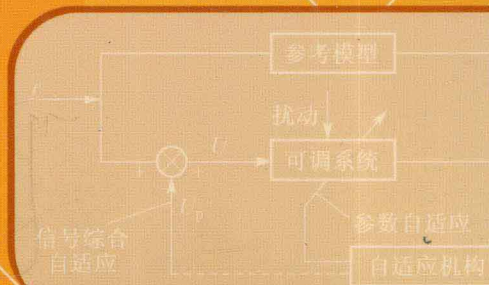




控制科学与工程研究生系列教材

自适应控制理论及应用

刘小河 管 萍 刘丽华/编著



科学出版社

内 容 简 介

本书介绍自适应控制的基本理论和方法。全书共7章,分别为绪论、自适应控制的理论基础、模型参考自适应控制系统、自校正控制系统、非线性系统的自适应控制、基于人工神经网络的自适应控制、基于模糊逻辑的自适应控制等。

本书按自适应控制理论基础、自适应控制系统设计、自适应系统的应用几个层次叙述,力图做到叙述清楚,论证严谨。内容既包含经典的线性系统的自适应控制,又包含20世纪90年代以来得到蓬勃发展的非线性系统自适应控制、智能自适应控制等,并以工程实例来说明理论方法的应用,对研究问题的提法、思路给予了足够的重视。本书注重可读性,便于读者自学。

本书可作为高等学校控制科学与工程、电气工程、电子工程等学科研究生自适应控制理论课程的教材,也可作为自动化专业本科高年级学生的教学参考书。对于高校教师和工程技术人员,本书也具有较大的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

自适应控制理论及应用/刘小河,管萍,刘丽华编著. —北京:科学出版社, 2011

(控制科学与工程研究生系列教材)

ISBN 978-7-03-029827-0

I. ①自… II. ①刘…②管…③刘… III. ①自适应控制-研究生-教材

IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 257785 号

责任编辑:巴建芬 余 江 潘继敏/责任校对:包志虹

责任印制:张克忠/封面设计:耕者设计工作室

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>

数 主 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011年1月第一次印刷 印张:14 1/4

印数:1—3 000 字数:347 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

刘小河 男,1955年10月生。1982年、1989年、2001年分别在陕西机械学院、重庆大学、西安理工大学获学士、硕士、工学博士学位。1999年晋升为教授。

现为北京信息科技大学学位委员会委员,控制科学与工程一级学科责任教授,控制理论与控制工程学科(北京市重点建设学科)学科带头人,院学术委员会主席。北京交通大学兼职教授,博士生导师。兼任教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会委员,中国自动化学会应用专业委员会委员,北京市人工智能学会理事,中国电子高学会理事。2006年入选北京市创新拔尖人才,获北京市优秀教师称号。2008年被评为北京信息科技大学首届教学名师。

长期从事自动化、电气工程领域的教学和科研工作。主持承担国家自然科学基金项目、教育部重点项目、北京市自然科学基金重点项目及面上项目、陕西省自然科学基金项目、北京市教委科技基金重点项目及面上项目等十余项。获国家级教学成果一等奖、省级教学成果一等奖各一项,省级科技进步奖及其他奖项等多项。在国内外学术期刊及学术会议发表论文80余篇,其中EI、ISTP等检索收录30余篇。出版专著3部,教学参考书1部。

主要研究方向为自适应控制与鲁棒控制、非线性系统分析与控制、非线性电路与系统。

管 萍 42岁,博士,副教授。1989年于郑州工学院工业自动化专业获得学士学位,1997年于洛阳工学院电气工程系获得硕士学位,2004年于北京理工大学自动控制系获得工学博士学位。现为北京信息科技大学自动化学院教师。主要从事智能控制理论的研究及其在工业和航空航天领域中的应用。主持过教育部科学技术研究重点项目、北京市优秀人才培养资助项目,参加过北京市教委科技发展计划重点项目、国家自然科学基金项目、北京市教委科技发展计划项目等研究工作。发表论文30余篇。

刘丽华 40岁,硕士,副教授。1992年于山东轻工业学院工业自动化专业获得学士学位,1995年于甘肃工业大学自动控制系获得硕士学位。现为北京信息科技大学自动化学院教师。曾主持过一项北京市教委基金项目,作为主要参加人先后参加过一项甘肃省自然科学基金项目、一项国家自然科学基金项目、多项北京市教委基金项目的研究工作,并参加过多项自动控制工程项目的实施工作。正式发表论文20余篇,参加编写教材1部。

前 言

近年来,自适应控制理论作为控制科学的重要学科分支,取得了长足的进展,并在工程中获得越来越广泛的应用。自适应控制的基本方法作为高级控制系统的典型控制策略之一,已经成为控制科学与工程、电气工程等学科研究生、工程技术人员从事复杂系统控制设计所需要的重要基础。许多高校为研究生或高年级本科生开设了自适应控制理论方面的课程。本书的编写目的是为控制科学与工程、电气工程等工科研究生和自动化专业本科高年级学生提供一本合适的教材,同时也为自动化工程技术人员在自适应控制领域进行研究提供一本合适的参考书。

本书介绍现代自适应控制理论的基本知识。全书分为7章。第1章为绪论,介绍了自适应控制理论的研究内容 and 应用概况。第2章为自适应控制的理论基础,简要介绍了 Lyapunov 稳定性理论、超稳定性理论、实时参数辨识、随机最优控制的基本内容,为从事自适应系统的设计工作准备必要的基础。第3章为模型参考自适应控制系统,介绍了线性系统模型参考自适应控制的基本内容,包含基于优化方法的自适应系统设计、基于 Lyapunov 稳定性理论和超稳定性理论的自适应控制系统设计、自适应模型跟随控制系统设计、离散系统的模型参考自适应控制算法设计等内容。第4章为自校正控制系统,介绍了最小方差控制、极点配置自校正控制、自校正 PID 控制等。以上各章为自适应控制的基本内容,牢固掌握相关内容对于从事自适应控制的研究将大有裨益。第5章为非线性系统的自适应控制,这是控制理论领域的研究热点之一。本章主要介绍了作者在研究中所涉及的一些自适应控制方法,并不能涵盖本领域研究的全部内容。为了帮助读者了解相关设计方法,作者给出了一些实际非线性系统自适应控制的仿真实例,为读者从事相关研究提供一些思路。第6章、第7章分别介绍了基于人工神经网络及模糊逻辑的自适应控制方法,并介绍了作者的相关研究成果及仿真结果。

本书按自适应控制理论基础、自适应控制系统设计、自适应控制的应用几个层次叙述,内容既包含经典的线性系统的自适应控制,也包含20世纪90年代以来得到蓬勃发展的非线性系统自适应控制、智能自适应控制、鲁棒自适应控制等内容。力求做到体系完整,论述严谨,分析深入,结合应用。除传统内容外,本书以较多篇幅介绍了近年来自适应控制系统理论的新进展及在工程方面的应用,在部分章节中也介绍了作者的一些相关研究成果。

教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会副主任、上海交通大学田作华教授认真审阅了本书的编写大纲和初稿,并提出了宝贵的修改意见,使本书增色许多。在此向田作华教授表示衷心的感谢!

本书所涉及的作者的研究工作得到了国家自然科学基金(50277032)、(51077004),北京市自然科学基金重点项目、北京市教委重点项目(KZ200611232020),北京市自然科学基金(4082010)等项目的资助,北京市教委重点建设学科(控制理论与控制工程)专项建设项目多年来持续提供了学科建设经费,为作者所在的学科团队建立了很好的研究平台,使得研究工作得以顺利进行。在此向国家自然科学基金委员会、北京市自然科学基金委员会、北京市教育委员会表示由衷的感谢!

在本书的立项、编写和出版过程中,得到了科学出版社的指导 and 大力支持,巴建芬副编审、余江编辑为本书的立项和出版付出了大量心血,在此表示诚挚的感谢!

本书由刘小河主编,刘小河、管萍、刘丽华共同编著。具体分工如下:刘小河教授负责起草全书编写大纲,制定编写体例要求,总体负责本书编写工作,并具体负责编写第1章、第3章、第5章及第2章2.1~2.3节;管萍副教授负责编写第6章、第7章7.1~7.4节;刘丽华副教授负责编写第4章及第2章2.4、2.5节,第7章7.5节。全书由刘小河统稿。

限于作者水平和能力,书中疏漏之处在所难免,恳请各位专家、学者、读者给予批评指正。反馈信息可通过电子邮件送达。E-mail:liuxiaohe551026@163.com。

作 者
2010年10月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 自适应控制的概念	1
1.1.1 自适应控制系统的任务	1
1.1.2 自适应控制系统的定义	2
1.2 自适应控制系统的类型	3
1.2.1 模型参考自适应控制系统	3
1.2.2 自校正控制系统	4
1.2.3 自寻优控制系统	5
1.2.4 其他自适应控制系统	5
1.3 自适应控制的理论问题	6
1.4 自适应控制的应用概况	7
参考文献	8
第 2 章 自适应控制的理论基础	9
2.1 Lyapunov 稳定性理论	9
2.1.1 稳定性定义	9
2.1.2 Lyapunov 直接法的基本定理	13
2.1.3 按首次近似决定稳定性	20
2.2 正实性和正实引理	24
2.2.1 正实函数	24
2.2.2 正实函数矩阵	25
2.2.3 连续系统和离散系统的正实引理	26
2.3 超稳定性理论	27
2.3.1 超稳定性的基本概念	27
2.3.2 超稳定性定理	28
2.4 实时参数估计	30
2.4.1 系统辨识的基本概念	30
2.4.2 被控对象的离散时间模型	32
2.4.3 参数估计的最小二乘算法	34
2.4.4 慢时变参数的递推估计	40
2.4.5 闭环系统辨识	40
2.5 随机控制基础	43
2.5.1 随机控制问题	43
2.5.2 随机控制策略	44

2.5.3 随机控制的结构特性	46
习题	47
参考文献	48
第3章 模型参考自适应控制系统	49
3.1 模型参考自适应系统的设计问题	49
3.1.1 模型参考自适应系统的结构类型和数学描述	49
3.1.2 模型参考自适应系统设计问题的提法	50
3.2 局部参数最优化设计方法	52
3.2.1 具有增益可调的 MIT 律的设计	52
3.2.2 具有多个可调参数的 MIT 律的设计	54
3.2.3 MIT 方案的稳定性	55
3.3 用 Lyapunov 稳定性理论设计模型参考自适应系统	56
3.3.1 模型参考自适应控制系统的设计	56
3.3.2 设计举例	58
3.4 基于超稳定性理论的模型参考自适应系统设计	59
3.4.1 设计的基本思路	59
3.4.2 用状态变量描述的自适应系统设计	60
3.4.3 基于输入-输出描述的自适应系统设计	63
3.5 自适应模型跟随控制系统	67
3.5.1 自适应模型跟随控制系统的基本形式	67
3.5.2 并联型自适应模型跟随控制系统的设计	68
3.6 离散时间模型参考自适应系统设计	71
3.6.1 引言	71
3.6.2 基于输入-输出描述的离散时间自适应控制系统设计	71
习题	77
参考文献	78
第4章 自校正控制系统	79
4.1 随机性和预测性自校正控制	79
4.1.1 最小方差自校正控制	79
4.1.2 广义最小方差自校正控制	86
4.1.3 多步预测自校正控制	93
4.2 极点配置自校正技术	101
4.2.1 极点配置设计原理	102
4.2.2 极点配置自校正控制	104
4.2.3 前馈补偿自校正控制器的零极点配置	112
4.3 自校正 PID 控制	116
4.3.1 PID 控制器	116
4.3.2 自校正 PID 控制器	117
习题	118
参考文献	118

第 5 章 非线性系统的自适应控制	119
5.1 单输入-单输出非线性系统的分段线性化自适应控制	119
5.1.1 基于 Lyapunov 理论的分段线性化自适应控制	119
5.1.2 基于超稳定性理论的分段线性化自适应控制	123
5.1.3 仿真实例	127
5.2 一类多输入-多输出非线性系统的自适应模型跟随控制	130
5.2.1 系统的描述	130
5.2.2 基于 Newton 迭代法的非线性系统的模型跟随控制	132
5.2.3 非线性系统的局部自适应模型跟随控制	133
5.2.4 仿真实例	135
5.3 基于反馈线性化的非线性系统模型跟踪控制	136
5.3.1 反馈线性化的基本概念	136
5.3.2 非线性系统的反馈线性化	139
5.3.3 基于反馈线性化的非线性系统渐近模型跟踪控制	146
5.3.4 仿真实例	149
5.4 基于后推法的非线性系统自适应控制	153
参考文献	158
第 6 章 基于人工神经网络的自适应控制	160
6.1 人工神经网络基础	160
6.1.1 神经元模型与网络连接	160
6.1.2 前向神经网络的模型	162
6.2 神经网络的自适应辨识	165
6.2.1 正向建模	166
6.2.2 神经网络逆模型辨识	167
6.3 神经网络模型参考自适应控制	168
6.3.1 间接神经网络模型参考自适应控制	169
6.3.2 直接神经网络模型参考自适应控制	170
6.4 神经网络自校正控制	171
6.4.1 直接神经网络自校正控制	171
6.4.2 间接神经网络自校正控制	172
6.5 其他智能自适应控制	173
6.5.1 自学习智能自适应控制	173
6.5.2 专家式智能自适应控制	174
6.5.3 分层递阶智能自适应控制	174
6.6 自适应 PID 神经网络控制系统设计与仿真	175
6.6.1 自适应 PID 神经网络	176
6.6.2 PID 神经网络控制器学习算法	176
6.6.3 PID 神经网络控制系统仿真	177
习题	179
参考文献	180

第 7 章 基于模糊逻辑的自适应控制	181
7.1 模糊控制的理论基础.....	181
7.1.1 模糊集合及其运算规则	181
7.1.2 模糊控制	186
7.1.3 基本模糊控制器的设计	189
7.2 模糊自适应控制.....	190
7.2.1 模糊推理系统	191
7.2.2 间接自适应模糊控制	191
7.2.3 直接自适应模糊控制	194
7.3 基于模糊神经网络的模型参考自适应控制.....	196
7.3.1 模糊神经网络	197
7.3.2 基于模糊神经网络的模型参考自适应控制	199
7.4 模糊滑模自适应控制.....	200
7.4.1 滑模控制的基本原理	200
7.4.2 自适应模糊滑模控制器	201
7.4.3 自适应模糊滑模控制器的设计步骤.....	202
7.5 模糊自适应控制实例.....	203
7.5.1 工业电弧炉的模糊神经自适应控制	203
7.5.2 挠性卫星的自适应模糊滑模控制	210
习题	216
参考文献	217

第 1 章 绪 论

1.1 自适应控制的概念

1.1.1 自适应控制系统的任务

在控制工程中,控制的目标是设计控制器使被控对象满足某种性能指标,或使系统运动轨迹按某种理想的轨迹运行,达到一种最优的运行状态。在线性系统理论和最优控制理论中,人们对这些问题进行了深入研究,得到了非常丰富的成果,形成了完整的理论体系。不过,这里要求被控对象的模型都是已知的,并且在多数情况下还要求被控对象具有线性时不变的特征。

在实际的控制工程中,控制对象往往存在不定性。有时人们对被控对象的数学模型了解并不完全,模型结构存在某种不定性;或者对模型结构(如模型的阶数、传递函数零极点的个数等)已经了解,但是由于环境、工况的影响,被控对象模型的参数可能在很大范围内发生变化。

下面举一些例子。

(1)飞机控制:在飞机飞行中,随飞机飞行高度、速度的变化,某些参数的变化可达 10%~50%。

(2)导弹(火箭):在导弹发射过程中,其质量、重心随燃料消耗而迅速变化。

(3)过程控制:在冶金、化工等工业过程控制中,其过程参数随工况、环境的变化而发生变化。

(4)船舶控制:在船舶航线控制中,轮船的动态参数随船载、吃水、速度、波浪等外部条件而发生变化。

由上述例子可以看出,控制对象的不定性主要可以分为以下几类:①数学模型的不定性。这是由于对象的数学模型本身是由实际对象机理的近似,或人们对受控对象机理本身的了解不完全所造成的。②参数变化的不定性。因为工作条件、工况的影响,被控对象的参数可能在较大范围内发生变化。③环境影响的不定性。环境对系统通常造成干扰,其中多数干扰是随机的。

当系统存在上述不定性时,按照确定性数学模型所设计出来的控制器就不可能得到良好的控制性能,有时甚至系统会出现不稳定现象。因此,需要一种新的控制系统,它能够自动补偿系统由于过程对象的参数、环境的不定性而造成的系统性能变化,这就是自适应控制系统。

一个自适应控制系统必须具有以下特征:

(1)过程信息的在线积累。其目的是在线进行系统参数的辨识或进行系统性能指标的度量,以了解和掌握当前系统的运行状态,减少系统的不定性。

(2)按一定的规则确定当前的控制策略,即根据对象的变化或系统性能指标的测量,掌握系统实际性能与规定性能之间的偏差信息,及时修正控制器参数或对可调系统的输入信号进行调整。

自适应控制与常规的反馈控制和最优控制一样,也是一种基于数学模型的控制方法,所不同的只是自适应控制所依据的关于模型和扰动的先验知识比较少,需要在系统的运行过程中不断提取有关信息,使模型逐步完善,基于这种模型综合出来的控制作用也将随之不断改进,使系统的性能指标越来越理想。在这个意义下,控制系统具有一定的适应能力。再如某些控制对象,其对象参数可能在运行过程中要发生较大的变化,如果采用一个恒定的控制器,系统在参数变化范围较大时就不能保证性能指标,甚至可能出现不稳定的现象。在这种情况下,需要通过在线辨识和改变控制器参数,使系统能适应环境、参数变化所带来的影响。所以对那些对象特性或扰动特性变化范围很大,同时又要求经常保持高性能指标的一类系统,采取自适应控制是合适的。应当指出,自适应控制比常规反馈控制要复杂得多,成本也高得多,因此只是在用常规反馈控制达不到所期望的性能时,才会考虑采用自适应控制。

这里需要说明自适应控制和鲁棒控制的联系与区别。自适应控制和鲁棒控制都可以处理具有不确定性系统的控制问题。自适应控制主要解决具有参数不确定系统的控制问题,鲁棒控制主要处理具有未建模动态系统的控制问题。在处理慢变参数系统方面,自适应控制系统通常具有更优越的性能,并且自适应控制仅仅需要很少的(甚至不需要)未知参数的先验信息。而鲁棒控制在处理具有扰动、未建模动态系统的控制方面,具有较强的能力,但是鲁棒控制通常需要预先知道参数界的合理估计。因此,在实际的控制中,可以将自适应控制和鲁棒控制结合起来,构成鲁棒自适应控制系统。在这种控制系统中,慢变参数的不确定性由自适应控制处理,而其他的不确定性由鲁棒方法解决。

1.1.2 自适应控制系统的定义

自适应控制系统尚没有公认的统一定义,一些学者针对比较具体的系统构成方式提出了自适应控制系统的定义。有些定义得到了自适应控制研究领域广大学者的认同。下面介绍两个影响比较广泛的定义。

定义 1-1 (Gibson,1962 年) 一个自适应控制系统应提供被控对象当前状态的连续信息,即辨识对象;将当前系统性能与期望性能或某种最优指标进行比较,在此基础上作出决策,对控制器进行实时修正,使得系统趋向期望性能或趋于最优状态。

定义 1-2 (Landau,1974 年) 一个自适应系统,应利用可调系统的各种输入-输出信息来度量某个性能指标,然后将测量得出的性能指标与期望指标进行比较,由自适应机构来修正控制器的参数或产生一个辅助信号,以使系统接近规定的性能指标并保持。

定义1-1和定义1-2实际上规定了两类最重要的自适应控制系统:自校正系统和模型参考自适应控制系统。它们的区别在于:①定义 1-1 所规定的系统需要对系统进行辨识,定义 1-2 所规定的系统不需要进行显式的辨识;②定义 1-1 要求自适应系统按照某种最优指标作出决策,定义 1-2 不要求进行显式的决策,而将其隐含在某种已知的(通过参考模型表示)性能指标之中。不过,两者基本思想是一致的。

从上述定义可以看出,一个自适应控制系统应当具有下列特征:

(1)过程信息的在线积累。信息在线积累的目的是为了降低被控对象模型参数的不定性,基本方法是采用系统辨识,在线辨识被控对象的模型参数。对于模型参考自适应控制系统来说,没有显式的系统辨识过程,但是通过比较对象输出和参考模型输出这一方式,将信息在线积累用一种隐式的方式来表示。

(2)性能指标控制决策。根据实际测量得到的系统性能与期望性能之间的偏差信息,决定控制策略,以使得系统的性能逐渐接近期望的性能指标并加以保持。

(3)可调控制器的修正。根据控制策略,在线修正可调控制器参数,或产生一个辅助的控制信号,实现自适应控制的目标。

具有上述特征的自适应控制系统的功能框图如图 1-1 所示。它由性能指标测量、比较与决策、自适应机构、可调系统等几个功能模块组成。

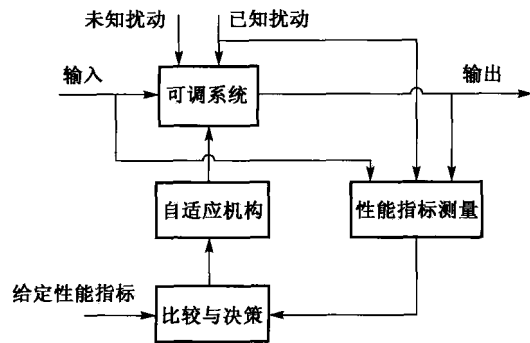


图 1-1 自适应控制系统功能框图

1.2 自适应控制系统的类型

自适应控制系统可以从不同的角度进行分类。例如,可以根据信号的数学特征分为确定性自适应控制系统和随机自适应控制系统,也可以根据功能分为参数自适应控制系统和非参数自适应控制系统。不过,人们更多的是根据自适应系统结构的特点对自适应控制系统进行分类。其中应用最为广泛的是模型参考自适应控制系统和自校正控制系统。除此之外,自寻优系统也是一类具有应用价值的自适应控制系统。近年来,具有学习功能的自适应控制系统应用日益广泛,具有较强的发展前景。

1.2.1 模型参考自适应控制系统

模型参考自适应系统(model reference adaptive system, MRAS)是一类重要的自适应控制系统。它的主要特点是自适应速度较快,实现比较容易,既可用数字方式实现,也可用模拟方式实现。模型参考自适应控制系统在许多领域中获得应用。图 1-2 是模型参考自适应控制系统的典型结构图。其中参考模型是一个辅助系统,用来规定希望的性能指标。输入信号同时作用于参考模型和可调系统,参考模型的输出就是期望的输出。可调系统的输出与参考模型输出之间的误差构成了广义误差信号,自适应机构根据广义误差及某一准则,调整控制器参数或施加一个辅助控制信号,以使广义误差的某个泛函趋于极小或使广义误差趋于零。这样,使得可调系统的特性逐步逼近参考模型的特性。

模型参考自适应控制系统的设计方法有局部参数优化方法、基于 Lyapunov 稳定性理论的设计方法和基于超稳定性理论的设计方法。

局部参数优化方法又称为 MIT 法,这种方法首先由美国麻省理工学院(MIT)的学者提出,并在飞行器控制中得到了应用。这种方法的缺点是不能保证自适应控制系统的全局渐近稳定性。

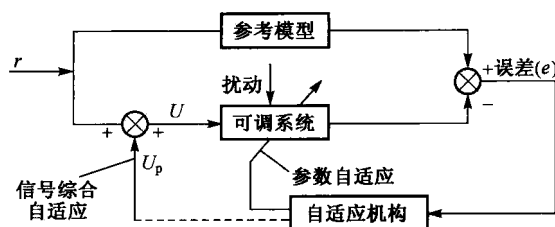


图 1-2 模型参考自适应控制系统的典型结构图

基于 Lyapunov 稳定性理论的设计方法最早由英国的 Parks 在 20 世纪 60 年代提出,后来又有一些学者对这个方法进行了一些改进。这个方法可以保证自适应控制系统的全局稳定性,但是自适应律的实现依赖于具体的 Lyapunov 函数的选择。

法国的 Landau 在 20 世纪 70 年代提出了基于 Popov 的超稳定性理论的自适应控制系统的设计方法。这种方法可以得到一族自适应控制率,具有较大的灵活性,便于工程技术人员使用。

模型参考自适应控制方法不但适用于线性系统的自适应控制,而且可在相当范围内推广到非线性系统的自适应控制中去,这使得模型参考自适应控制具有更广泛的应用价值。

1.2.2 自校正控制系统

自校正控制系统(self-tuning control system)是一大类比较重要的自适应控制系统。自校正控制一般应用于被控对象参数缓慢变化的场合,系统因此需要具有被控对象数学模型的在线辨识环节,根据辨识得到的模型参数和预先确定的性能指标,进行在线的控制器参数修正,以适应被控对象的变化。自校正控制系统的典型结构如图 1-3 所示。由图 1-3 可以看出,自校正控制系统由两个环路组成,其中内环是常规的反馈控制回路,外环为参数估计及控制器设计回路。

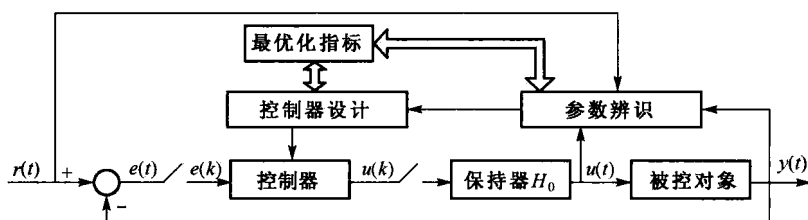


图 1-3 自校正控制系统的典型结构图

自校正控制主要采用两类控制方式。其一是基于优化性能指标来设计自校正控制系统；其二是基于常规控制策略设计自校正系统。基于优化性能指标设计的基本方法主要有最小方差控制和广义最小方差控制；基于常规性能指标设计的方法主要有极点配置、在线 PID 控制器设计等方法。无论哪一种方法,都需要在线进行参数估计。参数估计的方法主要有最小二乘法、增广最小二乘法、递推最小二乘估计等。在控制器的设计中采用确定性等价的原则,即把估计得到的系统参数当作真实参数,以此为依据来设计自校正控制器。

自校正控制具有标志性的工作是 1973 年瑞典的 Astrom 和 Wittenmark 提出的最小方差自校正控制器。针对这种控制器仅能应用于最小相位系统的弱点,英国的 Clark 和 Awthorp 于 1975 年提出了广义最小方差自校正控制方法。20 世纪 70 年代末,Astrom 等学者又提出了极点配置自校正控制的设计方法。

自校正控制的主要理论基础是随机最优控制理论和系统辨识。根据辨识方法和控制器设计方法的不同,产生了多种自校正算法,比较灵活,适用于工业过程的控制。

1.2.3 自寻优控制系统

在许多系统中,至少存在一个在性能上代表系统最优工作状态的极值点。当系统的最优点因各种原因发生漂移时,如果能够有一种方式可使系统自动调节控制器的相关参数,从而使系统的工作状态可以逼近并保持在新的最优点附近,这样的系统称为自寻优系统。显然,这是一类自适应控制系统。一些燃烧过程、最优消耗过程的控制都可以归结为自寻优系统的设计。

自寻最优系统具有两个基本功能:①实时地不断检测本身的工作状态,不断地对系统是否处于可能达到的最优状态作出判断;②根据检测和判断所得的信息迅速作出使系统趋向最优状态的调整。

实现自寻最优功能的方法主要有切换法、摄动法、自导法和模型定向法等。

切换法的实现方法是:先让输入信号以恒定速度沿着使系统性能改善的方向变化,直到系统性能不再继续改善时为止。这时系统状态可能已越过最优点,但仍处在最优点附近。然后,再让输入信号以同样的速度反向变化,重复同样的调整过程。不断重复这种调整,就可能使系统的工作状态保持在最优点附近。

摄动法是切换法的发展。其基本原理是,在系统的输入量 $u(t)$ 上附加一个周期性的探测信号(摄动量),如正弦信号 $\epsilon \sin \omega t$ 。通过对混合输入信号 $u(t) + \epsilon \sin \omega t$ 作用下系统输出信号的分析,可以得到系统输出是否向最优点运动的信息。利用这个信息不断地调整输入量即可使系统向最优点运动。

自导法不需要其他输入信号,其基本方法是将输出量对时间的一阶导数的实测值经积分作用后送入系统的输入端,以实现极值点的搜索。

模型定向法的基本思路是建立一个能描述最优运动状态的数学模型(系统的最优点可由此模型确定),再根据这个模型用一定的算法找出所需的输入。模型定向法需要较多的数值计算,用于在线控制时需要使用快速计算机。

近年来,有学者将上述方法与遗传算法等最优搜寻方法相结合,以得到一个具有最优工作点的自寻优系统。

在实际工业过程中,若采用自适应动态寻优方法,可以不需要辨识控制对象线性部分的参数,而且还能够自动适应参数的漂移,从而能有效地保证控制系统运行的连续性与稳定性。因此采用自适应动态寻优方法的极值调节控制系统将会在实际工业生产过程中发挥其强大的控制功能。

1.2.4 其他自适应控制系统

除了上述介绍的自适应控制系统外,近年来学习控制和智能控制也在自适应控制中得到了应用。

前述的自适应控制系统虽然对于参数缓慢变化的控制对象有自适应能力,但是其控制算法仍然是事先设计好的,主要是根据系统运行时的性能测量(或参数估计)按照一定算法来在线修正控制器的参数,系统还不具有学习的功能。

研究具有学习能力的控制器一直是控制理论界所关心的问题。1984年,Arimoto针对机器人系统具有重复运动性质的特点,提出了迭代学习的概念。1993年,Moore撰写了迭代学

习控制的第一本专著,1998年,他又撰写了一篇综述性论文,总结了截至1997年迭代学习控制研究的进展。迭代学习控制适用于具有重复运动的被控系统,采用“在重复中学习”的学习策略,通过记忆和修正的机制,实现在有限区间上的完全跟踪任务。目前,迭代学习控制已经在机器人运动轨迹控制、倒立摆控制、工业过程控制方面得到应用。

一个成功的迭代学习控制算法,不仅需要具有重复出现特征的控制作用于系统之后,通过迭代学习使得系统的输出与期望输出的误差变小,而且需要有较快的收敛速度以保证算法的实用性。

智能控制研究近年来进展很快,其中很重要的一个研究方向就是利用人工智能技术改善自适应控制系统的学习与适应功能。目前应用比较广泛的是模糊自适应控制系统和基于神经网络的自适应控制系统,模糊自适应控制系统和神经网络自适应控制系统可以应用于被控对象具有非线性特征的复杂对象。

模糊自适应控制系统是在基本模糊控制器的基础上,增加了性能测试、模糊规则修正、控制量校正等功能模块,从而使系统能自动对模糊控制规则进行修正,不断改善控制性能。模糊自适应控制系统既可以采用模型参考自适应控制的模式,也可以采用自校正控制的模式。

神经网络自适应控制系统是利用神经网络的学习功能和逼近非线性映射的功能,构成神经网络模型估计器和神经网络控制器,实现对复杂非线性时变控制对象的自适应控制。具体实现也可以根据要求而分别采用自校正控制的结构或模型参考自适应控制的结构。

1.3 自适应控制的理论问题

自适应控制系统是一个非线性时变系统,对于自校正控制系统来说,系统还常常兼有随机干扰或量测噪声等多种特征,内部机理十分复杂。分析这类系统需要解决很多理论上的难题,有些课题仍然处于研究阶段。目前被广泛研究的理论课题主要有稳定性、收敛性和鲁棒性等。

1. 稳定性

保证控制系统的稳定性是系统工作的前提条件,也是自适应控制系统正常工作的最重要的基本要求和前提条件。

即使对于参数缓变的线性被控对象而设计的自适应控制系统,也是一个非线性时变系统,对于非线性被控对象,其自适应控制系统更为一个复杂的非线性时变系统。要分析这种复杂非线性系统的稳定性,是一个难度较大的理论性课题。

Lyapunov 稳定性理论是分析设计模型参考自适应控制系统的基本方法,而超稳定理论针对一类非线性系统进行稳定性分析,对于设计模型参考自适应系统具有更为明确的指导作用,在应用方面更具有灵活性。不过,目前仅仅基本解决了对于线性被控对象的模型参考自适应控制系统的稳定性问题,对于随机和非线性被控对象的自适应控制问题,特别是基于模糊控制和神经网络的自适应控制问题,稳定性的分析还是一个难点。关键是如何根据所研究的问题,找到相应的自适应律,使自适应系统是稳定的。

2. 收敛性

收敛性是自适应算法的一个量度指标,一个递推的自适应控制算法被称为是收敛的,是指

这个自适应算法可以渐近地达到预定的目标,并保证系统所有变量的有界性。收敛性分析一般用于自校正控制系统参数估计和控制算法的分析。

收敛性对于自适应控制具有重要的意义,如果一个自适应算法被证明是收敛的,哪怕在推导过程中采取了某些理想的假设,也可以提高该算法在实际应用中的可信度。收敛性还可以用做比较不同的自适应算法的优劣,为改进算法指出必要的途径。

不过,自适应控制算法的收敛性分析是控制理论界公认的难题之一。已有的自适应控制系统的收敛性分析都是针对比较简单的一类系统在比较强的假设条件下得出的。对于时变被控对象,由具有遗忘因子最小二乘法构成的自校正控制的收敛性证明还是一个难题。

3. 鲁棒性

鲁棒性是指控制系统存在未建模动力特性和扰动的条件下,能够保持稳定性及系统性能指标的能力。控制系统的鲁棒性自 20 世纪 80 年代以来一直是控制理论界的研究热点之一。目前对于线性控制系统的鲁棒性研究已经有了丰富的结果,但对于非线性系统的鲁棒控制,研究成果还不够完善,还是一个具有很强挑战性的课题。

模型参考自适应控制系统一般是针对模型结构已知而参数未知的情形进行设计的,但是被控对象模型的结构往往难于确切获得,通过系统辨识而得到的对象模型常常难于包括一些高频成分,称之为未建模动态。已有典型的计算机仿真实例表明,在系统存在未建模动力学特性情况下,当指令信号过大,或含有高频成分,或自适应增益过大,或存在量测噪声时,都有可能使自适应控制系统丧失稳定性。目前已经提出一些方法,如带有死区的自适应算法或 σ 修正算法,来改进自适应控制系统的鲁棒性,但自适应控制系统鲁棒性的理论分析仍然是一个难度较大的课题。

对于非线性系统的自适应控制,其稳定性、算法收敛性、鲁棒性问题分析的难度更大,还没有得到比较一般的理论分析结果。可以这样说,自适应控制的理论分析有赖于现代控制理论的一些学科分支如非线性系统理论、稳定性与鲁棒性理论、系统辨识、智能控制理论等的研究成果,同时,自适应控制中提出的理论问题也会促进这些学科研究的深入与完善。

1.4 自适应控制的应用概况

20 世纪 70 年代以来,随着微电子技术、计算机技术的发展,廉价的微型计算机、微处理器应用越来越广泛,自适应控制开始在工程界、飞行器控制等领域得到应用,而这些应用也进一步促进了自适应控制技术的发展。

飞行器控制是首先采用自适应控制的重要领域,飞机的自动驾驶已应用了自适应控制技术,其优越的性能已被飞行试验证实。20 世纪 70 年代中后期以来,航空航天、航海、过程工业、电力、机械等部门都有成功应用自适应控制技术的实例。1982 年,第一台自适应控制器进入市场,现在已有一些商业性的自适应控制器产品。在船舶驾驶、电机驱动、工业机器人的产品中,都有相应商业化的自适应控制系统,性能越来越先进,使用也越来越方便。可以预料,随着自适应控制理论的不断深入,计算机技术、信息技术的不断发展,自适应控制技术的应用会越来越广泛。自适应控制将作为一种先进控制策略,以软硬件的形式被应用到各种高性能的设备、工业控制仪表之中。

参考文献

- [1] 李清泉. 自适应控制系统理论、设计与应用. 北京:科学出版社,1990
- [2] Åström K J, Wittenmark B. Adaptive Control. Second Edition. Beijing: Science Press and Pearson Education North Asia Limited, 2003
- [3] Willems J C. The Analysis of Feedback Systems. Cambridge:MIT Press, 1970
- [4] 方崇智,萧德云. 过程辨识. 北京:清华大学出版社,1988
- [5] 潘立登,潘仰东. 系统辨识与建模. 北京:化学工业出版社,2004
- [6] 刘兴堂. 应用自适应控制. 西安:西北工业大学出版社,2003
- [7] 朗道 I D. 自适应控制——模型参考方法. 吴百凡译. 北京:国防工业出版社,1985
- [8] 周东华. 非线性系统的自适应控制导论. 北京:清华大学出版社,施普林格出版社,2002
- [9] 韩曾晋. 自适应控制. 北京:清华大学出版社,1995
- [10] 张云生,祝晓红. 自适应控制器设计及应用. 北京:国防工业出版社,2005
- [11] 徐湘元. 自适应控制理论与应用. 北京:电子工业出版社,2007
- [12] 孙优贤,褚健等. 工业过程控制技术——方法篇. 北京:化学工业出版社,2006
- [13] 解新民,丁锋. 自适应控制系统. 北京:清华大学出版社,2002
- [14] Slotine Jean-Jacques E, Li W P. 应用非线性控制. 程代展等译. 北京:机械工业出版社,2006
- [15] 刘小河. 非线性系统分析与控制引论. 北京:清华大学出版社,2008