

# 系 统 辨 识

参数和状态估计

P. 艾克霍夫 著

潘科炎 张永光 朱宝璋 李蕴芝 孔繁爵 译

科 学 出 版 社

1980

## 内 容 简 介

本书是有关系统辨识的综述性专著。书中系统地介绍了与系统辨识有关的信号、动态过程模型、概率论、统计理论和最优化理论等方面的基础知识；着重介绍了不同类型的估计方法以及它们之间的关系；还介绍了参数与状态的组合估计法和估计方法的应用实例。书中还给出了大量有关参考文献。

本书可供从事这一领域的高等院校教师、研究生、工程技术人员以及自然和社会科学研究工作者参考。

Pieter Eykhoff

### SYSTEM IDENTIFICATION PARAMETER AND STATE ESTIMATION

John Wiley & Sons, 1977

## 系 统 辨 识

### 参数和状态估计

P. 艾克霍夫 著

潘科炎 张永光 朱宝琮 李蕴芝 孔繁镛 译

\*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1980 年 12 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

1980 年 12 月第一次印刷 印张：25

印数：0001—2,870 字数：575,000

统一书号：15031·305

本社书号：1874·15—8

定价：3.80 元

## 译 者 的 话

人们在社会实践中，对所研究和控制的对象是通过测量和计算来判明其内在结构和参数的，这就是辨识问题。人们对客观事物的认识是逐步由感性认识上升到理性认识，这就需要对事物之全体的、本质的、内部的联系用定量的数学模型描述。一般说来，这个模型只能按其输入输出特性近似于所研究的对象。近似的程度随着认识的进一步深化和测量数据的积累而逐步提高。辨识理论之所以得到发展，一方面是由于人类在认识自然界、生产实践和社会经济活动中的需要；另一方面也是由于现代计算工具的发展使得很多研究成果便于推广使用，从而进一步推动了辨识理论的发展。当前，辨识理论已经发展成为近代系统理论中的一个重要分支，它不仅有一定的理论意义，而且还具有很实际的意义。

近年来，由于辨识理论的应用日益渗透到工程系统、生物医学系统、经济系统等方面，因此，有关系统参数和状态辨识的文献和专著数量急剧增加。但文献资料分散在各种杂志和专题讨论会会刊中。艾克霍夫教授所著的这本综述性专著，统一地、系统地论述了与参数和状态估计有关的问题。书中每一章末尾均附有大量参考文献和补充文献，便于读者对某些专题进行更深入的研究。

系统辨识近年来在国内也比较受到重视，有些高等院校和科研单位在理论上和应用上也进行了一些工作，取得了一些成果。我们希望这本书的翻译出版，将进一步推动这一学科研究工作的发展。

本书的翻译工作由中国科学院自动化研究所李蕴芝、孔繁镛（1, 2, 3, 4, 5章），中国科学院系统科学研究所张永光（6, 7, 8, 10, 13章）和北京控制工程研究所朱宝璋（9, 11章）、潘科炎（12, 14章和附录）等同志担任。中国科学院自动化研究所童世璜和姜启明同志分别对本书译稿的某些章节进行了校对。北京控制工程研究所杨嘉墀所长对译稿进行了审订。谨此致谢。

1979年6月

# 原 序

近些年来,在许多论文中,在一些学术会议上,以及在几种大学教程里,都对系统参数和系统状态估计许多方面的问题进行了讨论。对这一学科的兴趣,显然有着极不相同的根源:

从事制造工业的工程师,要求对具体的控制对象有更好的了解,用以改进控制手段,从而降低生产费用或提高工作效率。

对高性能的空气动力飞行器和宇宙飞船的研究,以及经常碰到的对诸如铁路客车和水翼艇这类更多的地面系统的研究。

对处于跟踪动作状态下以及处于其他形式的控制或学习过程中的人的研究。

对生物系统的探讨,例如对诸如瞳孔控制系统、四肢(手臂和腿)控制和心率控制系统等这类神经和肌肉系统的探讨。

对估计理论产生兴趣,不仅由于需要提高系统性能(或增加系统动力学知识),而且也反映了现代计算机硬件和软件的出现带来了估计理论应用发生急剧变化的可能性。当我们开始讨论具体的估计算法时,是显然需要有这类计算设备的。

以上所述对估计理论的兴趣都来源于“工程科学”这一总的领域。但是,从事于社会活动的某一局部或其整体的动态模型(计量经济学模型)研究的计量经济学家和统计学家,对估计理论也有着相当大的兴趣与积极性,其兴趣所在与前者不大相同。他们的工作和工程科学偶尔起到互相渗透的作用,并且目前正处在发展一种既适用于社会科学类型系统,又适用于自然科学类型系统的一般数学理论的高潮之中。这一发展的直接结果是出版了大量书刊,在这些书刊中,有些着重于指出某一特殊类型的方法,有些则描述了对某个专题的研究。在本书中,我们力图根据比较广泛的观点有条理地对估计问题进行了整理。撰写本书时,对从事各类动态系统——生产过程、飞机、生物对象、经济的和其他类型的模型——的科学家和工程师的意见,都作了适当的考虑。

鉴于本书主题性质,必然要涉及到统计学,系统动力学,随机信号,模拟、数字和混合仿真以及最优化等问题。某些课题的论述由于篇幅所限,读者可参阅大量的有关文献从中得到补充。

这里就本书的编排提出一些意见是适合的。认真地思考一下本书的论题,我们就可对编排方案提出各种合理的区分,例如

应用类型;

统计学基础:最小二乘估计、马尔可夫估计、极大似然估计、贝叶斯估计;

模型对于参数的线性和非线性(应该注意到这和对于动态特性的线性不相同);

信号表示:采样的和非采样的;

技术实现:模拟的、数字的、混合的;

方法类型:开环估计法和闭环估计法。

为使读者参考方便和强调这一领域的连贯性,我们作了如下编排:

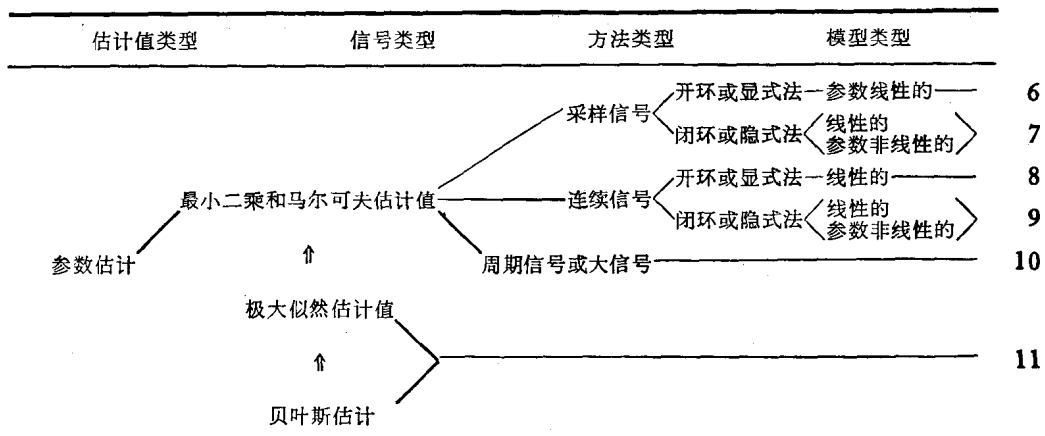
**引言和基本方法**这两章用作阐明解决估计问题最主要的方法。

1,2

**绪论**部分概述了所需知识,读者将获得有关信号、动态系统(过程)以及概率论、统计学理论和最优化理论等课题的一部分最精华的知识。

3,4,5

**参数估计**部分是按照下列方式进行组织的:



这是一种从简单到复杂、特殊到一般的表达方式。尽管在许多研究论文中有着相反的趋势,但我们认为工科学生和科研工作者在初学入门时更愿意接受归纳法推理,即使他们认为演绎法有很大的优点和价值。因此,在本书题材的组织编排中,教学方面的内容占了很大的比重。我们期望读者将会从这一侧重中加深理解所讨论的问题,并对一些可能的应用有一个明确的看法。

第五章介绍了不同类型估计方法之间的关系。

在可采用频率域变换法的几章中,讨论了频谱分析法。

如果在所研究的系统中,不仅需要确定其参数,而且还需要确定其(状态)时间函数,则估计任务将更为复杂。在第四章中回顾了用“状态变量”描述系统特性的方法。

在**参数和状态同时估计**这一部分,首先回顾了状态估计问题。这里,我们选用了演绎法,因为我们认为读者在此以前已经接触过这一问题,或者从参数估计问题的类比中,可以不难找到解决问题的途径。下一章专门讨论了参数与状态的组合估计法。

在本书最后的**应用**一章中,谈到了一些具体的估计实例,这些实例已在控制、自动工业测量、生物学系统以及学习或模型识别问题等文献中讨论过。

撰写本书时,也考虑了一些可能使用本书的读者,例如大学毕业的工程师或科研工作者、研究生或大学讲师。就阅读本书内容所需基础知识而言,有如下一些必备知识就足够了。

大学毕业水平的数学基础(高等微积分、微分方程、复变函数理论,以及熟悉一些线性代数和矩阵理论);参看附录 C;

具备一些反馈控制理论的基础知识;

懂得一些概率论、初等统计学和随机信号理论,其主要基础知识概述于附录 B 中;

懂得一些数字计算机和模拟计算机技术。

为便于查阅和定义符号,在附录中概述了一部分必要的基础知识,在附录 A 中给出了本书所使用的符号目录。

在讲授一门课程时,都非常希望学生能通过完成一些简单的习题加深其阅读课文的理解能力。由于在这一领域中只有一些极其简单的例子可用手算外,都需借助于计算机,因而完成这些习题在极大程度上将取决于现有的计算机设备和子程序。故本书不想把这类问题考虑在内,但任何讲授这门课程的人是不会感到难以提出这类问题和“提示”的。

在组织原稿过程中,对是否需把估计方法的数字计算机程序包括在内,是难以作出决定的。通用语言 (Fortran, Algol, PLI 等)和“专用语言”的选择,特殊子程序的可用性,外部设备的类型和存储容量,新的估计方法的发展速度,本书的篇幅等,所有这些方面都需在作出这个决定时加以权衡。权衡结果,没有把这类程序包括在内,而是强烈建议可能使用本书的读者,和提出过适合于某种特殊类型应用的计算机程序的作者建立联系。书中给出了大量参考文献。

有关辨识和估计方面的大量资料,可在下列一些专业讨论会的预印本和会议录中找到:

第一次 IFAC 讨论会——自动控制系统中的辨识,布拉格,(1967);预印本(两卷),科学院出版,布拉格。

第二次 IFAC 讨论会——辨识和过程参数估计,布拉格,(1970);预印本(两卷),科学院出版,布拉格。

第三次 IFAC 讨论会——辨识和系统参数估计,海牙/德尔夫特,(1973);会议录(两卷),北荷兰出版公司出版,阿姆斯特丹。

在 IFAC 代表大会的报告中还有大量的参考文献:

第一届 IFAC 代表大会,莫斯科,(1960);“自动控制与远距离控制”会议录(四卷),Butterworths 出版社出版,伦敦,1961。

第二届 IFAC 代表大会,巴塞尔,(1963);“自动控制与远距离控制”会议录(两卷),由 Butterworths 出版社(伦敦)和 Oldenbourg 出版社(慕尼黑)出版,1964。

第三届 IFAC 代表大会,伦敦,(1966);“自动控制与远距离控制III”会议录(四卷),机械工程学会出版,伦敦。

第四届 IFAC 代表大会,华沙,(1969);预印本(50卷),Naczelna Organizacja Technicza 出版,波兰华沙。

第五届 IFAC 代表大会,巴黎,(1972);预印本,美国仪器协会出版,美国宾夕法尼亚州匹兹堡。

除定期文献外,由美国自动控制委员会主办的自动控制联合会议(JACC)和许多其他会议的预印本,也是很有价值的参考资料。

# 目 录

<b>第一章 模型建立、参数和状态估计</b> .....	1
1.1 模型 .....	1
1.2 模型建立 .....	4
1.3 结构、参数与状态 .....	5
1.4 问题的表示方法 .....	7
1.5 正常运行条件 .....	10
1.6 某些应用领域 .....	12
1.6.1 估计用于“诊断”.....	13
1.6.2 估计用于控制.....	14
1.6.3 估计用于自动(工业)测量.....	15
1.6.4 估计用于自动(工业)决策.....	15
1.6.5 估计用于自动(工业)调整.....	15
1.6.6 模式识别.....	16
1.7 广阔的前景 .....	17
1.8 结束语 .....	17
<b>第二章 解决问题的统计方法和工程方法</b> .....	20
2.1 问题的几个基本方面 .....	20
2.1.1 过程输入信号.....	20
2.1.2 关于过程的先验知识.....	20
2.1.3 估计方案.....	21
2.2 技术实现的分类 .....	21
2.3 统计方法的分类 .....	23
2.3.1 最小二乘估计.....	26
2.3.2 马尔可夫或广义最小二乘估计.....	26
2.3.3 极大似然估计.....	26
2.3.4 极小风险估计.....	27
2.4 模型调整法 .....	27
2.4.1 “奇函数”和“偶函数”误差.....	27
2.4.2 求偏导数或梯度的方法.....	30
2.5 参数与状态估计 .....	33
2.6 结束语 .....	33
<b>绪 论</b>	
<b>第三章 确定性信号和随机信号</b> .....	35
3.1 信号分类 .....	35

3.2	正交函数 .....	35
3.3	确定性信号的描述 .....	38
3.4	随机信号的描述 .....	41
3.5	信号处理; 快速傅里叶变换 (FFT) .....	45
3.5.1	离散型傅里叶变换 (DFT) .....	46
3.5.2	快速傅里叶变换 (FFT) .....	46
3.6	结束语 .....	48
<b>第四章</b>	<b>线性、线性时变及非线性过程模型</b> .....	<b>51</b>
4.1	过程模型分类 .....	51
4.2	线性模型 .....	54
4.2.1	确定性连续(非采样)信号 .....	54
4.2.2	确定性采样信号 .....	59
4.2.3	随机信号 .....	61
4.3	时变线性模型 .....	63
4.3.1	输入-输出描述 .....	63
4.3.2	状态空间描述 .....	63
4.4	非线性模型 .....	64
4.4.1	Volterra 表达式 .....	64
4.4.2	其他表示方法 .....	72
4.5	可控性、可观测性、可辨识性 .....	74
4.6	基于这些描述的模型 .....	77
4.6.1	动力学的线性模型与对参数线性的模型 .....	77
4.6.2	线性输入-输出模型 .....	78
4.6.3	线性状态模型的标准型 .....	82
4.6.4	非线性模型 .....	87
4.7	结束语 .....	88
<b>第五章</b>	<b>估计理论、迭代收敛方法及随机逼近</b> .....	<b>95</b>
5.1	估计理论 .....	95
5.1.1	估计器的特性 .....	95
5.1.2	贝叶斯估计器 .....	97
5.1.3	极大似然估计器 .....	99
5.1.4	马尔可夫估计器和最小二乘估计器 .....	100
5.1.5	其他问题 .....	102
5.2	确定性的迭代收敛法 .....	104
5.3	随机收敛法和随机逼近 .....	116
5.4	结束语 .....	121

## 参 数 估 计

<b>第六章</b>	<b>采样信号; 显式法</b> .....	<b>124</b>
6.1	回归分析 .....	124
6.1.1	回归曲线与回归曲面 .....	124



6.1.2	用有限个观测值得到的估计	126
6.1.3	线性无偏估计器	127
6.1.4	最小二乘估计器	129
6.1.5	马尔可夫估计器	130
6.2	“开环”估计方法的技术实现	131
6.2.1	最小二乘估计	132
6.2.2	马尔可夫估计	133
6.2.3	一般的考虑	134
6.3	精度;产生误差的原因	136
6.3.1	噪声造成的误差	136
6.3.2	截断误差	137
6.3.3	状态拟合误差	139
6.3.4	技术实现中的简化造成的误差	140
6.3.5	采样误差	142
6.4	残差,噪声的性质及模型的阶数	142
6.5	对广义模型及有反馈过程的推广	145
6.5.1	广义模型	145
6.5.2	偏差问题	148
6.5.3	带有反馈的过程	152
6.5.4	迭代最小二乘	153
6.5.5	辅助变量法	153
6.5.6	“重合”原理	154
6.5.7	Levin 方法	154
<b>第七章</b>	<b>采样信号;隐式法或模型调整法</b>	<b>158</b>
7.1	关于参数是线性的模型	158
7.1.1	和梯度成比例的校正	159
7.1.2	最小二乘法应用于观测序列	160
7.1.3	最小二乘法应用于单个(或成对的)观测	163
7.1.4	随机逼近	167
7.1.5	压缩映射	167
7.2	对广义模型和状态空间模型的推广	168
7.2.1	逐次线性回归和滤波	168
7.2.2	广义最小二乘(马尔可夫)估计方法	169
7.2.3	增广矩阵法	172
7.2.4	状态空间模型	173
7.3	几种计算方法和结果	174
7.4	关于参数是非线性的模型	189
<b>第八章</b>	<b>连续信号;显式法</b>	<b>194</b>
8.1	关于“模拟”信号的运算	194
8.1.1	相关测量的一般性质	194
8.1.2	正交滤波器的使用	198
8.1.3	相关测量的统计误差	199

8.2	关于量化信号的运算	205
8.2.1	振幅的量化	205
8.2.2	相关器的各种类型	206
8.3	关于二进制信号的运算	208
8.3.1	相关函数	208
8.3.2	使用辅助信号	209
8.4	微分逼近及有关方法	210
8.5	高阶相关函数	214
8.6	弥散函数; 定义与性质	215
<b>第九章</b>	<b>连续信号; 隐式法或模型调整法</b>	<b>225</b>
9.1	对于参数是线性的模型	225
9.1.1	广义误差	225
9.1.2	误差判据选择和信息处理类型	229
9.1.3	动态算子的选择	230
9.2	求瞬时误差的极小值	232
9.2.1	基本方程	232
9.2.2	收敛特性	235
9.2.3	附加噪声的影响	238
9.2.4	仿真、技术实现和应用的举例	238
9.3	求时间平均误差的极小值	239
9.3.1	基本方程	239
9.3.2	收敛特性	241
9.4	参数灵敏度函数	241
9.4.1	参数影响(灵敏度)法	242
9.4.2	灵敏度点法	245
9.4.3	连续的模型调整	248
9.4.4	仿真、技术实现和应用的举例	249
9.4.5	断续的模型调整	249
9.5	同时采用两个模型或重复采用一个模型	252
9.6	采用参数扰动法的模型	252
9.7	结论	254
<b>第十章</b>	<b>周期的或大振幅的测试信号</b>	<b>260</b>
10.1	脉冲信号和阶跃信号	261
10.1.1	附加噪声的影响	261
10.1.2	相关滤波器的使用	263
10.2	正弦测试信号	263
10.2.1	附加噪声的影响	264
10.2.2	其它有关方法	267
10.3	二进制信号	269
10.3.1	$m$ 序列	270
10.3.2	使用 $m$ 序列测试信号时的误差	273

<b>第十一章 贝叶斯估计和极大似然估计</b> .....	281
11.1 贝叶斯估计 .....	281
11.2 极大似然估计 (M. L. E.) .....	286
11.2.1 可达精度 .....	286
11.2.2 一些最重要的特性 .....	289
11.3 一些具体实现方案 .....	290
11.4 有关过程-输入信号的要求 .....	292

## 参数和状态的组合估计

<b>第十二章 过程的状态估计(简评)</b> .....	296
12.1 维纳滤波问题 .....	296
12.2 卡尔曼-布西(Kalman-Bucy)滤波器 .....	298
12.2.1 单级滤波器 .....	299
12.2.2 多级滤波器 .....	301
12.3 前景、应用和实例 .....	304
<b>第十三章 参数与状态的估计</b> .....	313
13.1 问题的非线性实质 .....	313
13.2 误差函数的导出 .....	315
13.3 误差函数的极小化 .....	318
13.4 几种算法 .....	319
13.4.1 拟线性化法 .....	320
13.4.2 不变嵌入法 .....	321
13.5 结束语 .....	324

## 应    用

<b>第十四章 不同领域的应用综述</b> .....	327
14.1 自动控制 .....	327
14.1.1 最优控制;分离假设 .....	327
14.1.2 自寻最优系统和自适应系统 .....	328
14.2 物理过程/机械过程/化学过程 .....	331
14.3 核反应堆 .....	332
14.4 发电厂和电力分配系统 .....	332
14.5 远距离通信 .....	333
14.6 航空飞行器和空间飞行器 .....	333
14.7 生物学研究对象 .....	334
14.8 社会经济系统 .....	339
14.9 学习系统和模式识别 .....	339

<b>附录 A 本书所使用的符号表</b> .....	352
-----------------------------	-----

附录 B 概率论和随机信号概念提要 .....	357
附录 C 矩阵运算提要 .....	367
附录 D 相关测量的统计平均值和方差的瞬变过程 .....	373
中英名词对照索引 .....	378

# 第一章 模型建立、参数和状态估计

## 1.1 模 型

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的概念。在这一概念指导下，他再设计一些新的实验，通过观测这些实验的结果或者证实这一理论、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性作用的。为此，就可以肯定地说，在自然科学与工程技术领域中，实验与观察（测量）是最根本的。

和观察与测量相比几乎具有同等重要的是关于建立模型（Rosenblueth 和 Wiener, 1945）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（作为对所研究的自然现象的一种设想的概念）可以理所当然地称之为“模型建立”；这种理论也就可以看作是现实的一个语言或数学的模型。在这里，我们将定义模型为一个现有系统（或一个准备建立的系统）本质方面的表达，它以可用的形式提供关于该系统的知识。

在此定义中，可以用更一般的方法去解释“系统”，例如可以把系统看成是安排有序的对象组合，从某种意义上说，这种组合是受目的或目标所支配。凡不属于该“系统”的一切事物属于环境部分。凭借系统与其环境间所划定的界限，我们可以用输入/输出关系来表征这个系统。但究竟一个系统是由什么构成的，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。

关于模型的定义所涉及的范围可以用如下的几点看法来阐明。

模型可以模拟或仿照该系统的行为而不必是该系统实际结构的一个描述。正如人们可以制作一个受控的假手而不用了解人是怎么利用他的四肢一样。而模型制造者的技巧就是用象“可裂变性”、“自旋因子”等略具炼金术的一些性质来隐蔽掉系统的一些不能解释的影响。

模型可以是概念的、物理的或数学的（也依次称为现象逻辑的、经验的和解析的），这取决于：（1）判断什么是对于特定目的的本质方面；（2）可供使用的建立模型的方法；（3）可得到的知识的质和量。在天体力学中可以找到一个明显而又为大家熟知的模型发展例子。摆线运动的托勒玫模型可作为观测行星运动的一个完全适用的概念模型。哥白尼模型把一些观测记载解释为由于地球（观测者）和被观测的行星两者运动的一种结果，可以作为物理模型。而开普勒定律则提供了一个数学模型，这个模型给出了数字预报的可能性。从读者的自身经验中，将可列举出不同领域中所引用的其他模型。

模型间的另一种区别可以用硬件（仪器和设备）和软件（数学公式、计算机程序）来表

示。

必须为之建立模型的对象可以是一个被设计的系统或者是一个现有的系统。对于工程师来说,在过程设计阶段模型的重要性是不言而喻的,不必再作进一步的强调。而对于科研工作者来说,模型还可为进一步实验提供指南。

了解到的东西应该以可用的形式表达出来。因为模型必须提供进一步决策的背景,因此“可用性”也是一个重要方面。如果模型太复杂,它的可用性就成问题了。相对的简单性是模型构成中的一个主要特点。换句话说,一个模型反映客观现实,在复杂程度上有所简化。在许多情况下,为了使模型是有用的,在模型的复杂程度与现实的复杂程度之间必须保持一定的关系(例如对生物系统)。

在人类所观测的许多领域中都可以找到模型,其中包括物理学、生物学、天文学、工程技术、经济学、社会学和心理学。这本书的主要注意力集中在工程技术领域,虽然所介绍的一些估计方法也可以或正在用于所提到的其他领域。在工程技术中,按模型的目的或用途不同可以区分如下:

**研究** 人们希望这种模型给出对有关知识或一些测量结果的某种解释;不必事先明确其近期用途,但对加深理解从而有一个简明的阐述是具有头等重要意义的(诊断状态)。此模型必须为进一步研究提供线索。

**设计** 与设计准则(稳定性、误差判据、经济效益和固有可靠性等等)相适应,模型中必须表示出所要使用的部件或子系统的有关知识。就这点来说,由于更高的要求或更经济的性能需要,一个现有系统的改进也必须看作是设计的一部分。本质上设计是在回路中有设计者参加的一个反馈作用。

**控制** 对系统的各种控制作用取决于有关该系统的知识。对此,可以分为以下几种情况:

(a) 正常运行条件,例如反馈或前馈控制,静态最优、动态最优、适应控制、批量控制等形式。显然,在一个“难办的”动态系统的可用性和可以取得的控制手段之间存在着密切的关系。

(b) 事故的情况,例如局部损坏,这时控制作用取决于关于故障类型和程度的信息。

(c) 启停的情况,这时程序表的某些步骤可由系统变量或参数的数值决定。

在(自动)控制系统大量应用中,试图分析其共同特点,是(工程)科学家面临的实际任务。

首先,在工程技术中存在着人造控制系统的宽广范围:从最简单形式的开关控制直到工业过程中复杂的计算机控制系统;此外,社会中也存在有各种控制机构(如法律的强制手段),生命系统中也有许多控制回路。对于这样一类名目繁多的系统,只能期望有一个不严谨的概念去指出隐含于各类控制应用中的共同因素。可以称这样一个概念为“不确定性”。

从瓦特调节器的著名应用开始,显而易见的是,在无数情况下采用某种反馈机构可以作为克服这些不确定性的有效办法。这些不确定性可以是环境对系统不可预测的影响(扰动)后果,或者可能起源于被考虑系统的内部(如磨损、老化、催化剂的中毒作用等等)。简单的反馈可以减低不确定性的影响,或者至少可以把由不确定性引起的对系统重要参量的不利影响转移到非重要参量上。当然,这并不是万能的灵丹妙药,对于这个办法的采

用也存在着一些限制。有些限制是出现在参数发生很大变化的情况下；这可以导致使用自适应控制原则。另一种限制出现在当要求某一经济判据最优化时，从而导致使用最优或自寻最优化系统。

在设计普通控制时，所需要的关于过程行为的知识限于两方面：一是考虑稳定性所需要的(可能)颇为不精确的数据；二是为估价由于应用反馈而可能带来的改善所需要的数据，即负载和干扰的性质、对控制变量的约束等等。从全部控制理论的历史中已知，设计一个系统所需要的关于系统及其环境的全部知识很少是现成的。即使支配系统的方程在原则上已知时，也经常发生缺少个别参数知识的情况；同时所提供的模型也往往过于复杂。这些情况自然在许多其他领域中也存在。但是，在自动控制中出现的辨识问题总是存在以下两个事实：

为了得到所缺乏的知识，经常可能要在系统上进行一些实验；

辨识的目的是去设计一个控制对策。

在经典控制理论中，频率响应法之所以取得巨大成功的重要因素之一，就是由于这个设计方法伴随有一个对系统辨识而言十分有效的技术方法——频率分析法。这个方法使得精确地确定传递函数成为可能，并且这正是应用基于对数图的综合方法所需要的。除少数例外，在现代控制理论中，所用的是以状态方程表示的参数模型。对于控制工程师们来讲，根据实验数据来确定这类模型的愿望自然地更新了他们对参数估计及其有关技术的兴趣。

对参数变化大的系统(导致自适应控制)和对“经济”判据严的系统(导致最优或自寻最优化系统)，往往明确要求取得系统参数与状态变量的及时而比较精确的信息。因此，过程辨识、模型建立和参数估计的必要性就显而易见了。我们可以把这样一个过程作为一个著名的黑盒子来探讨，所谓黑盒子，亦即具备有一个或更多的“输入”和“输出”而不知其内部结构的一个(子)系统。但是在大多数工程情况下，黑盒子的方法并不是一个非常符合实际的方法。因为在许多情况下，实验者从对所考虑过程物理本质的理解中已经得出了某种先验知识。这个先验知识可以给出关于该过程的一个概念模型结构的信息，甚至很可能就是该模型中系数(参数)值的一个近似知识。因此这个盒子或多或少是灰色的或半透明的。甚至于我们知道我们想要考虑的是一个分馏塔而不是登月飞船这个事实也意味着是一个先验知识(Pavlik)。

通过回答下列问题可以提供表征问题的某些形式：

希望建立一个什么样的模型——是静态的(如为了静态过程最佳化)，还是动态的(如为了动态过程最佳化)？是完全非线性的，还是线性化的？回答这个问题隐含着关于所希望的精度、模型的复杂性、数学或统计方法等等方面的线索。

是应该用笔和纸从一些基本定律和某些孤立的实验出发，在离线的条件下去组成一个模型；还是允许我们对实际过程作实验，在线的条件下去组成呢？

必须注意到什么样的预算考虑？

随之而来的问题将越来越多、越加难办，我们将只提下面几个：

怎样判定模型的质量？

所有有关知识是如何被结合在一起的？

为获得所缺少的知识，其最优对策是什么？

如何处理非线性?

如何能用一个简单的模型去近似一个复杂的系统?

对这些问题的回答与具体对象紧密相关,某些一般的考虑将于第四章中给出。

## 1.2 模型建立

在许多情况下,模型的建立是从把基本的物理定律(牛顿定律、麦克斯韦定律、基尔霍夫定律、质量平衡、能/热平衡、冲量平衡、熵平衡等)应用于正在研究的过程(如一个机械的、电的或一个热力学过程)时开始的。从这些定律中得出所研究的变量间的一些关系,例如常微分或偏微分方程/差分方程。这些就是“势”(内涵量)与“流”(外延量)之间的一些关系,如:

	势	流
仅为时间函数	温 度 差 浓 度 差 电 位 差	热 流 质 量 流 电 流
时间与空间函数	温 度 梯 度 浓 度 梯 度 电 位 梯 度	(向量) 热流密度 (向量) 质量流密度 (向量) 电流密度

如果我们对系统所有的外部条件和内部条件都是定量地已知的,同时如果我们关于系统的物理知识是完备的,那末至少在原则上这些关系中的所有系数(参数)的数值是能够被确定的。这种情况可以在与空间运载工具动力学有关的例子中出现。但是,在地面系统(工程)的应用中,这种情况却是十分少见的。我们的先验知识是有限的。这是因为环境因素的不确定性,也因为过程内部物理方面的知识不完备。

即使我们对于有关过程中每一“基本单元”,物理效应的知识是完全掌握的,然而讨厌的维数问题仍可能迫使我们采用把过程看成是一个整体的简化描述。这可能意味着就模型参数和状态而言,先验计算的作用是不大的。由于这个理由,就必须依靠(过程)辨识与估计。因此,模型的建立包含下列步骤:

- 根据物理的知识选择模型的结构;
- 使参数与能得到的数据相适配(估计);
- 模型的检验与核实(诊断检查);
- 按预定目的去应用模型。

鉴于广泛的学科领域和应用的多样性,对于这些步骤不能给出一般的规则。模型的结构是根据关于系统的原始(先验)知识和它的目的选择的。实际上,即使在一个很窄的应用领域里,要找到一个合适的模型也可能是一个非常困难的问题。

这本书的主要重点是放在估计方面。使用“估计”这个词是由于在几乎所有现实的情况下,对所研究的系统的观测总是混有随机影响(干扰、误差)的。因此我们必须使用统计方法。以便滤掉干扰的影响,从测量中得到一个最好的结果。

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。为此目的,可以这样来设想:对系统与模



型作用以相同的输入信号,并研究两个输出信号差(误差或残差)的幅度和特征。

对于既定目的模型应用也和具体对象密切相关。

工业过程中,上述步骤的某些例子读者可以参阅 Eykhoff, Van der Grinten, Kwakernaak 和 Veltman (1966) 的文章。其他领域中的一些例子可在十四章提到的文献中找到。对于模型结构选择、参数适配、诊断检查和应用(如预报)的另一简要说明请参看 Box 和 Jenkins (1969, 1970) 的文章。

### 1.3 结构、参数与状态

在系统分析中,一个中心问题是根据输入时间函数和系统特性确定输出信号。而本书所要讨论的问题则往往表达成为系统分析的逆问题,即给定一个输入与输出时间函数,确定描述系统行为的(微分)方程。

Zadeh (1962) 把辨识定义为:根据输入与输出来确定指定的一类系统中的一个系统,这个系统应和所试验的系统相等价。使用 Zadeh 定义时必须指定某一类系统  $\mathcal{S} = \{S\}$ 、某一类输入信号  $\mathcal{U}$  和等价的意义。下面我们将简称“所试验的系统”为过程而  $\mathcal{S}$  的元素为模型。等价性经常是用一个判据即一个误差或损失函数来定义的。这个判据是过程输出  $y$  和模型输出  $y_M$  的一个泛函,即

$$E = E(y, y_M)$$

两个模型  $M_1$  和  $M_2$ , 如果它们的损失函数值相同,即

$$E(y, y_{M_1}) = E(y, y_{M_2})$$

那末就可以说它们是等价的。

阐述问题有很大的自由度,这个自由度在有关辨识问题的文献中都有所反映。过程的先验知识和辨识的目的对于选配哪一类模型  $\mathcal{S}$ 、哪一类输入信号  $\mathcal{U}$  和判据都有很大的影响。必须看到,一个模型将提供三种类型的知识,即

用数学恒等式、方块图、流程图和联络矩阵表示的结构;

参数值,即一些与输入无关的量或独立变量;

因变量(状态)的瞬时值或时间函数。

对结构的重要性不能作过分的强调。它的选择要适于模型的应用方式,并且这个选择对估计方案的最终成败可能是决定性的。

辨识通常带有对于过程毫无所知、白手起家的含意。但前面曾经提到过,在大多数工程技术和若干生物学问题中,这并不是一个现实的假设;从过程的构成情况和至少是对过程运行的局部了解中,某些先验知识,例如模型结构将是得到的。在这种情况下,需要获得的知识就简化为去求一些参数(支配其过程动态特性的微分方程系数、过程的线性或非线性模型的系数等等)的数值和/或一些状态变量的数值。因此,辨识问题也就被简化为(过程)参数和/或状态估计的问题了。

假设过程模型的结构已知,参数估计就被定义为支配其动态特性和/或非线性行为的参数值的实验确定。应该指出,在结构与参数知识之间的并联特性,不是一目了然的。从一个参数值  $\beta \neq 0$  到  $\beta = 0$  的变化可以表示其结构的一种简化,犹如模型中对应的那个分支被删掉了。另一方面,也很清楚,用这种方法不能给模型“增添”什么;选择了某种