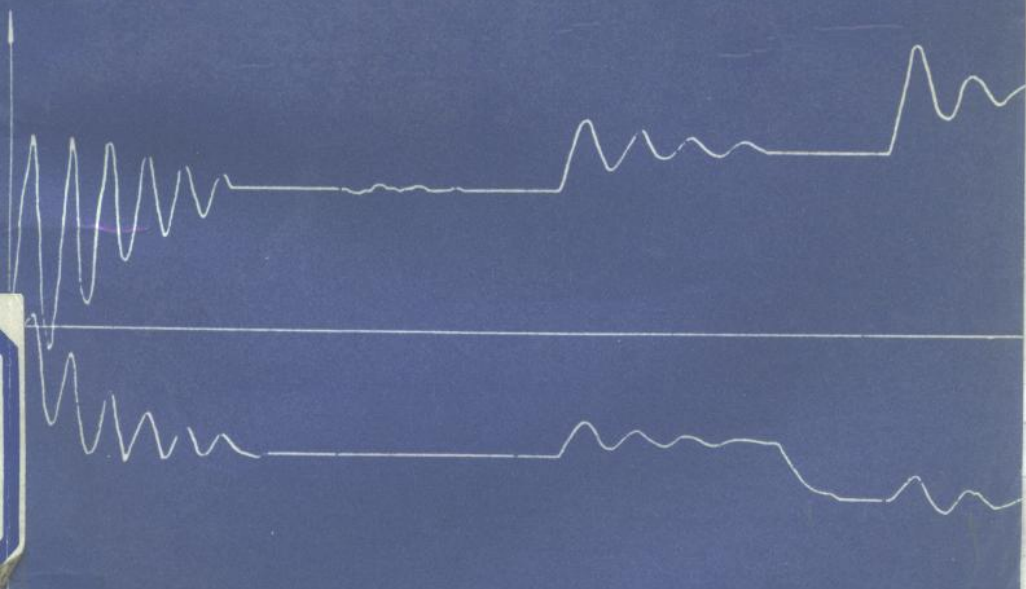


自适应控制技术 与应用

赵国良 姜仁锋 编著

ZISHIYING KONGZHI JISHU YU YINGYONG



人民交通出版社

1

15D-222
78

自适应控制技术与应用

赵国良 姜仁锋 编著

人民交通出版社

自适应控制技术与应用

赵国良 姜仁锋 编著

插图设计: 秦淑珍 正文设计: 乔文平 责任校对: 高琳

人民交通出版社出版发行

(100013北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

北京朝阳展望印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 13.125 字数: 346千

1991年5月 第1版

1991年5月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—3000册 定价: 9.50元

ISBN7-114-01118-0

U·00727

内 容 提 要

本书较全面地阐述了自适应控制系统的有关理论基础,各种自适应控制算法及其
实践应用。内容主要包括:稳定性和超稳定性,模型参考自 适 应 控制系统和参数估
计,参数估计自适应控制系统,船舶运动自适应控制系统。本书选材比较全面,系统
性强,叙述深入浅出。

本书可作为高等工科院校自动控制专业研究生和高年级大学生的教 材 或教学参
考书,对于从事自动控制领域的科学工作者和工程技术人员也有较大的参 考 和 实 用
价值。

JS452/33

前 言

自适应控制起源于50年代,它是自动化在工业生产领域内向广度、深度和高精度发展过程中出现的一种新技术。

30多年来,自适应控制技术的发展并不是一帆风顺的。早期的自适应控制方案由于稳定性问题曾导致整个系统工作的失败。然而,由于后人的不懈努力,再加上微型计算机的日益普及,现在自适应控制技术在理论上和应用上都有了很大的进展。自适应控制技术众多的研究课题和潜在的应用前景吸引着广大自动化工作者投身于这方面的开发工作。近十几年来,有关自适应控制技术的文章,报告和应用实例有如雨后春笋。

本书是在作者多年来为大学高年级学生和研究生讲授“自适应控制”课程的讲稿、讲义的基础上,经过多次修改而编写成的,其中也包括了作者和同事们在这个领域中所做的一些工作。

但是,作为一本书,既要把问题说清楚,又要把现有的各种自适应控制算法全部包括进去是很困难的。编写本书的目的是一方面要提供一些必要的理论基础和比较详尽地讲述自适应控制系统的一些基本算法,另一方面又要比已经出版的有关书籍包含有更多的自适应控制基本算法,以扩大读者的视野。因此,本书在选材方面作了比较认真的筛选,以使本书既可作为高年级本科生或研究生的教学用书,又可作为从事于自动化领域的科学工作者,生产技术人员自学或参考用书。

本书的第一章介绍自适应控制技术的由来,阐明自适应控制系统的基本原理和分类,对于它的发展历史和工业应用概况予以简单的回顾。第二章所介绍的稳定性和超稳定性(包含正实函数)是学习第三章和第四章模型参考自适应控制系统和参数估计的基

础, 所给出的有关定理证明将有助于对定理本身的理解和使用。第三章介绍模型参考自适应控制系统的三种设计方法: 参数局部优化设计方法, 稳定性设计方法和超稳定性设计方法。对后两种设计方法给出较详细的证明, 以便读者在实践中参照使用。第四章是参数估计的模型参考方法, 它是作为系统辨识理论中各种参数估计算法的一个扩充, 也是第五章有关算法的一个准备工作。第五章介绍参数估计自适应控制系统(又称自校正自适应控制系统)的各种算法, 如模型跟随, 最少拍, 最小方差, 极点配置, PID等方案。第三章和第五章是本书的重点。在这两章内, 除了介绍各种基本算法外, 还简单介绍有关自适应控制系统的鲁棒性问题。第六章介绍自适应控制技术在船舶运动控制系统中的应用, 它们是船舶自适应自动操舵仪和船舶自适应减摇鳍系统。

阅读本书时, 第二章的证明过程, 第四章全部和带++记号的各节或段落, 在初读时(或对高年级大学生)可以略去, 第六章可根据需要而定。

在本书的编写过程中, 作者得到了同事和学生们的关心和支持, 研究生们为书中的例题和习题作了大量的工作。特别是中国自动化学会理事、黑龙江省自动化学会理事长王广雄教授在百忙中抽空详细审阅了全书, 并提出了许多宝贵的意见和建议, 在此表示深切的谢意。

由于作者的水平和实践经验有限, 缺点和不足之处在所难免, 殷切希望读者批评指正。

作者

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 自适应控制的由来.....	(1)
第二节 自适应控制系统的分类及基本工作原理.....	(3)
第三节 自适应控制技术的发展和应用概况.....	(13)
第二章 稳定性和超稳定性	(17)
第一节 李雅普诺夫稳定性.....	(17)
第二节 正实函数.....	(29)
第三节 超稳定性.....	(40)
小结.....	(65)
习题.....	(65)
第三章 模型参考自适应控制系统	(69)
第一节 引言.....	(69)
第二节 参数局部优化设计方法.....	(74)
第三节 稳定性设计方法.....	(85)
第四节 超稳定性设计方法.....	(106)
第五节 模型参考自适应控制系统的鲁棒性问题.....	(134)
第六节 模型参考自适应控制系统数字仿真举例.....	(140)
小结.....	(142)
习题.....	(143)
第四章 参数估计的模型参考方法	(145)
第一节 连续模型的参数估计.....	(147)
第二节 离散模型的参数估计.....	(149)
第三节 参数估值的收敛性简介.....	(170)
第四节 参数估计数字仿真举例.....	(177)

小结	(179)
习题	(180)
第五章 参数估计自适应控制系统	(181)
第一节 确定性等效原理和分离原理	(182)
第二节 参数估计算法	(188)
第三节 模型跟随参数估计自适应控制系统	(202)
第四节 最少拍自适应控制系统	(215)
第五节 最小方差自校正调节器	(230)
第六节 广义最小方差自校正控制器	(242)
第七节 零极点配置自校正控制器	(264)
第八节 PID 自校正控制器	(284)
第九节 自校正控制器的鲁棒性问题	(292)
第十节 多输入多输出最小方差自校正调节器	(303)
第十一节 多输入多输出广义最小方差自校正控制器	(312)
第十二节 多输入多输出极点配置自校正调节器	(322)
第十三节 参数估计自适应控制系统数字仿真举例	(329)
小结	(331)
习题	(332)
第六章 船舶运动自适应控制系统	(334)
第一节 船舶运动及其干扰的数学模型	(334)
第二节 船舶自适应自动操舵仪	(346)
第三节 船舶自适应减摇鳍控制系统	(375)
小结	(382)
附录	(383)
附录 A 李雅普诺夫方程的计算机解法	(383)
附录 B 波波夫积分不等式求解	(395)
参考文献	(401)

第一章 概 论

“适应”(在自动控制系统中常称作“自适应”)这个名词对人们来说并不陌生,按照“辞海”中的解释,“适应性”是指“生物体随外界环境条件的改变而改变自身的特性或生活方式的能力”,因此,“适应”就是指这种变化的动作或行为。

自然界的生物必须适应它们所生活的环境条件才能得以生存。在我国成语中,也有“因人制宜,因时制宜,因地制宜”之说,这些都包含了“适应”(“自适应”)这个哲理。人类社会和自然界的进化过程就是一个不断适应和发展的过程。

在自动控制系统的设计中,采用“自适应”的设计思想的历史并不长。它起始于本世纪50年代,经过30年来的不断努力和探索,目前正处于发展和应用的兴旺时期。尤其是近十几年来微电子学的迅猛发展,使微型计算机的应用得到普及,为复杂的自适应控制算法提供了强有力而又廉价的手段,极大地促进了自适应控制在工业中的应用,并已显出其独特的优点。

第一节 自适应控制的由来

尽管自动控制技术可溯源于古代,例如,亚历山大时期的克泰希比斯水钟就是基于利用反馈来调节流量的原理而制成的。但是,对于控制理论的研究却是从19世纪才开始。当时是对带有调速器的蒸汽机的转速稳定问题进行了研究。在本世纪上半叶,控制理论的研究已取得丰硕的成果,逐步形成了经典控制理论的完整体系。它借助于传递函数的概念,在处理单输入单输出控制系统的分析和设计问题上取得了圆满的结果。直到今天,经典控制

理论仍为广大工程技术人员所使用。

从60年代起，建立在状态空间概念上的现代控制理论取得了很大进展，它不仅能用来解决单输入单输出控制系统的分析与设计问题，同时还能处理多输入多输出的控制系统的情况。更为重要的是，在此期间内，线性系统，最优控制，最优估计，系统辨识，随机控制等多个现代控制理论分支相继出现，并取得了有实用价值的成果，为自适应控制技术进一步发展提供了坚实的基础。

随着工业和自动化技术的发展，自动化的应用领域日趋广泛，受控对象的复杂程度差异很大，而且控制精度的要求也参差不齐。特别应该指出的是，对某些实际的工业受控对象来说，它们的数学模型(包括结构与参数)是很难事先提供的。因为在实际情况中可能会出现以下几种情况：

有些受控对象(如化工过程的反应炉等)，由于其内部的运动机理过于复杂，很难利用现有的知识和方法来确定它们的动态方程和有关参数；

有些受控对象(如船舶等)，尽管事先可以求得它的运动方程(如 $K-T$ 方程 或 非线性运动微分方程)，但是随着周围环境条件(如船舶的装载量，航行速度，海域条件及海况条件等)的变化，它的相应参数也要发生变化，而且这种环境条件的变化又是无法预知的。

对于第一种情况——受控对象的数学模型未知或其参数未知的情况来说，现有的控制理论不管是经典的还是现代的，都将束手无策。因为它们都是以受控对象的数学模型和参数是已知的这一条件作为前提，否则系统设计将无法进行。

对于第二种情况——受控对象参数要发生不可知的变化的情况来说，只要其参数变化不超过一定限度，那么常规的反馈控制系统本身具有的抗干扰、抗参数变化能力就足够了。但是这种补偿有时是以损失精度为代价的，而且其能力是有限的。因此在参数变化大，精度要求高的场合，常规控制系统就难以胜任了。

为了克服某些可以测量到的外界干扰对系统性能的影响，按

干扰补偿原理是常采用的一种方法。如在陀螺罗经中,为了克服地球自转及船舶运动速度和加速度对陀螺球指北精度的影响,通常在修正回路中引入纬度、速度和加速度补偿。应该指出的是,这种方法不仅要求被补偿的外界干扰可以测量,而且也还要求这种干扰对系统性能产生的影响的数学模型与参数是已知的。另外,由于这种补偿方法的针对性很强,因此在工程实际中,这种方法难以将全部外界影响统统补偿掉。

于是,对于这一类数学模型事先难以得到或事后又要发生变化的受控对象的控制问题,人们按照“仿生学”的思想,提出了一种新的控制方案——自适应控制方案。该方案摹仿自然界中存在的“适应”过程,从而使系统具有能自动适应环境变化的能力。

如果我们把受控对象的数学模型(结构形式或/和参数)或其变化事先并不知道这一特性称之为受控对象的不确定性,那么,自适应控制方案的大致思路可归纳为:系统可随时检测出本身的特性(或其变化),并在此基础上,对控制器的工作加以适当修正,以使系统内不确定性对系统性能所产生的不良影响得以减小。

30多年来,人们提出了多种自适应控制系统的设计方案。自适应控制系统方案的多样化也导致了它的定义的多样化。为统一定义,我们采用以下含义较宽的叙述作为自适应控制系统的定义:

基于对系统内物理量的在线检测,按照一定的方式,适当修正系统内控制器的特性(参数或结构形式),从而使系统内与控制有关的不确定性得以降低的控制系统,称之为自适应控制系统。

第二节 自适应控制系统的分类 及基本工作原理

尽管自适应控制系统的方案千变万化,但是它们仍有一些基

本的公共点, 在其组成结构上有一定的相似性。也就是说在自适应控制系统中, 除了具有通常反馈控制系统都有的受控对象(P)与测量元件(M)之外, 一般它还包括以下三个部分(图1-1);

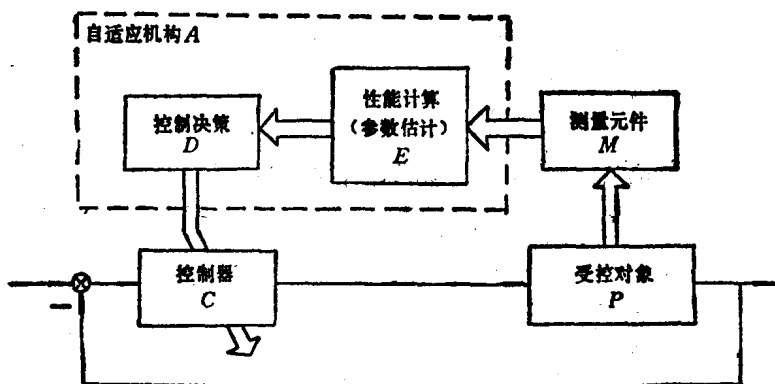


图1-1 自适应控制系统的组成

(1) 系统性能计算(或参数估计)部分(E)。该部分用以对受控对象进行实时在线检测, 求得受控对象当前的动态特征。

(2) 控制决策部分(D)。根据计算(估计)部分 E 提供的信息, 按照预先规定的系统性能指标, 实时在线地求出所需的控制器。

(3) 可调控制器部分(C)。在自适应控制系统中, 控制器(结构和参数)是可调的, 它由控制决策部分 D 驱动而作在线调整, 以保证系统对内、外环境的变化具有自动适应的能力。

系统性能计算(参数估计)部分 E 和控制器决策部分 D 合在一起可称为自适应机构部分(A)。

下面我们将结合自适应控制系统的各种分类形式, 逐个介绍它们的工作原理。

一、按自适应控制系统的结构形式分类

1. 开环自适应控制系统(图1-2)

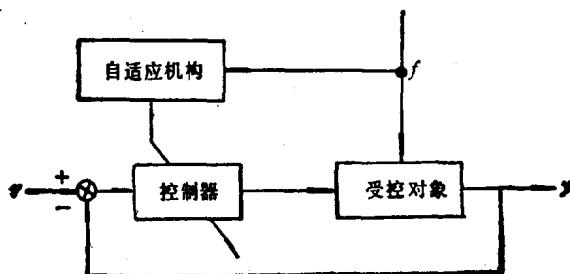


图1-2 开环自适应控制系统

这是一种最简单，也很实用的自适应控制系统，又可称为预定增益自适应控制系统。

本系统的工作原理是：通过对某些物理量(如 f)的测量，以取得与系统性能指标有关的信息，然后按照事先选定的规律(预定增益变化规律)适当调整控制器的参数，以保持系统性能处于规定的范围之内。由方块图可以清楚地看出，从物理量的测量，参数的调整，直到控制器及受控对象的输出，整个的信息通道(自适应通道)是开环的。

这种自适应控制系统设计比较简单，自适应过程也比较快，运行也比较可靠。但是由于自适应通道的开环特性，无法消除系统全部不确定性的不良影响，另外预定增益调整时引起的暂态过程必须予以注意。

带船速自动补偿的船舶减摇鳍控制系统可以认为是这类系统的一个例子。由于船鳍的升力不仅与鳍的面积成正比，而且还与船舶航行速度的平方成正比，为了保证减摇鳍控制系统的正常工作，鳍的转角必须随航速增加而减少。系统内引入的反平方函数发生器就是用来使鳍角信号通道的增益与航行速度的平方成反比，可自动按航速调整增益使系统正常工作。

2. 模型参考自适应控制系统

模型参考自适应控制系统是由线性模型跟随系统演变而来。

线性模型跟随系统的方块图如图1-3所示，它由参考模型、控

制器、模型跟随控制器和受控对象组成。其中参考模型代表受控对象应该具有的理想特性。而模型跟随控制器的功能则是确保受

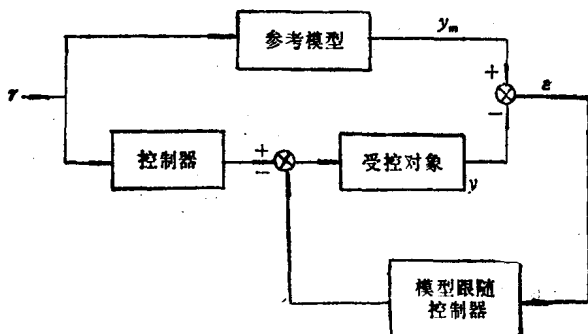


图1-3 线性模型跟随系统

控对象输出 y 能够跟踪参考模型的输出 y_m ，从而使受控对象具有与参考模型一样的性能。因为模型跟随控制器的输入是参考模型输出 y_m 和实际对象输出 y 的差值——广义输出误差，即 $e = y_m - y$ 。因此，通过适当选取模型跟随控制器的控制规律即可使广义输出误差 e 趋于零。

然而，设计模型跟随控制器时需要事先知道受控对象的数学模型及有关参数。如果这些参数是未知的，或是在运行过程中要发生变化，那末有必要把线性模型跟随控制系统加以改造，从而引出了模型参考自适应控制系统的方案(图1-4)。图中，模型跟随控制

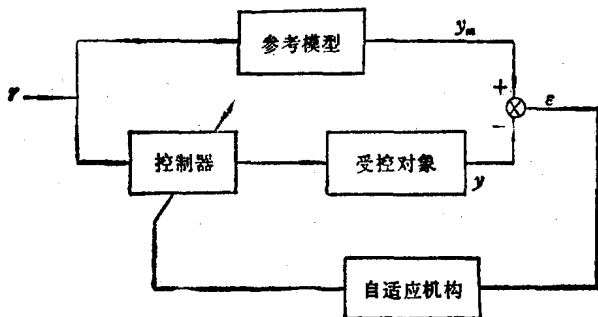


图1-4 模型参考自适应控制系统(并联形式)

器演变成自适应机构，控制器变为可调控制器，因此，模型参考自适应控制系统将通过自适应机构来调整可调控制器，以使广义输出误差 ϵ 趋于零。

由图可见，本系统的结构特点是系统内必定有一个代表理想特性的参考模型。另外，该系统内的自适应通道由自适应机构、控制器和受控对象组成。它形成了一个闭环回路——自适应回路。对于这个闭合的自适应回路，显然存在着所有的闭合回路都存在的一个重要问题——稳定性问题。于是该系统的分析和设计比起开环自适应控制系统来要复杂得多。

图1-4所示的结构形式称之并联形式，其他尚有串-并联形式、串联形式(图1-5)。

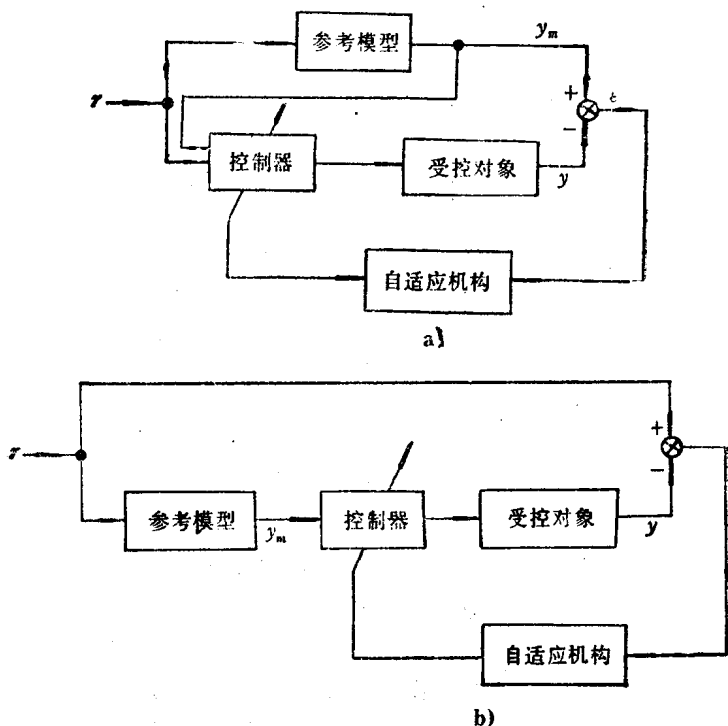


图1-5 模型参考自适应控制系统

a)串-并联形式；b)串联形式

这里值得指出的是：模型参考控制系统的结构形式除了可以用来达到控制的目的之外，尚可用于作为系统参数估计或状态观测的自适应方案。它与作控制使用时的区别仅在于需将参考模型与实际对象的位置作一交换，如图1-6所示。该系统将根据受测对象输出 y 与估计模型输出 $\hat{y}$ 之间的误差

$$\varepsilon = y - \hat{y}$$

借助于自适应机构来不断修正估计模型的参数，最终使误差 ε 趋于零。与此同时，再保证参数误差(估值与真值之间的差值)也趋于零，从而达到参数估计和状态观测的效果。

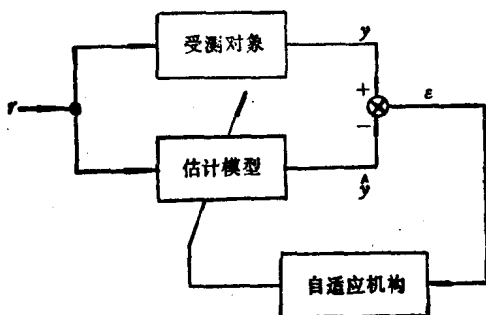


图1-6 模型参考自适应参数估计与状态观测

比较图1-4和1-6可知，模型参考自适应控制系统和模型参考自适应参数估计/状态观测器是互为对偶的形式。

为船舶航向改变阶段设计的模型参考自适应自动操舵仪就是这类系统的一个典型例子。对于船舶改变航向时的理想过渡过程曲线示于图1-7(详见第六章)。因此，我们可按图1-7为系统设计一个参考模型供模型参考自适应自动操舵仪所用。

3. 自寻最优自适应控制系统(图1-8)

本系统在结构上的特点是系统内有一个自动寻优机构。该系统通过不断测量有关物理量来得到系统的有关信息，并采用自动寻优的方法搜索控制器的最优参数，达到自适应控制的目的。

本系统的自适应回路是由测量、寻优机构、可调整控制器与

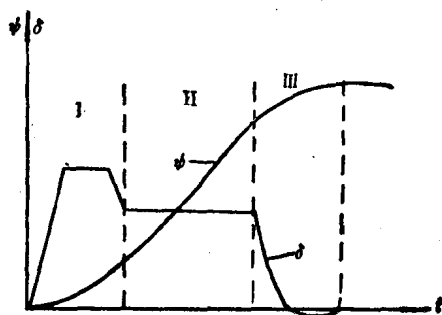


图1-7 船舶航向改变过程的理想过渡过程曲线

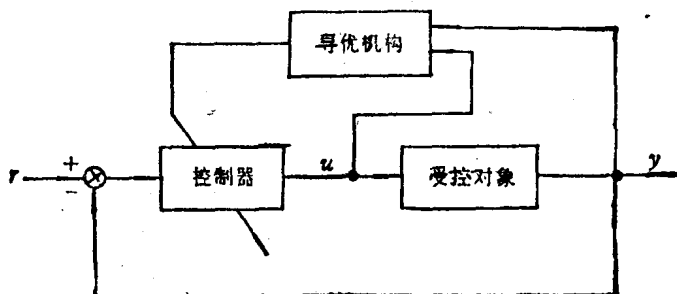


图1-8 自寻最优自适应控制系统

受控对象组成。它是一个闭合回路，也存在参数是否收敛，输出能否稳定的问题。

希林(Schilling等1976)提出的自适应自动操舵仪就是旨在使性能指标 J 寻优的自适应控制系统。

4. 参数估计自适应控制系统(图1-9)

本系统的结构特点是系统内含有一个参数估计器。整个系统的工作原理是：参数估计器将根据不断测量得到的有关信息求得受控对象的参数估值，然后根据所求得的参数估值，由与性能指标相对应的参数计算器算出控制器应取数值，并修正控制器参数，实施相应的控制作用，达到自适应控制的目的。