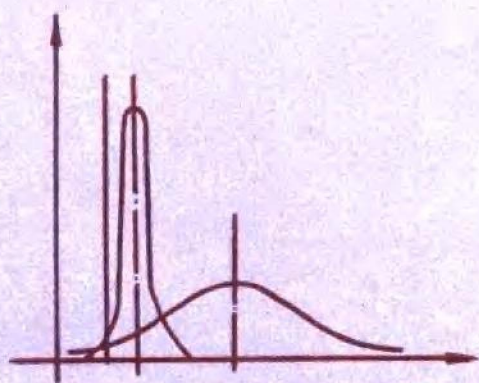
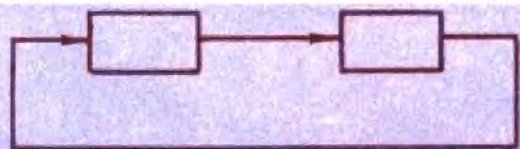


华东师范大学出版社



自适应控制理论及其应用

袁震东 编 著



自适应控制理论及其应用

袁震东 编著

华东师范大学出版社

自适应控制理论及其应用

袁震东 编著

华东师范大学出版社出版

(上海中山北路3663号)

新华书店上海发行所发行

宜兴南漕印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32

印张: 10.125 字数: 260千字

1988年3月第一版

1988年3月第一次印刷

印数: 1—5,000本

ISBN 7-5617-0037-7/O·002 定价: 2.05元

内 容 简 介

本书由浅入深地介绍自适应控制理论。内容包括:模型参考自适应控制、自校正控制原理、直接优化目标函数的自适应控制以及自适应控制系统的收敛性、稳定性理论。对于理论分析中的重要方法——常微分方程方法(ODE方法)和鞅收敛方法作了较为详细的讨论。对于目前值得进一步研究的时变系统自适应控制、对偶控制、广义预测控制及自适应系统稳健性(Robustness)问题作了介绍和探讨。

本书可作为理工科高等院校控制理论专业、自动控制专业、系统工程专业高年级学生的教材或研究生教材。对于从事过程控制工作的工程技术人员,也是一本好的参考书。

序 言

控制理论旨在研究动态系统的分析与综合。所谓综合，指控制系统的设计。在反馈系统设计中，系统的数学模型是已知的，人们按照实际需要定出一个性能指标。例如，二次型性能指标，然后求出使得性能指标达到最小值的控制量，这就是最优控制。如果系统受到随机干扰，人们可以建立系统的随机模型，然后用一定方法来设计控制器。如考虑在高斯白噪声干扰下的线性系统，性能指标是二次型的，那么人们可以利用已经成熟的 LQG 理论设计控制系统。这种控制系统是由被控过程的状态反馈控制器以及 Kalman 滤波器组成的。Kalman 滤波器是一种观察器，利用它可以从系统的输出估计状态变量的值。这些设计方法的共同特点是：系统的模型方程(包括其中所含的参数)在设计反馈系统时是已知的。一种与上述方法完全不同的设计方法称为自适应控制设计方法。在设计自适应控制系统时，不假定系统数学模型的参数是已知的，恰恰与上面的设计相反，我们假定系统数学模型中的参数是未知的。在自适应系统设计中，系统的数学模型与调节器(或控制器)的参数都是可以改变的。自适应控制的这一特点，使得它可用于系统模型参数未知或系统所处环境变化的情况，使它成为一种崭新的设计思想。

追溯历史，自适应控制的研究始于五十年代，是由于研究在不同飞行高度飞行器的控制器设计而引起的。五十年代后期以来，随着控制理论的发展和电子数字计算机的迅速发展，自适应控制在七十年代有了突飞猛进的进展，形成了独特的方法与理论。因此，其真正的历史不过十多年。自适应控制理论发展大致可以分为如下三个阶段。

第一阶段是奠基阶段。1958年, R. Kalman 提出自校正调节器的概念,六十年代,模型参考自适应控制发展了起来,到1973年, K. J. Åström 和 B. Wittenmark 发表了著名的论文,证明了自校正调节器的自校正性。从此,自校正调节不再是一种技巧,而是一种理论。在一定条件下,自校正调节器将收敛于某种最优控制器。

第二阶段着重于自适应控制系统收敛性和稳定性的分析。在这一阶段, L. Ljung 讨论了闭环系统辨识算法的收敛性问题。Goodwin、Ramadge、Caines 和 Egardt 讨论了自适应控制系统的稳定性问题。我国学者陈翰馥在这两方面也做了许多出色的工作。

第三阶段是自适应控制系统稳健性的研究阶段。

1981年,美国麻省理工学院的博士 Rohrs 提出了自适应控制系统在出现未建模(unmodelled)动态时,可以产生不稳定现象,指出了稳健性在自适应控制中的重要地位。近年来, Åström 多次发表了论文,分析 Rohrs 的反例; Clarke 提出了广义预测控制,来增强自适应控制系统的稳健性 (Robustness); B. D. O. Anderson 则推崇平均法, Goodwin 企图用死区(Dead Zone)来增加稳健性。目前,自适应控制系统的稳定性问题尚未彻底解决。稳健自适应控制已成为国际上研究自适应控制的学者的中心课题。

自适应控制理论涉及的领域很广,它涉及到线性系统理论、非线性系统理论、随机控制、数字控制系统、系统辨识、计算机控制、人工智能等领域。它与微分方程的稳定性理论、鞅收敛定理、应用泛函分析、计算方法、随机过程统计等有着密切的关系。自适应控制中提出的许多问题,既有深刻的实际背景,又有重大的理论意义,因此,它的发展不能不引起控制理论界与应用数学界的关注。

鉴于自适应控制的发展现状,由于自适应控制问题的高度复杂性,想用一本书来囊括一切,这是不实现的。作为自适应控制的

理论书籍,本书主要包括了下列三方面的内容。

(一)目前自适应控制方面的书籍大多侧重于设计方法的探讨,缺乏系统的理论分析与推导。为了使读者理解自适应控制的本质,本书在阐述自适应控制系统设计思想的发展、常用自适应控制算法的同时,着重分析了自适应控制算法的收敛性和自适应控制系统的稳定性。

在自适应控制系统设计方面,本书注重自适应设计思想的介绍、设计方法的推导,使读者有源可寻。本书备有主要自适应控制系统的数字仿真与应用方面的实例,使读者了解这些控制器的适用范围和应用方法,以便在读者今后应用时,从中获得借鉴,同时也防止自适应控制的滥用。在自适应控制的理论分析方面,本书着重介绍了具有开创性、代表性的工作,尽量从基础着手,逐步深入。许多更精细的结果,应在此基础上参阅近代文献。对于理论分析中所用的数学方法,如在一般教科书中难以找到的,则在第二章中分专题作介绍。

(二)除了上述设计方法和理论分析的内容外,本书阐述了几种一般自适应控制书籍中较少提及、而笔者认为颇有发展前途的自适应控制方法,如陡变系统的自适应控制问题、对偶控制系统、广义预测自适应控制系统等。

(三)自适应控制的稳健性问题是当前正在研究的问题。本书最后部分对这个问题作了初步的介绍和探讨。

1984年以来,本书稿曾四次被作为华东师范大学数学系运筹学与控制理论专业研究生的教材及应用数学专业本科生的选修课教材。笔者在写作本书稿过程中参考了 L. 荣教授 1983 年在瑞典林雪平大学作的五次讲演(研究生课程),他的讲演对形成本书的骨架起了很大作用。

自适应控制器的设计是在一般控制理论与递推辨识的基础之上建立起来的。在学习本书之前,读者最好学过现代控制理论的基础知识(例如:华东师范大学控制理论教研室编的《现代控制理

论引论》，上海科学技术出版社，1984 年版）。本书中配有一定数量的习题，供读者练习，以加深对课文内容的理解。书后列有参考文献，读者可以从中找到需要进一步深入讨论的内容。这里还要指出，除了本书已经阐述的内容外，自适应控制系统的频域定性分析、连续时间自适应控制系统以及智能适应控制系统，也是应该引起重视的研究课题。

本书可供应用数学专业的高年级学生或控制理论专业方面的研究生作教材使用。教学时间约为 60 学时。如果我们只读第二章的 §1，第三、四章全部，第五章的 §1 以及第六章的 §1 和 §3，那么只用 30 学时就可以教完本书的最基本的内容。这些内容包括了基本自适应控制系统以及自适应控制理论的概貌。如果选读这些章节的话，本书也可以作为自动控制专业或系统工程专业的教科书使用。当然，本书也可作为从事过程控制或控制理论研究的工程技术人员的参考书。

在本书的写作过程中，华东师范大学数理统计系副教授汪振鹏对有关概率内容的章节作了审阅并提出了有价值的修改意见，华东师范大学数学系 84 届毕业生龚为民、吴清和芮政先提供了第四章的数字仿真例子，85 届的沈洁文同学在抄清整理上做了许多工作，在此一併致以衷心的感谢。

作者

1986 年 10 月于华东师范大学

目 录

第一章 引论	1
第二章 数学预备定理	
§1 Lyapunov 稳定性定理	12
§2 传递函数的正实性和正实性引理	20
§3 Goodwin 关键性技术引理	38
§4 概率空间及有关概念	40
§5 条件概率与条件数学期望	44
§6 离散鞅与 Doob 分解	48
§7 鞅收敛定理(一)	52
§8 鞅收敛定理(二)	58
第三章 递推辨识与系统仿真	
§1 线性系统的递推最小二乘辨识	66
§2 ARMAX 模型的递推辨识	75
§3 系统数字仿真	80
第四章 自适应控制系统	
§1 切普金学习系统	85
§2 连续时间模型参考自适应控制系统	96
§3 离散时间模型参考自适应控制系统	106
§4 自校正调节器	117
§5 自校正极点配置	148
第五章 自适应控制系统的统一模式	
§1 误差模型	157
§2 参数估计与自适应控制的统一模式	163
第六章 自适应控制系统的稳定性和收敛性	
§1 严正实条件的作用	168
§2 闭环参数辨识收敛性证明的ODE方法	174
§3 用投影算法的自适应控制	182
§4 用最小二乘法的自适应控制	194

§5 用随机梯度法的自适应控制·····	197
第七章 自适应控制的应用	
§1 应用自适应控制系统的优越性·····	210
§2 怎样建立自适应控制系统·····	211
§3 应用实例·····	212
第八章 时变系统的自适应控制	
§1 时变系统的数学描述·····	224
§2 时变系统的参数辨识与状态估计·····	228
§3 Θ 在 $\Delta(t)$ 已知时的估计·····	229
§4 $\Delta(t)$ 在 Θ 已知时的估计·····	232
§5 双边等价假设·····	235
§6 时变系统自适应控制中的研究课题·····	242
第九章 自适应控制的进一步发展	
§1 多变量自校正调节器·····	244
§2 对偶控制·····	255
§3 广义预测控制·····	261
§4 稳健自适应控制·····	272
参考文献·····	292
索引·····	308

第一章 引 论

自适应控制与其说是一种新的技术、新的方法,不如说它是一种新的思想。近十多年来,它的迅猛发展与所取得的显著成果已引起控制论界很大关注。

什么叫“自适应控制”?至今还没有统一的定义,甚至该不该从控制理论中划出自适应控制来也还有争议。但是这并没有阻挡这一类控制理论的发展。韦氏 (Webster) 字典指出:“适应指去改变其自身,使得其行为适合于新的或者已经改变了的环境。”自适应控制这个名词,至少在五十年代初就开始运用了(如 1950 年 Aldwell 的自适应调节器)。

多年来,许多学者已经作了许多尝试来定义自适应控制,如 Truxal (1964)、Saridis、Mendel 和 Nikolic (1973)。直观地讲,自适应调节器可以改变其自身的行为来影响过程动态或环境的变化。

苏联学者切普金(Ya.Z. Tsypkin)在《学习系统的理论基础》一书中引用了马克·吐温的一段话来说明自适应:“一只猫在烧热的灶上烫了一次,这只猫再也不敢在灶上坐了,即使这只灶是冷的。”切普金的解释强调了自适应控制系统适应过程的机械性。

我们认为,要从自适应这个词的意义上定义自适应控制是相当困难的。如果人们从自适应控制所解决的问题以及它与一般反馈控制系统的比较来看,就不难发现真谛了。也就是说,要搞清自适应控制在本质上是什么的问题。

一般反馈控制系统的典型结构如图 1.1 所示。

假定图中被控过程 S 是离散时间系统,其状态方程和输出方程为

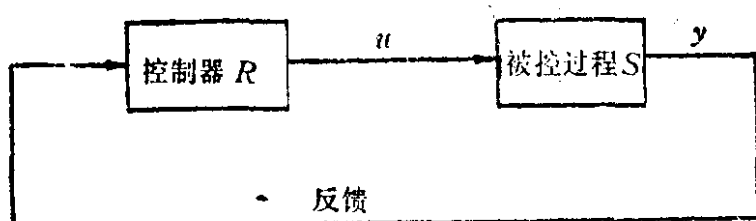


图 1.1 反馈控制系统框图

$$x(k+1) = G_1(x(k), u(k), \xi_1(k), k), \quad (1.1)$$

$$y(k) = G_2(x(k), \xi_2(k), k), \quad (1.2)$$

这里 $x(k)$ 表示状态变量 (可以是 n 维向量), $u(k)$ 表示输入量 (可以是 m 维向量), $\xi_1(k)$ 是状态方程中的随机干扰 (可以是 n 维随机向量序列)。在 (1.2) 中, $y(k)$ 表示输出量 (可以是 p 维向量), $\xi_2(k)$ 是观察随机误差 (可以是 n 维向量)。这里 k 表示时刻, 它只取整数值。

在本书中, 我们都假定 $x(k)$ 是有限维状态变量。这就是说, 我们所讨论的被控过程是一个集中参数的系统, 而不是分布参数系统。

随机最优控制理论 (Bellman 1961, Fel'dbaum 1965, Aoki 1967, Bertsekhes 1976) 是指求出一个控制律使得它最小化下列损失函数:

$$I(k_1) = \sum_{i=k_1}^{k_2} H(x(i+1), u(i), i), \quad (1.3)$$

其中 $H(i)$ 是一个标量函数, 它表示在每一个时刻 i 所形成的损失, $I(k_1)$ 称为损失函数或目标函数。随机最优控制问题是在动态方程 (1.1) 和 (1.2) 的约束下, 最小化目标函数 (1.3)。

人们在处理这一问题时, 常常用一个非随机的准则

$$J = E[I] \quad (1.4)$$

来代替损失函数 (1.3)。这是一个非线性的随机控制问题。

非线性随机控制是一个十分困难的问题, 至今没有系统的、完整的解决方法。如果由 (1.1)、(1.2) 和 (1.3) 表示的随机最优控制满足下列假设:

(1) G_1, G_2 都是线性函数 (即被控过程是离散时间的线性系统);

(2) I 是二次型目标函数;

(3) $\xi_1(k), \xi_2(k)$ 都是高斯分布的随机向量序列,

这时(1.1)、(1.2)、(1.3)所表示的随机最优控制问题称为 LQG 问题。LQG 问题早已获得了圆满的解决(Åström, 1970)。这是因为 LQG 问题是可分离的、确定性等价的, 而且当 $j < k$ 时, $P(x(k)|y(k))$ 不依赖于 $u(j)$ (中立性)。

可分离性定义 如果(1.1)、(1.2)和(1.3)随机最优控制问题的最优控制律具有

$$u(i) = \hat{x}(i) \text{ 的函数} \quad (1.5)$$

形式, 那么我们称这个随机控制问题是可分离的。

可分离问题控制器的结构如图 1.2 所示。

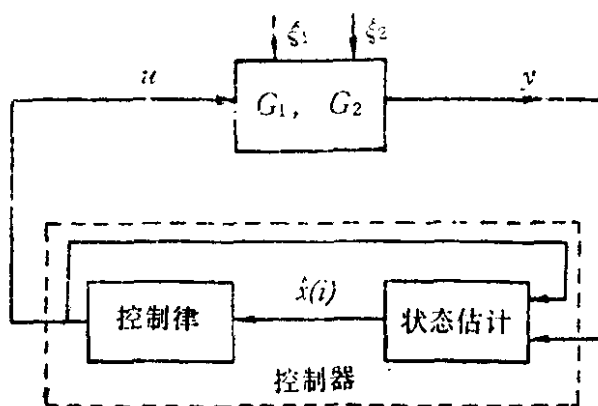


图 1.2 可分离随机控制问题控制器的结构

LQG 问题是一个可分离问题。

确定性等价的定义 如果由(1.1)、(1.2)和(1.3)所定义的问题的最优控制律可以写成

$$u(i) = \hat{x}(i) \text{ 的确定性函数,} \quad (1.6)$$

那么这个随机控制问题称为确定性等价的。

LQG 问题的最优控制可以分离成两个组成部分: 一个状态

估计器,由它产生系统状态向量的最优估计(如 Kalman 滤波估计);一个线性反馈控制律,它是状态估计的线性函数。

由此可知,LQG 问题是确定性等价的。

到目前为止,在由(1.1)、(1.2)和(1.3)描述的问题中, $P(x(i)|y(i))$ 与 $u(j)$ ($j < k$)是独立的、或是可分离的、或是确定性等价的充分必要条件还没有获得.LQG 问题所给的条件(1)、(2)、(3)是一个充分条件。

但是一个自适应控制问题是不满足 LQG 条件的,即使被控过程的本身可以用线性系统来描述。例如一阶线性系统

$$y(i) + ay(i-1) = bu(i-1) + \xi(i) + c\xi(i-1), \quad (1.7)$$

用三个状态变量来表示(1.7)中三个不确定的系数(在自适应控制问题中,系统方程的参数是未知的,因此也可以说是不确定的),

$$x_1 = -c, \quad x_2 = b, \quad x_3 = c - a,$$

第四个状态变量

$$x_4 = y - \xi,$$

把上述状态变量代入(1.7),可以得到一个非线性状态方程

$$x_4(i+1) = x_1(i)x_4(i) + x_2(i)u(i) + x_3(i)y(i). \quad (1.8)$$

(1.8)中 x_1 x_4 包含不确定的系数 c , $x_2 u$ 是双线性形式,它将使控制律的设计成为非线性问题(Mohler, 1973; Jacobs 和 Potter, 1976)。从上面的叙述可以看到,自适应控制问题是随机非线性控制问题,这是一个十分困难的问题。

为了进一步说明什么是自适应控制,我们将引用下列 L. Ljung(1983)给出的定义。

控制论的任务是找出合乎人们需要的控制器。控制器的设计可以看作是 S 到 R 的映照,这里 S 表示系统的集合, R 表示控制器的集合,

$$S \longrightarrow R \quad (1.9)$$

设 O 空间是观察空间(即由所有观察值组成的空间),那么

$$O \longrightarrow S, \quad (1.10)$$

从 O 到 S 的映照可以称为系统辨识。

自适应控制可以理解为从 O 空间到 R 空间的映照

$$O \longrightarrow R. \quad (1.11)$$

对于自适应控制的兴趣，最早是由航空问题引起的。人们发现，一般由图 1.1 结构的反馈控制器，对于在不同高度飞行的飞机和火箭，并不都给出满意的结果。困难发生在不同高度的响应特性有显著的变化，而图 1.1 的控制器只能与某一高度的响应特征相匹配，在不同的高度就不能匹配了。因此似乎需要一种更为成熟的控制器，它能随着响应特性的改变而改变控制器自身，这就是自适应控制器。这种情况也会在工业过程与经济系统中产生，因此具有一般性。在五十年代，人们作了许多具体的研究工作，但并没有形成统一的理论。

在六十年代，控制理论有了很大的发展。状态空间和稳定性理论的引进，对自适应控制理论的发展起了重要的作用。Bellman (1957, 1961) 引入了动态规划，1960、1961、1965 年，Feldbaum 引入了对偶控制，这些使人们逐步理解自适应控制。1971 年切普金指出，许多学习系统与自适应控制可以用统一的随机逼近的递推方程来表示。与此同时，在系统辨识与估计理论方面获得了很大进展 (Åström 和 Eykhoff, 1971)。

因此，到了七十年代，自适应控制的研究出现了一个高潮。近十多年的进展，主要是增进了人们对于自适应控制的理解。同时，微电子技术的革命性发展使得自适应控制的实施成为可能。经过人们十多年的艰苦研究，在自适应控制方面获得了巨大的进展。

至今有四种自适应控制方案已为人们所接受：

1. 增益程序控制 (Gain scheduling).

增益程序控制的概念是与飞行控制系统的发展联结在一起的。增益程序控制式自适应控制系统设计的关键是如何找到合适的程序变量。一般情况下，程序变量往往是根据系统的物理知识

来定的。例如在过程控制中,产品的生产速度可选作程序变量,因为系统的时间常数和时滞是反比于生产速度的。当程序变量选定以后,各种条件下的调节器参数也随之确定了。这时系统的性能与稳定性依赖于典型情况。

有时为了获得增益程序,人们设计了一些辅助系统,这样就使得控制系统变得十分复杂。增益程序控制的缺点在于它使用了开环补偿。它没有在遇到不正常情形下的反馈补偿。增益程序系统可以理解为在一个反馈控制系统中,反馈增益用前馈补偿来调整。增益程序的另一个缺点是系统设计必须花费很多时间。调节器的参数必须在许多工作情况下——加以确定。增益程序控制的优点是适应过程短、反应快,可以很快改变反馈系统,使之迅速响应过程的变化。其变化快速的极限决定于辅助测量对过程变化反应的快慢。

增益程序控制是否称作自适应控制,对这一点是有争论的,反对把它称为自适应控制的人认为,其参数变化是开环的,因而不能称为自适应控制。但无论如何,增益程序控制对于减少参数变化的影响是非常有用的,因此仍然为人们所采用。

2. 模型参考自适应控制系统 (Whitaker, Yamron 和 Kever, 1958)。

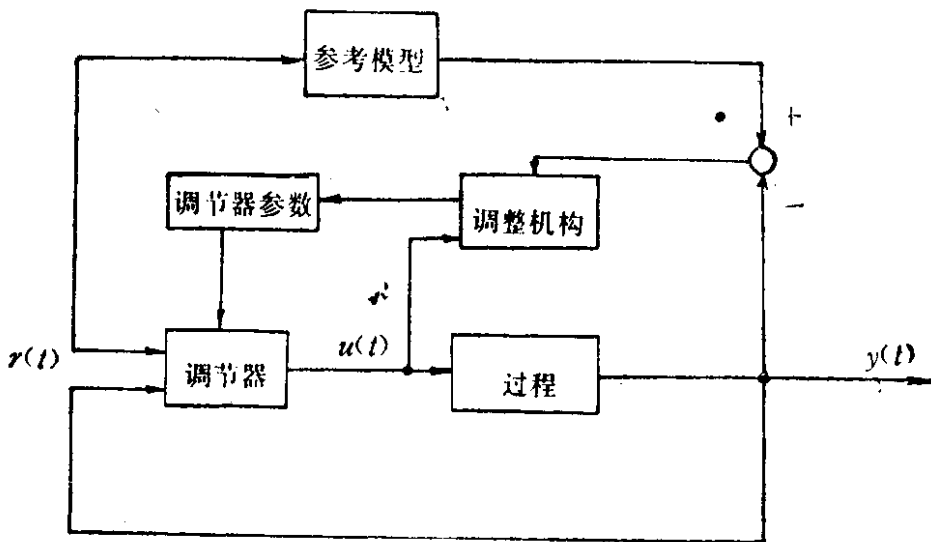


图 1.3 模型参考自适应控制框图

这种自适应系统之所以称为模型参考自适应系统,是因为其动机是想使过程的输出与模型的输出一致。应该注意的是,此时参考模型已是控制系统的一个部分。模型参考系统可以看作由两个控制回路组成。内回路(如图 1.3 所示)是过程与调节器,外回路是用以调整控制器或调节器的参数的。

下面的参数调整机理称为 MIT 法则

$$\frac{d\textcircled{S}}{dt} = -k \text{egrad} \textcircled{S} e, \quad (1.12)$$

其中 $\textcircled{S}$ 表示被调整的参数, e 表示误差。 grad 表示模型误差对于可调整参数的灵敏度,即 $\text{grad} \textcircled{S} e$ 表示 e 关于 $\textcircled{S}$ 的梯度。

由(1.12)可得

$$\textcircled{S}(t) = -k \int_0^t e(s) \text{grad} \textcircled{S} e(s) ds. \quad (1.13)$$

这一调整机构可以看作由三部分组成:第一是由输入输出计算出灵敏导数的滤波器,第二是一个乘法器,第三是一个积分器。这一结构对于许多自适应控制系统具有典型性。

模型参考自适应系统(MRAS)最早是由 Whitaker 与其合作者提出来的。Parks 于 1966 年作了进一步的研究,此外还有 Hang 和 Parks(1973)、Monopoli (1973)、Landau (1974) 以及 Ionesen 和 Monopoli (1977)。Hang 和 Parks 对这种系统作过较长期的研究。1979 年 Landau 总结了关于这种系统至 1978 年的工作。

3. 自校正调节器(STR).

自校正调节器也可以看作由两个控制回路组成:内环由过程与通常的线性反馈组成;外环负责调整调节器的参数(如图 1.4 所示)。

外环由参数估计器和调节器设计计算两部分组成,参数估计器执行递推估计任务。在图 1.4 中标有调节器设计的框,它表示对具有给定参数的系统进行在线设计。