

自适应控制 理论与应用

Adaptive Control Theory
and Applications

徐湘元 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

TP13
496
1-

自适应控制理论与应用

Adaptive Control Theory and Applications

徐湘元 编著



電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书阐述了自适应控制的基本理论和控制算法,介绍了设计和分析自适应控制系统的方法和技巧,列举了自适应控制的应用实例。选材典型、内容成熟,叙述清晰、深入浅出,既有一定的理论深度,又具实用价值;既突出了传统的基本内容,又反映了新近的科技成果。具体内容包括:自校正控制、模型参考自适应控制、非线性自适应控制、神经网络自适应控制和模糊逻辑自适应控制。

本书可作为控制理论与控制工程、检测与自动化装置、计算机控制与应用、机械电子,以及装备与控制工程等专业的研究生教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

自适应控制理论与应用 / 徐湘元编著. —北京:电子工业出版社, 2007.1
ISBN 978-7-121-03624-8

I. 自… II. 徐… III. 自适应控制 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 149310 号

责任编辑:刘志红 康霞 特约编辑:张莉

印刷:北京天宇星印刷厂

装订:涿州市桃园装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开本: 787×1092 1/16 印张: 17.25 字数: 408 千字

印次: 2007 年 1 月第 1 次印刷

定价: 26.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系电话:(010) 68279077;邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

自适应控制是现代控制中最具活力的分支之一。经过近半个世纪的发展,它已经形成了较为明晰的理论体系和相对成熟的设计方法,并且随着计算机技术的发展,它在实践中被越来越广泛地使用。它的内容和性能已被某些新的技术(如人工神经网络、模糊逻辑)充实和提高,它的工作机制已被其他一些控制策略(如预测控制、鲁棒控制)借鉴和发展,它在高等级控制中具有一定的典型性和先进性。

本书是在天津工业大学研究生《自适应控制》课程讲义的基础上编写而成的。全书分为10章:第1章概述自适应控制的基本情况,第2章阐述实时参数估计,第3章和第4章叙述自校正控制,第5章和第6章分别介绍连续模型参考自适应控制和离散时间系统模型参考自适应控制,第7章论述非线性自适应控制,第8章讲述人工神经网络自适应控制,第9章涉及模糊逻辑的自适应控制,第10章举例说明自适应控制的应用。前5章是基本内容(约50学时),6~9章在深度和广度上有所掘进和拓展,最后一章是应用举例,这些内容可供不同读者遴选择用。

清华大学资深教授韩曾晋欣然接受了审阅本书稿的邀请,阅后又提出了宝贵的修改意见,作者在此表达诚挚的感谢。作者还要感谢本书参考文献中所列的专家和学者,他们的专著、论文为自适应控制理论和技术的发展做出了巨大的贡献,也为本书的编写打下了基础。

Toronto University 的 Kevin 为本书的编写提供了难得的信息和资料。另外,在编写过程中,作者得到了天津工业大学自动化教研室师五喜等老师的大力支持,研究生徐丰芹做了第3章直接自校正控制仿真,并校对了全部的书稿,电子工业出版社机电图书部刘志红、康霞等编辑对该书的早日出版做了大量的工作,对他(她)们的支持和帮助,作者深表谢意。

作者试图全力写好这本书,但由于学识水平所限,书中难免有不足,甚至错误,恳请有关专家和读者指正和赐教,以便未来有机会再版时改进、修正和提高。反馈信息可通过电子邮件送达, E-mail: xyxu2001@yahoo.ca。

作 者
2006 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 自适应控制的概念	(1)
1.1.1 问题的出现	(1)
1.1.2 自适应控制的定义与特征	(1)
1.2 自适应控制系统与分类	(2)
1.2.1 自适应控制系统的原理性结构与简介	(2)
1.2.2 自适应控制系统的分类	(3)
1.3 自适应控制的发展、应用与研究	(5)
本章小结	(7)
第 2 章 实时参数估计	(8)
2.1 系统辨识的概念	(8)
2.1.1 什么是系统辨识	(8)
2.1.2 系统辨识的一般步骤	(8)
2.1.3 自适应控制中系统辨识的特点	(9)
2.2 白噪声序列和离散时间系统数学模型	(9)
2.2.1 白噪声序列	(9)
2.2.2 离散时间系统数学模型	(11)
2.3 最小二乘参数估计法	(13)
2.3.1 批处理最小二乘法	(13)
2.3.2 递推最小二乘算法	(17)
2.3.3 具有遗忘因子的递推最小二乘法	(19)
2.3.4 递推增广最小二乘法	(20)
2.4 参数估计的梯度算法	(21)
2.4.1 确定性系统参数估计的梯度算法	(21)
2.4.2 随机逼近递推算法	(23)
2.5 闭环系统辨识	(27)
2.5.1 问题的出现	(27)
2.5.2 什么是闭环系统可辨识	(27)
2.5.3 闭环状态下的辨识方法和可辨识条件	(28)
本章小结	(30)
习题	(31)

第 3 章 确定性自校正控制	(33)
3.1 自校正控制系统概要	(33)
3.1.1 系统设计的任务	(34)
3.1.2 自校正控制系统设计原理	(34)
3.1.3 自校正控制的两种方法	(35)
3.2 极点配置设计与间接自校正控制方法	(35)
3.2.1 极点配置设计	(35)
3.2.2 间接自校正控制方法	(42)
3.3 基于 PID 结构的间接自校正控制	(45)
3.3.1 PID 控制器的表达形式	(45)
3.3.2 基于 PID 结构的间接自校正控制	(47)
3.4 具有前馈补偿的零极点配置间接自校正控制	(48)
3.4.1 过程参数已知时的前馈补偿零极点配置	(48)
3.4.2 间接自校正控制算法	(49)
3.5 直接自校正控制	(50)
3.5.1 最小相位系统的情况	(51)
3.5.2 非最小相位系统的情况	(56)
3.5.3 直接和间接自校正混合算法	(57)
本章小结	(57)
习题	(58)
第 4 章 随机性和预测性自校正控制	(59)
4.1 最小方差自校正控制	(59)
4.1.1 预测模型输出与最优输出预测估计	(59)
4.1.2 最小方差控制	(62)
4.1.3 最小方差自校正控制算法	(64)
4.2 广义最小方差自校正控制	(67)
4.2.1 广义最小方差控制	(67)
4.2.2 闭环系统性能讨论	(70)
4.2.3 广义最小方差自校正控制直接算法	(71)
4.3 多步预测自校正控制	(76)
4.3.1 模型与最优多步预测估计	(76)
4.3.2 Diophantine 方程的递推求解	(78)
4.3.3 多步预测自校正控制间接算法	(80)
4.4 多步预测自校正控制的仿真举例	(85)
本章小结	(89)
习题	(89)

第 5 章 模型参考自适应控制	(91)
5.1 简单自适应控制系统	(91)
5.1.1 直接自适应控制	(91)
5.1.2 间接自适应控制	(95)
5.2 用梯度法设计自适应控制系统	(96)
5.2.1 MIT 控制规律	(97)
5.2.2 MIT 的规范化算法	(99)
5.3 李雅普诺夫稳定性与正实函数	(101)
5.3.1 李雅普诺夫稳定性理论概要	(101)
5.3.2 正实函数	(106)
5.4 用稳定性方法设计自适应控制系统	(109)
5.4.1 具有可调增益的模型参考自适应控制系统	(109)
5.4.2 状态变量可测时的模型参考自适应控制系统	(112)
5.5 利用输入-输出的模型参考自适应控制系统	(117)
5.5.1 被控对象相对阶为 1 (即 $n-m=1$) 的情况	(117)
5.5.2 被控对象相对阶为 2 (即 $n-m=2$) 的情况	(123)
5.6 模型参考自适应控制与自校正控制的关系	(127)
本章小结	(128)
习题	(129)
第 6 章 离散时间系统模型参考自适应控制	(131)
6.1 简单离散时间自适应控制系统	(131)
6.1.1 直接自适应控制	(131)
6.1.2 间接自适应控制	(133)
6.2 离散时间系统自适应控制的一般系统结构	(136)
6.3 模型已知时的参考控制	(137)
6.4 自适应控制系统	(140)
6.4.1 干扰 $d(k)=0$ 时的自适应控制	(141)
6.4.2 具有 $d(k) \in L^2$ 的模型参考自适应控制系统的鲁棒性	(145)
6.4.3 对于有界干扰 $d(k)$ 的鲁棒自适应控制	(146)
本章小结	(150)
第 7 章 非线性自适应控制	(151)
7.1 非线性自适应后推控制	(151)
7.1.1 反馈线性化与自适应反馈线性化	(151)
7.1.2 后推	(155)
7.1.3 自适应后推	(157)
7.2 自适应逆控制	(160)

7.2.1	执行器非线性与参数化非线性逆	(160)
7.2.2	状态反馈逆控制	(162)
7.2.3	输出反馈逆控制	(167)
7.3	基于 Hammerstein 模型的非线性自适应控制	(172)
7.3.1	Hammerstein 模型	(172)
7.3.2	基于简便 Hammerstein 模型的非线性自适应控制	(174)
7.3.3	基于简便 Hammerstein 模型的自适应控制仿真	(176)
	本章小结	(178)
第 8 章	基于人工神经网络的自适应控制	(179)
8.1	引言	(179)
8.2	人工神经网络基本概念与技术	(180)
8.2.1	神经元模型与网络连接	(180)
8.2.2	神经网络的训练(学习)方法	(181)
8.2.3	前向神经网络模型与学习算法	(182)
8.3	基于神经网络的系统辨识	(185)
8.3.1	前向建模	(186)
8.3.2	逆模型建立	(189)
8.4	神经网络模型参考自适应控制	(190)
8.4.1	间接神经网络模型参考自适应控制	(191)
8.4.2	直接神经网络模型参考自适应控制	(193)
8.5	神经网络自校正控制	(195)
8.5.1	直接神经网络自校正控制	(195)
8.5.2	间接神经网络自校正控制	(197)
8.6	径向基函数神经网络的内模控制设计与仿真 ^[42]	(199)
8.6.1	内模控制原理与性质	(199)
8.6.2	系统设计	(200)
8.6.3	网络参量收敛于极小点的性质	(203)
8.6.4	仿真与比较	(204)
8.6.5	结论	(205)
	本章小结	(205)
第 9 章	基于模糊逻辑的自适应控制	(207)
9.1	模糊理论基本概念与模糊控制	(207)
9.1.1	模糊理论基本概念	(207)
9.1.2	模糊控制	(211)
9.2	模糊自适应控制	(216)
9.2.1	模糊自适应控制系统结构	(216)

9.2.2 模糊自适应控制器工作原理	(217)
9.3 模糊模型参考自适应控制	(220)
9.4 间接型模糊自适应控制	(223)
9.4.1 被控对象与控制要求	(224)
9.4.2 控制器与监督器	(224)
9.4.3 自适应调节规律	(227)
9.4.4 模糊控制器的设计	(228)
9.5 工业机器人的模糊自适应控制 ^[55,56]	(231)
9.5.1 系统结构	(231)
9.5.2 赋值表、控制状态表和控制查询表	(231)
9.5.3 参数自动调整与调节特性	(234)
9.5.4 系统的响应	(235)
本章小结	(237)
习题	(237)
第 10 章 自适应控制的应用	(239)
10.1 自适应控制应用概述	(239)
10.2 丙烯聚合反应过程的自校正控制 ^[57]	(239)
10.2.1 工艺流程及其特点	(239)
10.2.2 控制器设计	(241)
10.2.3 应用效果	(243)
10.3 光学跟踪望远镜的模型参考自适应控制 ^[58]	(244)
10.3.1 关于被控对象	(244)
10.3.2 控制系统结构与自适应规律设计	(244)
10.3.3 现场测试与控制效果	(247)
10.4 一个模型参考自适应控制系统的设计与仿真	(248)
10.4.1 系统设计	(249)
10.4.2 控制算法与程序编写	(250)
10.4.3 仿真结果与讨论	(252)
10.5 液位对象的自校正动态矩阵控制 ^[59]	(254)
10.5.1 液位对象与控制要求	(254)
10.5.2 动态矩阵控制机理	(255)
10.5.3 系统设计	(258)
10.5.4 检验与结论	(260)
本章小结	(262)
参考文献	(263)

第1章 绪 论

1.1 自适应控制的概念

1.1.1 问题的出现

自适应控制是现代控制中最具活力的分支之一，它是工业化大生产和科学技术发展的必然结果。

随着社会的发展与进步，人们对物质生活的要求越来越高，自动控制的应用领域日益扩大。在航天航空、能源供给、交通运输、环境保护、武器装备、过程控制、电力电子、机器制造、轻工建材等领域，生产工艺与作业程序越来越复杂，控制难度越来越大，对控制精度要求越来越高。这些问题集中表现在以下几个方面。

(1) 由于建模技术发展水平、建模方法、建模手段、项目资金等方面的限制，过程或对象与数学建模之间存在不小的差别，模型往往过于简略或粗糙，即存在未建模动态。

(2) 有各种各样的随机干扰作用在系统上，而且不可测。

(3) 由于工作环境、工作负载、工作条件的变化，引起被控过程或对象的特性发生变化，而且幅度较大，变化规律难以掌握。

(4) 复杂的物理、化学和生物反应引发的非线性、大滞后和强耦合。

所有这些方面均反映出系统的不确定性，以及控制任务的艰巨性。如果仍沿用从前对付单输入单输出线性定常系统的反馈控制，实在是力不胜任。因为在常规的反馈控制中，假定一切都是不变的：对象不变、控制器不变，系统整定后，控制性能也维持不变。现在的情况是：被控对象变了、输入变了（有了干扰），但是控制器却没变，所以我们要维持原定的控制性能已经是不可能了。

于是，有人开始设想并尝试：对于部分未建模的动态特性、变化的被控对象和干扰信号，如果能及时地测得它们的信息，并根据此信息按一定的设计方法，自动地做出控制决策、修改控制器结构和参数，使其控制信号适应对象和扰动的动态变化，在某种意义上达到控制效果最优或次优，那将是我们刻意寻求的理想控制系统。这种思想正是自适应控制产生的背景。

1.1.2 自适应控制的定义与特征

自适应控制在英语里是：Adaptive Control，其字面意思应译为适应控制，但我国科技工作者习惯称其为自适应控制。关于它的定义，控制界流传着很多的版本，目前还没有一

个权威性的说法。不过,从自适应控制的工作机理和作用来看,我们可将其表述为:通过测量输入/输出信息,实时地掌握被控对象和系统误差的动态特性,并根据其变化情况及时调节控制量,使系统的控制性能维持最优,或满足要求。

它的特征有三条:

(1) 不断量测和监督被控对象和系统的变化,实时掌握变化信息,以降低不确定性带来的风险。这是通过传感器技术和系统辨识技术来实现的。这一条是要发现问题。

(2) 及时调整控制器,使控制量的变化自动适应对象的变化或减小误差。一般这是按照某种设计准则,通过改变控制器参数来实现的。这一条是要解决问题。

(3) 维持控制性能最优或者次优。这是前两步的结果,是要达到的目的。

虽然自适应控制也是一种反馈控制,但是自适应控制所具有的上述三个特征,使得它的性能比一般反馈控制有很大的提高,甚至可以说是一种跃升。它在实践中产生的实际效果,引起了控制界理论学者和工程界技术人员的高度关注和重视。随着计算机技术的发展,以及相关产品的降价,实现自适应控制变得越来越容易,自适应控制的应用范围正在日益扩大。

1.2 自适应控制系统与分类

1.2.1 自适应控制系统的原理性结构与简介

由于自适应控制系统千差万别,形式各异,难以归纳出一般性模式。在本章,我们只能就其原理性结构和工作情况做一简单的讲述,以获得对自适应控制的初步了解。

自适应控制系统方框图如图 1-1 所示,它有两个回路:一个是带有过程和可调控制器的一般反馈回路,另一个是有自适应机构(控制参数调节)的自适应回路。自适应回路的信号变化一般慢于反馈回路的信号变化;而反馈回路的过程参数变化速度比自适应回路的控制参数调整速度慢得多。

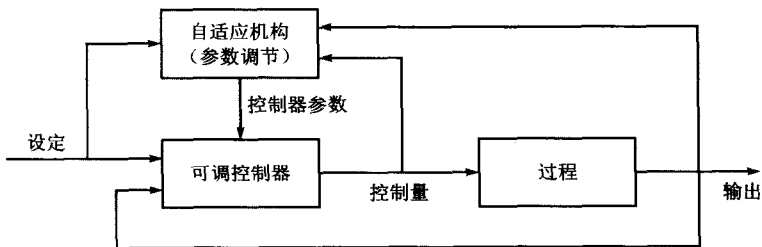


图 1-1 自适应控制系统方框图

在一般反馈控制中,如果有较小的干扰和过程参数变化,依靠自身的负反馈作用,系统一般能予以克服,但是对于较大的变化,它是无能为力的,而自适应控制系统却能做到。首先自适应机构通过输入口能检测到这种变化,然后依变化的多少修正控制器参数,并将其置入控制器,使控制器的输出产生相应变化,从而减小系统误差,或克服变化对输出的

影响, 最终维持控制性能最优或次优。

由此看来, 正是这个独特的自适应回路, 使得自适应控制具有较强的鲁棒性 (Robustness)。在后续章节里, 我们将对它进行更深入的讨论。

1.2.2 自适应控制系统的分类

为了揭示控制系统内部相互关系和特点, 以便于学习和研究, 我们打算对自适应控制系统进行分类。按不同的准则, 自适应控制系统可分为不同的类别。比如, 按被控对象的性质, 它可分为确定性自适应控制 (Deterministic Adaptive Control) 和随机性自适应控制 (Stochastic Adaptive Control); 按控制器参数获得的方法不同, 它可分为直接自适应控制 (Direct Adaptive Control) 和间接自适应控制 (Indirect Adaptive Control); 按结构它可分为前馈自适应控制 (Feedforward Adaptive Control) 和反馈自适应控制 (Feedback Adaptive Control)。

另一种被许多人所接受的分类是自适应控制分为自校正控制 (Self-tuning Control, or Self-tuning Regulators)、模型参考自适应控制 (Model Reference Adaptive Control) 和其他自适应控制 (Other Adaptive Control)。这是因为前两种自适应控制已经有比较成熟的理论体系和方法, 最后一种囊括了除前两种以外的所有自适应控制。下面对这种分类做一简单的介绍, 以建立自适应控制的初步概念。

1. 自校正控制系统

自校正控制也称做参数估计自适应控制, 它有两种形式: 一是间接自校正控制 (Indirect Self-tuning Regulators), 二是直接自校正控制 (Direct Self-tuning Regulators)。间接自校正控制系统由被控过程、过程模型参数估计器 (Estimator)、控制器参数计算器和控制器组成, 控制方框图如图 1-2 所示。

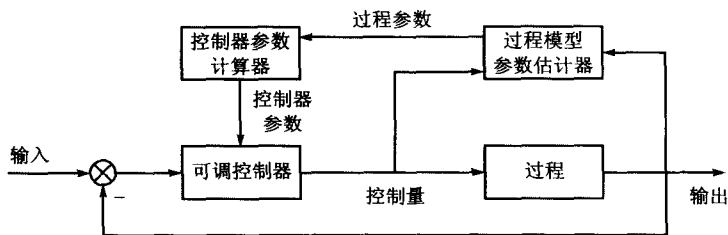


图 1-2 间接自校正控制系统控制方框图

过程模型参数估计器通过测量输入/输出信息, 估计出过程参数, 然后将其送到控制器。按照某种控制策略设计控制器, 并将控制器参数的计算和控制量的计算分开。前者为控制器参数计算器, 它是过程参数的函数; 后者叫可调控制器, 它给出具体的控制量大小。当过程参数未知或变化时, 模型参数辨识器都能给出过程参数, 并分别由控制器参数计算器和可调控制器计算出控制参数和控制量, 然后施加给过程。由于控制器是按某种策略的设计准则设计的, 所以系统能够达到并维持预期的性能指标。这样, 过程的部分未建模和参

数变化,能通过模型辨识器来估计和察觉,并通过及时调整控制量加以克服,对系统的干扰也能通过控制策略予以抵抗。

有很多种模型参数的估计方法,如最小二乘法、随机逼近法、极大似然法等。控制策略也不少,像极点配置、PID、最小方差控制等都是常用的。不同的辨识法与不同的控制策略搭配,又可组成多种形式的自校正控制系统。

至于直接自校正控制系统,它省略了控制器参数计算器,并将模型参数估计器改为控制器参数估计器,估计的结果直接送到可调整控制器,进行控制量的计算,系统控制方框图如图 1-3 所示。控制器参数计算器的省略,虽然减去了大量的计算,赢得了时间,提高了速度,但是系统的稳定性和参数的收敛性又值得我们密切关注。

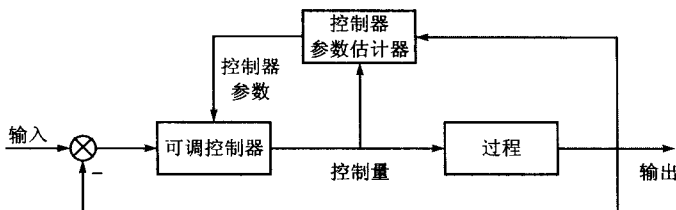


图 1-3 直接自校正控制系统方框图

2. 模型参考自适应控制系统

模型参考自适应控制系统有多种结构形式,并联式模型参考自适应控制系统方框结构图如图 1-4 所示。

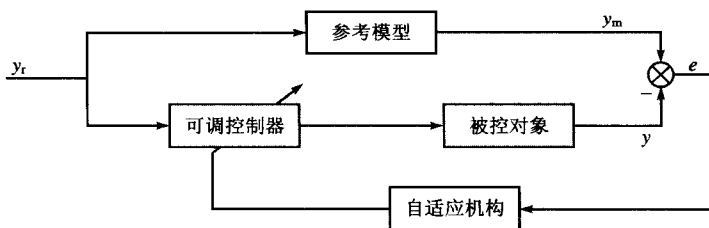


图 1-4 模型参考自适应控制系统方框图

其中, y_m 为参考模型输出,即期望输出, y 为被控对象或过程实际输出,且 $e = y_m - y$, y_r 为输入。

由于系统的不确定性,一般有 $y(t) \neq y_m(t)$,从而 $e = y_m - y \neq 0$,它驱动自适应机构作用,调节控制器参数,使 e 减小,直至为零时停止调节。此时,对象的实际输出达到期望输出。

模型参考自适应控制也分为直接自适应控制和间接自适应控制,在实际应用中,以直接自适应控制为多见。设计自适应机构调节规律的方法一般有:

(1) 局部参数最优化方法:主要有梯度法、牛顿-拉夫森法、变尺度法等。利用某优化计算方法求一组控制器参数,使性能指标最小,例如

$$J = \int e^2(t) dt$$

式中, $e(t)$ 为理想与实际输出之差。该方法的缺陷是不能保证系统总是稳定的。

(2) 基于稳定性理论的方法, 如李雅普诺夫 (Lyapunov) 稳定性理论和波波夫 (Popov) 超稳定性 (Hyperstability) 理论。该方法保证控制器参数的调节始终是稳定的, 并可加快收敛过程。

3. 其他型自适应控制系统

凡是未划入上述两种类型的自适应控制均列入此类, 如自整定 (Auto-tuning)、增益调度 (Gain Scheduling)、自激振荡系统 (Self-oscillating Systems)、双重控制 (也称对偶控制) (Dual Control)、非线性自适应控制 (Nonlinear Adaptive Control) 等。

1.3 自适应控制的发展、应用与研究

人们对自适应控制的兴趣最初起源于航天航空问题。虽然在 20 世纪 50 年代初期就有人提出了自适应控制的概念, 但是真正对自适应控制诞生有重要影响的人物是美国麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 的教授 Whitaker。1958 年, Whitaker 教授和他实验室的同事为设计一种自动适应飞机飞行控制的系统, 首先提出了这样一种控制方案: 利用参考模型期望特性与实际飞行特性之间的误差, 去调整控制器的参数, 使飞机驾驶达到理想的状态。该控制方案就是著名的 MIT 方案, 它用梯度法实现控制器参数的自适应调节规律, 是一种模型参考自适应控制系统。由于该方案并不能保证系统总是稳定的, 后来, 巴伽德 (Butchart, 1966) 和德国学者帕克斯 (Parks, 1966) 相继提出用李雅普诺夫稳定性理论、法国学者兰岛 (Landau, 1969) 提出用超稳定性理论, 设计自适应调节规律, 从而奠定了模型参考自适应控制的基本形式。1974 年, 美国学者马那坡力 (Monopoli) 提出了辅助变量的方法, 使模型参考自适应控制只需利用系统的输入/输出信息就能实现。纳仁爪 (Narendra, 1974) 等人在模型参考自适应控制系统的稳定性证明和参数估计方面取得了成绩。所有这些人的工作, 丰富和逐步完善了模型参考自适应控制理论。

1973 年, 瑞典学者阿斯爪穆 (Åström) 和威顿马克 (Wittenmark) 提出了自校正调节器。由于该算法容易在微处理器上实现, 因而受到了普遍的重视。此后, 英国的克拉克 (Clarke) 和洼氏瓦波 (Gawthrop) 提出了一种广义自校正控制器, 使得自校正控制能用于非最小相位系统。1976 年, 英国的艾敦氏 (Edmunds) 首次提出了极点配置自校正技术, 阿斯爪穆 (Astrom, 1978) 等人也对其进行了研究。而波力森 (Borissen, 1979)、柯伊沃 (Koivo, 1980)、帕节尔 (Prager, 1980) 等人将自校正控制引入到多输入/多输出系统。

在自适应控制系统的稳定性和收敛性方面, 美国的纳仁爪 (Narendra)、莫斯 (Morse) 和澳大利亚的古德文 (Goodwin) 做了许多研究。艾德伽 (Edgart, 1979, 1980) 和兰岛 (Landau, 1981) 研究了模型参考自适应控制与自校正控制之间的关系。

还有许多学者和研究人员做了很多研究和实验工作, 并取得了有意义的成果, 在此不一一列举。总的来说, 在 20 世纪 50 年代后期, 以及 60 年代前期和中期, 由于现代控制理论正处在萌芽和发展阶段, 加上实现自适应控制算法的技术手段非常有限, 致使自适应

控制系统的设计和实现十分困难,直接造成某些自适应控制系统在应用上的失败,极大地挫伤了人们研究和应用自适应控制的积极性。直到 60 年代后期和 70 年代,随着现代控制理论的成熟,微电子技术和计算机技术的发展,以及廉价微型计算机和处理器的出现,自适应控制的研究才重新热乎起来,自适应控制技术的应用也呈增多的趋势。

实践产生了理论,理论指导新的实践,新的实践又提高和完善了理论。自适应控制的发展也离不开这种理论与实践的依赖关系。自适应控制的应用是自适应控制发展的直接动力,是自适应控制理论研究的终极点。下面列举 6 个发生在 70 年代中后期的成功实例。

在 24 英寸的光学跟踪望远镜中,吉尔巴特和文思顿(Gilbart and Winston, 1974)利用模型参考自适应控制把跟踪精度提高了 6 倍;伯瑞森和西丁(Borrison and Syding, 1974)在 200kW 的矿石破碎机中采用自校正控制,把产量提高了 10%;在年产 13 万吨纸的纸机中,塞格热尔和赫魁斯特(Cegrall and Hedquist, 1975)利用类似的自适应方案改进湿度控制回路的性能,由于静态和动态性能的改善都十分显著,致使这个自适应控制系统被永久地安装在这台纸机上;杜蒙和比朗格(Dumont and Belanger, 1978)在工业二氧化钛窑上获得了类似的成果,静态性能改善了 10%,动态性能也有改进,在这个窑中实现了最成功的梯度变化;与飞机相比,在船舶中采用自适应自动驾驶仪要成功得多,卡尔斯特拉姆等(Kallstrom et al., 1979)在 35.5 万吨的油轮上采用自校正驾驶控制,使速度提高 1%;阿莫容金(Amerongen, 1980)在一艘远洋测量船上采用模型参考自适应方法,使得平均速度提高。

世界进入 20 世纪 80 年代以后,自适应控制技术的应用更加广泛。随着廉价微处理器的出现,自适应控制技术的应用急剧增长。1982 年,第一台自适应控制器进入市场,到 1986 年,生产并出售自适应控制器的厂家已有十多家。现在几种著名的产品已经经历了第二代、第三代和第四代的过程,它们的性能越来越先进,使用越来越方便。另外,自适应控制技术也被用到了一些产品之中:增益调度已成为高性能飞行器飞行控制系统的标准方法,并且它也被用到机器人和过程控制中;自激振荡自适应系统被用到几种导弹控制中。对于船舶操纵、电机驱动、工业机器人,都有相应的商业化自适应控制系统。在过程控制中,自适应技术不仅用在单回路控制器中,也用在多回路和复杂的控制系统中。

50 多年来,自适应控制理论的研究也取得了不小的成就。自校正控制系统和模型参考自适应控制系统已经形成了较为成熟的理论体系。从结构到算法,从设计到实施,形形色色的自适应控制方案层出不穷。相关的论文和报告扑面而来,让人目不暇接。总的来说,研究自适应控制算法的多,理论分析和研究的少。这主要是因为:不论是线性时不变过程,还是非线性时变过程,由于自适应机构的引入,整个自适应控制系统呈现出较强的非线性时变的特征。过程参数、控制器参数与系统性能之间的关系难以用传统的数学方式表述,要想分析它们自然十分困难。这些理论研究方面的问题主要包括系统的稳定性(Stability)、收敛性(Convergence)和鲁棒性(Robustness)。对于某些简单情况或特殊个例,虽然我们已获得了结论,但是就一般情况而言,要找到答案仍需要进一步努力。比如,对于模型参考自适应控制的稳定性问题,我们已经解决了确定性和线性时不变系统的稳定性。因为借助李雅普诺夫稳定理论和波波夫超稳定理论推导出的自适应调节规律无疑是稳定的。但是,对于随机系统和非线性系统的模型参考自适应控制系统的稳定性研究,目前还没有一

般性的结论。在自校正控制系统中,参数的收敛、系统的收敛与稳定也是十分棘手的问题。总之,自适应控制中尚未解决的理论问题还不少,需要我们继续探讨。

目前,虽然自适应控制理论不够完善,自适应控制技术也不很成熟、应用不够广泛,但自适应控制所具有的特别性能,一直是吸引人们推动它发展的动力。随着相关学科成果的问世,有关产业的繁荣和支持,自适应控制将会有更加灿烂的未来。当我们打算对自适应控制未来发展趋势予以展望时,发现这是件非常困难的事,因为它的发展太快。就目前的发展态势看,它可能在以下几个方面有进一步的发展:

(1) 自适应控制的思想将进一步与其他学科的成果相结合,形成更加先进的控制系统。传统的PID与自适应相结合,形成的PID自适应控制使控制性能大为提升,模糊逻辑和神经网络与自适应控制理念的融和,形成的模糊逻辑自适应控制和神经网络自适应控制具有人工智能。随着相关成果的问世,这方面的结合还将继续。

(2) 控制算法的发展。针对自适应控制中一些主要问题,如执行机构限幅、模型不确定、参数的估计、结构确定、适应机构的形式,以及对系统的诊断和评价等,将有新的思路 and 尝试。

(3) 理论研究将进行下去。针对一些自适应控制方案的稳定性和鲁棒性,以及算法的收敛性问题,需要给出明确的结果,研究者除了用到传统的数学物理方法外,其他的方法也将被考虑。

(4) 自适应控制技术的应用将更加广泛和深入。自适应控制作为一种高级控制策略,将以软硬件的形式被用到多种高性能的机器、设备和工业仪表之中,例如嵌入系统,现场数据总线、工业网络系统等。

本章小结

本章是全书的开篇章,主要目的是:通过对自适应控制产生背景、发展、现状和未来发展方向的介绍,以及对自适应控制定义、原理和分类的陈述,给读者一个关于自适应控制的大致轮廓,为后续内容的进一步学习奠定必要的基础。

虽然自适应控制的定义、分类还没有一个统一的说法,虽然自适应控制理论还不完善,但这并不妨碍我们对它的认识、理解、应用和研究。任一学科的发展都有一个从肤浅到深刻、从残缺到完善、从众说纷纭到一致认同的过程。这个过程是循序渐进的,需要一定的时间,自适应控制也不例外。

第2章 实时参数估计

数学模型 (Mathematic Model) 是我们进行系统分析、设计和研究的基础, 获得合适的数学模型是我们工作的第一步。

2.1 系统辨识的概念

2.1.1 什么是系统辨识

系统辨识 (System Identification) 是研究建立被控对象或过程数学模型的一种理论和方法。它是在输入和输出数据的基础上, 从一组给定的模型类别中, 确定一个与所研究系统等价的数学模型。

数学模型是指用数学形式来描述实际对象或过程行为特性和运动规律, 微分方程、差分方程、传递函数和状态方程是常用的数学形式。建立数学模型的方法主要有机理法和测试法。而机理法的应用是十分有限的, 实践中大量采用的还是测试法。系统辨识就是一种测试法。

2.1.2 系统辨识的一般步骤

通过辨识的方法来建立数学模型, 首先要明确建模的目的, 不同的建模目的, 模型的类型、精度和辨识方法都有很大的差别。其次是要获得尽可能多的先验知识, 如凭借丰富的实际经验, 了解系统的特点, 运行条件和状态, 进行预实验等。

系统辨识是一个从观测输入/输出数据到获取数学模型的过程。它的一般步骤如图 2-1 所示。

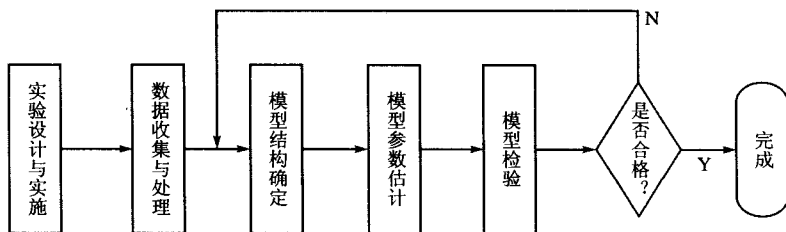


图 2-1 系统辨识一般步骤

(1) 实验设计与实施: 这是一个准备和产生数据的过程, 它包括输入信号的选择、采