

系统辨识与

自适应控制

下 册

吴广玉 主编

哈尔滨工业大学出版社



系统辨识与自适应控制

下 册

吴广玉 范钦义 编著
姜复兴 汪德辉

吴广玉 主编

韩志刚 主审

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书分为上、下两册。上册为“系统辨识”，它主要包括：线性系统传递函数和脉冲响应函数的辨识、线性系统状态和参数的估计、非线性系统状态和参数的估计、数学模型结构的辨识、系统辨识的试验设计、闭环系统的辨识和计算机自动辨识系统等。下册为“自适应控制”，它主要包括：自适应控制系统概述、随机自适应控制系统—自校正调节器、模型参考自适应控制系统、其他自适应控制系统和自适应控制系统的计算机辅助设计等。

本书可作为高等工科院校自动控制类专业研究生的教材和高年级大学生的教学参考书或教材，对于从事用试验统计法建立系统的数学模型和自适应、智能控制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。

系统辨识与自适应控制

下 册

吴广玉 主编

*

哈尔滨工业大学出版社出版

新华书店首都发行所发行

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/16 印张12.75 字数294,000

1987年3月第1版 1987年3月第1次印刷

印数 1—5,000

书号15341·44 定价2.20元

下 册 目 录

第十二章 自适应控制系统概论

- § 12.1 引言..... (1)
- § 12.2 自适应控制的定义..... (3)
- § 12.3 自适应控制系统的分类和基本工作原理..... (5)
- § 12.4 自适应控制理论研究的现状..... (10)
- § 12.5 自适应控制系统的应用(综述)..... (13)

第十三章 随机自适应控制系统——自校正调节器和控制器

- § 13.1 引言..... (18)
- § 13.2 一个简单实例..... (19)
- § 13.3 最优预报器和最小方差控制器..... (22)
- § 13.4 基本的自校正调节器..... (25)
- § 13.5 自校正调节器的应用实例..... (29)
- § 13.6 带可变遗忘因子的自校正调节器..... (34)
- § 13.7 自校正控制器..... (37)
- § 13.8 零极点和极点配置的自校正调节器..... (42)
- § 13.9 自校正调节器和控制器的发展..... (47)
- § 13.10 小结..... (48)

第十四章 模型参考自适应控制系统

- § 14.1 引言..... (53)
- § 14.2 利用局部参数最优化方法设计自适应控制系统..... (55)
- § 14.3 用李亚普诺夫稳定性理论设计模型参考自适应控制系统..... (57)
- § 14.4 增广误差信号系统和模型参考自适应控制的直接法..... (62)
- § 14.5 自适应状态观测器及模型参考自适应控制的间接法..... (68)
- § 14.6 用超稳定性理论设计模型参考自适应控制系统..... (71)
- § 14.7 用超稳定性理论设计适应式模型跟随系统..... (78)
- § 14.8 模型参考自适应控制系统设计方法的讨论及比较..... (82)
- § 14.9 随机自适应控制系统与模型参考自适应控制系统的比较与联系..... (87)
- § 14.10 MRAS 的应用实例..... (91)
- § 14.11 小结..... (94)

第十五章 其它的自适应控制系统

- § 15.1 引言..... (93)
- § 15.2 状态模型描述的随机自适应控制系统..... (93)
- § 15.3 学习控制系统..... (99)

| | | |
|----------------------------|-----------------------------------|-------|
| § 15.4 | 人工智能 | (103) |
| § 15.5 | 多级递阶智能控制 | (104) |
| 第十六章 自适应控制系统计算机辅助设计 | | |
| § 16.1 | 概述 | (107) |
| § 16.2 | CADCS 的硬件配置 | (108) |
| § 16.3 | CADCS 中的系统辨识 | (109) |
| § 16.4 | 自适应控制系统的计算机仿真 | (110) |
| § 16.5 | 混合仿真技术 | (124) |
| § 16.6 | 《CAD—ACS》自适应控制系统计算机辅助设计系统简介 | (128) |
| 附 录 | | |
| A.1 | 向量与矩阵的导数公式 | (141) |
| A.2 | 一个定理 | (144) |
| A.3 | 矩阵结果 | (145) |
| B | 估计量的性质 | (146) |
| 习题解答及提示 | | (150) |
| 实验指导书 | | |
| 实验一 | 利用相关分析法辨识线性系统的脉冲响应函数 | (188) |
| 实验二 | 利用递推最小二乘法估计系统参数 | (195) |
| 实验三 | 递推广义最小二乘法估计线性系统参数的数字仿真 | (197) |

第十二章 自适应控制系统概论

§ 12.1 引言

第二次世界大战以后,航空、航天事业迅猛发展,要求设计更加优良的控制装置,经典的控制方法远不能满足所提出的控制要求。因此,在本世纪五十年代到六十年代提出了一系列新型控制技术,如时间滞后控制,前馈控制,多变量解耦控制和建立在状态空间概念基础上的应用状态估计与状态反馈的控制方案。在此之间,最优控制技术得到了迅速的发展。

最优控制理论所研究的对象及环境是确定的,所处理的问题是将被控对象的运动规律量化为一个数学模型(可以是状态方程、输入输出方程或其它形式),同时将控制要求用一个指标函数来描述,然后用适当的最优化方法找出使指标函数达到极大(或极小)的控制律,即控制变量随时间变化的规律。

〔例12.1.1〕 设给定系统是线性的,即

$$\dot{x} = A(t)x + B(t)u \quad (12.1.1)$$

初始状态

$$x(t_0) = x_0$$

其中,控制律 u 可以有约束条件,也可以没有; $A(t)$, $B(t)$ 是连续的。

设性能指标泛函是二次型的,即

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} (x^T Q(t)x + u^T R(t)u) dt \quad (12.1.2)$$

其中 $Q(t)$ 是连续、对称、半正定矩阵;

$R(t)$ 是连续、对称、正定矩阵。

最优控制问题是求使泛函 (12.1.2) 取极值的控制律 u 。该问题存在解析解,

$$u^*(t) = -R^{-1}(t)B^T(t)Y(t)x(t) \quad (12.1.3)$$

其中 $Y(t)$ 是 Riccati 方程的解。

从上述典型的线性最优控制的求解过程来看,最优控制理论要求在确知对象和环境模型的前提下,才有可能综合出最优控制律。当然,最优控制所处理的模型可以是线性的,也可以是非线性的。

但是,实际的动态过程经常存在许多“不确定性”,最常见的有以下三类,

- (1) 随机扰动输入;
- (2) 量测噪声;
- (3) 系统模型结构和参数的不确定性。

随机最优控制主要考虑前二类“不确定性”对系统的影响。

〔例12.1.2〕 设系统的状态方程和量测方程为,

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k) + w(k) \quad (12.1.4)$$

$$y(k) = C(k)x(k) + v(k) \quad (12.1.5)$$

噪声 $w(k)$ 、 $v(k)$ 和状态初值 $x(0)$ 具有如下的统计性质:

$$E[w(k)] = E[v(k)] = 0$$

$$E[x(0)] = \bar{x}(0)$$

$$E[w(k)v^T(j)] = E[x(0)w^T(k)] = E[x(0)v^T(j)] = 0$$

$$E[w(k)w^T(j)] = R_1(k)\delta_{kj}$$

$$E[v(k)v^T(j)] = R_2(k)\delta_{kj}$$

$$E[x(0) - \bar{x}(0)][x(0) - \bar{x}(0)]^T = P(0)$$

随机最优控制的性能指标函数为:

$$J = E \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} [x^T(k)Q(k)x(k) + u^T(k)Q_2 u(k)] + x^T(N)Q_0(N)x(N) \right\} \quad (12.1.6)$$

其中

$$y(k) = [y(0), y(1), \dots, y(k)]^T$$

$$x(k) = [x(0), x(1), \dots, x(k)]^T$$

$$Q_1(k) \geq 0, \quad Q_2(k) > 0, \quad Q_0(N) > 0$$

随机最优控制问题是在满足系统状态方程和关于 $\{w(k)\}$, $\{v(k)\}$, $x(0)$ 的统计特性的条件下, 找出使性能指标函数 J 取最小值的控制律:

$$u(k) = u[y(k), k] \quad (12.1.7)$$

实现随机最优控制的系统结构如图 12.1.1.

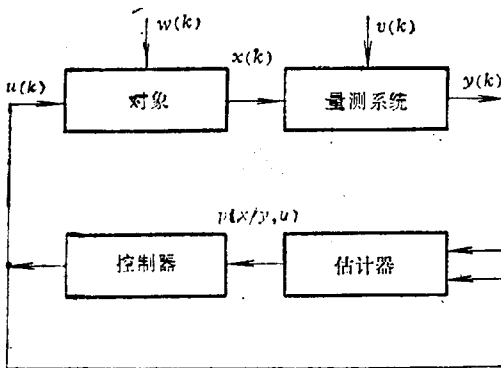


图 12.1.1 随机最优控制系统

到。 $Q_2(k)$ 是权矩阵。

从上面的例子可以看出, 随机最优控制理论是在系统状态表达式已知, 状态噪声、量测噪声以及初始状态的统计特性已知的条件下, 应用估计理论求得对象状态的条件概率密度函数, 进而得到使 J 达到最小的控制律。

实际的控制过程中, 存在着各种各样的不确定性。首先对象及环境的数学模型的参数及结构不完全确知的现象是普遍的, 而所谓确定性的系统却是少见的。其次, 系统受外界环境的干扰, 一类是随机性的, 一类是突变性的。随机性干扰是可用一随

在一般情况下, 系统状态的某些部分是不能直接观测的, 因此需要先对状态进行估计, 然后求出相应的控制律。对于系统是线性的, 指标是二次型, $\{w(k)\}$ 及 $\{v(k)\}$ 是高斯分布的情况, 即 LQG 问题, 随机最优控制律为:

$$u(k) = -L(k)\hat{x}(k/k) \quad (12.1.8)$$

$$L(k) = [Q_2(k) + B^T(k)S(k+1)B(k)]^{-1} B^T(k)S(k+1)A(k) \quad (12.1.9)$$

其中 $S(k)$ 可从相应的 Riccati 方程求解得

机过程(序列)加以描述的。而突变性干扰,如阵风、暴雨和负荷突变等,往往是难以预测的。这种干扰有些可以测量,但其规律是不可知的,当这种干扰出现时就会影响控制效果。

总之,对这些对象模型未知,或干扰未知的情况,往往无法用最优化控制理论综合出相应的控制律。或者,作了近似假设,所得控制效果亦不佳。在这种情况下应根据对象和环境的变化,不断修正系统的控制律,以适应对象的变化。因此,为了对这种具有部分或全部不确定性的对象和环境实行有效的控制,可以设计具有在一定范围内能“适应”对象和环境条件变化的控制系统,其中包括下面我们将要深入讨论的自适应控制系统。

从上面的分析我们可以初步地了解最优控制与自适应控制在提法上的一些差别。最优控制,是在对象模型已知以及干扰的统计特性已知的情况下最优控制律的设计,而自适应控制,却是指在对象的数学模型先验知识甚少的条件下最优控制律的设计。

与最优控制相同的是,自适应控制律亦是基于一定的数学模型和一定的性能指标综合出来的。但不同的是由于先验知识甚少,需要根据系统运行的信息,应用在线辨识的方法,使模型逐步完善,使综合出来的控制律亦不断改进。尽管起初关于系统的先验知识甚少,但是通过辨识系统的模型和干扰的模型,而使控制系统获得了一定的适应能力。

§12.2 自适应控制的定义

多年来,人们一直试图对自适应控制给出适当的定义^{[34][23]}。但是迄今为止,还没有一个确切的定义用以决定一个调节器是否是自适应的。特别是近二十年来,在有关控制的文献中,出现了大量讨论具有不确定性的动态特性系统的各种专著,但是这些研究工作都是在各种不同名目下,以各种相互有分歧和互不联系的形式出现的,从而使许多知名专家间产生种种争议^[2]。特别应提出的是最近一段时期,人们的兴趣已由纯粹的硬设备工程问题,转移到更广泛的一系列问题上去了,例如城市、社会和经济系统、交通和运输系统以及生物学系统等方面。出现了模式识别、人工智能、自学习系统等,从而使这个问题更加复杂化了。这也充分说明该学科内容正处在形成过程之中,对其范畴、对象、任务等尚未形成统一的看法。

下面引用某些知名学者,关于自适应控制的有争议的定义^[2],可以使了解争论的焦点,进一步认识自适应控制。

1964年特鲁克萨尔(Truxal)^[22]提出的定义是:“自适应系统是何以自适应的观点设计的系统”。

该定义过于笼统。某些补偿范围较宽的普通反馈控制系统将会被误认为是自适应控制系统,从而混淆了普通反馈控制与自适应控制的界限。

1963年吉布森(Gibson)^[34]提出的定义是:“一个自适应控制系统必须能提供对象现时状态的连续信息,也就是必须对过程进行辨识;它必须将系统现有的品质与我们希望的或者最优的品质进行比较,同时作出修改系统的决策;最后,它还必须着手进行这

种修改，以便驱动系统接近最优”。

朗道 (Landau) [27]提出的自适应系统的定义是：“一个自适应系统，就是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”。

由于这些定义曾被用于解决各种各样表面上毫无关系的控制问题，因此围绕它们引起了许多争论和误解。但是，主要的缺点还在于这些定义中没有一个能够完全反映这一领域中的现有工作而又留有扩展的余地。另一方面，其它一些定义中的最优性的要求使它们的实现受到了很大的限制，因为所需算法一般是极为复杂的。另外还可以通过离线的研究来降低系统的不确定性，从而使原来称之为自适应控制的系统成为普通的反馈控制系统。

1973年美国电工和电子工程师学会 (IEEE) 控制系统协会提出的定义是[2]：“如果对过程进行有效控制时的先验不确定性的缩小 (reduction)，是通过不断观测和积累被控过程输入输出的信息而完成的，我们就称此控制过程为‘自组织的’”。

这里用“自组织控制”来代替“自适应控制”以避免有争议的解释。自组织控制一词是从技术的角度定义的，因为它具有可以在线地对系统进行结构调整和参数调整的意义；适应性是指人类或动植物在外界或自然环境变化的条件下的适应能力，因此“自适应”基本上是一种借喻生物学上的一个名词，是一种定语性质的词汇。但“自适应”一词有直观、形象的优点。

从上面的讨论可以看到，尽管存在某些分歧，但关于自适应控制的观点却是一致的。

(1) 自适应控制系统，不是普通的反馈控制系统。Aström[1]认为“自适应控制系统是一种特殊形式的非线性控制系统”。

(2) 自适应控制处理的是具有“不确定性”的系统。这种不确定性，既可自系统内部，亦可来自系统外部；既可以是关于系统特性（结构和参数）的不确定性，也可以是关于干扰、环境条件的变化引起的；既可以是规律性的，亦可以是随机性的，尽管某些不确定因素是依赖于时间的随机变量，但是，对随机变量的性能的观察和辨识，可以设法降低这种不确定性。

(3) 某些研究认为，系统辨识是自适应控制系统的固有特性。实际上，系统辨识可能并不明显地出现在自适应控制系统中。因为只有与系统品质改进有关的信息才被认为是必要的信息，但这些信息不一定要求通过系统辨识的方法获得，可以说，这时辨识是隐含地进行的，所积累的关于对象的信息，可由控制器直接使用而不经中间的模型。

(4) 由于自适应控制在降低不确定性的程度以后，进一步要求实现最优控制，往往是不现实的，或是算法过于繁杂而无法实现，或者是根本不存在最优解。因而，控制结果常是达到一定的控制指标，即“最优的控制”被“有效的控制”所取代。

为了明确本课程研究的范围，并留有必要的扩展其范围的余地，我们采用下面的自适应控制的定义：

自适应控制系统是一种特殊形式的非线性控制系统。系统本身的特性（结构和参数）、环境及干扰的特性存在某种不确定性。在系统运行期间，系统自身能在线地积累与实行有效控制有关的信息，并修正系统结构的有关参数和控制作用，使系统处于所要求的（接近最优的）状态。

自适应控制系统的这种特点，可以看作一种学习能力，在运行过程中能对系统模型进行改进或对系统进行辨识的这种性质，显然是控制器的一种新的，有点类似于人类作为控制器时所具有的品质。在高速计算机的帮助下，有人已设计出“学习控制系统”。它可以经过训练而在未知环境中进行高级决策。更进一步的系统具有拟人的功能，即“智能控制系统”。这些新的领域是自适应控制系统的进一步发展方向。

本书主要讨论反馈控制器参数的自适应问题^[4]。因为反馈控制是最普通的，而其参数自适应是最困难而且也是最迫切需要研究的问题。

§12.3 自适应控制系统的分类和基本工作原理

对于自适应控制系统来说，“不确定性”可能有如下两种情况。一种情况是，对象的数学模型未知，例如模型的参数为未知，但控制系统所工作的环境却是确定的，那么这种系统需不断辨识自身的数学模型，从而获得一定的适应能力。这类系统我们称之为确定性的自适应控制系统。另一种情况是，对象的数学模型是不确定的，而且其所处环境亦是不确定的，这类系统我们称之为随机自适应控制系统。当然这里所说的不确定性和适应能力都是相对的，常规的线性调节器亦具有一定的适应能力。上述这两类自适应控制系统亦是相对的。如果当随机扰动和量测噪声都比较小时，可以把这种自适应控制系统用确定性自适应控制系统的方法来加以处理。这两类自适应控制系统之间，目前尚无明确的界限，究竟取何种分析方法，以控制效果来衡量为宜。这也正说明这门学科正处在形成，充实的阶段。

对过程的自适应控制，可由两种方法实现：一是进行直接的辨识，以减小过程和干扰的不确定性；另一方法是降低与过程品质改进直接有关的不确定性，此时由过程取出的信息直接被用于控制器和品质估计器中。前一种方法所对应的控制系统，称之为参数自适应控制系统；后一种方法所对应的控制系统，称之为品质自适应控制系统。

参数自适应控制系统常见有三种：增益列表补偿法自适应控制系统、带参数在线辨识的随机自适应控制系统及模型参考自适应控制系统。下面我们初步分析一下这几种系统，并简单介绍它们的基本工作原理。

一、增益列表补偿法^{[1][4]}

其原理如图12.3.1所示。

增益列表补偿法这一概念起源于飞行控制的发展。由于飞行高度及速度的变化，飞机工作条件大不相同。因而需要针对不同的飞行高度和速度，分成不同的区段，每一个区段可以综合出不同的最好的调节器参数，列成表格。在实际飞行中，针对不同的高度和速度区段，直接查表，以得到最好的调节器参数。

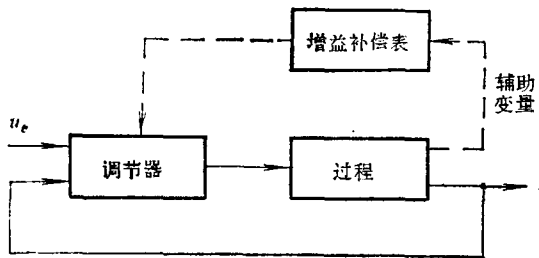


图 12.3.1 增益补偿法原理图

这种方法，起初用于调整增益的自适应控制系统，然后进一步的发展，被调参数不仅仅限于增益，亦可以是调节器的其它参数^[1]。

用增益列表补偿法设计自适应系统的关键是找出辅助变量^[1]。通常这是以系统的物理学（力学）知识为基础的^[4]。飞机的飞行速度和高度是飞行马赫数（大气密度和音速的函数）和动压（大气密度和速度的函数）的函数，而这两个量可以测量，

因而选它们为辅助变量，再通过寻优程序，找出相应的调节器参数。如果仅是一个变量寻优，则是一维搜索问题。有时往往有好几个调节器参数，因而需用多维搜索方法。

增益列表补偿法的一个应用实例是雷达天线的位置跟随自适应控制系统，如图 12.3.2 所示。

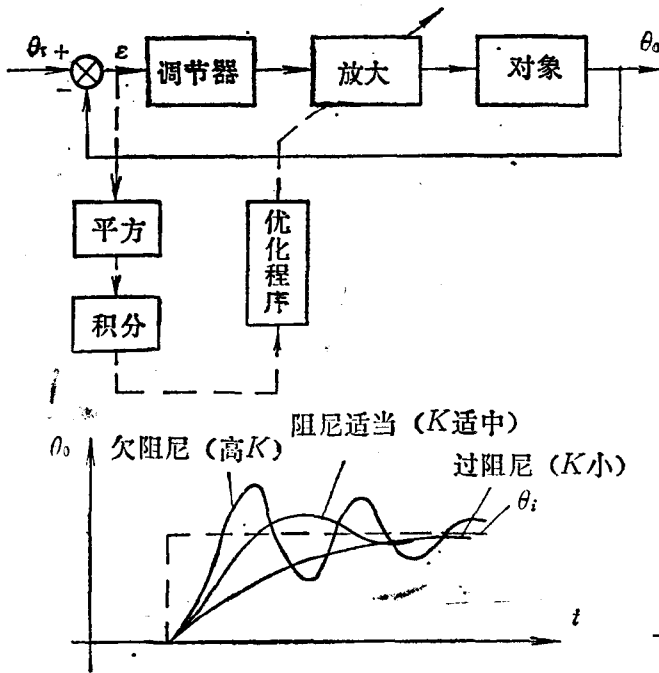


图 12.3.2 增益列表补偿法应用实例

在这个系统中，辅助变量是误差 e 。由于随机性阵风等干扰引起的系统的负荷变化，从而使系统的误差有突然变化，对于阶跃输入扰动，算出它的响应的 ISE (Integral of The Square Error)，并且通过最优化程序得到在不同工作条件下最

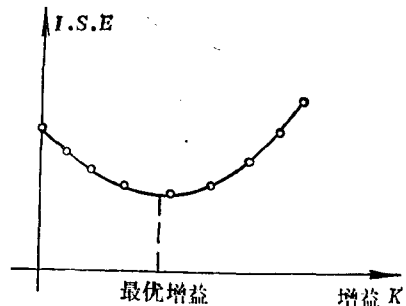
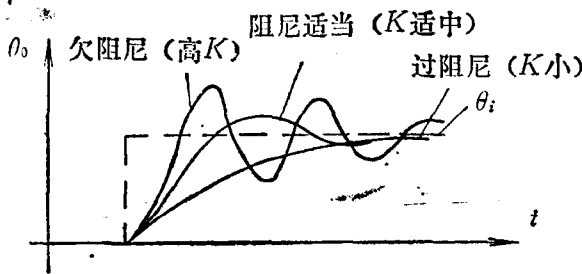


图 12.3.3 不同增益下的误差平方积分值

优的 K 值，再调节增益直至 ISE 最小，如图 12.3.3。

对于在不同工作条件之间的过渡特性应予以特别注意，如有必要应适当增加工作条件（分组区段）的数目。

Källström 及其同事^[36] (1979) 给出这种类型自适应控制系统的例子。Niemmi^[35] (1981) 指出，流动控制亦属此类。

增益列表补偿法的特点:

1. 就补偿部分而言,它是一种开环补偿,不能通过反馈消除错误的增益补偿。
2. 设计增益补偿表很费时间,需要在各种工作条件下进行大量仿真才能确定。应用无量纲的标准化的辅助变量为基础,可减少一部分计算工作量。
3. 只要设计得合适,调节器参数能很快地适应对象状态和环境的变化。

目前对这种方法是否属于自适应控制范畴还存在争论。不管结论如何,增益列表补偿法对减少参数变化的影响无疑是一种有用的方法,实际上,在处理飞行控制系统参数变化的方法中,此法占主要地位。

二、随机自适应控制系统

这类自适应控制器是目前讨论得较多,应用也比较广泛的一种自适应控制器。它有时称作非谨慎控制器,或称为确定等效控制器。

这类自适应控制器考虑了随机扰动和量测噪声,并以“分离原理”作为理论依据。

随机最优控制中的分离原理表明:在线性、二次、高斯条件下,整个控制策略分为两个部分:最优估计和最优控制。因此对于参数未知的控制对象,可用参数的实时估计代替最优控制中参数的真值,使估计和控制分开进行,使问题简单明瞭。该原理在线性、二次、高斯情况下已得到证明,在一般情况下,分离定理是否成立还需讨论。尽管如此,在工程应用中因为没有其它办法,对不是线性、二次、高斯噪声问题往往也按分离原理来处理,这样做常常是有效的,但是应警惕,这种做法在理论上是没有保证的。

应用“分离原理”以后,随机自适应控制系统中将有一个参数(或状态)辨识器。其原理如图12.3.4所示。

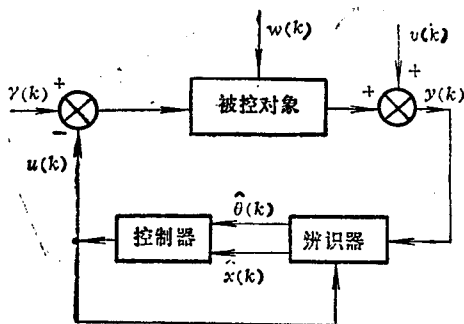


图 12.3.4 带有辨识器的随机自适应控制系统

辨识器在对系统的输入输出数据进行采样后辨识出对象的参数(或状态),而控制器参数计算环节是否出现,取决于所取何种自适应方案,如出现,则自适应律机构称为显式随机自适应控制系统,否则称之为隐式随机自适应控制系统。

随机自适应控制系统由被测对象、辨识器和控制器等三部分组成。辨识器根据系统的运行数据及某一选定的辨识算法,在线地计算被控对象的未知参数的估值

$\hat{\theta}(k)$ 和未知状态 $x(k)$ 的估值 $\hat{x}(k)$ 。控制器再根据估计出的 $\hat{\theta}(k)$ 及 $\hat{x}(k)$,以及事先选定的性能指标,综合出相应的控制作用 $u(k)$ 。尽管系统以及环境在不断地变化,由于控制动作是根据这些变化着的环境以及系统的数据不断辨识,不断综合出新的控制律,因而系统具有一定的适应能力,系统的动态指标将逐渐地趋向最优。在这种自适应控制系统中,不确定性可以通过辨识及控制作用逐步减小,对参数估计 $\hat{\theta}(k)$ 及状态估计 $\hat{x}(k)$ 都是收敛的,而且最后都渐近地收敛到它的真值,那么,最终自适应控制也将收敛到其参数已知时的最优控制。

目前参数估计和状态估计的方法很多，最优控制的算法也很多，因而组成相应的随机自适应控制系统的方案将是灵活的。例如，在辨识和估计理论中，已有下列的算法：

1. 递推最小二乘算法(RLS)
2. 递推广义最小二乘算法(RELS)
3. 递推极大似然算法(RML)
4. 递推扩展并联结构模型参考算法(REPM)
5. 递推适应式状态观测器算法(RASO)

另外也有一些控制算法：

1. 最小方差控制算法
2. 最小拍控制算法
3. 极点配置控制算法
4. PID控制算法
5. 模型跟随控制算法

等。由此经过适当组合，可以得到各种类型的带辨识器的自适应控制系统^[37]。

值得提出的是，自校正调节器是一种简便有效的工业控制器。自校正调节器最初由卡尔曼于1958年首先提出，以后便得到了广泛的应用。Åström和Wittenmark将自校正调节器应用于纸张的基重和含水量控制中，获得了满意的效果。

实际应用中，更多的是多变量自校正调节器。对于SISO系统，应用微型计算机是极易实现的。用FORTRAN—IV语言编写的程序将不超过100条语句，如果损失一些程序的易读性，则语句将更少^[1]。

三、模型参考自适应控制系统 (MRAS)

模型参考自适应控制系统的原理如图12.3.5所示。

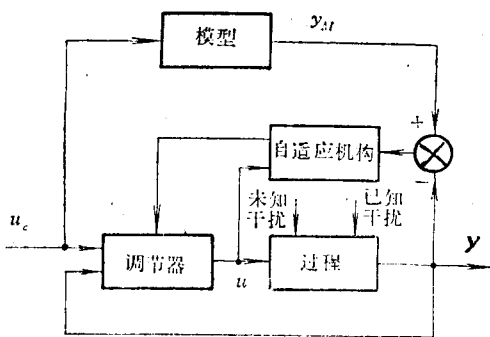


图 12.3.5 模型参考自适应控制系统

它的基本结构可看作是由两个回路组成：里面的回路是由过程与调节器组成的普通控制回路；外面是调节器参数调整回路，即自适应回路。系统的性能指标是以参考模型的方式给出的，它表明过程的理想输出应如何对输入信号作出响应。调节器参数调整的依据是使模型输出（或状态）与过程输出（或状态）进行比较，使其差别逐步缩小。由于参数的修改是在控制系统内部直接产生的，因而也有人称之为直接式自适应控制系统。还有其它的

MRAS方案，其中调节器参数是间接修改的^[38]。

模型参考自适应控制系统的设计需解决两个问题：

1. 模型完全匹配条件

设对象和模型的状态误差向量为

$$e(t) = x_p(t) - x_m(t) \quad (12.3.1)$$

自适应控制律作用的结果应使 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$, 这就是模型完全匹配条件。它说明系统的实际输出趋于理想输出值。

2. 适应机构能调整控制器的参数

由于设计自适应控制律的方法不同, 模型参考自适应控制系统有三类设计方法:

1. 参数最优化设计方法

其原理如图12.3.6。

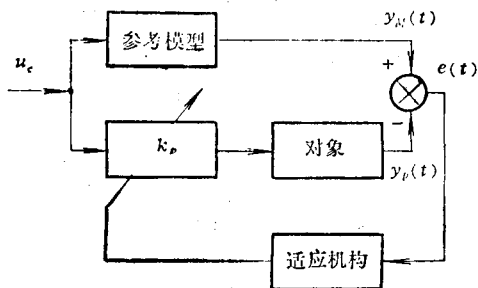


图 12.3.6 参数优化模型参考自适应控制系统

方案中调节 K_p 以满足模型完全匹配条件。应用梯度法可以得到自适应律为:

$$\dot{K}_p(t) = \beta e(t) y_m(t) \quad (12.3.4)$$

β —比例因子。可以证明, 由于上式的非线性因素, β 的取值会影响系统在输入作用下输出的稳定性, 因此用此法得到的自适应律应用在实际系统中可能出现不稳定现象。

2. 李亚普诺夫稳定性理论设计方法

其原理如图12.3.7。

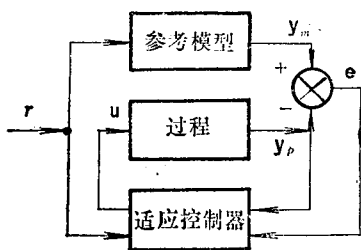


图 12.3.7 应用李亚普诺夫稳定性理论的模型参考自适应控制系统

律。

3. 波波夫超稳定性理论设计方法

应用超稳定性方法及有关定理^{[39][40]}, 亦可设计模型参考自适应控制系统。

基本的思路是: 首先要把系统变成等价的非线性时变反馈系统, 即系统由一个线性前向环节和非线性反馈环节构成:

- ① 前向环节应是线性的, 且是正实的;
- ② 反馈环节是非线性时变的, 满足波波夫积分不等式。

其基本思路是: 选定一个与系统误差有关的判据, 如

$$J = \int_0^t \varepsilon^2(t) dt \quad (12.3.2)$$

$$\varepsilon(t) = y_m(t) - y_p(t) \quad (12.3.3)$$

其中 $y_m(t)$ 和 $y_p(t)$ 分别是参考模型和对象的输出, $e(t)$ 是输出误差。采用参数最优化的方法(如梯度法, 最速下降法, 牛顿—拉普森法) 来确定控制器参数的调整规律, 以使判据取得最优。

基本思路是: 列写出等效的误差系统的运动方程后, 设计出合适的李亚普诺夫函数, 以保证系统的全局稳定性, 从而也得到了自适应控制律。

应指出, 选取不同的李亚普诺夫函数, 可得到不同的自适应控制律, 从而得到不同的动态性能, 因此稳定性设计方法仅保证了系统的全局稳定性, 而对具体的动态特性却得不到事先的保证, 因而常用试探法找出合适的自适应

再次，由此解出需要的自适应控制律。

在许多情况下，这个方法可以极大地简化的自适应控制系统分析与设计。这方面内容将在第十四章中介绍。

四、其它自适应控制系统

目前自适应控制正处于蓬勃发展的阶段，出现了许多自适应程度不同的新型自适应控制系统，有的系统还具有某些特殊的功能，如有些自适应控制系统，随着对象和环境的变化，不仅能改变控制器的参数，而且能改变控制器的结构，以进一步提高自适应控制器的性能。再如，有些自适应控制系统具有图象识别的功能，这使自适应控制系统的功能有了新的发展；而那些具有人工智能功能的智能控制系统，则具有学习的功能，它可以总结经验、避免错误和寻找最佳决策。可以预见，在不远的将来，自适应控制系统将会有质的飞跃，使自适应控制系统更趋完善。

目前我们仅对研究得比较多，得到较多实际应用的参数自适应控制系统进行探讨。

§ 12.4 自适应控制理论研究的现状

近年来，自适应控制领域取得的主要成果是：解决了大范围稳定性的问题，理清了自适应控制各种实现方法之间的等价性。这些发展成果使我们有可能应用统一的方式来研究自适应控制的一些问题。

对象和模型之间的状态误差向量 $e(t)$ ，一般可用形如^[41]

$$\dot{e}(t) = f_1[e(t), \phi(t), t] \quad (12.4.1)$$

的非线性时变微分方程描述，或用

$$e(k+1) = f_1[e(k), \phi(k), k] \quad (12.4.2)$$

的差分方程来描述。

设 θ^* 表示期望（但未知）的控制器参数向量， $\theta(t)$ 表示其实际值，则

$$\phi(t) = \theta(t) - \theta^* \quad (12.4.3)$$

为参数误差向量。自适应控制的目的是利用所有可能的信息，产生自适应控制律：

$$\dot{\phi}(t) = f_2[e(t), t] \quad (12.4.4)$$

或

$$\Delta\phi(k) = f_2[e(k), k] \quad (12.4.5)$$

使所有的信号一致有界，且 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ 。

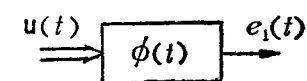

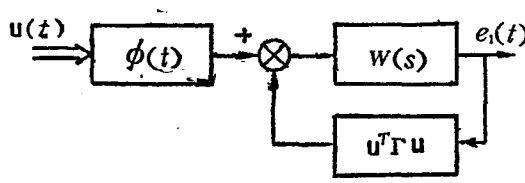
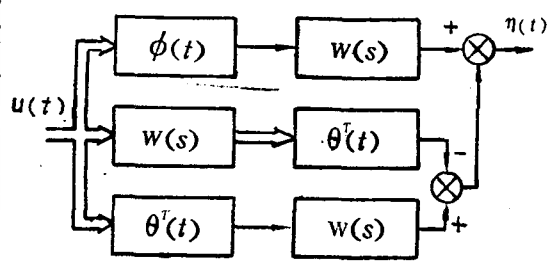
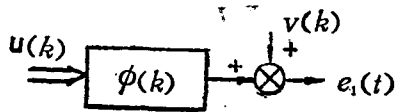
由上可知，建立自适应控制系统的误差模型，可以导出相应的自适应控制律，有助于各种自适应控制律实现方法之间等价性的研究。

一、自适应控制中的误差模型^[41]

目前研究工作表明，误差模型可有如表12.4.1中的几类。

表 12.4.1

自适应控制中的误差模型

| 模型 | 误差模型 | 自适应律 | 条件 |
|----|---|--|---|
| A |  | $\dot{\phi}(t) = \frac{-\alpha \Gamma e_1(t) u(t)}{1 + u^T(t) \Gamma u(t)}$ $\alpha > 0, \Gamma > 0$ | |
| B |  | $\dot{\phi}(t) = -e^T(t) P b u(t)$ $P = P^T > 0$ $A^T P + P A = -Q, Q > 0$ | $W(S) = (SI - A)^{-1} \cdot b$ $W(S)$ 稳定 |
| C |  | $\dot{\phi}(t) = -\Gamma e_1(t) u(t)$ | $W(S)$ 严格正实 |
| D |  | $\dot{\phi}(t) = \frac{-\Gamma \eta(t) \zeta(t)}{1 + \zeta^T(t) \Gamma \zeta(t)}$ | |
| E |  | $\phi(k+1) = \left[I - \frac{\alpha \Gamma u(k) u^T(k)}{1 + u^T(k) \Gamma u(k)} \right] \phi(k) - \frac{\alpha \Gamma u(k) v(k)}{1 + u^T(k) \Gamma u(k)}$ | |

设 $x_p(t)$ 和 $x_m(t)$ 是对象和模型的状态向量,

$$x_p(t) - x_m(t) = e(t) \tag{12.4.6}$$

$$e_1(t) = C^T e(t) \tag{12.4.7}$$

$e_1(t)$ 是标量输出误差。 $e_2(t)$ 为辅助误差, 而

$$\eta(t) = e_1(t) + e_2(t) \tag{12.4.8}$$

为增广误差。

二、自适应控制的大范围稳定性

稳定性对于一个控制系统来说是基本的要求。在分析自适应控制系统稳定性方面已做了大量工作, 但是对某些自适应控制方案仅在最近才得到其大范围稳定性的证明。

众所周知，自适应控制系统是一个非线性控制系统，对于非线性微分方程，稳定性的概念指的是某一特解的稳定性。因此，一个解是稳定的，而另一个解却可能是不稳定的。

如果对象的传递函数为 $W_p(s)$ ，有 n_1 个极点， m_1 个零点， $n_1^* = n_1 - m_1$ ；参考模型的传递函数为 $W_m(s)$ ，有 n_2 个极点， m_2 个零点， $n_2^* = n_2 - m_2$ 。

假设：

1. n_1^* 已知；
2. $n_2^* \geq n_1^*$ ；
3. n_1 的上界已知；
4. $W_p = K_p \frac{p(s)}{q(s)}$ ， $p(s)$ 及 $q(s)$ 是首一的多项式， K_p 的符号已知；
5. 对象的零点应是稳定的。

在上述条件下，所谓大范围稳定性是指：对象和控制中的信号是一致有界的，且 $t \rightarrow \infty$ ， $e_1(t) \rightarrow 0$ 。

对于图 12.4.1 所示的自适应控制系统， F 是已知的滤波器， $\xi(t)$ 是 F 的 $(n \times 1)$ 维输出向量， $\theta^T(t)\xi(t)$ 是反馈控制信号，而 $\xi^T(t)\Gamma\xi(t)e_1(t)$ 是附加的反馈信号。

若对象传递函数 $W_p(s)$ 是严格正实，而且是严格定常的 [41]，则其误差方程的形式为

$$W_p(s)Y(t) = e_1(t) \quad (12.4.9)$$

$$Y(t) = \theta^T(t)\xi(t) - \xi^T(t)\Gamma\xi(t)e_1(t) \quad (12.4.10)$$

相应于表 12.4.1 所述的模型 C，可得到相应的自适应控制律。从而可以推得：

$e_1(t)$ 和 $Y(t)$ 是有界的；

$y_m(t)$ 有界， $y_p(t)$ 和 $\xi(t)$ 是一致有界的，且 $t \rightarrow \infty$ ， $e_1(t) \rightarrow 0$ 。

若 $W_p(s)$ 不是严格正实的，则不能运用模型 C，即这个解不是稳定解，而需寻求另一稳定解。可以应用推广误差法，得到相当于误差模型 D 来证明其稳定性。

文献 [41] 证明了相应于误差模型 D 的自适应控制律，可以得到下述结论：

$e(t)$ 是有界的；

$e_1(t) = y_p(t) - y_m(t)$ 也是一致有界的。

从上面的例子可以看到，对于某些自适应控制方案，在各种不同的条件下，构造不同的误差模型，并得到不同的自适应律，可以证明其大范围的稳定性。这说明在不同的条件下，得到不同的稳定解。

大范围稳定性问题的解决，对自适应控制理论的发展无疑是起到了极大的推动作用。

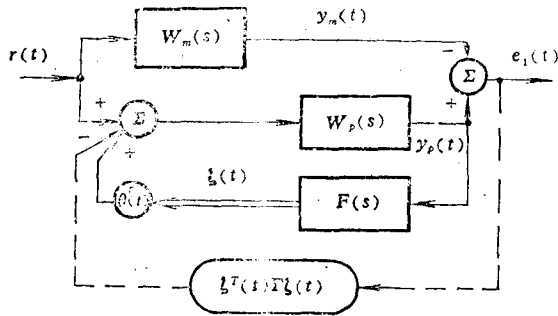


图 12.4.1 自适应控制系统中的误差模型