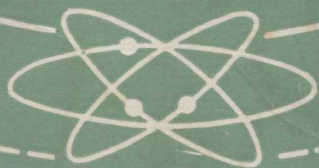


高等学校教材

系统辨识导论

徐南荣 编



电子工业出版社

TP302
221

系统辨识导论

徐南荣 著

电子工业出版社

内 容 简 介

《系统辨识导论》是系统辨识学科的一本导论性教材，它全面地介绍了线性单变量动态系统的辨识及参数估计问题。其主要内容包括：模型、建模和系统辨识的基本概念，动态系统的数学模型，系统辨识的经典方法，系统辨识的最小二乘法，系统辨识的随机逼近法、系统辨识的最大似然法和预报误差法，模型结构的判定，闭环系统的辨识。

本教材强调从实际的辨识应用出发，突出基本概念及有关结果的物理概念，对系统辨识的基本问题作了深入的论述。教材注意到与自动控制等专业其他课程的配合，兼顾了时域和频域两类模型的辨识。教材中有章节引入有例题，书末并附有作业题。

本书是自动控制和工业自动化方面专业本科高年级的选修课教材，它也可作为要求掌握系统辨识学科的其他专业的教材。对于从事系统分析、系统工程等领域的科技人员，本书也是了解掌握系统辨识学科的一本参考书。

系 统 辨 识 导 论

徐南荣 著

责任编辑 杨富强

电子工业出版社出版（北京市万寿路）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国科学技术情报研究所印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：14 字数：320 千字

1986年5月第1版 1986年5月第1次印刷

印数：1—5500 册 定价：2.35元

统一书号：15290·319

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工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》、中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构。并制定了一九八二到一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共217种选题。在努力提高教材质量、适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者，各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

系统辨识是系统理论的一个重要分支。它所涉及的理论基础较为广泛，它的内容亦相当丰富。根据《系统辨识导论》课程教学大纲，本课程是自动控制专业高年级学员的一门选修课。本教材是介绍系统辨识学科的一本导论性材料。通过本课程的学习，使学员对“模型”有正确的认识，掌握建立模型和系统辨识的基本概念，理解动态系统辨识的基本原理，学会辨识系统和估计系统参数的基本的、主要的方法。由于课程学时不多，本教材不再介绍学习《系统辨识》所需的基础理论知识。编写本书时，认为读者已具备工科大学本科水平的数学基础，包括有关线性代数、概率论及数理统计的基本知识，且已学过自动控制原理和最优化方法的专业知识。

考虑到本课程的性质，学员所具备的理论基础，以及有限的学时数，也考虑到线性单变量动态系统的辨识是研究其他更复杂的系统的基础，本教材主要介绍较为成熟的线性单变量动态系统的辨识问题。对于多变量系统、非线性系统、分布参数系统等方面的辨识问题，建议作为拟进一步深入掌握系统辨识理论的研究生的课程内容。在教材内对这些内容不作专题论述。

本教材共分八章，前二章介绍系统辨识的基本概念和系统的数学模型。在此基础上，从第三章开始，介绍单变量线性系统辨识和参数估计的各种方法。

从模型与实体开始，第一章介绍了建模、系统辨识的基本概念、基本原理以及系统辨识的基本过程和方法。第二章比较系统地介绍了描述线性动态系统的各种数学模型的形式，着重介绍系统的随机型数学模型的概念及其描述形式。对各种形式模型之间的转换关系也作了论述。第三章开始论述辨识系统的各种方法。首先介绍系统辨识的各种古典方法，重点介绍用相关法辨识系统的原理和方法。第三章最后，结合已经介绍的各种辨识方法，提出了对测试信号的要求问题，这是系统辨识中的一个重要的概念。最小二乘法是系统辨识学科的基本方法。第四章以较多的篇幅介绍了最小二乘法原理及其在系统辨识中的各种应用。从最小二乘的整批算法到它的递推算法。从方程误差为白噪声下的辨识算法到方程误差为相关噪声下的各种辨识算法，都进行了较详尽的论述。为了加深对辨识算法的实际理解，结合所介绍的方法，引入了一些例题。将随机逼近法应用于系统参数估计是参数估计的确定型梯度法在随机的环境下的推广，第五章从工程应用的角度较系统地介绍了随机逼近法的基本原理，并阐述了利用随机逼近法估计系统参数的方法。第六章介绍了运用最大似然法来估计系统参数的原理和方法，并引出了具有更广泛含义的预报误差法。在举出用最大似然法估计系统参数的一种整批的最优化算法后，在第四章结束时，还介绍了一种近似递推最大似然法。模型结构判定是系统辨识过程中的关键阶段。第七章先讨论用结构检验法和参数估计法判别系统模型阶次的各种方法，最后论述了采用得相当广泛的根据信息准则判定模型阶次的方法。大多数现实的系统往往运行于闭环状态，在闭环状态下辨识系统将出现一些新的问题。本书最后一章专门讨论了闭环系统的辨识问题，特别是讨论了系统的可辨识性问题以及输入结构对可辨识性的影响。

为了使读者不仅在理论上掌握系统辨识的原理和方法，而且能运用所学理论，以数字计算机为工具，实际地进行系统辨识的工作，在本教材的有关章节引入了一些例题。同时，在书末附有需要借助数字计算机完成的“系统辨识作业题”。读者可按所列的作业要求进行上机

实践，全部地或有选择地完成所列的练习内容。

考虑到程序语言的选择取决于所用计算机系统的软件配置，也考虑到系统辨识方法的多样性、新的辨识方法的发展等，所以本书未列入系统辨识用的计算机程序。在充分理解系统辨识的原理和算法后，对于已经掌握计算机程序编制的人员来说，独立地编写出辨识算法的计算机程序是不困难的。

本教材每章正文的后面都附有与该章内容有关的参考材料。这些参考材料是最主要的，目的是让读者深入理解该章的内容，并为进一步研究有关内容提供索引。有关系统辨识和参数估计的大量文献资料，可在国际自动控制联合会（IFAC）关于辨识和系统参数估计的学术会议论文集中找到。

本书承华中工学院韩光文同志负责主审，并经《计算机与自动控制》教材编审委员会、《自动控制》教材编审小组审定。韩光文同志及编审小组对本书初稿提出了不少宝贵的修改意见和建议。在此，谨致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中会有不妥和错误之处，恳切希望读者予以指正。

编者

一九八五年五月

绪 论

系统辨识和系统参数估计是六十年代开始迅速发展起来的一门学科。1960年，在莫斯科召开的国际自动控制联合会学术会议上，相对来说，只有很少几篇文章涉及系统辨识和系统参数估计问题。然而，在此后，人们对这门学科给予了很大的注意。有关系统辨识的理论和应用的讨论日益增多，在国际学术会议上出现了很多这方面的文章。不仅在自动控制学科研讨着系统辨识和系统参数估计问题，而且在其他一些科学和技术杂志上，亦刊登有这方面的论文。目前已经有一些专著和书籍介绍了这个应用非常广泛的领域。

系统辨识问题为什么会获得如此蓬勃的发展？概略地说，在六十年代，工程上广泛地应用了各种自动控制系统，这些系统包括了从最简单的继电控制系统到利用辅助变量的复杂的多回路控制系统。在这一时期，自动控制理论的发展亦达到了很高的水平，经典的控制概念被更有前途的现代控制理论所超越。与此同时，数字计算机，无论作为离线科学计算还是作为在线监测控制，都得到了广泛的应用。值得提出的问题是，现代控制理论是以掌握被控对象的数学模型为前提的，必要时，还要求掌握被控对象所受到的噪声的特性。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，如何获得这些模型的研究，却并没有象现代控制理论的发展那样有相应的同步的发展。在开展现代控制理论的应用工作中，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间距。现代控制理论在许多领域中还远没有得到充分的应用，这正是原因之一。尽管“理论”能够以非常精巧的方法提出一个控制问题的最优解，但是要实现这个控制，需要对被控系统的动态特性给予数学描述。在这样的背景下，系统辨识和系统参数估计问题便愈来愈受到人们的重视，它是发展系统理论，开展实际应用工作中不可缺少的一门学科。

值得提出，系统辨识理论之所以得到发展，不仅是由于实际控制工作者的需要，随着科学技术的发展，各门学科的研究方法进一步趋向量化，人们在生产实践和科学实验中，对所研究的较复杂的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、控制和决策。例如，在化工过程中，要求确定其化学动力学和有关的参数，以决定过程的反应速度；在热工过程中，要求确定象热交换器这样的分布参数系统的等价的集中参数；在生物系统方面，希望得到其较精确的数学模型，以便确定在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；为进行人口预报和作出相应的决策，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，亦已经建立并继续要求建立其定量的描述模型。其它如结构或机械的振动、地质分析、气象预报等等都涉及到系统辨识和系统参数估计，而且这类要求正在不断地扩大。

当前，系统辨识理论已经发展成为近代系统理论中的一个重要分支。系统辨识理论与实际应用密切结合，推动着系统辨识学科的发展。一般认为，系统辨识理论中，对于单变量线性系统辨识的理论和方法，目前已接近成熟。但是，对于多变量系统的辨识，尤其是它的结构辨识，则还处于不能令人满意的状态。为了寻找多变量系统的结构，探讨了多种途径，目前，大多采用的是某种规范化的表达形式。在多变量系统的辨识方面正开展着大量的研究工作。在非线性系统的辨识方面，采用多阶脉冲响应表示的 Volterra 函数级数可以对一类相当广泛的非线性过程给出相当一般的表达形式，利用 Rajbman 的弥散函数法亦可以有效地

辨识非线性系统的非参数模型。但是，与辨识线性系统相比，辨识非线性系统时，要求对被识过程具有充分的验前信息。Ivakhnenko提出一种在不需要验前信息的情况下，由观测数据推导出非线性系统的参数模型的方法，称为“数据处理的分组方法（GMDH）”。在系统辨识理论的其它方面，如辨识实验的设计，强壮性估计问题，分布参数系统的辨识问题等，现在也正开展着大量的研究工作，这些工作将推动这个学科进一步发展。值得提出的是，一些新的概念正继续引入系统辨识理论中来，例如，关于集合估计的概念，这就是去寻找出参数估计量的最小集合，可以认为，它是一种置信区间估计；又如，在模型结构判定、强壮性估计等方面，在运用Shannon信息熵的基础上，进一步引入了广义的Shannon熵，即随机变量的 α 阶Renyi熵，并从信息论的观点引入了H收敛性和H稳定性的概念。可以看出，系统辨识理论的发展，一方面有赖于其它理论（如系统结构理论，稳定性理论，模式识别，学习理论等等）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。

应当看到，系统辨识的理论，到目前为止，还没有形成为一门完整的统一的体系。系统辨识的概念和提法还没有完全统一，它所用的方法很多，还缺乏公认的统一的标准。这些问题，现在已经引起人们的注意，正开始朝着建立统一的学科体系的方向去努力。

目 录

绪 论

第一章 模型、建模和系统辨识	(1)
§ 1-1 模型与实体	(1)
§ 1-2 数学模型的建立	(2)
§ 1-3 系统辨识的基本概念	(5)
§ 1-4 系统辨识的基本过程	(8)
§ 1-5 系统辨识的方法	(13)
主要参考文献	(16)
第二章 动态系统的数学模型	(18)
§ 2-1 系统的数学模型分类	(18)
§ 2-2 线性连续时间系统的确定型数学模型	(21)
§ 2-3 线性离散时间系统的确定型数学模型	(25)
§ 2-4 随机噪声及其数学模型	(28)
§ 2-5 线性动态系统的随机型数学模型	(31)
§ 2-6 线性模型的规范形及模型之间的转换	(39)
主要参考文献	(50)
第三章 系统辨识的经典方法	(51)
§ 3-1 引言	(51)
§ 3-2 阶跃响应法	(52)
§ 3-3 频率特性法	(58)
§ 3-4 相关法	(61)
§ 3-5 对测试信号的要求	(80)
主要参考文献	(83)
第四章 系统辨识的最小二乘法	(84)
§ 4-1 引言	(84)
§ 4-2 最小二乘原理	(84)
§ 4-3 最小二乘估计的递推算法	(92)
§ 4-4 模型参数个数增多时参数的递推估计	(98)
§ 4-5 时变参数的最小二乘估计	(100)
§ 4-6 最小二乘法在系统辨识中的一些应用	(104)
§ 4-7 相关噪声及其影响	(113)
§ 4-8 广义最小二乘法	(117)
§ 4-9 辅助变量法	(127)
§ 4-10 扩充最小二乘法	(130)
§ 4-11 相关-最小二乘法	(132)
§ 4-12 多步最小二乘法	(136)

主要参考文献	(140)
第五章 系统辨识的随机逼近法	(142)
§ 5-1 引言	(142)
§ 5-2 洛宾斯-蒙罗方法	(143)
§ 5-3 基弗-沃尔甫维茨方法	(148)
§ 5-4 德沃雷茨基定理	(150)
§ 5-5 随机逼近算法的加速方案	(155)
§ 5-6 动态系统模型参数的随机逼近估计	(158)
主要参考文献	(163)
第六章 系统辨识的最大似然法和预报误差法	(164)
§ 6-1 引言	(164)
§ 6-2 最大似然法	(164)
§ 6-3 预报误差法	(168)
§ 6-4 参数估计中的最优化算法	(172)
§ 6-5 近似递推最大似然法	(174)
主要参考文献	(178)
第七章 模型结构的判定	(179)
§ 7-1 引言	(179)
§ 7-2 根据汉格尔矩阵判定模型的阶次	(179)
§ 7-3 根据积矩阵判定模型的阶次	(181)
§ 7-4 根据残差平方和判定模型的阶次	(183)
§ 7-5 根据残差的特性判定模型的阶次	(186)
§ 7-6 根据信息准则判定模型的阶次	(187)
主要参考文献	(190)
第八章 闭环系统的辨识	(191)
§ 8-1 引言	(191)
§ 8-2 闭环辨识的基本概念	(191)
§ 8-3 闭环辨识的基本问题	(195)
§ 8-4 可辨识性的概念	(201)
§ 8-5 输入结构对系统可辨识性的影响	(203)
主要参考文献	(207)
系统辨识作业题	(208)

第一章 模型、建模和系统辨识

§ 1-1 模型与实体

在自然科学和社会科学的许多领域中，定量的系统分析、系统综合已受到人们更多的重视。将被研究的对象模型化，则是开展这些工作的前提和基础。这些领域包括工程学、物理学、天文学、生物学、医学（生理学）、生态学、经济学等等，当然也包括工程控制这个领域在内。为了理解什么是模型、什么是模型化，我们从与“模型”密切相关的“实体”谈起。

一切客观存在的事物及其运动形态，都统称为实体。不论自然科学还是社会科学，人们所研究的一切客观对象都是这里所指的实体。一般来说，实体是一个复杂的对象、过程或系统。在科学研究中，尤其是在自然科学研究中，为了更好、更方便地研究复杂的实体的特征，相当普遍采用的而又有成效的一种方法就是模型法。

模型是对实体的特征和它的变化规律的一种表示或抽象，而且往往是对实体中那些所要研究的特定的特征定量的抽象。模型不同于实体，模型仅表达出实体中我们所感兴趣的那些主要特征，它是经过适当简化了的客观事物的代表。对作为被研究实体的“系统”来说，模型是现实系统的本质方面的表达形式，而且它是以适合人们需要的方式提供出来的该系统的表达形式。所以，模型是客观事物的本质方面或主要方面的表示，并采取适合于我们需要的形式（如图形、符号语言、数学关系式等等）表达出来，以便于人们对实体进行分析和处理。

模型不是实体本身，与实体也不等同。地图、工程图、像片、航模属于物理型模型；信号流程图、各种数学关系式则属于抽象型的数学模型。它们都不是真正的现实的事物。再举立体录像为例，立体录像表达人物、事物活动的一种模型。立体录像中的人物会说话、有表情，但它毕竟不是真正的人，录像中的人物没有反映出人具有的体温，也没有反映出人酗酒后的酒味。但是，立体录像抓住了表达人物活动的主要方面。这就是说，各种模型都只是将原来客观事物的主要特征表达出来。任何实体都有数不清的层次和特征，能反映出实体的一切特征和运动规律的东西，只能是实体本身，而不是模型。建立模型的目的，不是要将实体的一切方面都表达出来，事实上，也不可能将实体的一切方面都表达出来。模型只是在所要研究的主题范围内描述实体的特征。正确建立的模型能表达出实体的主要特征，特别是表达出人们最需要知道的那些特征，从而达到对实体的抽象。能够对实体进行抽象，这正反映了人们对实体的认识的深化。从这个意义上讲，模型更优于实体，因为模型能够更加深刻、更加集中地反映客观事物的主要特征和规律。

另一方面，建立模型的目的是为了以模型为基础，对被模型化的对象进行分析、研究、仿真、或者进一步作出某种决策。模型只是了解事物、研究事物的手段或者工具。也正因为这样，模型的形式应该适合于应用的目的。如果模型过于复杂，在适用性方面，它就不符合建模的需要。一般来说，相对于被模型化的现实系统来说，模型的结构应当比较简单，这是模型构成的一个重要特点。从这个角度来说，我们也可以这样来理解一个模型：模型是适当

地降低了复杂程度的客观事物的主要方面的代表。

既然模型是用来表达实体的主要特征，人们必然会提出这样一个问题：模型是否真正反映了实体的主要特征？对此，我们应当有这样的认识：模型代表着在这个领域中当前人们对被模型化对象所具有的知识水平。在科学实践的过程中，人们只能逐步地从真理的长河中获取对实体的知识。通过一、两次实践不可能完成全部认识过程。客观事物又是在发展变化的，我们只能在不断实践中逐步认识真理、接近真理。因此，对于已建立的模型，我们应有的态度是：“模型有待于不断改进。”那种以为模型可以一劳永逸地一次建成的想法是不符合实际的。在研究客观事物、建立其模型上，作为一个科学工作者的责任，首先是设法抽象出实体的主要特征，建立起模型，然后，对模型逐步完善和改进，使它能更精确地描述客观事物的发展过程。

采用数学描述形式对某个实体所建立的模型，称之为数学模型。在系统辨识中，数学模型可定义为，一个被模型化的系统中的各个有关变量之间的关系所构成的数学结构。象代数方程、微分方程、差分方程、偏微分方程等都是数学模型的表现形式。线性数学模型是比较简单的一种模型。当然，世界上各种实体，能用线性模型来准确地描述的是不多的，尽管如此，线性模型却仍能反映出很多类型的实体的主要特征，这点已经为许许多多的实践所证明。在长期的科学试验和生产实践中，已经充分证明，线性理论是有用的，而且常常是很有成效的。当然，如果发现某种非线性模型能更好地反映出所研究实体的主要特征，而且使用起来也比较方便，就应当采用这种非线性模型。

必须指出，实践是对模型最有权威的鉴定者。任何模型的有效性，只能通过对实体的考察来回答。只有参与考察客观事物的实际过程，并对模型进行具体研究和分析，才能鉴别模型的质量。离开对实体的实际考察，一般地评价模型的优劣，是得不出改进模型的有益的意见的。

§ 1-2 数学模型的建立

在上节介绍什么是模型的基础上，本节我们讨论数学模型的建立。在讨论这个问题以前，首先要明确，为什么要建立被研究对象的数学模型？这个问题的回答关系到整个建模过程的指导思想。打算利用模型去完成什么任务，对模型的要求、建立怎样形式的模型以及建立模型的方法等都会起着决定性的作用。

在科学技术的许多领域中，包括工程、生物、医学、生态、经济、社会等领域，为了要对较复杂的实体进行定量的分析和研究，必须将被研究的对象、过程或系统用数学模型描述出来。模型化是进行系统分析、设计、预测、控制、决策的前提和基础。具体地说，建立被研究的对象，过程或系统的数学模型有以下主要方面的目的。

(1) 系统的仿真——为了研究不同的输入变量下系统的输出情况，最好的办法是直接对系统本身进行实验。但是，实际上这往往是难以实现的。原因会是多方面的，例如：利用现实系统进行实验花费太大；实验过程中系统可能会不稳定，从而实验过程带有一定的危险性；系统的时间常数数值会相当大，以致实验需要花费很长的时间。为此，往往需要采用模型法、尤其是数学模型法来建立被研究系统的模型，利用模型模仿真实系统的特性或行为，从而间接地对系统进行仿真研究。建立数学模型就是通过机理的分析或者通过实验、观测，将所研究的系统的主要特征及其主要变化规律表达出来，将所研究的系统中主要变量之间的关

系比较集中地揭示出来，从而为分析该系统提供依据和线索。例如，根据实验装置或中间试验装置所得到的观测数据建立起该装置的数学模型后，将大大有助于理解所获得的试验数据，可以探索和分析不同的输入条件对该系统输出变量的影响，可以检验所提出的理论，从而对系统的动态行为得到更全面的理解。

(2) 系统的预测——不论在自然科学还是在社会科学的研究中，往往希望知道所研究的系统未来发展演变的规律和趋势。掌握了这个演变规律和趋势，才有可能预先作出决策、采取措施、控制系统中有关变量的变动。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，采取紧急保安措施等。科学的定量的预测大多采用模型法，首先建立所预测的系统的数学模型，根据模型对系统中某些变量的未来状态进行预测。例如，国家或地区人口发展规律的预测，市场上某种产品销售状况的预测。在工程上，则有电力系统负荷的预测，河流流量的预测，大型机组启动过程中运行状态的预测等。显然，这些预测的可靠性，关键在于人们对于被预测系统的特性的认识程度，这也就是所建立的系统的数学模型的可靠程度。

(3) 系统的设计和控制——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各子系统的特性。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（产量指标、误差、稳定性、安全性等）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，从而建立其数学模型，才能为进行分析和设计计算提供基础。另一方面，对于一个已有的系统，只有建立了该系统的数学模型，才有可能根据系统特性设计所需的控制器，才有可能采用最优化技术按一定目标对系统进行优化控制，才有可能运用系统理论作出实现系统运转要求所需的各种决策。

由上所述可以看出，系统模型的最终用途对于建模的要求、（精度、速度等）模型的类型等有决定性的影响。例如，用于预报或控制的系统模型的精度可以比用于分析、设计（如参数监测，故障分析检测等）的模型精度要求低一些，最优控制用的系统模型要比常规经典控制用的模型要求高得多。在建模速度上，对于分析、设计、预测用的模型并不专门提出特别的速度要求，但是对于在线控制的系统模型，尤其是用于自适应控制的系统模型，对其建模的速度提出了很高的要求。

怎样来建立系统的数学模型呢？建立系统的数学模型主要有两条途径：第一种途径是利用人们已有的关于系统的知识，采用演绎的方法来建立数学模型。演绎法是根据已知的原理推导出未知的原理的一种推理方法。用这种方法建立模型时，是通过系统本身机理（物理、化学规律）的分析确定模型的结构（也可能确定某些参数），从理论上推导出系统的数学模型。在这个过程中，要用到一些与系统有关的基本定律、系统本身的物理结构和参数。这种利用演绎法得出的数学模型称为机理模型或者解析模型。第二种途径是根据对一个已经存在的系统的观察、测量所得到的大量输入、输出数据，推断出被研究系统的数学模型。这时所采用的是总结归纳法。这种利用归纳法得出的数学模型称为经验模型。用归纳法来获得数学模型的基本依据是，在一定的输入激励条件下，系统的动态行为必然体现在它的输入和输出数据之中。利用输入、输出数据所提供的信息，有可能借助于数学方法建立起该系统的数学模型。

实际工作中，在建立数学模型时，往往是将演绎法和归纳法结合起来，尽量利用我们对被研究系统的已知规律或原理，采用演绎法确定系统模型的数学结构，然后利用实测数据，

将系统模型中尚未知道的部分（如模型参数）辨识出来。这种相结合的方法已被实践证明是十分有效的。但是，许多实际过程（包括大多数工业过程、生态过程、社会经济过程等）本身的机理是很复杂的，人们对这些过程的机理目前还不是了解得很清楚，要想利用系统的机理采用演绎法去建立数学模型是很困难的。面对这种情况，往往就不得不主要依靠对系统的实测数据，利用归纳法推断出系统的数学模型。在这里值得提出，一个纯粹由演绎法所建立的系统的数学模型，一般认为，它就是系统模型化问题的唯一解。相反，当采用归纳法时，能满足观测到的输入、输出数据关系的系统模型却有无穷多个。因此，在采用归纳法建立模型时，需要引入附加的假设和约束，以便从无穷多个可能的模型中挑选出合适的模型。

所以，一般说来，模型的建立首先是应用与被识对象有关的基本定律。这些定律是确定系统或部件的一般特性的基本规律。在物理系统中，这些定律通常是一些守恒性和连续性原理（物质和能量仅能从某些特定的源中发出）的表达式。例如物质不灭定律、能量守恒定律、热量平衡、基尔霍夫电路定律等。应用这类定律，就能够推导出描述被研究对象的数学模型，例如建立一个常微分方程，或者代数方程等。

在建立模型的过程中，为了方便起见，可以将被模型化的整体系统划分为较简单的子系统（甚至划分成最简单的基本单元）。整体系统看成是由这些相互连结的子系统所组成。这些子系统之间的相互连结，规定了系统中物质和能量流通的路径，子系统的物理类型则决定着这些物质和能量在系统中不同位置所发生的物理性质的变化。倘若对被识系统的每一个子系统的机理和作用规律都已完全掌握，我们就可以得到系统中各部分的变量之间的许多数学关系式，即各个子系统的数学模型。这些以方程式或关联的方程组描述的子模型与系统划分的边界条件一起，最后形成整个系统的数学模型。在根据机理规律推导整体系统数学模型的过程中，我们还需要解决一个很重要的问题，这就是所建立的数学模型的“阶次”问题。很明显，一个极为严密的、包罗万象的模型是过于复杂的。从应用的观点来看，我们需要的是一个足以反映所研究的系统的主要方面的尽可能简单的模型。为此，在模型的简单性和模型的精确性之间，我们需要寻求出合适的折衷方案，这就需要根据建模的目的，对所研究的系统作出一些在应用上是合理的假定，从而简化数学模型的结构。具体地说，我们必须确定哪些变量以及哪些关系是主要的，哪些则是可以忽略的。当系统中实际存在的分布参数现象可以按集总参数处理的时候，当过程的非线性现象在所研究的工作范围内可以按线性处理的时候，就有可能得到一个线性集总参数的微分方程形式的模型。作出这些假定以及忽略一些变量，应当对系统的主要特性的描述不产生过大的影响。这样，在今后验证所建立的系统模型的过程中，由所建数学模型所获得的各种结果才有可能与实际系统的实测结果比较接近。

但是，对被识系统各部分的机理能完全掌握的情况是很少有的。比较接近于这类情况的例子是建立电路系统的数学模型。这里，电路的物理结构是已知的，基本元件的参数数值也都是知道的。对这类关系，利用基尔霍夫定律或有关的电网络定律，就可以直接建立该电路系统的数学模型。又如，对于象空间飞行器那样的动力学问题，其数学模型也可以根据基本的力学原理和飞行器系统各部件的结构尺寸利用演绎法推导出来。然而，模型中的一些参数，例如某些空气动力参数，则必须根据真实的飞行试验数据才能确定。在建立例如化工生产过程的数学模型中，虽然根据反应动力学可以写出这类过程的某些反应方程，但总的来说，由于我们目前对化工过程内部具体的物理、化学过程的知识还不完备，加上环境条件的不确定性，干扰因素众多，在许多情况下，不仅不能确定所建模型的参数值，而且往往连系统的数学模型的结构亦难于确切地判定。在这种情况下，建模工作就必须在尽量采用演绎法

的同时，更多地运用归纳的方法。更进一步，倘若我们需要建立象环境系统这类更为复杂的系统的数学模型，而对于系统中所涉及的物理、化学、生态过程只有一般的了解，这时，这类系统模型的建立就更需要依靠对该实际环境系统的观测数据。这里需要指出，在工程系统的辨识过程中，那种完全脱离对被识对象的机理分析，将被识对象当作所谓“黑箱”来处理的做法是不合适的。事实上，在绝大多数工程问题中，我们对被识对象或多或少地具备某些规律性的知识，因此，在工程系统中，我们所需辨识的“箱子”一般不会是“黑色”的，而往往是“灰色”的。

由上所述，可以看出，根据对被识系统所掌握的知识水平的不同，建立该系统的数学模型时所采用的基本途径亦不同。显然，对于被模型化的系统的知识掌握得愈多，那么在建立其数学模型过程中演绎法的作用就愈显著，数学模型也愈可能满意地代表原系统。如果对于被识系统的知识掌握得相当少，模型的建立就必须更多地依赖于归纳的方法，即采用试验方法，根据观测数据来估计出系统的模型。

由此可见，当我们采用试验方法来辨识系统，建立任何系统的数学模型时，应当在进行试验观测以前，掌握到尽可能多的有关被识系统的信息。这种信息，我们常称之为验前知识。验前知识愈丰富、愈精确，利用试验方法开展系统辨识工作也愈省力、愈容易。

验前知识这个名词包含二种不同内容的含义。一方面，它是指人们事先已经具备的或收集到的关于被识系统的模型结构、参数的知识，以及关于观测数据本身特性的信息。例如，根据物理原理，已知模型结构具有指数型；已知模型中的某个参数处在某个范围内或者参数满足某种约束；或者已知参数的大致估计值。又如，已知观测数据本身所受到的某种限制（温度观测值处于某个范围之间，流量仅能是正值等）。另一方面，它的含义是指着手进行辨识以前，人们对被识系统以及环境所作的一些假定。例如，假定系统是稳定的；假定噪声变化具有某种概率特性；观测数据具有某个验前概率分布等。

为了在辨识系统以前更多地掌握所研究的系统的信息，必要时还可以进行一些预备性的试验。例如，利用阶跃响应试验来近似地估计系统的过程时间。在建立系统模型前，一般希望能够尽量掌握下列方面的知识：(i) 系统各部分之间的连结方式以及与其物理、化学特性有关的定理或规律。(ii) 系统是否存在可以觉察到的非线性特性及其形式；系统性能是否随时间而变化，即是否属于参数时变的系统；系统的有关变量之间是否存在可以觉察到的纯时间滞后现象（包括确定性干扰对状态变量的影响的滞后时间）。(iii) 系统的过渡过程时间或主要时间常数大约多大，系统参数的范围或近似估值。(iv) 系统所能允许的最大输入量的幅度。(v) 对系统的干扰或噪声的特性，噪声与系统的输入、输出信号之间是否相互独立。

§1-3 系统辨识的基本概念

我们所遇到的系统问题，概括地说，可以分为两大类。一类可归之为直接问题，另一类则为逆问题。为了说明它们的区别，我们来考察图1-1所示的系统。

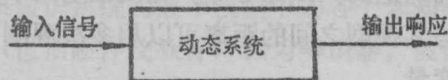


图 1-1

当上列动态系统的数学模型以及系统的初始状态已知时，倘若要求出该系统对一个规定的输入信号的输出响应，这样的问题称为系统的分析。系统分析问题在各种工程问题中几乎到处都会遇到。对这类问题，我们称它为“直接问题”。此外还有另一类问题，在这类问题中，描述该系统特性的数学模型是未知的，倘若对于一组给定的输入信号，已经测得系统的相应的输出响应，要求找出该系统的数学描述。对这类问题我们称它为“逆问题”。系统辨识问题正就是这种逆问题。简单地说，系统辨识就是通过试验或者运行过程中的观测数据来估计出系统的数学模型。例如，某个利用蒸汽冷凝的加热器系统的辨识问题，就是在某种条件下（如一定的截热体，一定的蒸汽压力），当已知加热器的输入蒸汽流量和相应的加热器的输出温度的一系列数据的情况下，寻求描述这种加热器的动态特性的数学模型问题。

实验和观测是人们了解客观世界的最根本的手段。在科学研究和工程实践中，人们总是希望通过实验和观测所得到的信息，获得对各种现象的规律性的解释，或掌握所研究的对象的特性。在不同的科学分支中，对这类利用实验手段来确定被研究对象的特性的实验研究方法，各个学科各自地给予了不同的名称。1956年，Zadeh提出了统一采用“辨识”（Identification）这个名词的建议。1962年，Zadeh对“辨识”提出了如下的定义：

“系统辨识是在对输入和输出观测的基础上，在指定的一类系统中，确定一个与被识别的系统等价的系统”。

根据这个定义，在系统辨识过程中，我们必须确定三方面的问题：第一，必须指定一类系统，这就是说，根据我们事先掌握的关于被识系统的知识，必须预先确定被识系统所属的系统的类别。例如，被识系统是静态的还是动态的，是线性的还是非线性的，是确定性的还是随机性的，系统参数是定常的还是时变的，是集中参数系统还是分布参数系统等。第二，必须规定一类输入信号。例如，输入信号可以是正弦信号，阶跃函数、脉冲函数、白噪声、伪随机信号等。第三，必须规定“系统等价”的含义及它的度量准则。

等价或者等效是系统综合中的一个重要概念。在工程上，我们经常希望在不改变系统的输入-输出特性的条件下，简化系统的结构。这时，等价的观念就是非常重要的概念。两个系统，当且仅当对于所有可能的输入值，它们的输入-输出特性全同时，这两个系统才称为是等价的。然而，由于实际上存在各种不可预测的干扰，对两个系统，在所有可能的相同的输入作用下，我们只能要求做到它们的输出近似相等。所以，我们实际采用的是系统“近似等价”的概念。

为了定量地检验两个系统是否近似等价，或者具体地说，为了检验在各种可能的相同的输入作用下，两个系统的输出是否接近相等，就必须引入一个衡量系统等价的近似程度的量。用数学的语言，这就是需要引入“距离”的概念，这里所谓“距离”，表示的是两个系统的接近程度。“距离”的概念在系统辨识中起着十分重要的作用。对于“距离”可以赋予不同的定义。例如，当将被辨识对象和该对象的模型分别看作为一个系统时，我们可以在同一输入作用下，经多次观测后，以被识对象的输出与其模型的输出之间的偏离作为这两系统的距离；也可以在同一输出下，以被识对象的输入与其模型的输入之间的偏离作为两系统的距离；又例如，还可以用随机变量的真正概率分布的熵与它的估计概率分布的熵之间的差值作为衡量这二个概率分布之间的距离，如此等等。在线性空间中，距离的一种度量可以用范数来表示。例如，被识对象与其模型之间的距离可以用多次观测下它们的输出之间的偏差值所组成的偏差向量的范数来度量。

在系统的辨识过程中，为了定量地判定模型的结构参数（如阶次）和估计模型的参数，

我们需要确定一个籍以最优地判定结构参数或估计参数的目标函数。在系统辨识中，常称它为准则函数。我们往往就用两个系统之间的距离或距离的某个函数作为衡量两系统等价程度的准则。例如，在数据离散的情况下，一个常用的准则函数为：

$$J(y, y_M) = \sum_{i=1}^N |y_i - y_{Mi}|^2 = \|e\|^2$$

这里， y 和 y_M 分别代表在相同的输入下，被识对象和模型的输出， y_i 和 y_{Mi} 分别代表它们在第 i 次观测时的实际值， N 为观测的次数。 e 就是这二个输出之间的偏离值 $e_i (i=1, 2, \dots, N)$ 所组成的 N 维向量。 J 就是衡量两个系统（被识对象和它的模型）的等价程度的准则函数。又例如，在连续信号的情况下，我们常常用下列准则函数来衡量被识对象和它的模型之间的等价程度：

$$J(y, y_M) = \int_{t-T}^t [y(t) - y_M(t)]^2 dt = \int_{t-T}^t e^2(t) dt$$

这里， $e(t)$ 代表在时刻 t 被识对象的输出 $y(t)$ 与模型的输出 $y_M(t)$ 之间的偏离量。我们选择了时间间隔 T 区间内输出误差的平方的积分作为准则。准则函数可以选取不同的形式。上面所举的二种形式的准则函数是两个系统的输出偏差的函数，称它们为输出误差准则（参见图1-2）。

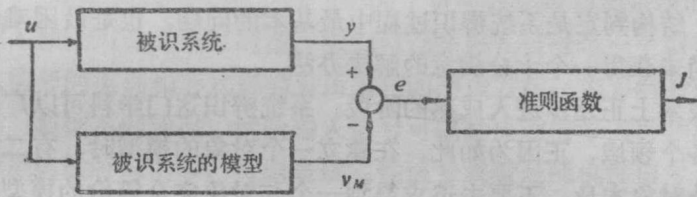


图1-2

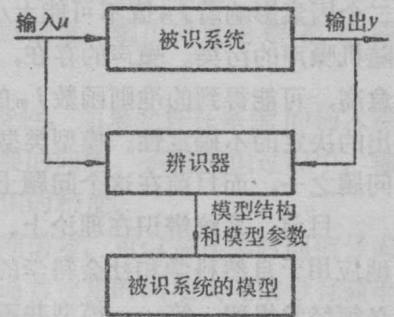


图1-3

从上面的例子中可以看出，当被识系统的模型的结构一定时，准则函数 J 将是模型的参数 θ 的函数。根据对被识对象的输入、输出多次观测的数据来辨识对象的模型，就是要从给定的模型类中，按照所规定的准则函数，选择一个与被识对象的观测数据拟合得最好的模型。这也就是选择出模型的参数向量 θ ，以使该准则函数的值达到最小。显然，在给定的模型结构下，距离的选择方式和准则函数的表达形式，是我们将被识对象和它的模型进行比较所采用的基本依据，它们的选取直接影响着最终获得的模型的参数。

在被识系统的数学模型的形式和结构已经选定的基础上，根据已得到的被识系统的输入和输出的观测数据，找出该被识系统的数学模型中的各个未知参数值的工作称为模型参数估计。实现系统辨识的装置（包括硬件及软件）称为辨识器。被识系统、辨识器和模型之间的关系可用图1-3简明地表示出来。

由以上系统辨识的定义可以看出，系统辨识问题的提法有相当大的自由度，所辨识得到