



高等学校教材

电子信息系列

自适应控制理论 及应用

李言俊 张科 编著

*Electronic
Information*

西北工业大学出版社



高等学校教材

自适应控制理论及应用

李言俊 张 科 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书主要介绍自适应控制理论的基本原理及应用。全书共 11 章,主要内容有绪论、自适应控制的理论基础、连续时间系统模型参考自适应控制、离散时间系统模型参考自适应控制、自校正控制、变结构控制、混合自适应控制、对象具有未建模动态时的混合自适应控制、非线性控制对象的自适应控制、模糊自适应控制、自适应控制的应用。

本书可作为高等学校自动控制类和航空航天类专业研究生的教材,也可供本科高年级学生和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自适应控制理论及应用/李言俊,张科编著. —西安:西北工业大学出版社,2005.4
ISBN 7-5612-1875-3

I. 自… II. ①李… ②张… III. 自适应控制 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 141938 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西省兴平市印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:22.375

字 数:546 千字

版 次:2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月第 1 次印刷

定 价:30.00 元

前 言

自 20 世纪 60 年代以来,由于航空航天技术和过程控制发展的需要,在计算机技术发展的推动下,自适应控制无论是在理论上还是在应用上都取得了很大进展。近 20 年来,由于计算机技术的飞速发展,特别是超大规模集成电路和芯片的广泛普及,为自适应控制技术的应用开辟了广阔的领域。目前,自适应控制在飞行器控制、深空探测器控制、卫星跟踪控制、大型油轮控制、电力拖动控制、造纸过程控制、水泥配料控制、大型加热炉温控制、冶金过程控制和化工过程控制等方面都得到了应用。利用自适应控制能够解决一些常规的反馈控制所不能解决的复杂控制问题,可以大幅度地提高系统的稳态精度和动态品质。

本书主要阐述自适应控制的基本理论及应用。全书共分 11 章。第 1 章至第 5 章为绪论、自适应控制的理论基础、连续时间系统模型参考自适应控制、离散时间系统模型参考自适应控制和自校正控制,主要回顾和介绍了与自适应控制有关的一些基础知识,以及经典的模型参考自适应控制和自校正控制系统设计方案。第 6 章至第 10 章为变结构控制、混合自适应控制、对象具有未建模动态时的混合自适应控制、非线性控制对象的自适应控制和模糊自适应控制,主要介绍了近 20 年来的自适应控制理论发展所出现的一些新的研究领域和研究成果。第 11 章为自适应控制的应用,介绍了自适应控制在应用方面的一些研究成果。

本书第 1 章至第 5 章、第 7 章至第 10 章由李言俊编写,第 6 章和第 11 章由张科编写。

陈新海教授和周军教授参编的《自适应控制及应用》为本书提供了很好的参考,打下了良好的基础,在此表示衷心的感谢。

西北工业大学研究生院、教务处和西北工业大学出版社对本书的出版给予了热情支持,在此深致谢忱。书中如有不妥之处,敬请读者批评指正。

编著者

2005 年 2 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 自适应控制系统概述	1
1.2 模型参考自适应系统	5
习 题	14
第 2 章 自适应控制的理论基础	16
2.1 李雅普诺夫稳定性理论.....	16
2.2 动态系统的正实性.....	23
2.3 超稳定性理论.....	33
习 题	38
第 3 章 连续时间系统模型参考自适应控制	40
3.1 用局部参数优化理论设计模型参考自适应系统.....	40
3.2 用李雅普诺夫稳定性理论设计模型参考自适应系统.....	44
3.3 用状态变量根据超稳定性理论设计并联模型参考自适应系统	60
3.4 用输入、输出变量根据超稳定性理论设计并联模型参考自适 应系统.....	66
3.5 串并联模型参考自适应系统.....	82
3.6 各种模型参考自适应系统设计方法的比较.....	85
3.7 模型参考自适应系统的鲁棒性问题.....	88
习 题	91
第 4 章 离散时间系统模型参考自适应控制	95
4.1 离散时间模型参考自适应系统的设计.....	95
4.2 用差分方程描述的离散模型参考自适应系统	100
4.3 用状态方程描述的离散模型参考自适应系统	115
4.4 关于用超稳定性和正性概念设计模型参考自适应系统的几点 结论	117
习 题.....	118

第 5 章 自校正控制	120
5.1 最小方差自校正调节器	121
5.2 最小方差自校正控制器	127
5.3 极点配置自校正调节器与控制器	133
5.4 多变量最小方差自校正调节器	139
5.5 多变量最小方差自校正控制器	142
习 题.....	144
第 6 章 变结构控制	146
6.1 变结构控制基本理论	146
6.2 变结构控制系统设计	154
6.3 变结构控制系统性能	158
6.4 变结构控制调节器设计	160
6.5 模型参考变结构控制器设计	168
6.6 全程滑动模态变结构控制系统	174
习 题.....	181
第 7 章 混合自适应控制	183
7.1 基于 Narendra 方案的显式模型参考混合自适应控制.....	183
7.2 Elliott 隐式模型参考混合自适应控制方案	187
7.3 铃木模型参考混合自适应控制方案	191
7.4 随机系统混合自适应控制	196
习 题.....	201
第 8 章 对象具有未建模动态时的混合自适应控制	202
8.1 连续对象具有未建模动态时的混合自适应控制	202
8.2 σ 校正混合自适应律	209
8.3 积分式混合自适应律	212
8.4 基于 Narendra 方案的混合自适应修正方案.....	220
8.5 对象具有未建模动态时的间接式混合自适应极点配置方案	223
8.6 对象具有未建模动态时的混合自适应控制系统的持续激励问题	225
习 题.....	230
第 9 章 非线性控制对象的自适应控制	232
9.1 非线性系统的自适应线性控制	232
9.2 非线性一阶系统的鲁棒自适应控制	238
9.3 可补非时变非线性系统的自适应控制	243
9.4 对象具有未知死区时的自适应控制	247

习 题	261
第 10 章 模糊自适应控制	262
10.1 模糊控制的基本概念	262
10.2 模糊自适应控制	271
10.3 模糊自校正控制	274
10.4 神经网络模糊自适应控制	276
10.5 基于模糊聚类算法的模糊自适应控制	282
习 题	291
第 11 章 自适应控制的应用	293
11.1 战术导弹的自校正控制	293
11.2 具有多输入和扰动作用的空—空导弹滚动通道的前馈/反馈自适应控制器	303
11.3 广义预测自适应控制器在导弹控制系统设计中的应用	307
11.4 导弹控制系统的随机混合自适应控制方案	315
11.5 高精度激光跟踪系统的综合设计	320
11.6 空间站的混合自适应控制	324
11.7 倾斜转弯导弹的时变滑态变结构自适应控制	330
参考文献	347

第 1 章 绪 论

1.1 自适应控制系统概述

1.1.1 自适应控制问题的提出

很多控制对象的数学模型随着时间或工作环境的改变而变化,其变化规律往往事先不知道。例如导弹或飞机的气动参数会随其飞行速度、飞行高度和大气密度而变,特别是导弹的飞行速度和飞行高度的变化范围很大,因而导弹的数学模型参数可在很大的范围内变化。在飞行过程中,导弹的质量和质心位置会随着燃料的消耗而改变,这也会影响其数学模型的参数。当对象的数学模型参数在小范围内变化时,可用一般的反馈控制、最优控制或补偿控制等方法来消除或减小参数变化对控制品质的有害影响。如果控制对象的参数在大范围内变化,上面这些方法就不能圆满地解决问题了。为了使控制对象参数在大范围内变化时,系统仍能自动地工作于最优工作状态或接近于最优的工作状态,因而就提出了自适应控制问题。

自适应控制也是一种反馈控制,但它不是一般的系统状态反馈或系统输出反馈,而是一种比较复杂的反馈控制。自适应控制系统很复杂,即使对于线性定常的控制对象,其自适应控制也是非线性时变反馈控制系统。所以设计自适应控制比设计一般的反馈控制要复杂得多。

1.1.2 自适应系统定义

自适应系统定义的统一仍然是一个有很大争议的问题,现引入部分有关的定义,其余定义可查阅有关参考文献。

定义 1.1.1 自适应系统在工作过程中能不断地检测系统参数或运行指标,根据参数或运行指标的变化,改变控制参数或控制作用,使系统工作于最优工作状态或接近于最优工作状态。

定义 1.1.2 自适应系统利用可调系统的输入量、状态变量及输出量来测量某种性能指标,根据测得的性能指标与给定的性能指标的比较,自适应机构修改可调系统的参数或者产生辅助输入量,以保持测得的性能指标接近于给定的性能指标,或者说使测得的性能指标处于可接受性能指标的集合内。

1.1.3 自适应系统的基本结构

自适应系统的基本结构如图 1.1 所示。图中所示的可调系统可以理解为这样一个系统,即

它能够用调整它的参数或者输入信号的方法来调整系统特性。

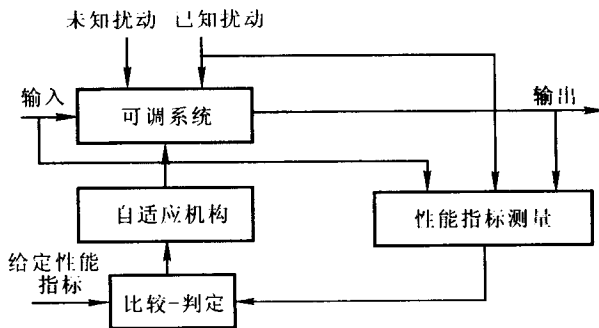


图 1.1 自适应系统的基本结构

性能指标的测量有多种方法,有些是直接的,有些是间接的,例如通过系统动态参数的辨识来测量性能指标就是一种间接方法。

比较-判定是指在给定的性能指标与测得的性能指标之间做出比较,并判定所测得的性能指标是否处于可接受性能指标的集合内。如果不是,自适应机构就相应地动作,或者调整可调系统的参数,或者调整可调系统的输入信号,从而调整系统的特性。

应当注意,在图 1.1 所示中,性能指标测量、比较-判定和自适应机构三个基本结构方块的实施是非常复杂的;在有些情况下,要把一个自适应系统按照图 1.1 所示的基本结构图进行分解不是一件容易的事情。

判断一个系统是否真正具有“自适应”的基本特征,关键看是否存在一个对性能指标的闭环控制。有许多控制系统被设计成参数变化时具有可接受的特性,习惯上,它们常被称为“自适应系统”。但是,它们并没有一个对性能指标的闭环控制,因而这样的系统并不是真正的“自适应系统”。

1.1.4 自适应系统的分类

有许多准则可以用来对自适应系统进行分类,因而自适应系统的分类方法很多。下面主要按照自适应系统各个组成部分的特点和完成自适应所用策略来考虑分类。

1. 按照所用性能指标类型对自适应系统分类

由于性能指标的类型将决定性能指标测量方块的特点,所以可以从性能指标的类型对自适应系统进行分类。性能指标可分为:

- (1) 静态性能指标;
- (2) 动态性能指标;
- (3) 参数性能指标;
- (4) 状态变量和输入量的泛函。

例如,内燃机的效率是一个静态性能指标。系统对阶跃输入响应的形状是一个动态性能指标。闭环控制系统的阻尼系数是一个参数性能指标。二次型性能指标为

$$J = \int_0^{t_1} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (1.1)$$

它是状态变量和输入量的一个泛函。

2. 按照比较-判定方块的特点进行分类

一般情况下,可分为:

- (1) 减法器;
- (2) 决定一个规定性能指标变量的极大值化或极小值化;
- (3) 属于某个数值域。

当给定的性能指标对某种使用情况被唯一地确定并且能够以某一个信号来代表的时候,采用第一种形式。对于极值自适应系统,一般希望能使某一性能指标达到极大或极小,例如使内燃机的效率极大值化,则属于第二种形式。当希望把系统的某一参数控制在某一数值域时,例如希望把一个闭环控制系统的阻尼系数保持在 $0.4 \sim 0.6$,则属于第三种形式。

3. 按照自适应机构对可调系统的作用进行分类

一般情况下,可分为:

- (1) 参数自适应;
- (2) 信号综合自适应。

例如,在一个控制回路中,既可以修改控制器的参数,也可以直接在控制器的输出端加入一个辅助信号来修改加到对象上的控制信号,前者为参数自适应,后者为信号综合自适应。

4. 按照自适应技巧,也就是按照各个组成部分的工作模式进行分类

一般情况下,可分为:

- (1) 确定性的;
- (2) 随机性的;
- (3) 学习性的(或称演变性的)。

第一种类型是最常见的自适应系统类型,系统各个方块的设计都使用的是确定性概念。对于第二种类型,或者性能指标测量方块或者比较-判定方块是使用随机性概念设计的。第三种类型的各个方块则含有记忆及模式识别的特点。一个学习系统能够记忆它先前的经历,辨认已经见识过的情况。这样就使系统能够根据它以前的经历来改善它的自适应作用。一个学习系统是一个自适应系统,但一个自适应系统却不一定具有学习的性质。

5. 按照自适应环的运行条件进行分类

一般情况下,可分为:

- (1) 有测试信号:① 测试信号加到系统输入;② 测试信号作用于系统的可调参数。
- (2) 无测试信号。

对测试信号的需求是为了保证性能指标得到良好和快速的测量,当已有的信号不足以对性能指标进行满意的测量时,就要使用测试信号。例如,当参考输入为常值时,为了辨识控制对象的参数,就需要加入测试信号。

除了上述分类方法之外,有的文献资料将自适应控制系统分为三大类,即自校正控制系统、模型参考自适应控制系统和其他类型的自适应控制系统。

(1) 自校正控制系统 典型的自校正控制系统结构图如图 1.2 所示,系统受到随机干扰的作用。

自校正控制的基本思想是将控制对象参数递推估计算法与对系统运行指标的要求结合起来,形成一个能自动校正调节器或控制器参数的实时计算机控制系统。首先读取对象的输入

$u(t)$ 和输出 $y(t)$ 的实测数据,用在线递推辨识方法辨识对象的参数向量 θ 和随机干扰的数学模型,然后按照辨识求得的参数向量估值 $\hat{\theta}$ 和对系统运行指标的要求,随时调整调节器或控制器参数,给出最优控制 $u(t)$,使系统适应于本身参数的变化和环境干扰的变化,始终处于最优或接近于最优的工作状态。

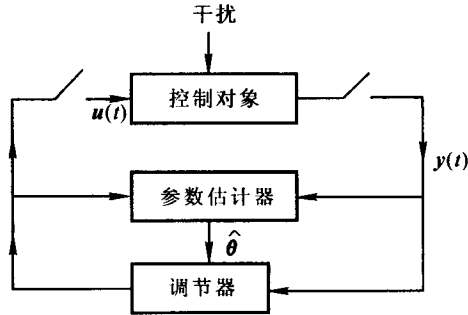


图 1.2 自校正控制系统结构图

自校正控制系统可分为自校正调节器与自校正控制器两大类。自校正控制的运行指标(性能指标)可以是输出的方差最小、最优跟踪或理想极点配置等等。因此自校正控制又可分为最小方差自校正控制、广义最小方差自校正控制和极点配置自校正控制等。

设计自校正控制的主要工作是用递推辨识算法辨识系统参数,然后根据系统运行指标来确定调节器或控制器的参数。一般情况下自校正控制仅适用于离散随机控制系统,在有些情况下也可用于混合自适应控制系统。

(2) 模型参考自适应控制系统 在各种类型的自适应控制方案中,模型参考自适应控制由于其自适应速度快且便于实现而获得了广泛的应用。在模型参考自适应系统中,给定的性能指标集合被一个动态性能指标所代替,变成了一个参考性能指标。为了产生这个参考性能指标,引入了一个被称为参考模型的辅助动态系统,它与可调系统同时被相同的外部输入信号所激励。参考模型用它的输出和状态规定了一个给定的性能指标。在这种情况下,给定的性能指标与测得的性能指标之间的比较使用了一个典型的反馈比较器——减法器,而比较结果可以从可调系统与参考模型的输出或状态之间的比较直接得到。参考模型与可调系统的输出之差被自适应机构用来修改可调系统的参数或产生一个辅助输入信号,使得被表示成可调系统与参考模型的输出或状态之差的泛函的两个性能指标之差达到极小,也就是使测得的性能指标保持在参考性能指标的邻域内,而这个邻域构成了可接受性能指标的一个集合。

模型参考自适应系统的发展概况、分类、一些常用定义及典型结构等将在 1.2 节进行较详细的介绍。

(3) 其他类型的自适应控制系统 除了自校正控制系统和模型参考自适应控制系统之外,其他各种类型的自适应控制系统层出不穷,例如变结构控制系统、非线性自适应控制系统、模糊自适应控制系统、神经网络自适应控制系统等等,在此不再一一例举。

1.1.5 自适应控制的发展概况

在 20 世纪 50 年代末,由于飞行控制的需要,美国麻省理工学院(MIT)的 Whitaker 教授首

先提出了飞机自动驾驶仪的模型参考自适应控制方案,称为 MIT 方案。在该方案中采用局部参数优化理论设计自适应控制规律,但这一方案没有获得实际应用。由于用局部参数优化法设计模型参考自适应系统时没有考虑系统的稳定性,所以在自适应系统设计完毕之后,还要进一步检验系统的稳定性,这就限制了这一方法的应用。

1966 年德国学者 P. C. Parks 提出了利用李雅普诺夫(A. M. Liapunov)第二法来推导自适应算法的自适应系统设计方法。这种方法可保证自适应系统的全局渐近稳定性,但在用控制对象的输入和输出构成自适应规律时要用到输入和输出的各阶导数,这就降低了自适应系统对干扰的抑制能力。为了避免这一缺点,印度学者 K. S. Narendra 和其他学者都提出了各自的不同方案。罗马尼亚学者 V. M. Popov 在 1963 年提出了超稳定性理论,法国学者 I. D. Landau 把超稳定性理论应用于模型参考自适应控制。用超稳定性理论设计的模型参考自适应系统是全局渐近稳定的。

自校正调节器是在 1973 年由瑞典学者 K. J. Åström 和 B. Wittenmark 首先提出来的。1975 年 D. W. Clark 等提出自校正控制器。1979 年 P. E. Wellstead 和 K. J. Åström 提出极点配置自校正调节器和伺服系统的设计方案。

自适应控制经过 40 多年的发展,无论是在理论上还是在应用上都取得了很大的进展。近 20 多年来,由于计算机技术的飞速发展,特别是超大规模集成电路和芯片的广泛普及,为自适应控制技术的应用开辟了广阔的领域。目前,自适应控制在飞行器控制、深空探测器控制、卫星跟踪系统、大型油轮控制、电子拖动、造纸过程控制、水泥配料控制、大型加热炉温度控制、冶金过程控制和化工过程控制等方面都得到了应用。利用自适应控制能够解决一些常规的反馈控制所不能解决的复杂控制问题,可以大幅度地提高系统的稳态精度和动态品质。

1.2 模型参考自适应系统

1.2.1 模型参考自适应系统的发展概况

在很长的一个时期内,如果不考虑反馈原理的应用,则物理过程的自动控制是一门经验技术,它较多地依赖于实践技巧而不是科学基础。对更复杂和更高性能控制系统的需求推动了控制理论的发展。即使有了这样一种系统化的控制理论,在设计实际系统时仍常常感到控制对象先验知识的不足,例如缺乏对控制对象动态特性的清楚了解,有时甚至是统计意义上的了解也无法满足。

当对控制对象的动态特性知道很少或对象的动态特性具有不可预测的较大变化时,为了构造高性能的控制系统,产生了一类被称为自适应控制系统的新型控制系统,它对这类问题的解决提供了可能性。自适应控制概念的提出也许和反馈概念一样古老,但对这类控制系统的浓厚兴趣则始于 20 世纪 50 年代早期。

为了使控制系统能够“自适应”,也就是当对象的动态特性发生不可预测的较大变化时,能够使控制系统仍具有良好的性能,曾提出过许多解决办法。其中,一类特殊的自适应系统——模型参考自适应系统,就是在 20 世纪 50 年代后期发展起来的。

模型参考自适应系统的主要创新点之一是参考模型的出现,由参考模型规定了所要求的系统性能。在好几年里,参考模型曾是一个非常有争议的概念。然而,只要对线性控制系统设计

问题和自适应控制问题进行仔细研究,就会很自然地引出参考模型的概念。为了进一步说明这一论点,让我们简略回顾控制理论的发展过程。

在控制理论发展的第一阶段,它是通过在确定环境下导出的线性定常微分方程发展起来的。早期的许多重要研究成果是利用线性积分变换技术把控制问题变换到频域中得到的。后来,在确定最优控制策略方面获得了丰富的理论成果,在这一阶段中状态变量的概念在描述动态过程时起到了很大作用。

现在来简单回顾一下最优控制理论。如果对象的状态方程为

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1.2)$$

式中, x 为状态向量, u 为控制输入, A 和 B 为具有合适维数的常值矩阵。在某些假设条件下求解最优控制 u , 使二次型性能指标

$$J = \int_0^{t_1} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (1.3)$$

为极小, 式中 Q 为非负定矩阵, R 为正定矩阵。

上述最优控制问题具有下列的局限性:

(1) 能够正确地用线性定常微分方程描述的动态过程并不太多, 对于线性定常的假设, 例外情况多于实用情况。线性定常的描述仅是在状态向量的稳态值附近才能对系统的动态特性给出有价值的描述。

(2) 在最优控制理论中假定控制系统所要求的性能可以由一个二次型性能指标完全确定, 式(1.3)中的矩阵 Q 和 R 是给定的。在许多情况下, 这些假定是不成立的。

(3) 式(1.2)中引入了由矩阵 A 和 B 定义的动态参数概念, 这些动态参数极少能够直接测量。

(4) 构成最优控制律需要得到全部状态变量, 而在许多情况下, 有些状态变量是无法直接得到的。

为了进一步讨论上面所给出的控制系统设计问题的结果, 现在假定: 线性和定常这两个前提是有效的, 对象的参数是已知的, 全部状态变量都是可以测量的。控制系统的设计者具有计算最优控制律所必需的全部数学工具之后, 首先需要解决的一个重要问题就是如何选取式 1.3) 所给出的性能指标中的矩阵 Q 和 R 。当系统的维数增加时, 选取矩阵 Q 和 R 的问题就更为复杂。在大多数情况下, 除了使式(1.3)所给出的性能指标为极小之外, 还必须保证对象的状态向量和控制输入向量随时间的变化满足某种动态性能。由于二次型性能指标式(1.3)没有包含对象的状态向量和控制输入向量在每一瞬间变化的任何明显信息, 所以用 Q 和 R 来确定广泛采用的诸如上升时间、超调量和阻尼系数等性能指标是极为困难的。如果我们将所希望的性能指标用一个被称为“参考模型”的理想控制系统的性能来规定, 就可以避免上述的困难。

如果 x_m 是接受控制信号 u_m 的参考模型的状态向量, 需要设计一个控制系统, 使二次型性能指标

$$J = \int_0^{t_1} [(x_m - x)^T Q (x_m - x) + u^T R u] dt \quad (1.4)$$

达到极小。在性能指标式(1.4)中, 权矩阵 Q 决定了状态变量的跟随精度, R 决定了 u 的幅值。依赖于 Q 和 R 的选择, 对模型各个状态变量的跟随精度有高有低, 控制输入 u 的各个分量的幅值也有大、有小, 但控制对象各个状态变量的动态响应将由参考模型规定。

参考模型既可以是显式的,也可以是隐式的。在显式情况下,参考模型是控制系统的一个组成部分,所要求的特性由参考模型状态的动态响应明显地规定。而在隐式情况下,参考模型仅仅用做控制规律的计算,并不明显出现在控制系统中。

参考模型的概念并不是随着自适应系统的产生才出现的。在线性定常控制系统设计的早期阶段,在线性系统最优控制理论的范畴内,参考模型的概念已显示出是一个用来解决实际问题的很有用的工具。例如,在线性模型跟随系统的设计中,就用到了显式参考模型和隐式参考模型。在线性状态观测器中,对象就是参考模型。在参数辨识中,被辨识的对象也扮演了参考模型的角色。由此可以看出,即使设计一个最优线性控制系统,无论是对于所要求的系统特性,还是对于不可达状态的观测,参考模型的概念都是非常有用的。

现在回到对象参数出现大的、快的和不可预测的变化时的情况,这是在许多实际工程项目中经常遇到的问题。在这种情况下,当参数的平均值以足够的精度已知时,参数的可能变化就可用一个已知的随机模型来描述,就能够用随机控制理论来设计控制系统。然而,在处理实际问题时这种方法却难以应用,主要原因是:

(1) 对象参数的平均值难以预先确定。

(2) 难以建立参数变化的随机模型,以及参数的变化太大,都会使用随机方法设计的系统产生不良特性。

从设计者的角度出发,我们进一步来讨论参数变化问题。目标是设计一种控制系统,使其能在动态参数变化时仍保持它的额定特性。为此,可以采取下列任何一种方法:

(1) 设计一个反馈控制,使系统特性对参数变化不敏感。

(2) 无延迟地在线测量控制对象参数并且相应修改控制规律的参数。

(3) 将所要求的性能指标与实际的性能指标进行比较,并由此信息来修改反馈控制规律。

上述第一种方法引发了控制系统敏感性领域的大量研究工作,出现了许多富有成效的研究成果,但其应用范围局限于参数在额定值附近发生小的变化。第二种和第三种方法引导了自适应控制系统的产生。但第二种方法存在若干限制,其中之一就是在确定对象参数时存在延迟,在大多数情况下它将会使自适应作用变得缓慢。第三种方法有利于理解自适应控制的意义及其相对于传统反馈控制的特点。实际上,自适应控制系统和传统反馈控制系统都是反馈系统,但自适应控制系统具有一个附加的反馈环,它不是作用在状态变量上,而是作用在一个抽象变量上,这个抽象变量就是利用性能指标估算出来的系统特性。要求的性能指标与测量的性能指标之差通过自适应规律作用到反馈控制环的参数或控制对象的输入,以保持实际的性能指标接近要求的性能指标。

因此,关键的问题就在于如何确定自适应规律,使得在环境发生变化时系统的实际性能指标接近于所要求的性能指标。

一个自适应控制系统的行为依赖于用来度量系统性能的性能指标。例如,如果选取二次型积分判据作为性能指标,则自适应作用就只能在估算性能指标所必需的某个滞后时间 Δt 之后才能完成。这自然就产生了一个疑问:能否在完成自适应作用的同时测量系统性能?问题的回答是肯定的。只要采用包含参考模型的自适应控制系统就可做到这一点。这类系统的典型结构如图 1.3 所示。图中参考模型的状态向量与对象的状态向量之差,就是所要求的特性与实际特性之差。在这种系统中,误差向量 $e = x_m - x$, 不仅用来消除对象的状态向量与参考模型的状态向量之差,而且当对象的参数值偏离设计线性控制系统所用的额定值时,误差向量 e 也用来修

改控制规律参数,或用来产生一个辅助控制信号。

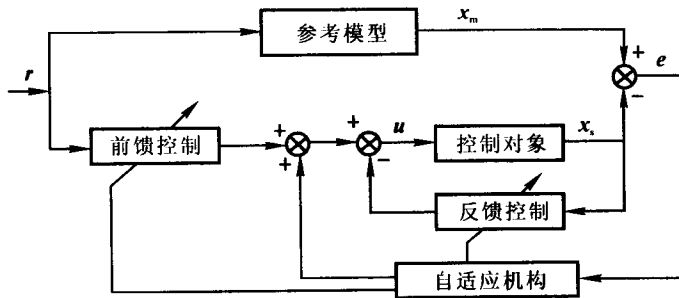


图 1.3 含有参考模型的自适应控制系统

当对控制对象参数知道很少或参数发生很大变化时,建立观测器时也需要采用自适应方案。在这种情况下,对象的输出与观测模型之差不仅用来构成观测模型的附加输入,而且还用来调整观测模型的参数,以便保持理想线性渐近观测器的性质,即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_m - x_s) = 0 \quad (1.5)$$

因此就产生了具有模型参考自适应系统结构的自适应观测器。它具有下列两个有趣的性质:

- (1) 可以确保观测模型的状态向量收敛于对象的状态向量,而与观测模型的初始值无关。
- (2) 在某些条件下,允许确定对象的动态参数,例如在自适应的作用下,观测模型的参数将收敛于对象的参数。

这种类型的自适应观测器称为具有可调模型的辨识器和观测器。于是可以得出结论:模型参考自适应系统起到了对使用积分二次型性能指标的最优线性系统的合理补充作用,使我们可以更有效地解决一些实际问题。

实际上,模型参考自适应系统在使用积分二次型性能指标的线性最优控制理论之前就已经出现了。它起源于把人类行为的自适应反应和因果律模型概念移植到控制领域,而因果律模型清楚地显示出人的自适应特征的推理过程的一般模式。例如,为了描述物理的、社会的或生物的现象,人们常常从惟象的模型结构出发,而惟象的模型结构表征了原因与结果之间定性联系的特点。从这个结构出发,人们尝试决定能够由因果关系得到定量确定的那些参数。于是,人们把这些模型与真实现象相比较,而人起着自适应机构的作用去修改这些参数值,一直到获得一个符合客观实际的模型为止。这个工作过程等价于具有可调模型的系统辨识。当人们期望利用已经建立的具有一定正确性的因果律模型的现象或对这个现象施加作用时,人们规定出所要求的模型行为,再对这些现象确定一个控制策略以使现象具有所要求的行为。在充分掌握这些模型的不完善性和可以改变所考虑模型有效性的扰动的基础上,人们把所获得的实际行为与所要求的行为进行比较。根据这些观察,人们试着修改控制策略以获得一个接近要求的行为。这种工作过程就对应于自适应模型跟随控制系统。

当然,真正意义上的模型参考自适应系统,即现代控制理论中的模型参考自适应系统是在 20 世纪 50 年代后期才逐渐发展起来的,这些内容在 1.1.5 小节及本小节的前面已叙述过,此处不再重述。

1.2.2 模型参考自适应系统的分类

由于模型参考自适应系统的类型很多,如果只用一个标准来对所有的典型结构进行分类是不可能的。这里按照系统结构、性能指标、应用类型、参数扰动类型和自适应控制的实现方式来对模型参考自适应系统进行分类。

1. 按照系统结构分类

- (1) 并联模型参考自适应系统;
- (2) 串并联模型参考自适应系统;
- (3) 串联模型参考自适应系统。

三种系统结构都可用于系统辨识和自适应模型跟随控制,其中并联方案是最常用的结构。

2. 按照性能指标分类

- (1) 输出广义误差及其导数的范数的极小化;
- (2) 状态距离的极小化;
- (3) 参数距离的极小化。

请注意不要将这里所说的性能指标与参考模型给出的所要求的性能指标相混淆。这里所说的性能指标仅仅用于设计自适应机构,它是表示参考模型给出的所要求的性能指标与可调系统的真实性能指标之差的一种量度。

3. 按照应用的类型分类

- (1) 自适应模型跟随控制系统;
- (2) 具有一个可调模型的系统辨识;
- (3) 状态观测;
- (4) 自适应调节;
- (5) 极值控制。

4. 按照参数扰动的类型分类

- (1) 参数未知,但却是恒定的;
- (2) 参数具有频繁不可测量的变化。

5. 按照自适应控制的实现方式分类

- (1) 连续时间模型参考自适应系统;
- (2) 离散时间模型参考自适应系统;
- (3) 混合式模型参考自适应系统。

1.2.3 常用的一些定义

设参考模型方程为

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m r \quad (1.6)$$

$$y_m = C x_m \quad (1.7)$$

并联可调系统方程为

$$\dot{x}_s = A_s(t) x_s + B_s(t) r \quad (1.8)$$

$$y_s = C x_s \quad (1.9)$$

式中, x_m 和 x_s 为 n 维状态向量, r 是 m 维输入向量, y_m 和 y_s 为 r 维输出向量, A_m 和 B_m 为适当

维数的常值矩阵, $A_s(t)$ 和 $B_s(t)$ 为适当维数的时变矩阵, C 为适当维数的输出矩阵。不失一般性, 这里对参考模型和可调系统采用了同一矩阵 C 。

定义 1.2.1(广义状态误差) 广义状态误差 e 表示参考模型的状态向量 x_m 与可调系统状态向量 x_s 之差的可变向量, 即

$$e = x_m - x_s \quad (1.10)$$

定义 1.2.2(广义输出误差) 广义输出误差 ε 表示参考模型的输出 y_m 与可调系统输出 y_s 之差的可变向量, 即

$$\varepsilon = y_m - y_s = Ce \quad (1.11)$$

定义 1.2.3(状态距离) 参考模型的状态向量 x_m 与可调系统状态向量 x_s 之差的任何一种范数都称为状态距离。

定义 1.2.4(参数距离) 参考模型的参数向量(或矩阵)与可调系统参数向量(或矩阵)之差的任何一种范数都称为参数距离。

定义 1.2.5(自适应规律) 广义误差与相应的参数修改量之间的关系或与加到可调系统输入的修改量之间的关系称为自适应规律或自适应算法。

定义 1.2.6(自适应机构) 用来执行自适应规律的一组相互连接的线性的、非线性的或时变的方块称为自适应机构。

定义 1.2.7(模型参考自适应系统) 给出一个由参考模型

$$y_m = f_m(r, \theta_m, x_m, t) \quad (1.12)$$

的输入 r 、输出 y_m 和状态 x_m 所规定的性能指标, 式中 θ_m 是参考模型的参数。同时给出一个可调系统, 即

$$y_s = f_s(r, \theta_s, x_s, t) \quad (1.13)$$

式中, θ_s 是可调系统的参数, x_s 是可调系统的状态。再给出一个性能指标, 即

$$J = f(\varepsilon, \theta_m - \theta_s, e, t) \quad (1.14)$$

它表示由参考模型规定的性能指标与可调系统性能指标之差。通过以广义误差作为输入之一的自适应机构, 采用参数自适应或信号综合自适应使性能指标 J 达到极小。这类系统称为模型参考自适应系统。

1.2.4 典型结构及数学描述

按照自适应控制的实现方式分类可将模型参考自适应系统分为连续时间模型参考自适应系统、离散时间模型参考自适应系统和混合式模型参考自适应系统三种类型, 这三种类型的数学描述各不相同。受篇幅限制, 这里仅简单介绍连续时间模型参考自适应系统的典型结构和数学描述, 三种类型模型参考自适应系统的详细介绍将分别在第 3 章、第 4 章、第 7 章和第 8 章给出。

1. 并联模型参考自适应系统

并联模型参考自适应系统的基本结构如图 1.4 所示。我们将采用状态方程和微分算子方程两种方式描述模型参考自适应系统。

(1) 状态方程描述 对于参考模型, 选取线性状态方程, 即