

系统辨识与

自适应控制

上册

吴广玉 主编

哈尔滨工业大学出版社



系统辨识与自适应控制

上 册

吴广玉 范钦义 编著
姜复兴 汪德辉

吴广玉 主编

韩志刚 主审

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书分为上、下两册。上册为“系统辨识”，它主要包括：线性系统传递函数和脉冲响应函数的辨识、线性系统状态和参数的估计、非线性系统状态和参数的估计、数学模型结构的辨识、系统辨识的试验设计、闭环系统的辨识和计算机自动辨识系统等。下册为“自适应控制”，它主要包括：自适应控制系统概述、随机自适应控制系统——自校正调节器、模型参考自适应控制系统、其他自适应控制系统和自适应控制系统的计算机辅助设计等。

本书可作为高等工科院校自动控制类专业研究生的教材和高年级大学生的教学参考书或教材，对于从事用试验统计法建立系统的数学模型和自适应、智能控制的科学工作者和工程技术人员，也有较大的参考和实用价值。

系统辨识与自适应控制

上 册

吴广玉 主编

*

哈尔滨工业大学出版社出版

新华书店首都发行所发行

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 22.5 字数 514,000

1987年3月第1版 1987年3月第1次印刷

印数 1—5,000

书号 15341.43 定价 3.75 元

前 言

本书是在哈尔滨工业大学自动控制类专业的“系统辨识”与“自适应控制”讲义基础上改写、补充而成的。

全书分为上、下两册。上册为系统辨识，主要包括：线性系统传递函数和脉冲响应函数的辨识；线性系统状态和参数估计；非线性系统状态和参数估计；数学模型结构的辨识；系统辨识的试验设计；闭环系统的辨识和计算机自动辨识系统等。下册为自适应控制，主要包括：自适应控制系统概述；随机自适应控制系统—自校正调节器；模型参考自适应控制系统；其它自适应控制系统和自适应控制系统的计算机辅助设计等。

为了使读者深入理解本书内容，书后附录中介绍了有关的基础知识；全部习题都附有习题解或解题提示；每章附有参考文献；最后还附有三个实验指导书。

本书不但较完整的反映了当前国内外在本学科领域的基本内容和动态，也包括了编著者多年的科研成果。它可作为自动控制类专业研究生或高年级大学生的教材或教学参考书。对于从事用试验统计法建立系统的数学模型和从事自适应控制、智能控制的科学工作者，工程技术人员，有较大的参考和实用价值。

本书由吴广玉主编，其中第十二章、第十五章和第十六章由范钦义、姜复兴合写，第十一章和实验指导书由汪德辉编写，第二章由吴广玉、汪德辉合写，第六章、第十章由姜复兴、吴广玉合写，其余由吴广玉编写。

编 者

1984 年 10 月

上册 目 录

引 论	(1)
第一章 辨识线性系统传递函数的过渡响应和频率响应法	(9)
§1.1 引言.....	(9)
§1.2 参数模型及其转换和输入信号.....	(10)
§1.3 辨识非参数模型的非周期输入信号方法.....	(14)
§1.4 由阶跃响应曲线辨识传递函数.....	(16)
§1.5 由脉冲响应曲线辨识传递函数.....	(25)
§1.6 辨识非参数模型的周期输入信号方法.....	(30)
§1.7 由实验频率特性辨识传递函数.....	(34)
§1.8 多输入多输出线性系统传递函数的辨识.....	(43)
§1.9 小结.....	(45)
第二章 辨识线性系统脉冲响应函数的相关分析法	(48)
§2.1 引言.....	(48)
§2.2 相关分析法原理.....	(48)
§2.3 伪随机二位式序列产生的方法及其性质.....	(50)
§2.4 用 M 序列辨识线性系统的脉冲响应函数.....	(61)
§2.5 用逆重复 M 序列辨识线性系统的脉冲响应函数.....	(68)
§2.6 用伪随机序列辨识系统的步骤及实例.....	(70)
§2.7 关于多变量系统的辨识.....	(74)
§2.8 小结.....	(76)
第三章 线性动态系统数学模型的典范表达式	(79)
§3.1 引言.....	(79)
§3.2 单输入 / 单输出线性系统的典范表达式.....	(80)
§3.3 一类等价关系.....	(84)
§3.4 确定型典范状态方程.....	(86)
§3.5 随机型典范状态方程.....	(92)
§3.6 确定型典范差分方程.....	(94)
§3.7 随机型典范差分方程.....	(100)
§3.8 预报误差方程.....	(104)
§3.9 小结.....	(106)
第四章 线性系统参数估计的最小二乘法	(111)
§4.1 引言.....	(111)
§4.2 基本定义和计算公式.....	(112)
§4.3 在线性系统参数估计中的广泛应用.....	(114)
§4.4 递推的最小二乘法.....	(117)

§4.5	渐消记忆和限定记忆的递推算法	(121)
§4.6	最小二乘参数估计的统计意义及其缺陷	(124)
§4.7	广义最小二乘法	(128)
§4.8	辅助变量法	(132)
§4.9	增广矩阵法 (增广最小二乘法)	(134)
§4.10	相关分析——最小二乘两步法	(135)
§4.11	随机逼近算法	(139)
§4.12	小结	(142)
第五章	线性系统的状态估计	(145)
§5.1	引言	(145)
§5.2	线性随机型状态模型及分析	(146)
§5.3	系统状态的最小方差估计	(151)
§5.4	系统状态的线性最小方差估计	(153)
§5.5	系统状态的递推估计——卡尔曼滤波器	(156)
§5.6	卡尔曼滤波器的具体计算	(162)
§5.7	卡尔曼滤波器用于系统的参数估计	(164)
§5.8	小结	(167)
第六章	非线性系统模型参数和状态的估计	(169)
§6.1	引言	(169)
§6.2	非线性稳态系统参数估计概述和迭代优化算法原理	(171)
§6.3	几种非线性稳态系统参数估计的优化 (迭代) 算法	(174)
§6.4	Hammerstein 模型参数估计的相关分析法	(178)
§6.5	一般非线性动态系统状态模型参数估计的最优化方法	(181)
§6.6	非线性系统的状态估计——推广卡尔曼滤波器	(183)
§6.7	系统状态和参数的联合估计——推广卡尔曼滤波器的应用	(185)
§6.8	小结	(189)
第七章	系统参数与状态估计的极大似然法与预报误差法	(192)
§7.1	引言	(192)
§7.2	系统参数估计的极大似然法原理	(192)
§7.3	系统参数估计的预报误差法原理	(196)
§7.4	极大似然法估计线性系统参数的离线迭代算法	(200)
§7.5	极大似然法估计线性系统参数的在线递推算法	(203)
§7.6	预报误差估计量的一致性和渐近正态性	(208)
§7.7	各种递推算法的一般格式及收敛性分析	(211)
§7.8	各种估计方法的选用和初步比较	(216)
§7.9	小结	(218)
第八章	系统模型结构的辨识和检验	(222)
§8.1	引言	(222)

§8.2	稳态线性系统模型结构的辨识 (F 检验法)	(222)
§8.3	陀螺漂移和加速度计数学模型结构的辨识	(231)
§8.4	单输入/单输出动态线性系统差分模型结构辨识 (定阶) 的F检验法	(234)
§8.5	动态线性系统模型阶辨识的 AIC 准则法	(242)
§8.6	确定型典范状态模型 (方程) 结构的辨识	(246)
§8.7	随机型典范状态模型 (方程) 结构的辨识	(254)
§8.8	小结	(261)
第九章	系统辨识的试验设计	(265)
§9.1	引言	(265)
§9.2	稳态线性系统辨识的试验设计 (回归的 D-最优设计)	(266)
§9.3	用双轴位置滚转法辨识陀螺与加速度计数学模型的试验设计	(269)
§9.4	辨识动态线性系统输入信号的设计准则和试验约束条件	(274)
§9.5	辨识一种特殊的 CAR 系统模型的 D-最优输入信号设计	(276)
§9.6	辨识一般线性系统的最优输入信号的设计	(279)
§9.7	递推输入信号的设计	(281)
§9.8	最优输入信号与伪随机二位式信号的比较	(282)
§9.9	采样周期及试验长度的选择	(283)
§9.10	小结	(285)
第十章	闭环系统的辨识	(288)
§10.1	引言	(288)
§10.2	无外部输入信号时单输入 / 单输出线性闭环系统的间接辨识	(289)
§10.3	无外部输入信号时单输入 / 单输出线性闭环系统的直接辨识	(296)
§10.4	有外部输入信号时单输入 / 单输出闭环系统的直接辨识	(300)
§10.5	无外部输入信号时多变量闭环系统的辨识	(301)
§10.6	有外部输入信号时多变量闭环系统的综合辨识	(304)
§10.7	只切换输入调节器的多变量闭环系统的过程辨识	(306)
§10.8	闭环系统的辨识精度—辨识方法选择及试验设计	(306)
§10.9	闭环系统的联合输入 / 输出过程和谱分解辨识法	(310)
§10.10	小结	(313)
第十一章	计算机自动辨识系统及辨识软件包	(318)
§11.1	引言	(318)
§11.2	计算机自动辨识系统的构成及工作原理	(320)
§11.3	计算机自动辨识系统的接口硬件	(320)
§11.4	计算机自动辨识系统的接口软件	(326)
§11.5	计算机自动辨识系统程序包	(331)
§11.6	一些工程问题	(334)
§11.7	使用实例和软件包中几个常用程序	(337)

引 论

一、定义及联系

就工业过程或装置 (Process, Plant) 而言, 所谓系统 (Systems) 就是由元件、部件相互联系而组成的具有某种特定功能的整体。

这种系统, 小的如一个晶体管、一个运算放大器、一个电机; 大一些的如一个伺服机构、一个调节器、一个惯性导航平台; 再大一些如一条生产线、一个电力调节网等。

关于系统的概念, 已经扩展到其它各个学科领域, 是一个应用很广泛的术语。一个企业、一个联合企业体、一个经济协作区、整个农业、工业、整个国民经济, 分别是一个系统; 一个细胞、一个生物体, 分别是一个系统; 一个行政组织、整个社会、整个社会中的各个要素本身 (如人口), 都分别是一个系统。有小系统, 大系统, 也有把一个国家作为对象的巨型系统。因此, 存在有工程系统, 生物系统, 经济系统, 还有社会系统。

对一般的系统而言, 它可以定义为由相互联系、相互制约、相互作用的各个部分组成的, 具有一定整体功能和综合行为的统一体 [1]、[2]。

事实上已经形成了研究一切系统的一般理论——“系统学”。

不同的系统, 对应着不同的学科领域。每个学科领域都要研究这一领域所包含的所有系统内部的以及与它相联系的外部因素之间比较精确的定量关系, 即数学模型。

所谓系统的数学模型, 就是利用数学结构 (表格、图形以及各种数学方程; 代数方程、积分方程、微分方程、它们的方程组、传递函数、状态方程、差分方程等) 来反应系统内部之间、内部与某些外部因素之间的精确的定量关系。

不同的学科领域, 对应着不同的数学模型 (它们之间有共性和相似性)。长期以来, 人类不断地观察和研究自然界中发生的各种现象及其规律性, 其目的就是要建立联系这些现象, 反映事物本质的数学模型, 以使用它们能动地改造客观世界, 使大自然为人类社会提供更多的福利。在某种意义上讲, 不同学科领域的发展过程, 就是建立它的数学模型的过程。

建立数学模型有两种方法: 一种是从基本物理定律, 即利用各个专门学科领域提出来的物质和能量的守恒性和连续性原理, 以及系统 (设备) 的结构数据推导出模型。这种方法得出的数学模型称之为机理模型或解析模型; 这种建立模型的方法, 称之为解析法。另一种方法是从系统的运行和试验数据建立系统的模型 (模型结构和参数), 这种方法称之为系统辨识。

关于系统辨识的定义及辨识 (Identification) 的译法, 目前还不统一 (有的译成识别、测辨等)。Zadeh [3] 曾给系统辨识一个定义: “系统辨识是在输入输出的基础之上, 从一类系统中确定一个与所测系统等价的系统”。这个定义虽然笼统, 但还比较恰当, 目前仍然采用。

从长远看，解析法仍将是建立模型的重要手段，但这种方法只能用于建立比较简单的系统（白箱）模型，对于大多数系统，过程是很复杂的（黑箱和灰箱），以致用解析模型很难准确描述。

经过客观实践检验的基本物理定律，最初都是经过反复实验和观测而建立的。从这一意义上讲，用系统辨识方法建立系统的数学模型，则是分析法建模的基础。由于我们所要研究的系统，越来越复杂，而且千变万化，因此，用系统辨识法建立系统的数学模型，将永远处于重要的基础的地位。

在不同的领域，由于系统的复杂程度不同，模型化的进展也不同。

工程技术领域，如电路、力学系统、飞行控制、过程控制等，其中电学、力学规律较清楚，模型接近“白箱”，还有“灰箱”。

社会经济领域，基本规律及其数学描述还不清楚，或有争议，模型接近于“黑箱”，大部分为“灰箱”。近几年在经济管理方面情况有所进展。

生物工程、生态循环工程领域，包括环境污染问题，环境的物理、化学过程，有一些定性的了解和初步的数学描述，模型大部分为“灰箱”。

因此在实际应用中，将两种建模方法结合起来，尽量利用我们对物理过程的认识，将系统的模型结构分成已知的和未知的两部分，然后利用实测数据，将未知部分辨识出来。

还有一点需要指出，在实际控制中，常常需要知道过程中的干扰特征。系统的检测，结合辨识技术是确定干扰特征的有效手段，而解析法建立模型，对此是无能为力的。

如果说系统辨识是认识客观世界，那么，对系统按人们的意愿进行控制，就是改造客观世界。由于我们所要控制的系统是比较复杂的，它遭受各种各样的干扰，是一个随机过程，同时它们大部分是一个时变系统，因此，必须对系统进行在线（On-line）辨识，同时提出实时的控制律（通过计算机），才能进行有效的控制。从内容上讲，在线辨识和最优控制的结合，就是自适应控制。自适应控制离不开系统辨识。

自适应控制系统是一种特殊形式的非线性控制系统。在运行期间，系统本身的特性（结构和参数）、环境及干扰特性存在某种不确定性。随着时间的变化，系统自身能在线地积累有关信息与实行有效的控制，修正系统结构的有关参数和控制作用，使系统处于最优的（或接近最优的）状态。

自适应控制系统的这种特点，可以看作一种学习能力。在过程运行中能对系统模型进行改进或对系统进行辨识的这种性质，显然是控制器的一种新的，有点类似于人类作为控制器时所具有的品质。

二、发展和现状

这里我们主要说明在工程系统中与自动控制理论密切相联系的系统辨识与自适应控制的发展和现状。

在自动控制理论出现之前，其它学科如天文学、数学、力学、物理学等，已经有了很大的发展，因此用试验法建立数学模型最早用于自然现象的预测，如天文学和其它基

础学科各种定律的建立，后来才用于生产过程的自动控制。

在现代控制理论问世之前，大多数被研究的对象是用传递函数描述的线性单输入单输出定常系统。经典（古典）控制理论获得极大的成功并得到了广泛应用的原因之一就在于，能运用十分有效的试验方法确定系统的传递函数。这种试验方法，简单易行，如只要在输入端引入正弦变化信号，并在稳态下量测输入输出之间的振幅与相位的关系即可。这种获得传递函数的方法可以直接用于设计控制系统。从这一意义上讲，系统辨识在经典控制理论中已广泛地使用了。

随着现代工业生产向着大型化，连续化和自动化方向迅速发展，对控制系统也提出了新的更高的要求。人们所研究的对象已不单是前述的简单系统，而是多变量的时变的随机过程。为了设计能实时进行信息处理、排除干扰、寻求最优操作条件以及适应环境的改变而改进本身性能的高性能的系统，经典控制理论已经不能完全满足要求了。特别是空间技术的发展，对控制系统提出了许多新的要求。由于这种客观需要的推动，在六十年代前后，发展了一种新的控制理论——现代控制理论。

计算机作为工具进入了控制系统，使得用现代控制理论设计的一些高精度、高性能的系统能够得以实现；也使得在过程控制中，能够采用不同于常规调节器的许多较为复杂的自适应控制系统。这样就有可能大大提高整个系统的控制品质。

现代控制理论在方法上的特点，是通过对被控过程的运动规律的定量描述来设计控制系统。因此，现代控制理论用于过程控制时，首先遇到的问题是建立系统的数学模型。是否能建立一个合适可用的数学模型，是现代控制理论的成果能否用到实际过程控制中去的关键。这样，通过输入输出数据建立数学模型——系统辨识，就成为控制系统设计的一个重要组成部分和首要任务了。另一方面，和系统辨识最为密切的自适应控制理论和方法，也就必然成为现代控制理论的最为活跃的内容之一了。

到 20 世纪中叶，人们注意到了一切物理、生命、社会科学与生产过程的自动控制理论中，那种借助数学模型，研究控制系统的成效显著的原则，就随之被推广到极其广阔的其它学科领域。现在，不仅在生产过程中需要建立设备或过程的数学模型，而且在其它学科领域，例如水文学、大气污染、生物学、生态学和社会经济学，也都需要建立数学模型。

从控制论的形成和发展来看，工程控制论的建立，是控制工程系统的技术总结，即从工程技术提炼到工程技术理论，也就是技术科学。如上所述，人们发现生物生命现象中的一些问题也可以用同样的观点来考察，从而建立了生物控制论，进而发展到经济控制论以及社会控制论。在上述各种控制论的基础上，将要建立基础科学的理论控制论〔1〕。这些控制论，首先都离不开用辨识方法建立它的数学模型。由于这些控制论研究的对象——各种系统，都是很复杂的，都受到各种各样的干扰，都是时变的，因此研究这些控制理论，也都离不开自适应控制。可以讲，系统辨识和自适应控制，已成为这些控制理论的重要组成部分。

因此，利用观测数据建立数学模型的理论和方法——“系统辨识”，以及与它相伴的在线辨识与最优控制相结合的自适应控制，自然而然地受到人们的普遍重视。今天，它已经发展成为一个非常活跃的学科。从 1967 年起，IFAC（国际自动控制联合

会) 每三年召开一次国际性的辨识与参数估计(包括自适应控制)讨论会。情况表明, 系统辨识的理论研究, 正愈来愈深入; 辨识方法在实际中的应用, 也愈来愈广泛; 与系统辨识关系密切的自适应控制也蓬勃地发展起来。做为自适应控制, 也将向更深广方向发展, 如向自组织、自学习和人工智能等方向发展。

在国内, 四个现代化和技术革命的需要, 促使这一学科迅速发展, 在教学、科研和生产中都取得很大的成果。已有几个研究所专门从事这方面的理论和应用的研究工作; 不少知名学者, 如宋健教授、关肇直教授、张钟俊教授、刘豹教授和李国平教授等都从事和领导这方面的研究工作; 大部分理工科高等院校都开设这方面的课程; 先后翻译和发表了不少综述文章〔4〕—〔9〕; 编著和引进具有不同特点的较系统的专著〔10〕—〔18〕; 初步编写了讲义和教学参考书〔19〕—〔21〕。

三、基本内容

辨识的最终任务是为实际过程设计控制方案。所以辨识系统的数学模型时, 首先要根据辨识的目的以及我们对过程已有的认识来确定模型结构, 并设计出为了辨识应做的一些试验, 在试验进行过程中记录输入输出数据, 对模型中的未知部分进行估计。我们所得的数据总是在某种工况下的数据, 在变化的工况下, 所估计出来的模型是否仍然适用, 就需要用不同工况下的数据, 对模型进行核验, 不合要求还要重新计算或重新进行试验。因此, 辨识的过程是一个迭代过程。这样的做法, 最后可能得到一个满意的模型。对于系统辨识的这个基本内容及步骤, 可表示为图 0—1。

下面就框图的各部分再进一步做些简单介绍。

1. 试验设计

试验设计是系统辨识首先遇到的问题。试验设计的好坏, 直接影响系统模型辨识的精度、速度和经济性等。

已有的验前知识、前几次试验结果和辨识的目的对试验设计起重要作用。在安排试验时, 首先根据试验对象, 确定所要观测的变量。在这些变量中, 输入变量可由人们给定, 而输出变量要都检测出来。

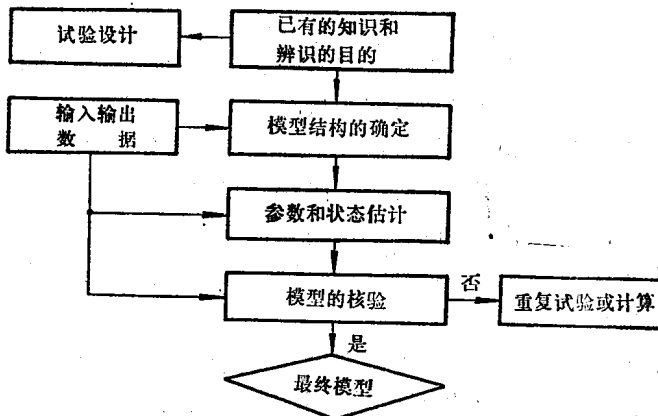


图 0—1 系统辨识的概略内容和步骤

在许多情况下，为了得到试验设计所必要的知识，必须进行一些所谓预备性试验（它们也是系统辨识的组成部分），可以用一些简单的办法，如阶跃响应法、频率响应法等。通过这些试验，获得系统的信息如下：

- (1) 主要的时间常数；
- (2) 允许的输入信号幅度；
- (3) 过程的非线性与时变性；
- (4) 噪声水平；
- (5) 变量之间的延迟等。

如果系统允许输入扰动信号，如何选择输入信号将是一个很重要的问题。根据不同输入扰动信号的特点，可以应用不同的辨识方法。现在实际中常用阶跃信号、方波、窄脉冲、二进制伪随机噪声等，都是有效的输入信号。

试验设计的另一个重要问题是采样速度。一般采样速度是根据过程的动态和输入信号特性而定，但是预先精确地确定一个最优采样速度是很复杂的。所以在一般工业装置上收集数据时，可采用实际可能的较短的时间间隔。在数据分析时，可根据需要隔几个数据取一个数据。

试验的时间问题。在正常工况下，辨识精度取决于试验的时间长短，愈长愈好。在试验中，如果过程变化复杂，试验时间不够长可能会得出完全错误的模型。

2. 模型结构的分类及确定

模型结构形式的选择，主要取决于模型的应用目的及精度要求。要在模型使用精度和模型的复杂性之间进行权衡。

常用的模型有以下几类：

非参数的-参数的；

连续的-离散的；

时域的-频域的；

单变量的-多变量的；

静态的-动态的；

线性的-非线性的；

时变的-非时变的；

确定性的-随机的；

集中参数的-分布参数的等。

数学模型用数据表格或图形表示，即为非参数模型，例如系统的阶跃响应、脉冲响应和频率响应的记录图形（如 Bode 图）等。如果系统辨识的目的是分析系统的特性，系统的时间常数、截止频率等，可采用非参数模型。如果系统辨识的目的是为了对系统进行精确控制，那么则要采用参数模型。

一般说来，从参数模型转变成非参数模型（图表和特征值）是不困难的，因为这是已知方程的求解和表征其性质的问题。但是，其逆过程，即由非参数模型求参数模型，则往往是困难的。因为这是前者的反问题，即根据已知解求原方程的问题。若模型结构已知，则较容易从非参数模型求出参数模型。

根据系统的空间、时间变量的离散化情况，模型又可以分为三类：

(1) 集中参数模型。空间变量是离散的，时间变量是连续的，如常微分方程、代数方程。

(2) 离散时间模型。空间、时间变量都是离散的，如差分方程、代数方程。

(3) 分布参数模型。空间、时间变量都是连续的，如偏微分方程等。

因为分布参数模型，一般可以在空间上离散化，即它可以变成离散时间模型和集中参数模型，所以本书不介绍对分布参数模型的辨识。

为了获得一个可接受的模型，必须重新考虑模型结构的选择。当然，模型结构的确定，要尽量利用对过程本身的物理意义的认识。若能从物理上得到某种模型结构的话，是很有利的。

对一个模型也常常需要衡量它的近似程度，因为有时一个和数据符合得很好的模型，其结构也可能是错误的，例如阶数不对或存在滞后相差，这时需要通过一些统计方法进行检验。

3. 参数和状态的估计方法

模型结构确定后，其中的未知部分就需要通过实验数据去估计。模型的未知部分绝大多数情况是以未知参数出现的，因此，参数估计的方法将是后面要讨论的主要内容之一。

参数估计的要求就是要辨别出来的模型与实际的过程在某种意义下是最“接近”的，“接近”是用一个准则来衡量的，这个准则是衡量在同样的输入时，模型的输出与过程的实际输出之间的误差大小。例如通常用的参数估计的最小二乘法所依据的准则就是模型输出与过程输出之间的误差平方和最小。

当系统的模型是状态空间模型时，有时还需要对它的状态进行估计，尤其是递推估计。系统的状态估计，是系统辨识的组成部分。

4. 模型的校验

一个模型被辨识出来之后，是否是可靠的，即是否真实地反映出过程的特性，是需要核验的。如何检验一个已得到的模型，至今还未有很好的解决。模型的好坏主要应在控制系统的实际运行中来鉴定。

为了得到可靠的模型，需要进行多次实验。更重要的是用一套数据辨识出来的模型要用另一套数据来验证和修改。如此交错地核对，可以对模型的质量得到很好的验证。

所有拟定的假设，在可能时都要进行校验。例如时间不变性、线性性、模型的阶次、正态性以及噪声是否有有色等等。另一方面，由于实验中的种种限制，实际上不可能对各项都进行校验，只能根据实验所得资料和对过程的了解，来判断模型是否处于合理的偏差范围之内。

前已述及，系统辨识与最优控制结合即构成自适应控制，但最优控制和自适应控制是有差别的。最优控制是在对象模型已知以及干扰的统计特性已知的情况下设计最优控制律，而自适应控制问题却是在对象的数学模型先验知识甚少的条件下研究最优控制律的设计问题，即需要根据系统运行的信息，应用在线辨识的方法，使模型逐步完善，也使综合出来的控制律不断获得改进。尽管起初关于系统的先验知识甚少，但是通过辨识系

统的模型和干扰的模型，可以使控制系统获得适应能力。

对过程的自适应控制，一般可由两种方法实现：一是进行明显的辨识，以减小过程和干扰的不确定性；另一方法是降低与过程品质直接有关的不确定性，此时由过程取出的信息直接被用于控制器和品质估计器中。前一种方法所对应的控制系统，称之为参数自适应系统；后一种方法所对应的控制系统，称之为品质自适应控制系统。本书主要介绍参数自适应控制系统。

参 考 文 献

- [1] 钱学森、宋健著，工程控制论（修订版）上册，科学出版社，1980。
- [2] 王寿云等编著，系统工程名词浅释，科学出版社，1982。
- [3] Zedeh, L.A., "From Circuit Theory to System Theory" Proc. TRE, Vol. 50.
- [4] K.J. Åström, 系统辨识，应用数学与计算数学。1979, 2, 65—72页。
- [5] I. Gustavsson, 识别在化学与物理过程中的应用述评，应用数学与计算数学。1972, 2, 73—91页。
- [6] K.J. Åström and P. Eykhoff, System Identification—A Survey. Automatica, Vol. 7, No. 2, PP. 123—162.
- [7] K.H. Fasol, H.P. Jörgl, 建模与辨识，《系统辨识》入门，中国科学院系统科学研究所编印。
- [8] 袁震东、卢桂章、张永光，《系统辨识》综述，现代控制理论及其应用研究报告（第四集），上海师范大学数学系。
- [9] 袁震东，系统测辨的现状与发展趋势——综述与参加 IFAC 第五届测辨会议观感。信息与控制，1980, 3。
- [10] 李国平等，数学模型与工业自动控制，第一卷，总论与模型的建立。湖北人民出版社，1978, 10。
- [11] 潘裕焕编著，生产过程自动化的数学模型，科学出版社，1977。
- [12] 卢桂章等编，化工自动化丛书，现代控制理论基础，上册，数学基础与数学模型识别，化学工业出版社，1981。
- [13] W.D.T. 戴维斯著，潘裕焕译，自适应控制的系统识别，科学出版社，1977。
- [14] P. 艾克霍夫著，潘科英等译，系统辨识，参数和状态估计，科学出版社，1980。
- [15] 动态系统辨识——试验设计与数据分析，张永光、袁震东译，科学出版社，1983。
- [16] 古田胜久著，线形システムの观测と同定，コロナ社。
- [17] 相良节夫等著，システム同定，社团法人计測自動制御学会。
- [18] 近藤次郎著，数学モデル，現象の数式化，1976。

- [19] 韩光文编, 辨识与参数估计, 国防工业出版社, 1980。
- [20] 徐南荣等编, 自适应控制, 国防工业出版社, 1980。
- [21] 韩曾晋编, 自适应控制系统, 机械工业出版社, 1983。
- [22] 陈锡康等著, 经济数学方法与模型, 中国财政经济出版社, 1982。
- [23] 李卓立著, 应用经济计量模型与经济预测, 清华大学出版社, 1981。

第一章 辨识线性系统传递函数的 过渡响应和频率响应法

§ 1.1 引言

在引论中已述及，模型可以有不同的形式。在单输入单输出系统的过渡响应分析中，采用传递函数的复频域法较为简单和适用；而在多输入、多输出的最优控制系统中，时间域法（状态空间法）更有发展前途。

单输入和单输出的线性控制系统不仅可以独立使用，而且还可以作为大规模控制系统的终端、检测或执行机构的组成部分，广泛的应用于实际工业过程。在六十年代前后，虽然现代控制理论的出现和数字计算机的应用，使控制理论有一个飞跃发展，但它绝不能代替古典的控制理论。正确的观点是，古典的控制理论和现代的控制理论各有所长，各有所短。今后的方向是二者互为补充，互相渗透，并在共同的客观物理背景基础上统一起来。目前有许多研究工作已开始使二者的概念和方法相互沟通，其间的界限正在消融。做为自动控制理论组成部分的系统辨识这一学科，也应向这一方向发展。

从发展的观点来看，用过去和现在还大量使用的由实验法建立的数学模型——传递函数来描述单输入单输出线性系统的方法，无疑是系统辨识的重要组成部分。另外，在许多情况下，这种方法又可以为更复杂的系统数学模型的辨识做预备性试验。可以讲，这种方法又是系统辨识的基础。这种方法是属于连续系统数学模型的辨识领域，与离散系统模型辨识相比，其研究相对地说要少得多。近年来，从文献报道上看，国外有加强这方面研究的趋势。因而，用系统辨识的观点对这种方法进行概括的介绍是必要的。

建立单输入/单输出线性系统动态特性的数学模型有过渡响应（时间域）法和频率响应（复频域）法。过渡响应法研究系统输入量为某种时间函数的形式时，其输出量随时间变化的关系。频率响应法研究输入不同频率的正弦波信号时，系统的增益和相位特性。因为过渡响应表示了系统在时间域上的性质，所以在直观上容易掌握它的意义。频率响应（特性）是系统在频率域中的性质，其性质不象过渡响应那样具体形象，但它却更能反应系统的本质。而二者密切关连，可以相互转换。显然，过渡响应或是频率响应可以从不同的角度出发，来表示同一系统的性质。

采用上述两种方法，又可分别得到系统的非参数模型和参数模型，最终的目的是求出它的参数模型——传递函数。

本章§ 1.2 节首先介绍用于古典控制理论的数学模型 的分类及其转换和辨识时所用的输入信号的形式。

§ 1.3~§ 1.5 节主要介绍用时域法，即非周期输入信号的方法，对定常线性系统的非参数模型辨识和在非参数模型的基础上建立系统的参数模型。

§ 1.6~§ 1.7 节主要介绍用频率域方法,即输入周期信号的方法,对定常线性系统的非参数模型进行辨识和在非参数模型的基础上建立系统的参数模型。

对定常线性系统非参数模型辨识的最终目的,也是要建立系统的参数模型——传递函数,以使用频率域的方法分析和设计控制系统。

§ 1.8 节在上述的基础上,讨论了多变量的定常(时变)线性系统的传递函数阵的辨识问题,并由此说明古典控制论和现代控制论在方法上的界限,以及在同一个客观物理背景的基础上统一起来的可能性。

§ 1.2 参数模型及其转换和输入信号

一、参数模型分类及其转换

在时间域中,描述线性动态系统的数学模型主要有:

1. 微分方程

如图 1.2.1 所示,某个线性系统的输入量 $u(t)$ 表示,输出量用 $y(t)$ 表示,那末可用下述微分方程描述一般定常线性系统的动态特性:

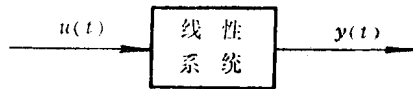


图 1.2.1 定常线性系统方框图

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_m u^{(m)}(t) + b_{m-1} u^{(m-1)}(t) + \dots + b_1 u'(t) + b_0 u(t) \quad (1.2.1)$$

2. 脉冲响应函数 $g(t)$

当系统的输入量为一个“单位脉冲”时,输出量随时间的变化过程,称之为脉冲响应函数。当系统输入任意量 $u(t)$ 时,则有

$$y(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau) g(t-\tau) d\tau \quad (1.2.2)$$

当考虑 $\tau > t$ 时, $g(t-\tau) = 0$, 则上式可改写成:

$$y(t) = \int_0^t u(\tau) g(t-\tau) d\tau \quad (1.2.3)$$

或表示成

$$y(t) = \int_0^t g(\tau) u(t-\tau) d\tau \quad (1.2.3)$$

这个公式称为 $u(t)$ 与 $g(t)$ 的卷积,而 $g(t)$ 又称为加权函数。由此可知,若知道“脉冲响应函数” $g(t)$, 就可以求得任意输入量 $u(t)$ 所对应的输出量 $y(t)$ 。

3. 阶跃响应函数 $k(t)$

当输入为单位阶跃函数 $u(t)$

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.2.4)$$

则有阶跃响应函数

$$k(t) = \int_0^{\infty} g(t-\tau) d\tau \quad (1.2.5)$$