

161

TP273
254

信息技术丛书

自适应控制系统

谢新民 丁 锋 编著



A1004456

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

自适应控制是研究具有一定程度不确定性系统的控制理论和方法,本书系统地介绍了自适应控制的基本理论知识和应用实例。主要内容包括:连续系统和离散系统模型参考自适应控制的基本原理和设计方法,系统参数估计方法,自校正控制算法,自适应 PID 控制和神经网络控制技术等。

本书讲述了自适应控制领域的基本内容和最新研究成果,内容丰富,论述简练,可以作为高等院校自动控制类和相关专业的教材,也可供工程技术人员参考。

书 名: 自适应控制系统

作 者: 谢新民 丁 锋 编著

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者: 北京四季青印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 **印张:** 15 **字数:** 359 千字

版 次: 2002 年 7 月第 1 版 2002 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-05227-1/TP·3302

印 数: 0001~3000

定 价: 21.00 元

《信息技术丛书》

出版说明

人们称当今的时代为信息时代。信息科学技术的快速发展和广泛渗透已经成为现今社会的一个重要的时代特征。人类社会的生产活动和生活质量,比以往任何时代,都更加得益于和依赖于信息技术的成就和发展。自动化是信息技术领域的主要组成部分之一,包括信号和信息处理、模式识别、知识工程、控制理论、自动化技术、传感技术、自动化仪表、系统工程、机器人控制、计算机控制与应用、网络技术等在内,都和信息科学与技术有着直接和密切的关系,几乎涉及到了信息的检测、分析、处理、控制和应用等所有的方面。正是基于当今时代特点和科技发展态势这个大视野,结合自动化类专业人才培养模式及教学内容体系的改革,我们规划和组织了这套丛书的编写和出版。这套丛书的读者,定位为自动控制、过程自动化、计算机、电子工程、电气工程、动力工程和机械自动化等系科的高年级大学生和研究生,以及工作于这些领域和部门的科学工作者和工程技术人员。

十年前,我们曾经组编和出版过一套《信息、控制与系统》系列教材,产生了比较大的社会影响,其中的许多著作至今仍然为国内很多高等学校用作教材,并为广大相关的科技人员作为进修和自学读物。现在组编和出版的这套《信息技术丛书》,从一定意义上可以说,就是先前的那套系列教材的发展和延伸,以反映新的进展和适应新的需求,匹配于变化了的时代和发展了的科技。列入这套丛书中的著作,大都是清华大学自动化系等开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有在多年教学经验基础上新编而成的教材,也有原系列教材中的部分教材的修订版本。总体上,这套丛书仍将保持原系列教材的求新与求实的风格,力求反映所属学科的基本理论和新近进展,力求做到科学性和教学性的统一,力求体现清华大学近年来在相应学科和领域中科学研究与教学改革的成果。

我们希望这套丛书,既能为在校大学生和研究生的学习提供内容较新和论述较为系统的教材,也能为广大科技人员的继续学习与知识更新提供适合的和有价值的参考书。我们同时热忱欢迎,选用这套丛书的老师、学生和科技工作者提出批评和建议。

《信息技术丛书》编委会

1999年10月

《信息技术丛书》编委会

主 编 李衍达 郑大钟

编 委 金以慧 边肇祺
陈禹六 杨家本
周东华 蔡鸿程

责任编辑 蔡鸿程 王一玲

前 言

自适应控制包括模型参考自适应控制和自校正控制两个分支。前者是 20 世纪 50 年代建立起来的,它是通过自适应机构来克服系统模型参数的不确定性;后者是瑞典学者 Åström 1973 年提出的,它是通过在线估计系统模型参数,进而修改控制器的参数,以使系统适应环境的变化。到 70 年代末和 80 年代初,李雅普诺夫稳定性理论和鞅收敛定理在自适应控制中的成功应用,使得基于稳定性分析的模型参考自适应控制系统的设计得到了蓬勃发展,形成模型参考自适应控制的完整理论体系和设计方法;鞅收敛定理由于在研究自校正控制系统的稳定性有独到之处,使得基于参数估计的自校正控制系统研究取得了突破性进展。随着计算机技术的发展,自适应控制的应用领域也日益扩大,自适应控制已成为一个极其活跃的研究领域,各种自适应控制策略相继问世,其理论研究成果和应用成功例子不断涌现。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和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 8 章。第 1 章介绍了自适应控制的基本概念、自适应控制系统的构成原理和主要类型,以及自适应控制理论的发展概况。第 2 章和第 3 章分别针对连续系统和离散系统,介绍了模型参考自适应控制(MRAC)的设计方法,内容包括用局部参数最优化理论设计 MRAC 系统,用李雅普诺夫稳定性理论设计 MRAC 系统等。第 4 章详细地阐述了系统辨识的基本方法,内容包括常规最小二乘法、增广最小二乘法等,以及作者新近提出的一些辨识方法,如辅助模型最小二乘法、递推广义增广最小二乘法、参数和状态联合估计方法、参数随系统可测扰动量变化的广义时变系统的泛参数估计方法、基于信息压缩阵的阶次和参数同时辨识方法、多新息辨识方法等。第 5 章从最优控制的角度讨论了自校正控制系统的设计问题,内容包括最小方差和广义最小方差自校正调节器、极点配置自校正调节器及其算法等。第 6 章介绍了一些 PID 调节器参数整定方法,内容包括自校正 PID 参数自整定、基于过程响应特性参数的 PID 自整定方法等。第 7 章研究了神经网络自适应控制系统的性能,内容包括人工神经网络控制器的构造方法、网络训练的反向传播算法,重点介绍了基于自适应极点配置的自适应共振 II 型神经网络控制器的设计方法。第 8 章简单地综述了(时变)系统辨识的一些参数估计方法,包括遗忘梯度算法、卡尔曼滤波算法、有限数据窗最小二乘法或限定记忆最小二乘法等,从实际应用的角度指出了研究时变参数估计的有界收敛性的重要性,建立了研究时变系统辨识算法有界收敛性的数学工具,即鞅超收敛定理,并用它分析遗忘因子最小二乘法参数估计的有界收敛性。此外还分析了时不变系统参数估计的投影算法、最小二乘法、随机梯度算法的收敛性,以及它们构成的自校正控制的收敛性。

本书前六章介绍了自适应控制领域的一些基本概念和基本知识,其目的是为读者尽快了解本学科的前沿打下基础,这部分内容可供大学本科生选读。第 7 章和第 8 章属于较深入的内容,适合研究生阅读。书中一些理论问题的提出,以及证明思路和方法,对于培养科学工作者的创新能力大有裨益。本书的先修课程为线性代数、概率论和自动控制理论。

本书是根据作者在清华大学自动化系讲授的《自适应控制》讲义的基础上改编而成,编写时参阅了大量文献资料,书中反映了作者新近的一些科研成果。书中第4章、第8章和附录由丁锋编写,第1章由丁锋和谢新民合写,其余章节由谢新民编写,书中部分仿真由王新完成,全书由丁锋定稿。

由于水平有限,缺点和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2002年1月于清华园

主要符号说明

$\text{col}[\mathbf{X}]$	将矩阵 \mathbf{X} 按列的次序排成的列向量
const	有限常数
$\text{det}[\mathbf{X}]$	矩阵 \mathbf{X} 的行列式, 即 $\text{det}[\mathbf{X}] = \mathbf{X} $
$\text{diag}[*, *, \dots, *]$	对角矩阵
$\text{dim}\boldsymbol{\varphi}(t)$	表示 $\boldsymbol{\varphi}(t)$ 的维数, 若 $\boldsymbol{\varphi}(t) \in R^n$, 则 $\text{dim}\boldsymbol{\varphi}(t) = n$
$E[*]$	数学期望(均值)
$E[* F_i]$	条件期望(均值)
$\exp(x)$	指数函数, $\exp(x) = e^x$
$f(t) = o(g(t))$	表示 $g(t) \geq 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{f(t)}{g(t)} = 0$
$f(t) = O(g(t))$	表示 $g(t) \geq 0$, 存在 $M > 0$ 满足 $ f(t) \leq Mg(t)$
\mathbf{I} 或 \mathbf{I}_n	\mathbf{I} 表示适当维数单位阵, \mathbf{I}_n 表示 n 阶单位阵
\inf	下界
\lim	极限符号
$\lim \sup$	上界极限符号
$\ln(*)$	以 e 为底的自然对数
$\max(*, *, \dots, *)$	$(*, *, \dots, *)$ 中最大者
$\min(*, *, \dots, *)$	$(*, *, \dots, *)$ 中最小者
$\mathbf{P}(t)$	协方差矩阵
R	实数域
R^n	n 维实欧几里德(Euclidean)空间
$R^{m \times n}$	所有 m 行 n 列矩阵构成的空间
$\text{sgn}(x)$	符号函数, $\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$
\sup	上界
$\text{tr}[\mathbf{X}]$	矩阵 \mathbf{X} 的迹, 即 \mathbf{X} 的对角元之和
$ \mathbf{X} $	当 \mathbf{X} 为矩阵时, $ \mathbf{X} $ 表示 \mathbf{X} 的行列式
$\ \mathbf{X}\ $	矩阵 \mathbf{X} 的范数, 定义为 $\ \mathbf{X}\ ^2 = \text{tr}[\mathbf{X}\mathbf{X}^T]$ 或 $\ \mathbf{X}\ ^2 = \lambda_{\max}[\mathbf{X}\mathbf{X}^T]$ 或其他
\mathbf{X}^T	矩阵 \mathbf{X} 的转置
\mathbf{X}^*	(复)矩阵 \mathbf{X} 的共轭转置
z^{-1}	Z 变换算子或单位后移算子, $z^{-1}y(t) = y(t-1)$

δ_{ij}	Kronecker delta 函数, $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$
θ 或 $\theta(t)$	时不变或时变参数向量(或参数矩阵)
$\hat{\theta}(t)$	参数向量(矩阵) θ 或 $\theta(t)$ 在 t 时刻的估计
$\bar{\theta}(t)$	参数估计误差, 定义为 $\bar{\theta}(t) = \hat{\theta}(t) - \theta$ 或 $\bar{\theta}(t) = \hat{\theta}(t) - \theta(t)$
$\lambda_{\max}[\mathbf{X}]$	矩阵 \mathbf{X} 的最大特征值
$\lambda_{\min}[\mathbf{X}]$	矩阵 \mathbf{X} 的最小特征值
$\sigma_v^2(t)$ 或 σ_v^2	噪声 $\{v(t)\}$ 的方差
$\sigma_w^2(t)$ 或 σ_w^2	噪声 $\{w(t)\}$ 的方差
$\varphi(t)$	信息向量
\otimes	Kronecker 积或直积, 若 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in R^{m \times n}$, $\mathbf{B} = [b_{ij}] \in R^{p \times q}$, 则 $\mathbf{A} \otimes \mathbf{B} = [a_{ij} \mathbf{B}] \in R^{mp \times nq}$, 一般 $\mathbf{A} \otimes \mathbf{B} \neq \mathbf{B} \otimes \mathbf{A}$

目 录

主要符号说明	XI
第 1 章 概论	1
1.1 自适应控制的任务	1
1.2 自适应控制的有关定义	2
1.3 自适应控制的发展概况	3
1.4 自适应控制系统的主要类型	4
1.5 自适应控制的主要理论问题	5
参考文献	7
第 2 章 连续系统模型参考自适应控制	10
2.1 模型参考自适应控制系统的各种结构	10
2.2 模型参考自适应系统的分类	13
2.3 模型参考自适应控制系统的数学描述	15
2.3.1 并联模型参考自适应控制系统的数学描述	15
2.3.2 串-并联模型参考自适应控制系统的数学描述	16
2.3.3 串联模型参考自适应控制系统的数学描述	17
2.3.4 直接的和间接的模型参考自适应控制系统的数学描述	18
2.4 用局部参数最优化理论设计模型参考自适应控制系统	20
2.4.1 具有可调增益的模型参考自适应控制系统的设计	20
2.4.2 并联模型参考自适应控制系统的设计	24
2.5 用李雅普诺夫稳定性理论设计模型参考自适应控制系统	27
2.5.1 李雅普诺夫稳定性理论概述	27
2.5.2 基于状态变量的模型参考自适应控制系统的设计	33
2.5.3 基于广义误差和状态观测器的模型参考自适应控制系统的设计	38
习题	49
参考文献	50
第 3 章 离散系统模型参考自适应控制	51
3.1 离散模型参考自适应控制系统的数学描述	51
3.1.1 离散系统的输入输出模型	51
3.1.2 离散系统的状态空间模型	53
3.1.3 离散模型参考自适应控制系统的数学描述	54

3.2	离散系统的稳定性定理	55
3.2.1	离散系统的李雅普诺夫稳定性定理	55
3.2.2	离散系统的正实引理	55
3.3	稳定的离散时间自适应控制器	56
3.3.1	自适应控制器的结构	57
3.3.2	自适应误差模型的稳定性分析	59
	习题	60
	参考文献	60
第4章	系统参数估计	61
4.1	随机信号的描述与分析	61
4.1.1	随机过程的基本概念及其数学描述	61
4.1.2	白噪声的性质及其产生方法	65
4.2	最小二乘类参数估计方法	68
4.2.1	最小二乘参数估计及其递推算法	68
4.2.2	遗忘因子最小二乘法	72
4.2.3	增广最小二乘法	73
4.2.4	辅助模型最小二乘法	75
4.2.5	广义最小二乘法	77
4.2.6	广义增广最小二乘法	80
4.2.7	辅助变量法	82
4.2.8	参数和状态联合估计	84
4.3	随机梯度参数估计方法	86
4.3.1	估计 CAR 模型参数的随机梯度算法	86
4.3.2	估计 CARMA 模型参数的随机梯度算法	88
4.4	系统阶次辨识	90
4.4.1	残差分析判阶法	90
4.4.2	相关分析判阶法	93
4.5	基于最小二乘的阶次和参数同时辨识方法	95
4.5.1	AR 模型的信息压缩阵的定义及其特性	96
4.5.2	CAR 模型的信息压缩阵的定义及其特性	97
4.6	多新息辨识方法	99
4.6.1	多新息辨识算法	99
4.6.2	衰减激励条件下的一致参数估计	101
4.7	广义时变系统的泛参数估计方法	105
4.7.1	一类广义时变系统的辨识模型	105
4.7.2	泛参数估计方法	109
	习题	113
	参考文献	115

第 5 章 自校正控制	116
5.1 自校正调节器	116
5.1.1 闭环系统可辨识性条件.....	117
5.1.2 自校正调节器的最小方差控制策略.....	119
5.1.3 最小方差自校正调节器的特性.....	123
5.1.4 自校正调节器的算法.....	125
5.2 自校正控制器的广义最小方差控制策略	126
5.2.1 对控制量加以约束的自校正控制器.....	126
5.2.2 具有辅助模型的自校正控制器.....	128
5.2.3 自校正控制算法.....	130
5.3 极点配置自校正调节器	131
5.3.1 基本原理.....	131
5.3.2 极点配置自校正调节器的算法.....	132
5.3.3 迟延的辨识.....	133
5.4 极-零点配置自校正控制	134
习题.....	139
参考文献.....	140
第 6 章 PID 自整定调节器	141
6.1 用广义最小方差原理设计的 PID 自校正控制器	141
6.2 利用响应特性参数的 PID 自整定	144
6.2.1 具有参考模型的 PID 自适应调节器	144
6.2.2 一阶惯性加迟延系统的 PID 自整定	147
6.3 基于参数最优化原理设计的 PID 自校正调节器	150
6.4 采用稳定边界法的 PID 调节器自整定	151
6.4.1 相位裕量法.....	152
6.4.2 PID 调节器参数自整定方法	154
6.4.3 改进的 Ziegler-Nichols 整定公式	154
6.4.4 具有积分性能指标的 PID 参数整定方法	158
习题.....	161
参考文献.....	162
第 7 章 具有人工神经网络的自适应控制系统	163
7.1 神经网络概述	163
7.1.1 神经网络的分类.....	165
7.1.2 神经网络的几种重要模型.....	166
7.2 神经网络控制器的构造	166
7.2.1 神经网络控制器模型.....	166
7.2.2 反向传播算法.....	167
7.3 神经网络自适应控制系统	168

7.4 基于极点配置的自适应共振型神经网络控制器	175
参考文献	179
第8章 自校正控制系统的收敛性分析	180
8.1 参数估计的投影算法及其收敛性分析	180
8.2 确定性系统投影自校正控制的收敛性分析	186
8.3 递推最小二乘法的收敛性分析	188
8.4 随机系统最小二乘自校正控制的收敛性分析	194
8.5 随机梯度算法的收敛性分析	196
8.6 随机梯度自校正控制的收敛性分析	203
8.7 鞅超收敛定理与时变参数估计的有界收敛性	204
8.7.1 一些参数估计方法	205
8.7.2 鞅超收敛定理与遗忘因子最小二乘法的收敛性分析	206
习题	215
参考文献	216
附录 系统噪信比的计算	217
A.1 单输入单输出(SISO)系统的噪信比及其计算	217
A.2 多输入多输出(MIMO)系统的噪信比及其计算	221
主要缩略语	223

第 1 章 概 论

1.1 自适应控制的任务

在反馈控制和最优控制中,都假定被控对象或过程的数学模型是已知的,并且具有线性定常的特性。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。这种变化的例子很多,现列举如下。

(1) 飞机控制。超声速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、飞行速度的不同而有很大变化,一些参数的变化率可达 10% 至 50%。

(2) 导弹控制。导弹的质量和重心随燃料的消耗迅速变化。

(3) 过程控制。在一个连续生产的化工设备中,它的一些参数随环境温度和输入输出流量而改变;大型锅炉机组的过热蒸汽温度的动态参数随负荷变化而变化。

(4) 电力拖动。在造纸生产过程中,纸不断地卷使得卷纸筒的惯性不断地变化,为了保持传送中的纸张力不变,马达的转矩需要相应地改变。

(5) 船舶的航线控制。轮船或油轮传递函数的动态参数随船载、速度、吃水深度和环境(即波浪、风速、海潮等)的变化而有很大的变化。

(6) 冶金过程。同一冶炼炉的许多过程参数在不同工况下是不同的。这是因为初始条件不总是相同的,加入的原料无法做到精确的一致,而且在冶炼过程中参数随冶炼的反应物特性的变化而变化。

由以上所列举的许多工程实例中可知,特性变化因环境和工作条件改变很大,所以在设计控制系统时,我们要考虑下列几个实际问题:

(1) 由于环境、原料特性和生产量的变化,或因为各种物理系数改变而引起设备传递函数的阶次或参数值的改变;

(2) 各种各样的随机扰动;

(3) 输入信号类型、大小和特性的变化;

(4) 复杂的化学或生物反应过程的非线性特性;

(5) 相当大的纯迟延。

在发生这些问题时,常规调节器不可能得到好的控制品质。为此,需要设计一种特殊的控制系统,它能够自动地补偿在模型阶次、参数和输入信号方面非预知的变化。这就是自适应控制的任务。

自适应控制系统需要不断地测量系统的状态、性能或参数,从而“认识”或“掌握”系统当前的运行指标并与期望的指标相比较,进而作出决策以改变控制器的结构、参数或根据自适

应律来改变控制作用,以保证系统运行在某种意义下的最优或次最优状态。当然,按照这些要求设计的自适应控制系统比常规的调节器要复杂得多。但是,随着现代控制理论蓬勃发展所取得的一些成果,诸如状态空间分析法、系统辨识与参数估计、最优控制、随机控制和稳定性理论等等,为自适应控制的形成和发展提供了理论基础。另一方面,微处理机的迅速发展和它的价格性能比不断降低,为采用较为复杂的自适应控制创造了物质条件,使得自适应控制成功地应用于许多实际工程问题中。

1.2 自适应控制的有关定义

自适应控制有许多不同的定义,到目前为止尚未统一,争论也比较多,许多学者提出的定义都是同具体的自适应控制系统类型相联系的。有些定义比较流行,概念也清楚,下面加以介绍,以供参考。

1962年Gibson^[1]提出一个比较具体的自适应控制定义:一个自适应控制系统必须提供出被控对象当前状态的连续信息,也就是辨识对象;它必须将当前系统性能与期望的或最优的性能相比较,并作出使系统趋向期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,以驱使系统走向最优状态。这三方面的功能是自适应控制系统所必须具备的功能。

1974年法国学者Landau^[2]也提出了一个针对模型参考自适应控制系统的自适应控制定义:一个自适应系统,将利用其中的可调系统的各种输入状态和输出来度量某个性能指标;将所测得的性能指标与规定的性能指标相比较;然后,由自适应机构来修正可调系统的参数或者产生一个辅助的输入信号,以保持系统的性能指标接近于规定的指标。定义中提出的可调系统一般由被控制对象和调节器组成,它可以通过修改它的内部参数或输入信号来调整其性能。

综合以上定义可知,自适应控制系统应该有如下功能:

- (1) 在线进行系统结构和参数的辨识或系统性能指标的度量,以便得到系统当前状态的改变情况;
- (2) 按一定的规律确定当前的控制策略;
- (3) 在线修改控制器的参数或可调系统的输入信号。

由这些功能组成的理论性自适应控制系统如图1.2.1所示。它由性能指标(IP)的测量、性能指标的比较与决策、自适应机构,以及可调系统组成,它的功能完全符合自适应控制定义所要求的目标。

除了自适应控制的定义以外,本书所涉及的另外一些较重要的定义在这里也一并列举出来。

(1) 自组织控制。当控制过程在演变时,依次通过观测系统的可达输入和输出量所得到的信息,对过程进行有效的控制,使得系统的不确定性有所减小,这个控制系统称为自组织控制系统。

(2) 学习控制系统。一个系统,如果能对一个过程的未知特性的有关信息进行学习,并将所得的经验用于未来的决策和控制以便系统的性能得到逐步改善,则这种系统称为学习控制系统。

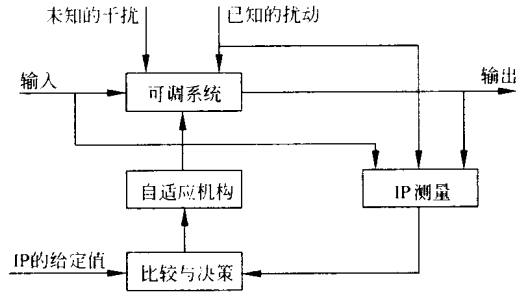


图 1.2.1 自适应控制系统原理图

根据学习时是否需要接收外部信息,学习过程可分为监督学习和无监督学习。监督学习的外部信息可以对系统工作质量进行评价,控制系统工作符合要求则“奖”,相反则“罚”。控制器据此评价信息,要么维持或加强原有的控制作用,要么改变或削弱原有的控制作用,以便改进学习控制系统的性能。无监督学习即为自学习,它不接收任何外部信息,控制系统只能经由统计估计和观测等手段积累经验,以便确定所需的控制策略。这种学习方式的先验信息甚少,要经过多次迭代才能逐步逼近最优性能,所以学习时间较长。

1.3 自适应控制的发展概况

自适应控制系统首先由 Draper 和 Li^[3] 在 1951 年提出,他们介绍了一种能使性能特性不确定的内燃机达到最优性能的控制系統。这种类型的控制能自动地达到最优的操作点,所以称为最优控制或极值控制。而自适应这一专门名词是 1954 年由 Tsien^[4] 在《工程控制论》一书中提出的。其后,在 1955 年 Benner 和 Drenick^[5] 也提出一个控制系统具有“自适应”的概念。

自适应控制发展的重要标志是在 1958 年 Whitaker^[6] 及其同事设计了一种自适应飞机飞行控制系统。该系统利用参考模型期望特性和实际飞行特性之间的偏差去修改控制器的参数,使飞行达到最理想的特性,这种系统称为模型参考自适应控制系统(MRAC 系统)。此后,此类系统因英国皇家军事科学院的 Parks^[7] 利用李雅普诺夫(Lyapunov)稳定性理论和法国 Landau^[8] 利用 Popov 的超稳定性理论等设计方法而得到很大的发展,使之成为一种最基本的自适应控制系统。1974 年,为了避免出现输出量的微分信号,美国的 Monopoli^[9] 提出了一种增广误差信号法,因而使由输入输出信号设计的自适应控制系统更加可靠地应用于实际工程中。

1960 年 Li 和 Van Der Velde^[10] 提出的自适应控制系统,它的控制回路中用一个极限环使参数不确定性得到自动补偿,这样的系统称为自振荡的自适应系统。

Petrov 等人^[11] 在 1963 年介绍了一种自适应系统,它的控制输入由开关函数或继电器产生,并以与参数值有关的系统轨线不变性原理为基础来设计系统。这种系统称为变结构系统。

在 1960—1961 年, Bellman^[12] 和 Fel'dbaum^[13] 分别在美国和苏联应用动态规划原理设计具有随机不确定性的控制系统时,发现作为辨识信号和实际信号的控制输入之间存在对

偶特性,因此而提出对偶控制。

Åström 和 Wittenmark^[14]对发展另一类重要的自适应控制,即自校正调节器(STR)作出了重要的贡献。这种调节器用微处理机很容易实现。这一有创见的工作得到各国学者普遍的重视,并且把发展各种新型的 STR 和探索新的应用工作推向新的高潮,使得以 STR 方法设计的自适应控制系统在数量上遥遥领先。在这些发展中以英国的 Clarker^[15]和 Gawthrop^[16]在 1976 年提出的广义最小方差自校正控制器最受重视,它克服了自校正调节器不能用于非最小相位系统等缺点。为了既保持自校正调节器实现简单的优点,又有较好的直观性和鲁棒性,1976 年英国的 Edmunds 首先提出^[16]极点配置自校正控制技术,Åström, Westerberg 和 Wittenmark 在这方面也做了一些研究^[18~20]。

近年来许多学者在自适应控制系统的稳定性、收敛性和设计方法上又做了大量的有益工作,其中有美国的 Narendra^[21~26],Morse^[27]和澳大利亚的 Goodwin^[28,29]。我国学者陈翰馥^[30]在收敛性分析方面也作出很大贡献。

1.4 自适应控制系统的主要类型

关于自适应控制系统的分类也和定义一样,众说纷纭,尚未统一。本书只限于介绍已被普遍认可的、应用较为广泛的自适应控制系统的类型。自适应控制系统有两类,一类是模型参考自适应控制系统(model reference adaptive control system, MRACS),或模型参考自适应系统(model reference adaptive system, MRAS);另一类是自校正控制系统(self-tuning control system),这类自适应系统的一个主要特点是在线(on-line)辨识对象数学模型参数,进而修改控制器的参数。

1. 模型参考自适应控制系统

模型参考自适应控制系统的典型结构如图 1.4.1 所示。在这个系统中,采用了一个称为参考模型的辅助系统。加到可调系统的参考输入 r 同时也加到这个参考模型输入端,参考模型的输出或状态可以用规定的或期望的性能指标设计。为了比较规定的性能指标和可调系统实测的性能指标,可用减法器将参考模型和可调系统的输出或状态直接相减,得到广义误差信号 e 。自适应机构按一定的准则利用广义误差信号来修改可调系统的调节器参数,或产生一个辅助输入信号,使广义误差的某个泛函指标达到极小。当可调系统特性与参考模型特性渐近逼近,广义误差就趋于极小或下降为零,调节过程结束。

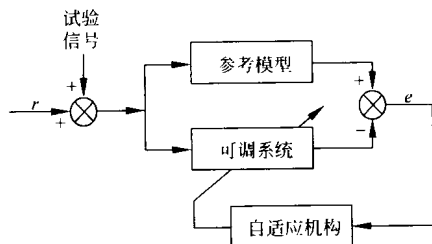


图 1.4.1 模型参考自适应控制系统的结构

这类自适应控制系统设计方法的理论基础为局部参数优化方法、李雅普诺夫稳定性理论和波波夫(Popov)超稳定性理论。

2. 自校正控制系统

自校正控制系统的典型结构如图 1.4.2 所示。这类系统的特点是必须对过程或被控对象进行在线辨识(递推参数估计),然后用过程参数 $\theta(t)$ 估计值和事先规定的性能指标,在线地综合出调节器的控制参数 $\theta_c(t)$,并根据此控制参数产生的控制作用对被控对象进行控制。经过多次的辨识和综合调节参数,使系统的性能指标渐近地趋于最优。

此类自适应控制系统设计方法的理论基础为系统辨识和随机最优控制理论。

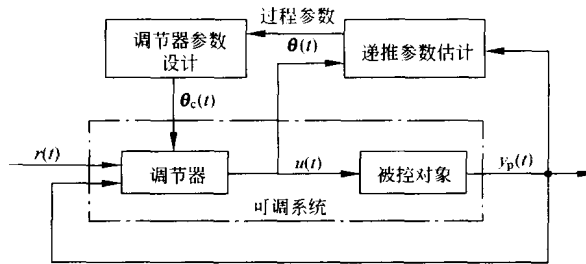


图 1.4.2 自校正控制系统的结构

自寻最优控制系统也可归于自校正控制系统一类。自寻最优控制系统^[31]是一种能自动搜索和保持系统输出位于极值状态的控制系统。以前这种系统称为极值控制系统。这种系统中被控对象是非线性的,有一个或多个最优运行状态的极值点。由于许多工业对象的极值点在运行中会发生漂移,所以必须采用自寻最优控制策略自动保持极值的运行状态。这类系统在燃烧过程中广泛地应用。

1.5 自适应控制的主要理论问题

无论是时不变线性系统,还是时变非线性系统,它们与自适应机构所构成的自适应控制系统都是非线性时变系统,分析这类系统的性能是很困难的。它的收敛性研究一直是控制领域的理论难题,至今还存在一些理论问题有待解决。下面就自适应控制系统的稳定性、收敛性、鲁棒性(robustness)及性能指标等方面简单论述目前自适应控制理论的发展现状。

1. 稳定性

稳定性问题是一切控制系统的核心问题。因此,设计自适应控制系统应以保证系统全局稳定为原则。目前,对于确定性线性时不变系统的模型参考自适应控制,常常借助于李雅普诺夫稳定性理论和波波夫超稳定性理论等数学工具导出自适应控制律,这样设计的自适应控制系统无疑是稳定的。但是,对于随机系统或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律会不断诞生,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