

高等学校教材

# 系统辨识

状态模型、差分模型的统一辨识理论和方法

韩光文



华中理工大学出版社

794  
1112

# 系 统 辨 识

状态模型和差分模型的统一辨识理论和方法

韩 光 文

华中理工大学出版社

**系 统 辨 识**  
状态模型和差分模型的  
统一辨识理论和方法

韩 光 文  
责任编辑 殷伯明

华中理工大学出版社出版发行  
(武昌喻家山)  
新华书店湖北发行所经销  
湖北省石首市第二印刷厂印刷

开本, 787×1092 1/32 印张, 10.125 字数, 217 000

1988年7月第1版 1992年9月第2次印刷

印数, 5 001—7 000

ISBN 7-5609-0151-4/TP·16

定价: 4.95元

**(鄂)新登字第10号**

## 内 容 简 介

本书以离散、线性、定常系统为研究对象，介绍了系统辨识的基本概念、理论和方法，并提出了描述系统的状态模型和差分模型的统一辨识理论和方法。理论分析和实践结果均表明，统一辨识方法不仅是一种较好的辨识方法，而且还将系统辨识中的难点之一的状态模型的辨识难度，降低到与差分模型的辨识难度大体相当的水平。除介绍常用的辨识方法外，本书的讨论还表明：只需用简单的最小二乘法，就能完成最一般的随机状态模型和随机差分模型的辨识。

本书读者应具备线性代数、概率论和随机过程的基础知识和线性系统的专业知识。本书读者对象为从事动态系统建模的工程技术人员及高等学校有关专业的高年级学生、研究生及教师。

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

## 序

任何系统的设计、分析、综合和控制，以及对其未来行为的预测，都需要知道该系统的动态特性。因此，建立描述系统动态特性的数学模型（以下简称模型），及论述建立模型的理论和方法，即所谓系统辨识，就成了自动控制系统的基础理论和工程实践的组成部分之一。

随着系统论、控制论和信息论应用范围的扩大，系统辨识的应用领域亦随之扩大。现在，在社会学、经济学、环境科学、水文学、生物学和医学等众多学科领域里，都在利用系统辨识来建立模型，进行卓有成效的定量研究。

模型可以是线性的或非线性的，连续的或离散的，时变的或非时变的，确定的或随机的等等。因此，要一般地回答模型的选择问题（例如选择什么样的模型？什么样的模型合用？）是不容易的。然而对线性时不变系统来说，这些问题却是不难回答的，因为从理论上，描述这样系统的参数模型和非参数模型现在已经很好地建立起来了；从实际观点来看，用线性时不变模型，通常已能足够准确地描述非线性时变系统。尤其当系统参数和信号相比变化缓慢、系统又在正常工作状态附近变化时，这种线性时不变的假设是有效的，从而使系统辨识的复杂性大大地简化了。

本书反映了韩光文同志多年来的研究成果，集中讨论了离散随机系统的辨识理论和方法，这种系统辨识算法能方便地在计算机上予以实现。事实上，许多实际系统本质上就是离散

的，例如，社会经济系统的数据，多以季度为周期取样，而人口系统的数据，则以一年为周期取样。不仅如此，描述系统的离散形式还可以变换成连续形式。因此，离散系统的辨识，在理论上发展得最成熟，在实际中应用得也最广泛。

目前，系统辨识领域里的书籍和文献，把状态模型和差分模型的辨识原理和方法，割裂开来分别地予以介绍。韩光文同志在本书中则致力于用最小二乘法研究状态模型和差分模型的统一辨识理论和方法，将参数模型和非参数模型密切而有机地联系起来进行讨论。

全书叙述清楚，立论正确，推导详尽，便于自学。本人乐于为韩光文同志这本专著校阅，并作此序。

张钟俊

于1986年11月

## 前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材1986—1990年编审出版规划，由电子工业部教材编审委员会工科电子类专业编审小组征稿，推荐出版，责任编委秦寿康。

本教材由华中理工大学编著，上海交通大学张钟俊教授主审

本课程的参考学时数分40学时，书中主要以离散、线性、定常系统为对象，提出描述这类系统的随机状态模型和随机差分模型的统一辨识理论和方法。围绕此主旨，撰写了六章正文：导论、动态系统统一的辨识理论基础、脉冲响应的相关辨识、线性系统的辨识、线性随机性系统的辨识、系统辨识中的实际问题；同时还编写了两个附录：矩阵论的某些结果、系统辨识中的估计理论。通过正文的论述，从统一辨识理论、最优输入信号、具有高计算效率的一致性辨识算法等方面构成的技术路线，保证了统一辨识方法是一种较好的辨识方法。统一辨识方法具有下述优点：

- (1) 辨识精度高；
- (2) 将系统辨识中的难点——随机状态模型的辨识难度，降低到与随机差分模型的辨识难度大体相当的水平；
- (3) 只需用最小二乘法就能完成随机状态模型和随机差分模型的辨识。

在正文中，还介绍了相关分析法、最小二乘法、辅助变量法、广义最小二乘法、极大似然法、增广矩阵法和随机逼近法



等常用的经典的参数估计方法。以便于读者在处理实际问题时灵活选用。

中国科学院学部委员张钟俊教授为本书提出了许多宝贵的意见，并给予了多方面的关怀和帮助，这里表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编著者

1988年4月22日

电子工业部教材办公室

# 目 录

## 序

## 前言

### 第一章 导论

- § 1.1 引言····· (1)
- § 1.2 建模方法的分类····· (1)
- § 1.3 系统辨识的内容····· (3)
- § 1.4 状态模型和差分模型的统一辨识····· (5)
- § 1.5 本书内容的编排····· (6)

### 第二章 动态系统统一辨识的理论基础

- § 2.1 引言····· (8)
- § 2.2 线性系统的等价性····· (9)
- § 2.3 满足完全能控能观条件的系统结构特征····· (13)
- § 2.4 确定性系统的典范状态表达式····· (17)
- § 2.5 随机性系统的稳态新息表达式····· (23)
- § 2.6 随机性系统的典范状态表达式····· (28)
- § 2.7 随机性系统脉冲传递函数等价的状态表达式····· (30)
- § 2.8 确定性系统的差分表达式····· (36)
- § 2.9 随机性系统的差分表达式····· (40)
- § 2.10 随机性系统有限马尔柯夫参数实现的简例····· (44)
- § 2.11 随机性系统的差分表达式的特例及变形····· (51)
- § 2.12 随机性系统的预报误差表达式····· (57)
- § 2.13 小结····· (59)

### 第三章 脉冲响应的相关辨识

- § 3.1 引言····· (62)

§ 3.2	相关分析法	( 63 )
§ 3.3	伪随机二位式序列产生的方法及其有关性质	( 66 )
§ 3.4	用 $m$ 序例辨识线性系统的脉冲响应	( 80 )
§ 3.5	用逆重复 $m$ 序例辨识线性系统的脉冲响应	( 89 )
§ 3.6	用伪随机二位式序列辨识系统的步骤	( 93 )
§ 3.7	多变量系统脉冲响应的辨识	( 104 )
§ 3.8	小结	( 108 )

#### 第四章 线性系统的辨识

§ 4.1	引言	( 110 )
§ 4.2	最小二乘辨识	( 111 )
§ 4.3	多变量系统的最小二乘辨识	( 119 )
§ 4.4	脉冲响应的最小二乘辨识与相关辨识之间的关系	( 123 )
§ 4.5	最优输入信号	( 126 )
§ 4.6	递推最小二乘辨识	( 133 )
§ 4.7	数据饱和现象及实时辨识	( 138 )
§ 4.8	相关噪声的影响	( 148 )
§ 4.9	线性系统的辅助变量辨识	( 152 )
§ 4.10	阶的确定	( 159 )
§ 4.11	脉冲响应的差分模型和状态模型实现 (一)	( 168 )
§ 4.12	小结	( 179 )

#### 第五章 线性随机性系统的辨识

§ 5.1	引言	( 181 )
§ 5.2	广义最小二乘辨识	( 182 )
§ 5.3	偏倚校正的广义最小二乘辨识	( 190 )
§ 5.4	增广最小二乘辨识 (增广矩阵辨识)	( 194 )
§ 5.5	预报误差辨识与极大似然辨识	( 196 )
§ 5.6	近似递推极大似然辨识	( 212 )
§ 5.7	随机逼近辨识	( 220 )
§ 5.8	离线估值的渐近性质	( 224 )

§ 5.9	递推算法的收敛性	(230)
§ 5.10	多步辨识技术	(236)
§ 5.11	脉冲响应的差分模型和状态模型实现(二)	(238)
§ 5.12	将随机性差分模型转换成随机性状态模型	(240)
§ 5.13	小结	(247)
<b>第六章 系统辨识中的实际问题</b>		
§ 6.1	引言	(248)
§ 6.2	闭环系统的能辨识条件	(248)
§ 6.3	最优输入信号的设计	(253)
§ 6.4	递推次优输入信号的设计	(262)
§ 6.5	数据滤波	(264)
§ 6.6	采样周期及试验长度的选择原则	(266)
§ 6.7	模型验证	(268)
§ 6.8	小结	(269)
<b>附 录</b>		
附录A	矩阵论的某些结果	(270)
附录B	系统辨识中的估计理论	(276)
附录C	全书的主要证明	(288)

# 第一章 导 论

## § 1.1 引 言

系统的数学模型（以下简称模型）是反映系统有关变量之间关系的一组数学描述（代数方程、差分方程、微分方程或几何曲线）。在一般情况下，系统的模型表征了该系统的输入和输出之间的关系。因此，一个模型可以看成是联系系统输入和输出的一种关系，建立数学模型（以下简称建模）就是要确定这种关系。显然，这种关系不是唯一的，建立这种关系的方法也不是唯一的。系统辨识是建立这种关系的一种理论和方法，它是利用系统试验或运行的数据，建立模型和估计参数的理论和方法。当然，建立的模型应有足够的准确度，以便能够根据它对系统的行为做出有意义的解释和推断。

## § 1.2 建模方法的分类

根据对系统的组成、结构尺寸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三类：

### 1. 机理建模

这是一种常用建模方法，它利用各个有关学科领域提出来的物质和能量的守恒性和连续性原理、组成系统的部件的结构尺寸，演绎出描述系统的模型。例如：化学工程师就善于针对化学变化过程，写出其描述化工系统运动的数学方程；电气工

程师就善于针对电路情况，写出其描述电工系统运动的数学方程。利用这种方法建立的模型可以是线性的，非线性的，时变的或分布参数的，模型有很宽的有效范围；通过这样的模型常能得到关于系统行为的深刻理解；这种模型能用于设计新的系统（对于尚在设计中的系统，决定其动态特性的唯一根据，存在于有关学科的基本原理之中）或改造现有系统。这类建模问题有时称为白箱建模的问题。

## 2. 系统辨识（经验建模）

这是一种利用系统的输入和输出数据建模的方法。它属于黑箱建模的问题，属于实际上没有任何可资利用的经验前信息情况的建模问题。在这一领域里，迄今所提出的大多数方法尚属于线性系统的建模范畴。因此，模型的有效范围受到一定的限制。然而，应用这种建模方法所需的建模时间相对地较短，对有关学科的专业知识要求的也较少；所获得模型常常是简单的，是实际系统的一个合适的近似。系统辨识还能提供环境或噪声的动态特性，而这种噪声模型是难以用其它方法建立的。这是系统辨识的突出优点。这类建模也称为黑箱建模。

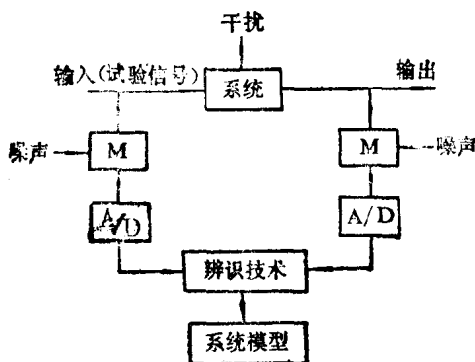
## 3. 机理分析和系统辨识相结合的建模法

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，可能利用系统的运动机理和运行经验确定出模型的结构（状态方程的维或差分方程的阶）或结构的上确界，也可能指出部分参数的大小或可能的取值范围，再根据系统的输入-输出数据由系统辨识来估计和改善模型中的参数，使其精确化。显然，这是一个能充分利用全部可资利用的信息的最有效的建模方法，有时称此为灰箱建模问题。实际上遇到的大多数系统都可以利用这种方法建模。

机理建模只适用于建立比较简单的系统（例如，电学系

统，飞行动力学系统)的模型。对于较复杂的系统(例如，社会学，经济学，环境科学，生物学等领域的系统)，人们对其结构和支配其运动的机理只有很少的了解，或者是很不了解的。这时机理建模法就受到很大限制，于是利用数据建模的方法——系统辨识，便自然地受到人们的普遍重视。现在，系统辨识已发展成一门非常活跃的学科领域。

### § 1.3 系统辨识的内容



M—测量仪器；A/D—模数转换器

图1.3.1

系统模型是一个表示输入和输出关系的数学表达式。为此，可以利用各种输入信号去激励系统，并测量其输出，通常这些输入和输出数据都为噪声所污染，辨识技术就是通过处理这样的数据，而获得模型的。图1.3.1概略地展示了实际系统及其输入-输出数据的采集、转换和辨识直至获得描述系统输入和输出之间关系的模型。

系统辨识的内容包括试验设计、模型结构的确定、参数估

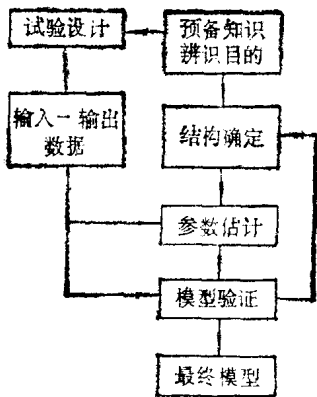


图1.3.2

计和模型验证。图 1.3.2 说明了系统辨识的一般步骤。现将图中的各个步骤简介如下：

### 1. 预备知识和辨识目的

这一步为执行辨识任务提供尽可能多的信息。为此，我们首先应从各个方面尽量地了解待辨识的系统，例如系统的工作过程，运行条件，噪声的强弱及其性质，支配系统行为的机理；其次再在系统上作某些预备性试验以便获得必需的信息。对辨识目的的了解，常能

提供模型类型、模型精度和辨识方法的约束。如果用经典控制理论分析和综合系统，则常要求一个非参数模型(如脉冲响应，频率响应或阶跃响应模型)；如果要用现代控制理论给系统进行二次性能指标下的最优控制、Kalman 滤波，则应选用状态模型；如对系统进行自适应控制，选用差分模型更为合适。状态模型和差分模型是以参数数目和参数值大小的差别来描述具有不同动特性的系统的，故它们属于参数模型。在模型精度方面，自适应控制用的模型可以粗糙些，但为了进行跟踪辨识，要求在自适应控制中用的辨识算法的计算效率要高；对确定性系统以及用于预报的模型精度要求更准确些。

### 2. 试验设计

在这一步中，除选择感兴趣的输入和输出变量外，还需选择合适的试验信号和确定此试验信号参数。

### 3. 输入-输出数据



系统辨识中所利用的数据，可以是外施激励信号作用下的测量值，也可以是系统正常工作时的运行数据。

#### 4. 结构确定和参数估计

对所选择的模型进行结构、纯滞后时间和参数的辨识，使模型对系统产生的数据有最好的拟合精度。在完成这一任务后，可以采用离线或在线的辨识算法。采用离线辨识时，计算机是一次性地成批处理收集到的全部数据；而采用在线辨识时，数据的处理则采用实时的方式，即采用递推算法。

#### 5. 模型验证

描述系统的模型是否辨识得合适，必须进行适当的检验。如果经过检验证实模型符合要求，则整个辨识进程结束；否则，就应修改模型的结构。甚至重新进行试验设计，直至获得满意的模型为止。

### § 1.4 状态模型和差分模型的统一辨识

状态模型和差分模型的统一辨识方法，实质上是一种两步法，即首先辨识系统的非参数模型-脉冲响应阵（马尔柯夫参数）序列，然后再将脉冲响应阵序列实现成状态模型或差分模型。这样的辨识方法有下述优点：

#### 1. 有较高的建模精度

就辨识脉冲响应阵序列而言，不论作用于系统的噪声是白色的还是有色的，伪随机二位式信号( $m$ 序列)是最优的或者是次优的输入信号(后面将有证明)，迄今只有脉冲响应阵序列能从被噪声污染的数据中，以最高的精度、最短的试验时间辨识出来，这点已为大量的事实所证明。所以，以脉冲响应阵序列作桥梁辨识的状态模型和差分模型具有较高的精度，这是一种理