河海大学研究生教育教学改革项目资助

工程应用中的自适应控制

The Applications of Adaptive Control in Engineering

卢新彪　秦补枝◎编

河海大學出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

河海大学研究生教育教学改革项目资助

工程应用中的自适应控制

The Applications of Adaptive Control in Engineering

卢新彪　秦补枝◎编

常州大学图书馆
藏书章

河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内容简介

本书在编者多年教学实践和科研的基础上，参考当前的自适应控制教材和国内外相关自动化专业的期刊编写而成。主要阐述了自适应控制的研究对象和特点、典型的自适应控制系统的结构以及自适应控制理论和应用概述，研究了模型参考自适应系统的基本原理和设计方法，并详细介绍了系统辨识方法、自校正控制系统、典型的工程应用案例、动态网络中的自适应控制等，最后提出了多智能体蜂拥控制中的自适应策略。

本书可供自动化、计算机科学与应用以及有关专业的高年级本科生和控制科学与工程、计算机科学工程等相关学位的硕士研究生学习使用，也可供自动化专业及相关专业人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

工程应用中的自适应控制 / 卢新彪，秦补枝编. --
南京 ：河海大学出版社，2019.3
ISBN 978-7-5630-5875-4

Ⅰ. ①工… Ⅱ. ①卢… ②秦… Ⅲ. ①自适应控制—研究 Ⅳ. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 021884 号

书　　名	工程应用中的自适应控制
书　　号	ISBN 978-7-5630-5875-4
责任编辑	金　怡
封面设计	徐娟娟
出版发行	河海大学出版社
地　　址	南京市西康路 1 号(邮编:210098)
电　　话	(025)83737852(总编室) (025)83787103(编辑室) (025)83722833(营销部)
经　　销	江苏省新华发行集团有限公司
排　　版	南京布克文化发展有限公司
印　　刷	虎彩印艺股份有限公司
开　　本	787 毫米×1092 毫米　1/16
印　　张	9.5
字　　数	215 千字
版　　次	2019 年 3 月第 1 版　2019 年 3 月第 1 次印刷
定　　价	48.00 元

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

前言 / Preface

随着人工智能的快速发展和网络化时代迅速到来，自适应控制无论在理论上还是在实际的工程应用上都取得了很大的进展，它已逐渐成为现代控制理论中一个十分重要的研究领域，吸引了大批优秀研究学者。本书从工程应用的角度介绍了自适应控制经典的理论知识和设计方法以及一些理论和实际工程应用案例，主要帮助读者进一步了解自适应控制的研究成果并结合具体工程实际应用。

本书共分为七章。第一章为绪论，主要介绍自适应控制的研究对象和特点、典型的自适应控制系统的结构，以及自适应控制理论和应用概述。第二章主要介绍模型参考自适应系统的基本原理和设计方法。第三章主要介绍系统辨识方法，回顾随机过程的相关知识，研究在含有噪声的系统输入、系统输出中获得对象的数学模型及其应用场合和方式。第四章介绍了自校正控制系统，主要有自校正调节器、自校正控制器、极点配置自校正控制器和自校正 PID 控制器。第五章介绍典型的工程应用案例。第六章介绍复杂动态网络中的自适应控制，包括复杂网络的简介、网络同步的判据和自适应控制策略在网络同步和聚类同步中的应用。第七章介绍多智能体蜂拥控制中的自适应策略。

本书可供自动化、计算机科学与应用以及有关专业的高年级本科生和控制科学与工程、计算机科学工程等相关学位的硕士研究生学习使用，也可供自动化专业及相关专业人员阅读。

本书在编者多年教学实践和科研的基础上，参考当前的自适应控制教材和国内外相关自动化专业的期刊编写而成。第六章由南京科技职业学院的秦补枝编写，其余由卢新彪编写。书本列出了部分参考书目，在此谨向参考过的列出和未列出的编著者致以衷心的感谢！本书在编写过程中得到了周军教授的支持和帮助，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。

卢新彪

河海大学江宁校区　勤学楼

目录 / Contents

第一章 绪论 …… 001

1.1 自适应控制概述 …… 001

1.2 自适应控制系统的分类 …… 001

1.2.1 模型参考自适应控制系统 …… 001

1.2.2 自校正控制系统 …… 002

1.2.3 其他形式的自适应控制系统 …… 003

1.3 自适应控制理论研究的主要问题 …… 003

1.4 工程应用中的自适应控制 …… 005

第二章 模型参考自适应控制 …… 007

2.1 MRAC 结构组成 …… 007

2.2 MRAC 的设计问题 …… 008

2.2.1 局部参数优化设计方法 …… 008

2.2.2 基于 Lyapunov 稳定性的设计方法 …… 009

第三章 系统辨识与参数估计 …… 024

3.1 系统辨识概论 …… 024

3.1.1 系统辨识的定义 …… 024

3.1.2 系统辨识的分类和步骤 …… 025

3.2 随机过程概论 …… 026

3.2.1 随机过程的概念 …… 026

3.2.2 随机过程的数字特征 …… 026

3.2.3 平稳随机过程和各态历经性 …… 027

3.2.4 自相关函数的性质 …… 028

3.2.5 功率谱密度函数 …… 029

3.2.6 随机序列 …… 030

3.3 系统的离散时间模型 …… 031

3.3.1 平移算子 …… 031

3.3.2 确定性输入输出模型 …… 032
3.3.3 随机性输入输出模型 …… 033
3.4 经典的辨识方法 …… 034
3.4.1 最小二乘估计 …… 034
3.4.2 递推最小二乘估计 …… 037
3.4.3 慢时变参数的递推估计 …… 039
3.4.4 CARMA 模型的参数估计 …… 039
3.5 梯度校正参数估计法 …… 040
3.5.1 确定性系统的梯度校正参数估计方法 …… 041
3.5.2 随机性系统的梯度校正参数估计方法 …… 041
第四章 自校正控制系统 …… 043
4.1 概述 …… 043
4.1.1 自校正控制技术 …… 043
4.1.2 自校正控制系统的结构 …… 043
4.1.3 自校正控制算法的分类 …… 044
4.1.4 自校正控制系统的性能指标 …… 045
4.2 Diophantine 方程 …… 045
4.3 最小方差调节器 …… 047
4.3.1 概述 …… 047
4.3.2 最小方差控制律的设计 …… 050
4.3.3 最小方差控制律的特点 …… 053
4.4 自校正调节器 …… 054
4.4.1 自校正调节器的控制律 …… 054
4.4.2 自校正调节器实用注意事项 …… 056
4.4.3 自校正调节器的仿真举例 …… 056
4.5 广义最小方差控制 …… 057
4.5.1 概述 …… 057
4.5.2 最优预报 …… 058
4.5.3 广义最小方差控制律 …… 060
4.5.4 广义最小方差控制律的闭环特性 …… 060
4.6 自校正控制器 …… 064
4.6.1 最优预报作为反馈 …… 065
4.6.2 以控制系统的输出量直接反馈 …… 067
4.6.3 自校正控制器的优缺点 …… 068
4.7 极点配置自校正调节器 …… 069
4.7.1 参数已知的极点配置调节器 …… 069

4.7.2 极点配置自校正调节器 …… 071
4.8 极点配置自校正控制器 …… 073
4.8.1 参数已知的极点配置控制器 …… 073
4.8.2 广义最小方差极点配置自校正控制器 …… 075
4.9 自校正 PID 控制器 …… 075
4.9.1 PID 控制算法 …… 075
4.9.2 自校正控制器 …… 076
第五章 自适应控制系统的应用 …… 079
5.1 工业自适应控制器及其应用 …… 079
5.1.1 Leeds 和 Northrup 公司的 Electromax V …… 079
5.1.2 ScattControl 公司生产的 ECA40 …… 080
5.1.3 Asea Brown Boverid 的自适应调节器 Novatune …… 081
5.1.4 First Control 公司的自适应调节器 …… 082
5.1.5 工业自适应调节器的小结 …… 083
5.2 高炉铁水含硅量的预报 …… 084
5.3 温度自校正控制 …… 089
5.3.1 被控对象分析 …… 089
5.3.2 自校正控制算法 …… 090
5.3.3 试验结果 …… 093
5.4 船舶驾驶的自适应控制 …… 094
5.4.1 船舶动态特性建模 …… 094
5.4.2 海洋事业考察船的 MRAC …… 095
5.5 飞机自适应驾驶仪 …… 098
5.5.1 MIT 的模型参考自适应控制 …… 099
5.5.2 Sperry 自适应控制系统 …… 099
5.5.3 M-H 自适应控制系统 …… 100
第六章 复杂动态网络中的自适应控制 …… 102
6.1 复杂网络的基本概念和拓扑模型 …… 102
6.1.1 基本概念 …… 102
6.1.2 网络模型 …… 103
6.2 网络同步 …… 107
6.3 具有未知拓扑的网络自适应同步 …… 112
6.3.1 局部同步 …… 112
6.3.2 全局同步 …… 115
6.4 网络拓扑结构已知时的自适应同步 …… 117
6.4.1 全局信息 …… 117

6.4.2 局部信息 …… 117
6.5 复杂网络的自适应聚类同步 …… 121
6.5.1 复杂网络的异质平衡点控制 …… 121
6.5.2 聚类同步的自适应策略 …… 129
第七章 多智能体蜂拥中的自适应控制 …… 133
7.1 多智能体蜂拥简介 …… 133
7.1.1 蜂拥控制基本术语和数学模型 …… 134
7.1.2 梯度的定义及性质 …… 137
7.1.3 蜂拥控制数学模型 …… 137
7.2 一种自适应调节的仅用位置信息的多智能体蜂拥控制 …… 137
7.3 仿真结果 …… 139
参考文献 …… 141

第一章 / 绪论

对于一个性能良好的控制系统，通常需要已知被控对象的动态特性。但是，在实际的工程应用中，有一些被控对象的动态特性往往难以提前获取，或者这些特性是经常变化的。对于这类被控对象，采用常规的反馈控制方法难以获得期望的效果，因此要利用自适应控制策略达到目的。

1.1 自适应控制概述

在种类繁多的控制工程中，它们的被控对象通常具有一定程度的不确定性。其中“不确定性”是描述被控对象的数学模型的某些参数事先不完全知道，或者被控对象的结构和参数随着工作环境的变化而变化。

为了克服这些不确定性，人们设计了自适应控制器最大限度地消除这些不确定性带来的影响。一个完整的自适应系统大体上包含三个部分：性能指标测量与计算、比较与判定和自适应机构。

1.2 自适应控制系统的分类

自适应控制系统通常分为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。

1.2.1 模型参考自适应控制系统

(1) 模型参考自适应控制(MRAC)

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

从图中可以看出，系统主要包括四个部分：被控对象、控制器、自适应机构和参考模型。与经典的自动控制系统相比，多了参考模型和自适应机构两个部分。其工作过程为：参考输入同时作用到参考模型以及控制器上，参考模型的输出与被控对象的输出的差值作用到自适应机构上，自适应机构根据一定的策略调整控制器的参数，从而使得被控对

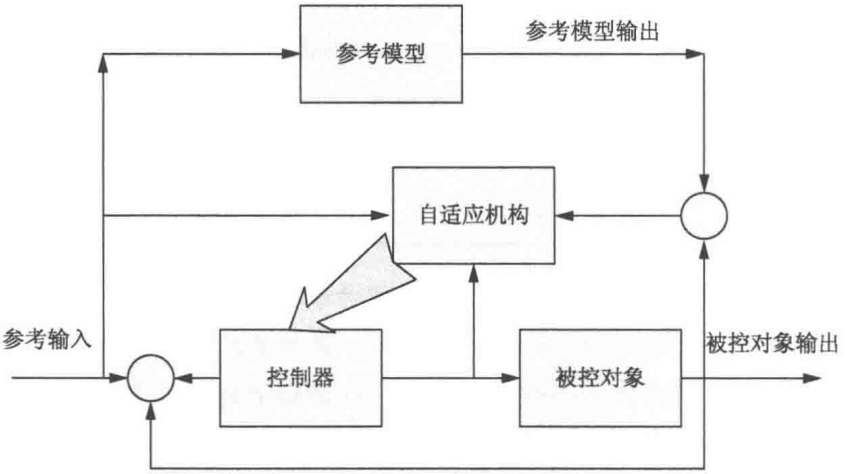


图 1-2-1 模型参考自适应控制系统的基本结构

象的输出与参考模型的输出一致。

模型参考自适应控制系统由两个环路组成，内环是由控制器、被控对象和被控对象的输出反馈环节组成，基本上与经典的负反馈控制系统相同，唯一不同点在于控制器的参数可以调整。外环是由参考模型和自适应机构组成。从图 1-2-1 中不难发现内外环路通过两处进行连接，即自适应机构的输入和输出。

模型参考自适应控制系统最初是由工作于美国波士顿的麻省理工学院(MIT) H. P. Whitaker 教授在 1958 年提出的并应用于无人驾驶的飞行器上减少其飞行中遇到的不确定性因素的影响，主要是利用参数最优化理论推出了自适应规律的算法，简称为 MIT 方案。但是，这种方案的最大缺点是不能确保所构建的自适应系统是全局稳定的。后来人们在 MIT 方案的基础上做出了持续不断的改进，主要包括利用构建合适的李雅普诺夫函数获得具有全局稳定性的自适应控制系统和把超稳定理论应用到模型参考自适应控制系统的设计中。

1.2.2 自校正控制系统

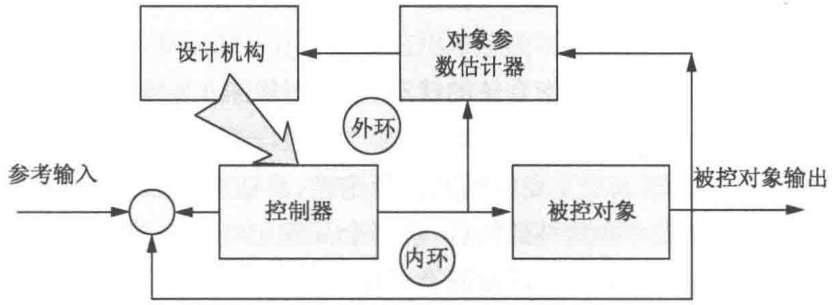
模型参考自适应控制系统需要一个已知的参考模型，但是这个参考模型往往不易获得。Kalman 在 1958 年基于最小二乘估计和有限拍控制的思想设计自校正控制器，从而不需要提前获取参考模型的信息。但是由于当时计算机硬件的限制，直到 1973 年 Astrom 等人才获得了自校正控制突破性的研究进展。

自校正控制(Self-Tuning Control，STC)系统的一般结构如图 1-2-2 所示，它主要包括间接自校正和直接自校正两种类型。从两幅小图中，可以看出自校正系统都包含内环和外环两个部分。内环都是由常规的负反馈控制系统组成，在间接自校正控制系统图 1-2-2(a)中，外环是由对象参数估计器和设计机构等组成，在直接自校正控制系统图 1-2-2(b)中，外环是由控制器参数估计器等组成。

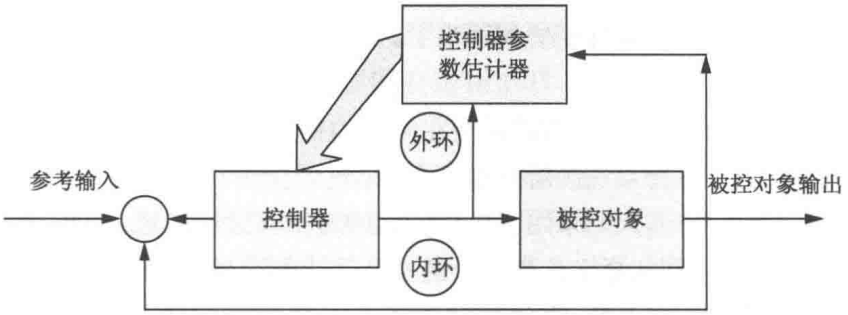
在图 1-2-2(a)中，对象参数估计器在根据控制器的输出和被控对象的输出对对象参

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

数进行估计，估计的结果经过设计机构后去间接调整控制器的参数。在图 1-2-2(b)中，直接对控制器的参数进行估计，需要建立一个与控制器参数直接关联的模型。从二者的图形对比中，不难发现，直接自校正控制器的计算量较小，但是需要构建一个合适的控制参数估计模型。



(a) 间接自校正控制



(b) 直接自校正控制

图 1-2-2 自校正控制系统的一般结构

间接自校正控制系统工作过程为参考输入和被控对象输出反馈相加后作用到参数可调整的控制器上，控制器的输出作用到被控对象上，对象参数估计器根据控制器的输出和被控对象的输出对被控对象参数进行估计，然后将估计的结果传输给设计机构，设计机构根据给定的技术指标调整控制器的参数。直接自校正控制系统工作过程与间接自校正系统类似，不再赘述。

1.2.3 其他形式的自适应控制系统

近年来，随着先进的控制理论不断涌现，人们将人工智能、机器学习、模糊理论、鲁棒控制、复杂网络理论、多智能体蜂拥控制和变结构控制等应用到自适应控制系统中，发展了多种智能的自适应控制系统。感兴趣的读者可以阅读最新的研究综述，这里由于篇幅所限，不再详述。

1.3 自适应控制理论研究的主要问题

自适应控制系统是一个时变的非线性系统，因此对这种系统分析是相当困难的。自

适应系统的理论研究进展缓慢，许多研究工作在理论上仍没达到合理和完整的程度。由于其特性复杂，所以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从不同的角度理解自适应控制系统的特性。但是，对于自适应控制系统本身来说，最重要的理论研究课题主要集中在三个方面。

(1) 稳定性

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，在受干扰的情况下，应当是有界的。

对于所有的控制系统，其最主要问题就是稳定性，自适应控制系统当然也不能例外。由于自适应控制系统时变和非线性的特点，获得全局稳定性保证是比较困难的。目前一般的方法是构建合适的李雅普诺夫函数或者利用波波夫超稳定性理论等获得确定性线性时不变系统的自适应控制规律，从而保证系统的全局稳定性。但是对于随机系统和非线性系统的自适应控制的稳定性研究进展十分缓慢。这类系统本质上属于非线性时变系统，要证明自适应系统的稳定性就更加困难了。

(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，算法能够渐进达到预期目标，并在收敛过程中保持系统的所有变量有界。

在自校正控制系统中，人们采用了各种形式的递推自适应算法，因此，其算法的收敛性对于系统具有重要的现实意义。当一个递推自适应算法被证明是收敛的，就可以提高这个算法的可信度。更进一步，收敛性理论还可以区别算法的优劣，为改进算法提供帮助。

由于自适应控制算法的非线性特性给利用收敛性理论带来了巨大的困难，目前只在几类简单的自适应控制算法中取得了一定的成果，而且现有的收敛性结果的局限性较大，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，即系统的输入信号持续激励或足够丰富，对于实际系统也不是经常满足。因此，收敛性理论还有待于进一步的深入。

(3) 鲁棒性

自适应控制系统的鲁棒性是指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。

虽然自适应控制系统能适应对象模型时变和强干扰的影响，但自适应控制系统本身的鲁棒性依然是一个重要的研究课题。由于自适应律设计的过程中对系统未建模动态(寄生高频)的影响缺乏理论分析，设计出的自适应控制系统的稳定性等性能指标存在被破坏的可能。因此，自适应控制系统的鲁棒性研究值得开展，但由于非线性时变系统鲁棒性分析和鲁棒性综合都存在很大困难，所以目前进展不大。

这个问题在 20 世纪 80 年代被 Rohrs 所发现后引起了大家的重视。现有的研究表明，扰动能使系统参数严重漂移，从而导致系统不稳定，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、自适应增益过大、存在测量噪声，都可能使得系统的稳定性丧失。目前为止，人们仍然没有找到一个合适的方案消除这些因素

造成的不确定性。因此，如何设计一个鲁棒性强的自适应控制系统，至今仍是一个未解的理论研究课题。

1.4 工程应用中的自适应控制

20 世纪 50 年代末期，MIT 方案被提出用来解决飞行器的自动驾驶问题，但受限于当时的嵌入式系统和控制理论的发展水平，飞行试验没有取得成功。20 世纪 70 年代以来，随着嵌入式系统的迅速发展和自适应控制理论的不断完善，自适应控制已经成功地应用于多个领域，这些领域主要包括航空航天、航海、电力、化工、钢铁冶金、通讯、电子、原子能、机器人和生物工程等。比如，在 24 in[①] 的卫星跟踪望远镜的伺服系统中，采用了模型参考自适应控制器后，跟踪精度提高了近 6 倍；在 200 kW 的矿石粉碎机中采用自校正控制提高产量约 10%；在长网纸机中采用组合自校正控制，与传统的 PID 控制器相比，定量标准差由 2.41 g/m^2 降低到 1.32 g/m^2，每年每台纸机可多获得经济效益 120 万元；在水泥生料配料中采用自校正控制，提高水泥产量 5%～8%，而同时耗电量还减少了 3%；在轧辊罩式退火炉中采用自校正控制，使得温度控制误差达到±3℃，从而每年可多获经济效益约 100 万元。

20 世纪 80 年代以来，伴随着计算机技术的飞速发展，自适应控制理论和设计方法得到了不断发展和进一步完善，自适应控制技术的应用得到广泛的扩展。目前从火星的探测计划到人工智能领域，自适应控制技术的应用都方兴未艾。下面将介绍自适应控制在工业领域中的最近的应用现状。

随着自动化装置在工业工程中的不断普及，控制方法经历了从传统的比例积分微分(PID)控制到智能控制的发展历程。近年来，自适应控制策略在工业过程控制中获得了广泛的应用，主要包括化工过程、造纸过程、冶金过程等。

(1) 化工过程控制

2005 年，大连理工大学的张志君将两个多层模糊神经网络分别用于化工过程辨识和控制，通过不断更新模糊隶属函数实现系统的自适应控制。综合运用 BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shannno)和最小二乘算法在线训练神经网络，从而提高模型的精度和控制性能，极大地降低了模型不匹配和参数时变的影响。

在化工过程控制领域，基于自校正调节器的醋酸蒸发器的液位控制是自适应控制典型应用之一。醋酸蒸发器内装有醋酸液体，高压水蒸气把醋酸加热蒸发为气体，因此调整高压水蒸气的流量可以调整醋酸的蒸发量，从而达到控制醋酸液位位置的目的。化工工艺要求醋酸的蒸发量等于加入的醋酸量，使得醋酸蒸发器中的液位必须保持不变。由于在这一化工过程中，存在水蒸气压力波动的随机干扰，对于这样的一个大惯性、长滞后的系统，采用传统的 PID 数字调节器调节高压水蒸气的流量，液位偏差较大。

(2) 航海航向的控制

在航海领域，大型海洋考察船和油轮的自动驾驶是自适应控制的经典案例之一。这

① 注：in=0.0254 m

些船舶在航行中不断受到海风、海浪、潮流、速度、负载和水深的影响，为了使船舶按照预设的航向航行，必修消除以上这些不确定因素的影响，采用传统的 PID 控制策略时，必须经常整定 PID 调节器的参数或者在几组参数中不断地切换，从而导致控制效果不好。为了进一步提高控制效果，人们先后采用了模型参考自适应控制和自校正控制策略设计出多种船舶自动驾驶仪。实践证明，自适应控制策略控制效果要明显优于传统的 PID 控制策略，从而取得了良好的经济效益。

(3) 智能化机电控制

随着嵌入式技术的迅速发展，自适应控制在智能化高精度的机电控制系统应用逐渐增多。

加拿大宇航局的研究人员在 2005 年利用直接测量负载单元的输出力实现液压缸输出力的自适应控制。采用自适应测量得到的输出力误差用于反馈控制和动态更新摩擦模型的参数，从而使得缸内压力误差和输出力误差稳定。这种液压缸控制的优异性能使得其动态性能在预设的宽带范围内与电机驱动马达相当。因此，可以利用这样的液压机器人代替电驱动机器人获得更好的控制效果。

美国普渡大学的研究人员在 2001 年对一类同时具有可重复和不可重复不确定性的非线性系统综合自适应鲁棒控制和迭代控制，提出一种性能可调的控制策略。首先，在确定的已知边界条件函数下，运用迭代控制学习和逐渐接近未知的可重复非线性；然后鲁棒性消除不确定性因素的影响，特别是不可重复不确定性的影响，提高了直线电机驱动系统的瞬态特性和稳态精度。

(4) 柔性结构和振动的控制

美国密西根大学的 J. F. 等在 1997 年将自适应模态空间控制应用到一类类似机翼的悬臂梁柔性结构时变系统中，结果表明该控制器的频带较宽，且具有很强的解耦能力。英国曼彻斯特大学的研究人员结合神经网络辨识器和 PID 神经网络控制器组成建筑结构的自适应控制系统。当该系统受到不同的地震载荷等扰动时，线性单自由度建筑结构采用自适应策略有效减少系统振动。

(5) 电力系统的控制

在燃煤或燃气发电厂的蒸汽温度和压力控制、锅炉燃烧效率的优化控制中经常用到自适应控制策略。针对这种锅炉主蒸汽温度调节的大时滞和不确定性，东北电力大学的顾俊杰在 2005 年构建自适应比例、求和、微分方法，并与内模控制器相结合，与传统的控制效果相比，这种控制策略大幅度减少系统超调量，提高相应速度，缩短稳定时间。哈尔滨工业大学的徐立新等人在 2005 年将模糊控制和自适应控制相结合提出模糊自适应 PI 控制器，该方案方便实施并能提高燃气轮机的动态性能。

习 题

1. 与经典的反馈控制系统相比，自适应控制系统的主要特征是什么，其主要用于哪些系统？

2. 经典的自适应控制系统有哪两类？二者的主要区别是什么？

3. 举一个例子说明自适应控制系统。

第二章 / 模型参考自适应控制

模型参考自适应控制(MRAC)是经典的自适应控制一类重要分支。MRAC 是在确定性连续时间系统的伺服控制问题解决过程中提出的，然后逐渐应用到离散事件系统和随机扰动系统。从工程应用的角度出发，希望系统的自适应控制律，在不直接求解系统线性或非线性方程的条件下，使系统的输出能够跟踪参考模型的输出。

2.1 MRAC 结构组成

MRAC 的基本结构如图 2-1-1 所示。

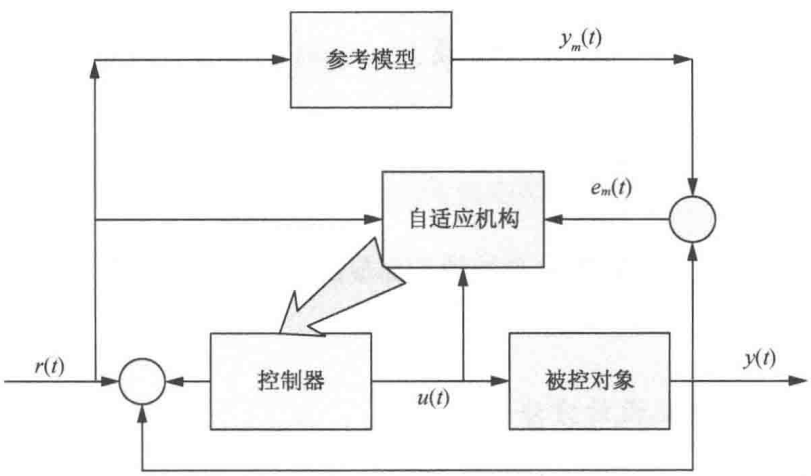


图 2-1-1 模型参考自适应控制系统的基本结构

从图中可以看出，系统主要包括四个部分：被控对象、控制器、自适应机构和参考模型。与经典的自动控制系统相比，多了参考模型和自适应机构两个部分。其工作过程为：参考输入同时作用到参考模型以及控制器上，参考模型的输出与被控对象的输出的差值作用到自适应机构上，自适应机构根据一定的策略调整控制器的参数，从而使得被控对象的输出与参考模型的输出一致。

在图中，$r(t)$为系统的参考输入，$u(t)$为控制器的输出，自适应机构的输入为参考模型的输出 $y_m(t)$与被控对象的输出 $y(t)$之差或称为输出误差：

$$e_y(t) = y_m(t) - y(t) \tag{2-1-1}$$

状态向量误差为

$$e_x(t) = x_m(t) - x(t) \tag{2-1-2}$$

其中 $x_m(t)$ 和 $x(t)$ 分别为 n 维参考模型和被控对象的状态。自适应机构的设计原则就是逐渐缩小状态向量误差或输出误差，使得系统的实际性能指标达到期望值。

在图 2-1-1 中，参考模型的状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{x}_m(t) &= \boldsymbol{A}_m x_m(t) + \boldsymbol{B}_m u(t) \\ y_m(t) &= C x_m(t) \end{aligned} \tag{2-1-3}$$

其中 $\boldsymbol{A}_m$ 和 $\boldsymbol{B}_m$ 分别为 $n \times n$ 维和 $n \times m$ 维的常数矩阵。由于参考模型表述的是期望的系统性能，所以参考模型(2-1-3)是完全能控和完全能观的。

被控对象的状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \boldsymbol{A}(t) x_p(t) + \boldsymbol{B}(t) u(t) \\ y(t) &= C x(t) \end{aligned} \tag{2-1-4}$$

其中 $\boldsymbol{A}(t)$ 和 $\boldsymbol{B}(t)$ 分别为 $n \times n$ 维和 $n \times m$ 维的时变矩阵。

此时，MRAC 的设计问题可以描述为寻找一定的自适应规律使得系统的广义误差(系统状态向量误差或输出误差)在趋近于 0 或者在一段时间内的误差平方最小：

$$\lim_{t \to \infty} e(t) = 0 \text{ 或 } J = \min \int_0^t e^2(t) \mathrm{d}t \tag{2-1-5}$$

2.2 MRAC 的设计问题

MRAC 的设计方法有很多，从最初的局部参数优化方法到基于 Lyapunov 稳定性的设计方法。

2.2.1 局部参数优化设计方法

利用局部参数最优化理论设计 MRAC 是在 1958 年美国麻省理工学院的研究人员提出的，因此人们称其为 MIT 方案，如图 2-2-1 所示。

在该方案中，假设被控对象未知或慢时变参数为 θ，则公式(2-1-5)中的性能指标可写为

$$J = \min \int_0^t e^2(t) \mathrm{d}t \tag{2-2-1}$$

为使上式取得最小值，可调参数 k_c 取值为性能指标 J 的负梯度方向，即

$$k_c = -B' \frac{\partial J}{\partial k_c} = -B' \int_0^t 2e(t) \frac{\partial e(t_c)}{\partial k_c} \mathrm{d}\tau = -B \int_0^t e(t) \frac{\partial e(t)}{\partial k_c} \mathrm{d}\tau \tag{2-2-2}$$

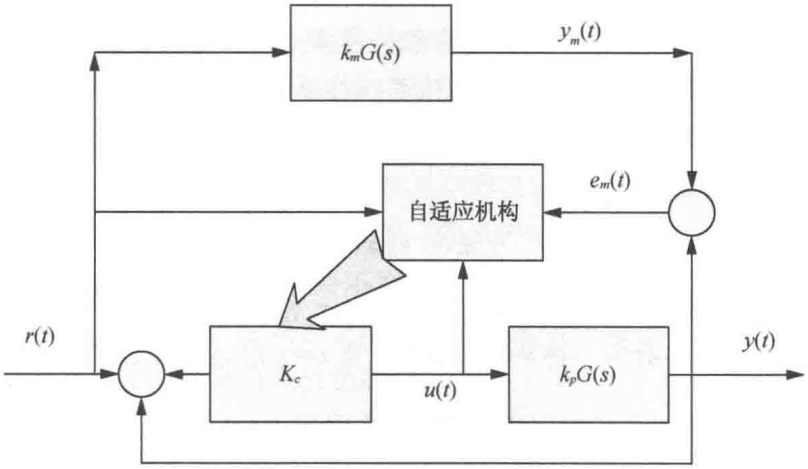


图 2-2-1　MIT 方案框图

其中 $B=2B'$，对上式两端同时取导数，则

$$\dot{k}_c(t) = -Be(t)\frac{\partial e(t)}{\partial k_c} \tag{2-2-3}$$

当 $G(s)=z(s)/R(s)$，系统的开环传递函数为

$$\omega_e(s) = (k_m - k_c k_p)\frac{z(s)}{R(s)} = \frac{e_m(s)}{r(s)} \tag{2-2-4}$$

对上式两边取拉普拉斯反变换，可得

$$R(p)e(t) = (k_m - k_c k_p)z(p)r \tag{2-2-5}$$

对式(2-2-5)两边对 k_c 求偏导数并结合参考模型可得

$$\frac{\partial e_1}{\partial k_c} = -k_p\frac{z(p)}{R(p)}r(t) = -\frac{k_p}{k_m}\frac{y_m(t)}{r(t)}r(t) = -\frac{k_p}{k_m}y_m(t) \tag{2-2-6}$$

则该设计的自适应规律为

$$\dot{k}_c(t) = -B\frac{k_p}{k_m}y_m(t)e(t) = -\beta y_m(t)e(t) \tag{2-2-7}$$

其中自适应增益 $\beta=-Bk_p/k_m$。

从式(2-2-7)中，不难发现，实现该自适应律的信号比较容易获取。但是，该方法存在明显的缺点，即该方案并不能保证系统的稳定性，需要对该系统进行稳定性分析和验证。

2.2.2　基于 Lyapunov 稳定性的设计方法

为了克服 MIT 方案难以保证系统稳定性的缺陷，1966 年德国学者 P. C. Parks 首先提出了采用 Lyapunov 稳定性理论推导的 MRAC 自适应控制律，以保证系统的全局稳定性。该理论的提出为自适应控制的发展开启了新的篇章。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com