

自动化

专业本科系列教材

Xitong Bianshi Yu Zishiying Kongzhi

系统辨识与自适应控制

0101001000100001

杨承志 孙棣华 张长胜 编著

重庆大学出版社

系统辨识与自适应控制

杨承志 孙棣华 张长胜 编著

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书内容包括:系统辨识的基本概念,系统辨识的经典方法,系统辨识的最小二乘算法,系统辨识的随机逼近法、极大似然法和预报误差法,数学模型的结构辨识,闭环系统的辨识,系统辨识的发展及在生产实际中的应用,自适应控制概述,模型参考自适应控制,自校正控制,多变量自校正控制,自适应控制系统发展及其应用。

本书适合自动化及相关专业的大学本科高年级学生和研究生学习使用,也可供自动化专业及其相关专业人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

系统辨识与自适应控制/杨承志,孙棣华,张长胜编著. —重庆:重庆大学出版社,2003.7

(自动化专业本科系列教材)

ISBN 7-5624-2817-4

I. 系... II. ①杨... ②孙... ③张 III. ①系统辨识—高等学校—教材②自适应控制—高等学校—教材 IV. ①N945.14②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 038063 号

系统辨识与自适应控制

杨承志 孙棣华 张长胜 编著

责任编辑:谭 敏 版式设计:谭 敏

责任校对:蓝安梅 责任印制:秦 梅

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鹤盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

自贡新华印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:437千

2003年7月第1版 2003年7月第1次印刷

印数:1—5 000

ISBN 7-5624-2817-4/TP·415 定价:22.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

前言

《系统辨识与自适应控制》是自动化及相关专业大学本科高年级学生和研究生的一门专业课程。随着科学技术的不断进步(对平均变化规律的深入了解和计算机技术的发展)《系统辨识与自适应控制》成为自动化及相关专业技术人员必须掌握的一项高层次的技术。

对《系统辨识与自适应控制》课程的开设,部分学校是将《系统辨识》和《自适应控制》的内容分成两门课程开设,或者仅开设其中一门,也有的学校是将其合为一门课程开设。

目前,国内关于此方面的教材,有以《系统辨识》为书名编写的,也有以《自适应控制》为书名编写的,而将两项内容综合而编的《系统辨识与自适应控制》较少。通常是在《系统辨识》教材中,将自适应控制的内容作为系统辨识的一项应用进行讲述;而在《自适应控制》教材中,仅将《系统辨识》的内容作为《自适应控制》的基础先修内容。

本教材的编写目的之一是充分考虑到二者的独立性,也考虑二者的综合性。再者,随着技术的进步,如模糊技术,神经网络技术及智能控制技术等也渗入“系统辨识与自适应控制”中。让学生初步地了解这些技术的发展,也是此教材的尝试内容之一。各个学校在选用此教材时,可根据各自的要求,对教材的内容进行分解、组合而进行教学。

另外,许多教师在教学过程中,深刻地体会到,对《系统辨识与自适应控制》的讲授与学习来说,一个较好的仿真平台,是提高此门课程的教学效果和学生学习兴趣的重要环节。因此配合本书我们将编写一个计算机仿真平台,作为本书的附属部分(以上网的方式提供给学生和教师作为学习本门课程的实验仿真平台)。

基于如上考虑,《系统辨识与自适应控制》教材是为了适应这些特点而编写的。《系统辨识与自适应控制》课程的目的和要求为:

(1)学习“系统辨识”的目的是研究如何从观测到的含有噪声的系统输入、输出数据中,提取对象(即所研究的系统)的数学模型,及数学模型的应用场合与方式。

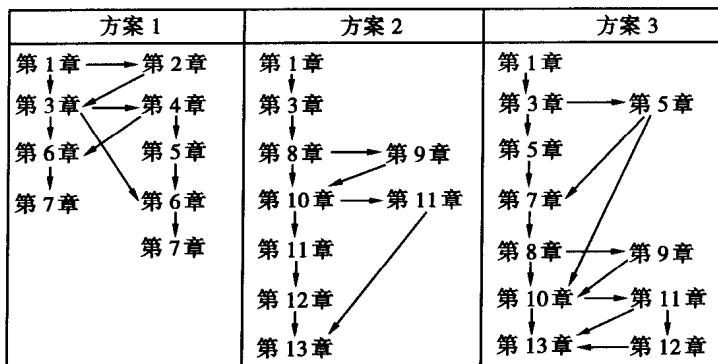
(2)学习“自适应控制”的目的是研究两种主要的自适应控制形式——模型参考自适应控制系统和自校正控制系统的理论及设计方法与应用。

(3)通过学习本门课程,让学生初步了解一些“系统辨识与自适应控制”的最新技术发展实例。

(4)通过网上计算机仿真平台的使用,让学生在掌握“系统辨识”和“自适应控制”理论和方法的基础上,了解一种用它进行验证性学习的工具,学生也可用它进行系统的仿真和设计,同时也为教师提供一种辅助教学的手段。

本书在编排上追求系统性,但各个部分又力求其独立性,所以本书教学内容可具有灵活多样的特性。由于各个学校的教学要求与安排不同,使用本教材进行教学的安排也不尽相同,教师不一定讲授全部内容,编者安排以下教学路线以供使用者参考:

(1)教学计划安排



(2)学时安排

方案 1:《系统辨识》课程,40 学时(讲授 32 学时,上机 8 学时),学分:2 学分。

方案 2:《自适应控制》课程,40 学时(讲授 32 学时,上机 8 学时),学分:2 学分。

方案 3:《系统辨识与自适应控制》课程,48 学时(讲授 38 学时,上机 10 学时),学分:2 学分。

(3)考核方式及成绩比例:笔试占70%,上机占30%。

本书适用于作为自动化、测控技术及仪器、机械工程及自动化、电气工程及自动化、计算机应用技术等本科专业教材,也适用于控制理论与控制工程、检测技术及自动化装置、模式识别与智能系统和机电一体化等专业硕士研究生必修课教材,同时也可作为机械工程及自动化、水利水电工程、计算机应用技术等专业硕士研究生选修课教材。

本书由杨承志教授主编,负责全书的组织、统稿和定稿。副主编是孙棣华副教授。张长胜老师编写第4、5、6章和网上计算机仿真平台;杨承志教授编写第1、2、3、7、12、13章。孙棣华副教授编写第8、9、10、11章。

本书的编写工作得到昆明理工大学自动化系、重庆大学自动化学院及重庆大学出版社很多同志的支持与鼓励;作者的家人也为本书做了许多工作;我们更不能忘记本书责任编辑所付出的辛勤劳动;同时,本书参考了作者本人和他人的一些发表论文、书籍与研究工作。在此,向他们表示衷心感谢!

由于时间仓促和作者的水平有限,书中的不足和缺点在所难免,欢迎读者批评指正。

说明:

(1)为方便各高等院校使用本书,其选用本书的教师也可按电子邮件地址(jy5663@public.km.yn.cn)与作者联系,索要本书的电子文档,以方便多媒体教学使用。

(2)本书的仿真平台部分用 Matlab 6.1 编程,平台的使用及说明见相关网站(IP:202.98.174.40)。

目 录

绪 论	1
0.1 关于系统辨识	1
0.2 系统辨识的应用与发展	3
0.3 关于自适应控制	4
0.4 自适应控制系统的应用与发展	5
第 1 部分 系统辨识理论、方法及应用	
第 1 章 系统辨识的基本概念	7
1.1 系统辨识的基本原理	8
1.2 系统描述的数学模型	11
1.3 随机信号的描述与分析	17
1.4 白噪声与伪随机码	21
1.5 系统辨识的步骤与内容	29
1.6 系统辨识的基本应用	34
第 2 章 系统辨识的经典方法	37
2.1 阶跃响应法系统辨识	38
2.2 频率响应法系统辨识	41
2.3 相关分析法系统辨识	44
第 3 章 系统辨识的最小二乘算法	52
3.1 最小二乘法原理	52
3.2 最小二乘估计的递推算法	61
3.3 慢时变参数的最小二乘递推算法	66
3.4 广义最小二乘法	70
3.5 辅助变量法	73
3.6 参数和状态的联合估计	76
3.7 多变量系统的最小二乘辨识	78
第 4 章 系统辨识的随机逼近法、极大似然法和 预报误差法	81
4.1 系统辨识的随机逼近法(SAA)	81
4.2 系统辨识的极大似然法(ML)	85

4.3	系统辨识的预报误差法(PE)	96
第5章	数学模型的结构辨识	101
5.1	根据汉格尔矩阵估计模型的阶次	101
5.2	根据积矩阵估计模型的阶次	103
5.3	根据残差平方和估计模型的阶次	106
5.4	根据信息的准则估计模型的阶次	109
第6章	闭环系统的辨识	111
6.1	闭环系统的可辨识性	111
6.2	闭环辨识方法和可辨识条件	115
6.3	最小二乘法和辅助变量法在闭环辨识中的应用	120
第7章	系统辨识的发展及在生产实际中的应用	124
7.1	模糊关系模型辨识及应用	124
7.2	应用辨识技术的故障检测及预报	129
7.3	自校正预报器	134

第2部分 自适应控制

第8章	自适应控制概论	138
8.1	什么是自适应控制系统	138
8.2	为什么需要自适应控制	144
8.3	自适应控制的方案	146
8.4	自适应控制的设计和理论问题	149
第9章	模型参考自适应控制	153
9.1	模型参考自适应控制引言	153
9.2	基于局部参数最优化理论的设计方法	156
9.3	基于李雅普诺夫稳定性理论设计模型参考 自适应控制系统	161
第10章	自校正控制(一)	167
10.1	自校正控制概述	167
10.2	单步输出预测自校正控制	168
10.3	控制加权自校正控制	183
第11章	自校正控制(二)	190
11.1	极点配置自校正控制	190
11.2	自校正PID控制	195
11.3	专家式自校正PID控制器	210
11.4	广义预测控制	218

第 12 章 多变量自校正控制	227
12.1 多变量自校正调节器	227
12.2 多变量自校正控制器	233
12.3 多变量极点配置自校正控制器	237
12.4 多变量系统自校正解耦控制	240
第 13 章 自适应控制系统的发展及应用	245
13.1 自适应控制技术的发展	245
13.2 工业锅炉的加权广义预测自校正控制	257
13.3 大滞后系统自校正智能极点配置内模控制	262
参考文献	267

绪 论

系统辨识和自适应控制是两门联系密切的学科。在自然和社会科学的许多领域中,系统的设计、系统的定量分析、系统综合及系统的控制,以及对其未来行为的预测,都需要知道系统的动态特性。将被研究的对象模型化,则是开展这些工作的前提、基础和手法之一,因此,建立描述系统动态特性的数学模型及论述建立模型的理论和方法,即为系统辨识研究的内容。

而自适应控制研究的对象是具有不确定性的系统。我们都知道要成功地设计一个性能良好的控制系统,需要掌握被控过程的动态特性,然而,实际上有一些被控对象或过程的动态特性是事先难以确知的,或者对它们的数学模型是经常变化的,对于这类对象,常规反馈控制方法的效果往往难以令人满意,而对这种系统特性经常发生波动,事先却无法完全确定的情况下,如何设计一个高性能的控制系统,是一个自适应控制系统所要研究的问题。

为使读者尽快和初步地了解本书的概貌,在诸论中简要介绍4个基本问题:①关于系统辨识;②系统辨识的应用与发展;③关于自适应控制;④自适应控制的应用与发展。

0.1 关于系统辨识

系统辨识问题的提出是由于随着科学技术的发展,各门学科的研究方法进一步趋向量化,人们在生产实践和科学实验中,对所研究的复杂对象通常要求通过观测和计算来定量地表明其内在规律,为此必须建立所研究对象的数学模型,从而进行分析、设计、预测、控制的决策。例如,在化工过程中,要求确定其化学动力学和有关参数,以决定工程的反应速度;在热工过程中,要求确定如热交换器这样的分布参数的系统及其动态参数;在生物系统方面,通常希望获得其较精确的数学模型,以便描述在生物群体系统的动态参数;为了控制环境污染,希望得到大气污染扩散模型和水质模型;为进行人口预报,做出相应的决策,要求建立人口增长的动态模型;对产品需求量、新型工业的增长规律这类经济系统,已经建立并继续要求建立其定量的描述模型。其他如结构或机械的振动、地质分析、气象预报等等,都涉及系统辨识和系统参数估计,这类要求正在不断扩大。

0.1.1 什么是数学模型

在科学研究中,尤其是在自然科学研究中,研究的问题所涉及的往往是一个复杂的对象,这个对象的含义是比较广泛的,可以是指某个工业生产过程、某个生物学系统、某个经济学系统或者是社会科学系统,总而言之,可以是一切客观存在的事物及运动形态。

而数学模型是对这个对象的特征和变化规律的一种表示或抽象,它不是对象本身,它是把对象本质的部分信息表达成为有用的描述形式。它是用来描述对象的运动规律,表达对象主要特征或者是人们最需要知道的主要特征。能够对对象进行抽象,这正反映了人们对对象的认识的深化。从这个意义上讲,应用数学模型来认识对象,可以更深刻地、更集中地反映对象的主要特征和规律。

在系统辨识中,数学模型可定义为一个被模型化的系统中的各个有关变量之间关系所构成的数学结构,即它用数学结构的形式来反映实际对象的行为特征。常用的数学模型有代数方程、微分方程、差分方程、偏微分方程和状态方程等。本书中常用的有:

- a. 微分方程
- b. 差分方程
- c. 状态方程

通常,对于同一个实际研究的对象,根据建立数学模型的目的,根据研究这个对象所采用的假定,它的模型不是惟一的。它可能是较为简单的一个数学模型,也可能是一个较为复杂的数学模型。而且,由于每一个系统有它自己的特点,所以,应有相应的反映这些特点的数学模型。因此,要对具有广泛含义的各种系统的数学模型进行分类是一项比较困难的工作,然而,在研究工作中所采用的数学模型都有其基本的特征,根据这些模型不同的基本特征,可从如下几个方面对数学模型进行划分:

- (1) 静态模型与动态模型;
- (2) 线性模型与非线性模型;
- (3) 参数模型与非参数模型;
- (4) 确定性模型与随机性模型;
- (5) 连续时间模型与离散时间模型;
- (6) 时不变模型与时变模型;
- (7) 时间域模型与频率域模型;
- (8) 集中参数模型与分布参数模型。

在本书中,主要介绍的是单变量系统的辨识问题,涉及的数学模型主要是线性、动态、参数、连续或离散时间、集中参数、确定性或随机性、时间域的数学模型。

0.1.2 系统辨识的基本方法

根据对系统的组成、结构和支配系统运动的机理的了解程度,可以将建模方法分为如下3类:

(1) 机理建模

利用各个专业学科领域提出来的物质和能量的守恒性和连续性原理、组成系统的结构形式,建立描述系统的数学关系,这样的建模方法也称为“白箱问题”。如此建立的数学模型,称

为机理模型。

(2) 系统辨识(实验建模)

从理论上,这是一种在没有任何可利用的验前信息(即相关学科专业知识与相关数据)的情况下,应用所采集系统的输入和输出数据提取信息进行建模的方法。这是一种实验建模的方法,这种建模方法也称为“黑箱问题”。这样建立的数学模型,称为辨识模型,也称为实验模型。

(3) 机理分析和系统辨识相结合的建模方法

这种建模方法适用于系统的运动机理不是完全未知的情况。这时,可以利用系统的运动机理和运行经验确定出模型的结构(如状态方程的维或差分方程的阶),也可能分析出部分参数的大小或可能的取值范围,再根据采集到的系统输入和输出的数据,由系统辨识方法来估计和修正模型中的参数,使其精确化。这样的建模方法也称为“灰箱问题”。实际中应用的辨识方法,严格地说,对“黑箱问题”一般是无法解决的,通常提到的系统辨识,往往是指的“灰箱问题”

0.1.3 系统辨识的基本内容

一般说来,若建立某一系统的数学模型的目的已经十分明确,同时对该系统已具备了一定的验前知识,就可以进行辨识该系统的数学模型及其参数,其内容为:

- a. 实验设计;
- b. 模型结构辨识;
- c. 模型参数辨识;
- d. 模型验证。

0.2 系统辨识的应用与发展

系统辨识获得如此蓬勃发展的来由,主要取决于20世纪60年代工程上广泛应用了各种自动控制系统,这些系统包括最简单的继电器控制系统到利用辅助变量的复杂的回路控制系统。在这一时期,自动控制理论的发展达到了一个较高水平,当时经典的控制概念受到新兴的现代控制理论的挑战。随后,计算机技术的快速发展和成本的降低,使得无论是使用计算机作为离线科学计算工具还是作为在线检测控制装置,都开始得到了广泛的应用。而且,值得注意的问题是,现代控制理论研究和应用是以被控对象的数学模型为前提的,有时它要对被控对象所受到的噪声的特性有所了解。在现代控制理论的研究中,往往要求系统的数学模型具备特定的形式,以适合理论分析的需要。然而,在获得这些模型的研究中,却出现了如何确定被控对象的数学模型的各种困难,理论和实际之间出现了相当大的距离。因此在当时,这正是现代控制理论在许多领域中远没有得到充分应用的原因之一。尽管“理论”能够以非常精巧的方法提出一个控制问题的最优解,但是要实现这个控制,需要对被控系统的动态特性给予一个合适的数学描述。在这样的背景下,系统辨识问题便愈来愈受到人们的重视,它成为了发展系统应用理论,认识实际对象特性并研究和控制实际对象工作中不可缺少的一个重要手段。

当然,系统辨识理论和应用之所以得到发展的更主要原因还在于,在科学技术的发展进程

中,各门学科的研究方法进一步趋向定量化发展,人们在生产实践和科学实验中,对所研究的较复杂的对象往往要求通过观测和计算来定量地判明其内在规律。为此必须建立所研究对象的数学模型,从而进行分析、设计、预测、控制的决策。因此,系统辨识对研究对象的定量化描述的特点,使得这门学科在它的起源的自动控制学科之外也得到迅速发展。除前述的应用外,其范围现在已大大超出建立这门学科的科学家的想像。如对产品需求量、新型工业的增长规律这类经济系统,已经建立并继续要求建立其定量的描述模型;其他如结构或机械的振动、地质分析、气象预报等等也都涉及系统辨识的理论和方法,而且这类需求还正在不断扩大。

当前,系统辨识理论已发展成为系统理论中的一个重要分支。系统辨识理论中,对于单变量线性系统辨识的理论和方法,目前已做了大量的研究,也得到了许多理论和应用成果。但是,对于多变量系统的辨识,尤其是它的结构辨识,则还处于不能令人满意的状态。系统辨识理论的发展,一方面有赖于其他理论(如系统结构理论,稳定性理论、模式识别、学习理论等等)的发展,从而加深对系统内在性质的理解,并提供新的估算方法。另一方面,又必须根据客观实际中提出的新问题(如实验设计、准则函数的选取、模型的验证等),在理论和实践的统一上加以解决,从而充实理论和推动学科的发展。

0.3 关于自适应控制

自适应控制是近年来在自动控制理论和工程的实践中都十分活跃的一门学科,设计具有真正自适应能力的控制系统是控制系统设计者追求的一个目标。因为在控制工程的实践中已经遇到了许多困难,诸如被控对象的动态未知或部分未知;动态特性随时间有未知漂移(时变性);环境有噪声干扰;还有一种常见的情形,即被控制对象的特性过于复杂(如非线性、分布参数、大滞后等),难以准确地描述被控对象,或者即使能描述控制对象,其数学模型也是十分复杂。在这些场合要想利用现有的控制理论(包括经典控制理论或现代控制理论)设计一个理想的控制系统是很困难的,有时甚至是不可能。所以能否设计出一种高性能的控制系统要求是,它能自动适应各种变化而不断修正自身的控制动作,以达到较满意的控制品质。

一个实际系统总存在某种不确定性,这种不确定性表征为描述系统本身的数学模型包含有未知或随机的因素。另外,系统在运行过程中,还会受到各种干扰因素的影响,这些影响也会使系统的动态特性发生变化。因此,对于一个比较复杂的实际系统,先建立精确的数学模型,再进行控制系统的设计,在许多情况下是行不通的。尤其是随着控制技术在各个领域的广泛应用,控制质量要求的不断提高,许多实际系统仅使用常规的控制手段已达不到理想的控制效果了。这就给人们提出了一个问题:对动态参数变化很大,控制质量又要求较高的系统,如何实现理想控制呢?很明显,这样的控制系统应该具有这样的能力:它能适应实际被控对象的参数所发生的各种变化,及时地调整控制动作,保证被控对象达到理想的控制效果。具有这种能力的控制系统就称为自适应控制系统,设计和分析这类控制系统正是本书所要讨论的问题。

近年来,由于闭环系统的全局稳定性的理论有了较大发展,计算机的性能有了很大提高,且使用成本也大大降低,因此,近十几年来,自适应控制系统从理论上和实践上都有了很大的进展,成为引人注目的一个学科方向。下面简单介绍几个与本书内容有关的问题。

0.3.1 什么是自适应控制

什么是自适应控制？它与一般的反馈控制有什么不同？它可以表达如下：

在控制系统的运动过程中，系统本身不断地识别被控系统的状态、性能或参数，从而“认识”或“掌握”系统当前的运行指标并与期望的指标相比较，进而做出决策，来改变控制器的结构、参数或根据适应性的规律来改变控制作用，以保证系统运行在某种意义下的最优或次优状态下。按这种方式建立的控制系统，称为自适应控制系统。

随着对复杂系统的高性能、高精度的要求日益提高，系统中那些具有较大不确定性的参数越来越具有本质的意义。如何处理这些不确定性对设计“一个能够保证具有较好性能的系统”是十分重要的。粗略地说，自适应控制就是对系统的变化进行连续地监测，并自动地校正自身的控制参数，以保证系统的良好性能。为了达到这一要求，用常规校正系统显然是不行的。

0.3.2 两种主要的自适应控制形式

因设计原理和结构的不同，自适应控制可以分为多种形式，目前应用最为广泛的为如下两种：

(1) 模型参考自适应控制

它是自适应发展历史上最早出现的自适应控制系统。

这类自适应控制系统的突出特点是它本身附加一个参考模型，这个模型体现了人们对被控对象的要求，也就是说，参考模型的特性就是被控对象的理想特性。模型参考自适应控制系统总是根据被控对象的状态（或输出）与参考模型的状态（或输出）之间的偏差，实时地进行调整，使得在某种指标下，被控对象的动态特性与参考模型特性尽量接近。这样，不管实际被控对象的不确定因素如何影响，总能保证它具有较理想的特性。

(2) 自校正控制系统

自校正控制是实际中应用较广的、与系统辨识技术联系最为密切的一类自适应控制系统，它是将在线辨识技术和最优设计方法相结合而产生的一种控制方法。整个控制系统由两个环构成，内环是由被控对象和通常的反馈控制器组成，控制器的参数通过外环来调整。调整的方法是通过在线递推估计参数（即系统辨识）和控制器在线设计来实现。

0.4 自适应控制系统的应用与发展

自适应控制的概念很早就提出来了，但由于当时的控制理论和计算机技术的限制未能取得大的进展。后来，随着计算机技术的发展才使得自适应控制获得了新的生命。近年来，无论在理论上还是应用上，自适应控制系统取得了较大的进步，目前已是控制理论中引人注目的活跃领域之一，同时在相当广泛的范围内获得了成功的应用。

自适应控制特点在于它冲破了其他设计方法要求事先准确知道被控过程的数学模型这一严格的约束，而这一点正是许多设计方法难以奏效的主要原因。由于过程的动态总是带有或多或少的不确定性，而自适应控制系统恰恰是针对这一点而提出的，因此它就可能在实际过程

的控制中获得比通常的控制系统更好的品质。迄今为止,自适应控制在许多方面得到了成功的应用。例如,飞行器的控制是最早应用自适应控制技术的领域,由于在飞行过程中,其动态气压、飞行高度、飞机质量、飞机机翼角度、阻尼板位置等飞行参数,在不同的环境下,可能会发生很大的范围的变化。因此对于这种工作环境复杂、参数变化大的控制对象,采用自适应控制是十分合适的;而在大海中航行的大型油轮自动驾驶是自适应控制应用的另一个例子,按照事先设定的路线控制(设定模型)自动驾驶油轮可使之航行既平稳又迅速。在工业过程控制中也有很多这类问题。例如,加热反应炉的升温自适应控制,可使升温图曲线尽量接近试验所确定的理想曲线等等。

其他如造纸机、矿石破碎机、热交换器、乙烯合成反应器、醋酸蒸发器、蒸馏塔、水泥生料混合、混凝土搅拌的控制等等。

自适应控制系统目前在理论上尚有较多的不完善地方,且设计方法也不是尽善尽美的。由于设计思想和理论工具的局限,现有的自适应控制系统在设计时有两个主要原则,其一,一般只假定系统是线性定常的,阶次已知(这一点有时也可以去掉);其二,设计是从系统的稳定性出发的(有的方法并不直接从稳定性理论出发,系统的闭环稳定性也是考察系统的一个最基本、最重要的指标)。此外,保证系统的闭环稳定性无疑也是最重要的。但是,由于实际系统往往具有各种复杂性,例如最常见的非线性、分散性、快时变性等。对于具有这些特性的系统,用现有的设计方法就难以得到理想的控制效果。

此外,稳定性只是保证如果系统的初始偏差在一定范围内,随着系统运行时间的增大偏差逐渐趋于零。这一点当然是最基本的,但是一个实际的系统仅这一点是不够的。它还要求一定的稳定速度,太慢了实际上是没有意义的。设计理论假定了系统的自适应速度(即使系统的偏差趋于零)比系统动态(或环境)的变化速度要快。也就是说,在两次适应过程之间,系统可以看做是定常的。但是,如果系统的稳定速度太慢,这一要求就不一定能保证。所以保证所设计的系统不仅是稳定的,而且具有所要求的稳定速度也是十分重要的。

自适应控制所着力追求的是具有真正适应能力的系统。它是一种拟人化的设计思想,自适应是生命系统的一种基本能力。它的表现从简单的昆虫变色到人类对自然界和社会的适应,有着不同层次的丰富内容。控制系统哪怕是只具有最初等的生命系统的那种自适应能力就可能大大地提高它的品质,而自适应能力的提高关键在于系统学习能力和智能水平。因此,自适应控制的进一步发展是借鉴于生命系统的自学习、自组织等功能,充分结合人工智能的深入研究肯定会对设计更高级的自适应控制系统产生很大的推动力。

在非工程应用方面,目前,如何应用自适应控制方法来研究具有不确定性大系统的特性,已有了大量的应用实例。如应用自适应滤波理论研究油田产量和船舶动态定位;应用随机自适应研究随机资源分配和宏观经济系统的随机最优化问题;应用自校正平滑理论研究语言声学等,目前已有大量的研究成果发表。

第 **I** 部分

系统辨识理论、方法及应用

第 **I** 章

系统辨识的基本概念

“系统辨识”是研究如何利用系统试验或运行的、含有噪声的输入输出数据来建立被研究对象数学模型的一种理论和方法。系统辨识与控制理论相互联系较为密切,随着计算机技术的发展和控制系统控制要求的提高,控制理论得到广泛的应用。但是,在控制理论的大多数应用场所,若想获得理想的使用效果,则与能获得被控对象精确的数学描述是密不可分的。然而,在很多情况下,被控对象的数学模型是不知道的,甚至涉及这个系统的工艺方面的工程师都无法用数学模型来描述它。或者有时,系统的正常运行期间的数学模型的参数会发生变化,使得依赖于这个模型运行的系统控制效果大打折扣,甚至使系统失控。

因此,在应用控制理论去实施系统控制时,其基础是要建立控制对象的数学描述(即对象的数学模型),这是控制理论能否应用成功的关键因素之一。

所谓通过“系统辨识”建立对象数学模型的依据是:研究表明,从外部对一个系统的认识,是通过其输入输出数据来实现的,既然数学模型是表述一个系统动态特性的一种描述方式,而系统的动态特性的表现必然蕴含在它变化的输入输出数据中。所以,通过记录系统在正常运

行时系统的输入输出数据,或者通过测量系统在人为输入作用下的输出响应,然后对这些数据进行适当的系统处理、数学计算和归纳整理,提取数据中蕴含的系统信息,从而建立被控对象的数学描述,这就是系统辨识。即系统辨识就是一种利用数学的方法从输入输出数据序列中提取对象数学模型的方法。

1.1 系统辨识的基本原理

1.1.1 系统辨识的定义和基本要素

实验和观测是人类了解客观世界的最根本的手段。在科学研究和工程实践中,利用通过实验和观测所得到的信息,从中获得对各种现象的规律性认识,或掌握所研究对象的特性,这种方式的含义即为“辨识”。关于系统辨识的定义,1962年,L. A. Zadeh 是这样提出的:“系统辨识就是在输入和输出数据观测的基础上,在指定的一组模型类中,确定一个与所测系统等价的模型”。1978年,L. Ljung 也给出了一个定义:“辨识即是按规定准则在一类模型中选择一个与数据拟合得最好的模型”。

上述两个定义,L. A. Zadeh 的定义较为严格,但要找出一个与实际系统完全等价的模型是比较困难的。而按 L. Ljung 的定义,辨识的实质可理解为数据拟合的优化,比较切合实用。可用图 1.1.1 来说明辨识建模的思想。

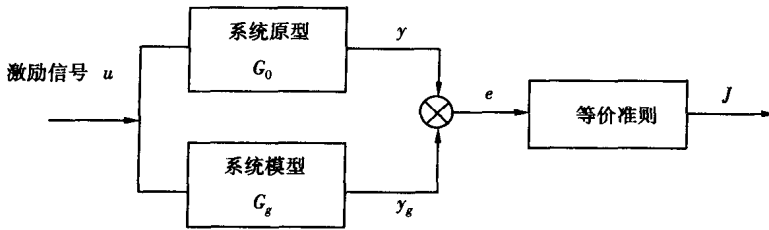


图 1.1.1 系统辨识的原理

图中规定代价函数(或称等价准则)为 $J(y, y_g)$,它是误差 e 的函数,系统原型 G_0 和系统模型 G_g 在同一激励信号 u 的作用下,产生系统原型输出信号 y 和系统模型输出信号 y_g ,二者误差为 e 。经等价准则计算后,去修正模型参数,然后再反复进行,直到误差满足代价函数最小为止,其数学表述为

$$J(y, y_g) = f(e) \quad (1.1.1)$$

其中 $f(e)$ 为准则函数表达式。而辨识的目的为:找出一个模型 $G_g \in \phi$,而 ϕ 为给定模型类。使之

$$J(y, y_g) \rightarrow \min \quad (1.1.2)$$

则有

$$G_g = G_0 \quad (1.1.3)$$

此时,即称为系统被辨识。

这个定义明确了系统辨识过程中的 3 大要素:①输入输出数据 (u, y, y_g) ;②模型类 (G_g) ;