

 新世纪高等院校精品教材

XITONG BIANSHI

# 系统辨识

(第二版)

冯培悌 编著

浙江大学出版社

# 系 统 辨 识

(第二版)

冯培悌 编著

浙江大學出版社

## 内容简介

本书较系统地介绍了系统辨识的理论与方法,内容涉及系统辨识的基本概念、动态系统的数学模型和各种辨识方法及其应用。书中讨论了辨识的经典方法、最小二乘类方法和一些概率型方法,以及它们在各种系统的辨识中的应用,并对递推算法的收敛性、结构辨识、闭环辨识、试验设计以及辨识在自适应控制、自适应预报与故障检测等重要领域中的应用等一些问题作了介绍。本书力求深入浅出、注重实用,尽量避免涉及过深理论。书中附有习题与上机实验,以便读者通过练习掌握有关内容。

本书既可作为高等院校自动化类专业研究生或高年级学生的课程教材,也可供有关专业师生和科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

系统辨识 / 冯培梯编著. —2 版. —杭州: 浙江大学出版社, 2004. 12

ISBN 7-308-02100-9

I. 系... II. 冯... III. 系统辨识 IV. N945.14  
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 104373 号

责任编辑 邹小宁

封面设计 宋纪浔

出版发行 浙江大学出版社

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 杭州杭新印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 11.75

字 数 301 千字

版 印 次 2004 年 12 月第 2 版 2006 年 12 月第 3 次印刷

印 数 2001—3000

书 号 ISBN 7-308-02100-9/N·007

定 价 18.00 元

# 前 言

近年来,由于系统辨识的应用领域愈来愈广泛,吸引各行业技术人员把系统辨识的理论和方法应用于各自的专业领域。各高等学校也开设有系统辨识的课程。本书是在多年为浙江大学工科自动化类专业研究生开设系统辨识课程的基础上,结合科研成果多次修改完善讲稿后写成的。

本书共九章,第一章介绍系统辨识的基本概念、发展历史和现状。第二章介绍描述动态系统的各类数学模型,它们是全书的基础。第三章至第七章介绍各种辨识方法及其在各类系统中的应用。先从辨识的经典方法着手,然后在最基本的最小二乘方法上展开广泛讨论。在此基础上,再将目光从确定型方法移向概率型方法。这样,逐渐把辨识算法引向一般化,最后以讨论递推算法的收敛性为结束。在介绍各种方法的过程中,同时也把应用对象从单输入、单输出系统推广至多输入、多输出系统,并在第六章专门讨论了非线性系统的辨识。第八章讨论系统结构辨识。第九章讨论辨识实现中的一些问题,如闭环辨识、输入信号设计及辨识应用等。

本书是为工科类研究生和工程技术人员写的,重点放在阐述系统辨识的基本概念、方法和应用,并希望能吸引读者跟踪学科发展,并将其成功应用于各自的专业领域。书中尽可能地简化或省略了复杂、繁琐的数学推导和证明。在书中附有供练习用的习题和上机实验,以有利于读者深入理解本书内容。

有关系统辨识的文献浩如烟海,所涉及的知识面也极其广泛,作者学识有限,书中缺点与错误之处恳请读者批评指正。

作 者

1998年8月

# 目 录

<b>第一章 引论</b> .....	1
§ 1-1 系统、模型与辨识.....	1
§ 1-2 系统辨识的发展和现状.....	1
§ 1-3 系统辨识的基本过程.....	6
<b>第二章 动态系统的描述</b> .....	9
§ 2-1 单输入、单输出线性连续系统的动态模型.....	9
§ 2-2 线性离散系统的动态模型.....	12
§ 2-3 随机型动态系统的数学模型.....	25
§ 2-4 小结.....	33
习题.....	33
<b>第三章 线性系统辨识的经典方法</b> .....	35
§ 3-1 引言.....	35
§ 3-2 阶跃响应法.....	35
§ 3-3 频率法.....	40
§ 3-4 相关分析法.....	44
§ 3-5 小结.....	54
习题.....	54
<b>第四章 线性系统参数估计的最小二乘法</b> .....	56
§ 4-1 引言.....	56
§ 4-2 基本最小二乘法.....	56
§ 4-3 最小二乘法在线性系统参数估计中的应用.....	62
§ 4-4 递推最小二乘法.....	66
§ 4-5 最小二乘估计的统计特性.....	71
§ 4-6 广义最小二乘法.....	76
§ 4-7 辅助变量法.....	80
§ 4-8 增广最小二乘法.....	83
§ 4-9 多步最小二乘法.....	84
§ 4-10 随机逼近方法.....	87
§ 4-11 小结.....	90
习题.....	91

<b>第五章 线性系统的状态估计</b> .....	92
§ 5-1 引言 .....	92
§ 5-2 随机型线性离散系统的分析 .....	92
§ 5-3 系统状态的最小方差估计 .....	96
§ 5-4 系统状态的线性最小方差估计 .....	97
§ 5-5 系统状态的递推估计 .....	100
§ 5-6 卡尔曼滤波器的具体计算 .....	103
§ 5-7 卡尔曼滤波器用于系统的参数估计 .....	104
§ 5-8 推广的卡尔曼滤波器 .....	106
§ 5-9 小结 .....	110
习题 .....	110
<b>第六章 非线性系统的辨识</b> .....	112
§ 6-1 引言 .....	112
§ 6-2 Volterra 级数描述和辨识 .....	112
§ 6-3 具有线性参数的非线性差分方程和辨识 .....	113
§ 6-4 具有非线性参数的非线性差分方程和辨识 .....	114
§ 6-5 Hammerstein 模型与辨识 .....	115
§ 6-6 基于神经网络的非线性系统辨识 .....	119
§ 6-7 小结 .....	126
<b>第七章 极大似然法和预报误差法</b> .....	127
§ 7-1 引言 .....	127
§ 7-2 极大似然法 .....	127
§ 7-3 预报误差方法 .....	132
§ 7-4 极大似然法估计线性系统参数的离线迭代算法 .....	135
§ 7-5 极大似然法估计线性系统参数的在线递推算法 .....	137
§ 7-6 递推算法的一般格式及收敛性分析 .....	140
§ 7-7 各种辨识方法的比较与选用 .....	142
§ 7-8 小结 .....	143
习题 .....	144
<b>第八章 系统模型结构的辨识</b> .....	145
§ 8-1 引言 .....	145
§ 8-2 单输入、单输出系统的模型结构辨识 .....	145
§ 8-3 多输入、多输出系统的模型结构辨识 .....	151
§ 8-4 小结 .....	156
习题 .....	157

<b>第九章 系统辨识实现中的一些问题</b> .....	159
§ 9-1 系统在闭环条件下的辨识 .....	159
§ 9-2 辨识试验设计 .....	164
§ 9-3 系统辨识的应用 .....	168
习题.....	177
<b>附录 上机实验说明</b> .....	178
<b>主要参考文献</b> .....	180

# 第一章 引 论

## § 1-1 系统、模型与辨识

\* 系统——指依一定秩序相互联系着的一组事物(钱学森语);是我们要研究的某一客观实体,如电机、晶体管、工程与社会等。

\* 系统数学模型——指人们对所研究客观系统的数学描述,描述系统内部以及相关外部因素之间的定量关系。

\* 系统辨识——通俗地说,是研究怎样利用包含未知因素系统的试验或运行数据(输入、输出数据)来建立系统数学模型的学科。

\* 1962年,Zadeh L. A. 下的数学化定义:“系统辨识是在输入和输出数据的基础上,从一类模型中确定一个与所测系统等价的模型。”此定义包含三要素:输入、输出数据;模型类;等价准则。

\* 1978年,Ljung L. 更明确指出:“系统辨识有三个要素——数据、模型类和准则。系统辨识是按照一个准则在模型类中选择一个与数据拟合得最好的模型。”

\* 按照对辨识对象的了解程度,系统辨识分为两类:(1)整体辨识——黑箱问题,一无所知。(2)部分辨识——灰箱问题,略有所知,但不全知。工程问题大多是灰箱问题。当系统结构已知,辨识变为参数估计。一般情况下分析建模与辨识建模结合使用。

\* 辨识应用——(1)控制系统设计与分析(仿真),(2)在线控制,(3)天气、人口、能源、客流量等预测预报,(4)生产过程监测与故障诊断。

## § 1-2 系统辨识的发展和现状

### 一、学科形成的历史

\* 萌芽:控制理论出现前,试验法建模用于自然现象预测、天文学行星轨道预测、其它基础学科基本定律的建立、概率统计与回归分析。

\* 经典控制理论中蕴含:用试验法确定系统传递函数。

\* 现代控制论方法的特点是需要依赖对象数学模型设计控制系统。系统辨识在60年代发展成现代控制理论的一个活跃的分支,是一种满足需要的发展:满足(1)控制理论,(2)系统工程,(3)统计学,(4)信息理论发展的需要。

\* 1967年开始每隔三年 IFAC(International Federation of Automatic Control)召开一次国际辨识与系统参数估计学术会议。

人们注意到借助数学模型进行各种系统的研究,可以获得显著成效。于是,系统辨识被推广至其它广泛领域,如水文学、生物学、生态学与社会经济学等各种领域。



## 二、发展现状与新动向

### 1. 发展现状及常规辨识和控制的局限性

进入 20 世纪 80 年代以来,系统辨识发展面临新形势,一方面由于鲁棒控制(Robust Control)的出现,使自适应鲁棒控制成为研究新热点,相比之下辨识本身的研究缺乏生气;另一方面,一些过去认为陈旧的东西,如连续系统辨识又以新面貌出现,引起人们注意。

回顾现代控制理论 30 多年(1962 年起)发展历史,研究成果非常显著,其中一些研究经过不断发展完善变成独立学科,也有些研究经过一段时间繁荣昌盛就完成了历史使命,其本身理论与应用价值非常有限。对系统辨识来说,在过去的 10 年中,系统辨识正处于挑战与危机并存,新老交替的形势下。下面根据有关文献介绍探讨系统辨识发展外因与内因引起的新动向。

如上所述,现代控制理论中辨识与控制的研究已进入而立之年。目前世界上大约有 10 万个自适应控制回路在工业生产中运行。然而,更大量的工业过程仍采用着 PID 调节。为什么呢?这是因为现有的完全基于数值计算的辨识与控制(Conventional Identification and Control 简称常规辨识和控制)不能满足现代工业过程控制的需要。于是新一代的辨识与控制(Modern Identification and Control 简称现代辨识和控制)已经出现。下面先分析常规辨识和控制的局限性:

1) 现代工业生产过程自动化极其复杂,不仅需要以数学模型为基础的控制,还需要处理一些不能用数量表示的质量因子以及处理语言和图像信息,还要有决策功能。而常规辨识和控制完全以数值计算为基础,以模型控制为手段,故难以满足要求。

2) 常规辨识中的统计框架有局限性。现有的绝大部分辨识文献中,都假定系统的噪声是随机过程,且满足某种假设。在这种假设下可以证明参数估计的收敛性。然而,一旦假设不满足,辨识收敛性就失去意义。实际系统噪声是否满足概率性假设是很难验证的,其结果产生以下的矛盾:一方面承认系统是复杂的,不一定都能用简单的数学模型作为系统模型;另一方面,由于模型集和噪声假设是人为的。于是似乎所有的系统都能通过辨识获得与系统任意接近的模型,这是辨识统计框架所造成的局限。

3) 常规辨识结果是一个标称系统(一个点),一般没有给出建模误差大小,不能满足鲁棒控制设计要求。

4) 常规辨识中,一般模型集总比实际系统简单,如实际系统是高阶次系统,模型集一般只取至 4~5 阶,阶次大大低于实际系统。M. Givers 最近指出这种节简(Parisisony)可能使原来稳定的系统,通过辨识和极点配置(关于模型系统稳定)得到的闭环系统不稳定。简单模型通过自适应控制可使原来以低频成分为主体的输入信号变成高频成分为主体的输入信号,因而使闭环系统处于可能产生不稳定的临界状态。

### 2. 20 世纪 90 年代以来的发展新动向

#### (1) 辨识与控制的配合及鲁棒辨识

\* 辨识与控制的相互配合,似乎已成为一种常识,然而真正认识这问题的本质及其重要性只是近几年的事。Gervers 认为,辨识与控制的配合是控制理论研究中一个新的挑战。这一问题的研究已导致系统辨识与控制器设计两方面的不断变革。鲁棒辨识或者适合控制的辨识等研究正是辨识与控制结合在系统辨识理论方面的革新。而鲁棒自适应控制和鲁棒预

测控制等研究正是这一结合在控制器设计方面的变革。各种鲁棒控制器的设计均将建模误差或系统不确定性作为控制器设计条件之一,而鲁棒辨识将系统不确定性作为辨识条件,将建模误差作为辨识目的。

在最差情况下,鲁棒控制器设计需要有关模型不确定性的一个精确边界。这就要求辨识技术能对不确定性系统以某种最优意义来求出模型不确定性的量化边界。从对系统的先验知识要求来看,有两种处理问题的方法:一种是传统的随机统计方法,它是假设系统噪声服从一定的统计分布,从而估计系统参数估计量的方差,这种方法已有大量结果和应用,并趋于成熟。另一种则是鲁棒辨识方法,又称为确定方法或最差情况辨识,这种方法是假设系统噪声的统计性是未知但有界的。第一种方法给出的边界通常是软边界误差,而第二种方法给出的则是硬误差边界。

此外,从方法论角度来看,在自适应鲁棒控制研究中存在两种不同途经。一种是致力于复杂和高级控制律的设计,使之能克服辨识方法可能产生的难以预料的变化;一种集中于参数估计方法研究,试图获得一种优良的估计器。能在信号允许范围内与控制律所需边界条件相适应。但是在自适应框架下辨识与控制事实上不可分隔,因为辨识在闭环下,而控制在辨识基础上实施,两者相互影响,因此人们由怀疑控制器与辨识分开设计的思想与方法到考虑两者协同作用的新方法。预示新的联合设计理论有可能产生。这中间,“如何估计自适应鲁棒控制中未建模动态的误差界限”也是研究者面临富有挑战性的问题。这些新问题将推动辨识理论发展。

\* 鲁棒辨识方法通常可理解为:在噪声具有某种不确定条件下,仍然保持某种优良特性的辨识方法。传统辨识理论中,噪声统计特性已知是先验假设条件。而真实系统是复杂的,所含不确定因素是多种多样的,不一定具有纯随机性。研究不确定因素对估计量的影响,是一个更为实际更为深入的课题。

近年来被称之为未知但有界 UBB(Unknown But Bounded) 估计理论和方法在鲁棒辨识中的应用愈来愈引人注目。基于该理论的集员辨识(Membership Set Identification)与  $H_\infty$  鲁棒辨识(Robust Identification in  $H_\infty$ ) 均假设系统的噪声未知但有界。其中集员辨识所追求的是能给出所辨识系统参数或传递函数的集合,而  $H_\infty$  辨识则追求辨识算法的鲁棒收敛性和  $H_\infty$  模型的误差上界。

集员估计最早形成于 20 世纪 60 年代,并首先用于不确定系统的状态估计。直至 1979 年,E. Foged 才将集员估计的思想用于参数辨识。其研究对象为:

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta + w(k) \quad (1-2-1)$$

其中:  $\theta^T = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$  为待估计参数,  $\varphi^T(k)$  是由输入和输出组成的观测向量。与传统辨识不同的是  $w(k)$  是未知但有界的,即

$$|w(k)| \leq \varepsilon(k) \quad (1-2-2)$$

集员辨识就是根据观测序列  $\{u(k), y(k)\}$  找出  $\theta$  所属的集合,并满足(1-2-1), (1-2-2) 式,又称集合为成员集。显然有

$$\Theta_H = \left\{ \theta: \sum_{k=1}^N [y(k) - \varphi^T(k)\theta]^2 \leq \varepsilon(k), \theta \in \mathbf{R}^n \right\} \quad (1-2-3)$$

可证明下式成立:

$$\Theta_H = \left\{ \theta: (\theta - \theta_c(k))^T P_k^{-1} (\theta - \theta_c(k)) \leq G(k), \theta \in \mathbf{R}^n \right\} \quad (1-2-4)$$

(1-2-4) 式是参数空间中的一个含真参数的椭球,  $\theta_i(k)$  是椭球的中心, 它与  $P_i$  和  $G(k)$  均可递推计算出来。

控制系统的设计通常涉及系统的不确定性和性能指标之间的折衷。换言之, 相对于任何一种不确定性水平的系统, 总存在一种控制策略, 使系统的性能指标达到最优, 而鲁棒控制器就是这样一种控制策略。由此可知, 要完成这种鲁棒控制器的设计, 必须知道系统不确定性的量化边界。称能估计系统不确定性量化边界的辨识算法为适合控制的辨识。集员辨识即为该类方法之一。而始于 20 世纪 90 年代初的  $H_\infty$  辨识也正是适合控制辨识的最近发展。它以一个全新的角度研究稳定的 LSI (Linear Shift Invariant) 系统的辨识问题。这是一种最差情况下误差收敛的辨识算法。需要说明的是这里的  $H_\infty$  指的是系统的不确定性可以在频域中用标称模型的一个  $\infty$  范数来描述。这种辨识中的  $H_\infty$  数学描述与目前的  $H_\infty$  控制理论的要素相一致。基于这一理论, 可以将  $H_\infty$  辨识真正称为适合控制的辨识。

适合控制的辨识是个全新的研究领域, 虽然起步较晚, 尤其是  $H_\infty$  辨识只是近几年的事情。无论是集员辨识还是  $H_\infty$  辨识, 现有的研究成果很多, 但目前的工作基本上还处于理论研究阶段, 实际应用例子还不多见。

正确合理地认清辨识与控制的关系, 不但是一个理论问题, 也是使这一技术走向应用的关键, 以往的研究侧重在适合于控制的辨识, 然而强调适合于辨识的控制也是极为重要的。换句话说, 在鲁棒辨识与控制之间存在着某种关系, 能否认清这种关系是控制学者所关注的热点, 而以往更多的研究则是将两者分隔开来, 自适应鲁棒控制、基于  $H_\infty$  范数指标的预测控制似乎已开始涉足于这一领域。

模型的不确定性是辨识与控制的结合纽带。如何处理模型的不确定性分别构成了鲁棒控制与鲁棒辨识的条件和目的。因此不确定性的数学描述是研究的热点。但是工作还刚刚开始。需要解决的问题很多, 但这毕竟是控制工程技术发展的一项重要工作, 许多现在无法解决的问题有可能在此找到答案。

### (2) 时变动态系统的跟踪

时变动态系统的跟踪是目前辨识领域十分活跃的研究课题。不同于时不变系统, 时变系统中系统特性与参数变化要求辨识算法具有适应性。Ljung (1990) 对此作了综述, 1991 年 IFAC 辨识会议作了专题讨论。

由于时变系统的广泛性和复杂性, 以及人们从时变系统获得信息的局限性 (观测数据不能“充分丰富”), 时变系统的跟踪仍是一个有许多问题要解决的难题。

对时变系统——一类不确定性系统, IBC (Information Based Complexity) 理论应用仅处于起步阶段, IBC——It is the study of the inherent difficulty in solving problems for which only partial, noise, and costly information is available. 由于信息不完全和有噪声, 因此其解是不确定的。要降低解的不确定性, 就必须获得更多的信息。但是信息的获取不但是困难的, 而且要付出代价。由此可以断定, 在解的不确定性的量化指标和获取信息的代价之间存在着折衷。IBC 理论的一个课题就是研究这种折衷方法。

### (3) 连续时间系统辨识

连续时间系统可能是最早采用的辨识模型。然而随着数字计算机的出现, 系统辨识的连续时间方法受到了冷落。后来这种状况有了明显改变。许多专著相继问世, 1991 年 IFAC 会议上达到了高潮, 论文最多, 讨论时间最长。

在系统辨识中,连续时间方法的重新崛起,原因是多方面的,首先连续系统描述方法有着广泛和深刻的物理渊源,辨识一个连续时间系统是人们认识客观世界的需要。其次是从连续到离散的转化是有条件的,其等价性的研究是一个重要课题。此外,随着计算机技术的发展。可为辨识连续系统提供直观有效手段,所以目前连续系统辨识仍是一个研究方向。

#### (4) 集成辨识方法

集成辨识方法溶进了专家系统和人工智能的思想和方法,随着人工智能、专家系统、神经网络发展而成为系统辨识的一种发展方向。

IIM(Integrated Identification Methodology)可看作是自适应辨识与专家系统的结合。通常的自适应辨识常在递推辨识中采用变遗忘因子,增加修改和重置  $P(k)$  矩阵(估计协方差阵)功能,使之具有适应性。基于知识的专家系统则采用辨识的一些质的因子,如系统稳定状况、运行状况、协方差矩阵状况等用以补充数值辨识之不足。现在用 Lisp 语言加专家系统的 IIM 系统已在 IBM-PC 机上实现。如何将专家经验和技巧反映到辨识软件包中去,是系统辨识面临的新课题。在 20 世纪 80 年代中这些思想即开始付诸实现。一些初步的基于知识的辨识软件包已相继问世。功能虽未达到预期目标,已反应出辨识的智能化倾向。

在使用专家系统时使用人工神经网络,使它们具有各自所达不到的联合效应(Synergism)。用了人工神经网络可以增加专家系统处理非线性的功能和识别状态的功能。反之,专家系统又帮助人工神经网络来确定节点个数、层数及权矩阵的初值。两者相得益彰发挥出更大的联合效应。

#### (5) 并行辨识方法

并行辨识方法随着并行计算机出现而成为研究方向。

传统的辨识算法是建立在串行计算机方法的基础上,通常采用递推或迭代算法。但随着系统的规模和复杂程度的增加,使得传统算法的应用在实际上无法奏效,人们迫切需要高效快速的算法。20 世纪 80 年代以来,各种并行计算机的出现,使得这类算法的实现成为可能。由于辨识算法一般涉及矩阵代数运算,同时辨识问题是一种优化问题,因此,关于矩阵运算的高效并行化算法和关于优化问题的并行算法都被较多地应用于并行辨识算法的研究。近年来,最小二乘估计、Kalman 滤波等均已被“并行化”。1991 年 IFAC 对此作了专题讨论,是有待进一步研究的重要方向。

### 三、辨识应用领域的拓广

系统辨识是一门应用性学科,近年来,它的应用愈来愈广泛,在这些应用中,可以看出一些特点:

(1) 在广泛应用的同时,逐步形成了“专业化”的特点,如在机器人、航空、航天、社会经济、农业和生物等不同领域,其辨识方法都有明显特色,在 IFAC 历次会议设专题讨论。

(2) 辨识的内涵已经拓宽,它已不仅仅是利用输入、输出数据来辨识参数和结构,对于那些模型已经建立,并能正常运行,但在环境改变下,某些特征的识别也将是辨识研究的课题。其典型例子是关于系统的故障诊断,IFAC 就此问题组织大会报告。

(3) 改变了辨识仅仅研究软件的概念,而把软、硬件结合起来,研究特殊微处理器芯片。

#### 四、新一代辨识与控制研究的先导

本课程讲解的内容偏重于成熟的基本理论和方法,为引导对新一代辨识的研究,特介绍这方面研究的先导。

\* 1988年, K. J. Astrom 指出:常规辨识和控制有其局限性,专家控制系统和智能控制将成为新一代过程控制器。

\* 1991年, M. Gevers 在 IFAC 辨识大会报告中说:辨识与鲁棒控制如何配合是一个挑战性课题,指出真正理解辨识与控制的相互作用只是近年的事。

\* 1991年, L. Ljung 指出常规辨识中统计框架的局限性。

\* 20世纪90年代,集员辨识受到重视, G. C. Goodwin 等人研究系统不确定性估计。

\* 1990年, K. S. Narendra 等把人工神经网络用于系统辨识。

### § 1-3 系统辨识的基本过程

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一定的验前知识,就可以着手辨识该系统的数学模型。一般来说,系统辨识的基本过程将包括下列主要阶段:

(1) 根据系统建模目的及验前知识,进行系统辨识试验的设计;

(2) 根据系统建模目的及验前知识,选择合适的模型类型和结构;

(3) 根据实验观测数据,采用适当的方法估计出模型的未知参数;

(4) 对所获得的数学模型进行验证。

以上各主要阶段相互间关系用图 1-1 表示。下面将框图中有关内容说明如下:

#### 1. 试验设计

试验设计是系统辨识首先遇到的问题。试验设计的好坏,直接影响系统模型辨识的精度、速度和经济性等。

已有的验前知识,前几次试验结果和辨识的目的,对试验设计起重要作用。在安排试验时,首先根据试验对象,确定所要观测的变量,其中输入变量可以由设计者给定,而输出变量则要通过检测获得。

在很多情况下,为了得到进行试验设计所必要的知识,需进行一些所谓预备性试验(也是辨识的组成部分),用一些如阶跃响应法、频率响应法等简单办法获得以下信息:(1) 被辨识系统的主要时间常数;(2) 允许的输入信号幅度;(3) 过程控制的非线性与时变性;(4) 噪声水平;(5) 变量之间的延迟等。

如被辨识系统允许输入扰动信号,如何选择输入信号将是一个重要问题。根据不同输入

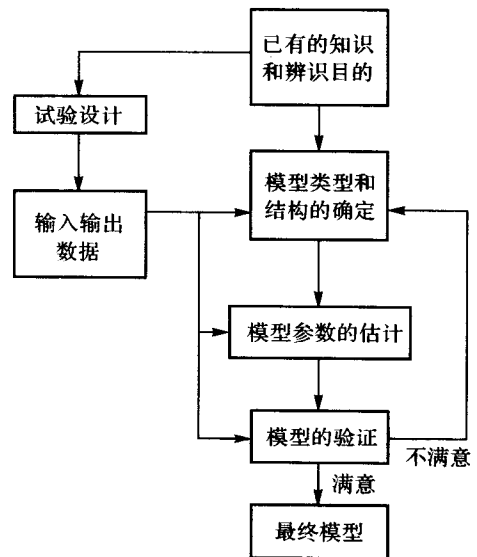


图 1-1

信号特点,可以应用不同的辨识方法。实践中常用的有阶跃信号、方波、窄脉冲、伪随机二进制序列等。

试验设计中另一重要问题是观测信号的采样速度。一般采样速度根据过程的动态和输入信号特性来定。但预先确定一个最优采样频率是困难的。一般工业过程搜集数据时,尽可能地用较短采样间隔采样,然后按需选用(在数据分析时)。

试验持续时间影响辨识精度。在正常工况下,试验时间越长辨识精度越高。如时间不够长时,可能得到完全错误的模型(太长,需注意实际系统参数漂移)。

实质上试验设计即试验条件设计,影响试验所获得的信息,如信息量不够或者有误将不可能通过数据分析得到精确模型。

## 2. 模型类型和结构的确定

模型的结构形式(类型)选择主要取决于模型的应用目的及精度要求。往往需要在其精度与复杂性之间进行权衡折衷。

从不同的角度和约束条件出发,模型可区分为以下几类:

- (1) 稳态模型和动态模型,一般稳态模型可看作动态模型的特例。
- (2) 参数模型与非参数模型。
- (3) 连续时间模型与非连续时间模型。
- (4) 集中参数模型与分布参数模型。
- (5) 线性模型或非线性模型。
- (6) 定常参数模型或时变参数模型。
- (7) 确定型模型或随机型模型。
- (8) 时间域模型或频率域模型。
- (9) 单变量或多变量模型。

数学模型用数据表格或图形表示,即为非参数模型,例如系统的阶跃响应、脉冲响应和频率响应的记录图形(如 Bode 图)等,它们通常是在试验过程中直接记录到或通过相关分析、频谱分析得到。如系统辨识目的是分析系统的特性,如系统的时间常数、截止频率等,可采用非参数模型。如辨识的目的是为了对系统进行精确控制,那么要采用参数模型。

一般说来,从参数模型转为非参数模型(图表和特征值)是不困难的,因为这是已知方程的求解问题。但是其逆过程,即由非参数模型求参数模型则往往是困难的,因为这是前者的反问题,即根据已知解求原方程的问题。若模型结构已知,则容易从非参数模型求出参数模型。

考虑到稳态模型是动态模型的特例,连续时间模型可离散化为离散时间模型,分布参数模型可在空间离散化为集中参数模型,非线性模型可在小范围内作线性化处理;而在用计算机进行辨识时,将是面向离散系统的。所以,下面重点讨论的将是线性、集中参数、定常的离散模型的辨识。当然,也讨论时变的、非线性的模型,并且总是从单变量推广到多变量。

所谓模型结构确定,在线性、定常系统中指的是阶与纯滞后的确定。在结构确定过程中要尽可能地利用对被辨识过程的物理意义的认识,而不只是利用统计方法。

## 3. 参数和状态估计方法

(1) 模型结构确定后,其中未知部分就需通过实验数据去“估计”。采用“估计”这个术语,是因为对被测系统进行观测时,所得到的数据实际上都会受到随机干扰和噪声的污染。

因此必须对实验数据采用统计方法处理,设法“滤去”污染,从而得到好的结果。

(2) 考虑到模型的未知部分,绝大多数情况是以未知参数出现的。因此参数估计方法是课程要讨论的重点内容之一。

(3) 参数估计的要求就是要辨识出来的模型与实际过程在某种意义上是最接近的。“接近”是用一个准则来衡量的,通常衡量在同样输入时模型输出与实际过程输出之间的误差大小。如常用的最小二乘法所依据的准则就是模型输出与过程输出之间的误差平方和最小。

(4) 当系统的模型是状态空间模型时,有时还需要对它的状态进行估计,尤其是递推估计。系统的状态估计,是系统的辨识组成部分。

(5) 参数和状态估计一般都需要借助于数字计算机,数值分析方法在此起重要作用。

#### 4. 模型的检验

一个模型被辨识出来之后,是否是可靠的,或是否真实反映对象的特性,是需要检验的。如何核验一个已得到的模型,至今未有很好的解决办法。应该说,模型好坏主要由实际应用效果来鉴定。

为了得到可靠的数学模型,需要进行多次试验。特别重要的是用一套数据(某工况下得到的)辨识出来的模型,需要另一套数据(另一工况下得到的)来验证或修改。如此交错地核对,才可能使模型的质量得到保证。

所有拟定的假设,有可能时都要进行校验。如时不变性、线性性、模型的阶次、噪声正态性及是否有色等。限于实验条件,不可能样样校验,但也须根据实验所得资料和对过程的了解,来判别模型是否处在合理的偏差范围之内。

## 第二章 动态系统的描述

学习本章的目的是为了熟悉描述动态系统的各类数学模型表达式,以及有关数学模型间的相互转换。重点将放在线性离散动态模型上。

在辨识进行中需要给出模型类。因此,研究系统辨识有必要熟悉各类数学模型及有关模型类间的转换。考虑到讨论经典辨识方法的需要,本章将对线性连续系统模型作一简短的回顾。由于现代辨识技术离不开计算机。因此辨识过程面向数字。且复杂控制都用计算机作为得力工具,控制也面向数字。因此把讲述重点放在线性离散系统上。

为了避免与先修的课程重复又不失系统连贯性,单输入、单输出系统的数学模型叙述比较简略。随机模型和多输入多输出系统模型将多占些篇幅。

### § 2-1 单输入、单输出线性连续系统的动态模型

#### 一、时域模型

##### 1. 微分方程

如图 2-1 所示,某线性系统的输入量用  $u(t)$  表示,输出用  $y(t)$  表示,  $\frac{d^n}{dt^n}y$  用  $y^{(n)}(t)$  表示,那么可用下述微分方程描述定常线性系统的动态特性:

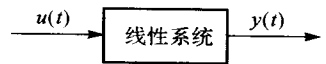


图 2-1

$$\begin{aligned} y^{(n)}(t) + a_1 y^{(n-1)}(t) + \cdots + a_{n-1} y'(t) + a_n y(t) \\ = b_0 u^{(n)}(t) + b_1 u^{(n-1)}(t) + \cdots + b_{n-1} u'(t) + b_n u(t) \end{aligned} \quad (2-1-1)$$

##### 2. 权函数和卷积

当系统的输入量为一个“单位脉冲  $\delta(t)$ ”时,输出量  $g(t)$  随时间变化,称之为脉冲响应函数。这里  $\delta(t) = \begin{cases} \infty & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases}$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$$

当系统输入任意量  $u(t)$  时,则有

$$y(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau) g(t - \tau) d\tau \quad (2-1-2)$$

考虑到  $\tau < 0$  时,  $u(\tau) = 0$ , 则上式可改写为

$$y(t) = \int_0^t u(\tau) g(t - \tau) d\tau \quad (2-1-3)$$

或表示为:  $y(t) = \int_0^t g(\tau) u(t - \tau) d\tau \quad (2-1-3)$

(2-1-3) 式称为  $u(t)$  与  $g(t)$  的卷积,其中  $g(t)$  又称为权函数(加权函数)。已知  $u(t)$  可求出任意  $g(t)$  下的  $y(t)$ 。



### 3. 阶跃响应函数 $k(t)$

当输入为单位阶跃函数  $1(t)$

$$1(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases} \quad (2-1-4)$$

则系统输出为阶跃响应函数

$$k(t) = \int_0^t g(t - \tau) d\tau \quad (2-1-5)$$

若令  $t - \tau = \lambda$ , 则有

$$k(t) = \int_0^t g(\lambda) d\lambda \quad (2-1-6)$$

(2-1-6) 式表明  $k(t)$  与  $g(t)$  之间存在的对应关系。

### 4. 连续状态方程

把高阶微分方程改写成一阶微分方程组就可以得到状态方程

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + du \end{cases} \quad (2-1-7)$$

这里  $x$  为  $n$  维列向量,  $A$  为  $n \times n$  维系数矩阵,  $B$  为  $n$  维列向量,  $C$  为  $n$  维行向量。与(2-1-1)式输入输出关系等价的状态方程(2-1-7)式不是唯一的。它的典范形式与微分方程典范形式之间存在参数对应关系。此时其参数个数最少, 为  $(2n + 1)$  个。微分方程与状态方程的典范形式分别为:

$$y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + a_2 y^{(n-2)} + \cdots + a_n y = b_0 u^{(n)} + b_1 u^{(n-1)} + \cdots + b_{n-1} u^1 + b_n u \quad (2-1-8a)$$

$$\dot{x} = A_0 x + B_0 u \quad (2-1-8b)$$

$$y = C_0 x + d_0 u$$

式中  $A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & \cdots & \cdots & a_1 \end{bmatrix}_{n \times n}$   $B_0 = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}_{n \times 1}$   $C_0^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{n \times 1}$   $d_0 = b_0 = \beta_0$

$\beta_i$  与  $a_i, b_i$  关系可表达为:

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ a_1 & 1 & \cdots & \cdots & 0 \\ a_2 & a_1 & 1 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n & a_{n-1} & \cdots & a_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}$$

以上四种数字模型均可用于描述确定型单输入单输出线性连续系统。

## 二、频域模型

### 1. 传递函数 $G(s)$

线性系统传递函数的定义为:

$$G(s) = \left. \frac{\mathcal{L}\{y(t)\}}{\mathcal{L}\{u(t)\}} \right|_{\text{零初始条件下}} = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (2-1-9)$$

其中  $Y(s)$  和  $U(s)$  分别是  $y(t)$  和  $U(t)$  在零初始条件下的拉氏变换