

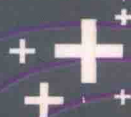
系统辨识与建模

XITONG BIANSHI YU JIANMO

刘峰 万雄波
编著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE



系统辨识与建模

XITONG BIANSHI YU JIANMO

刘 峰 万雄波 编著



中国地质大学出版社

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

内 容 简 介

本书系统地介绍了系统辨识的基本原理和应用方法,分析了各种方法的特点,探讨了 Matlab 软件对各类辨识方法的实现途径。全书共 7 章,主要内容包括:绪论、系统辨识的基本概念、随机过程简介、系统辨识的经典方法、最小二乘参数辨识方法及应用、极大似然参数辨识方法、其他辨识方法。在理论分析的基础上,列举了许多的 Matlab 仿真程序,进行了程序剖析,并给出一些应用实例和练习题。附录给出了学习本课程中用到的实验和 Matlab 系统辨识工具箱简介等。

本书可以作为高等学校控制科学与工程、仪器科学与技术、控制工程等学科的研究生教材,也可作为自动化、测控技术与仪器及相关专业本科生教材,还可以供工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

系统辨识与建模/刘峰,万雄波编著. —武汉:中国地质大学出版社,2019.3

ISBN 978-7-5625-4502-6

I. ①系…

II. ①刘… ②万…

III. ①系统辨识 ②系统建模

IV. ①N945.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 043286 号

系统辨识与建模

刘 峰 万雄波 编著

责任编辑:阎 娟

责任校对:徐蕾蕾

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传 真:(027)67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16

字数:333 千字 印张:13

版次:2019 年 3 月第 1 版

印次:2019 年 3 月第 1 次印刷

印刷:武汉市籍缘印刷厂

ISBN 978-7-5625-4502-6

定价:45.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

“系统辨识与建模”是控制科学与工程、控制工程、仪器科学与技术、自动化等相关专业学生的一门重要理论课程。

系统辨识、状态估计和控制理论是现代控制理论中的 3 个相互独立又相互渗透的学科领域。系统辨识和状态估计离不开控制理论的支持,控制理论的应用又几乎不能没有系统辨识和状态估计技术。

系统辨识是早期控制系统动态特性测试的延续。由动态特性测试方法得到的是非参数模型,而为了获得参数模型就必须探索应用更为普遍的参数估计方法。现代的系统辨识则主要是由系统的输入输出直接求出动态方程式的结构和参数。参数估计是系统辨识中的基础部分,它可解释为在系统结构已知的情况下从系统的观测数据中找出最接近观测值的估计值。

实际系统通过试验所获得的数据,都包含有测量噪声,而模型的假定和简化等过程所引起的误差也可以理解为噪声,从受到噪声干扰的观测值中寻求最接近被测值的估计值,这一过程称为参数估计。辨识方法可以较好地解决系统噪声和测量噪声干扰的问题,可以处理多变量和非线性系统问题,而对于时变系统和分布参数问题,则可以在多级系统上作参数估计。

在许多科学领域中,需要对系统进行定量的系统分析、系统综合、仿真、控制和预测。获得研究对象的模型是开展这些工作的前提和基础。一般说来,建立系统的数学模型有两种基本方法,即机理分析法和测试法。机理分析法即理论建模方法,它主要是通过分析系统的运动规律,利用数学方法推导出模型的结构和参数。机理分析法只能用于较简单系统的建模,并且对系统的机理要有较清楚的了解。测试法是通过分析未知系统的实验或运行数据(输入输出数据),来建立一个与所测系统等价的数学模型。测试建模的方法就是系统辨识。

系统辨识主要研究如何确定系统数学模型及其参数的问题,是现代控制理论的一个重要分支。它的理论正在日趋成熟,其实际应用遍及许多领域。近年来,它不仅在生产过程及工程实际中,而且在生物学、生态学、环境科学、航空、航天、海洋工程、工程控制、医学、水文学、人口学、经济学等方面的应用也越来越广泛。显然,把系统辨识方面比较成熟的理论及行之有效的方

法写成可供学习的教材是有必要的。

本书主要阐述系统辨识的基本原理及应用。全书共分 7 章。第 1 章至第 4 章为绪论、系统辨识的基本概念、随机过程简介、系统辨识的经典方法,主要是回顾和介绍了与系统辨识有关的一些基础知识。第 5 章至第 7 章为最小二乘参数辨识方法及应用、极大似然参数辨识方法、其他辨识方法等,介绍了系统辨识常用基本方法,是系统辨识的主要基本内容。为了初学者方便学习,附录中介绍了系统辨识实验说明与 Matlab 系统辨识工具箱简介。其中,第 1、3、

4、6 章由刘峰教授编写,第 2、5、7 章由万雄波副教授编写。本书编写大纲由刘峰教授提出,经编写小组成员共同深入细致地研究制定,全书由刘峰教授负责修改和统稿。在本书的编写过程中,董庭、戴向娟、任杰、梅启程等研究生为本书的文字资料收集整理做了大量工作。本书的编写工作得到了自动化学院各级领导的支持和关怀,许多同行专家提出了宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢。同时,本书在编写过程中参考了许多文献资料,在此对所有文献的作者表示崇高的敬意和由衷的感谢。

本书受中国地质大学(武汉)研究生院研究生精品教材建设项目(YJC2017405)和国家自然科学基金面上项目(61472374)资助。中国地质大学出版社对本书的出版给予了热情支持,在此深表谢意。

由于作者水平有限,书中错误在所难免,敬请读者批评指正并提出宝贵意见。

刘 峰

2018 年 10 月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 基本概念	(2)
1.2 系统辨识的产生与发展	(3)
1.2.1 系统辨识的基本思想	(4)
1.2.2 系统辨识的发展	(5)
1.2.3 系统辨识的应用	(7)
1.3 本书的主要内容	(10)
练习题	(11)
第2章 系统辨识的基本概念	(12)
2.1 系统的概念及其分类	(12)
2.1.1 系统的基本概念	(12)
2.1.2 系统的分类	(13)
2.2 模型的概念及分类	(14)
2.2.1 模型的基本概念	(14)
2.2.2 模型的性质	(14)
2.2.3 模型的分类	(15)
2.3 建立模型的方法及常见模型	(16)
2.3.1 建立模型的基本方法	(16)
2.3.2 常见的数学模型	(17)
2.4 系统辨识的定义和基本原理	(20)
2.4.1 系统辨识的定义	(20)
2.4.2 系统辨识的基本原理	(20)
2.5 系统辨识相关知识	(23)
2.5.1 系统辨识的误差准则	(23)
2.5.2 系统辨识的分类	(25)
2.5.3 系统辨识的基本原则	(26)
2.5.4 系统辨识的内容和步骤	(27)
练习题	(29)

第3章 随机过程简介	(30)
3.1 随机过程的基本概念	(30)
3.1.1 随机过程的定义	(30)
3.1.2 随机过程的概率分布函数与密度函数	(31)
3.1.3 随机过程的数字特征	(32)
3.1.4 平稳随机过程	(34)
3.1.5 广义平稳随机过程	(35)
3.1.6 平稳随机过程的各态遍历性	(36)
3.1.7 平稳随机过程相关函数的性质	(37)
3.1.8 离散平稳随机序列的数字特征的估计	(39)
3.1.9 其他类型的随机过程	(40)
3.2 谱密度函数	(41)
3.2.1 确定性过程的谱密度	(41)
3.2.2 随机过程的功率谱密度	(43)
3.2.3 谱密度的性质	(43)
3.3 线性过程在随机输入下的响应	(43)
3.3.1 线性过程在随机输入下的输出谱密度	(44)
3.3.2 线性过程在随机输入下的互谱密度	(45)
3.4 白噪声及其产生方法	(46)
3.4.1 白噪声过程	(46)
3.4.2 白噪声序列	(48)
3.4.3 表示定理	(49)
3.4.4 白噪声序列的产生	(49)
3.5 伪随机码的产生及其性质	(52)
3.5.1 伪随机二位式序列	(52)
3.5.2 逆重复 M 序列	(57)
练习题	(58)
第4章 系统辨识的经典方法	(59)
4.1 阶跃响应法	(59)
4.1.1 近似法	(60)
4.1.2 两点法	(61)
4.1.3 面积法	(62)
4.1.4 拉氏变换法	(63)
4.2 频率响应法	(64)
4.3 脉冲响应法	(68)
4.3.1 从系统输入输出求系统的脉冲响应	(69)

4.3.2 根据脉冲响应求脉冲传递函数	(70)
4.4 相关分析法	(73)
4.5 用 M 序列辨识线性系统的脉冲响应	(75)
练习题	(79)
第 5 章 最小二乘参数辨识方法及应用	(80)
5.1 最小二乘辨识的基本概念	(80)
5.2 最小二乘参数辨识方法	(83)
5.2.1 最小二乘辨识问题的假设条件	(83)
5.2.2 最小二乘辨识问题的解	(84)
5.2.3 最小二乘估计的几何意义	(86)
5.2.4 最小二乘估计的统计性质	(87)
5.3 递推最小二乘参数辨识方法	(90)
5.3.1 递推算法	(90)
5.3.2 损失函数的递推计算	(92)
5.3.3 递推算法分析	(93)
5.4 加权最小二乘辨识法	(100)
5.4.1 加权最小二乘辨识法简介	(100)
5.4.2 加权最小二乘递推算法	(101)
5.4.3 算法的加权形式	(102)
5.4.4 损失函数的递推计算	(102)
5.5 增广最小二乘辨识方法	(106)
5.5.1 增广最小二乘的原理	(106)
5.5.2 递推算式	(108)
5.5.3 增广最小二乘法的改进	(108)
5.6 多变量最小二乘辨识方法	(114)
5.6.1 多变量系统的最小二乘辨识算法的基本原理	(114)
5.6.2 多变量系统的最小二乘辨识算法的分析与设计	(116)
练习题	(120)
第 6 章 极大似然参数辨识方法	(122)
6.1 极大似然估计方法	(122)
6.1.1 极大似然估计法	(122)
6.1.2 极大似然法	(124)
6.2 动态模型参数的极大似然估计	(125)
6.3 极大似然法参数估计的数值解	(127)
6.4 递推的极大似然参数估计	(131)
6.5 预报误差参数辨识法	(138)

6.5.1	预报误差模型	(138)
6.5.2	预报误差法与极大似然法之间的关系	(140)
6.5.3	预报误差参数估计方法	(142)
6.6	极大似然法的估计精度及辨识方法的比较	(145)
6.6.1	估计精度	(145)
6.6.2	递推算法的一般格式	(147)
	练习题	(148)
第 7 章	其他辨识方法	(150)
7.1	梯度校正参数辨识	(150)
7.1.1	确定性系统的梯度校正参数辨识法	(150)
7.1.2	随机逼近法	(153)
7.1.3	随机牛顿法	(156)
7.2	神经网络模型辨识	(158)
7.2.1	神经网络模型分类	(158)
7.2.2	神经网络模型辨识中常用结构	(158)
7.2.3	基于 BP 神经网络的非线性系统辨识	(161)
7.3	模型的结构辨识	(167)
7.3.1	Hankel 矩阵定阶法	(167)
7.3.2	损失函数检验法	(168)
7.3.3	F 检验法	(169)
7.3.4	Akaike 准则法	(169)
7.3.5	预报误差准则法	(171)
7.4	非线性系统辨识	(174)
7.4.1	Volterra 级数描述和辨识	(174)
7.4.2	非线性差分方程和辨识	(176)
7.4.3	Hammerstein 模型与辨识	(178)
	练习题	(183)
附录 A	系统辨识实验说明	(185)
实验 1	白噪声和 M 序列的产生	(185)
实验 2	相关分析法辨识脉冲响应	(186)
实验 3	最小二乘法的实现	(188)
实验 4	递推最小二乘法的实现	(189)
附录 B	Matlab 系统辨识工具箱简介	(190)
附录 C	矩阵相关性质	(198)
	主要参考文献	(199)

第1章 绪论

系统辨识的发展源于20世纪60年代工程上广泛应用的各种自动控制系统。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。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,现代控制理论在许多领域中远没有得到充分应用。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。

系统辨识、状态估计和控制理论是现代控制论中相互渗透的几个领域。系统辨识和状态估计离不开控制理论的支持,控制理论的应用也不能没有系统辨识和状态估计技术。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。在系统辨识理论中,对于单变量线性系统辨识的理论和方法的研究,得到了许多成果。但是,对于多变量系统的辨识,尤其是它的结构辨识,还不能令人满意。系统辨识理论的发展,一方面依赖于其他理论(如系统结构理论、稳定性理论、模式识别、学习理论等)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。系统辨识理论和应用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。

系统辨识的理论的应用已经遍及很多领域,如在控制工程、航空航天、生物学、医学、社会经济学等领域中得到广泛的应用。除这些应用外,其范围现在已大大超出建立这门学科的科学家的想象。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,用于描述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;对结构或机械的振动、地质分析、气象预报等也都涉及系统辨识的理论和系统参数估计方法,而且这类需求正在不断扩大。目前不仅工程控制对象需要建立数学模型,而且在其他领域也常常需要建立数学模型,并根据数学模型确定最优控制决策。对于上述各领域,由于系统比较复杂,人们对于其结构和支配其运动的机理,往往了解不多,甚至很不了解,不可能用理论分析的方法得到数学模型,只能用观测数据来确定数学模型,所以系统辨识受到了人们的重视。

1.1 基本概念

系统是由相互联系、相互制约、相互作用的各个部分组成的,具有一定整体功能和综合行为的整体。系统是多样的、千姿百态的和最常见的。例如,电力系统、交通系统、自来水系统等。工程中的系统是由相互联系的元部件组成的具有某种特定功能的整体。从外界接受一个(或多个)输入量的作用,然后向外界输出物理量,输入量和输出量都是随时间变化的。控制理论中的系统都是动态系统,系统在当前的输出不仅取决于系统当前的输入,还取决于过去的输入。

过程是一个含义非常广泛的概念,通常泛指具有时间或空间上的跨度的对象(如工程系统、生物系统或社会经济系统都可以称为过程)。在系统辨识中,所考虑的主要是工业控制过程(如化工过程、石油加工过程、冶金过程、生化过程、制药过程等)。在实际工业过程中,由于工艺过程的复杂性通常难以通过机理分析建立精确的数学模型。但如果仅仅关心过程的输入特性,可以将过程视为“黑箱”,根据“黑箱”的输入输出特性建立输入输出模型,这正是系统辨识的出发点。

模型是针对特定的应用,对系统中与该应用相关的那些信号(变量)之间的本质关系的一种假定性的近似描述。模型就是把系统的本质部分信息缩减为有用的描述形式,用来描述系统的变化规律,是系统行为特性的一种客观写照,是分析系统和预报、控制系统的有力工具。系统的模型一般分物理模型与数学模型。

物理模型指用物理、化学、生物等材料构成的用于描述系统中的关系和特征的实体模型。

数学模型是对真实系统的变量间相互关系的假定性数学描述。控制领域的数学模型就是指能用来描述系统的动态或静态特性和行为的数学表达式或方程,是进行系统分析、预报、优化及控制系统设计的基础。

实体是具体系统对象(如汽车、火车、机器、设备等)。一切客观存在的事物及其运动形态,统称为实体。实体泛指自然科学和社会科学中所研究的客观对象,如生物系统、经济系统、社会系统、工业生产过程(化工装置、锅炉设备、飞机和船舶驾驶)。

属性系指描述实体特征的信息,常以状态、参数或逻辑等来表征,如连续系统、离散事件、随机过程、位置、速度、加速度等,以及“非”“合”“并”等。

行为是指随时间推移所发生的状态变化,如位置、速度变化、操作过程等。

环境则表示系统所处界面状况,如干扰、约束、关联因素等。

先验知识指关于系统运动规律、数据以及其他方面的已有知识。这些知识对选择模型结构、设计实验和决定辨识方法等都有重要作用。用于不同目的模型可能会有很大差别。

辨识就是在输入和输出的基础上由规定的一类系统模型中确定一个系统模型,使之与被测系统等价。这个定义明确了辨识的三大要素:系统的输入输出数据、模型类和等价准则。这个定义中提到的“一类系统模型”是指规定的连续时间模型或离散时间模型、输入输出模型或状态空间模型、确定性模型或随机模型、线性模型或非线性模型等。模型类的规定是根据人们对实际系统的了解以及建立模型的目的设定的。规定了模型类后,再由输入输出数据按结构辨识的方法确定系统的结构参数,并且用参数辨识的方法辨识系统的参数。

辨识目的是估计表征系统行为的重要参数,建立一个能模仿真实系统行为的模型,用当前可测量的系统的输入和输出预测系统输出的未来演变,它是控制的逆问题。系统辨识包括两个方面:结构辨识和参数估计。结构辨识和参数估计这两个方面不是截然分开的,而是可以交织在一起进行的。

在自然科学和社会科学的许多领域中,人们越来越重视对系统进行定量的系统分析、系统综合、仿真、控制和预测。将被研究对象模型化,则是开展这些工作的前提和基础。系统是通过模型来表达的,因此系统辨识也称为模型辨识。

1.2 系统辨识的产生与发展

系统辨识(System Identification)又译为“系统识别”和“系统同定”,目前尚无公认的统一定义。《中国大百科全书》中记述为:系统辨识是根据系统的输入、输出时间函数,确定系统行为的数学模型,是现代控制理论的一个分支。

系统辨识是控制论的一个分支,系统辨识、状态估计、控制理论构成了现代控制论的三大支柱。“系统辨识”是“系统分析”和“控制系统设计”的逆问题。经典控制理论中蕴含着系统辨识,用实验法确定系统传递函数。

辨识是研究建立系统或生产过程数学模型的一种理论和方法。辨识是一种从含有噪声

的测量数据(输入、输出数据)中提取被研究对象数学模型的一种统计方法。辨识模型是对对象输入输出特性在某种准则意义下的一种近似。近似的程度取决于人们对系统先验知识的认识和对数据集性质的了解程度,以及所选用的辨识方法是否合理。辨识技术帮助人们在表征被研究的对象、现象或系统、过程的复杂因果关系时,尽可能准确地确立它们之间的定量依存关系。辨识是一种实验统计的建模方法。通俗地说,系统辨识是研究怎样利用对未知系统的试验数据或在线运行数据(输入、输出数据)建立描述系统的数学模型的科学。

基于实际系统的复杂性,描述其特性的数学模型具有“近似性”和“非唯一性”;辨识方法亦有多多样性。没有绝对好的数学模型和绝对好的辨识方法。什么是较好的模型?依据辨识的不同目的,有不同答案。一般说,能够满足目的要求的,比较简单的模型,就是较好的模型。

1.2.1 系统辨识的基本思想

系统辨识的基本思想是根据系统运行或试验测得的数据,按照给定的“系统等价准则”从一群候选数学模型集合中,确定出一个与系统特性等价的数学模型。由于实际系统的机理往往是未知的,因此依据“系统等价准则”得到的模型大多只是实际系统模型的某种近似,而不是准确的系统模型。所以,辨识模型一般也称为系统的名义模型。为了描述方便,本书中采用辨识方法得到的系统模型,一般指系统的名义模型,而非系统的真实模型。因此,系统辨识包括3个主要因素:候选数学模型集、辨识准则及辨识算法。

候选数学模型集,数学模型的分类方法很多,可按连续与离散定常参数与时变参数、集中参数与分布参数、线性与非线性、动态与静态、确定性与随机性、宏观与微观、精确与模糊等方式进行分类。对于实际问题,可选用适当的模型集作为候选模型集。另外,由于目前对线性系统的研究比较深入,因此能用线性模型解决的问题最好采用线性模型,以简化计算。随着计算机技术的发展,较为复杂的样条函数模型集、指数函数模型集、超越函数模型集、有限元和有限体积元、神经网络等构成的模型集都可作为候选模型集。

辨识准则,是用于衡量模型接近实际系统的标准,因此误差准则也称为等价准则、损失函数、误差准则函数等,通常表示为实际系统与模型的误差的函数。误差可以是输出误差、输入误差、广义误差等。此外,还有些其他准则,如最小方差准则、最大似然准则、预报误差准则、 H_∞ 准则等。不同的辨识准则结合不同的优化方法可构成不同的辨识算法,如最小二乘法、极大似然法、预报预测法、神经网络法和模糊辨识法等。

辨识算法,对于给定的候选数学模型集,根据辨识准则建立模型的方程组之后,系统辨识就化成了一个极值优化计算问题。对于线性系统,可得到解析解。而对于非线性系统,由于辨识准则函数通常是关于参数的复杂的非线性函数,一般无解析解,通常采用非线性优化的方法进行求解,如梯度下降法、遗传算法等优化算法。

1.2.2 系统辨识的发展

系统辨识是近几十年来发展起来的新兴科学,系统辨识已经发展成现代控制论的一个活跃分支。它所涉及理论基础广泛,内容丰富,工程应用性强。现以系统辨识学科相关的重要学者、重大发现为线索,回顾系统辨识学科的发展历史。

系统辨识最早可以追溯到16世纪,德国天文学家开普勒(Kepler)和德国数学家高斯(Gauss)根据观测数据,建立了行星运动的数学模型。

最小二乘法(Least Squares Method)。高斯(Gauss)在1795年首次用最小二乘法计算行星轨道。马尔可夫(Markov)继续完善了高斯的工作,证明了最小二乘估计是最优线性无偏估计。

概率论(Probability Theory)。朴素概率论早在19世纪就建立起来了,但是朴素概率论不是建立在严格的数学基础之上的。苏联科学家柯尔莫可洛夫(Kolmogorov)于1930年在测度论的基础上建立了公理化的概率论体系,这使得概率论、随机过程、数理统计等学科的飞速发展成为可能。

预测误差方法(Prediction Error Methods)。如果扰动不是白噪声,则最小二乘法不再适用。瑞典的莱纳特荣格(Lennart Ljung)等从20世纪70年代开始发展出预测误差方法,它能够在有色噪声情形的情况下,给出参数的一致估计。目前,该类方法是系统辨识的主流方法。

辅助变量法(Instrumental Variable Methods)。如果扰动不是白噪声,则最小二乘法不再适用。但我们可以假设扰动与输入不相关,这在开环运行的情况下是完全合理的。在这种假设下,可以用辅助变量法进行模型参数估计。该类方法计算量较小,但是不像预测误差方法那样能够同时得到噪声模型。

子空间辨识方法(Subspace Identification Methods)。20世纪90年代,为了克服PEM针对多变量系统辨识时需要进行非线性优化,以及IV不能同时辨识出噪声模型的缺点,巴特德摩尔、维尔海根(Bart De Moor, Verhaege)等提出了针对多变量系统的子空间辨识方法。该类方法不是基于优化某个准则,主要用到矩阵的奇异值分解,无需非线性优化,因而计算量较小。

鲁棒辨识方法(Robust System Identification Method)。20世纪90年代末,古德温、陈(Goodwin, Chen)等提出鲁棒辨识。随着鲁棒控制的发展,控制界需要适用于鲁棒控制的系统模型。鲁棒辨识完全舍弃了扰动为随机噪声的假设,而假设扰动在某个区间范围内。因此,辨识得到的模型是(确定论的)模型族,而不是单个模型。由于传统的辨识理论假设系统的噪声服从某种分布,而实际应用中,通常很难得出系统噪声的真实分布情况,这使得传统辨识方法获得的系统模型是不可靠的。基于 H_∞ 准则的鲁棒辨识方法得到了很大发展,这是一种适合于控制的系统辨识方法,对系统的先验知识要求得很少,甚至只要求系统噪声的某种

范数有界即可,这大大提高了系统对外界环境变化的适应性,因而称为鲁棒的系统辨识。

20 世纪 30 年代以前,人们主要利用概率统计理论中的统计回归方法等来处理在从事生产实践、社会活动以及天文气象的研究中遇到的大量的数据资料。30 年代到 50 年代末,由奈奎斯特(Nyquist)所倡导的试验研究方法丰富了经典理论,但还是仅局限于对动态系统的传递函数或脉冲响应的研究(测试阶跃响应、脉冲响应和频率特性等古典辨识方法)。20 世纪 60 年代以后,随着现代控制理论的迅速发展,卡尔曼(Kalman)滤波理论的广泛应用以及计算机技术的发展,系统辨识这门学科开始迅速而蓬勃发展,进入了现代辨识方法的研究(最小二乘法等时域方法)。20 世纪 80 年代以来,由于大系统、系统工程及智能控制等的需要,系统辨识已成功地应用于航空航天、生物医学系统、经济系统及机器人工程等领域。辨识方法也结合人工智能、模糊理论、神经网络等理论获得了更加广泛的应用。目前,随着数据挖掘、神经网络、粗集理论等数学方法的发展及运用,系统辨识研究更加深入,涉及系统辨识问题的研究成果越来越多,对系统辨识的认识更加深入和实际。

系统辨识当前发展的新热点:非线性系统辨识(机器人);快时变与有缺陷样本的辨识;生命、生态系统的辨识;辨识的专家系统与智能化软件包的开发;基于模糊理论、神经网络、小波变换的辨识方法;系统辨识与人工智能、人工生命、图像处理、网络技术和多媒体技术的结合。

在社会和生产中,越来越多需要辨识过程(或系统)模型的问题已广泛引起人们的重视,社会科学和自然科学的各个领域有很多学者在研究有关线性和非线性的辨识问题。对于线性系统的模型辨识和参数估计,由于我们对一个系统多少有一些了解,系统总有某种程度的透明度,我们可以得到一个可用的模型。所以,辨识问题一般来说是可解的。人们已经进行了深入的研究,并总结出一套成熟的方法:最小二乘辨识方法、最大似然辨识方法、梯度法辨识等。这些理论和方法已在工程实际中得到了广泛的应用。

然而在现实中,非线性是普遍存在的,而线性模型只是对非线性的一种简化和近似。对非线性系统的研究、设计要比线性系统复杂得多,且方法并非唯一,更找不到统一的设计模式,只能是针对具体问题分析其非线性的问题所在,抓住其影响系统静、动态品质的要害,研究辨识非线性系统模型及控制的理论和方法,进而对系统进行辨识、补偿或控制。若能够通过辨识得到其较准确的模型,则是控制问题的关键。

系统辨识学科的发展,可归结为如下几个方面:

第二次世界大战期间和结束后,随着军事技术和工业生产的发展,人们面对的控制系统越来越复杂,对控制系统的性能要求也越来越高,以根轨迹法和频率域法为代表的经典控制理论已不能胜任将控制技术提到更高水平的要求。在 20 世纪 50 年代末出现了以状态空间法、动态规划以及极大值原理为代表的现代控制理论。无论是经典还是现代控制理论,其基础是必须有一个足够精确反映动态系统输入输出关系,或进一步反映输入输出系统状态变量之间关系的数学模型。现代控制理论的应用更是以掌握被控对象足够精确的数学模型为前提。能否构成一个基本恰当的数学模型已成为控制理论应用成败的关键。

同时,计算机的广泛使用,为辨识系统所需进行的计算提供了有效的工具,使系统辨识

算法的实现成为可能。在这种背景下,系统辨识问题便理所当然地越来越受到人们的重视,它已成为发展系统理论、开展实际应用工作中必不可少的组成部分。

系统工程主要是用定量方法来研究大系统的一门学科,其基础工作也是建立数学模型。系统工程建模有许多方法,其中之一就是系统辨识。

生物计量学以及经济计量学等都要用到系统辨识技术。它们有一套自己的辨识和估计的模式。

信息理论中很重要的一个内容是滤波,需要从受噪声污染的信息中通过滤波来获取有效信息。滤波的前提也需要先构成模型,因此也要用到系统辨识技术。

随着科学技术的发展,各学科的研究方法都或多或少地趋于定量化。在许多科学和工程领域内,是否进行定量分析,能否建立所研究问题的数学模型,已成为衡量人们在这些领域认识水平的一个尺度。

促进系统辨识发展的主要因素有:

(1) 自动控制学科发展的需要。在自动控制领域,系统辨识是早期控制系统动态特性测试的延续。例如通过试验得到系统的过渡过程曲线或频率特性曲线,再推算出系统的脉冲过渡函数或传递函数。现代的系统辨识主要是由系统的输入输出直接求出动态方程式的结构和参数。随着控制理论更深入更广泛的发展,控制精度和控制指标的要求提高,控制策略极强烈地依赖对控制对象的了解,例如“自适应控制”“鲁棒控制”“变参数对象的控制”。系统越复杂,系统模型的地位就越重要。再好的控制理论和控制策略离开了系统数学模型,只能成为空中楼阁,无用武之地。而系统分析、综合、预测都离不开数学模型。系统建模是系统分析的基础,是自动控制系统设计和分析必不可少的先导环节。

(2) 其他学科发展的需要。数学模型不仅是控制理论分析的基础,也是其他学科理论分析的基础,如机械性能分析、疲劳、损伤、故障诊断、信号分析、气象预报、大气环境等。其他原本只注重定性分析的学科,如社会学、经济学、企业战略以及人力资源、市场经济、股票预测等也都离不开数学模型了。因此系统辨识知识也能为其他学科共用。

(3) 计算机技术快速发展。计算机技术的不断发展和普及,为系统辨识的广泛应用提供了技术保证。计算机具有强大的硬件支持、丰富的软件资源和高速的运算能力,在计算机上自动运行的系统辨识算法,可以在线实时地完成系统辨识,为控制策略的设计直接提供数学模型。计算机运算速度越来越快,建模分析软件功能越来越强大,系统辨识的各种复杂算法能付诸于实践和实际系统建模应用。

1.2.3 系统辨识的应用

系统辨识的应用范围越来越广,已成为各门学科数学建模的现代工程方法,特别是对于复杂系统仿真、分散控制、自适应控制等,系统辨识更是不可缺少的技术手段。在提出和解决一个辨识问题时,明确最终模型的使用目的是至关重要的。它对模型结构、输入信号和等

价准则的选择都有很大的影响。

(1) 系统仿真。为了研究不同输入下系统的输出情况,最直接的方法是对系统本身进行实验。需要建立系统的数学模型,利用模型模仿真实系统的特性或行为,有了模型,就可以在计算机上对系统进行仿真研究,实验各种不同的策略,观测其结果,从而分析和制定策略。系统仿真是系统研究的重要手段。在工程实践中,一个大工程的研制过程,从设计、试制、实验到定型的全过程中,系统仿真是贯彻始终的重要研究手段。系统仿真可用于优选设计参数、预测系统性能、复现系统故障、节省实物实验次数,从而大大节省系统的研制经费,缩短研制周期,提高产品质量。在一些系统实验中,可能难以采用实物进行实验,这时通过其数学模型就可以模拟真实系统的行为,达到快速、定量、简便的研究目的。例如,导弹飞行过程中受到空气动力学的影响,然而这一系统无法用实物实现,可采用风洞试验获得相应数学模型。又如生物甲烷化过程,这一生物反应过程很慢,但通过其数学模型在计算机上可以很快地得到仿真结果。

(2) 系统预测。不论在自然科学还是在社会科学领域,往往需要研究系统未来发展演变的规律和趋势。掌握了系统的演变规律和趋势,才可能预先做出决策,采取措施,控制系统中有关的变量。例如,启动或停闭某些机组,或者当预测到可能超越安全极限时采取紧急保护措施等。科学的定量预测大多采用模型法,首先建立所预测系统的数学模型,根据模型对系统中某些变量的未来状态进行预测。根据系统过去运行中的实测数据,建立反映系统本质属性的数学模型,可以用来预测系统的未来行为。建立预测模型主要是依据预测误差最小的原则。一般来说,一个好的预测模型,其预测误差较小,且对模型的结构和参数很少有其他要求,常常用一个线性函数去预测未来的输出,甚至当系统是时变的和非线性的,只要以适当方式对预测模型的系数加以不断修正,就可能获得很好的预测效果。例如,最常见的气象预报、洪水预报、工程系统中的状态预测、股票市场价格预测、环境污染状况预测、飞行轨道预测等许多方面都使用了预报技术。

(3) 系统设计和控制。在工程设计中,必须掌握系统中所包括的所有部件的特性或者子系统的特性。一项完善的设计,必须使系统各部件的特性与系统总体设计要求(如产量指标、误差、稳定性、安全性和可靠性等)相适应。为此,在设计中必须分析、考察系统各部分的特性以及各部分之间的相互作用和它们对总体系统特性的影响。显然,只有掌握了各部件和子系统的主要特征,建立了相应的数学模型,才能为系统的分析和设计提供基础,才可能根据系统特性设计控制器,按一定目标进行优化控制和系统决策。对于经典控制,已知数学模型可以改善系统的动态特性,进行调节器的参数整定等。对现代控制系统,有了数学模型,可以进行最优控制、自适应控制等。要对一个系统设计控制器,就需要知道系统的传递函数或状态方程,这可通过建模和辨识获得。通过系统的状态和环境参数的变化,自动调节控制器的相应参数,以达到最佳的控制效果,即达到自适应控制的目的。例如工业炼钢上炉温的自适应控制、导弹飞行时轨道的自适应控制、大型舰船航行的自适应控制、造纸过程的自适应控制等。