

《信息、控制与系统》系列教材

韩曾晋 编著

自适应控制

清华大学出版社

《信息、控制与系统》系列教材

自适应控制

韩曾晋 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书是作者在清华大学自动化系为高年级大学生和研究生讲授“自适应控制”课程的教材。书中全面地介绍了自适应控制的理论和应用。本书前六章包括预备知识、模型参考自适应控制和辨识、离散时间系统的参数递推估计及自校正控制等,这些属于本课程的基本内容。第七章自适应控制系统鲁棒性和收敛性分析及第八章基于神经网络的自适应控制则属于本学科中较深入的或前沿的研究课题,这部分内容可供研究生选读。第九章介绍自适应控制几个成功的应用实例。

本书内容丰富,论述精炼,反映了本学科的基本内容和最新成就。适合作为自动化有关专业大学生和研究生教材,也可供该领域内的研究人员和工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

自适应控制/韩曾晋著. —北京:清华大学出版社,1995

《信息、控制与系统》系列教材

ISBN 7-302-01818-9

I. 自… I. 韩… III. 自适应控制-教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 03771 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

责任编辑: 王仁康

印 刷 者: 北京市海淀区清华园印刷厂

发 行 者: 新华书店总店科技发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16.75 字数: 389 千字

版 次: 1995 年 6 月第 1 版 1995 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-01818-9/TP·814

印 数: 0001—3000

定 价: 12.00 元

《信息、控制与系统》系列教材

出版说明

《信息、控制与系统》系列教材是一套关于信息、控制和系统学科的基本理论和应用技术的高等学校教材。选题范围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、系统理论、系统工程、机器人控制、智能控制、计算机应用和控制等方面。主要读者对象为自动控制、计算机、过程自动化、无线电等系科的高年级大学生和研究生,以及在这些领域和部门工作的科学工作者和工程技术人员。

信息、控制与系统科学是在本世纪上半叶形成和发展起来的新兴学科。它们的应用和影响已经遍及众多的部门和领域,贯穿其中的许多思想和方法已用于经济和社会现象的研究,而以这些学科为理论基础的自动化技术的广泛应用更是实现现代化的重要标志之一。这套系列教材,正是在这样的客观要求下,为适应教学和科研工作的需要而编写和出版的。它以清华大学自动化系近年来经过教学实践的新编教材为主,力求反映这些学科的基本理论和最新进展,并且反映清华大学在这些学科中科学研究和教学研究的成果。我们希望这套系列教材,既能为在校大学生和研究生的学习提供较为系统的教科书,也能为广大科技人员提供有价值的参考书。

组编和出版这套教材是一次尝试。我们热忱欢迎选用本系列教材的老师、学生和科技工作者提出批评、建议。

《信息、控制与系统》系列教材编委会

一九八七年三月

《信息、控制与系统》系列教材编委会

主 编	编 委	常 迥		
		常 迥	童诗白	方崇智
		韩曾晋	李衍达	郑大钟

责任编辑 蔡鸿程 王仁康

前 言

70年代以来,由于空间技术和过程控制发展的需要,特别是在微电子和计算机技术的推动下,自适应控制技术发展很快。到了80年代末和90年代初,自适应控制理论和设计方法已日臻成熟,内容更加丰富,应用的领域也日益扩大。为适应自适应控制技术发展的需求,我们在清华大学开设此课已有十余年历史,在教学内容和方法上都积累了一定的经验,在此基础上,我们编写了这本“自适应控制”的新教材。

本书绪论主要介绍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和应用的发展概况。第一章是学习本书所需的预备知识,内容包括范数、稳定性理论和平稳随机过程。第二章模型参考自适应辨识和第三章模型参考自适应控制主要是讨论确定性、连续时间系统的辨识和控制问题。本书的第四章讨论离散时间系统的参数估计问题。第五章自校正控制(一)是从最优控制的观点出发讨论几类自校正控制器的设计问题;第六章自校正控制(二)是从经典控制的观点出发讨论自校正控制器的设计问题。以上六章是自适应控制理论中比较基本和成熟的内容,可以作为学习本课程的基础教材。

第七章自适应控制的鲁棒性和收敛性分析,第八章基于神经网络的自适应控制,均属于自适应控制中较深入的和正在研究中的课题,这两章的内容可供自动化专业的研究生选读参考。

第九章自适应控制的应用介绍了自适应控制器商品化的概况以及自适应控制技术在复杂对象的预报和控制中应用的一些成功的实例,其中包括作者的研究成果。

本书为工程专业人员而写,重点在阐述自适应控制的基本概念、工具和设计方法,并引导读者尽快地进入本学科的前沿。书中对一些复杂、繁琐的数学推导和证明,尽可能简化或省略,对此有兴趣的读者可以查阅有关的参考文献。书中带*的部分属于较深入的内容,读者可以选学。本书的先修课程为线性代数、随机过程与自动控制原理。

由于自适应控制的文献浩若烟海,所涉及的知识面也非常广泛,再加上作者的学识有限,书中的缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

作者

1994年8月

目 录

绪论	1
第一章 预备知识	9
1.1 范数	9
1.2 动态系统的稳定性理论	15
1.3 平稳随机过程	21
第二章 模型参考自适应辨识	29
2.1 一阶系统的模型参考自适应辨识	29
2.2 模型参考自适应辨识	33
2.3 线性误差方程及其参数辨识算法	42
第三章 模型参考自适应控制	49
3.1 一阶系统的模型参考自适应控制	49
3.2 模型参考自适应控制	52
第四章 离散时间系统模型及其参数估计	70
4.1 被控对象的离散时间模型	70
4.2 参数估计的最小二乘法	77
4.3 参数估计的投影算法	93
第五章 自校正控制(一)	101
5.1 最小方差自校正控制	101
5.2 广义最小方差自校正控制	109
5.3 基于多步预测的自适应控制	119
第六章 自校正控制(二)	134
6.1 极点配置自校正控制	134
6.2 自校正 PID 控制	144
6.3 PID 调节器的自动整定	147
6.4 增益调度控制	151
第七章 自适应控制系统的鲁棒性和收敛性分析	158
7.1 自适应控制的鲁棒性问题	158

7.2	指数收敛性与鲁棒性	164
7.3	平均方法及其在自适应系统分析中的应用	171
7.4	改善自适应系统鲁棒性的方法	192
第八章	基于人工神经网络的自适应控制	197
8.1	神经网络的结构	197
8.2	神经网络的学习算法	204
8.3	基于神经网络的辨识和控制结构	209
8.4	基于神经网络的内模控制	214
第九章	自适应控制的应用	226
9.1	工业自适应控制器及其应用	226
9.2	自适应技术在一些复杂系统中的应用	232
附录	关于平均方法的一些定义和定理	251

绪 论

为了使读者尽快地了解本书的概貌,在绪论中讨论以下三个基本问题: 1. 什么是自适应控制; 2. 两类重要的自适应控制系统; 3. 自适应控制的理论及应用的发展概况。

1. 什么是自适应控制

在日常生活中,所谓自适应是指生物能改变自己的习性以适应新的环境的一种特征。因此,直观地讲,自适应控制器应当是这样一种控制器,它能修正自己的特性以适应对象和扰动的动特性的变化。

自适应控制的研究对象是具有一定程度不确定性的系统,这里所谓“不确定性”是指描述被控对象及其环境的数学模型不是完全确定的,其中包含一些未知因素和随机因素。

任何一个实际系统都具有不同程度的不确定性,这些不确定性有时表现在系统内部,有时表现在系统的外部。从系统内部来讲,描述被控对象的数学模型的结构和参数,设计者事先并不一定能确切知道。作为外部环境对系统的影响,可以等效地用许多扰动来表示。这些扰动通常是不可预测的,它们可能是确定性的,如常值负载扰动,其幅值和出现的时间是不可预知的;也可能是随机性的,如海浪和阵风的扰动。此外,还有一些量测噪声从不同的测量反馈回路进入系统。这些随机扰动和噪声的统计特性常常是未知的,面对这些客观存在的各式各样的不确定性,如何设计适当的控制作用,使得某一指定的性能指标达到并保持最优或近似最优,这就是自适应控制所要研究解决的问题。

下面进一步说明自适应控制问题与自控理论中其他分支,如最优控制、随机控制等等

的关系。

设被控对象可用以下非线性微分方程描述:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f[x(t), u(t), \theta, t] \\ y(t) &= h[x(t), u(t), \theta, t]\end{aligned}$$

其中, $x(t)$ 表示系统的状态变量, n 维; $u(t)$ 表示系统的输入向量, m 维; $y(t)$ 表示系统的输出向量, r 维; θ 为未知的参数向量, s 维。

假设上述方程能够线性化和离散化,然后再考虑扰动和噪声的影响即得以下方程组:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= \Phi(\theta, k)x(k) + \Gamma(\theta, k)u(k) + w(k) \\ y(k) &= H(\theta, k)x(k) + v(k)\end{aligned}$$

其中, k 表示离散时间,取整数; $\{w(k)\}$ 表示 n 维随机扰动; $\{v(k)\}$ 表示 r 维量测噪声; $\Phi(\theta, k), \Gamma(\theta, k), H(\theta, k)$ 分别为 $n \times n, n \times m, r \times n$ 矩阵。被控对象(过程)的结构如图 0.1 所示。

以图 0.1 为基础,让我们分析各种控制问题的条件和数学描述。

(1) 确定性最优控制问题

这是一种最简单的情况,它所对应的条件如下:

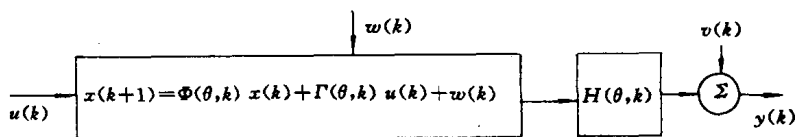


图 0.1 被控对象的结构图

① 矩阵 $\Phi(\theta, k), \Gamma(\theta, k), H(\theta, k)$ 中的参数向量 θ 是已知的, 即矩阵 Φ, Γ, H 是已知的。

② $\{w(k)\}, \{v(k)\}$ 是时间 k 的确定性函数, 另外, 系统的初始状态也认为是已知的, 通常是:

$$w(k) = \text{常向量}; \quad x(0) = x_0 = \text{已知常向量}; \quad v(k) = 0$$

所以确定性最优控制问题的描述是: 在已知对象模型和扰动模型条件下, 综合一个控制序列 $u(0), u(1), \dots, u(N-1)$, 使某一指定的性能指标函数 J 达到最小, 即

$$J = \sum_{k=0}^N C[x(k), u(k), k] = \text{最小}$$

其中, $C[x(k), u(k), k]$ 表示第 k 阶段的代价; 整个控制过程共分 N 段; J 表示整个控制过程的总代价, 即系统的性能指标。

(2) 随机最优控制问题

这种情况比上述情况要复杂一些, 它所对应的条件是:

① 矩阵 $\Phi(\theta, k), \Gamma(\theta, k), H(\theta, k)$ 中的参数向量 θ 是已知的, 即 Φ, Γ, H 已知。

② 扰动 $\{w(k)\}$ 和 $\{v(k)\}$ 是统计特性已知的随机序列, 初始状态 $x(0)$ 是统计特性已知的随机向量。

随机最优控制问题的描述是: 在对象和扰动的数学模型已知的条件下, 要求综合一个控制序列 $u(0), u(1), \dots, u(N-1)$, 使得总代价的数学期望达到最小, 即

$$J = E \left\{ \sum_{k=0}^N C[x(k), u(k), k] \right\} = \text{最小}$$

在随机情况下, C 是一个随机变量 x 的函数。用 C 的概率平均值来计算和比较性能指标的大小才是有意义的。

(3) 自适应控制问题

这是一种更复杂的情况, 它所对应的条件为:

① 矩阵 $\Phi(\theta, k), \Gamma(\theta, k), H(\theta, k)$ 中的参数向量 θ 是未知的, 即矩阵 Φ, Γ, H 有些元为未知。

② $\{w(k)\}, \{v(k)\}$ 是统计特性未知的随机序列, $x(0)$ 为统计特性未知的随机向量。

自适应控制问题的描述可归结为: 在对象和扰动的数学模型不完全确定的条件下, 设计控制序列 $u(0), u(1), \dots, u(N-1)$, 使得指定的性能指标尽可能地接近和保持最优。

(4) 智能控制问题

自适应控制所讨论的对象, 一般是指对象的结构已知, 仅仅是参数未知, 而且采用的控制方法仍是基于数学模型的方法。但是实践中我们还会遇到结构和参数均未知的对象, 比如对一些运行机理特别复杂、目前尚未被人们充分理解的对象, 不可能建立有效的数学

模型,因而也无法沿用完全基于数学模型的方法来解决其控制问题。这时要借助于人工智能学科,例如建立基于操作人员的知识和经验的专家系统来进行控制。由于智能控制涉及许多其他的学科领域,大大超出了本书的讨论范围,我们仅对智能控制中与自适应控制关系最密切的一个分支,即人工神经网络控制,在本书的第八章进行介绍。

通过以上的分析可知,自适应控制与常规反馈控制与最优控制一样,也是一种基于数学模型的控制方法,所不同的只是自适应控制所依据的关于模型和扰动的先验知识比较少,需要在系统的运行过程中去不断提取有关模型的信息,使模型逐渐完善。具体地说,可以依据对象的输入输出数据,不断地辨识模型的参数,这个过程称为系统的在线辨识。随着生产过程的不断进行,通过在线辨识,模型会变得愈来愈准确,愈来愈接近于实际。既然模型在不断地改进,显然,基于这种模型综合出来的控制作用也将随之不断改进。在这个意义下,控制系统具有一定的适应能力。譬如说,当系统在设计阶段,由于对象特性的初始信息比较缺乏,系统在刚开始投入运行时可能性能不理想,但是只要经过一段运行,通过在线辨识和控制以后,控制系统逐渐适应,最终将自身调整到一个满意的工作状态。再比如某些被控对象,其特性可能在运行过程中要发生较大的变化,但通过在线辨识和改变控制器参数,系统也能逐渐适应。总之在自适应控制系统中所发生的过程分为两个类型。一类是系统状态的变化,变化速度比较快;另一类是参数的变化和调整,变化速度比较慢。这就提出了两个时间尺度的概念:适用于常规反馈控制的快时间尺度以及适用更新控制器参数的慢时间尺度。两种时间尺度的过程并存,是自适应控制的又一特点,它同时也增加了自适应控制系统分析的难度。

当然,常规反馈控制系统对于系统内部特性的变化和外部扰动的影响都具有一定的抑制能力,但由于控制器参数是固定的,所以当系统内部特性变化或外部扰动的变化幅度很大时,系统的性能常常会大幅度下降,甚至不稳定。

由此可见,对于那些对象特性或扰动特性变化范围很大,同时又要求经常保持高性能指标的一类系统,采用自适应控制是合适的。

最后应当指出,自适应控制比常规反馈控制要复杂得多,成本也高,只是在常规反馈控制达不到期望的性能时,才考虑采用。

2. 两类重要的自适应控制系统

自从 50 年代末期由美国麻省理工学院提出第一个自适应控制系统以来,先后出现过许多不同形式的自适应控制系统。发展到现阶段,无论是从理论研究还是从实际应用的角度来看,比较成熟的自适应控制系统有下述两大类。

(1) 模型参考自适应控制系统(Model Reference Adaptive System,简称 MRAS)

模型参考自适应控制系统由以下几部分组成,即参考模型、被控对象、反馈控制器和调整控制器参数的自适应机构等部分,如图 0.2 所示。

从图 0.2 可以看出,这类控制系统包含两个环路:内环和外环。内环是由被控对象和控制器组成的普通反馈回路,而控制器的参数则由外环调整。

参考模型的输出 y_m 直接表示了对象输出应当怎样理想地响应参考输入信号 r 。这种用模型输出来直接表达对系统动态性能的要求的作法,对于一些运动控制系统往往是很

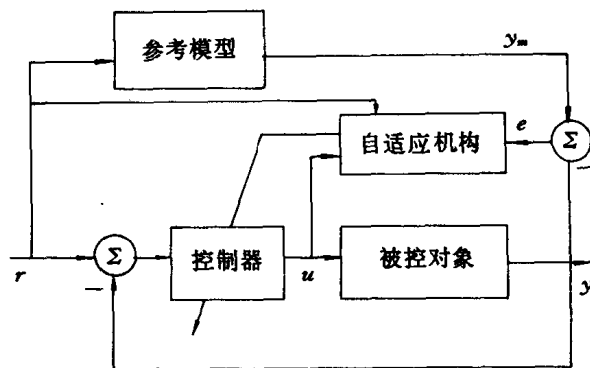


图 0.2 模型参考自适应控制系统

直观和方便的。

控制器参数的自适应调整过程是这样的：当参考输入 $r(t)$ 同时加到系统和参考模型的入口时，由于对象的初始参数未知，控制器的初始参数不可能调整得很好。因此，一开始运行系统的输出响应 $y(t)$ 与模型的输出响应 $y_m(t)$ 是不可能完全一致的，结果产生偏差信号 $e(t)$ ，由 $e(t)$ 驱动自适应机构，产生适当的调节作用，直接改变控制器的参数，从而使系统的输出 $y(t)$ 逐步地与模型输出 $y_m(t)$ 接近，直到 $y(t) = y_m(t)$ ， $e(t) = 0$ 为止。当 $e(t) = 0$ 后，自适应参数调整过程也就自动中止。

当对象特性在运行中发生了变化时，控制器参数的自适应调整过程与上述过程完全一样。

设计这类自适应控制系统的核心问题是如何综合自适应调整律（以下简称自适应律），即自适应机构所应遵循的算法。关于自适应律的设计目前存在两类不同的方法。其中一种称为局部参数最优化的方法，即利用梯度或其他参数优化的递推算法，求得一组控制器的参数，使得某个预定的性能指标，如 $J = \int e^2(t) dt$ ，达到最小。最早的 MIT 自适应律就是利用这种方法求得的。这种方法的缺点是不能保证参数调整过程中，系统总是稳定的。自适应律的另一种设计方法是基于稳定性理论的方法，其基本思想是保证控制器参数自适应调节过程是稳定的，然后再尽量使这个过程收敛快一些。由于自适应控制系统是本质非线性的，因此，这种自适应律的设计自然要采用适用于非线性系统的稳定理论。Lyapunov 稳定性理论和 Popov 的超稳定性理论都是设计自适应律的有效工具。由于保证系统稳定是任何闭环控制系统的基本要求，所以基于稳定性理论的设计方法引起了更广泛的关注。

本书将在第二、第三两章分别介绍基于 Lyapunov 稳定理论的模型参考自适应辨识器和控制器的设计方法。

(2) 自校正调节器 (Self-tuning Regulator, 简称 STR)

这类自适应控制系统的一个主要特点是具有一个被控对象数学模型的在线辨识环节，具体地说是加入了一个对象参数的递推估计器。

由于估计的是对象参数，而调节器参数还要求解一个设计问题方能得出，所以这种自适应控制系统可用图 0.3 的结构描述。这种自适应调节器也可设想成由内环和外环两个

环路组成,内环包括被控对象和一个普通的线性反馈调节器,这个调节器的参数由外环调

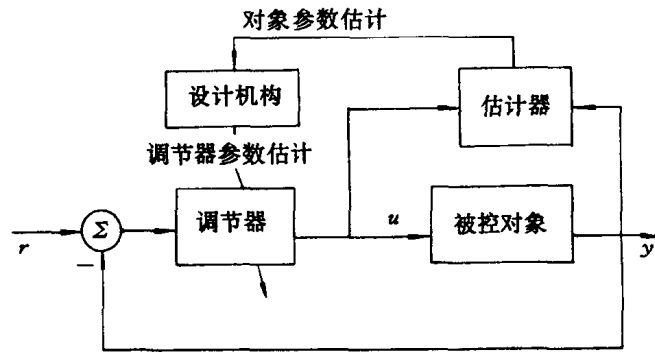


图 0.3 自校正调节器(STR)的结构图

节,外环则由一个递推参数估计器和一个设计机构所组成。这种系统的过程建模和控制的设计都是自动进行,每个采样周期都要更新一次。这种结构的自适应控制器称为自校正调节器,采用这个名称为的是强调控制器能自动校正自己的参数,以得到希望的闭环性能。

图 0.3 中的设计机构表示当对象参数已知时,对调节器的参数进行在线求解。由于调节器的控制律是多样的,如 PID 调节、最小方差调节等等,而且参数估计的方法也是多样的,如最小二乘法、极大似然法等等,因此自校正调节器 STR 方案也非常灵活,可以采用各种不同控制方法和估计方法来搭配,以满足不同的性能要求。

图 0.3 中的自校正调节器中,调节器的参数是通过设计计算机机构间接更新的。我们也可以将对象重新参数化,即用调节器的参数来表示模型。这时,就不需要进行设计计算这个环节。算法将大大简化,设计机构的方框将不复存在,调节器参数将直接进行更新。Åstrom 和 Wittermark 最早发表的自校正调节器(1973)就是以这种形式出现的。

在设计自校正调节器时,不管是采用哪种形式,都需要进行参数的在线辨识,所以,第四章我们将系统地介绍参数实时估计的递推算法,然后在第五章和第六章分别从最优控制和常规控制的观点介绍各种类型的自校正调节器,或者从更广泛的意义上说,介绍各种自校正控制器的设计方法。

最后我们比较两种自适应控制系统,即模型参考自适应控制与自校正调节器。

模型参考自适应控制系统源于确定性的伺服问题,而自校正调节器则源于随机调节问题。尽管它们的来源不同,但从图 0.2 与图 0.3 可以清楚地看出,它们是密切相关的。两个系统都有两个反馈回路,内环都是由对象和调节器组成的普通反馈回路,内环调节器具有由外环调整的可调参数,而外环的调整是以对象输入和输出的反馈为基础。不过,这两个系统的内环设计方法和由外环调整内环调节器参数时所用的技术是不同的。在模型参考自适应控制系统中,调节器的参数是直接更新的,而在自校正调节器中,调节器的参数是经由参数估计和控制的设计计算而间接进行更新的。然而,这些差别是非本质的。如前所述,自校正调节器经过修正(用调节器参数重新参数化)也可以直接更新其调节器参数,而不必经过控制设计计算这一环节。

我们在介绍模型参考自适应控制时用连续时间模型,介绍自校正调节器时采用离散时间模型。这种阐述方式与自适应控制的发展情况基本相符合,因为自校正调节器通常是

用计算机来实现的。

3. 自适应控制的理论和应用概况

自适应控制系统是一种本质非线性的系统,所以分析这种系统相当困难。自适应系统的理论进展比较缓慢,许多研究工作在理论上仍未达到合理和完整的程度。由于自适应系统的特性复杂,所以必须从几种不同的角度来考查它们。非线性系统理论、稳定性理论、系统辨识、递推参数估计、最优控制理论和随机控制理论等都有助于理解自适应控制系统的特性。但是,对自适应控制系统本身来说,最重要的理论研究课题还是集中在以下三个方面。

(1) 稳定性

自适应控制系统的稳定性是指系统的状态、输入、输出和参数等变量,在干扰的影响下,应当总是有界的。稳定性是对所有控制系统的基本要求,自适应控制系统当然也不能例外。在分析自适应控制系统动态性能方面,人们已花费了大量的精力,目前,稳定性理论已成为研究模型参考自适应控制系统的主要理论基础。大多数模型参考自适应控制系统,在分析其稳定性时,都可以归结为研究一个误差模型,这个误差模型由一个线性系统和一个非线性反馈环节所组成。关于系统稳定性的一个主要结果是:如果误差模型的线性部分的传递函数 G 是严格正实的 (Strict Positive Real, 简称 SPR), 而非线性部分是无源的, 则闭环系统是稳定的。如果线性系统的传递函数 G 不是严正实的, 我们就用一个线性滤波器 G_c 对误差进行滤波, 使组合传递函数 GG_c 是严正实的。模型参考自适应控制系统的许多自适应律都是由此导出, 而且它还可以保证在任意大的自适应增益下系统稳定, 即自适应的速度可以任意快。

然而, 为了使上述结果成立, 需要附加很强的假设条件, 而这些条件在实践中往往难于满足, 以致按稳定性理论设计的某些自适应控制系统在一定条件下仍会丧失稳定性。因此, 建立新的理论体系, 逐步放宽对被控对象及其环境的限制条件是当前迫切需要解决的理论问题。

自适应控制系统的稳定性问题, 我们将在第二、第三章中结合模型参考自适应系统的设计来详细进行分析。

(2) 收敛性

一个自适应控制算法具有收敛性是指在给定的初始条件下, 算法能渐近地达到其预期目标, 并在收敛过程中, 保持系统的所有变量有界。

在许多自适应控制系统中, 特别是在自校正控制中, 人们要采用各种形式的递推算法。当一个自适应控制算法被证明是收敛时, 它可以提高这个算法在实际中应用的可信度。另外, 收敛性的理论还有助于区分各种算法的优劣, 指明改进算法的正确途径。因此, 收敛性的研究对自适应控制系统具有重要的理论和实际意义。

由于自适应算法的非线性特性对建立收敛性理论带来很大的困难, 目前只在有限的几类简单的自适应控制算法中取得了一定的结果。而且现有收敛性结果的局限性太大, 假设条件限制太严, 不便于实际应用, 即使是保证参数估计收敛的最基本的要求, 即希望系统的输入信号能持续激励或足够丰富, 对于实际系统也不一定总能满足。

收敛性的理论研究还有待进一步深入。有关收敛性的问题,本书将在第四、五、六章中结合具体算法进行讨论。

(3) 鲁棒性

自适应控制系统的鲁棒性主要是指:在存在扰动和未建模动态特性的条件下,系统能保持其稳定性和一定动态性能的能力。这个问题直到 80 年代初期才被 Rohrs 所发现,而后,引起了自适应控制理论界的高度重视。现在已经查明,扰动能使系统参数产生严重的飘移,导致系统的不稳定,特别是在存在未建模的高频动态特性的条件下,如果指令信号过大或含有高频成分,或存在高频噪声,或者自适应增益过大,都可能使自适应控制系统丧失稳定性。基于对各种不稳定的机制的理解,目前,已提出了若干个不同方案来克服上述原因导致的不稳定性,但远未达到令人满意的程度。因此,如何设计一个鲁棒性强的自适应控制系统,至今仍是一个重要的理论研究课题。鉴于鲁棒性问题的重要性,我们将在第七章中介绍鲁棒性问题的由来、机制和分析工具。

下面介绍自适应控制的应用概况。

早在 50 年代末期,由于飞行控制的需要,美国麻省理工学院(MIT)的 Whither 教授首先提出了参考模型自适应控制方法,并且企图用它来解决飞行器的自动驾驶的问题。限于当时的计算机技术和控制理论的发展水平,飞行试验没有成功,这些新的控制思想因而没有得到应有的普及和推广。尔后,经过 20 余年的努力,自适应控制理论和系统的设计方法都有了一定的进展,特别是计算机技术的飞速发展,微型计算机和微处理器的广泛普及,自适应控制的应用又重新引起了控制工程师们极大的兴趣。70 年代以来,自适应控制不仅在工程应用方面取得了较大的进步,出现了一批成功应用的实例,在非工程领域,如社会、经济、管理、生物、医学等方面也进行了一些新的探索。以下仅对工程应用的几个主要方面作一概略介绍。

飞行器的控制是需要采用自适应控制技术的重要领域,这是由于飞机的动态特性决定于许多环境参数和结构参数,例如,与动态气压、高度、质量、机翼角、阻尼板位置等等参数都有关。在不同的环境条件下,这些参数可能在相当大的范围内变化,因此要想在不同的飞行条件下都能获得高的性能指标往往是很困难的。传统的解决办法是根据不同的环境条件,按事先安排好的程序,切换控制器的增益以适应不同的环境,这种控制方法称为增益调度控制。为了确定运行时环境条件,需要量测所有影响飞机动态特性的参数。这种实现方法对飞行器来说是不经济也不现实的,因为实际只能量测几个主要参数,如动态气压和高度。因此,控制性能不可能很理想。对于飞机这类工作环境复杂、参数幅度变化大的被控对象,采用自适应控制方案自然是很合理的,因为采用自适应控制之后,不仅常规控制系统中使用的复杂传感器可以大大节省,而且在不同飞行条件下的控制性能也可得到改善。文献[7]提出了一种数字自适应控制系统,通过混合数字仿真试验,证实了采用自适应控制的优越性。

大型海洋考察船和油轮的自动驾驶是成功应用自适应控制的另一例子。文献[5][6]提出的自适应自动驾驶仪取代了原有的 PID 调节器,实践证明采用自适应驾驶仪后,在变化的复杂的随机环境下,例如在海浪、阵风、潮流等的扰动下,在不同的气候、不同的负荷、不同的航速下,船舶都能适应,并且能够经济地、准确地和稳定可靠地工作。

在工业过程控制方面,由于原材料成分的不稳定(其成分随机波动),或者由于改换产品品种,或者由于设备磨损等等,这些因素都要使工艺参数发生变化,从而使产品质量不稳定。常规PID调节器不能很好地适应工艺参数的变化,往往需要经常进行整定。当采用自校正调节器后,由于调节器参数可以随着环境和特性的变化而自动整定,所以对各种不同的运行条件,调节器都能很好地工作,使被控过程输出对其设定值的方差达到最小。这样既保证了产品质量、又节省了原材料和能源的消耗。由于自校正控制的算法简单,一般用微机即可实现,因此,在工业控制的许多领域,例如造纸机的纸张的基重(单位面积的重量)控制、湿度控制,水泥的配料控制,蒸煮器和热交换器的温度控制,pH值的控制等方面,自校正控制器都得到了成功的应用^[10]。在运动控制和机械手控制方面,参考模型自适应控制技术较早地获得了成功的应用,比较著名的例子如24in卫星跟踪望远镜的高精度伺服系统,由于采用了模型参考自适应控制技术,自动补偿了系统在低速和超低速运行时,系统惯量的变化、增益的变化以及摩擦负载的非线性特性的变化,从而大幅度地提高了系统的稳态和动态跟踪的精度^[4]。

自适应控制的应用在我国亦有很大的发展,关于1980年以后在我国的成功应用的实例,读者可以参考文献[8]。在本书的最后一章将较详细地介绍几个成功应用的实例。

参 考 文 献

- [1] 韩曾晋编,自适应控制系统,机械工业出版社,1983
- [2] Åstrom K. J and Wittenmark B. , Adaptive Control, Addison-Wesley, 1989
- [3] Dubowsky S. and Desforges D. T. , The Application of Model-Referenced Adaptive Control to Robotic Manipulators, Tran of ASME Journal of Dynarnic Systems, Measurent and Control, 1979,Sept
- [4] James W. Gilbert and George C. Winston, Adaptive Compensation for Optical Tracking Telescope, Auromatica, 1974, March Vol. 10, No. 2
- [5] Amerogen J. Van, Adaptive Steering of Ships—A Model Reference Approach, Automatica, Vol. 20, No. 1, 1984
- [6] Källstrom C. G. , Åstrom K. J. , Thorell N. E. et al. , Adaptive Autopilots for a Tanker, Automatica, Vol. 15, No. 3, 1979
- [7] Hartmanu U. and Krebs V. Command and Stability Systems for Aircrafts: A New Digital Adaptive Approach, Automatica Vol 16, No. 2, 1980
- [8] 吴宏鑫执笔,自适应控制技术的应用和发展,控制理论与应用,第九卷,第二期,1992年4月
- [9] Åstrom K. J. and Wittenmark B. , On Self-tuning Regulators, Automatica, Vol. 9, No. 2, pp. 185—199, 1973
- [10] Åstom K. J. , Borisson U. , Ljung L. et al. , Theory and Applications of Self-tuning Regulators, Automatica Vol. 13, No. 5, pp. 457—476, 1977

第一章 预备知识

本章扼要介绍阅读本书所需的一些数学方面和控制理论方面的基础知识。对本章引用的定理,一般不作严格证明,只作一些说明,其目的是为了便于读者查阅和应用。希望详细了解本章内容的读者,可参阅本章后所列举的参考文献。本章共介绍三个内容。1.1节介绍范数的概念,它是研究算法收敛性和稳定性的重要工具。1.2节介绍动态系统的稳定性理论,这部分内容是设计模型参考自适应控制系统的理论基础。1.3节介绍平稳随机过程的基本概念,这部分内容对于学习随机自适应控制是必需的。

1.1 范数

1. 向量的范数(norms)

我们先讨论向量的欧氏范数及其基本性质,然后再介绍几种常用的向量范数。

设 R^n 为 n 维实向量空间, x 为 R^n 中的向量,它的欧氏范数,实际就是它的长度,规定为

$$\|x\| = (x, x)^{\frac{1}{2}} \quad (1.1.1)$$

这样规定的范数具有下列基本性质:

① 非负性: 若 $x \neq 0$, 则 $\|x\| > 0$, $\|0\| = 0$

② 齐次性: 对任何实数 α 和任意向量 x , 有

$$\|\alpha x\| = |\alpha| \|x\|$$

③ 三角不等式: 对任意向量 x 和 y , 恒有

$$\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$$

以上三条是向量的欧氏范数所具有的基本性质,根据这些性质,还可以证明不等式

$$|\|x\| - \|y\|| \leq \|x - y\| \quad (1.1.2)$$

其中 x 和 y 是 R^n 中任意两个向量。

证明 因为

$$\|x\| = \|x - y + y\| \leq \|x - y\| + \|y\|$$

所以

$$\|x\| - \|y\| \leq \|x - y\|$$

同理可证

$$\|y\| - \|x\| \leq \|y - x\| = \|x - y\|$$

从而可知

$$|\|x\| - \|y\|| \leq \|x - y\|$$

如果用 $-y$ 来代替 y , 不等式(1.1.2)就变成

$$|\|x\| - \|y\|| \leq \|x + y\| \quad (1.1.3)$$