



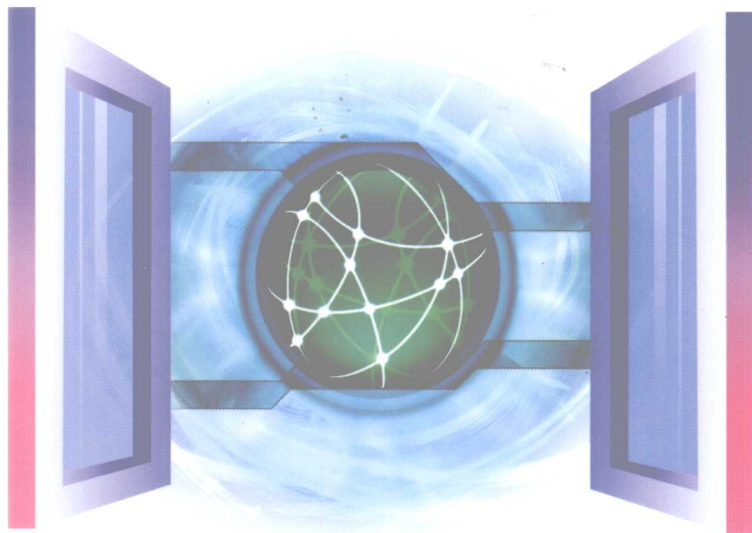
北京理工大学 **211工程**  
研究生规划教材

# 自适应控制

## Adaptive Control

© 董宁 编

控制科学与工程



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



北京理工大学 211工程  
研究生规划教材

# 自适应控制

## Adaptive Control

◎ 董 宁 编

控制科学与工程



北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书主要介绍自适应控制系统的工程控制理论、设计方法和应用实例。

全书共7章。第1章主要介绍自适应控制的作用、结构、类型和应用概况,第2章介绍一些常用的系统辨识方法,第3章介绍自校正控制系统,第4章和第5章主要介绍模型参考自适应控制系统的基本原理和设计,第6章介绍其他形式的自适应控制系统,第7章是应用举例。

本书既可作为自动化、计算机科学与技术以及相关专业高年级本科生和研究生的教材,也可供相关专业技术人员阅读。

版权专有 侵权必究

### 图书在版编目(CIP)数据

自适应控制 / 董宁编. —北京: 北京理工大学出版社, 2009. 3  
北京理工大学“211工程”研究生规划教材. 控制科学与工程  
ISBN 978-7-5640-1653-1

I. 自… II. 董… III. 自适应控制-研究生-教材 IV. TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第001873号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787毫米×960毫米 1/16

印 张 / 24.25

字 数 / 509千字

版 次 / 2009年3月第1版 2009年3月第1次印刷

印 数 / 1~4000册

定 价 / 42.00元

责任校对 / 申玉琴

责任印制 / 母长新

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

# 前 言

随着微电子技术、计算机技术的迅猛发展和广泛应用，自适应控制无论是在理论上还是在应用上都取得了很大的进展，它已成为现代控制理论中一个十分活跃的重要的学科领域。本书系统地介绍了自适应控制最基本的理论知识和设计方法，以及一些实际应用例子，旨在为读者进一步学习、深入了解自适应控制的研究成果和进行实际应用奠定基础。

本书共分为7章。第1章是概论，主要介绍自适应控制的研究对象和特点、自适应控制系统的基本结构和主要类型以及自适应控制理论和应用概况。第2章介绍一些常用的系统辨识方法，研究如何从观测到的含有噪声的系统输入、输出数据中提取对象的数学模型以及数学模型的应用场合和方式。第3章介绍自校正控制系统，包括自校正调节器、自校正控制器、极点配置自校正控制器、多变量自校正控制以及自校正PID控制器。第4章和第5章主要介绍模型参考适应控制系统的基本原理和设计。第6章简单介绍其他形式的自适应控制系统，包括模糊自适应控制系统、具有人工神经网络的自适应控制系统和自适应逆控制等。第7章是应用举例。

本书可供自动化、计算机科学与应用以及有关专业的大学本科高年级学生和研究生学习使用，也可供自动化专业及其相关专业人员阅读。

本书是编者在多年教学实践的基础上，参考当前自适应控制教材编写而成的。书末列出了部分参考书目，在此谨向参考过的列出和未列出书目的编著者致以衷心的感谢！本书在编写过程中得到了马东升教授的支持和帮助，并提出许多宝贵意见，对此编者表示衷心感谢！

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请批评指正。

编 者

# 目 录

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 概论</b> .....             | 1   |
| § 1.1 自适应控制系统的研究对象和特点 .....       | 1   |
| § 1.2 自适应控制系统的基本结构和分类 .....       | 4   |
| § 1.3 自适应控制的主要理论问题 .....          | 7   |
| § 1.4 自适应控制的应用概况 .....            | 9   |
| <b>第 2 章 实时参数估计</b> .....         | 12  |
| § 2.1 系统辨识的基本内容 .....             | 12  |
| § 2.2 随机过程概论 .....                | 17  |
| § 2.3 经典的辨识方法 .....               | 28  |
| § 2.4 控制系统的数学描述 .....             | 40  |
| § 2.5 线性参数模型最小二乘估计 .....          | 49  |
| § 2.6 线性参数模型极大似然估计 .....          | 75  |
| § 2.7 递推算法的收敛性 .....              | 82  |
| § 2.8 各种估计方法的选用和初步比较 .....        | 83  |
| § 2.9 过程模型结构辨识 .....              | 84  |
| § 2.10 闭环参数估计 .....               | 91  |
| <b>第 3 章 自校正控制系统</b> .....        | 103 |
| § 3.1 概述 .....                    | 103 |
| § 3.2 Diophantine 方程 .....        | 106 |
| § 3.3 最小方差调节器 .....               | 109 |
| § 3.4 自校正调节器 .....                | 123 |
| § 3.5 广义最小方差控制 .....              | 137 |
| § 3.6 自校正控制器 .....                | 146 |
| § 3.7 极点配置自校正调节器 .....            | 150 |
| § 3.8 极点配置自校正控制器 .....            | 162 |
| § 3.9 多变量自校正控制 .....              | 171 |
| § 3.10 自校正 PID 控制器 .....          | 184 |
| <b>第 4 章 模型参考适应控制系统设计基础</b> ..... | 199 |
| § 4.1 Lyapunov 稳定性理论 .....        | 199 |

|              |                        |            |
|--------------|------------------------|------------|
| § 4.2        | 正实引理及其应用               | 206        |
| § 4.3        | 超稳定性理论                 | 211        |
| <b>第 5 章</b> | <b>模型参考自适应控制系统</b>     | <b>216</b> |
| § 5.1        | 概述                     | 216        |
| § 5.2        | 局部参数优化设计               | 221        |
| § 5.3        | 基于 Lyapunov 稳定性理论的设计方法 | 232        |
| § 5.4        | 基于超稳定性理论的状态方程设计方法      | 265        |
| § 5.5        | 模型参考自适应系统的鲁棒性问题        | 282        |
| <b>第 6 章</b> | <b>其他形式的自适应控制系统</b>    | <b>295</b> |
| § 6.1        | 模糊自适应控制系统              | 295        |
| § 6.2        | 具有人工神经网络的自适应控制系统       | 323        |
| § 6.3        | 自适应逆控制                 | 342        |
| <b>第 7 章</b> | <b>自适应控制系统的应用</b>      | <b>349</b> |
| § 7.1        | 船舶驾驶的自适应控制             | 349        |
| § 7.2        | 温度自校正控制                | 359        |
| § 7.3        | 工业自适应控制器及其应用           | 366        |
| § 7.4        | 飞机自适应驾驶仪               | 372        |
|              | 参考文献                   | 378        |

# 第 1 章 概 论

## §1.1 自适应控制系统的研究对象和特点

### 1.1.1 自适应控制问题的提出

在控制工程中，有各种各样的被控对象，它们的结构、复杂程度和环境条件可能各不相同，但对它们施加控制的目的却是基本相同的，都是为了使它们的状态或运动轨迹符合某个预定要求，即使被控对象的运行性能满足预定的性能指标。被控对象的运行状态或运动轨迹称为被控过程，或简称为过程。显然，过程不仅与被控系统本身有关，还与对象所处的环境有关。因此，在综合控制作用时，必须把对象和它所处的环境统一地加以考虑。本书把被控对象和它所处的环境称为被控系统，由被控系统及其控制器所组成的整体称为控制系统，简称系统。过程和被控系统并没有什么本质差别，只是强调的重点不同而已。控制系统的组成如图 1-1-1 所示。

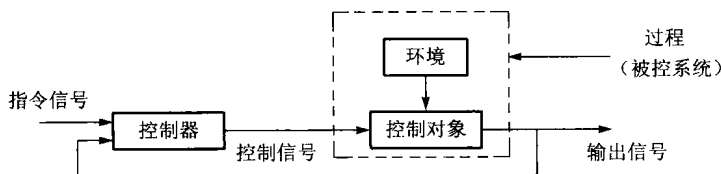


图 1-1-1 控制系统的组成

如果过程的脉冲响应函数或传递函数已知，可以用经典控制理论设计控制器，使控制系统的过渡过程指标（超调量、振荡次数、调节时间）、通频带等满足要求。如果过程的运动方程已知，可以用最优控制理论设计最优控制器，使控制系统的某项性能指标最优。然而实际上在许多工程中，被控对象或过程的数学模型事先是难以确定的，即使在某一条件下被确定了数学模型，在工况和条件改变后，其动态参数乃至模型的结构仍经常发生变化。例如飞机由于近地点和高空的空气密度不同，其动力学特性变化很大，因此，其控制特性随高度、飞行速度的不同而变化，一些参数的变化率可达 10%~50%；导弹在飞行过程中，其质量和重心位置会随着燃料的消耗而改变，这也会影响其数学模型的参数。这种变化的例子在过程控制、电力拖动、船舶控制和冶金过程等方面还有很多。

当对象的数学模型参数在小范围内变化时，可用上述方法来消除或减小参数变化对控制品质的影响。如果控制对象的参数在大范围内变化，上述方法就不能圆满地解决问题了。为了较好地解决被控对象参数在大范围显著变化时系统仍能自动地保持在接近某种意义下的最优运动状态这个问题，有人提出了一种新的设计思想——自适应控制的设计思想。

### 1.1.2 被控对象的不确定性

自适应控制的研究对象是具有一定程度不确定性的系统，这里所谓的“不确定性”是指被控系统的数学模型和系统所处的环境事先不完全知道，或者是被控对象的结构和参数随着工作情况和环境的变化而改变，且受到外界环境的干扰。

任何一个实际系统都具有不同程度的不确定性，这些不确定性有时表现在系统内部，有时表现在系统外部。系统结构、参数、模型化误差等的不确定性是系统内部表现。系统外部干扰、环境变化等的影响是系统外部表现。这种不确定性的外部表现通常是不可预知的，它们可能是常值的扰动，例如负载扰动等，也可能是随机的扰动，例如海浪、阵风等。此外，还有一些量测噪声从不同的测量反馈回路进入系统。这些随机扰动和噪声的统计特性常常是未知的，面对这些客观存在的各式各样的不确定性，如何设计适当的控制作用，使得某一指定的性能指标达到并保持最优或近似最优，这就是自适应控制所要解决的问题。

与传统的控制方法相比，自适应控制方法最显著的特点是不但能控制一个已知系统，而且还能控制一个完全未知的系统或部分未知的系统。它的控制策略、控制规律是建立在未知系统的基础上的，它不但能抑制外界干扰、环境变化、系统本身参数变化的影响，在某种程度上，还能有效地消除模型化误差等的影响。从这个意义上讲，自适应控制范围更加广泛，控制程度更加深入，更有实际应用价值。

### 1.1.3 自适应控制的定义

多年来，关于自适应控制的定义一直是一个非常有争议的问题。许多学者从各自的观点和认识出发，都力图对自适应控制给出一个适当的定义。但是到目前为止还没有一个比较公认的自适应控制的定义，通过它能将所有区别于普通反馈调节的各种形式的自适应控制系统包括在定义之中。

下面列举几个有分歧的自适应控制的流行定义，通过分析这些定义的异同点来了解自适应控制系统的基本特征。

① 1961年 J.G.Truxal 所提出的定义是：任何按自适应观点设计的系统均为自适应系统。

按照这个过于笼统的定义，它将对干扰信号进行前馈补偿的控制系统或者对随机干扰进行滤波补偿的普通反馈系统也都划入自适应控制系统的范畴，从而混淆了一般反馈控制与自适应控制的界限。因为当系统的特性、性能和参数在运行过程中产生较大变动时，一般反馈



系统并不具备控制的适应能力。

② 1962年 J.E.Gibson 提出一个比较具体的定义：一个自适应控制系统必须能提供被控对象当前状态的连续信息，也就是要辨识对象；它必须将系统当前的性能与希望的或者最优的性能进行比较，并做出使系统趋向希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便使系统趋向最优状态。这三方面的功能是自适应控制系统所必须具有的。

③ 1974年法国学者 I.D.Landau 也提出了一个针对模型参考自适应控制系统的定义：一个自适应系统，利用其中的可调系统的各种输入、状态和输出来测量某个性能指标，将所测得的性能指标与规定的性能指标进行比较，然后由自适应机构修正可调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于规定的性能指标。在这里，可调系统是持这样一种系统，它可以用修改它的参数或内部结构，或者用修改它的输入信号来调节其性能。

另外还有一些其他定义，含义大同小异，不再赘述。

#### 1.1.4 自适应控制系统的特征

由于自适应控制的对象是那些存在不确定性的系统，所以这种控制应首先能在控制系统的运行过程中，通过不断地量测系统的输入、状态、输出或性能参数，逐渐了解和掌握对象，然后根据所得的过程信息，按一定的设计方法，做出控制决策去更新控制器的结构、参数或控制作用，以便在某种意义上使控制效果达到最优或次最优，或达到某个预期目标，按此设计思想建立的控制系统便是自适应控制系统。

由此可见，一个较完善的自适应控制系统应该具有下列3个基本特征。

① 系统本身可以不断地检测和处理信息，了解系统当前状态。

在线积累过程信息是为了降低被控系统原有的不确定性。为此可用系统辨识的方法在线辨识被控系统的结构和参数，直接积累过程信息；也可通过量测能反映过程状态的某些辅助变量，间接积累过程信息。

② 调整可调控制器，使整个系统始终自动运行在最优或次最优工作状态下。

可调控制器是指它的结构、参数或信号可以根据性能指标的要求进行自动调整。这种可调性要求是由被控对象的不确定性决定的，否则就无法对过程实现有效的控制。

③ 进行性能准则优化，产生自适应控制律。

上述特征从本质上决定了自适应系统是一个非线性时变系统，因而造成了对它进行分析研究的困难和复杂性。

自适应控制是现代控制的重要组成部分，同一般反馈控制相比较它有如下突出特点：

① 一般反馈控制主要适用于确定性对象或事先确知的对象，而自适应控制主要研究不确定对象和事先难以确知的对象。

② 一般反馈控制具有强烈抗干扰能力，即它能够消除状态扰动引起的系统误差，而自适应控制因为有辨识对象和在线修改参数的能力，因而不仅能消除状态扰动引起的系统误差，

而且还能消除系统结构扰动引起的系统误差。

③ 对一般反馈控制系统进行设计前必须掌握描述系统特性的数学模型及其环境变化状况，而自适应控制系统设计则很少依赖数学模型，仅需要较少的先验知识，但必须设计出一套自适应算法，因而将更依赖于计算机技术实现。

④ 自适应控制是更复杂的反馈控制，它在一般反馈控制的基础上增加了自适应控制机构或辨识器。

## §1.2 自适应控制系统的基本结构和分类

### 1.2.1 自适应控制系统的基本结构

自适应控制系统的基本结构如图 1-2-1 所示，其中的可调系统可以理解为这样一个系统，即它能够用调整它的参数或者输入信号的方法来调整系统特性。

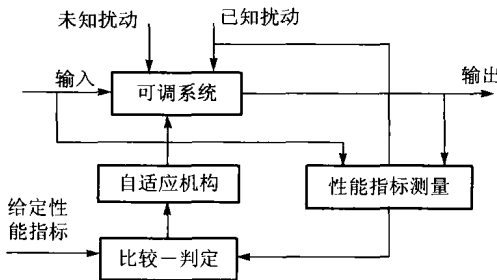


图 1-2-1 自适应控制系统的基本结构

性能指标的测量有多种方法，有些是直接的，有些是间接的，例如通过系统动态参数的辨识来测量性能指标就是一种间接方法。

比较-判定是指在给定的性能指标与测得的性能指标之间做出比较，并判定所测得的性能指标是否处于可接受性能指标的集合内。如果不是，自适应机构就产生相应的动作，调整可调系统的参数或输入信号，从而调整系统的特性。

应当注意，在图 1-2-1 中，性能指标测量、比较-判定和自适应机构 3 个基本结构的实施是非常复杂的，在有些情况下，要把一个自适应系统按照图 1-2-1 所示的基本结构图进行分解不是一件容易的事情。

判断一个系统是否真正具有“自适应”的基本特征，关键看是否存在一个对性能指标的闭环控制。有许多控制系统被设计成参数变化时具有可接受的特性，习惯上，它们常常被称为“自适应系统”。但是，它们并没有一个对性能指标的闭环控制，因而这样的系统并不是真正的“自适应系统”。

### 1.2.2 自适应控制系统的分类

自适应控制系统可按照不同角度进行分类。通常，按被控对象的性质可以分为：确定性自适应控制系统；随机自适应控制系统。按照自适应机构对可调系统的作用可以分为：参数自适应控制系统；信号综合自适应控制系统。

除此之外，从实用角度讲，自适应控制系统一般可分为 3 大类，即模型参考自适应控制

系统、自校正控制系统和其他形式的自适应控制系统。

### 1. 模型参考自适应控制系统

模型参考自适应控制 (Model Reference Adaptive Control, MRAC) 系统的基本结构如图 1-2-2 所示。

系统包含一个理想模型 (参考模型), 模型的输出  $y_m$  代表了该系统期望的动态响应, 即表征了对系统性能的要求。当理想模型与实际系统输出有差异时, 则通过自适应机构 (适应算法) 做出决策, 由执行机构改变可调系统控制器参数以消除误差, 使实际系统 (即可调系统) 与参考模型动态响应一致。

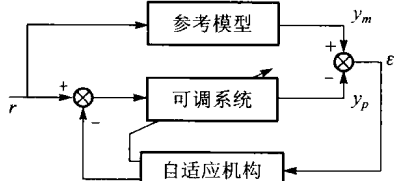


图 1-2-2 模型参考自适应控制系统的基本结构

模型参考自适应控制系统由两个环路组成, 内环由控制器与控制对象组成可调系统, 外环由参考模型与自适应机构组成。

当控制对象受干扰的影响使运行特性偏离了参考模型输出的最优轨迹, 则优化的参考模型的输出与控制对象的输出相比较就产生了广义误差  $\varepsilon$ , 它通过自适应机构根据一定的适应规律产生反馈作用, 用来修改控制器的参数或产生一个辅助输入信号, 促使可调系统与参考模型的输出相一致, 从而使广义误差  $\varepsilon$  趋向极小值或减小到 0。

模型参考自适应系统所研究的问题主要是设计一个稳定的、具有高性能的自适应机构的适应算法, 既能确保系统有足够的稳定性, 同时又能使广义误差得以消除。这种自适应控制系统的本质是要使被控闭环系统的特性和参考模型的特性一致, 这就往往需要在被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能适用于逆稳定系统。

对于图 1-2-2 所示的这种模型参考自适应控制系统的典型结构来说, 如果可调系统包括被控对象在内, 则会产生一个自适应模型跟随控制问题。如果被观测的系统处在图 1-2-2 中参考模型的位置, 则会产生一个自适应参数辨识和自适应状态估计问题。由于这两类问题互为对偶, 因此, 对它们的分析和综合可以从同一个理论基础出发来完成。

模型参考自适应技术可以用来设计自适应模型跟随控制系统, 也可以用来进行参数辨识, 还能用于设计自适应状态观测器。这 3 类模型参考自适应系统构成了模型参考自适应技术应用的主要方面。

模型参考自适应系统最初是由美国麻省理工学院 (MIT) 的 Whitaker 教授于 1958 年提出的, 并用参数最优化理论导出了自适应规律的算法, 称为 MIT 方案。这一方法的最大缺点是不能确保所设计的自适应系统是全局渐进稳定的。因此, 在 20 世纪 60 年代中期由德国学者 P.C.Parks 提出了用李雅普诺夫 (A.M.Lyapunov) 第二法来推导自适应算法的自适应控制系统设计方法。从此以后, 许多学者在这方面做了大量工作。罗马尼亚学者 V.M.Popov 在 1963 年提出超稳定性理论之后, 法国学者 I.D.Landau 于 1974 年把这一稳定性理论用到模型参考自

适应系统的设计中来，并引起各国学者的重视。后来许多学者，诸如 K.S.Narendra、A.S.Morse、G.C.Goodwin 等在模型参考自适应控制系统的稳定性、收敛性以及控制方案的选择等方面都做出了贡献。

## 2. 自校正控制系统

自校正控制 (Self-Tuning Control, STC) 系统的一般结构如图 1-2-3 所示。

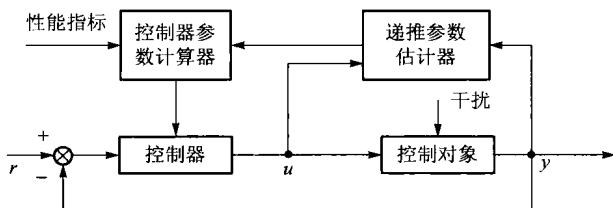


图 1-2-3 自校正控制系统的一般结构

自校正控制系统有两个回路，一个回路包括控制对象和控制器，称为内环，它类似于通常的反馈控制系统；另一个回路由递推参数估计器和控制器参数计算器组成，称为外环。因此，自校正控制系统将在线参数辨识与控制器的设计有机地结合在了一起。在运行过程中，首先根据控制对象的输入输出信息，利用递推参数

估计器（实际上是某一种辨识算法），对控制对象进行在线辨识，然后由辨识结果得来的过程模型参数和事先指定的性能指标，在线地综合控制作用，使控制效果最终达到某个预定的目标。通常要考虑随机扰动和量测噪声对系统带来的影响，即当控制对象大幅度变化时，仍然能使其动态品质达到预定的品质要求。

自校正控制系统通常属于随机参数自适应控制系统，它具有确定性等价性质，即当将系统中的所有未知参数用它们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律的形式相同。由此可见，在寻求自校正控制规律时，可根据确定性等价性质和分离原则，先假定被控系统的所有参数是已知的，并根据给定的性能指标综合出系统的最优控制律，然后用估计模型来估计未知参数，并用未知参数的估计值代替这个最优控制律中的相应未知参数，便得到了自校正控制律。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进最优的。

因此，自校正控制系统，就其控制方法可分成常规控制（其中包括最小拍、PI、PID 控制）、最小方差控制、二次型最优控制和极零点配置等。而就其参数估计方法有随机逼近法、各种最小二乘法、辅助变量法以及最大似然法等。通过对各种控制律和不同参数估计方法进行组合，可构成各种自校正控制算法。

自校正调节器是在 1973 年由瑞典学者 K.J.Åström 和 B.Wittenmark 首先提出来的，1975 年剑桥大学的 D.W.Clark 和 P.J.Gawthrop 提出自校正控制器。1979 年 P.E.Wellstead 和 K.J.Åström 提出极点配置自校正控制器和伺服系统的设计方案。关于离散时间随机自适应控制的稳定性和收敛性，澳大利亚学者 G.C.Goodwin 做出了有益的贡献。

### 3. 其他形式的自适应控制系统

其他形式的自适应控制系统是指除前述自校正控制系统和模型参考自适应控制系统以外, 基于先进理论的自适应控制系统以及非线性自适应控制系统、多变量过程自适应系统和全系数自适应控制系统。近年来, 在自适应控制系统中应用的先进理论有: 人工智能、神经网络、模糊集合论、鲁棒控制、 $H_\infty$ 控制、变结构控制等, 由此产生了基于人工智能的自适应控制系统、基于神经网络理论的自适应控制系统、基于模糊集合论的自适应控制系统、鲁棒自适应控制系统、 $H_\infty$ 自适应控制系统以及变结构自适应控制系统等。

由于篇幅所限, 不在这里一一列举。有关这方面的详细论述, 有兴趣的读者可参阅有关资料。自 20 世纪 50 年代以来, 自适应技术无论就其理论还是实践都得到了迅速发展, 新的自适应系统正在不断出现, 但到目前为止, 自适应控制在理论上比较成熟、在应用上比较广泛的还是以模型参考自适应控制和自校正控制为主。

## §1.3 自适应控制的主要理论问题

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, 尤其是在有随机干扰时更是如此。自适应控制系统的理论进展比较缓慢, 许多研究工作在理论上仍未达到合理和完整的程度。由于自适应控制系统的特性复杂, 因此必须从几种不同的角度来考察它们。非线性系统理论、稳定性理论、系统辨识、最优控制理论和随机控制理论等都有助于理解自适应控制系统的特性。但是, 对自适应控制系统本身来说, 最重要的理论研究课题还是集中在以下 3 个方面。

### 1. 稳定性

稳定性问题是一切控制系统的核心问题, 自适应控制系统当然也不能例外。自适应控制系统的稳定性是指系统的状态、输入、输出和参数等变量, 在受干扰的影响下, 应当总是有界的。

自适应控制系统的首要问题是保证系统的全局稳定。目前许多自适应控制系统的设计是以能保证整个系统全局稳定为准则的。对于确定性线性时不变的模型参考自适应控制, 常常借助于李雅普诺夫 (Lyapunov) 稳定性理论和波波夫 (Popov) 超稳定性理论等数学工具导出自适应控制规律, 这样设计的自适应控制系统无疑是稳定的。两种方法虽然不同, 但就现有的文献来看, 所得的结果是基本相同的。但是, 对于随机系统和非线性系统的模型参考自适应控制的稳定性研究, 进展极为缓慢。况且, 随着模型参考自适应控制的发展, 各种各样的自适应控制规律还在不断地提出来, 要保证系统全局稳定也很困难, 特别是因为系统是本质非线性时变的, 故当系统存在未建模动态特性或随机干扰时, 要证明自适应控制系统的稳定性就更困难了。

## 2. 收敛性

一个自适应控制算法具有收敛性是指在给定的初始条件下，算法能渐近达到预期目标，并在收敛过程中保持系统的所有变量有界。

许多自适应控制系统采用了各种形式的递推自适应算法，所以收敛性理论对自适应控制系统有重要的现实意义。当一个自适应控制算法被证明是收敛的，哪怕在证明中采用了若干理想假设，也能提高这个算法在实际应用中的可信度。再者，收敛性理论还有助于区别各种算法的优劣，指明改进算法的途径。

由于自适应控制算法的非线性特性对建立收敛性理论带来很大的困难，目前只在有限的几类简单的自适应控制算法中取得了一定的结果，而且现有收敛性结果的局限性太大，假设条件限制太严，不便于实际应用，即使是保证参数估计收敛的最基本的要求，即希望系统的输入信号能持续激励或足够丰富，对于实际系统也不一定总能满足。因此，收敛性的理论研究还有待于进一步深入。

## 3. 鲁棒性

自适应控制系统的鲁棒性是指在存在扰动和未建模动力学特性的条件下，系统保持其稳定性和一定动态性能的能力。

这个问题在早期的理论研究中未引起足够的重视，直到进入 20 世纪 80 年代才被 Rohrs 所发现，而后，引起了自适应控制理论界的高度重视。已经查明，扰动能使系统参数严重漂移，导致系统不稳定，特别是在存在未建模的高频动态特性的条件下，如果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，都可能使自适应控制系统丧失稳定性。目前人们已提出若干方案来克服上述各种原因引起的不稳定性，但远未达到令人满意的程度。因此，如何设计一个鲁棒性强的自适应控制系统，至今仍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，如何保证性能而又简化算法等课题都可归入这一类问题之中。由于自适应控制系统是非线性时变系统，初始条件的变化或未建模动态特性的存在都势必要改变系统的运动轨迹，因此，分析这种系统的动态品质，并研究改进措施是极其困难的。目前在这方面取得的成果还不多。

自适应控制理论中的问题当然远不止以上所列这几方面。自适应控制反映了控制系统向智能化方向发展的趋势，然而自适应控制只是控制系统智能化很初步的阶段，随着实践和理论不断发展，将会有更多的新课题提出来。近年来虽然在自适应控制系统的稳定性和算法收敛性的分析等方面，取得了一些突破性的进展。但显而易见，不能认为自适应控制系统的理论已经完善。

## §1.4 自适应控制的应用概况

自从 20 世纪 50 年代末期由美国麻省理工学院提出第一个自适应控制系统以后, 自适应控制在当时就引起了很多人的兴趣和关注。但是, 在这一时期, 由于理论和技术方面的原因, 在应用方面没有取得多少显著的发展, 对问题的研究大都停留在对具体对象设计方案的讨论上。至 20 世纪 60 年代, 由于现代控制理论在状态空间法、稳定性理论、最优控制、随机控制、系统辨识和参数估计等方面取得了一系列重要成果, 为自适应控制理论的形成和发展奠定了基础。再加上 20 世纪 60 年代中期以来, 微电子学和计算机技术得到了迅速的发展, 为自适应控制系统的实现提供了必要的物质条件。因此, 自 20 世纪 70 年代以来, 自适应控制无论是在理论还是应用方面都取得了许多重要进展。在由理论方面提出的一些简单实用的自适应控制方法已在航空、航海、冶金、化工、机电等领域得到了许多成功的应用, 成为现代控制理论中应用最广泛的一个分支。

近二三十年来, 由于微型计算机的发展和理论的不完善, 自适应控制技术在工程界得到了越来越广泛的应用, 它涉及化工、造纸、采矿、船舶驾驶与定位、水泥、发酵、空调、飞机驾驶、机械手、柴油发动机、加热炉、扩散炉、玻璃窑、pH 值控制、卫星试验、发电厂与电力拖动等多种工业部门, 大大改善了系统性能, 提高了产品质量, 节约了能源, 取得了明显的效果。与此同时, 我国学者不仅在理论研究方面取得了一系列有价值的研究成果, 而且在应用方面也取得了许多可喜的成绩, 如在化工、水泥、发酵、造纸、电力、扩散炉、加热炉、卫星试验等部门进行了成功的试验与应用。以下简略地介绍自适应控制技术在解决具体问题的一些应用概况。

自适应控制系统较早应用的一个实例是在 20 世纪 50 年代末, 由美国麻省理工学院的 Whitaker 教授首先提出并设计了飞机自动驾驶仪的模型参考自适应控制方案, 称为 MIT 方案。在该方案中采用局部参数优化理论设计自适应控制规律, 因为飞机在飞行过程中, 其动力学特性取决于环境因素和结构参数, 而飞机的环境因素和结构参数在飞行过程中将不断发生改变, 如飞机飞行的高度和速度的变化。因此, 这些改变使得飞机的动力学特性在相当大的范围内发生变化。运用传统的飞行控制方式难以保证在整个飞行过程中实现高质量的控制, 而当采用模型参考自适应技术的自动驾驶仪时, 经模拟研究和飞行试验表明, 飞机在不同飞行条件下都具有满意的控制性能。但是限于当时计算机技术和控制理论的发展水平, 这一自适应控制技术的成果未能得到迅速的发展和推广。随着计算机技术和控制理论发展水平的不断提高, 特别是由于航空航天事业的迅速发展的需要, 目前, 自适应控制在航空航天方面也取得了相应的发展和应用。

在航海方面, 大型海洋考察船和油轮的自动驾驶是成功应用自适应控制的一个例子。由于船舶在航行中不断受到风、浪、潮流、速度、负载和水深的影响, 为了使船舶按照预定航

向航行而采用 PID 控制的船舶自动驾驶仪时, 必须经常整定 PID 调节器的参数, 或者在几组参数中切换, 这样的 PID 调节器在随机干扰条件下不能很好地工作。为了克服 PID 调节器的缺点, 人们先后用模型参考自适应技术和自校正技术等方法设计了多种船舶自动驾驶仪并做了航海试验。试验证明, 采用了自适应技术的这些自动驾驶仪在随机变化复杂的环境下, 无论是航向精度, 还是与机械损耗有关的船舵摆动幅度, 都在不同程度上明显优于 PID 控制并取得了良好的经济效益。

在化工过程控制方面, 醋酸蒸发器的液位控制, 是自校正调节器成功地应用于化工设备的一个实例。醋酸蒸发器装有醋酸液体, 高压水蒸气通过管道把醋酸加热蒸发为气体, 改变水蒸气的流量可以调节醋酸的蒸发量。工艺上要求醋酸的蒸发量等于加入的醋酸量, 因此, 必须使醋酸蒸发器中的液位保持在一个希望的常值上。而蒸发器装置经常受高压水蒸气压力波动的随机干扰, 并且是一个具有大惯性、长滞后时间的系统。该系统原来采用 PID 数字调节器通过调节高压水蒸气的流量, 来达到控制蒸发器的液位高度的目的。由于系统存在大的滞后时间和随机干扰, 在一定的装置上试验表明, 当希望的液位高度设定值为 1 600 mm 时, 在 PID 数字调节器的控制下, 实际液位高度与设定值之间的偏差在  $\pm 30$  mm 内波动。而在自校正调节器的控制下, 液位偏差仅在  $\pm 5$  mm 以内。因此, 采用自校正调节器使其调节品质得到了明显的改善。除此之外, 在化工领域的其他方面, 如蒸馏塔、pH 值控制、醋酸乙烯合成反应器等, 都不同程度地采用了自适应控制系统, 并取得了较好的效果。

在水泥生产工业方面, 水泥生料的成分将直接影响烧制水泥的质量。在水泥生料配料过程中, 水泥生料混合装置把主要含有氧化钙、三氧化二铁、二氧化硅和三氧化二铝 4 种化学成分的颗粒状物料石灰石、铁矿石和黏土按一定重量百分比送入研磨机, 将其研磨成粉末后放入储料仓。配料的目的是要求每一个储料仓中的生料混合均匀, 含有的化学成分等于希望值。因为进入研磨机的物料化学成分随机变化, 且不能实时量测。为了保证生料的化学成分, 在研磨后的生料粉末进入储料仓之前需要用 X 射线分析其化学成分, 以便实时修改进入研磨机的石灰石、铁矿石和黏土的重量百分比, 使得储料仓装满后的生料化学成分达到希望值。由于进料的随机干扰, 采用常规的 PID 调节和确定性最优控制, 其控制效果都不甚理想。而人们利用多输入多输出自校正调节器设计方法, 并在此基础上稍做改进, 得到了物料重量百分比控制策略。根据这个策略, 对送入研磨机的 3 种物料重量进行实时控制, 可使每一储料仓的水泥生料化学成分与希望值的偏差明显地减小。与此同时, 在水泥生产过程中, 用于烧制水泥的旋转水泥窑也采用了自校正调节器, 对于这种大干扰、长滞后、工艺复杂的系统, 经生产试验表明, 其控制效果比以往单凭工人操作经验的手动控制好, 不仅降低了劳动强度, 同时也提高了产品质量。

电加热炉是一种对金属材料进行热处理的设备, 为了保证材料热处理的质量, 要求加热炉有足够高的温度控制精度。由于环境温度的变化、电网电压的波动以及加热炉本身的时变参数和非线性特性等, 使用常规控制方法很难保证加热炉在整个工作温度范围内都始终保持



较高的温度控制精度。为此，北京科技大学高温实验室采用多输入多输出自校正调节器的控制方案，用计算机对多台电加热炉进行实时群控，当电网电压有较大范围波动时，自校正调节器的控制方案控温精度可达到 $(800 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。控制效果明显优于PID调节和线性二次高斯(LOG)控制算法。

在电力拖动方面，由可控硅供电的直流调速和交流调速系统，在运行过程中，系统参数（如惯量、时间常数、增益等）可能在较大范围内变化，有时当直流调速系统主回路的电流由连续变为断续时，系统的结构也将发生变化。尽管被控对象参数和结构发生很大的变化，但通过自适应技术（如模型参考自适应控制）仍可使系统的动态响应保持与期望值相接近。

在运动控制和机械手控制方面，参考模型自适应控制技术较早地获得了成功的应用，比较著名的例子如24 in<sup>①</sup>卫星跟踪望远镜的高精度位置随动系统，由于采用了模型参考自适应技术，自动补偿了系统在低速和超低速运行时由于系统惯量和增益的变化以及摩擦负载的非线性特性所带来的不良影响，从而大幅度地提高了系统的稳态和动态跟踪的精度。

通过上面简略的介绍可以看出，自适应控制技术仅在一个不太长的时间内，无论是理论还是实践应用都得到了长足的发展，表现出强大的生命力，目前已广泛应用于许多领域，例如机器人操作，飞机、导弹、火箭和飞船的控制，化工过程，工业过程，动力系统舰船驾驶，生物工程以及武器系统，并逐步渗透至经济管理、交通、通信等各个领域。可以相信，随着计算机技术的不断进步和控制理论的日益完善，将会出现更多更新的方法，在更广泛的领域发挥越来越多的作用。

## 习 题

1. 自适应控制系统的基本特征是什么？
2. 常用的自校正控制系统和模型参考自适应控制系统与理想自适应控制系统有何区别？
3. 试举出一两个具有自适应性质的具体控制系统。

<sup>①</sup> 1 in=25.4 mm。