

全国普通高校自动化类专业规划教材



**A**daption Control and Model Predictive Control

# 自适应控制与预测控制



徐湘元 © 编著

Xu Xiangyuan

清华大学出版社



全国普通高校自动化类专业规划教材

**A**daption Control and Model Predictive Control

# 自适应控制与预测控制



徐湘元 ©编著

Xu Xiangyuan

清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是控制学科初学者的升级教程,主要讨论了当对象与模型失配,且干扰对系统产生影响时控制系统如何及时调整控制策略,抵御变异和扰动,维持系统控制质量不变。

本书内容包括系统辨识、模型参考自适应控制、确定性自校正控制、随机性自校正控制、基于非参数模型的预测控制、广义预测控制、预测控制形式的多样性等。具体涉及控制意图、基本结构、控制算法和应用等。此外,本书针对具体问题,进行相应的控制设计与 MATLAB 仿真。

本书取材典型、内容实用、表述清晰、结合实际解决问题,具有一定的可读性。可供自动化类专业高年级本科生和控制类研究生选用,也可作为相关技术人员进修或提高的自学读本。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

自适应控制与预测控制/徐湘元编著. —北京:清华大学出版社,2017

(全国普通高校自动化类专业规划教材)

ISBN 978-7-302-44922-5

I. ①自… II. ①徐… III. ①自适应控制—高等学校—教材 ②预测控制—高等学校—教材  
IV. ①TP13 ②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 213064 号

责任编辑:曾 珊

封面设计:傅瑞学

责任校对:焦丽丽

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:保定市中国画美凯印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:16.25

字 数:390千字

版 次:2017年1月第1版

印 次:2017年1月第1次印刷

印 数:1~1500

定 价:35.00元

产品编号:063068-01

经典的PID控制可以解决生产实践中大部分控制问题,但对于一些实际问题却无能为力。例如,当被控对象因环境或工艺等原因而发生改变时,或者受到较为严重的干扰时,由于控制器模式固定,控制系统难以及时作出相应调整,从而导致控制性能变差,甚至系统不稳定。因此,有必要研究解决这类问题的技术和方法。

应该说,解决处在变化中的对象或过程的控制问题,通常是比较棘手的问题。目前,主要采用的方法有自适应控制和模型预测控制。前者属于现代控制,后者属于先进的计算机控制。虽然两者出现有先后之别,但是它们在处理这类问题上,有一些相似的理念和相近的方法,所以将这两部分内容放在一起,便于学习与比较。

本书在内容上分为自适应控制和模型预测控制两部分,具体安排如下。第1章分别介绍了自适应控制与预测控制的基本情况,包括产生背景、发展、特点、分类和应用等,并揭示了自适应控制与预测控制的联系与区别。第2章讨论了系统辨识,虽然被控对象包括结构和参数两部分,但本章着重关注参数及其变化,作为在线感知过程变化的工具,它将为两类控制提供实时参数变化信息。第3章阐述了模型参考自适应控制,除了重点在连续时间的自适应控制外,还涉及离散时间的自适应控制。第4章和第5章分别讲述了确定性和随机性自校正控制系统,其内容既是自适应控制的重点之一,又是模型预测控制的基础。第6章论述了来自工业领域的预测控制:基于脉冲响应的模型算法控制和基于阶跃响应的动态矩阵控制。第7章谈到了广义预测控制,它既是自校正控制的继续和深入,又有鲜明的特点。第8章介绍了预测控制形式的多样性,包括状态空间形式、极点配置形式、PID结构形式和综合性预测控制等。第9章讨论了约束预测控制,以及模型预测控制的应用。

本书的附录A提供了书中部分例题的仿真程序,希望通过它给读者提供具体而有启发性的参考,以加深读者对相关概念和原理的理解,增强应用能力。由于编程是非常灵活而富有技巧的工作,除了需要熟悉所涉及的问题外,还要求掌握相关的编程知识和技巧。附录A提供的程序仅起抛砖引玉的作用,可作为从理论到应用进程中的一环来研究与练习。附录B提供了专业术语中英文对照。

由于自适应控制和预测控制有千丝万缕的联系,建议按本书的顺序学习。如果学时有限,或者学习有具体的目的性,可以根据需要选择学习。下面是几套选择方案,可供参考。

(1) 全学方案:从头至尾,每章都学。

(2) 自适应控制方案:依次学习第1.1节、第2章、第3章、第4章、第5章。

(3) 预测控制方案:依次学习第1.2节、第2章、第6章、第7章、第8章、第9章。

由于作者在相关领域的研究和实践有限,以及对有关资料和信息掌握不足,书中难免存在不足和错误,欢迎广大读者和专业同仁提出建议和批评意见,以便有机会再版时加以改进和提高。

徐湘元

2016年3月

“自适应控制和预测控制”是继“自动控制原理”之后的升级内容，理论上有一定的难度。学习者除了掌握相关概念、原理、特性和方法之外，应将这些内容应用到实践中，解决所面临的问题。但是，这是一件极具挑战性的工作。

理论联系实际是一种学习的好方法。鉴于这两种控制面对的问题都比较复杂，学习者一方面要掌握理论要点，另一方面还要结合实际加以应用。但是，一般实验室难以提供这样的条件，此时，计算机仿真实验是更好的选择。这是一种经济、方便和高效的实践方式。虽然仿真不等于实践，但是它离实际不远了。

本书在控制算法应用与仿真编程方面有过初步的摸索和探讨，公布了一些通常不便公开的程序，以便进一步引导读者将理论应用于实际，尽快提高实践技能。具体内容见书中主要例题，以及附录 A 中相关的仿真程序。其特点如下：

(1) 针对例题的具体要求，设计自适应控制器或预测控制器，实现预期的控制目的。用书中提供的控制思路或算法，编写相应的仿真程序，整定参数，调试运行。

(2) 将理论用程序来实现，检验理论的有效性，同时积累编程、调试经验，提高动手能力，从实践的角度加深对理论的理解与认识。

(3) 读者从仿真中受到启发，在未来的工作实践中可举一反三，有利于突破与创新。

此外，随着学习与研究的深入，学习者在专业领域需要阅读和参考大量的文献和资料，尤其是用英语表达的重要信息。有意识地积累一些英语专业术语，对于快速阅读与获取用英语表述的信息是很有必要的。因此，本书挑选了自适应控制和预测控制中基本的、主要的英文专业术语（见附录 B），供读者熟悉和掌握，为早日流利地阅读英文资料、开拓视野、提高学习与工作效率提供帮助。

第 1 章 绪论	1
1.1 自适应控制	1
1.1.1 自适应控制及其特征	1
1.1.2 自适应控制系统的原理性结构	2
1.1.3 自适应控制系统的分类	3
1.1.4 自适应控制的发展	5
1.2 预测控制	7
1.2.1 预测控制的产生与发展	8
1.2.2 预测控制的特点	9
1.2.3 预测控制的分类	10
1.2.4 预测控制的应用	11
1.3 不同类型的控制方法	11
本章小结	12
思考题与习题	12
第 2 章 系统辨识	13
2.1 系统辨识的概念	13
2.1.1 关于系统辨识	13
2.1.2 系统辨识的一般步骤	13
2.1.3 控制中系统辨识的特点	14
2.2 白噪声序列与控制模型	15
2.2.1 白噪声序列	15
2.2.2 控制模型	15
2.3 最小二乘参数估计法	22
2.3.1 批处理最小二乘法	22
2.3.2 递推最小二乘算法	26
2.3.3 具有遗忘因子的递推最小二乘法	29
2.3.4 递推增广最小二乘法	29
2.4 参数估计的梯度算法	32
2.4.1 确定性系统参数估计的梯度算法	32
2.4.2 随机逼近递推算法	33
2.5 模型结构的确定	37
2.6 闭环系统辨识	38
2.6.1 问题的提出	38

2.6.2	什么是闭环系统可辨识 .....	38
2.6.3	闭环状态下的辨识方法和可辨识条件 .....	39
	本章小结 .....	41
	思考题与习题 .....	42
<b>第 3 章</b>	<b>模型参考自适应控制 .....</b>	<b>44</b>
3.1	简单自适应控制系统 .....	44
3.1.1	直接自适应控制 .....	44
3.1.2	间接自适应控制 .....	48
3.2	用梯度法设计自适应控制系统 .....	49
3.2.1	MIT 控制规律 .....	49
3.2.2	MIT 的规范化算法 .....	51
3.3	李雅普诺夫稳定性与正实函数 .....	53
3.3.1	李雅普诺夫稳定性理论概要 .....	53
3.3.2	正实函数 .....	58
3.4	用稳定性方法设计自适应控制系统 .....	61
3.4.1	具有可调增益的模型参考自适应控制系统 .....	61
3.4.2	状态变量可测时的模型参考自适应控制系统 .....	63
3.5	利用输入输出的模型参考自适应控制系统 .....	67
3.5.1	被控对象相对阶为 1 的情况 .....	68
3.5.2	被控对象相对阶为 2 的情况 .....	75
3.6	离散时间模型参考自适应控制系统 .....	80
3.6.1	简单离散时间自适应控制系统 .....	80
3.6.2	离散时间自适应控制系统的一般系统结构 .....	84
3.6.3	基于误差模型的离散时间模型参考自适应控制 .....	85
	本章小结 .....	88
	思考题与习题 .....	88
<b>第 4 章</b>	<b>确定性自校正控制 .....</b>	<b>90</b>
4.1	自校正控制系统设计概要 .....	90
4.1.1	系统设计的任务 .....	91
4.1.2	自校正控制系统设计原理 .....	91
4.1.3	自校正控制系统的两种方法 .....	92
4.2	极点配置设计与间接自校正控制 .....	92
4.2.1	极点配置设计 .....	92
4.2.2	间接自校正控制 .....	98
4.3	基于 PID 结构的间接自校正控制 .....	101
4.3.1	PID 控制器的表达形式 .....	101
4.3.2	基于 PID 结构的间接自校正控制 .....	102

4.4 具有前馈补偿的零极点配置自校正控制 .....	103
4.4.1 过程参数已知时的前馈补偿零极点配置 .....	103
4.4.2 间接自校正控制算法 .....	104
4.5 直接自校正控制 .....	105
4.5.1 最小相位系统的情况 .....	106
4.5.2 非最小相位系统的情况 .....	110
4.5.3 直接和间接自校正混合算法 .....	111
本章小结 .....	111
思考题与习题 .....	112
<b>第5章 随机性自校正控制</b> .....	<b>113</b>
5.1 最小方差自校正控制 .....	113
5.1.1 预测模型输出与最优输出估计 .....	113
5.1.2 最小方差控制 .....	115
5.1.3 最小方差自校正控制算法 .....	117
5.2 广义最小方差自校正控制 .....	120
5.2.1 广义最小方差控制 .....	120
5.2.2 闭环系统性能讨论 .....	122
5.2.3 广义最小方差自校正控制直接算法 .....	124
5.3 多变量自校正控制 .....	127
5.3.1 输出预测 .....	127
5.3.2 控制律与闭环特性 .....	129
5.3.3 控制算法 .....	131
5.4 模型参考自适应控制与自校正控制的关系 .....	132
本章小结 .....	133
思考题与习题 .....	133
<b>第6章 基于非参数模型的预测控制</b> .....	<b>134</b>
6.1 内模控制 .....	134
6.1.1 内模控制的基本结构与控制特性 .....	134
6.1.2 内模控制器设计 .....	137
6.1.3 其他环节的设计 .....	139
6.2 基于脉冲响应的模型算法控制 .....	141
6.2.1 概述 .....	141
6.2.2 模型输出预测 .....	142
6.2.3 最优控制律 .....	143
6.2.4 闭环特性分析 .....	147
6.2.5 几个参数的讨论 .....	150
6.3 基于阶跃响应的动态矩阵控制 .....	152



## VIII 自适应控制与预测控制

6.3.1	预测与优化	152
6.3.2	闭环系统特性分析	155
6.3.3	例题	157
6.4	稳定性	159
6.4.1	控制器	159
6.4.2	反馈滤波器	163
	本章小结	165
	思考题与习题	165
<b>第7章</b>	<b>广义预测控制</b>	<b>166</b>
7.1	广义预测控制基本方法	166
7.1.1	控制模型与最优多步预测	167
7.1.2	Diophantine 方程的递推求解	168
7.1.3	控制律及间接控制算法	170
7.1.4	系统分析	173
7.1.5	控制举例与仿真研究	177
7.2	一般广义预测控制	180
7.2.1	基本型的扩展	180
7.2.2	具有误差修正的广义预测控制	182
7.2.3	引入滤波器的广义预测控制	183
7.3	单值广义预测控制	184
7.3.1	预测长度和控制长度	184
7.3.2	控制律	185
7.3.3	输出表达式与稳态误差	186
7.4	广义预测控制的直接算法	186
7.4.1	预测与最优控制	186
7.4.2	直接控制算法	188
7.5	广义预测控制的稳定性与鲁棒性	190
7.5.1	稳定性	190
7.5.2	鲁棒性	193
	本章小结	195
	思考题与习题	195
<b>第8章</b>	<b>预测控制形式的多样性</b>	<b>196</b>
8.1	基于状态空间的预测控制	196
8.1.1	模型预测	196
8.1.2	优化控制	199
8.1.3	反馈校正	200
8.1.4	状态观测器	200

8.2 基于极点配置的广义预测控制 .....	201
8.2.1 广义输出预测误差 .....	201
8.2.2 最优控制律 .....	202
8.2.3 极点配置 .....	203
8.2.4 控制算法 .....	205
8.3 具有 PID 结构的广义预测控制 .....	206
8.3.1 控制规律 .....	206
8.3.2 PID 控制器参数 .....	208
8.3.3 控制算法 .....	208
8.4 预测控制定性综合理论简介 .....	209
8.4.1 预测控制的优化时域 .....	210
8.4.2 从有限时域到无限时域的拓展 .....	211
8.4.3 相邻周期之间性能函数的比较 .....	212
本章小结 .....	214
思考题与习题 .....	214
<b>第 9 章 其他</b> .....	215
9.1 具有约束的预测控制 .....	215
9.1.1 问题的提出 .....	215
9.1.2 已用过的约束措施回顾 .....	216
9.1.3 对控制与输出的约束 .....	217
9.1.4 约束优化方法 .....	218
9.2 预测控制的应用 .....	222
9.2.1 应用概述 .....	222
9.2.2 设计要点 .....	223
9.2.3 应用举例 .....	223
本章小结 .....	229
<b>附录 A 部分例题仿真程序</b> .....	230
<b>附录 B 专业术语中英文对照/Technical Terms in English and Chinese</b> .....	240
<b>参考文献</b> .....	243

**【内容提示】** 自适应控制和预测控制是控制领域中两类具有相当活力的控制方式,被大量应用于较为复杂的控制对象中。本章将分别介绍它们产生的背景、含义、特征、分类和应用等基本情况,最后对这两类控制的联系与异同进行揭示。无疑,这些陈述和讨论对后续内容的学习具有铺垫和引领作用。

## 1.1 自适应控制

随着社会生产的发展与进步,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,对控制精度的要求越来越高,由此产生的问题集中表现在以下几个方面:

(1) 由于建模技术水平、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很大的差别,模型往往过于简略或粗糙,即存在未建模动态。

(2) 多种多样的随机干扰作用在系统上,并且不可测量、不可预料。

(3) 由于工作环境、工作负载、工作条件的变化,引起被控过程或被控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,使得问题盘根错节,处理起来十分棘手。

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。如果沿用从前对付单输入单输出线性定常系统的 PID 控制(Proportion Integration Differentiation Control),实在是力不从心。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。而实际情况是,被控对象结构或参数随环境变化而变化,输入有变化(有干扰),但是控制器却没变,所以在这种情况下,要维持原定的控制性能已就很困难,甚至是不可能了。

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,如果能及时测得它们的信息,并根据此信息按一定的设计方法,自动地调整控制决策、修改控制器结构或参数,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,那将是人们刻意寻求的、较为理想的控制系统。这种思想正是自适应控制产生的初衷。

### 1.1.1 自适应控制及其特征

自适应控制的英文是 Adaptive Control,其字面意思是“适应控制”,但现在习惯译为自适应控制。关于它的定义,控制界流传着很多版本,目前还没有一个具有权威性的说法。不过,从自适应控制的工作机理和作用来看,可将其表述为:通过测量输入输出信息,实时地

## 2 自适应控制与预测控制

掌握被控对象和系统误差的动态特性及其变化,并据此及时调节控制器参数,使系统的控制性维持最优,或满足预定要求。

自适应控制是一种现代控制方式,它有 3 条显著的特征:

(1) 不断监视被控对象,测量被控量的变化,实时掌握变化信息,及时发现不确定性可能带来的风险。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) 根据发现的问题,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满足预定要求。这是前两步的结果,也是要达到目的。即在外部条件发生变化,或者系统受到干扰的情况下,系统能够自动地抵御这种变化或干扰,保持原控制性能不变。

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也在日益扩大。

### 1.1.2 自适应控制系统的原理性结构

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。本章只能就其原理性结构和工作机制作简单的介绍,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:一个是带有被控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。

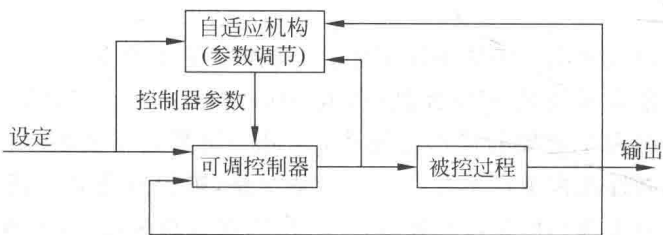


图 1-1 自适应控制系统方框图

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,而自适应控制系统此时却能有所作为。首先,自适应机构通过输入能检测到这种变化,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,或者说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,将对它进行深入讨论。

自适应控制的主要任务是要设计一个随环境的变化而变化的自适应控制规律,而与自适应控制规律有关的理论问题主要有:系统的稳定性、参数的收敛性和性能的鲁棒性。

### 1.1.3 自适应控制系统的分类

为了揭示控制系统内部相互之间的关系和特点,便于认识和学习,有必要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,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,可分为直接自适应控制(Direct Adaptive Control)和间接自适应控制(Indirect Adaptive Control);按结构可分为前馈自适应控制(Feed-forward 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, STC)、模型参考自适应控制(Model Reference Adaptive Control, MRAC)和其他自适应控制。这是因为前两种自适应控制已经各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。下面对这种分法作简单的介绍,以建立自适应控制的初步概念。

#### 1. 自校正控制系统

自校正控制也称作参数估计自适应控制,它有两种形式:间接自校正控制(Indirect Self-tuning Control)和直接自校正控制(Direct Self-tuning Control)。间接自校正控制系统由被控过程、过程模型参数估计器(Parameter Estimator)、控制器参数计算器和可调整控制器组成,系统方框图如图 1-2 所示。

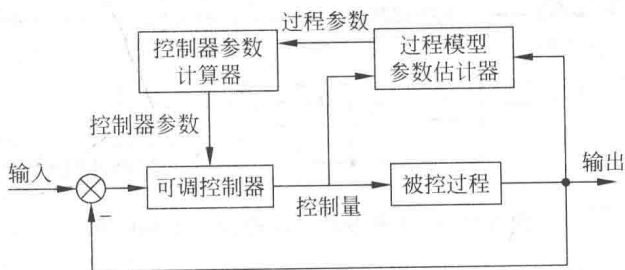


图 1-2 间接自校正控制系统方框图

过程模型参数估计器(又称辨识器)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;后者称为可调整控制器,它给出具体的控制量大小。当过程参数未知或变化时,过程模型参数辨识器都能给出过程参数(估计值),并分别由控制器参数计算器和可调整控制器计算出控制参数和控制量,最后将控制量施加给过程。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。于是,过程的部分未建模和参数变化,能通过过程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 控制、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相互搭配,又可组成多种形式的自校正控制系统。

## 4 自适应控制与预测控制

直接自校正控制系统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控制器,进行控制量的计算,系统方框图如图 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。

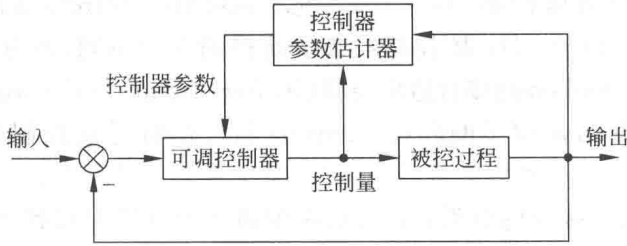


图 1-3 直接自校正控制系统方框图

### 2. 模型参考自适应控制系统

模型参考自适应控制是另一类应用很广泛的形式,它有多种结构模式,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,  $e = y_m - y$  为广义输出误差,  $y_r$  为输入量。

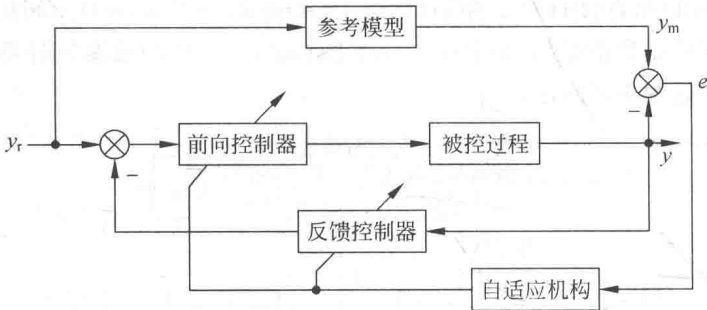


图 1-4 模型参考自适应控制系统方框图

由于系统的不确定性,一般  $y(t) \neq y_m(t)$ ,从而有  $e(t) = y_m(t) - y(t) \neq 0$ ,于是驱动自适应机构发挥作用,调节控制器参数,使  $e$  趋向减小,或为零。此时,对象或者过程的实际输出近似达到,或达到期望输出。这里参考模型不一定是实际硬件,它可以是计算机构成的过程数学模型。

在模型参考自适应控制中,要使闭环系统的特性与参考模型的特性一致,关键是设计好自适应机构的自适应算法,使广义误差被消除,同时保证系统有一定的稳定性。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(Gradient Method)、牛顿-拉夫森法(Newton-Raphson Method)、变尺度法(Variable Metric Method)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(广义误差)。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。

模型参考自适应控制可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。

### 3. 其他型自适应控制系统

凡是未列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。

#### 1.1.4 自适应控制的发展

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 教授和其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,是一种早期的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 Butchart 和德国学者 Parks 在 1966 年相继提出用李雅普诺夫稳定性理论,法国学者 Landau 于 1969 年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 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。Narendra 等人于 1974 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 Åström 和 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 Clarke 和 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 Edmunds 首次提出了极点配置自校正技术,Astrom 等人(1978 年)也对其进行了研究。而 Borrisson(1979 年)、Koivo(1980 年)和 Prager(1980 年)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 Narendra、Morse 和澳大利亚的 Goodwin 做了许多研究工作。Edgart(1979—1980 年)和 Landau(1981 年)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 20 世纪 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起来,自适应控制技术的应用也呈现增多的趋势。

实践产生了理论,理论指导新的实践,新的实践又检验和完善了理论。自适应控制的发展也离不开理论与实践的这种依赖关系。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。

1974年,在24英寸的光学跟踪望远镜中,Gilbart和Winston利用模型参考自适应控制把跟踪精度提高了6倍;1974年,Borrison和Syding在200kW的矿石破碎机中采用自校正控制,把产量提高了10%;1975年,在年产13万吨纸的纸机中,Cegrall和Hedquist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;1978年,Dumont和Belanger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,所以1979年,Kallstrom等人在35.5万吨的油轮上采用自校正驾驶控制,使速度提高1%;1980年,Amerongen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。

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。例如,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,而且也用在多回路和复杂的控制系统中。

六十多年来,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,虽然已经获得了结论,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,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(Lyapunov Stability Theory)和波波夫超稳定理论(Popov Stability Theory)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,自适应控制技术也很不成熟、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以及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。当人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工作,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。例如,将传统的PID控制与自适应控制相结合,形成PID自适应控制,使控制性能大大提升;将模糊逻辑和神经网络技术与自适应控制理念相融合,形成基于模糊逻辑的自适应控制和基于神经网络的自适应控制,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进步。

(2) 控制算法的发展。针对自适应控制中的一些主要问题,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,未来将不断有新的思路和实验出现。

(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,以及算法的收敛性等问题,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) 非线性自适应控制。非线性不确定系统是相当复杂的一类系统,目前对它们的控制方法十分有限。非线性系统的不确定可分为两种情况:一是参数化不确定,即参数不确定,表现为未知常(向)量,或者时变(向)量,这些变量又有慢变和快变之分;二是非参数化不确定,包括未建模动态、建模误差、外界干扰等。相对于参数不确定而言,非参数不确定的控制具有更大挑战性。Backstepping控制方法对这类系统具有较好的针对性,预计会进一步发展。

(5) 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现代控制策略,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。

## 1.2 预测控制

预测控制的全称是模型预测控制(Model Predictive Control),它是起源于20世纪70年代后期的一种充满活力的控制形式。经过四十年多年的发展,现在已经形成了比较成熟的控制模式和算法。目前,在不易建立精确数学模型且较为复杂的工业生产过程控制中发挥着积极的作用,并向其他工业领域延伸。

进入20世纪60年代以来,现代控制理论的发展引起了人们的广泛关注,它以状态空间为基础,在系统辨识和参数估计、最优控制、自适应控制等方面取得了多项积极的成果,并在航天和航空领域获得了成功的应用。但是,将这些现代控制理论用于工业过程控制却遇到了不少的问题,主要表现在这样几个方面:

(1) 现代控制理论通常需要被控对象或过程精确的数学模型,才能取得较好的控制效果。而实际对象或过程往往是非线性、多输入多输出,且相互耦合的复杂系统,现实中获得的数学模型一般是在一定程度上对原对象或过程的简化与近似。即便费了九牛二虎之力获得较为精确的数学模型,实际操作起来,也很费劲或繁琐,难以推广使用。

(2) 工业过程往往存在结构或参数上的变化,这种不确定的变化会给控制性能带来较大的负面影响,如性能指标不达标,或者偏离优化值,甚至引发系统不稳定。这就需要系统能根据这些变化及时调整控制策略或控制参数,以维持原系统品质不变。

(3) 工业生产是一种经济行为,要求生产过程在满足技术指标的同时,付出的代价应尽