

21 世纪高等院校教材

# 系统辨识及其 MATLAB 仿真

侯媛彬 汪 梅 王立琦 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统地论述了古典、现代辨识理论和方法,并探讨了多种如神经网络、遗传神经网络算法、模糊神经网络新的非线性智能辨识技术,介绍了诱导和辨识混沌的方法。分析了各种方法的一致性及特点,并探讨了 MATLAB 软件对各类辨识方法的实现途径。全书共分 8 章,在理论分析的基础上,列举了大量的仿真程序、程序剖析和工程应用实例。本书内容新颖、信息量大,并附开发的多种与辨识相关的源程序光盘,为读者提供了学习或模仿的样本。

本书可供自动化、测控、通信、安全类及相关专业高校师生和工程技术人员选用。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

系统辨识及其 MATLAB 仿真/侯媛彬,汪梅,王立琦编著.—北京:科学出版社,2004

(21 世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-012737-4

I. 系… II. ①侯…②汪…③王… III. ①系统辨识-高等学校-教材 ②计算机仿真-计算机辅助计算-软件包, MATLAB-高等学校-教材 IV. ①N945.14 ②TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 126445 号

---

策划编辑:刘俊来 李艳霞/文案编辑:彭 斌 姚 晖/责任校对:钟洋  
责任印制:安春生/封面设计:陈 敬

**科 学 出 版 社** 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2004 年 2 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2004 年 2 月第一次印刷 印张:16 1/4

印数:1—4 000 字数:312 000

**定价:20.00 元(含光盘)**

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

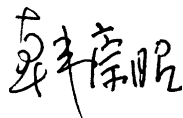
## 序

在自然科学和社会科学的各个研究领域,越来越多的专家学者在关注与寻求着各自研究领域的系统(或过程)建模问题。系统辨识属于近十年发展起来的信息、控制与系统科学的新兴交叉学科,其研究内容是关于系统建模理论和方法。MATLAB是美国 Mathworks 公司推出的应用软件,其优秀的数值计算能力和强大的扩展功能几乎能够满足所有的计算需求,一经推出就得到了专家学者和科研人员的广泛关注。《系统辨识及其 MATLAB 仿真》一书是系统辨识建模理论与 MATLAB 仿真软件融合的产物,是信息与控制的前沿研究领域。

本书第一作者西安科技大学博士生导师侯媛彬教授现担任中国自动化学会电气工程自动化专业委员会委员、陕西省自动化学会常务理事、学校省级重点学科“控制理论与控制工程”的学科带头人,长期从事本专业的教学和科研工作,多年来一直站在本学科的前沿,主持和参加省部级项目 10 余项,发表科技论文 90 余篇,其中 16 篇被 EI 和 ISTP 检索,出版著作、教材 4 本。在系统工程,复杂系统的辨识、建模、故障诊断,安全生产与监测监控方面做了大量的研究工作,得到了国内外同行专家的好评。本书的第二作者西安科技大学副教授汪梅博士和第三作者西安交通大学副教授王立琦博士也长期从事系统辨识教学及相关科研工作。作者们正是在这些积累的基础之上,编著了《系统辨识及其 MATLAB 仿真》一书。

全书系统地论述了古典辨识的相关分析法,现代辨识的最小二乘法、梯度校正法、极大似然法、离散随机系统的自适应滤波理论和方法,并探讨了多种新的非线性智能辨识技术,如神经网络辨识、遗传神经网络算法、模糊辨识、Volterra 辨识方法、复杂系统的混沌现象及其辨识等新的辨识方法。分析了各种方法的一致性及特点,并探讨了 MATLAB 软件对各类辨识方法的实现途径,在分析了各类辨识编程方法的基础上,开发了 13 种可直接在 MATLAB 6.1 下运行的系统辨识程序,给出了程序剖析和工程应用实例,并附有习题和仿真光盘,为读者提供了学习、模仿的样本。

由于近年很少有系统辨识方面的新书问世,尤其是将系统辨识与 MATLAB 软件相融合的书籍在国内外尚未见到。因此,本书对于复杂系统的辨识和 MATLAB 软件的普及应用及智能控制学科的发展将起着较大的促进作用。



2004 年 1 月于西安交通大学

# 前 言

在社会和生产中,越来越多需要辨识系统模型的问题已广泛引起人们的重视,社会科学和自然科学各个领域中有许多学者在研究有关线性和非线性的辨识问题。作者在多年从事系统辨识教学及与智能控制相关的科研积累基础之上,编著了《系统辨识及其 MATLAB 仿真》一书。

本书系统地论述了古典、现代辨识理论和方法,并探讨了多种新的非线性智能辨识技术,分析了各种方法的一致性及特点,并探讨了 MATLAB 软件对各类辨识方法的实现途径。本书内容新颖、信息量大,在分析了各类辨识编程方法的基础上,列举了开发的 13 种系统辨识及其相关的程序,给出了程序剖析和工程应用实例,并附有习题和仿真光盘(光盘上附有开发的 13 个各类辨识程序,可直接在 MATLAB 6.1 下运行。光盘压缩文件密码:HYBWM),为读者提供了学习、模仿的样本。

本书是 MATLAB 仿真软件与系统辨识建模理论融合的一种新技术,是信息与控制的前沿研究领域。其主要特点是:结构新颖,内容深入浅出,理论联系实际,不仅系统地论述了古典辨识、现代辨识理论和方法,还探讨了多种新的非线性智能辨识技术,如神经网络、遗传神经网络算法、模糊神经网络等新的辨识。

本书共分 8 章,第 1、2 章为辨识的基本概念、理论基础和古典辨识方法;第 3 至 6 章为现代辨识内容,其中第 3 章是最小二乘参数辨识,第 4 章是梯度校正参数辨识,第 5 章是极大似然法的参数辨识方法,第 6 章是自适应参数辨识;第 7、8 章为复杂的非线性系统的智能辨识和混沌辨识,其中第 7 章是非线性系统的神经网络辨识;第 8 章是 Volterra 辨识方法、复杂系统的混沌现象及其辨识。从第 2 至 7 章,各章均包含开发的相应程序及其程序剖析。

本书的第 1、2、5、7 章由侯媛彬教授执笔,第 3、4、6 章由汪梅博士执笔,第 8 章由王立琦博士执笔。

西安交通大学博士生导师韩崇昭教授审阅了全书并提出了宝贵的意见。清华大学博士生导师萧德云教授、电子科技大学博士生导师焦李成教授和西安建筑科技大学博士生导师任庆昌教授对本书提出了宝贵的意见,在此一并深表感谢!另外,在本书编写过程中,编者的研究生祝海江博士、李秀改博士、高赟博士、杜京义博士、张海峰硕士、王勇硕士、吴杰硕士、陈中亮硕士、李红岩硕士、涂克颇硕士、王征硕士、阎小如硕士、宋春峰硕士给予了支持与帮助,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中错误在所难免,欢迎读者批评指正并提出宝贵意见。

作 者  
2004 年 1 月

# 目 录

序

前言

第 1 章 辨识的基本概念	1
1.1 系统和模型	1
1.1.1 模型的表现形式	1
1.1.2 数学模型的分类	3
1.2 辨识建模的定义	3
1.3 辨识问题的表示形式及原理	4
1.3.1 辨识问题的表达形式	4
1.3.2 辨识算法的基本原理	6
1.3.3 误差准则	7
1.4 辨识的内容和步骤	9
1.5 典型的非线性系统辨识与控制方法	11
1.5.1 非线性辨识典型模型及辨识、控制方法特点	11
1.5.2 非线性系统参数估计的特点	13
1.5.3 神经网络及其系统控制结构	14
1.5.4 非线性解耦问题	16
1.5.5 需要深入研究的非线性问题	17
1.6 小结	19
习题	20
第 2 章 辨识理论基础及古典辨识方法	21
2.1 随机过程基本概念及其数学描述	21
2.1.1 基本概念	21
2.1.2 相关函数和协方差函数的性质	23
2.2 谱密度与相关函数	24
2.2.1 帕塞瓦尔(Parseval)定理与功率密度谱表示式	24
2.2.2 维纳-辛钦(Wiener-Khintchine)关系式	24
2.3 线性系统在随机输入下的响应	25
2.4 白噪声产生方法及其仿真	26
2.4.1 白噪声的概念	26

2.4.2	白噪声的产生及其 MATLAB 仿真 .....	28
2.4.3	伪随机信号产生及 MATLAB 仿真举例 .....	33
2.5	古典辨识方法 .....	36
2.5.1	$M$ 序列自相关函数 .....	37
2.5.2	逆 $M$ 序列 .....	38
2.5.3	相关分析法频率响应辨识 .....	39
2.5.4	相关分析法脉冲响应辨识 .....	43
2.5.5	相关分析法脉冲响应应用 .....	49
2.6	小结 .....	51
	习题 .....	51
<b>第 3 章</b>	<b>最小二乘参数辨识</b> .....	<b>53</b>
3.1	最小二乘法的概念 .....	53
3.1.1	系统辨识结构 .....	53
3.1.2	最小二乘法的基本概念 .....	54
3.2	最小二乘问题的描述 .....	55
3.3	最小二乘问题的一次完成算法 .....	57
3.3.1	普通最小二乘问题的解 .....	57
3.3.2	加权最小二乘问题的解 .....	57
3.4	最小二乘一次完成算法的 MATLAB 仿真 .....	60
3.5	最小二乘参数估计的递推算法 .....	63
3.5.1	递推算法的概念 .....	64
3.5.2	递推算法的推导 .....	64
3.6	最小二乘递推算法的 MATLAB 仿真 .....	67
3.7	增广最小二乘法 .....	73
3.8	增广最小二乘辨识的 MATLAB 仿真 .....	74
3.9	广义最小二乘法 .....	81
3.10	多级最小二乘法 .....	83
3.10.1	辅助模型参数辨识 .....	84
3.10.2	系统模型参数辨识 .....	84
3.10.3	噪声模型参数辨识 .....	85
3.11	小结 .....	87
	习题 .....	88
<b>第 4 章</b>	<b>梯度校正参数辨识</b> .....	<b>90</b>
4.1	确定性问题的梯度校正参数辨识方法 .....	90
4.1.1	确定性梯度校正辨识公式的推导 .....	90

4.1.2 权矩阵的选择 .....	91
4.2 脉冲响应梯度校正辨识的 MATLAB 仿真 .....	95
4.3 随机性问题的梯度校正参数辨识方法 .....	101
4.3.1 随机性问题的提法 .....	101
4.3.2 随机性辨识问题的分类 .....	102
4.3.3 随机性问题的梯度校正参数估计方法 .....	104
4.4 梯度校正法在动态过程辨识中的应用 .....	112
4.4.1 状态方程的参数辨识 .....	113
4.4.2 差分方程的参数辨识 .....	116
4.5 随机逼近法 .....	117
4.5.1 随机逼近原理 .....	117
4.5.2 随机逼近参数估计方法 .....	120
4.5.3 随机牛顿法 .....	123
4.6 小结 .....	124
习题 .....	125
<b>第 5 章 极大似然法辨识方法</b> .....	<b>126</b>
5.1 引言 .....	126
5.2 极大似然参数辨识原理 .....	126
5.3 动态系统模型参数的极大似然估计 .....	129
5.3.1 动态模型描述 .....	129
5.3.2 极大似然估计与最小二乘估计的关系 .....	130
5.3.3 协方差阵未知时的极大似然参数估计 .....	132
5.4 递推的极大似然参数估计 .....	139
5.4.1 极大似然递推算法的原理及方法 .....	139
5.4.2 似然递推法辨识 MATLAB 仿真及程序剖析 .....	143
5.5 小结 .....	146
习题 .....	147
<b>第 6 章 离散随机系统的自适应滤波</b> .....	<b>148</b>
6.1 Bayes 辨识方法 .....	148
6.1.1 Bayes 基本原理 .....	148
6.1.2 最小二乘模型的 Bayes 参数辨识 .....	152
6.2 Bayes 辨识的 MATLAB 仿真 .....	154
6.3 Kalman 滤波 .....	160
6.3.1 预测、滤波与平滑 .....	160
6.3.2 高斯变量估计 .....	161

6.3.3	Kalman 滤波与预测	163
6.4	模型参考自适应辨识方法	172
6.4.1	$\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 的确定	175
6.4.2	$\epsilon(k)$ 的计算	176
6.4.3	A 辨识算法类	177
6.4.4	B 类辨识算法	178
6.4.5	C 类辨识算法	178
6.5	小结	180
	习题	180
<b>第 7 章</b>	<b>神经网络模型辨识</b>	<b>182</b>
7.1	神经网络概念与特性	182
7.1.1	人工神经元模型	182
7.1.2	激发函数	183
7.1.3	神经网络模型分类	184
7.1.4	神经网络学习方法	185
7.1.5	神经元网络特点	188
7.2	神经网络模型辨识中常用结构	189
7.3	辨识中常用网络训练算法	192
7.3.1	自适应控制系统基本结构	192
7.3.2	辨识中常用 BP 网络训练算法	194
7.4	改进的 BP 网络训练算法	197
7.4.1	基于降低网络灵敏度的网络改进算法	198
7.4.2	提高一类神经网络容错性的理论和方法	201
7.4.3	提高神经网络收敛速度的一种赋初值算法	203
7.4.4	其他网络训练技巧	209
7.5	神经网络辨识的 MATLAB 仿真举例	210
7.5.1	具有噪声二阶系统辨识的 MATLAB 程序剖析	210
7.5.2	多维非线性辨识的 MATLAB 程序剖析	214
7.6	基于改进遗传算法的神经网络及其应用	218
7.6.1	一种适应度函数的改进算法	218
7.6.2	一种改进的遗传神经解耦方法	220
7.6.3	遗传神经解耦仿真、实验及结论	221
7.7	模糊神经网络及其应用	222
7.7.1	模糊神经网络原理及其应用	222
7.7.2	FNN 对非线性多变量系统的 MATLAB 解耦仿真	225



7.8 小结 .....	229
习题 .....	230
<b>第 8 章 非线性动态系统的其他辨识方法</b> .....	232
8.1 Volterra 级数的表示及其辨识方法 .....	232
8.1.1 非线性系统 Volterra 级数的表示 .....	233
8.1.2 Volterra 级数的辨识 .....	234
8.2 复杂系统的混沌现象及其辨识 .....	235
8.2.1 反馈系统和优化过程中的混沌现象 .....	236
8.2.2 基于控制理论的混沌分析方法 .....	238
8.2.3 混沌识别与混沌系统辨识 .....	240
8.3 小结 .....	244
习题 .....	244
<b>参考文献</b> .....	245
<b>光盘目录</b>	
<b>第一部分 开发的程序</b>	
1 FLch2sjxleg1.m .....	随机序列产生程序
2 FLch2bzsheg2.m .....	白噪声产生程序
3 FLch2bzsheg3.m .....	$M$ 序列产生程序
4 FLch3LSeg1.m .....	二阶系统一次性完成最小二乘辨识程序
5 FLch3LSeg2.m .....	实际压力系统最小二乘辨识程序
6 FLch3RLSeg3.m .....	递推的最小二乘辨识程序
7 FLch3ELSeg4.m .....	增广的最小二乘辨识程序
8 FLch4GAeg1.m .....	梯度校正最小二乘辨识程序
9 FLch5RMLeg1.m .....	递推的极大似然法辨识程序
10 FLch6BAeg1.m .....	Bayes 辨识程序
11 FLch7NNeg1.m .....	改进的神经网络 MBP 算法对噪声系统辨识程序
12 FLch7NNeg2.m .....	多维非线性函数辨识的 MATLAB 程序
13 FLch7FNNeg3.m .....	模糊神经网络解耦 MATLAB 程序
<b>第二部分 程序的注释与剖析</b>	
次序同第一部分	

# 第 1 章 辨识的基本概念

在社会和生产中,越来越多需要辨识过程(或系统)模型的问题已广泛引起人们的重视,社会科学和自然科学各个领域有很多学者在研究有关线性和非线性的辨识问题。对于线性系统的模型辨识和参数估计,早在 20 世纪 60 年代初期,Zadeh 就给出了系统辨识的定义,人们已经进行了深入的研究,并总结出一套成熟的方法:最小二乘辨识方法、最大似然辨识方法、梯度法辨识等等。这些理论和方法已在工程实际中得到了广泛的应用。然而在现实中,非线性是普遍存在的,而非线性模型只是对非线性的一种简化和近似。对非线性系统的研究、设计要比线性系统复杂得多。且方法并非惟一,更找不到统一的设计模式。只能是针对具体问题分析其非线性的问题所在,抓住其影响系统静、动态品质的要害,研究辨识非线性系统模型及控制的理论和方法,进而对系统进行辨识、补偿或控制。若能够通过辨识得到其较准确的模型,则是控制问题的关键。本章主要介绍系统辨识的基本概念;1.1 节系统和模型,其中包括模型的表现形式及数学模型分类;1.2 节辨识的定义;1.3 节辨识问题的表示形式及原理,其中包括辨识问题的表达形式、辨识算法的基本原理和误差准则;1.4 节辨识的内容和步骤;1.5 节介绍典型的非线性系统辨识与控制方法。

## 1.1 系统和模型

### 1.1.1 模型的表现形式

系统是通过模型来表达的,因此系统辨识也称为模型辨识。模型有如下一些表现形式:

(1) “直觉”模型。它指过程的特性以非解析的形式直接储存在人脑中,靠人的直觉控制过程的进行。例如,司机就是靠“直觉模型”来控制汽车的方向盘。

(2) 物理模型。它是根据相似原理把时间过程加以缩小的复制品,或是实际过程的一种物理模拟。比如:电力系统动态模型、某种控制机床模型或风洞、水利学模型、传热学模型等均是物理模型。

(3) 图表模型。它以图形或表格的形式来表现过程的特性。如阶跃响应、脉冲响应和频率响应等,也称非参数模型。

(4) 数学模型。它用数学结构的形式来反映实际过程的行为特性。常用的有代数方程、微分方程、差分方程和状态方程。

a. 经济学上的 Cobb-Douglas 产生关系模型(代数方程)

$$Y = AL^{a_1} K^{a_2}, \quad a_1 > 0; \quad a_2 < 1 \quad (1.1)$$

式中,  $Y$  为产值;  $L$  为劳动力;  $K$  为资本。

b. 微分方程

$$\begin{aligned} z^{(n)}(t) + a_1 z^{(n-1)}(t) + a_2 z^{(n-2)} \cdots + a_{n-1} z^{(1)}(t) + a_n z(t) \\ = b_1 u^{(m-1)}(t) + b_2 u^{(m-2)} \cdots + a_{m-1} u^{(1)}(t) + b_m u(t) + e(t) \end{aligned} \quad (1.2)$$

式中,  $u(t)$  和  $z(t)$  为输入输出量;  $e(t)$  为噪声项。

c. 差分方程

$$A(z^{-1})z(k) = B(z^{-1})u(k) + e(k) \quad (1.3)$$

式中

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \cdots + a_n z^{-n} \\ B(z^{-1}) &= b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \cdots + b_n z^{-n} \end{aligned} \quad (1.4)$$

即

$$\begin{aligned} z(k) + a_1 z(k-1) + a_2 z(k-2) + \cdots + a_n z(k-n) \\ = b_1 u(k-1) + \cdots + b_n u(k-n) + e(k) \end{aligned} \quad (1.5)$$

式中,  $u(k)$  和  $z(k)$  为输入输出量;  $e(k)$  为噪声项;  $z^{-1}$  表示延迟算子, 即  $z^{-1}x(k) = x(k-1)$ 。

d. 状态方程

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + bu(t) + F\omega(t) \\ z(t) &= cx(t) + hw(t) \end{aligned} \quad (1.6)$$

或

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + bu(k) + F\omega(k) \\ z(k) &= cx(k) + hw(k) \end{aligned} \quad (1.7)$$

式中,  $u(\cdot)$  和  $z(\cdot)$  为输入输出量;  $x(\cdot)$  为状态变量;  $\omega(\cdot)$  和  $w(\cdot)$  为噪声项。

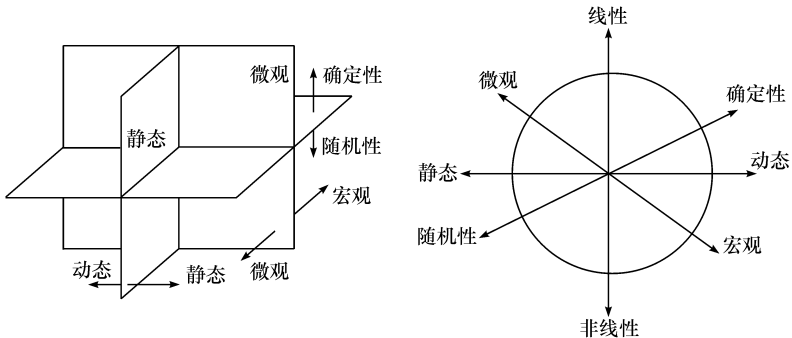


图 1.1 数学模型的分类

### 1.1.2 数学模型的分类

一般来说,系统的特性有线性与非线性、动态与静态、确定性与随机性、宏观与微观之分,故描述系统特性的数学模型必然也有这几种类型的区分。这些类型的数学模型可以用图 1.1 来表示。另外,也有参数模型和非参数模型;外部模型(SISO 系统)和内部模型(MIMO 系统)等不同分类。

## 1.2 辨识建模的定义

系统模型建立(建模)分为机理建模、系统辨识建模、机理分析和系统辨识相结合的建模方法。①机理建模是一种常用的建模方法,是根据系统的结构,分析系统运动的规律,利用已知的相应的定律、定理或原理,如化学动力学原理、生物学定律、牛顿定理、能量平衡方程和传热传质原理等推导出描述系统的数学模型,建立的模型可能是线性的或非线性的,这类建模有时也称为白箱建模。②系统辨识是一种利用系统的输入输出数据建模的方法,是黑箱建模问题,即使对系统的结构和参数一无所知,也可以通过多次测量得到的系统的输入和输出的数据来求得系统的模型,是对实际系统的一个合适的近似。在这方面线性系统的建模(辨识)理论已成熟,有关学科的专业知识要求不变,获得的模型较简单。③机理建模和辨识建模结合的方法适用于系统的运动机理不是完全未知的情况,称之为灰色建模。利用已知的运动机理和经验确定系统的结构和参数(即确定模型)。

辨识问题包括模型结构辨识和参数估计。所谓参数估计或点估计问题,即设  $x$  为一未知参数,可以视为参数空间  $X$  中的一个点,测量  $y$  是一随机向量,其分量依赖于参数  $x$ 。即根据  $y$  的一组样本(观测值)对参数  $x$  的估计就称为参数估计问题。而系统辨识是研究如何获得必要的系统输入输出的数据(样本),以及如何从所获得的数据构造一个相对真实地反映客观对象的数学模型。L. A. Zadeh 在 1962 年曾给系统辨识下一个定义:

**定义 1.1** 辨识就是在输入和输出的基础上由规定的一类系统模型中确定一个系统模型,使之与被测系统等价。

这个定义明确了辨识的三大要素:系统的输入输出数据、模型类和等价准则。这个定义中提到的“一类系统模型”是指规定的连续时间模型或离散时间模型、输入输出模型或状态空间模型、确定性模型或随机模型、线性模型或非线性模型等。模型类的规定是根据人们对实际系统的了解以及建立模型的目的设定的。规定了模型类后,再由输入输出数据按结构辨识的方法确定系统的结构参数,并且用参数辨识的方法辨识系统的参数。

根据定义,我们所建立的模型必须与被测系统在某种意义上是等价的。

设  $M$  表示被测系统的一个模型,并且满足

$$M \in G_m \tag{1.8}$$

$G_m$ 是具有某种属性的模型类。一个系统可看做是从系统允许的输入空间  $U$  到输出空间  $Y$  的一个算子  $p$ (相当于对象  $M$ ),  $p$  属于某个算子类  $G$ 。系统辨识的问题是指对于一个给定的算子类  $G$  和一个对象  $p \in G$ , 确定一个模型类  $G_m$  及它的一个元素  $p_m \in G_m$ (可以认为  $G_m$  是  $G$  的一个子集), 使得  $p_m$  尽可能的逼近  $p$ 。在实际的被控系统中, 可以采集到对象的输入和输出的数据, 现认为时间函数  $u(t)$ ,  $y(t)$ ,  $t \in [0, T]$  所表示的输入、输出对可以定义这个系统  $p$ , 这时辨识的目标是确定  $p_m$ , 并且满足

$$\| y(u) - y_m(u) \| = \| p(u) - p_m(u) \| \leq \epsilon, u \in U, \epsilon > 0 \tag{1.9}$$

模型不确定的非线性系统的辨识应属于黑箱辨识问题。对于黑箱辨识方法, 被测对象所属的算子是未知的, 由于输入、输出对隐含地表示算子  $p$ , 但通常可认为  $p$  属于非线性连续算子集合, 因此可选用对连续算子集合具有任意逼近能力的模型集合。对模型集合的选择主要考虑算法的简单性、模型的适应能力和逼近的精度等因素。对于离散时间系统, 这样的集合有基于多项式的 NARMA 模型, 而基于神经网络所构成的模型也属其中的一种。黑箱法由如下三个步骤组成: 实验观测、数学建模、模型验证。

## 1.3 辨识问题的表示形式及原理

### 1.3.1 辨识问题的表达形式

下面着重讨论线性离散模型的辨识问题。所谓线性离散模型是指一个或几个变量可以表示的另外一些变量在时间或空间的离散点上的线性组合, 如图 1.2 所示。

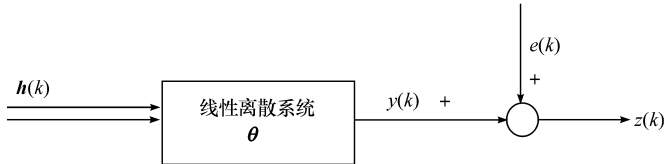


图 1.2 线性离散模型的数学表达形式

图中,  $h(k)$  和  $z(k)$  是模型的输入输出变量, 它们在离散点上必须是可观测的;  $e(k)$  是模型噪声;  $\theta$  是未知模型参数。记

$$\begin{cases} \mathbf{h}(k) = [h_1(k), h_2(k), h_3(k), \dots, h_n(k)]^T \\ \theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_N]^T \end{cases} \quad (1.10)$$

则线性离散模型的输出可表示成

$$z(k) = \sum_{i=1}^N \theta_i h_i(k) + e(k) = \mathbf{h}^T(k) \theta + e(k) \quad (1.11)$$

**例 1.1** 将差分方程化成最小二乘格式。

考虑如下差分方程

$$\begin{aligned} z(k) + a_1 z(k-1) + a_2 z(k-2) + \dots + a_n z(k-n) \\ = b_1 u(k-1) + \dots + b_n u(k-n) + e(k) \end{aligned} \quad (1.12)$$

式中, 方程的输入输出变量  $u(\cdot)$ 、 $z(\cdot)$  在各离散点上都是可观测的。

**解** 设样本及参数集为

$$\begin{cases} \mathbf{h}(k) = [-z(k-1), -z(k-2), \dots, -z(k-n), u(k-1), \\ u(k-2), \dots, u(k-n)]^T \\ \theta = [a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n]^T \end{cases} \quad (1.13)$$

则  $\mathbf{h}(k)$  是可观测的向量, 那么差分方程所对应的最小二乘格式为

$$z(k) = \mathbf{h}^T(k) \theta + e(k) \quad (1.14)$$

如果图 1.3 是被辨识的系统, 则描述它的模型必须是能化成图 1.4 所示的辨识表达式, 即最小二乘格式, 输出量  $z(k)$  应是输入量  $\mathbf{h}(k)$  的线性组合, 如式 (1.14)。

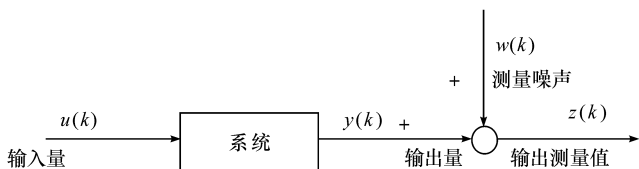


图 1.3 待辨识的过程

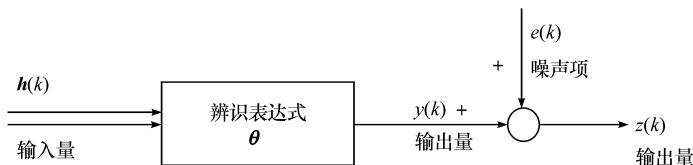


图 1.4 辨识问题的表达式形式

### 1.3.2 辨识算法的基本原理

辨识的目的就是根据系统的测量信息,在某种准则意义下,估计出模型的未知参数,其基本原理如图 1.5 所示。

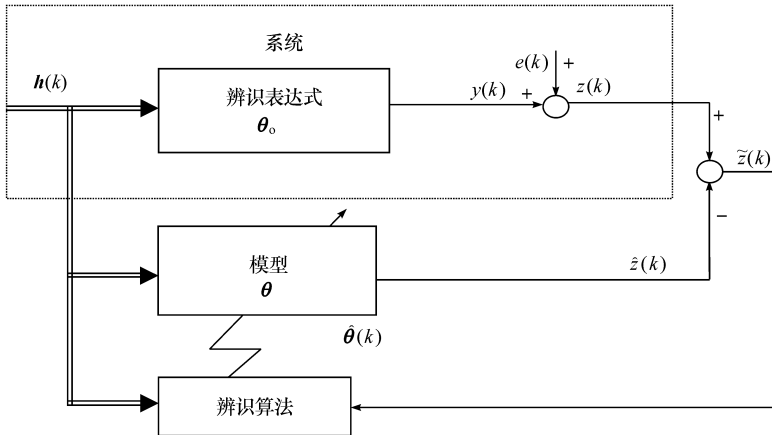


图 1.5 辨识原理

为了得到模型参数  $\theta$  的估计值,通常采用逐步逼近的办法。在  $k$  时刻,根据前一时刻的估计参数计算出模型该时刻的输出,即系统输出预报值

$$\hat{z}(k) = \mathbf{h}^T(k) \hat{\theta}(k-1) \quad (1.15)$$

同时计算出预报误差,或称新息(innovation)

$$\tilde{z}(k) = z(k) - \hat{z}(k) \quad (1.16)$$

图中,系统输出量

$$z(k) = \mathbf{h}^T(k) \theta_0(k-1) + e(k) \quad (1.17)$$

及辨识表达式的输入量  $\mathbf{h}(k)$  都是可测量的。然后将预报误差  $\tilde{z}(k)$  反馈到辨识算法中,在某种准则下计算出  $k$  时刻的模型参数估计值  $\hat{\theta}(k)$ ,并据此更新模型参数。这样依次迭代下去,直至其准则函数达到最小值。此刻模型的输出  $\hat{z}(k)$  便可以在该准则意义下最好的逼近系统的输出  $z(k)$ ,从而获得了所需要的模型。

上述辨识算法原理可以推广到多输出系统。如果系统的输出是  $m$  维向量,那么辨识问题的表达形式应为

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}(k) \theta + \mathbf{e}(k) \quad (1.18)$$

式中,输出向量为

$$\mathbf{z}(k) = [z_1(k), z_2(k), \dots, z_m(k)]^T \quad (1.19)$$

噪声向量为

$$\mathbf{e}(k) = [e_1(k), e_2(k), \dots, e_m(k)]^T \quad (1.20)$$

参数向量为

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T \quad (1.21)$$

输入数据阵为

$$\mathbf{H}(k) = \begin{bmatrix} h_{11}(k) & h_{12}(k) & \cdots & h_{1N}(k) \\ h_{21}(k) & h_{22}(k) & \cdots & h_{2N}(k) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{m1}(k) & h_{m2}(k) & \cdots & h_{mN}(k) \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

该多输出情况下的辨识问题与单输出情况下的辨识问题相同,其辨识原理如图 1.6 所示。

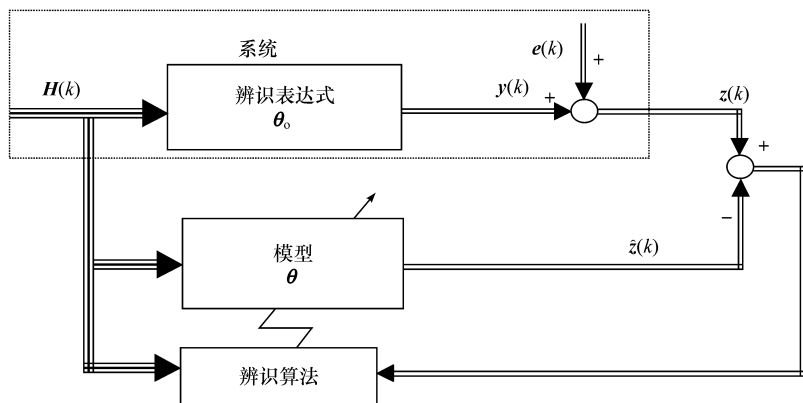


图 1.6 多输出过程的辨识原理

### 1.3.3 误差准则

等价准则是辨识问题中不可缺少的三大要素之一,它是用来衡量模型接近实际过程的准则,而且它通常被表示为一个误差的泛函。因此等价准则也叫做误差准则或损失函数,也称准则函数,记作

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^L f(\epsilon(k)) \quad (1.23)$$

式中,  $f(\cdot)$  是  $\epsilon(k)$  的函数。用得最多的是平方函数,即

$$f(\epsilon(k)) = \epsilon^2[k] \quad (1.24)$$

$\epsilon(k)$  是定义在区间  $(0, L)$  上的误差函数。这个误差函数应该广义地理解为模型与实际过程的“误差”,也可以是输出误差、输入误差或广义误差,如图 1.7 所示。



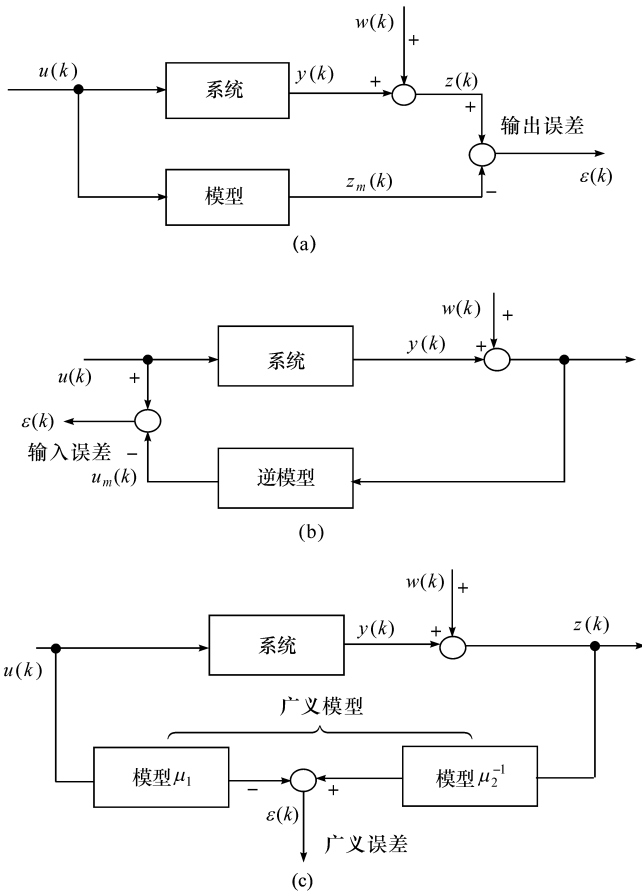


图 1.7 误差准则分类

从图 1.7 可知,将系统的输出和模型的输出的差定义的误差称为输出误差;将系统的输入和逆模型的输出的差定义的误差称为输入误差;而从系统广义模型  $\mu_i$  定义的误差称作广义误差。输出误差在辨识中是应用最广泛的一种误差准则,如图 1.7(a)所示。当实际系统和模型的输出分别记作  $z(k)$ 和  $z_m(k)$ 时,则

$$\epsilon(k) = z(k) - z_m(k) = z(k) - \mu[u(k)] \quad (1.25)$$

称作输出误差。式中,  $\mu[u(k)]$  是当输入为  $u(k)$  时的模型输出。如果扰动是作用在过程输出端的白噪声,那么选用这种误差准则就是理所当然的了。但是,输出误差  $\epsilon(k)$  通常是模型参数的非线性函数,因此在这种误差准则意义下,辨识问题将归结成复杂的非线性最优化问题。比如,如果图 1.7(a)中的模型取脉冲传递函数形式

$$\mu: G(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (1.26)$$

式中

$$\begin{cases} A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_n z^{-n} \\ B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \cdots + b_n z^{-n} \end{cases} \quad (1.27)$$

则输出误差为

$$\varepsilon(k) = z(k) - \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(k) \quad (1.28)$$

且误差准则为

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^L \left[ z(k) - \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(k) \right]^2 \quad (1.29)$$

显然,误差准则函数  $J(\theta)$  关于模型参数空间是非线性的。由于在确定这种情况的最优解时,需要用梯度法、牛顿法或共轭梯度法等迭代的最优化算法,这就使得辨识算法变得比较复杂。在实际应用中是否采用这种误差准则要视具体情况而定。

## 1.4 辨识的内容和步骤

辨识问题分为模型结构辨识和参数辨识(或估计)。当系统模型结构根据工程经验或采用模型结构的辨识确定后,主要的问题是模型的参数估计。从以上分析可见,系统辨识主要包括以下内容 and 步骤:

### 1. 设法取得系统输入输出的观测数据

为了获得一个最大可能接近实际对象特性的数学模型,在条件许可的情况下,要进行辨识实验。我们希望由辨识实验所获得的系统输入输出数据尽可能多地包括对象的信息。辨识实验设计包括:

#### 1) 设计准则

为了对不同的试验方案进行比较,必须给出一个度量试验优劣性的准则。比如参数估计的精度,参数估计量一般是一个随机变量或随机向量,其估计的精度可以用一个估计误差的方差或协方差阵来衡量。数理统计中有下面的重要结论:对于一次完成的采样,参数估计的  $\hat{\theta}$  的协方差满足 Cramer-Rao 不等式

$$\text{cov}\{\hat{\theta}, \theta\} \geq \mathbf{M}_\theta^{-1} \quad (1.30)$$

式中,  $\mathbf{M}_\theta$  为 Fisher 信息函数矩阵,

$$\mathbf{M}_\theta \triangleq \mathbf{E}_\theta \left\{ \left[ \frac{\partial \ln p(\mathbf{z} | \theta)}{\partial \theta} \right]^\top \left[ \frac{\partial \ln p(\mathbf{z} | \theta)}{\partial \theta} \right] \right\} \quad (1.31)$$

式中,  $z$  表示测量数据列;  $\ln p(z|\theta)$  表示给定参数  $\theta$  时希望  $z$  的条件概率密度的自然对数。根据式(1.30), 希望  $M_\theta^{-1}$  尽可能的小, 使得参数估计的精度有可能提高; 又根据式(1.31),  $M_\theta$  又依赖于测量数据, 所以  $M_\theta^{-1}$  依赖于测量数据  $z$ 。因为  $M_\theta$  是一个方阵, 量度的准则一般应为标量函数。在实验中, 通常取

$$J = -\ln \det M_\theta \quad (1.32)$$

作为设计准则。因为测量数据(包括所有的输入输出)与输入信号的选择有关, 我们将推出各种关系的表达式, 并据此设计出最优输入信号。

### 2) 持续激励输入信号的设计

用于辨识模型的输入信号通常要求是零均值的伪随机信号。无论采用何种信号, 都要求信号是持续激励的。

### 3) 采样间隔的设计

在实验之前必须适当地选择采样间隔或输入信号的时序脉冲宽度, 其主要依据是实际系统的采样间隔和所要求的模型精度。采样间隔  $\Delta$  太大, 会影响辨识精度。否则会增加存储量和计算量。一个经验的规则是

$$T_{gs}/\Delta \approx 5 \sim 15 \quad (1.33)$$

式中,  $T_{gs}$  是系统过渡过程时间的 95%; 另外一规则是

$$\Delta \approx T_{\min} \quad (1.34)$$

或

$$\Delta \approx (0.05 \sim 0.1) T_a \quad (1.35)$$

式中,  $T_{\min}$  是对象的最小时间常数,  $T_a$  为系统的主要时间常数。

## 2. 应有一个合适的模型集

为了所辨识的系统能从这个模型集中选择出一合适的模型, 模型集可根据机理所得到的一些未知参数的模型结构, 或是待定参数仅作为数据拟合工具的黑箱模型结构, 也可以是根据系统实际工艺要求或系统预测所得到的一组待拟合曲线数据结构。

### 3. 必须有一个对辨识所得到模型的验证评价

对辨识所得到模型的验证是系统辨识的重要环节。验证的目的是为了确定该模型是否是模型集中针对当前观测数据的最佳选择。验证的方法主要有

(1) 利用先验知识验证, 即根据对系统已有的知识来判断模型是否实用。

(2) 利用数据检验。当利用一组数据辨识得到一个模型之后, 通常希望用另一组未参与辨识的数据检验模型的适用性。如果检验结果失败, 可能存在的问题是: 辨识所用的一组数据包含的信息不足或所选模型类不合适。另外, 也可以用同

一组数据对不同模型进行比较,以选用更合适的模型。

(3) 利用实际响应检验。比较实际系统和模型的阶跃响应或脉冲响应是判别模型是否适用的重要手段。

(4) 利用激励信号  $\{u(k)\}$  的自相关函数校验。若验证  $\{u(k)\}$  是零均值的白噪声序列,相应的模型是可靠的,其置信度为 95%。

## 1.5 典型的非线性系统辨识与控制方法

### 1.5.1 非线性辨识典型模型及辨识、控制方法特点

建立描述非线性现象模型是研究非线性问题的基础,Billings 对以前的非线性系统辨识结果做了一次总结性的综述。Titterton 和 Akitsos 在 1989 年也做了非线性系统辨识的综述。描述非线性系统的典型模型及对非线性辨识、控制的方法有:

#### 1) Volterra 级数

Volterra 级数可表示为

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n u(t - \tau_i) d\tau_i = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t) \quad (1.36)$$

函数  $h_i(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i)$  是 Volterra 级数的核(kernel)。Volterra 的核(特别是频域核)有明确的物理意义。从模型辨识的角度看 Volterra 级数有一个明显的缺点,即需要相当多的被估计参数才能取得满意的精度。例如,当用 Volterra 级数去逼近一个二阶的非线性系统需要  $10^{10}$  个参数。Billings 对这个模型做过详细的研究,提出了几种辨识算法,尽管 Volterra 级数对非线性系统理论、函数逼近、辨识方法的发展有非常重要的推动作用,但认为它很难用过程建模。

#### 2) NARMAX 模型子集

谢菲尔德大学的专家对非线性的辨识做了一次综述,他认为,NARMAX 模型

$$y(k) = F[y(k-1), \dots, y(k-n_a), u(k-1), \dots, u(k-n_b), e(k-1), \dots, e(k-n_e) + e(k)]$$

式中  $F(\cdot)$  是一个非线性函数,  $e(k)$  是一个不可观测的零均值和有限方差的独立噪声,  $k=0, 1, 2, \dots$  是离散时间标量。近年来, Sontag, Billings 和 Chen, Billings 和 Zhu 又找到了另一 NARMAX 模型子集,称为有理(rational)NARMAX 模型,其表达式为

$$y(k) = \frac{a(k)}{b(k)} + e(k) = \frac{\sum_{j=1}^{\text{num}} p_{nj}(k) q_{nj}}{\sum_{j=1}^{\text{den}} p_{dj}(k) q_{dj}} + e(k) \quad (1.37)$$

NARMAX 模型提供了一个统一的有限可实现非线性系统表达式,像双线性型、Wiener 模型、Armax 模型等,其优点是逼近精度高,收敛速度快,对线性参数的子集模型辨识简便。可以用线性最小二乘法进行选项和估计参数。在国外已用在化工领域、海洋工程、电力工程。但当被测对象是多变量系统且阶数较高时,模型中的参数非常多。而且在这种模型中,模型结构辨识问题一直未解决。

### 3) 神经网络(neural network)模型

神经网络近年来得以飞速发展,并已有效地用于非线性系统的辨识和控制。目前广泛使用的有两种神经网络,一种是多层(multi-layer)神经网络,另一种是循环(recurrent)神经网络,从辨识的角度看,多层神经网络代表了静态非线性模型,而循环神经网络代表了动态非线性模型。Narendra 等人提出了多层前馈网络用于非线性辨识的一般框架,Chen 和 Billings 等从基于人工神经网络的 Narma 模型出发,进行了类似的研究,提出了并行递推预报误差辨识方法。另外,模糊控制和神经网络结合产生的模糊神经网络(FNN)也可以用于非线性辨识。

比其他非线性辨识方法优越的是神经网络可以不依赖模型函数,也就是说,可以不用了解被辨识非线性系统(被测系统)输入和输出之间存在何种数学关系。目前用的较多的是具有反传的前馈 BP 网络。只要给定系统输入样本、网络的结构以及系统输出的教师信号,给网络一组输入样本,便可得到对应的网络输出,利用网络输出和教师信号的差值来修正网络的权值和阈值,直至满足要求。换句话说,利用多层网络所具有的对任意非线性映射的逼近能力,来模拟实际系统的输入输出关系。但 BP 算法存在着局部极值和收敛速度慢等无法克服的缺点,这就促使人们去研究其改进的算法。我们对一类非线性系统神经网络辨识作过几种尝试性的改进算法研究,收到了较好效果,其中包括降低一类神经网络灵敏度的理论和方法、提高一类神经网络容错性的理论和方法、提高神经网络收敛速度的一种赋初值算法、改进适应度函数的遗传神经解耦控制器、隶属函数型神经网络与模糊控制融合的方法等<sup>[52~55,58~66]</sup>。这部分内容在第 7 章展开讨论。

### 4) $H_{\infty}$ 控制理论

应用  $H_{\infty}$  控制理论设计的控制器对各种摄动(外部干扰信号,系统内部参数变化,传感器噪声等)的灵敏度最低。这种设计可以使 SISO 系统达到最优,但对 MIMO 系统设计的控制器阶数太高,难以实现。但日本的华人专家 Sheng Tielong 等学者应用  $H_{\infty}$  控制理论对 MIMO 系统的设计和对非线性系统控制做了大量深入的研究,认为,  $H_{\infty}$  控制理论对于非线性系统控制具有较好的前景。

### 5) 扩展的卡尔曼滤波

扩展的卡尔曼滤波可以用于非线性系统的状态估计。尽管贝叶斯(Bayes)估值给出了一种直观的精确定义,但其在每一步的积分运算都是非常困难的,因而很难用于实际计算非线性的状态估计。扩展的卡尔曼滤波实际是把非线性模型进行线性化处理,然后利用卡尔曼滤波进行状态估计。用一阶近似扩展的卡尔曼滤波的精度与系统模型的非线性特性以及噪声水平有关。当非线性函数参考点附近比较平直并且信噪比较高时,该算法一般可获得足够精确的结果。为考察系统精度对系统进行仿真时,如果出现算法发散或精度较差时,可以考虑用二阶近似扩展的卡尔曼滤波方法。

### 6) 微分几何法

微分几何法是研究非线性系统的一种新的工具,其作用相当于 SISO 线性系统的拉氏变换和多变量系统中的线性代数。近年来,非线性系统的几何理论已初步形成,用微分几何方法可以有效的解决非线性系统的能控性、能观性、可逆性、解耦、最小实现及系统的对称性、相似性等问题。

另外,预测(PC)、模糊解耦(FD)、滑模变结构(SMVS)、模型参考自适应(MRAC)、专家控制(EC)或相互的组合的方法均可用于非线性系统的控制。

## 1.5.2 非线性系统参数估计的特点

参数估计是在模型阶或模型的结构已确定后,根据系统所外加的输入样本及实测到的数据求模型中的参数(或模型的数学表达式中与各项有关的系数)。从参数估计的角度看,非线性的模型可分为线性参数模型和非线性参数模型。

系统模型为离散化的方程,其中输出变量中存在大于或等于二次以上的项,其他参数、输入都是线性的,该模型是线性参数的非线性模型。如果模型的参数是非线性的,且输入输出都是非线性的,这种模型是非线性参数的非线性模型。对参数估计来说,后者比前者复杂得多。

目前参数估计用的较多的方法是有预测误差(prediction error)算法,Jackoby 和 Pandit, Billings 和 Chen 已将这个算法用于估计非线性模型的参数;各种改进的最小二乘;Huffel 和 Van de Walle 基于线性变量有误差模型推导了一类改进最小二乘算法,但现实仍未推广到非线性模型的参数估计;Korenberg, Billings, Liu, McIlroy 将直交最小二乘算法推广到线性参数的非线性模型的参数估计;Billings 和 Zhu 又将这一算法进一步推广到有理 NARMAX 模型(非线性参数)的参数估计,这一结果是非线性参数估计及变量有误差问题研究的一次大的进展。研究非线性模型的参数估计是研究非线性问题的一个重要方面。

### 1.5.3 神经网络及其系统控制结构

上面讨论了神经网络在非线性的辨识中特点,这部分主要分析非线性系统神经网络控制的研究问题。非线性系统控制是当前自动控制领域一个难点。而基于神经网络的非线性系统控制是非线性控制研究中的一个热点。这是由于现代控制理论是以完备的系统模型为基础,使得将其用于非线性系统的建模相当困难。早在人工神经网络研究的初期,就已开始了控制领域应用的研究,但迄今为止,人工神经网络辨识方法还不能算作一种独立的成熟的方法,只是在原有的非线性控制方式中用神经网络模型替换原有模型,且将网络的训练过程与模型参考自适应、辨识过程结合使用。应根据被辨识对象的特性探讨出实用的算法。作者在神经网络辨识方面尝试过几种较有效的改进型的算法<sup>[52~55,58~66]</sup>,在第7章展开讨论。

下面简要提供几种学者们研究的神经网络控制结构形式及其现状:

#### 1) 预测控制

预测控制又称为预估控制。Erramilli W Willinger、Scokaert P O M 和 Clarke D H 等证明:采用时段后退技术(receding horizon)可构成一种计算量有限的反馈控制算法,且这种算法可用于非线性系统,使系统达到稳定。在这种算法中,一般由系统输出和预测的方差值、系统本时刻输入和上一时刻输入的方差值组成一个二次型指标函数。根据系统前一时段的输出、输入数据,可由网络来预测后一时段系统的输出,经过优化处理,即可得到使指标函数最小情况下的控制信号。实际上预测的目的是给系统控制器的设计提供参考依据。

这种方法已成功地用在很多领域,如对大量的通信网络业务量的处理,学者们是通过神经网络训练,掌握通信业务源的内在规律,从而实现实时、动态地对业务源预测,其结果有助于对异步转移模块(ATM)网络的控制;船舶横摇动的时间序列预报;气象预报、工业过程控制等方面。

#### 2) 控制系统的状态监测与故障诊断

故障诊断实质上是模式分类的过程。利用监测空间到故障空间的映射关系以及对系统在各时刻采集到的状态变量,判断系统运行正常与否。Timo Soraa 等指出,用于控制系统监测与故障诊断的神经网络主要有 MLP(多层感知器)神经网络、RBF(径向基函数神经网络)、ART(自适应共振)神经网络和 SOM(自组织映射)神经网络等。后两种非监督学习神经网络对于故障诊断准确率不高,如 ART 的误诊断率超过 30%。相比之下,MLP 网络能够对训练样本可靠分类且测试结果令人满意。

文献[33]提出系统状态监测与故障诊断方法很有代表性。基本步骤是:从实际控制系统提取监测状态变量构成监测向量  $P$ ;将  $P$  作为原始输入样本,根据函数型连接思想对  $P$  进行样本模式特性增强,形成  $X$ ;根据  $X$  和相应的监督信号对

神经网络进行离线训练,从而获取神经网络的结构参数;在线对系统状态监测与故障诊断时,利用已训练好的神经网络对系统监测的状态变量进行泛化;显示系统的运行状况正常与否。

在实际控制中特别是被控对象具有非线性特性时,人们往往无法得到被控对象的解析模型,更无望依据古典或现代控制理论设计有效的控制器。因而,现场技术人员常根据现场工况和积累的经验对系统进行控制。在这种情况下,可采用监督控制方式。这种控制方法已被用于智能控制的决策系统,倒立摆平衡控制等。

### 3) 模型参考自适应控制

在模型参考自适应控制系统中,系统期望的输出特性由一个能满足系统要求的参考模型给出,控制器在被控对象之前且处于串联连接的关系。基于神经网络的非线性系统模型参考自适应控制是 Narendra 等提出来的,将神经网络用作控制器,利用被控对象的输出和网络的差值来训练网络,网络的输出又作用给被控对象,使对象的输出逐渐逼近参考模型的理想输出,最终使系统达到平衡稳定。

### 4) 内模控制

在内模控制中,被控系统和一个系统的前向模型处于并列位置,被控对象的输出与该模型的差值作为反馈信号送到被控对象前(控制器和被控对象串联连接)的控制器,该系统要求控制器函数是被控对象的逆。由于内模控制有较强的鲁棒性,因而在过程控制中得到了广泛的应用。目前已研究智能自适应内模控制系统,如文献[26]将自适应内模控制系统在线调试成功,他用的是控制器参数模糊调整内模控制系统结构。用神经网络已得到的系统模型实现非线性系统的内模控制方法是 Hunt 等提出的<sup>[25]</sup>。内模控制器参数在线调整是根据被控对象的输出与神经网络模型的差值进行,故该神经网络必要是离线或在线辨识所得到的模型,它一定要能反映实际系统的特性。

### 5) 模糊神经网络系统

模糊神经网络系统从结构上看主要有两类:一是在神经网络结构中引入模糊逻辑,使其具有直接处理模糊信息的能力,把一般神经网络中的加权求和转为模糊逻辑运算中的“ $\vee$ ”,“ $\wedge$ ”(“析取:取大、即并”,“合取:取小、即交”),从而形成模糊神经网络;二是直接利用神经网络的学习能力及映射能力,去等效模糊系统中的各个模糊功能块,如模糊化、模糊推理、模糊判决。另外,还可以把神经网络和模糊控制用在同一个系统中,以发挥各自的特长。

J. R. Jang 采用暂存反向传播算法实现模糊神经网络的自学习<sup>[27]</sup>。这种方法利用自适应神经网络实现了时间序列预报和系统辨识,并形成了模糊控制器。倒立摆实验结果证明了这一方法的有效性和控制器的鲁棒性。神经网络在模糊自适应控制器中的另一个应用是改进和增强自组织模糊控制器的学习能力。T. Yamaguchi 等提出用模糊联想记忆系统(FAM)实现自组织模糊控制的方法<sup>[28]</sup>。FAM



利用模糊规则表达专家知识,且采用神经网络的自学习能力来提炼知识。这样可在模糊规则的前提部分产生期望的隶属函数分布,在结论部分可单独训练控制器,以保证在特定的限制条件下达到最佳。从两个可调参数的模型(直升机飞行控制器)仿真研究发现,学习后直升机稳定飞行的效果明显优于学习前的效果。大多数的模糊神经网络系统被看做分层前馈网络,然后用 BP 网络来实现。Junbong Nie 等<sup>[29]</sup>提出一种不同的方法,通过引入局部网络结构和前馈推理算法,用整个 RBF (radial basis function) 网来表达基于规则的模糊知识,并将其发展成多变量自组织和自学习模糊控制器。同时引入模糊竞争机构和重复学习控制算盘,使得基于模糊的 RBF 网(FRBF 网)的模糊控制器在缺少“专家知识”(或“教师信号”)的情况下,能自组织其结构、自学习控制规律,以达到满意的控制效果。

在实际应用中,基于神经网络的自适应模糊控制器存在的主要问题是:由于神经网络的结构复杂、计算量大,使得控制器的计算时间过长。如何用简单的方法对模糊控制器进行量化,并转换成易于学习的算法;借用何种学习算法,如何确定学习指标,构成有效的模糊控制学习系统;如何用神经网络表达某种模糊模型等,都是有待进一步研究的问题。

#### 1.5.4 非线性解耦问题

耦合是生产过程动态特性普遍存在的一种现象。若被控对象存在耦合,势必降低控制系统的调节性能。耦合严重时,会使系统无法正常运行。因此对解耦问题的研究无论是对控制理论的发展还是对工程实际都是非常有意义的。

目前有许多方法用于多变量控制的解耦问题,在工程上应用最多的解耦方法是 Bokesenbom Hood 提出的对角矩阵法和 Bristol 提出的相对增益法,它们均是基于过程通道的传递函数来设计解耦控制器,使系统的零极点对消的方法,可得到简便形式的控制器,但这些方法使得被控对象的动态特性发生变化,而且变得相对复杂些,从而使控制器的设计有一定困难。前馈补偿解耦控制也有用到工程中的,前馈补偿解耦实际是把某通道的调节器输出对另外通道的影响看做是扰动作用,然后应用前馈控制的原理消除回路的耦合,以上解耦方法均要求系统模型确定。而非线性系统多属参数易变,模型不确定。因此上述解耦方法不应用于非线性系统的解耦。

尽管解耦理论已取得了不少成果,但与最优控制、自适应控制等其他分支相比,解耦理论在工程的应用确不能令人满意。

目前,利用模糊理论对多变量非线性系统进行控制或解耦控制也是研究非线性问题的一个热点。国内外对多变量模糊控制系统的研究方兴未艾,逐渐成为模糊领域研究的热门课题。多变量模糊控制系统主要有:分层多变量模糊控制器、自学习模糊控制器、基于模型的多变量模糊控制方法、多变量的模糊解耦以及基于神经

网络的模糊控制。

模糊解耦的结构与特点大致包括：

### 1) 直接模糊解耦

这种方法是对被控对象和解耦补偿器相串联,先进行解耦,然后针对解耦后的各变量进行模糊控制设计。该方法是徐承伟和吕勇哉首先提出来的,给出了实现解耦的一个充要条件,但解耦补偿器的结构和参数用经验试凑法离线确定的,没有通用法,很难实现完全解耦<sup>[36]</sup>。随后,他们又提出模糊关系系统的反馈解耦考虑到用于多输入多输出(MIMO)系统的情况,文中给出了实现解耦的一个充分条件,但控制器的构成尚缺少理论依据<sup>[37]</sup>。

### 2) 间接模糊解耦法

Chen等引入相关因子,研究出一类多变量模糊控制器。Czogalaand和Zimmermann引入随机相关因子,利用此类因子构造出多维概率模糊控制器。Gupta等在此研究基础上,提出通过对多变量模糊控制规则进行子空间的分析,然后用一组二维模糊方程描述多维模糊控制规则。文献[40]对Gupta解耦算法中采用的Mamdani推理合成规则进行了改进,提出一种新算法,将“max-min”合成算子修改为“max- $\wedge$ ”运算从理论上证明了采用新的合成算子所得到的推理结论更为确定,且满足一致性条件。

总之,模糊解耦控制系统的研究尚处于发展阶段,很多结论只是理论推导,还不能进入实验室进行验证。同时,针对解耦之后控制系统的稳定性、可控可观性的研究也尚未成型。因此,无论是针对控制对象还是针对控制器解耦,当前急需解决的问题是如何由模糊关系方程求解各个解耦后的模糊子关系,尽量减少前述方法所加的约束条件,得到令人满意的仿真效果。

## 1.5.5 需要深入研究的非线性问题

智能控制是传统控制理论发展的高级阶段,主要用来解决那些用传统方法无法解决的复杂系统(非线性系统)控制问题。前述的神经网络及模糊控制均属智能控制范畴,即是智能控制的一个分支。智能控制中也有不少需要辨识模型的问题。全球第一届智能控制会议从1993年8月在北京召开以来,相继于1997年在西安交通大学、2000年在合肥、2002年在上海和2004年在杭州召开了四届全球智能控制会议,会上全球关注智能控制的专家研讨智能控制的热点问题。今后如何按人们所关心的问题去研究,从智能控制应用发展看,应从以下几方面研究:

### 1) 网络理论方面

在发展人工神经网络理论中,要突出其学习、并行处理、联想记忆功能。进一步开发Petri网及其他网络功能,因为这些网络在系统建模时已脱离了传统的方法,给智能控制带来了生机。尤其是在神经网络逼近非线性函数(特性)及其控制

系统方面应解决如下问题。

(1) 对不同的逼近对象,如在辨识中对不同的被辨识非线性模型,如何选择神经网络结构,当选择前馈多层网络时,问题就落实到如何确定网络的总体结构形式、网络层数、以及每层节点的个数,目前还缺乏理论指导。尽管有不少学者投身到该问题的研究中,但只停留在经验上和启发式的规则上,问题有待深入研究。

(2) 从如何提高网络的训练速度上深入研究。要从网络作用函数的映射机理、网络的灵敏度、网络的容错能力以及抗干扰性等问题上深入研究,找出现有网络逼近复杂非线性特性速度慢的根本原因,进而研究提高训练速度的理论和方法。

(3) 从提高神经网络系统的控制精度方面研究。神经网络作为控制器对系统进行实时控制时,由于网络的训练速度限制,加之非线性系统的复杂性,使得这一问题具有相当大的难度。对于这种系统的稳定性、可控性理论还需深入研究。另外,由于非线性系统的噪声是普遍存在的,因此研究如何提高网络抗干扰性、降低灵敏度及提高神经网络控制器的鲁棒性问题是提高神经网络系统的控制精度的关键,须进一步深入研究。

另外,神经网络发展的最终要以大规模的高精度的并行计算集成电路(硬件)来实现,因此,神经网络的硬件开发及其研究也是一个研究神经网络的重大发展方向。若这个问题能解决,将对神经网络控制复杂的非线性系统的控制速度及精度提高是一个很大的促进。

## 2) 模糊控制理论

(1) 模糊集理论的研究。模糊集理论是介于逻辑计算与数值计算之间的一种数学工具,其形式上利用规则模糊推理。这正补偿了人工神经网络的弱点。

(2) 从多变量模糊控制的理论方面研究。其中有模糊规则设计方法,包括隶属函数的确定、量化因子、采样周期、规则系数的最优选择、规则和隶属函数的自动生成等;多维模糊推理方法的研究,以满足高性能多变量控制器设计的需求;多变量控制系统稳定性的研究,以及对可控性、可观性等性能指标的评估方法;模糊动态模型的辨识方法及相应的自学习方法;基于模型的模糊自校正控制系统的研究;神经网络与模糊控制相结合,从而提高系统控制精度方法的研究;实用多变量控制技术的开发与应用,为解决像多自由度的机器人柔性运动控制这样的复杂问题服务。重要发展动向是 MIMO 模糊控制器的集成化和 MIMO 模糊计算机的开发。

## 3) 信息融合理论及方法的研究

一个复杂的多变量非线性系统要得到较理想的控制效果,多个传感器多种信息的融合是关键。除了传统的基于 Bayes 参数估计数据融合方法外,应对基于模糊理论信息融合方法、粗糙集理论与智能方法结合的信息融合方法进行研究。

## 4) 数据挖掘

数据挖掘方法是对复杂的多变量非线性系统研究的重要方法之一。支持向量

机技术可经济、有效的挖掘所需的甚至是无法测到的(野点)数据。

#### 5) 知识工程的研究

尤其作为智能控制重要分支的专家系统、学习系统都离不开知识的运用、知识的获取和更新,因而知识工程应进一步研究。

#### 6) 系统可靠性能理论的研究

一个智能控制系统的正常运行,离不开故障诊断,故障的随时检测与自动排除,以及一些算法中的冗余、容错理论的研究对系统控制的可靠性至关重要。

#### 7) 混沌的诱导与控制

非线性控制系统的混沌研究也是对控制学科学者们的新的挑战。20 世纪 70 年代,美国大气物理学家 Lorenz 在实验室里观察到一个完全确定的非线性方程组(现被称为的 Lorenz 方程),对初值异常敏感,具有貌似随机信号的输出。十多年后,许多学者相继在不同的领域中发现了这种现象。Li 和 Yorke 首先称之为“混沌(chaos)”。这在科学界引起了一场很大的振动,有的学者认为,混沌现象的发现否定了传统的确定论时空观,将是 20 世纪量子力学和相对论之后第三次技术观念的革新。广泛地说,器件的非线性是绝对的,而线性是相对的。线性状态只是非线性状态的一种近似或一种特例而已。由于混沌运动是非线性系统的一种普遍的运动,模糊了传统的确定系统和随机系统的界限,目前是最活跃的科学领域之一,已成为数学、物理、化学、力学、光学、天文学及脑科学等重多学科的重点研究课题。对这种新的、复杂的混沌对象的研究,传统基于小扰动。线性化的处理方法不再适用,具体的学科的一些定义、定理可能将改变(如控制理论中系统的稳定分为:常值稳定、周期稳定、混沌状态)。混沌的特征:对初值异常敏感,不能进行长期预测,确定性系统却有貌似随机的响应,局部不稳定,但是总体吸引,与常规运动(平衡周期运动、准周期运动)不同,是一种始终限于有限区域并且轨迹不重复性态复杂的运动。文献[71]指出:“控制系统的混沌运动来自三个方面:一是非线性控制系统本身的混沌;二是控制算法带来的混沌;三是系统离散化引起的混沌。若系统模型用状态方程来描述,对定常系统而言,只有三阶以上的系统能够产生混沌。”近年来有关专家对混沌识别与混沌系统辨识、混沌系统的诱导与控制进行了深入的研究,这对非线性问题的稳定控制开辟了新的途径。有关反馈动态系统出现的混沌现象、基于控制理论的混沌分析方法、混沌识别与混沌系统辨识问题在第 8 章展开。

## 1.6 小 结

本章是系统和模型及辨识建模的基本概念,其中 1.1、1.2 节包括模型的表现形式及数学模型分类、辨识的定义;1.3 节介绍了辨识的问题的表示形式及原理,其中包括辨识问题的表达形式、辨识算法的基本原理和误差准则;1.4 节是辨

识的内容和步骤;最后,1.5 节介绍了典型的非线性系统辨识与控制方法,其中包括非线性系统辨识与控制方法的特点、非线性参数估计的特点、神经网络及其控制系统结构、非线性解耦及需要深入研究的非线性问题。

## 习 题

1. 简述数学模型的表现形式及其分类。
2. 辨识建模的定义是什么?
3. 辨识问题的表达形式是什么?
4. 什么是辨识的误差准则?
5. 简述辨识的内容和步骤。
6. 神经网络非线性辨识的主要特点是什么?

## 第 2 章 辨识理论基础及古典辨识方法

本章是系统辨识基础,包括辨识的理论基础和古典辨识法两部分内容。2.1~2.4 节主要介绍随机过程的基本概念及其数学描述、线性系统在随机输入下的响应等,并讨论随机序列和白噪声及其产生方法。系统辨识所用的数据通常含有噪声,它的基本概念及其产生方法与系统辨识密切相关。因此,分别讨论并剖析用 MATLAB 语言开发的产生随机序列、白噪声和  $M$  序列的三种程序。在 2.5 节古典辨识法中,介绍相关分析法辨识和相关函数的概念,讨论相关分析频率响应和相关分析脉冲响应法辨识,并列举相关分析脉冲响应法辨识的实例。

### 2.1 随机过程基本概念及其数学描述

#### 2.1.1 基本概念

在科学技术领域中,人们观察到各式各样的事物变化过程。有些变化过程具有明确的规律性,如自由落体运动、电容充电过程等,这些称为确定性过程。还有些变化过程具有偶然性,例如电子放大器的零点漂移、风浪中海面的起伏等,人们无法预知下一时刻将会发生什么情况,这些称为随机过程。对于随机过程,我们可以在完全相同的条件下(在人们力所能及的意义上)进行多次测试,这样就得到很多样本,它们的变化过程互不相同。样本具有偶然性,但他们的总体却往往具有统计意义上的规律性。按照严格的定义,所谓“随机过程”就是指大量样本  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ , ... 所构成的总体。

##### 1. 随机过程数学描述

为了对随机过程  $x(t)$  进行数学描述,应该注意以下几点:

(1) 在每一孤立的瞬间,  $x(t)$  的取值是随机的,它是一个随机变量。因此,  $x(t)$  首先可以用描述一维随机变量的方法加以描述,这就引出随机过程一维概率密度  $p_1(x, t)$  的概念。

(2) 沿时间坐标轴看,  $x(t)$  是  $x$  的取值随时间变化的过程。为了完整的描述一个随机过程,还需反映不同的时刻  $x$  取值之间的联系。二维概率密度  $p_2(x_1, x_2; t_1, t_2)$  代表  $x$  在  $t_1$  时刻取值为  $x_1$ 、 $t_2$  时刻取值为  $x_2$  的概率密度。这就是说,  $p_2(x_1, x_2; t_1, t_2) dx_1 dx_2$  代表  $x(t)$  相继通过随机过程图 2.1 中  $dx_1$  和  $dx_2$  两个小窗口的概率。