

系统辨识

最小二乘法

[美] 夏天长 著

熊光桦 李芳芸 译



清华大学出版社



031895

系 统 辨 识

最小二乘法

(美) 夏天长 著
熊光楞 李芳芸 译



清华大学出版社

内 容 简 介

系统辨识是一门通过对系统的输入与输出数据的测量与处理从而建立系统模型的技术，它是系统科学中的一个重要分支。

本书以最小二乘法为主，系统地介绍了系统辨识中的有关理论问题及实验方法。它的主要特点是：重点突出，数学处理适度，条理清晰，因此特别适合于工程技术人员自学。

本书共分下列八章：导论、动态系统的描述、最小二乘理论、用最小二乘理论辨识权序列、辨识线性参数模型、用广义最小二乘辨识系统、多步最小二乘辨识技术及非线性系统的辨识。

本书可供从事自动控制、系统工程、信息处理及生物医学等领域内的科技人员阅读，也可作为大专院校有关专业师生的教学参考书。

系 统 辨 识

最小二乘法

(美)夏天长 著

熊光炯 李芳芸 译

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京朝阳区关西庄印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

☆

开本：787×1092 1/32 印张： $5\frac{3}{4}$ 字数124千字

1983年10月第一版 1983年10月第一次印刷

印数：1~25,000

统一书号15235·83 定价：0.80元

GF52/09

译 序

为了分析、研究及控制一个系统，首先要建立起系统的模型。通过对系统输入-输出数据的测量与处理从而建立系统模型的技术就称为系统辨识技术。近些年来，由于生产、科研的需要和计算技术的发展，系统辨识已经成为系统科学的一个重要的分支。

美国加州大学夏天长教授所著的“系统辨识——最小二乘法”一书，虽然只有八万余字，但是却十分精炼地阐明了系统辨识中的有关理论问题及实际方法。另外，该书重点突出，数学处理适度，条理清晰，文字流畅。

清华大学自动化系及中国自动化学会仿真专业委员会举办的第二次全国仿真技术学习班，都曾选用本书作为“系统辨识”课程的教材，并受到了好评。因此，译者将本书推荐给工科院校的大学生和研究生以及在工业企业和医学、生物工程等领域中从事系统分析、研究的技术人员。

谢新民同志对全书作了校审，谨此致谢。由于我们水平有限，译文中有不当之处，敬请读者批评指正。

译 者

目 录

序言	1
第一章 导论	3
1.1 系统辨识问题	3
1.2 系统辨识问题的提法及分类	4
1.3 参数估计的方法	6
1.4 本书的编排	7
参考文献	8
第二章 动态系统的描述	9
2.1 导言	9
2.2 线性差分方程	10
2.3 权序列及卷积	12
2.4 状态变量方程	14
2.5 结论	19
参考文献	19
第三章 最小二乘理论	20
3.1 导言	20
3.2 最小二乘理论	20
3.3 最小二乘估计的统计特征	23
3.4 序贯最小二乘估计	26
3.5 多应变量系统	31

3.6	增加参数数目的递推估计	32
3.7	实时最小二乘算法	35
3.3	结论	37
	参考文献	38
	附录3A极大然似估计	39
	附录3B矩阵求逆公式	40
	参考文献	41
第四章	权函数辨识	42
4.1	导言	42
4.2	辨识问题	43
4.3	最小二乘估计	45
4.4	与互相关辨识的关系	49
4.5	最优输入信号	53
4.6	伪随机二位式序列	56
4.7	在线最小二乘辨识	62
4.8	多变量系统辨识	66
4.9	结论	69
	参考文献	70
	附录4A产生PRBS的计算程序	72
第五章	用最小二乘法辨识线性参数模型	73
5.1	导言	73
5.2	基本辨识问题	74
5.3	最小二乘解	75
5.4	参数估计的统计特性	81
5.5	在线最小二乘辨识	84
5.6	系统阶次的确定	85

5.7	实时辨识	90
5.8	连续系统辨识	95
5.9	结论	100
	参考文献	100
	附录5A 卡尔曼滤波解决系统参数辨识	102
	参考文献	105
第六章	用广义最小二乘法辨识系统	106
6.1	引言	106
6.2	噪声系统模型之公式	106
6.3	相关残差有偏问题	108
6.4	广义最小二乘问题的公式	110
6.5	广义最小二乘估计算法	112
6.6	评论	117
6.7	另一种GLS解技术	123
6.8	辅助变量法	132
6.9	结论	135
	参考文献	136
第七章	多步最小二乘辨识技术	139
7.1	引言	139
7.2	MSLS方法I	140
7.3	MSLS方法II	146
7.4	MSLS方法III	147
7.5	MSLS与GLS算法的比较	152
7.6	结论	155
	参考文献	156
第八章	非线性系统的辨识	158

8.1	引言	158
8.2	Volterra 级数描述及辨识	159
8.3	具有线性参数的非线性差分方程	160
8.4	具有非线性参数的非线性差分方程	162
8.5	Hammerstein模型——GLS 辨识	164
8.6	Hammerstein 模型——MSLS 辨识	168
8.7	结论	172
	参考文献	173

序 言

系统特性的描述和系统辨识在系统工程实践中是个基本的问题。系统描述主要涉及的是建立描述系统输入-输出关系的数学模型。而另一方面，系统辨识涉及的则是从一类模型中选择一个特定的模型，所选的模型在数学上应等价于相应的物理系统。

系统辨识技术的应用超出了工程学及物理学的范围。对于其它许多学科领域内，例如生物学、医学和经济学，利用系统辨识方法建立起定量的模型也是有益的，现在已经出版了有关这方面的几本书。

多年来，系统辨识已提出了各种方法。一般来讲，辨识技术是从最优化理论与估计理论派生而来的。本书与其它大多数书籍相比，各有特点，其它每本书都包括有繁多的方法，而本书的论题则集中于最小二乘法，把它作为解决系统辨识的基本方法。因为最小二乘法是科学工作者在各个领域内经常惯用的经典方法，所以本书可以吸引众多的读者。集中讲述最小二乘法的另一个动机是由于其它通用的辨识方法，如互相关法、极大似然法，卡尔曼滤波法、辅助变量法及随机逼近法都很容易与最小二乘法联系起来。所以《系统辨识》这本书提供了一个基础，使得许多系统辨识的方法均得到某种程度的集中和统一。

全书考虑的只是开环系统，但其基本结果也可以辨识闭环系统。至于系统模型描述的重点则在于输入-输出的特性描述（差分方程和加权序列），而不是状态变量的描述。

在本书中数学处理是适度的，以使尽可能多的广大科学工作者及工程师都可以成为本书的读者。书中所选择的参考文献又可以让有兴趣的读者去作进一步理论上的探讨，所以本书适合于作大学里学习系统工程研究生的教材。

第一章 导 论

1.1 系统辨识问题

系统辨识问题通常是指通过观测系统过程的输入-输出的关系以确定其数学模型。本书主要介绍系统辨识问题的基本理论和解决方法。关于这个问题的一些参考文献列在本章末。

历史上, 由于要求设计一个较好的控制系统, 而提出了系统辨识的问题。在大部分实际系统中(如工业控制过程), 为了设计一个有效的控制方案, 有关系统及其环境的先验信息是很不充分的, 我们常常需要用试验的方法来确定某些重要的物理参数, 如传热系数、化学反应率、阻尼系数等。随着最优和自适应控制理论的发展, 高精度的系统模型就更加需要了。例如, 在自适应系统设计中, 为了保持系统性能在任何时候都是最优, 常常需要修改一个装置及其环境的某些时变参数值。动态系统参数的估计在其它工程上的应用还包括有通讯频道的探测, 系统和故障的测试等等。

其它学科领域也都提出了模型化的要求。例如, 计量经济学工作者长期以来就企图建立起内部生成变量(输出)与外部生成变量(输入)之间的数学关系。将系统辨识技术用

于生理学和生物医学也已取得重大的进展。对于人机系统中人的功能，如瞳孔和肌肉的控制作用、新陈代谢、脑波等，都已获得了十分成功的模型。因而，系统辨识课题正在引起医学和生命科学工作者日益增长的兴趣。在生态学、运输以及社会学等领域，也可以找到模型化应用的问题。此外，现代估计理论和随机计算算法的运用也促进了系统辨识技术的迅速发展。

1.2 系统辨识问题的提法及分类

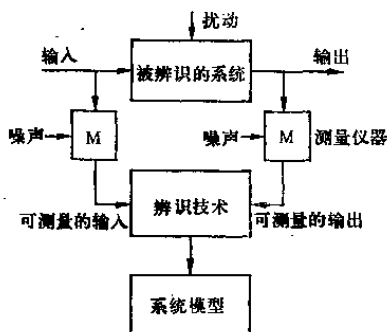


图1—1 系统辨识问题的方块图

图1—1是一个具有输入和输出的系统。我们需寻找的系统模型是一数学表达式，它表示了任何时候输入和输出的关系。为了获得这个模型，我们可以用各种输入信号来测试系统并观测其响应，然后，处理输入—输出数据，获得模型。根

据对系统事先了解的程度，我们将系统辨识问题分成两类。

1. 完全辨识问题：即意味着我们完全不了解系统的任何基本特性，例如是线性还是非线性，无记忆还是有记忆等等。显然，这是一个极难解决的问题。通常要得到任何有意义的解之前，必须对系统作出某种假定，因此这类问题也称之为黑箱问题。

2. 部分辨识问题：在这类问题中系统的某些基本特性，例如线性度、频带宽度等假定是已知的，但是我们不知道动态方程的阶次或有关的系数值，这类问题称之为灰箱问题，当然，它比黑箱问题容易解决。

实际上，我们遇到的大多数工程系统及工业过程都属于后一类。在一般情况下，我们对系统的结构有很多的了解，因此可以推导出系统动力学的特定的数学模型。在这种情况下，只要确定模型方程中一组参数就可以了，从而模型化问题被简化为参数辨识问题。

因为大多数的系统辨识问题可以阐述为、或可以简化为参数辨识问题，因此参数辨识是一个最重要的问题。最近的一些研究工作以及在这个领域中的许多探讨，都是针对这类问题而进行的。

从系统理论的观点来看，精确地测量出输入-输出数据以后，我们就能准确地判断并获得系统模型方程中的未知参数。但是，实际上输入-输出数据要受到噪声的影响，而且模型方程本身也有误差，这就像系统本身有随机干扰一样。所以系统参数的确定，从本质上讲是一个统计问题，即我们要寻求一个特殊的数学模型，它应该能与具有噪声的观测数据相拟合。

实现系统辨识的程序可以分成下面几步：

1. 对用来描述被辨识系统的一类数学模型进行说明和参数化。

2. 对系统施加一个适当选择的试验信号，并记录输入-输出数据。假如系统正处于连续运行中，且不允许加试验信号，必须用正常运行数据进行辨识。

3. 对所选择的一种模型进行参数辨识，使其与统计数据有最好的拟合。

4. 对选出的模型进行验证性试验，看它是否适当地描述了最终要辨识的系统。

5. 若验证性试验通过，则辨识程序结束，否则要选择其它类型的模型，并重复步骤2到4，直到获得一个验证通过的模型。

第一步实质上是涉及到系统的描述问题。对于一个已知系统，我们可以选择很多描述的方法，包括频域、时域、连续或离散的描述模型。在时域描述中我们可以选择权函数（或序列）、微分方程（或差分方程）及状态变量方程。这种选择取决于辨识的目的并和输入-输出数据有关。

1.3 参数估计的方法

很多众所周知的参数估计技术已经成功地用于辨识问题，其中包括有极大似然法，最小二乘法、互相关法、辅助变量法及随机逼近法等等。

在本书中我们之所以采用最小二乘法是有充分理由的。首先，最小二乘法是一个经典的方法，很多领域的科学家对

它都是熟悉的，所以它很受欢迎。其次，最小二乘法概念简明、适用范围广，在应用其它统计估计理论有困难的情况下，可应用最小二乘法，而且在大多数情况下，它又能获得与极大似然法一样好的统计效果。此外，最小二乘辨识法能很方便地与其它辨识算法建立关系，这样就有可能对系统辨识问题做出统一的处理。

在所有的估计技术中，我们都力求使某一个被适当定义的误差标准趋于最小，以便使模型与系统数据最好的拟合。可以有很多方法定义误差。例如，参数的实际值与估计值之差（参数误差），在同一输入的条件下系统输出与模型响应之差（输出误差），模型方程与被量测的输入-输出数据之差（方程误差），后者是最常用的。

完成辨识有两种模式：一种是离线辨识，即先将观测的输入-输出数据记录下来，然后很据所记录的全部数据来估计模型参数。另外一种是在线辨识。它的参数估计是对每一组数据进行递推计算，而新的数据被用来修正、刷新已有的估计值。假如刷新的过程进行得非常快，那么就有可能获得一定精度的时变系统的参数估计值，这种能力称为在线实时辨识。

1.4 本书的编排

第二章介绍动态系统的参数模型描述，重点放在离散型线性系统模型，同时还要指出各种描述形式之间的关系。第三章我们将介绍最小二乘理论和有关的统计特性，并建立与其它估计技术的关系。第四章介绍用最小二乘法辨识加权序列，同时介绍可辨识性及最佳试验信号设计的概念。第五章

介绍白噪声情况下，用最小二乘法辨识线性系统的差分方程模型的步骤，同时还要讨论一下模型阶次的辨识。第六章介绍在有色噪声情况下，方程误差问题，并引出广义最小二乘法作为基本辨识方法。第七章我们试图用多步最小二乘法解决同样的问题，这种方法的计算要比第六章中讨论的广义最小二乘法简单一些。第八章讨论非线性系统模型的辨识问题，特别注意Volterra级数模型及Hammerstein非线性模型。

参 考 文 献

- Åström, K.J., and Eykhoff, P., "System Identification—a Survey," *Automatica*, Vol. 7, pp.123-162, 1971.
- Bekey, G.A., "System identification—an Introduction and a Survey." *Simulation*, pp. 151-166, Oct.1970.
- Cuenod, M., and Sage, A.P., "Comparison of some Methods Used for Process Identification," *Automatica*, Vol. 4, pp.235-269, 1968.
- Eykhoff, P., *System Identification, Parameter and State estimation*, ley, London, 1974.
- _____, "Some Fundamental of Process-Parameter Estimation." *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.AC-8, pp.317-357.Oct.1963.
- Graue, D., *Identification of Systems*, Van Nostrand Reinhold, New York 1972.

第二章 动态系统的描述

2.1 引言

动态系统的模型可以分成二种类型：连续的和离散的。两者的本质差别在于加到系统上的信号一个是连续的，而另一个是离散的。由于连续信号的信息，可以被一个采样频率适宜的采样信号所表示，所以连续系统也可以被一个离散模型所近似。关于系统理论的一般性参考文献将在本章的末尾给出。

绝大部分系统辨识技术都是利用数字计算机获得结果的，所以采用离散系统模型更为合适。本书中关于最小二乘辨识技术的发展，也是建立在离散系统概念上的。

在这一章中，我们将提出线性离散动态系统的各种描述形式，而这每一种形式都以不同的方式显示了系统的特征。这些描述形式包括：卷积和、差分方程及状态变量方程。由于这些形式之间存在着唯一的对应关系，所以，当一个线性系统的某一种特定的描述形式被获得之后，就可以认为它已经完全被辨识了。