

● 高等学校教材

系统建模和参数估计 ——理论与算法

吴旭光 编著



机械工业出版社
China Machine Press



机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

高等学校教材

系统建模和参数估计 ——理论与算法

吴旭光 编著



机械工业出版社

本书系统地介绍了系统建模的概念、理论与算法。内容包括数学基础知识、基于统计理论的系统建模理论和算法以及系统建模的最新发展技术鲁棒建模等内容，在一定程度上反映了系统建模的最新成果。

本书属于专著性质的教材，因此不但给出了有关系统建模所涉及到的数学背景知识，还比较全面地介绍系统建模的两大研究领域。不但注重基础理论的讲解，也注重工程算法研究。书中的应用实例取自作者的研究成果。

本书可作为工科高等院校控制类专业高年级学生的教材和控制类专业研究生的选修教材，也可作为从事该领域的科技工作者的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

系统建模和参数估计——理论与算法/吴旭光编著. —北京：机械工业出版社，2002.7

高等学校教材

ISBN 7-111-10572-9

I. 系... II. 吴... III. 系统建模—高等学校—教材 IV. N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 049844 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：王保家 版式设计：张世琴 责任校对：李秋荣

封面设计：陈 沛 责任印制：路 琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·15.5 印张·382 千字

0 001—3 000 册

定价：23.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

封面无防伪标均为盗版

前 言

建立数学模型是许多科学研究和工程实践的必须。一个好的数学模型是人们认识系统，进而对系统进行决策的必要条件。“系统辨识”就是利用系统运行或试验的输入-输出数据构造系统的数学模型和估计系统的未知参数理论和方法。由于许多具体的物理对象或工程系统的机理很复杂，而且含有各种噪声，使得建模更加困难，又因为随着技术的发展，对模型的要求越来越高。例如，鲁棒控制，不但希望知道系统的标称模型，而且也希望知道真实系统和标称系统的“误差”。所有这些又反过来影响系统辨识理论和技术的发展，目前已成为一门非常活跃的学科。它也深深地吸引着从事自动控制理论、系统工程等多学科的工程研究的科学家和工程师。

研究系统辨识的方法很多，有众多的理论和算法，各有特点，各有特色，其发展的深度和完善程度也有很大的差别。我们认为，按其发展的历史、使用的数学工具和建模的目的，有以下几种分类：

- (1) 机理建模和实验建模；
- (2) 参数建模和非参数模型；
- (3) 基于统计的辨识和鲁棒辨识。

本书的编排是按照后一种方式处理的，第2章到第7章向读者介绍了基于统计的辨识理论和各算法。这部分是系统辨识的基础，是系统辨识理论发展较为完善的，也是至今系统辨识应用得最成功、最广泛的，是建模工程师必须学习的内容。

本书的第8章到第14章介绍了鲁棒辨识理论和算法。统计辨识是在系统噪声和测量噪声为概率统计前提下研究系统的建模问题，它给出的是体现模型不确定性的软误差界，因此，这种辨识算法得出的模型是不适合鲁棒控制的，而始于20世纪90年代初的鲁棒辨识理论，从一开始就强调以控制作为系统辨识的最终目的，考虑在最差情况下如何得到系统的名义模型和估计模型不确定性误差上界。在鲁棒辨识中，系统噪声以某种范数形式表示，模型不确定性的描述与鲁棒控制理论相一致，故又称为“适合控制的辨识”。

本书的出版正是为了向读者介绍系统辨识的这两大潮流。这是一本专著性质的教材。多年来，作者在西北工业大学自动化专业的本科生、研究生中讲授了这些内容，效果良好。书中不但给出了丰富的基础理论和各类算法，也包括了作者多年来的理论研究和工程应用的成果，因此书中给出的实例、图表和曲线对工程应用有较大的参考价值。

众所周知，系统辨识研究的领域很宽，尤其是派生出的各类算法甚多，并均有引人注目的理论成果和应用实例。尤其是本书涉及的不确定性系统鲁棒建模，其发展也是近十几年的事，国内外的许多学者在该领域做了大量的工作，我们不可能在本书做全面的介绍。但我们在书中附了大量的参考文献，尤其是鲁棒辨识方面的文献，有志在该领域做深入研究的读者可参考。

本书可供工科院校控制类专业的学生作为教材使用。作为本科生教材，可安排40学时，选学以下内容：

第1章；第2章的2.1~2.4，第3章，第4章，第5章，第6章，第7章的7.1~7.3，第8章的8.1和8.2。

作为研究生教材，可安排40学时，根据学生的实际情况，除补修本科生有关内容和选学第2~7章中的部分内容外，还可根据学时数选学以下内容：

第9章的9.1~9.3、9.5和9.6，第10章的10.1、10.3，第11章的11.2、11.3和11.4，第12章中的12.1~12.3，第13章的13.2~13.4，第14章。

多年来，作者获得国家自然科学基金、国防科工委预研基础研究、航空工业总公司科学基金、船舶工业总公司预研基础研究的资助，在系统建模领域做了大量的理论和研究工作。本书反映了我们的部分研究成果。

在本书的写作过程中，得到了许多老师和同行的指导和支持，在此表示感谢。作者也对所引用的许多参考文献的作者表示感谢。同时还得到作者的研究生的大力帮助，杨益军博士、石峰博士、范训礼博士、庞莉硕士、王晓利硕士的论文都参与了该领域的研究，他们为本书做了大量的工作，在此深表谢意。范训礼博士参与了本书部分工作。

在本书出版过程中，船舶重工集团七零五研究所研究员关国枢对文稿进行了非常认真、仔细地审阅，提出了许多具体的、非常中肯的修改意见，在此也表示衷心的感谢。

由于作者的水平有限，再加上所涉及的鲁棒辨识内容较新，国内外尚无可供参考的教材和专著，因此书中难免有不少缺点，甚至错误。对此，作者希望起到抛砖引玉，引起同行对该领域的关注，并竭诚欢迎广大读者批评指正。

吴旭光

2002年于西北工业大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 系统与模型	1
1.2 系统辨识的定义	2
1.3 系统辨识的理论与技术	3
1.4 系统辨识的应用	7
1.5 本书的编排	8
第 2 章 非参数模型辨识	10
2.1 随机过程的基本概念及其数学描述	10
2.2 辨识系统的相关分析法	15
2.3 伪随机二位式序列产生的方法及其性质	20
2.4 用伪随机二位式序列辨识系统	24
2.5 谱分析法	32
2.6 小结	40
第 3 章 最小二乘参数辨识	41
3.1 引言	41
3.2 最小二乘法	41
3.3 最小二乘参数估计的递推算法	46
3.4 辅助变量法	49
3.5 广义最小二乘法	51
3.6 小结	52
第 4 章 极大似然法与预报误差法	54
4.1 引言	54
4.2 极大似然参数辨识	54
4.3 预报误差参数辨识方法	64
4.4 小结	69
第 5 章 动力学系统参数辨识	70
5.1 引言	70
5.2 状态估计和卡尔曼滤波算法	70
5.3 极大似然辨识算法	73
5.4 水下自主航行器动力学参数辨识	78
5.5 极大似然迭代辨识算法	82
5.6 极大似然递推辨识算法	86
5.7 单纯形寻优法	90
5.8 增广的广义卡尔曼滤波算法	91
5.9 小结	93
第 6 章 数据预处理及相容性检验	94

6.1	前言	94
6.2	数据处理的理论基础	94
6.3	数据预处理	98
6.4	数据相容性检验和数据重建	103
6.5	数据相容性检验应用实例	106
6.6	测量数据含有异常值时的鲁棒辨识问题	107
6.7	小结	111
第 7 章	辨识技术及应用	112
7.1	闭环系统可辨识的条件	112
7.2	递归算法的收敛性	115
7.3	模型的确认与验证	118
7.4	递推辨识算法在故障检测中的应用	121
7.5	小结	125
第 8 章	鲁棒建模方法与发展	126
8.1	鲁棒辨识的发展和研究现状	126
8.2	Hardy 空间和算子范数	130
8.3	Nehari 问题和插值逼近问题	133
8.4	线性矩阵不等式	140
第 9 章	基于频域数据的 H_∞ 鲁棒辨识	143
9.1	引言	143
9.2	H_∞ 辨识问题的描述	143
9.3	非线性两步算法	146
9.4	窗函数与非线性两步算法的关系	148
9.5	线性算法	151
9.6	仿真算例	155
9.7	小结	158
第 10 章	基于时域数据的鲁棒辨识	160
10.1	引言	160
10.2	问题描述	160
10.3	基于时域数据的鲁棒辨识算法	162
10.4	最优误差界估计—— μ 分析法	168
10.5	基于 l_1 范数的时域数据鲁棒辨识	172
10.6	小结	177
第 11 章	基于时域/频域混合数据的鲁棒辨识	178
11.1	引言	178
11.2	问题描述	178
11.3	作为 Nudelman 问题形式的混合数据插值问题	179
11.4	基于混合数据的鲁棒辨识插值算法	182
11.5	混合数据鲁棒辨识的凸规划算法	190
11.6	小结	197
第 12 章	连续时间系统 H_∞ 辨识	198
12.1	简介	198

12.2 问题描述和定义	198
12.3 连续系统的 H_∞ 辨识算法	199
12.4 水下自主航行器系统辨识仿真算例	202
第 13 章 面向鲁棒控制的模型验证	205
13.1 引言	205
13.2 问题描述	205
13.3 预备知识	207
13.4 非结构不确定性模型验证	209
13.5 结构不确定性模型验证	212
13.6 闭环系统的模型验证	218
13.7 小结	220
第 14 章 鲁棒辨识的相关问题和应用技术	221
14.1 集员辨识方法	221
14.2 鲁棒辨识与鲁棒控制的结合	224
14.3 实验数据的获取	228
14.4 鲁棒辨识理论在水下自主航行器系统中的应用	231
参考文献	237

第 1 章 绪 论

1.1 系统与模型

系统就是一些具有特定功能的、相互间以一定规律联系着的物体组成的一个总体。显然，系统是一个广泛的概念，毫无疑问，它在现代科学研究和工程实践中扮演着重要的角色。不同领域的问题均可以用系统的框架来解决。但究竟一个系统是由什么构成的，如何描述，这取决于观测者的观点。例如，这个系统可以是一个由一些电子部件组成的放大器，或者是一个可能包括该放大器在内的控制回路，或者是一个有许多这样回路的化学处理装置，或者是一些装置组成的一个工厂，或者是一些工厂的联合作业形成的系统，而世界经济就是这个系统的环境。

一个系统可能非常复杂，也可能很简单，因此很难给“系统”下一个确切的定义。但无论什么系统，它一般应具有四个重要的性质，即整体性、相关性、有序性和动态性。建立系统概念的目的在于深入认识并掌握系统的运动规律，不仅能定性地了解系统，还要定量地分析、综合系统，以便能更准确地、有效地解决工程、现代社会和自然界中种种复杂的问题。

著名学者 P. 艾克霍夫在其论著 [1] 的首页指出：观察与测量是自然科学与工程技术中的普遍意图，根据观察，科学家对他所研究的问题有了透彻的物理认识，并从这种认识出发，通过反复推敲建立起一种理论，这个理论就成为关于他所研究的自然现象的一种设想概念。在这一概念指导下，他再设计一种新的实验，通过观测这些实验的结果或者证实这一理论，或者确定其某种修改，或者完全否定这一理论。因此，即使一个概念可能是美妙的，并且对科学家具有魅力，但在理论与实验的这种相互作用中，事实的结果却是起决定作用的。为此，可以肯定地说，在自然科学与工程技术领域中，实验与观察是最根本的。

和观察相比几乎具有同等重要性的是关于建立模型的思想，事实上它们之间也很难分开。有系统地阐述一种理论可以理所当然地称之为“模型建立”。

所谓模型就是把关于系统的本质部分信息，抽象成有用的描述形式，因此抽象是建模的基础。数学在建模中扮演着十分重要的角色，马克思说过：“一种科学只有在成功地运用数学时，才算达到完善的地步”。例如，集合的概念是建立在抽象的基础上的，共同的基础使集合论对于建模过程非常有用。这样，数学模型可以看成是由一个集合构造的。

数学模型的应用无论是在纯科学领域还是在实际工程领域中都有着广泛的应用，但通常认为一个数学模型有两个主要的用途：首先，数学模型可以帮助人们不断加深对实际物理系统的认识，并且启发人们去进行可以获得满意结果的实验；其次，数学模型有助于提高人们对实际系统的决策和干预能力。

在建立一个数学模型时，需要建立几个抽象概念，即定义几个集合。最基本的有：输入、输出、和状态变量的集合。同时，这些变量具有数值化的值。再进一步，在这些抽象的基础上，可建立复合的集合结构，特别是要定义它们的函数关系。根据这些函数关系的特征，可将数学模型分类为：线性、非线性、时变、定常、连续、离散、集中参数、分布参数、确定、

不确定等。

一个数学模型最终是为应用服务的，因此，模型的抽象必须与真实系统和研究目的相联系。由此可提出一个基本公理：存在一个十分复杂的数学模型，它可以详细而精确地描述系统。根据这个公理，可不断地把细节增加到原抽象中去，以达到抽象逼近真实系统。这个过程称为具体化。即：使抽象不断地变的具体。

在建模方法学中，还有一个基本假设：整个世界被研究的过程、被建模的目标，当它们用于某种特殊目的时，至少是“部分可分解”的。可分解的系统允许从系统中取得任何一部分，而不影响其他部分。例如，对大多数航行器的运动，均可在一定范围内将其分解为水平面和纵平面运动。所以，“部分可分解”对系统的分析和建模有着明显的用途。

根据上述的公理和假设，很明显地可以看出，虽然数学模型可为许多目的服务，但如果认为一个特殊的描述对所有研究都适用，那将是十分愚蠢和可笑的。这种情况在定量分析过于繁琐，数学上的严格性过于精确时可能会发生，因此必须注意建模的代价问题。

1.2 系统辨识的定义

系统辨识是研究建立数学模型的一种技术，是系统建模中的实验建模阶段。由于系统建模的发展和复杂性，其定义也有不同。

1962年 L. A. Zadeh 在早期曾给辨识下过这样的定义：“辨识就是在输入和输出数据的基础上，从一组给定的模型中，确定一个与所测系统等价的模型。”该定义明确了辨识的三大要素：① 输入输出数据；② 模型类；③ 等价准则。其中，数据是辨识的基础，准则是辨识的优化目标，模型类是寻找模型的范围。按照 Zadeh 的定义，寻找一个与实际过程完全等价的模型无疑是困难的，从实用观点看，对数学模型的要求并非如此苛刻。

P. 艾克霍夫给辨识下的定义是：“辨识问题可以归结为用一个模型表示客观系统（或将要构造的系统）本质特征的一种演示，并用这个模型把对客观系统的理解表示成有用的形式。”这个定义强调了一个非常重要的概念，最终的模型只应表示动态系统的本质特征，并且把它表示成适当的形式，而不一定是该系统实际结构的一个描述。而这个适当的形式可以是概念的、物理的或数学的。这个定义强调了适合于应用的特点。

L. Ljung 肯定了真实系统与数学模型是两种不同的东西。我们必须对数学模型采取实用观点，他对辨识是这样定义的：“辨识有三要素：数据、模型类和准则。辨识就是按照一个准则在一组模型集中选择一个与数据拟合得最好的模型”。与 Zadeh 的定义不同之点，这个定义仅要求模型能“最好”地与数据拟合，而不是与实际系统等价，而由此带来的问题是模型验证方法的不同。

总之，系统辨识就是通过测量系统在外作用下的系统响应数据，按照确定的辨识准则和建模的目的，利用优化技术，寻求最能反映系统本质属性的数学模型。显然，这是一个优化近似问题，近似的程度取决于对系统先验知识的认识深化程度和对数据集的了解和处理，以及所选用的辨识算法。图 1-2-1 是 L. Ljung 给出的系统辨识的示意图。

辨识通常带有对于物理系统毫无所知的含义，但上一小节我们提到过，对绝大多数工程系统和科学研究对象，我们至少对过程的物理结构和其环境知识有或多或少的了解。在这种情况下，待辨识的系统不是“黑箱”而是“灰箱”，由此我们在建模时就有可能采取更有效的算法，以减小计算工作量，降低建模费用。

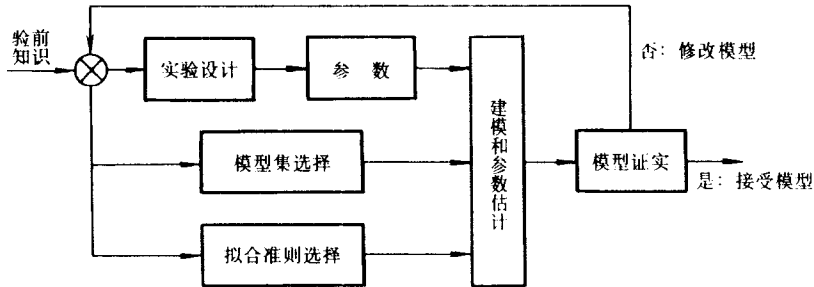


图 1-2-1 系统辨识的环节

1.3 系统辨识的理论与技术

对系统建模理论产生兴趣，不仅仅是由于需要提高系统的性能（控制）或增加对动力学系统的认识（仿真），而且也反映出相关学科的发展与需求。例如，社会系统、生物系统和其它高精工程系统的需求是系统辨识理论得以发展的动力，泛函分析、代数理论、微分几何、优化理论等数学的引入给系统辨识理论注入新的内涵，而现代计算机硬件与软件的发展使系统辨识理论应用发生急剧变化成为可能。

1.3.1 系统辨识和参数估计

辨识方法包括非参数模型辨识方法和参数模型辨识方法。非参数模型辨识方法获得的模型是非参数模型，例如系统的脉冲响应、阶跃响应、系统的频率响应等。它在假定过程是线性的前提下，不必事先确定模型的具体结构，因而可以用于比较复杂的系统建模。参数模型辨识方法必须假定一种模型结构，通过极小化模型与过程之间的误差准则函数来确定模型的参数。如果模型的结构事先无法确定，则必须利用结构辨识方法先确定模型的结构，再进一步辨识模型的参数，即参数估计，这类辨识算法常用的有三种不同的方法。

第一种称为最小二乘法：利用最小二乘法原理，通过极小化广义误差函数的平方和函数来确定模型的参数。

第二种称为梯度校正法：利用最速下降法原理，沿着误差准则函数关于模型参数的负梯度方向，逐步修改模型的参数估计值，直至误差准则函数达到最小值，其中常用的方法是随机逼近法。

第三种称为极大似然法：根据极大似然原理，通过极大化似然函数来确定模型的参数。

系统的数学模型（以下简称“模型”），可以有各种不同的表达方法。在经典的控制理论中，线性过程的动态特性通常用以下形式来表示：

- 传递函数 $G(s)$
- 频率响应 $G(j\omega)$
- 脉冲响应 $g(t)$
- 阶跃响应 $h(t)$

这里，我们把模型分成两大类，非参数模型和参数模型。例如，脉冲响应、频率响应、阶跃响应称为非参数模型；传递函数、状态方程、差分方程则称为参数模型。非参数模型，其表现形式是以时间或频率为自变量的实验曲线；而非参数模型经过适当的数学处理，又可以转变成参数模型，例如我们常用的传递函数形式。在现代控制理论中（modern control），经

常采用的数学模型还有状态空间形式；而在后现代控制理论 (post-modern control) 中经常使用的模型还有传递函数矩阵和线性分式变换 (LFT, Linear Fractional Transformations)。

参数估计有较多的理论和不同的结构，它们的主要内容是解决估计准则和估计算法两个问题，常用的准则有最小二乘法、极大似然、最小方差和鲁棒建模中的泛函数极小化准则等。估计算法常分为两类：一类是迭代算法，属于离线算法；另一类是递推算法，是一种实时在线估计算法。

由于依据脉冲响应可以方便地得到阶跃响应和频率响应，因此，脉冲响应在经典控制理论中起着重要的作用。不仅如此，在现代控制理论及系统辨识中，它也扮演着重要的角色，一方面它本身就是描述动态系统的非参数模型，另一方面还可以依据它进而得到参数模型；此外，它还是验证模型合适与否的重要依据。

通常情况下，系统辨识的内容主要包括五个方面：

(1) 准备阶段，这一步的目的是为执行辨识任务提供尽可能多的信息，为此要从各方面了解系统。此时获得的信息称为“验前信息”。

(2) 实验设计，获得充分包含系统信息的输入输出数据。

(3) 模型结构辨识，若已掌握足够多的先验信息，则可直接确定模型的结构。

(4) 模型参数辨识。

(5) 模型检验，检验辨识所获得的模型是否反应了原系统的特性。

等价性经常是用一个判据，即用一个误差函数或损失函数来定义。这个判据是系统输出 y 和模型输出 y_m 的一个泛函，即

$$e = e(y, y_m) \quad (1-1)$$

用统计方法来处理判据 (1-1) 的参数估计方法称为传统方法，有别于鲁棒辨识方法。

经常用的统计辨识算法有：最小二乘、马尔科夫、极大似然和贝叶斯算法。这些算法所要用的过程原始知识依次增加。对最小二乘算法，不需要系统噪声的任何假定。而马尔科夫算法需要噪声的协方差矩阵知识。对于极大似然算法，需要知道噪声随机过程采样值的概率密度函数。而贝叶斯算法需要未知参数的先验概率密度函数的知识以及误差所付出的代价知识。因此从贝叶斯算法出发，如果实际可利用的先验知识较少，其他估计算法可作为其特殊情况推导出来。

一种参数估计算法，本身也可以看成是一种过程。无论从数学还是从控制论的观点，对它的基本要求是：

稳定：算法必须是稳定的，必要的话，对某些先验知识应是鲁棒的；

精确：所得到的结果，必须满足研究的目的；

收敛：算法必须是收敛的，并有一个满意的收敛速度。

因此可以看出，一个辨识算法的选择受许多考虑所支配。同样，评价一个辨识算法的好坏，除以上定性的条件外，在基于统计辨识中，工程师还更乐意使用以下指标对算法作定量地分析：

无偏性；

均方误差；

有效性；

一致性；

充分性。

无论是基于统计的辨识还是鲁棒辨识,均有许多不同的算法。一旦我们掌握了辨识理论,实际应用中如何根据不同的对象和建模的不同目的去选择合适的辨识算法的确不是一件容易的事,它需要大量的实际经验和一定的“技艺”。但任何一个可以被工程实践所接受的算法最好满足下列要求:

- 数学上易于处理;
- 技术上易于实现的;
- 可以被广泛地应用;
- 能够给出一个最优估计值;
- 代价是可以接受的。

1.3.2 鲁棒辨识理论和发展

系统建模与控制器设计有着密切的关系,早在1977年,P. Eykhoff就指出,“辨识与自动控制直接有关的应用中,存在的难题是估计方法如何与控制问题配合^[1]”。基于以鲁棒控制为最终目的的系统建模和以辨识理论体系相一致的鲁棒控制器设计已得到了越来越多的学者关注。辨识与控制之间的配合问题的联系纽带是系统模型,而模型的数学描述是建模的目的,是鲁棒控制器设计的条件。只有真正解决了辨识与控制之间的配合问题,才能使状态空间控制理论在实际系统中得到更广泛、更有效的应用。在过去的几十年间,无论是单变量频域理论、状态空间理论还是多变量频域理论,辨识与控制的研究均是在各自的领域内独立进行,真正认识这一问题的本质及其重要性还只是近几年的事,可以认为辨识与控制的配合是控制理论研究中的一个新的挑战。此外,一体化的设计也符合拟人控制的哲学思想。

人们认识和分析客观世界的能力决定了系统的不确定性是普遍存在的,而相对于任何一种不确定性水平的系统,总存在着一种控制策略使得该系统的某项性能指标达到最优。在现有的各种控制策略中,大多数是基于模型的(model-based)。尤其对于鲁棒控制,它不仅要求知道描述系统动态特性的名义模型,而且必须知道系统不确定性的量化边界。传统的统计辨识是在系统噪声概率统计假设前提下研究系统的建模问题^[2],它给出的是体现模型不确定性的软误差边界(soft error bound),因此这种辨识算法所提供的模型是不适合鲁棒控制的。集员辨识是建立在统计辨识基础上的,但对系统噪声的假设基于UBBE,即噪声未知但有界。由于集员辨识在不确定性估计上较为保守,其误差的描述形式与现有的控制系统设计结合较差,因此在控制系统设计中尚未得到很好的应用。始于20世纪90年代初的鲁棒辨识(robust identification)理论^[3],从一开始就强调以控制作为系统辨识的最终目的。它以一个全新的角度研究稳定的线性时不变系统(LTI)的辨识问题,考虑在最差情况下如何得到系统的名义模型及估计模型的不确定性误差上界。在鲁棒辨识中,系统噪声以某种范数形式表示,模型不确定性的描述与鲁棒控制理论相一致,故又称为“适合控制的辨识”(control-oriented identification)。

与传统的统计辨识及集员辨识相比,鲁棒辨识在建模理论和算法,模型的有效性检验和模型验证算法上有较大的差别,这主要在于:

(1) 对待辨识系统的描述不同。统计辨识是假设系统噪声特性可以用概率密度函数描述,但实际上,系统噪声,尤其是系统的不确定性是不可以测量的,即使可以测量,有限的数据也很难证明其假设的正确性。而一旦假设不成立,辨识的收敛性及误差界也就失去意义。鲁

棒辨识是一种基于系统噪声非概率假设下,特别是 UBBE 假设下的系统辨识方法,这与鲁棒控制中系统外界干扰是范数有界信号相一致的。

(2) 辨识算法不同。传统的统计辨识及集员辨识算法是以最小二乘方法为框架,模型或名义模型具有固定的结构和阶次,是一种线性算法。鲁棒辨识将问题定义在范函空间中,将算法转化为凸空间的优化问题,是一种非线性算法。事实上,在存在噪声情况下,不存在任何具有鲁棒收敛性的线性算法。同时,鲁棒辨识也是一类非参数辨识问题,无需模型结构及阶次的假设。

(3) 描述辨识误差的收敛性不同。统计辨识给出的误差界是软误差边界,如 Cramer-Rao 界。而鲁棒辨识给出的误差界为硬误差界,这一点与鲁棒控制是接轨的。并且其误差范数界是随着噪声的衰减和采样数目的增大而趋于零。

(4) 模型验证的方法不同。模型验证是系统建模与控制器设计中非常重要的一步,由于统计辨识强调模型对真实系统的再现,其模型验证着重于系统残差序列的检验,并且至今一直采用 Cramer-Rao 界作为衡量的标准。而鲁棒辨识的模型验证则根据鲁棒控制理论中不确定性的数学描述,分为结构不确定性和非结构不确定性的有效性分析,经验证为有效的模型可直接为鲁棒控制器设计服务。

由以上几点可以看出,鲁棒辨识是一种真正适合控制的辨识方法。在近几年间,许多学者在此领域作了大量的研究,发表了许多论文,从 20 世纪 90 年代起,每届全美控制年会 (ACC) 及 IEEE 控制与决策会议 (CDC) 都对鲁棒辨识及辨识与控制的配合问题给予了相当的重视,1992 年在美国 Santa Barbara 举行了“控制系统的不确定性系统建模”的专题讨论会^[12],另外许多控制学科的刊物也分别出版了研究此类问题的专刊 [13、14、15]。

同鲁棒辨识相比,鲁棒控制理论的研究更加吸引控制界的学者,不但有大量的文献,而且有很成功的应用实例,在此不再叙述。值得重视的是,由于凸规划内点多项式算法的发展^[4],使得利用计算机求解高阶线性矩阵不等式 (Linear Matrix Inequalities, LMI) 成为可能,促使 LMI 在控制理论得以应用成为可能,LMI 在控制系统分析、设计中扮演着越来越重要的角色。具有统一标准、统一解法的鲁棒控制器分析、设计的规范形式正在形成。

1.3.3 辨识的内容与技术的实现

鉴于系统辨识在众多学科领域中应用的广泛性和多样性,因此对于辨识算法的技术实现不可能给出一般的规划,但对大多数的应用来说,系统辨识的内容主要包括四个方面:

- (1) 实验设计: 获得充分包括系统信息的输入输出数据。
- (2) 模型结构辨识: 根据物理知识,选择模型的结构。
- (3) 参数估计: 根据准则,使参数与能得到的数据相适配。
- (4) 模型验证: 检验辨识模型是否描述了系统的主要特征。

值得建模工程师和领域工程师注意的是:以上过程并非是开环进行的,而是根据实际需要反复进行的。首先关键的问题是模型结构的选取,主要是根据系统的先验知识和应用模型的目的来选择的。建模者应认识这个问题的重要性和困难性。因为有时即使在一个很窄的应用领域里,要找寻一个合适的模型也可能是一个非常困难的事。而其重要性是因为这个选择对估计方案的最终成败是决定性的。

对于初级建模者,常常认为参数估计带有对于系统毫无所知、白手起家的含义,或在着手进行参数估计时优选对先验知识要求最少的估计方案。而一个建模老手则喜欢将更多的系统先验知识加入估计方案。

模型的检验与核实是和估计密切相关的。在紧接着估计步骤之后，应该调查这个模型实际上“解释”系统行为到了什么样的程度。但遗憾的是，模型的验证和校验是一个重要而又未很好解决的问题。目前常用的方法有：

- 比较实际系统与模型的输出之间的残差；
- 将任一组数据拟和的模型，在其他各组数据上进行检验，选出在这种交叉检验中适应性较好的模型。

理论计算、缩尺模型试验和实物试验（物理仿真）各有其局限性，不可偏信任一方，只有三大手段较为一致的综合分析结果才是可信的结果。

1.4 系统辨识的应用

几十年的应用表明：系统辨识和参数估计的用途已经越出控制工程的范围。P. Eykhoff 列出的图 1-4-1 指出与系统辨识有关联的一些理论，也指出其某些应用领域。在每种应用中估计的目的都是必须事先明确的，因为这个目的决定所需要的精度和可允许的尝试。

系统辨识技术为科学和工程中的问题提供了有利的工具，它的价值已为各种领域中多方面的应用所证实。即使某领域的技术已相当成熟，但对建模技术的要求不是偏低反而是越来越高。控制技术中的自适应控制和鲁棒控制是最典型的例子。

当然，系统辨识技术能成功地应用关键是获得可靠的数据和对所使用的模型结构特征有良好的了解。有几个原因造成在某些实际应用中无法得到合适的数据。首先，是过程的时间尺度太慢，使得必要的充分信息数据太少。第二，是由于系统本身的性质决定不能随意支配系统的输入。第三个原因是很差的信噪比，使得可辨识性不能得到保证。最后是系统可能存在不可测量的扰动，它不满足平稳随机过程的假定。显而易见，一个值得研究的课题是：在明确的条件下，就可能获得有关参数和状态向量的信息量讲，如果能指出其辨识精度的最大极限，那将是极为有用的。

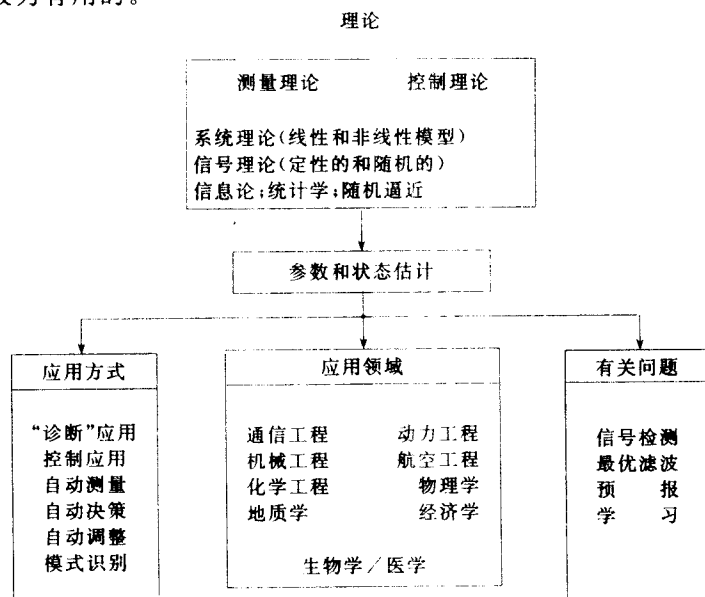
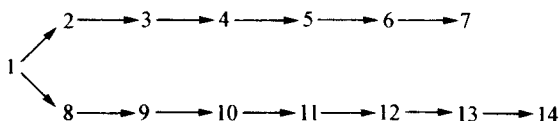


图 1-4-1 参数辨识理论与应用

1.5 本书的编排

全书共分 14 章, 作者在对本书各章节的编排中尽量做到相互独立, 但不同章节的组合又可成为一定的体系, 其关系如下:



具体结构安排如下, 可供读者学习时参考:

第 1 章介绍了基于统计建模中必须用到的随机过程方面的理论, 包括随机过程的基本概念及其数学描述、线性过程在随机输入下的响应、点估计理论、相关函数和谱密度的估计、白噪声及其产生方法等。

第 2 章到第 7 章篇介绍了基于统计理论的系统辨识。该部分是系统建模重要组成, 也是系统建模理论发展的最为成熟的部分, 并在实际理论研究成果最多的, 在工程实际中应用的最广泛和最成熟的。该部分内容也是控制类本科生应具备的基础理论知识。

第 2 章讨论了线性系统非参数模型辨识, 包括辨识系统的相关分析法、线性系统的脉冲响应辨识法、伪随机二位式序列产生的方法、性质和用伪随机二位式序列辨识系统、谱分析法。

第 3 章是基于最小二乘的系统参数辨识方法。我们介绍了最小二乘问题的提法和基本计算公式、最小二乘估计的几何意义和统计性质、最小二乘参数估计的递推算法、数据饱和现象、辅助变量法和广义最小二乘法。

第 4 章极大似然法与预报误差法, 内容有极大似然原理、差分方程参数的极大似然估计、极大似然估计统计性质、预报误差参数辨识方法等。

在第 5 章我们介绍了辨识技术在动力学系统参数辨识中的应用, 本章给出了大量的具有实际应用意义的算法, 包括卡尔曼滤波基本公式、非线性连续-离散系统的卡尔曼滤波、极大似然辨识算法、非线性动力系统极大似然算法。本章还结合航行器动力学模型研究了航行器模型参数的极大似然迭代辨识算法、极大似然递推辨识算法和基于单纯形寻优法辨识算法。

测试数据预处理是系统辨识的第一步, 可靠的数据是辨识成功的关键, 这部分内容是第 6 章的主题。它包括数据处理的理论基础。数据预处理技术有: 野值的识别与补正、传感器安装位置校正、低通滤波、数据加密、据平滑和微分平滑等。数据相容性检验和数据重建。测量数据含有异常值时的鲁棒辨识问题。

第 7 章我们给出了涉及辨识技术的研究课题, 基于系统辨识的应用方法。包括闭环系统能辨识的条件、递归算法的收敛性、模型的确认与验证、递推辨识算法在故障检测中的应用、水下自主航行器建模软件包 TMSP。

鲁棒辨识是 20 世纪 90 年代才提出的对不确定系统的建模, 由于其坚实的理论基础和明显的应用背景, 使其发展很快, 但又因为它需要应用者具有深广的数学知识和其繁琐的计算又极大地妨碍了它的应用。我们在第 8 章到第 13 章向读者详细地介绍了鲁棒辨识的理论和算法。由于鲁棒辨识的思想和算法与基于统计的辨识大不一样, 因此这部分内容不但有很大的新颖性, 但也有很深的难度。读者在初学时, 可以暂时略去许多定理的证明和算法的推导, 但

要掌握鲁棒辨识的精髓，不但要掌握除本书以外的许多数学内容，也必须认真学习本篇的各章节。

第8章对系统辨识理论的发展概况进行了综述，在分析鲁棒辨识和模型验证的理论及其应用的发展现状及存在问题的基础上，确立了这部分的研究内容及意义。

第9章基于系统频域数据，对 H_∞ 鲁棒辨识问题进行了描述，并对其中一些相关问题进行了说明；深入研究了Hanning窗函数形式的两步非线性算法的鲁棒收敛性；并对相应的辨识模型在最差情况下的误差界进行了估计。

第10章基于系统时域数据，介绍了LMI理论、Caratheodory-Fejer插值算法及有关概念的定义，为后续章节的理论分析奠定基础；深入研究了利用 μ 分析法估计不确定性系统的辨识模型的最优误差界的理论及算法。

第11章深入研究了基于时域/频域混合实验数据的鲁棒辨识理论及算法。利用作为一类Nudelman问题形式的混合数据插值定理，提出并证明了系统的时域和频域实验数据与系统和噪声的先验信息一致的充分必要条件，然后构造了插值算法以得到辨识模型集合；为了降低插值算法的复杂性，在一定程度上避免因数据量大所引起的计算问题，基于 n -宽度函数逼近理论，提出了一种基于凸规划的混合数据鲁棒辨识算法；分别对插值算法和凸规划算法的辨识模型在最差情况下的误差界进行了估计，所得到的误差界，均比基于时域或基于频域数据的鲁棒辨识算法的误差界更紧，并且证明了这两种算法均是收敛的。

第12章考虑 H_∞ 辨识在连续系统中的应用，即将两步算法推广到一类线性时不变连续系统 $H_{\infty,M}(\phi)$ ，又给出类似于离散系统的 H_∞ 辨识方法。辨识算法可以得到被建模系统的一个标称模型和误差上界，并且不需要知道未知系统的阶次。算法适合于一类稳定的、严格正则的、线性时不变连续系统。

第13章基于时域/频域混合数据，以LFT不确定性模型为对象，研究了结构不确定性模型的模型验证问题；通过将不确定性模型验证问题转化为一类混合数据插值问题，证明了结构不确定性LFT模型为局部有效的必要条件；研究了当系统模型的不确定性为互质因子形式时的模型验证问题；在系统频率响应数据满足正切Nevanlinna-Pick边界插值条件时，提出了将混合数据的模型验证问题分解为两个相对独立的检验过程进行；另外，进一步研究了闭环系统的模型验证问题，从而将模型验证的有关结论推广到一类开环不稳定系统。

第14章针对某型水下自主航行器，将本篇所提出的鲁棒辨识算法应用于其航向系统模型的建立，对辨识模型的在最差情况下的误差界进行了估计，并对水下自主航行器偏航角 ψ 的辨识模型及其在最差情况下的误差上界进行了验证，为水下自主航行器控制系统模型的建立探索一条新的途径。本章还指出进一步的研究工作方向。