复习或者自学,从而培养学生的创新能力、实践能力、国际交流能力以及综合素质。

本书主编为自适应控制研究生课程负责人,长期从事“自适应控制”课程的教学工作,2013 年在新加坡南洋理工大学与 IEEE Fellow 温长云教授开展自适应控制领域的国际合作研究工作。副主编陶钢教授为中组部“千人计划”学者,美国弗吉尼亚大学电子工程系教授,自适应系统与控制实验室负责人,国际自适应控制领域的 IEEE Fellow,长期从事自适应控制理论和方法及飞行器控制应用方面的研究工作。副主编姜斌教授为教育部“长江学者”,南京航空航天大学控制理论与控制工程学科带头人,在国内外长期从事自适应控制领域相关的科研工作。

本书为南京航空航天大学研究生系列精品教材,是在南京航空航天大学研究生教育优秀工程(二期)建设项目 2013 年研究生教材出版立项项目资助下完成的。

本书由陈复扬教授主编,其中姜斌(第 1 章)、陶钢(第 6 章)、陈复扬(其余各章及内容简介、前言、附录等)。在此感谢胡寿松教授对编者多年的培养,感谢 2008 年自动控制系列课程国家优秀教学团队带头人吴庆宪教授、科学出版社编辑对本书编写工作的大力支持,特别感谢课程组的盛守照副教授、屈蕾副教授对本书编写工作的大力支持。

由于水平有限,本书难免存在不足之处,恳请广大读者不吝指正。

作者邮箱:chenfuyang@nuaa.edu.cn

网址:<http://chfy.nuaa.edu.cn/1-zshykh/zshykh.htm>

陈复扬

2015 年 6 月于南京

目 录

前言

第 1 章 自适应控制概述	1
1.1 自适应控制的产生	1
1.2 自适应控制的定义	3
1.3 自适应控制的基本原理和类型	4
1.3.1 自适应控制的基本原理	4
1.3.2 按自适应控制系统的结构形式分类	4
1.3.3 按干扰影响分类	8
1.4 自适应控制的理论问题	9
1.5 自适应控制的应用概况	10
1.6 自适应控制的国内外最新进展	12
第 2 章 用局部参数最优化理论设计模型参考自适应控制系统	18
2.1 引言	18
2.2 模型参考自适应控制系统的数学描述	18
2.2.1 用状态方程描述模型参考自适应系统	18
2.2.2 用输入/输出方程描述模型参考自适应系统	20
2.2.3 模型参考自适应系统的误差方程	21
2.3 模型参考自适应控制系统设计的假设条件	23
2.4 具有可调增益的模型参考自适应系统的设计	24
2.4.1 MIT 方案问题提出	25
2.4.2 MIT 方案自适应控制律推导	25
2.4.3 MIT 方案存在的问题	27
2.4.4 MIT 方案数字算例	27
2.4.5 MIT 方案应用实例	28
2.5 单输入/单输出自适应系统的设计	36
2.6 局部参数最优化方法设计模型参考自适应系统注意事项	39
第 3 章 用李雅普诺夫稳定性理论设计模型参考自适应系统	41
3.1 李雅普诺夫稳定性的概念及基本定理	41
3.1.1 平衡状态	41
3.1.2 李雅普诺夫意义下稳定性定义	42
3.1.3 李雅普诺夫意义下稳定性定理	43
3.1.4 李雅普诺夫第二法的应用	44

3.2	用可调系统的状态变量构成自适应规律的设计方法	45
3.2.1	自适应控制律推导	45
3.2.2	数字算例	47
3.3	用被控对象的输入/输出构成自适应规律的设计方法	48
3.3.1	具有可调增益的自适应系统的设计	48
3.3.2	单输入/单输出自适应控制系统的设计	52
3.3.3	数字算例	53
3.4	基于李雅普诺夫稳定性理论设计自适应控制律应用实例	56
3.4.1	汽车减振系统自适应控制律设计	56
3.4.2	弹性结构振动抑制的自适应控制律设计	58
3.4.3	飞机起落架系统自适应控制律设计	62
第4章	用超稳定性理论设计模型参考自适应系统	66
4.1	超稳定性理论的概念及基本定理	66
4.1.1	绝对稳定性问题	66
4.1.2	超稳定性问题	67
4.1.3	正实性问题	68
4.1.4	正实性与超稳定性等价定理	75
4.2	用超稳定性理论设计模型参考自适应系统	76
4.2.1	用状态变量设计模型参考自适应系统	76
4.2.2	用输入/输出测量值设计模型参考自适应系统	81
4.3	基于超稳定性理论设计自适应控制律应用实例	85
4.3.1	室内温度控制系统自适应控制律设计	85
4.3.2	直接转矩控制系统自适应控制辨识转速	87
4.3.3	自动导向车系统自适应控制律设计	90
第5章	自校正控制	94
5.1	自校正控制基本概念	94
5.2	系统辨识	96
5.2.1	参数估计方法	96
5.2.2	闭环系统的辨识	107
5.3	单输入/单输出最小方差自校正调节器	114
5.3.1	预测模型	115
5.3.2	最小方差控制	116
5.3.3	具有参考输入增量最小方差控制	118
5.4	单输入/单输出自校正控制器	118
5.4.1	加权最小方差控制	119
5.4.2	自校正控制系统的闭环稳定性质	122
5.5	极点配置自校正控制技术	122

5.5.1	参数已知时的极点配置调节器	123
5.5.2	加权最小方差自校正控制器的极点配置	124
第 6 章	模型参考自适应控制研究进展	127
6.1	状态反馈状态跟踪的 MRAC	127
6.2	状态反馈输出跟踪的 MRAC	130
6.2.1	连续自适应控制系统设计	130
6.2.2	离散时间系统设计	134
6.3	输出反馈输出跟踪的 MRAC	138
6.4	相对阶为 1 的系统设计	142
6.4.1	输出反馈控制设计	142
6.4.2	状态反馈控制设计	143
6.5	间接自适应控制设计	143
6.5.1	间接自适应的状态反馈状态跟踪控制设计	143
6.5.2	间接自适应的输出反馈输出跟踪控制设计	145
6.6	典型设计实例	149
6.6.1	标准型系统的状态跟踪控制匹配	149
6.6.2	非标准型系统的输出跟踪设计	149
6.7	结论及练习题	152
6.7.1	结论	152
6.7.2	练习题	153
第 7 章	自适应控制技术综合应用实例	155
7.1	基于非规范化自适应律的民航机直接自适应控制	155
7.2	基于自适应控制与量子调控的小直升机直接自修复控制	157
7.2.1	量子调控模块与直接自修复控制	157
7.2.2	基于量子调控的自适应控制律设计与仿真	158
7.3	基于干扰观测器与 LDU 分解的直升机自适应控制	160
7.3.1	干扰观测器设计	161
7.3.2	自适应控制器设计	161
7.3.3	基于干扰观测器与 LDU 分解的自适应控制器仿真	164
7.4	基于量子调控的四悬翼直升机的自适应补偿控制	165
7.4.1	四旋翼直升机的模型介绍	165
7.4.2	四旋翼直升机的干扰观测器设计	167
7.4.3	四旋翼直升机的自修复控制律设计	168
7.4.4	四悬翼直升机自适应补偿控制的半物理仿真验证	171
附录	历年试题集锦	175
	试题 1	175
	试题 2	176

试题 3	177
试题 4	179
试题 5	180
试题 6	183
试题 7	185
试题 8	186
历年试题部分参考答案	188
参考文献	191

第 1 章 自适应控制概述

1.1 自适应控制的产生

自适应控制是在控制方式的发展过程中产生的,为了解决实际问题,控制方式从古典控制方式中的开环控制发展到闭环控制,一直到从现代控制方式中的最优控制发展到容错控制、鲁棒控制、自适应控制、智能控制。自适应控制在各种控制方式发展中的地位逻辑关系示意图如图 1.1 所示。

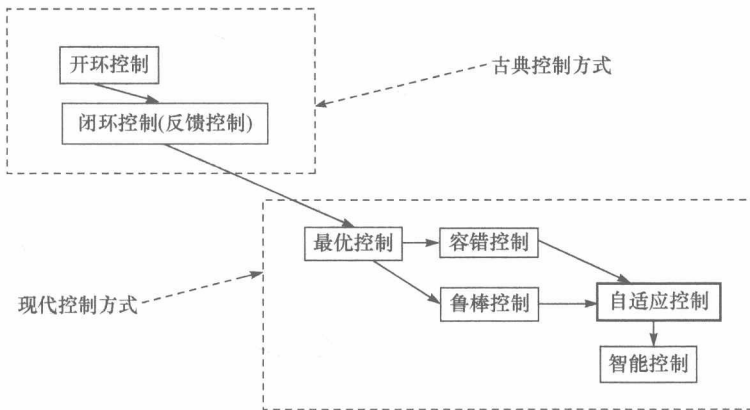


图 1.1 自适应控制与其他控制方式的逻辑关系

控制系统的输入量与输出量之间的关系能明确地知道,而且系统内部不存在扰动,外部扰动对系统没有产生不良影响或影响很小的情况下,可以采用开环控制方式,开环控制系统结构如图 1.2 所示。

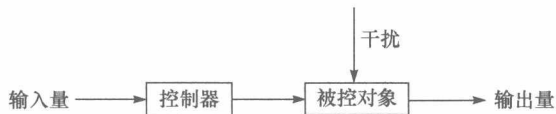


图 1.2 开环控制系统

若控制系统的输入量与输出量之间的关系能明确地知道,而且系统内部不存在扰动,外部扰动对系统产生了不良影响,但影响不是很大,则可以采用按干扰补偿的开环控制方式,按干扰补偿的开环控制系统结构如图 1.3 所示。

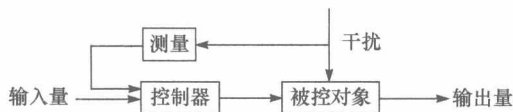


图 1.3 按干扰补偿的开环控制系统

控制系统在运行过程中可能会受到事先无法预计的扰动,控制系统本身的某些参数也可能会有变动,此时常常采用闭环控制系统。通过反馈使控制系统的输出对外部扰动和内部参数的变动都不很敏感,从而使控制系统达到预期的控制性能,闭环控制系统结构如图 1.4 所示。

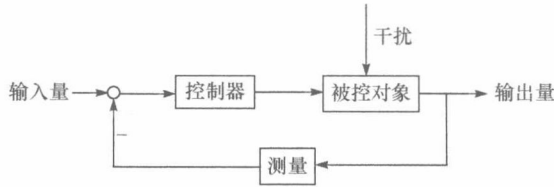


图 1.4 闭环控制系统

随着现代控制理论的迅速发展和计算机技术的进步,为了适应复杂控制系统的高质量控制要求,便出现了最优控制的技术措施。在最优控制中,在一定的限制条件下选择控制向量,使预先规定的性能指标达到极值(极大值或极小值),从而使系统性能达到或接近最优。

反馈控制和最优控制都属于常规控制,常规控制的设计都要求事先掌握被控对象或被控过程的数学模型。然而这些数学模型是很难事先确知的,或者由于种种原因,一些控制系统的数学模型会在运行过程中发生较大范围的变化,在这些情况下,常规控制就往往达不到预定的控制要求。

因此,学术界出现了很多研究改进问题的控制方式,如容错控制、鲁棒控制、自适应控制、智能控制。

要成功设计一个性能良好的控制系统,不论是通常的反馈控制系统还是最优控制系统,都要掌握被控对象的数学模型。然而,绝大多数被控对象的数学模型事先难以确知,或者它们的数学模型是变化的,对于这类对象的不确定因素,常规控制往往难以克服。

引起被控对象不确定的主要因素如下。

(1) 系统内部机理过于复杂,很难利用现有的知识和方法确定它们的动态过程和有关参数,如化工过程的反应炉等。

(2) 系统所处环境变化引起的被控对象参数的变化。例如,飞行器随着飞行高度、飞行速度和大气条件的变化,动力学参数将发生变化;化学反应的过程参数随着温度等因素的变化而变化;电子元器件参数随着温度和湿度等因素而变化。

(3) 系统本身的变化引起被控对象参数的变化。例如,飞行器飞行过程中,重量和质心随着燃料的消耗而改变;化学反应过程中,当原料不同时系统参数会有很大的变化;绕纸卷筒的惯性会随着纸卷的直径变化而变化;机械手的动态特性随机械手的伸屈在很大范围内变化。

反馈控制、扰动补偿控制、最优控制以及预编程序控制等,都是为了克服或降低系统受外来扰动或内部参数变化而引起的控制品质恶化,但是对于被控对象具有不确定性,这些方法不能满意地解决问题。为了较好地解决这类问题,确保系统的控制品质仍能自动维持或接近某种意义下的最优运动状态,本书提出一种新的设计思想——自适应控制设计思想,这种思想可以表达如下。

在控制系统运动过程中,系统本身不断地测量被控对象的状态、性能或参数,从而“认识”或“掌握”被控对象,然后根据掌握的被控对象信息,与期望的性能相比较,进而作出决策来改变控制器的结构、参数或根据自适应规律来改变控制作用,以保证系统达到某种意义下的最优或接近最优状态。按照这样的思想所建立的控制系统称为自适应控制系统。

自适应控制大约在 20 世纪 50 年代即已开始发展,当时大都是针对具体对象的设计讨论,尚未形成理论体系,60 年代现代控制理论蓬勃发展所取得的一些成果,诸如状态空间法、稳定性理论、最优控制、随机控制、参数估计、对偶控制等,为自适应控制理论的形成和发展准备了条件。70 年代以来自适应控制理论有了显著的进展,一些学者分别在确定性和随机的、连续的、离散的系统的自适应控制理论方面作出了贡献。对于这类系统的控制方案、结构、稳定性、收敛性等方面都有一定的突破性进展,从而把自适应控制理论推向一个新的发展阶段,与此同时,开始出现较多实际应用的例子,并取得了良好的效果。目前自适应控制理论正在迅速发展,这也反映了现代控制系统向智能化、精确化方向发展这一总的趋势。

1.2 自适应控制的定义

自适应控制技术一直处在与其他技术整合与自身发展的过程之中。目前,关于自适应控制的定义有许多不同的论述,不同的学者根据自己的观点提出了各自关于自适应控制的定义,众说不一。下面是一些比较著名的关于自适应控制系统的定义。

1961 年,Truxal 提出了一个包含广泛的定义,即“任何按自适应观点设计的物理系统均为自适应控制系统”。按照这个定义,许多控制系统都可包括在自适应控制系统这一范畴内。例如,带有扰动补偿环节的反馈控制系统以及预编程序的控制系统等都可称为自适应控制系统,因为它们对可预期的扰动具有一定的适应能力。但很多人认为,上述系统并不属于自适应控制系统的范畴,因为它对系统参数的调整或附加的控制信号,都不是根据当时系统的特性、性能和参数变动的实际情况而决策的,而是事先确定的,因而并不符合测量、辨识、决策和改造的过程。

1962 年,Gibson 提出了一个比较具体的自适应控制的定义:一个自适应控制系统必须提供被控对象当前状态的连续信息,也就是要辨识对象,它必须将当前的系统性能与期望的或者最优的性能相比较,并作出使系统趋向期望或最优性能的决策,最后,它必须对控制器进行适当的修正,以驱使系统更接近期望或最优状态,这三方面的功能是自适应控制系统所必须具有的功能。

1974 年,Landau 提出了一个更加具体的定义:一个自适应系统,利用其中的可调节系统的各种输入、状态和输出来度量某个性能指标,将所测得的性能指标与规定的性能指标相比较,然后由自适应机构来修正可调节系统的参数或者产生一个辅助输入信号,以保持系统的性能指标接近规定的指标。定义中的“可调节系统”应理解为“可以用修正它本身的参数或内部结构,或修正它的输入信号来调节其性能的子系统”。

上述关于自适应控制的定义具有一些共同的特征,如系统的不确定性、信息的在线积累和过程的有效控制。考虑到这样一些共同概念,自适应控制可以简单地定义为:在系统工作

过程中,系统本身能不断地检测系统参数或运行指标,根据参数的变化或运行指标的变化改变控制参数或控制作用,使系统运行于最优或接近最优工作状态。

自适应控制是一种特殊的反馈控制,它不是一般的系统状态反馈或输出反馈,即使对于线性定常的控制对象,自适应控制亦是非线性时变反馈控制系统。这种系统中的过程状态可划分为两种类型,一类状态变化速度快,另一类状态变化速度慢,慢变化的状态可视为参数,这里包含两个时间尺度概念:适用于常规反馈控制的快时间尺度以及适用于更新调节器参数的慢时间尺度。这意味着自适应控制系统存在某种类型的闭环系统性能反馈,所以设计自适应控制比一般的反馈控制要复杂得多。

1.3 自适应控制的基本原理和类型

1.3.1 自适应控制的基本原理

尽管自适应控制系统的方案千变万化,但是它们仍有一些基本的公共点,即结构上具有一定的相似性,自适应控制系统基本原理框图如图 1.5 所示。在这个系统中,性能计算或辨识装置根据被控对象的实时检测信息对对象的参数或性能指标连续或周期性地在线辨识,然后决策机构根据所获得的信息按照一定的评价系统优劣的性能准则,决定所需的控制器参数或控制信号,最后通过修正机构实现这项控制决策,使系统趋向所期望的性能,从而确保系统对内、外环境的变化具有自动适应的能力。

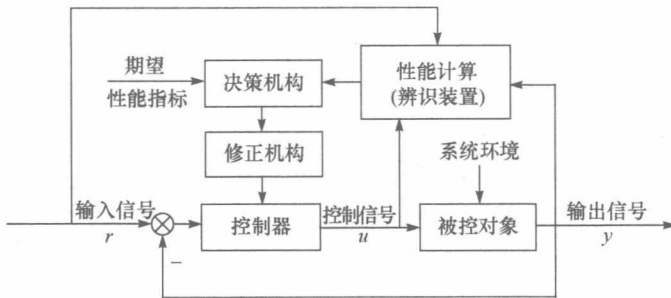


图 1.5 自适应控制系统基本原理框图

性能计算或辨识装置、决策机构和修正机构合在一起统称为自适应机构,它是自适应控制系统的核心,本质上就是一种自适应算法。

下面将结合自适应控制系统的分类形式,介绍几种主要类型的自适应控制系统的基本工作原理。

1.3.2 按自适应控制系统的结构形式分类

按照结构形式分类,自适应控制系统通常分为可变增益自适应控制系统、模型参考自适应控制系统、自校正控制系统、直接优化目标函数的自适应控制系统以及新型自适应控制系统等。部分新型自适应控制系统类型将在以后各章的仿真算例中详细介绍,本节只介绍几类常用自适应控制系统的基本原理。

1. 可变增益自适应控制系统

可变增益自适应控制系统结构如图 1.6 所示,它的结构和原理比较直观,调节器按受控过程的参数已知变化规律进行设计。当参数因工作情况和环境等变化而变化时,通过能测量到的系统的某些变量,经过计算并按规定的程序来改变调节器的增益结构。

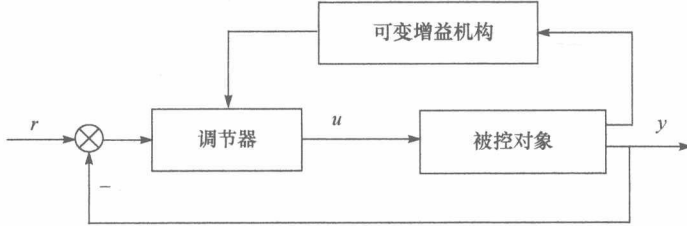


图 1.6 可变增益自适应控制系统

这种方案中系统参数的变动处于开环之中,因此,它是开环自适应控制系统,其理论和分析方法均不同于其他自适应控制系统的理论和分析方法。虽然它难以完全克服系统参数变化带来的影响而实现完善的自适应控制,但是由于它具有结构简单、响应迅速和运行可靠等优点,因而获得了较广泛的应用。另外,应该指出的是,若调节器本身对系统参数变化不灵敏(如某些非线性校正装置和变结构系统),那么这种自适应控制方案往往能够得到较满意的结果。

2. 模型参考自适应控制系统

模型参考自适应控制(Model Reference Adaptive Control)系统是由线性模型跟随系统演变而来的,线性模型跟随系统如图 1.7 所示,它由参考模型、控制器、模型跟随调节器和被控对象组成,其中参考模型代表被控对象应该具有的特性。模型跟随调节器的输入是参考模型的输出 y_m 和被控对象输出 y_p 的差值广义输出误差,它的功能就是确保被控对象输出 y_p 能够跟踪参考模型的输出 y_m ,消除广义误差 e ,从而使被控对象具有与参考模型一样的性能。

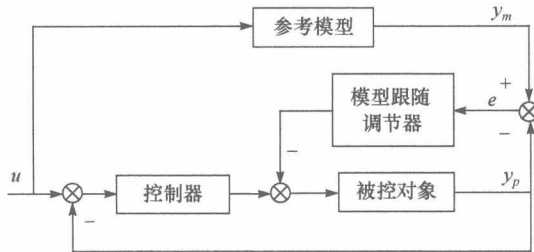


图 1.7 线性模型跟随系统

然而,设计模型跟随调节器时需要事先知道被控对象的数学模型及有关参数。如果这些参数未知或在运行过程中发生了变化,则对线性模型跟随控制系统加以改造,从而引出了模型参考自适应控制系统。

模型参考自适应控制系统的基本结构如图 1.8 所示,它由两个环路组成,内环由调节器与被控对象组成可调系统,外环由参考模型与自适应机构组成。若被控对象受干扰的影响而使运行特性偏离了最优轨线,则优化的参考模型的输出 y_m 与被控对象的输出 y_p 相比较就产生了广义误差 e ,并通过自适应机构,根据一定的自适应规律产生反馈作用,以修改调节器的参数或产生一个辅助的控制信号,促使可调系统与参考模型输出相一致,从而使广义误差 e 趋向极小值或减小至零,这就是模型参考自适应控制系统的基本工作原理,系统中的参考模型并不一定是实际的硬件,它可以是计算机中的一个数学模型。不论在理论上还是实际应用中,模型参考自适应控制系统都是一类很重要的自适应系统。

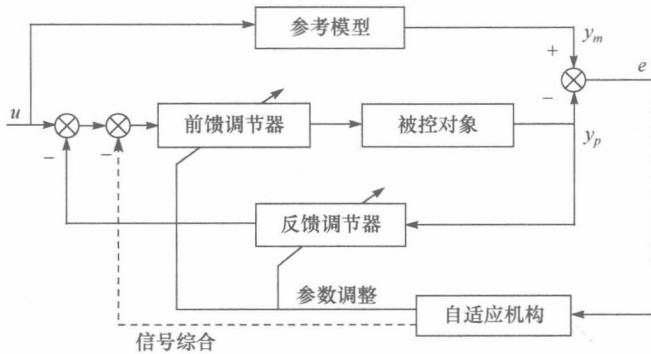


图 1.8 模型参考自适应控制系统

模型参考自适应控制的关键问题是如何选择自适应机构的自适应算法,以确保系统有足够的稳定性,同时能使广义误差得以消除。这种自适应控制系统的本质就是使受控闭环系统的特性和参考模型的特性相一致,这往往需要在受控系统的闭环回路内实现零极点的对消,因此这类系统通常只适用于逆稳定系统。逆稳定系统、非逆稳定系统的定义以及非逆稳定系统控制方式在本书第 6 章有详细论述。

模型参考自适应控制系统的结构形式除了可用来达到控制目的,还可用来作为系统参数估计或状态观测的自适应方案,如图 1.9 所示。它与控制使用时的区别仅在于需将参考模型与实际对象的位置进行交换,两者是互为对偶的形式。

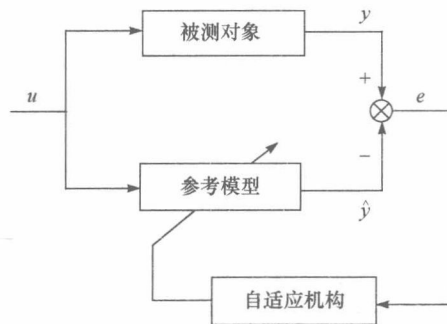


图 1.9 模型参考自适应参数估计与状态观测系统

3. 自校正控制系统

自校正控制系统又称参数自适应系统,其一般结构如图 1.10 所示,它也有两个环路,一个环路由调节器与被控对象组成,称为内环,它类似于通常的反馈控制系统;另一个环路由递推参数辨识器与调节器参数设计计算机组成,称为外环。因此,自校正控制系统是将在线参数辨识与调节器的设计有机地结合在一起,在运行过程中,首先进行被控对象的参数在线辨识,然后根据参数辨识的结果进行调节器参数的设计,并根据设计结果修改调节器参数,以有效地消除被控对象参数扰动所造成的影响。

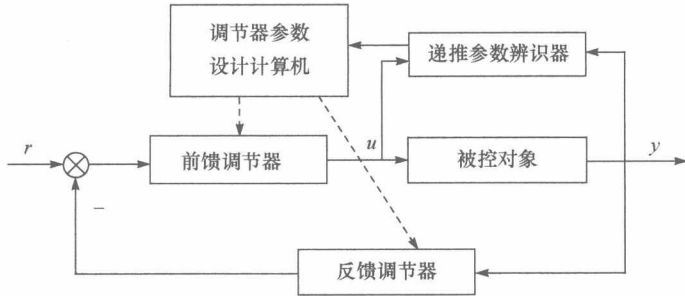


图 1.10 自校正控制系统结构

自校正控制系统通常属于随机自适应系统,它具有确定性等价性质,即当系统中所有未知参数用相应的估计值代替后,其控制规律的形式恰与对应的参数已知的随机最优控制规律的形式相同。由此可见,在寻求自校正控制规律时,即可根据给定的性能指标综合出系统的最优控制规律,然后用估计模型来估计未知参数,并用估计结果代替上述最优控制规律中相应的未知参数,就得到了自校正控制规律。显然,这里没有考虑未知参数的估计值是否等于真值,也没有考虑到它与真值的偏离程度。因此,一般来讲,这时的自校正控制规律可能不一定是渐近最优的。

在自校正控制系统中,参数辨识的方法有很多种,如随机逼近法、递推最小二乘法、辅助变量法以及极大似然法等,应用比较普遍的主要是递推最小二乘法。自校正控制规律的设计可以采用各种不同的方案,比较常用的有最小方差控制、二次型最优控制和极点配置等。

4. 直接优化目标函数的自适应控制系统

直接优化目标函数的自适应控制是一种较新颖的设计思想,虽然它和模型参考自适应控制系统、自校正控制系统有着密切的关系,但为了引起人们的重视,不妨把它单列为一种形式,这种自适应控制系统的结构如图 1.11 所示。

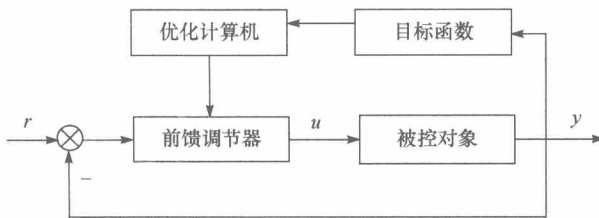


图 1.11 直接优化目标函数的自适应控制系统

Ljung 于 1981 年在国际自动控制联盟 (IFAC) 第八届国际大会上提出“基于显式判据极小化的自适应控制”的报告中所涉及的设计方案就属于这种类型。它的基本思想是选定某目标函数

$$J(\eta) = E\{g[y(t, \theta), u(t, \theta)]\} \quad (1.1)$$

式中, θ 为调节器的可调参数; $E\{\cdot\}$ 表示取数学期望。

对上述目标函数求极小值, 用随机逼近法求得自适应控制算法, 这是一种更直接的和概括性更强的新设计思想。

5. 新型自适应控制系统

由于工业生产过程的复杂性以及人类认识的片面性和局限性, 对上述各种自适应控制系统的研究还有许多工作要做, 如参数收敛性、系统鲁棒性等。与此同时, 人们也在探讨新的自适应控制系统的设计方案。

前述四种方案中都需假定被控对象数学模型的结构是不变的和已知的, 从而可调节控制器的结构也是不变的和已知的。在自适应控制过程中, 只要适当调整它的参数值就可达到自适应的目的。然而, 在新型自适应控制系统中将进一步弱化或取消这一假设。下面简单介绍两种新型自适应控制方法。

(1) 自组织自适应控制系统。系统将具有自动调整控制器结构的功能, 通过测量和判断, 系统对于不同的外部和内部情况, 可自动从规定的不同控制器结构形式中选出满足设计性能指标的结构形式的控制器并计算出相应的参数, 从而达到自适应控制的目的。

(2) 自学习自适应控制系统。这种形式可以认为是自适应控制系统的最高形式, 它是自组织自适应控制系统的进一步发展。系统利用人工智能的技术发现、鉴别并补充现有控制器形式, 它可以随时扩充系统的知识库和数据库, 具有创新和记忆功能, 可选取或创造出最好的控制器(结构形式和参数)与当前实际情况相匹配, 以达到自适应控制的目的。

1.3.3 按干扰影响分类

1. 确定性自适应控制系统

这类自适应控制系统假定被控对象不受随机干扰影响, 即在确定性环境下讨论系统的分析和设计问题。前面提及的可变增益自适应控制系统、模型参考自适应控制系统、直接优化目标函数的自适应控制系统的讨论中不计及随机干扰, 因而属于确定性自适应控制系统。

2. 随机性自适应控制系统

这类自适应控制系统考虑随机干扰对被控对象输出量的影响, 如前面所述的自校正控制系统计及随机干扰的影响, 因而属于随机性自适应控制系统。

1.4 自适应控制的理论问题

自适应控制系统是一种特定的时变非线性系统,分析这类系统是比较困难的,尤其是有随机干扰时更是如此。从自适应控制理论的发展现状来看,主要的理论问题如下。

1. 稳定性分析

自适应控制系统设计的首要问题是要保证系统全局稳定,目前许多自适应控制系统设计是以能保证整个系统全局稳定为准则的。为此,对于确定性系统的自适应控制系统设计可以利用李雅普诺夫稳定理论和波波夫的超稳定性理论等数学工具。两种方法虽然不同,但是从现有的文献来看,所得到的结果是基本相同的。新的自适应控制规律还在不断地涌现出来,但它们首先都必须保证系统的全局稳定性。要做到这一点并不容易,因为系统是本质非线性的,分析是困难的。

2. 收敛性分析

对于离散自适应控制系统,尤其是随机离散系统,一般采用递推自适应算法,这有利于实现在线计算和用微处理机实现。对于这类算法首要的问题是保证算法能收敛到预期的值。由于这种递推自适应控制系统也是本质非线性的,所以分析这种递推算法的收敛性也不是件容易的事。1977年,Ljung提出利用求平均值的方法将随机递推算法过程转化为常微分方程式,利用常微分方程来分析算法的收敛性。后来,Sternby、Gawthrop和Goodwin等都曾用Martingale收敛定理分别证明了一些自适应控制算法的收敛性。就其本质来说,Martingale收敛过程分析相当于李雅普诺夫函数在随机系统中的应用。1981年,陈翰馥将Martingale定理和微分方程两种方式结合起来,用Martingale定理证明了递推过程的一致有界性及某种程度的收敛性,然后用微分方程的方法证明了算法收敛到真值。除上述分析方法外,还有其他分析方法,不同的分析方法可能获得不同的自适应递推算法,但这些算法必须保证系统的收敛性。

3. 鲁棒性分析

目前的自适应控制系统一般都是针对被控对象结构已知而参数未知的情况进行设计的。实际上,被控对象的结构常常不能完全确知,例如,对象特性中常附有未计或难以计及的寄生高频特性。对于线性反馈系统,即使系统具有足够的稳定储备,这种附加的高频特性仍可能引起失稳,或者使系统的特性严重变坏。这就提出了自适应控制系统的鲁棒性(Robustness)问题。如何设计鲁棒性强的自适应控制系统是一个重要的理论研究课题。

4. 品质分析

如何提高自适应控制系统参数自适应的速度?如何优化自适应控制的过程?如何保证性能同时简化算法?类似课题都可归入这一类问题之中。前已说明自适应控制系统是时变非线性系统,分析这种系统的动态品质,并研究改进措施都是困难的,目前在这方面取得的成果还不多。不过首先要满足的实际要求就是自适应控制的速度要大于对象特性变化的速