

928321

高等数学

自适应控制导论

史 维 陈文吾 何勤奋

73
20

东南大学出版社

高等学校教材

自适应控制导论

史 维 陈文吾 何勤奋

东南大学出版社

内 容 简 介

本教材系由电子工业部《计算机与自动控制》专业教材编审委员会《自动控制》教材编审组评选审定，并推荐出版的全国统编教材。全书共七章，主要内容有：自适应系统中最常用的参数估计最小二乘方法、模型参考自适应系统的数学描述及误差方程、李雅普诺夫稳定性理论设计模型参考自适应系统的方法、超稳定性理论的基本概念和用超稳定性理论设计模型参考自适应系统的方法、单变量系统和多变量系统自校正技术的基本算法等。本教材内容比较全面，各章均有例题和思考题。

本书可作为高等工科院校自动控制类专业高年级选修课教材，亦可供从事自动控制的工程技术人员参考。

责任编辑 徐步政

责任校对 陈东方

自 适 应 控 制 导 论

史维 陈文吾 何勤奋

东南大学出版社出版

(南京四牌楼2号)

江苏省新华书店发行 高邮县彩色印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 9.875 字数 253千

1990年11月第1版 1990年11月第1次印刷

印数：1—1500册

ISBN 7-81023-337-5

TP·13 定价：2.00元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986年~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践，师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审出版工作还有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

EAD 8/14

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类教材1986~1990年编审出版规划,由《计算机与自动控制》专业教材编审委员会《自动控制》教材编审小组征稿,推荐出版的全国高校统编教材。责编委是哈尔滨工业大学王广雄教授。

本教材由东南大学史维、陈文吾、何勤奋编写,华南理工大学周其节教授主审。本教材是在东南大学自动控制类专业“自适应控制系统”讲义的基础上,并依据《自动控制》编审小组审定的编写大纲和主审的意见进行修改和补充而成。

课程的参考教学时数为40学时,主要介绍自适应控制的一些基本问题及与其相关的系统辨识方法。

全书共七章。第一章介绍自适应控制的基本概念。从自适应控制问题的产生开始,介绍了自适应控制的定义、基本工作原理和主要类型。第二章介绍系统的参数辨识及辨识的实验设计,并着重介绍最小二乘法的基本原理和最小二乘估计的递推算法。第三章介绍模型参考自适应系统的数学描述和依据局部参数最优化的方法设计模型参考自适应系统的自适应规律。第四章介绍了用李雅普诺夫稳定性理论设计模型参考自适应系统的方法。本章除介绍用可调系统的状态变量构成自适应规律的设计方法外,还介绍用可调系统的输入输出信号构成自适应规律的设计方法,为克服自适应规律中难于直接获得输入输出的导数项,还介绍了常用的增广误差法的基本概念和基本的设计方法。第五章介绍了超稳定性和正实性的基本概念及其等价关系,着重介绍用超稳定性理论设计模型参考自适应系统的方法。第六章介绍单变量系统的自校正控制技术,着重介绍了最小方差自校正控制技术和零极点配置自校正控制技术的基本算法及其收敛性质。对于无振荡自校正有限时间调节的控制也作了扼要的介绍。第七章介绍了多变量系统自校正控制技术的基本设计方法。

本书在编写过程中承蒙周其节教授细心校阅,提出了许多宝贵意见并提供了有关素材,对此编者表示衷心感谢。

限于编者的学识水平和经验,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编者于东南大学

1989. 11

目 录

第一章 自适应控制的基本概念

- § 1.1 自适应控制的产生..... (1)
- § 1.2 自适应控制的定义..... (2)
- § 1.3 自适应控制的基本原理..... (3)
- § 1.4 自适应控制系统的主要类型..... (5)
- § 1.5 自适应控制的应用..... (7)
- § 1.6 自适应控制的主要研究问题..... (9)

思考题

第二章 系统的参数辨识

- § 2.1 系统数学模型的建立..... (11)
- § 2.2 系统辨识的实验设计..... (12)
- § 2.3 系统辨识的方法..... (14)
- § 2.4 自适应控制系统的参数辨识..... (16)
- § 2.5 系统辨识的最小二乘法..... (17)
 - 2.5.1 最小二乘法的基本原理..... (17)
 - 2.5.2 动态系统模型参数最小二乘估计..... (21)
 - 2.5.3 最小二乘估计量的统计特征..... (24)
- § 2.6 最小二乘估计的递推算法..... (26)
 - 2.6.1 最小二乘估计的递推算法之一..... (26)
 - 2.6.2 最小二乘估计的递推算法之二..... (28)
 - 2.6.3 最小二乘递推算法的初始值..... (30)
- § 2.7 时变系统的最小二乘估计..... (30)
 - 2.7.1 渐消记忆的最小二乘递推算法..... (31)
 - 2.7.2 限定记忆的最小二乘递推算法..... (33)

思考题

第三章 模型参考自适应控制系统设计初步

- § 3.1 引言..... (37)
- § 3.2 模型参考自适应控制系统的数学描述..... (37)
 - 3.2.1 用状态方程描述模型参考自适应系统..... (38)
 - 3.2.2 用输入-输出方程描述模型参考自适应系统..... (39)
 - 3.2.3 模型参考自适应系统的误差方程..... (40)
- § 3.3 模型参考自适应系统设计的一些假定条件..... (41)
- § 3.4 用局部参数最优化理论设计模型参考自适应系统..... (43)

3.4.1	具有可调增益的自适应系统的设计	(43)
3.4.2	单输入-单输出自适应系统的设计	(47)

思考题

第四章 用李雅普诺夫稳定性理论设计模型参考自适应系统

§ 4.1	李雅普诺夫稳定性的概念及基本定理	(53)
§ 4.2	用可调系统的状态变量构成自适应规律的设计方法	(55)
§ 4.3	用被控对象的输入输出构成自适应规律的设计方法	(59)
4.3.1	具有可调增益的自适应系统的设计	(59)
4.3.2	单输入-单输出自适应控制系统的设计	(65)

思考题

第五章 用超稳定性理论设计模型参考自适应系统

§ 5.1	引言	(76)
§ 5.2	超稳定性理论的基本概念及定义	(77)
5.2.1	超稳定性定义	(77)
5.2.2	正实函数定义及其基本概念	(78)
5.2.3	超稳定性方块和正实函数的等价关系	(81)
§ 5.3	用超稳定性理论设计模型参考自适应系统	(82)
5.3.1	用状态变量设计模型参考自适应系统	(83)
5.3.2	用输入输出测量值设计模型参考自适应系统	(88)

思考题

第六章 单变量系统的自校正控制

§ 6.1	引言	(94)
§ 6.2	单输入-单输出最小方差自校正调节器	(95)
6.2.1	预测模型	(96)
6.2.2	最小方差控制	(98)
6.2.3	调节系统的闭环稳定性质	(99)
6.2.4	自校正调节器的基本算法	(100)
6.2.5	具有参考输入增量最小方差控制	(106)
6.2.6	时变系统自校正调节算法	(107)
§ 6.3	单输入-单输出自校正控制器	(110)
6.3.1	加权最小方差控制	(110)
6.3.2	自校正控制系统的闭环稳定性质	(112)
6.3.3	自校正控制器算法	(115)
6.3.4	修正加权最小方差控制	(117)
§ 6.4	极点配置自校正控制技术	(119)
6.4.1	参数已知时的极点配置调节器	(119)
6.4.2	极点配置自校正调节器算法	(121)
6.4.3	加权最小方差自校正控制器的极点配置	(123)

6.4.4	前馈补偿自校正控制器的零极点配置.....	(125)
§6.5	无振荡自校正调节系统.....	(129)
6.5.1	受控对象参数已知时的无振荡调节系统.....	(129)
6.5.2	无振荡自校正调节器算法.....	(131)

思考题

第七章 多变量系统的自校正控制

§7.1	多变量自校正调节器.....	(133)
7.1.1	多变量最小方差控制.....	(133)
7.1.2	多变量调节系统的闭环性质.....	(136)
7.1.3	多变量自校正调节器算法.....	(138)
§7.2	多变量自校正控制器.....	(140)
7.2.1	多变量加权最小方差控制.....	(140)
7.2.2	多变量加权最小方差控制系统的闭环稳定性.....	(141)
7.2.3	多变量自校正控制器算法.....	(143)

思考题

参考文献

第一章 自适应控制的基本概念

§ 1.1 自适应控制的产生

我们知道，要对一个对象（或者过程）进行良好的控制，就意味着采用某种方式使这个对象（或者过程）的功能或特性有效地达到人们所期望的目标。这里“目标”的含义，可以是满足所规定的各种性能特征，也可以是在一定的限制条件下某个代表性能的量达到或接近最优。

为解决上述控制问题，针对不同的实际情况和要求，可以采用不同的技术措施。

当系统的输入量与输出量之间的关系能明确地知道，而且系统内部不存在扰动，也没有外部扰动对系统产生不良的影响，则可以采用开环控制方案。

当系统在运行中，可能会受到事先无法预计的扰动，系统本身的某些参数也可能会有些变动，则常常采用闭环控制方案。在闭环控制系统中利用了反馈原理，通过反馈使系统的输出对外部扰动和内部参数的变动都不很敏感，从而使系统达到预期的性能。

随着生产实践和科学技术的发展，相应地对控制质量提出了更高的要求，一般的反馈控制系统已满足不了要求。由于建立在状态空间概念上的现代控制理论的迅速发展，和计算机及计算技术的进步，为了适应复杂系统的高质量控制要求，便出现了最优控制的技术措施。在最优控制系统中，在一定的限制条件下，选择控制向量，使预先规定的性能指标达到极值（极大或极小），从而使系统性能达到或接近最优。

为了要成功地设计一个控制系统，不论是常规的反馈控制系统，还是最优控制系统，都必须设计者事先知道被控对象所具有的特征，及其结构和参数。也就是说在设计常规的反馈控制系统或最优控制系统时，都要求事先掌握被控对象或被控过程的数学模型。然而实际上有一些被控对象或过程的数学模型事先难以确知，或者由于种种原因，一些系统的数学模型会在运行过程中发生较大范围的变化，这就是说设计者对系统的特性并不是完全掌握的，或者说系统的特性是不肯定的。在这些情况下，常规控制就往往达不到预定的控制要求。

引起被控对象特性发生变化的主要原因有：

(1) 由于系统所处环境的变化而引起的被控对象的参数值的变化。如飞行器随着飞行高度、飞行速度及大气条件的变化，其空气动力学参数将发生宽范围的变化；化学反应过程中的参数亦会随着环境温度、流率的变化而变动；电子器件的某些参数随着环境的温度、湿度的变化而变化。如此等等。

(2) 系统本身由于工作情况的变化而引起自身参数值的改变。如在造纸过程中，绕纸卷筒的惯性由于纸的卷绕而变化；导弹的质量和重心随着燃料的消耗而变化；机械手的动态特性随着机械手的伸屈在很大范围内变化；在化学生产过程中，当原料不同时，系统的参数亦会有很大的变化。如此等等。

针对上述系统特性，由于系统所处环境及系统本身工作情况经常发生波动，事先又无法

完全确定，为了设计满意的控制系统，这就提出了自适应控制问题。

实际上从控制理论的发展来说，反馈控制，扰动补偿控制，最优控制以及预编程序控制等都是为了克服或降低系统受外来扰动或内部参数变动所带来的控制品质恶化的影响。但是当系统特性参数有较大范围的变化时，这些方法就不能满意地解决问题了。为了使得对象参数即使有较大范围变化时，系统的控制品质仍能自动地维持在按某种意义下为最优或接近最优，便提出了一种新的设计思想——自适应控制的设计思想。

我们可以这样设想：在控制系统设计阶段，设计人员本来应当掌握被控对象或被控过程的性质和特征的，现在我们将这个任务放在控制系统在运行过程中由控制系统本身来完成。也就是说，在控制系统运行过程中，系统本身不断地测量被控对象的特性（状态、性能、参数），从而“认识”或者“掌握”被控对象。然后，根据所掌握的被控对象当前的特性的信息，与期望的特性相比较，进而作出决策，来改变控制器的结构、参数或根据自适应规律来改变控制信号，使系统的性能按照所规定的标准达到最优或接近最优。根据这个思想，采取在系统运行过程中不断测量特性的办法来代替预先必须掌握被控对象特性的要求。同时使系统又能根据所获得的关于系统当前特性的信息自动地按闭环控制方式实施最优控制。按这样的思想所构成的控制系统，我们就称它为自适应控制系统。

§ 1.2 自适应控制的定义

自适应控制还处在发展过程之中。在自动控制领域中，不同的学者根据自己的观点，提出了各自的关于自适应控制的定义，众说不一。下面列举的一些是比较流行的关于自适应控制系统的定义。通过比较，从中可以更好地理解什么是自适应控制。

目前，在自适应控制的定义中，含义最广泛的是特鲁克萨尔(Truxal)1961年提出的定义：即“任何按自适应观点设计的物理系统均为自适应系统”。按照这个定义，就有许多控制系统都可以被包括在自适应系统的这一范畴之内。例如，喷气式飞机的燃料控制都是采用温度补偿的，那么它也可算是自适应系统。再如通过精巧设计的，将一个系统的运行范围扩展到能够适应所预期的环境变化，按上述定义，它也是一个自适应系统。然而这样的系统实质上都是常规的反馈控制系统，并不属于自适应控制系统的范畴。因为它对系统的参数改变或附加的信号不是根据系统当时的特性、性能和参数变动的实际情况作出决策的，而是由设计者事先确定下来的，因而不符合测量辨识决策、改造的过程。

1962年吉布逊(Gibson)提出一个比较具体的自适应控制的定义：一个自适应控制系统必须提供出被控对象的当前的状态的连续信息，也就是要辨识该对象，它必须将当前的系统性能与期望的或者最优的性能相比较，并作出使系统趋向最优性能的决策，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有的功能。

崔普金(Tsytkin)对自适应过程的提法是：当运行条件在初始时规定得不充分或者是随时间而发生了变化，则在控制期间所获得信息的基础上，修正系统的结构的各种参数和控制作用，从而使系统处于一定的（一般是最优的）状态。这样的过程就是自适应过程。

1974年兰德(Landau)提出了一个更为具体的定义：一个自适应系统，利用其中的可调

节系统的各种输入、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相比较，然后由自适应机构来修正可调节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。上述定义中，对于“可调节系统”应理解为“可以修正它本身的参数或内部结构，或修正它的输入信号来调节其性能的系统”。

定义的广泛性与明确性是有矛盾的。为了集中注意力于自适应控制的独特的方面，根据达到适应的内部结构，考虑到自适应控制的特征：“系统的不肯定性”、“信息的在线积累”、“过程的有效控制”这样一些共同的概念，我们采用如下的自适应控制系统的定义：自适应控制系统是这样的一种系统，当运行条件是不肯定的，或随时间而变化的情况下，在控制期间，它能根据对被控系统(或被控对象)的输入量和输出量的在线观测所积累的信息，实施有效的控制，修改系统结构的有关参数和控制作用，从而使系统处于规定的(一般接近最优的)状态。

上述定义中，采用了“有效的控制”，而没有采用最优控制，这是考虑到大多数问题中，严格说来，最优性是不能达到的，一般是在最优情况附近工作。

由上述自适应控制问题的提出，以及自适应控制系统的定义，可以看出，现在我们所要解决的问题是，有一些系统，起初我们对它们的具体模型还缺乏知识，暂时不完全掌握或不确切地掌握系统的特性，但是我们相信，这些系统具有确定的特性，而且根据控制过程进行中所积累的信息，这些特性是可以确定的。为了处理这类具有不肯定性的模型的系统，我们提出并定义了自适应控制。

附带指出，自适应控制系统比常规反馈控制系统要复杂得多，因而成本也较高，并且常常还需要借助于计算机才能够实现。所以自适应控制方案只是在常规反馈控制达不到期望的性能指标时才考虑采用。

§ 1.3 自适应控制的基本原理

图 1.1 表示一个自适应控制系统的基本原理的方块图。在这个系统中，根据被控对象的输入输出信号对对象的参数或性能指标连续地或周期地进行在线辨识，然后根据所获得的信息并按照一定的评价系统优劣的性能准则，判断决定所需的控制器参数或所需的控制信号，最后通过修正装置实现这项控制决策，使系统趋向所期望的性能。

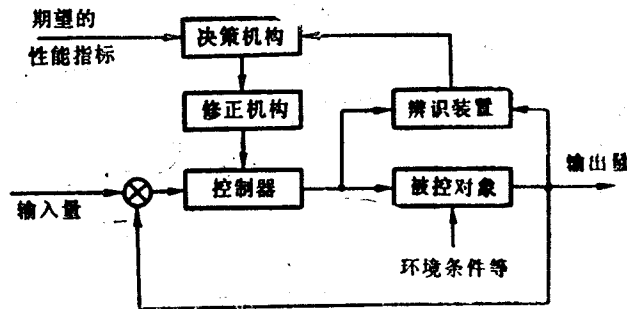


图 1.1 自适应控制系统的方块图

首先必须指出，在自适应控制系统的设计过程中最重要的决策之一是选择一个合适的系

统性能指标。用这个指标将系统性能的质量用单独一个量综合地表示出来，并以这个量的极值（极大或极小）作为设计系统的依据。若系统的参数值被选成使所采用的性能指标达到极值（极大或极小），则可认为系统此时是最优的。

选择了合适的性能指标后，系统的自适应控制过程将由下列三方面的作用来描述。

- a. 辨识被控对象的特性。
- b. 在辨识的基础上作出控制决策。
- c. 按照决策对可调系统实行修正。

辨识：通常是指对于待研究的对象，通过测量其输入输出量并经过适当的计算来判明对象的模型结构和参数值的问题。这是自适应系统中必不可少的一环。但是并非所有的自适应控制系统都要求直接地辨识被控对象的特性或参数，对某些自适应控制系统，只要求测量出性能指标的数值，就可以根据这个信息确定控制器应如何修正。对这种系统，测量出它的性能指标就完成了系统的辨识任务。

决策：在自适应控制系统中，决策机构一般来说是一个需要完成一组数学运算的设备，常常是用电子计算机来实现的。该机构根据辨识所获得的关于对象的当前信息，按规定好的性能准则，利用某种最优化策略促使系统的运行性能逼近最优状态。

修正：在自适应控制系统中，修正作用就是利用实际的机电设备来实现决策机构所作出的决策。也就是修正加到被控对象上去的控制信号。

加到被控对象的控制信号有两种修正方式，一种为参数修正法，它是采用修正控制器或补偿网络中的有关参数。在自适应系统中，参数的修正是系统自身所执行，且以保持系统的最优状态为目标。另一种方法为信号综合法，它根据需要综合出加到对象上去的控制信号。信号综合法的原理图如图 1.2 所示。综合信号的依据为（1）由辨识装置所提供的当前被控对象的特性。（2）所选择的性能指标。（3）相应的期望的响应。（4）给定的正常输入信号。因而信号综合的修正方法应用范围可以更广。

前面我们从自适应控制系统的工作原理上将其分为辨识机构，决策机构，修正作用几个部分。但在一个具体的自适应控制系统中，往往很难将这三方面的作用清楚地区分开来，而是一种功能与另一种功能结合在一起，但是任何一个自适应控制系统都具有这三方面的作用。

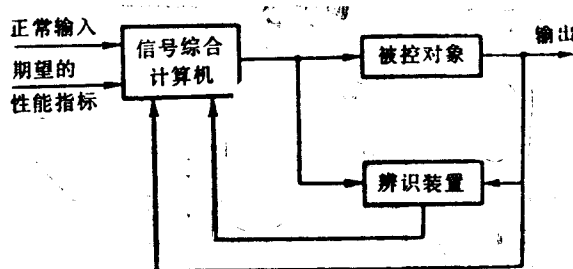


图 1.2 信号综合法原理图

另外，我们对自适应控制系统进行分析时，总是假定在自适应控制系统中，辨识过程和决策过程是分别进行的。也就是说首先进行辨识，然后利用辨识所得到的信息作出决策而导

出适当的控制规律。而且认为系统中被控制对象的特性或参数的变动，与自适应回路的动态适应过程相比较来说是非常缓慢的。也就是说在被控系统中出现任何显著的变化之前，辨识、决策、修正的适应过程已在比较短的时间内完成。这就要求自适应过程能快速地完成。

§ 1.4 自适应控制系统的主要类型

自从五十年代末期由麻省理工学院仪器实验室研制出的第一个自适应控制系统以来，先后出现过许多种类型完全不同的自适应控制系统。如前面所述，由于对自适应控制系统还缺乏统一处理的理论，因而难于对自适应控制系统进行严格地分类。为了研究分析的方便，揭示出各类系统的固有特征，我们可以将自适应控制系统分为如下几种形式：

1. 可变增益的自适应控制

这类自适应控制系统结构简单，响应迅速，在许多方面都有采用。其结构如图 1.3 所示。调节器按被控过程参数的变化规律进行设计，也就是当被控对象（或受控过程）的参数因工作状态或环境情况的变化而改变时，通过能够测量到的系统的某些变量，经过计算而按规定的程序来改变调节器的增益，以使系统保持较好的运行性能。

另外，在某些具有非线性校正装置和变结构系统中，由于调节器本身对系统参数变化不灵敏。采用此种自适应控制方案往往能取得较满意的效果。

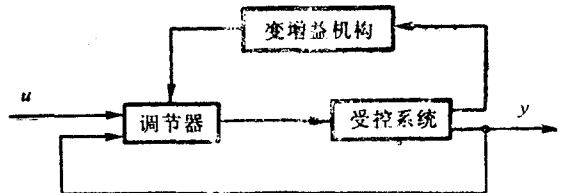


图 1.3 变增益自适应控制

2. 模型参考自适应控制系统

模型参考自适应控制系统原理图如图 1.4 所示，它由两个环路所组成，由调节器和被控对象组成内环，我们将这一部分称之为可调节的子系统。由参考模型和自适应机构组成外环。从图中可以看出，模型参考自适应控制系统是在常规的反馈控制系统的基础上，再附加

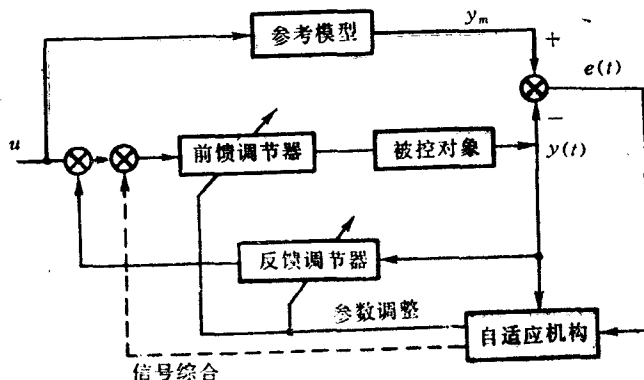


图 1.4 模型参考自适应控制

一个参考模型和控制器参数的自动调节回路，其中参考模型的输出 $y_m(t)$ 代表系统希望的动态响应，也就是用理想模型的输出来表示对系统的性能要求。当被控对象由于外界环境或工

作状态的改变使其运行特性偏离了最优轨线，则被控对象的输出 $y(t)$ 与理想模型的输出 $y_m(t)$ 相比较，产生广义误差 $e(t)$ ， $e(t)$ 通过自适应机构，根据自适应规律产生反馈作用去修正调节器的参数或产生一个辅助的控制信号作用于可调系统，从而促使可调系统的输出 $y_m(t)$ 与参考模型的输出相一致，使 $e(t)$ 趋向于零。

由上可见，即使系统初始参数未知，通过对参考模型的输出 $y_m(t)$ 与系统的输出 $y(t)$ 相比较获得广义误差信号 $e(t)$ ，按自适应规律形成对调节器参数的修正作用或综合出辅助信号作用于系统，系统初始参数不确定对运行性能的影响将逐步减小。经过一段运行，系统对参考输入的动态响应最后将自动地调整到与希望的动态响应相一致，这就是模型参考自适应控制系统的基本工作原理。当在运行过程中对象特性发生变化时，自适应调整过程与上述完全一样。

系统中的参考模型并不一定都是实际的硬件，它可以是数字计算机中的一个数学模型。不论在理论上还是实际应用上，模型参考自适应控制系统是一类很重要的自适应系统。

3. 自校正控制系统

自校正控制系统原理图如图 1.5 所示，它也被称为参数自适应系统。这类自适应控制系统的一个主要特点是具有被控对象数学模型的在线辨识环节。它也有两个环路，一个是由被控对象与调节器所组成，它类似于常规的反馈控制系统，称为内环。另一个是由参数辨识器与调节器参数设计计算机所组成，称为外环。

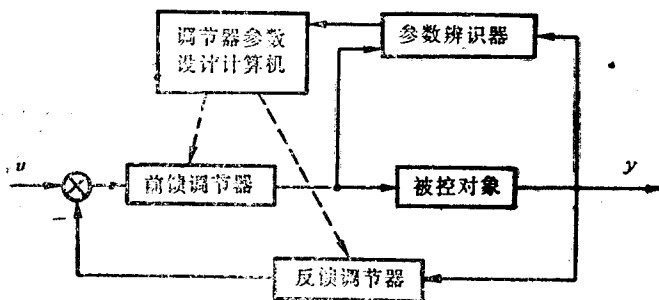


图 1.5 自校正控制系统

自校正控制系统把被控对象的参数在线辨识与系统调节器的参数设计工作有机地结合再由系统自身完成。在运行过程中，首先进行被控对象的参数在线识，根据辨识的结果起进行调节器参数的选择设计，然后根据最新选择设计的参数对调节器进行修正，从而使对象辨参数尽管受到扰动，但运行性能仍保持最优或接近最优。

在自校正控制系统中，参数辨识的方法有很多种，常用的主要有各种递推最小二乘法，辅助变量法，以及极大似然法，随机逼近法等等。自校正控制规律的设计，亦有各种不同的方案，常用的有最小方差控制，二次型最优控制，极点配置等等。具体算法又有直接算法和隐式算法，关于这些内容在讨论自校正自适应这章时再作详细介绍。

4. 直接优化目标函数的自适应控制

直接优化目标函数的自适应控制系统的结构原理图如图 1.6 所示。

1981年在国际自动控制联盟 (IFAC) 第八届国际大会上瑞典学者 Ljung 作题为“基于显

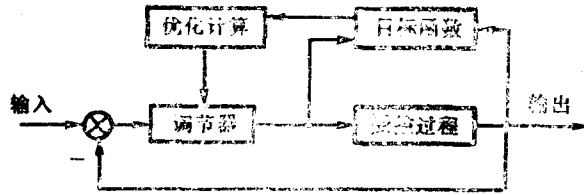


图 1.6 直接优化目标函数的自适应控制

式判据极小化自适应控制”的报告中提出的设计方案，就体现了这种设计思想。

选择某个指定的目标函数为

$$J(\eta) = E\{s[y(t, \eta), u(t, \eta)]\}$$

式中： y 为输出， u 为控制信号， η 为调节器的可调参数向量， $E\{\cdot\}$ 表示取数学期望。

对上目标函数求极小，用随机逼近法求得自适应控制算法。这是一种更为直接概括性更强的新的设计思想。

自适应控制在许多方面都有应用。按照不同的观点，从不同的角度对自适应控制系统作了多种分类和提法。但就目前来说，比较成熟应用较广的主要是模型参考自适应和自校正控制。

§ 1.5 自适应控制的应用

自适应控制技术最早在航空方面首先获得了应用，这是由于飞机的动力学特性决定于许多的环境因素和结构参数。例如随着飞机飞行的高度和速度的不同，飞机的动力学特性可能在很宽的范围内变化，要使飞机在不同的高度和不同的速度的情况下，都具有良好的控制质量，依靠经典的控制理论是难以保证的。因而美国麻省理工学院在五十年代末期就提出了模型参考自适应控制的方案，经过试验表明，该方案具有较好的性能。随着计算机技术和控制理论不断发展提高，特别是由于航空航天事业迅速发展的需要，目前自适应控制在航空航天方面获得了较为广泛的应用。

在航海方面，瑞典Astrom等人首先在大型油轮上采用了自适应控制的自动驾驶仪，取代了原有的PID调节器的自动驾驶仪。实验证明，自适应自动驾驶仪能够在变化复杂的随机环境（例如，在海浪、潮流、阵风的干扰以及在不同载荷不同的航速）下，都能使油轮按照预定的航迹稳定而可靠地航行。并取得了良好的经济效益。

在化工过程方面，在钢铁和冶金工业方面许多工艺过程为非线性、非平稳的复杂过程，原材料成份的改变，催化剂的老化和设备的磨损等等，都可能使工艺参数发生复杂而幅度较大的变化，对于这类生产过程，采用常规的PID调节器往往不能很好地适应工艺参数的变化，而导致产品的产量和质量不稳定。当采用自适应控制后，由于调节器的参数可以随工艺参数的变化而按某种最优性能自动整定，从而保证了产品的产量和质量不随工艺参数的化变而下降，于是在十多年前即有人提出采用自适应控制来代替常规的PID调节器。目前在板轧机的厚度，带钢热轧机的张力，水泥的配料，造纸等方面都有不同程度的自适应控制作用，并取得了较好的效果。现看矿石破碎过程中自适应控制的应用。矿石破碎过程原理示意图如

图 1.7 所示，矿石从矿石箱经进料机及传送带首先送入 1 号筛，将已经合格的（直径小于 25mm）矿石从 1 号筛中筛下来。直径大于 25mm 的颗粒矿石送入破碎机破碎，破碎后的矿石再送入 2 号筛分选，合格的部分筛下，不合格的大颗粒矿石经过回流管循环送回破碎机再进行破碎。

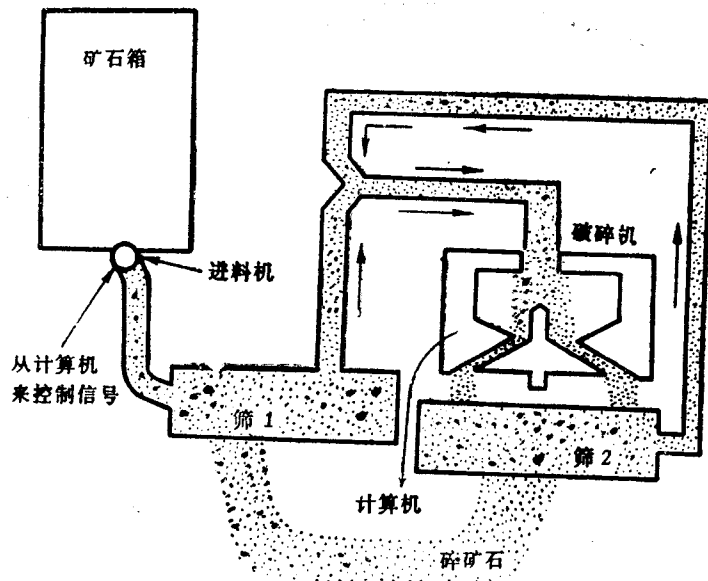


图 1.7 矿石破碎流程图

在破碎过程中，破碎机的功率不可避免地要受到两个方面的扰动影响：其一，在进料机进料量（吨/小时）不变的情况下，由于来料矿石颗粒大小不一样，当直径大于 25mm 的颗粒占多数时，破碎机负荷就大，反之，破碎机负荷便小；其二，矿石硬度不相同，造成破碎机的负荷时而大时而小，负荷大时就有可能停车。为了使破碎机不停车又有高的生产效率，可以通过对破碎机马达功率的检测所得到的信息，来控制矿石的进料量，以补偿扰动对破碎机负荷的影响。

另外，在实际生产过程中，矿石由送料机到进入破碎机约需 40~50 秒的时间，矿石从 2 号筛经回流管返回破碎机的循环过程约需 70~80 秒时间，而送料机的时间常数为 12 秒，破碎机的时间常数为 20 秒，因而循环和送料所需的时间比设备的时间常数要大得多，所以系统的滞后特性比较明显。

对这种具有强干扰、大滞后的过程，采用 PID 调节器，是难以达到预期的控制效果的。因此破碎机的功率设定值就不可能接近其额定值，而影响破碎机的效率。但是，采用自适应控制之后，按照选定的自适应规律来控制进料量，就可以保证破碎机在接近其功率额定值附近运行，而达到提高生产效率的目的。

在电力系统方面，六十年代即出现对锅炉燃烧效率的优化控制，且在热交换器上采用自适应控制技术使控制参数最优地适应发电机和各种负荷条件。到了七十年代自适应控制在火力发电站和水力发电站上的应用也获得了成功，并在原子能电站上进行了试验研究。

在电力拖动方面，已经用自适应控制对直流电动机的转矩、转速、位置和功率进行有效

的控制。目前,有人研究对交流感应电动机的转速采用自适应控制以达到当系统在运行过程中其惯性、负载力矩、时间常数和系统增益等在大范围内变化时,系统的动态响应仍可保持在期望值附近的目的。在非工业领域中,如社会、经济、管理、生物、医学等方面也有了一些探索。近来,宏观经济系统的随机最优化问题也引起了人们的注意。

我们完全可以预期,随着控制理论和电子计算机技术的发展,自适应控制的应用将会愈来愈广泛,所获得的效益会愈来愈大。

§ 1.6 自适应控制的主要研究问题

从前面各节的讨论中可以看出,实际的自适应控制系统将是一个多回路的非线性系统。因为在自适应系统中,为完成辨识、决策、修正这些作用,必须在基本的控制回路的基础上添加反馈通道。例如,为了实现自适应,往往要对多个参数进行调整,这就需要引入多个并行通道或回路。另一方面,自适应控制系统中,通常都采用为完成某些线性及非线性运算的计算装置。有时为了综合出最优的系统,还特意将非线性特性引入控制系统。因而自适应控制系统常常为一个非线性的多回路系统,同时,系统还常受到随机干扰的作用。在某些系统中为了辨识的需要,往往采用随机性的试验信号。因此,在多数情况下,自适应控制系统是在随机性的环境和条件下工作的,我们所研究的是一个随机型系统的自适应控制问题。这一切说明,自适应控制系统是一个复杂的系统,它必然存在一个稳定性的问题。故许多自适应控制系统的设计是以能保证系统全局稳定为前提的。目前主要用李雅普诺夫稳定性理论和波波夫超稳定性理论进行设计。

要保证自适应控制系统全局稳定,并不是一件轻易的事,还有许多理论问题有待进一步探讨。

其次对自适应控制系统,必须要在在线辨识,根据辨识的结果作出决策再实施修正作用。在线辨识一般都采用递推算法,对这类算法首要的问题是收敛性问题。如前所述,这类递推自适应控制系统也是本质非线性的,解决算法的收敛性同样不是一件轻易的事。近年来已有人提出了用 Martingale 收敛定理来分析和证明算法的收敛性。但不同的算法有待于今后不断地探索。

目前大多数自适应控制系统的设计都是假定被控对象的结构已知,参数未知的情况下进行的,而实际上被控对象的结构常常并未完全掌握,且对象特性中还常常伴有未能考虑到的寄生高频特性,这种寄生高频特性有时会使得时变非线性自适应控制系统失去稳定性。因而必须研究如何设计鲁棒性强的自适应控制系统。

最后,如何提高自适应控制系统的自适应速度,如何优化自适应控制过程,这就是自适应控制系统的品质分析的任务,这方面要做的工作还很多。

自适应控制系统的进一步发展将走向所谓“自学习”系统和“智能控制”系统。这类系统将拥有大型记忆,模式识别,以及带有各式各样具有智能性的高级决策功能。这类系统能够记住系统过去的经验和教训,识别曾经发生过的情况,并能基于过去的经验来逐步改进其自适应动作。这类系统的理论研究和实际应用,还正处于探索阶段。

因此,本教材将着重讨论: 1. 自适应控制系统的辨识问题; 2. 模型参考自适应控制