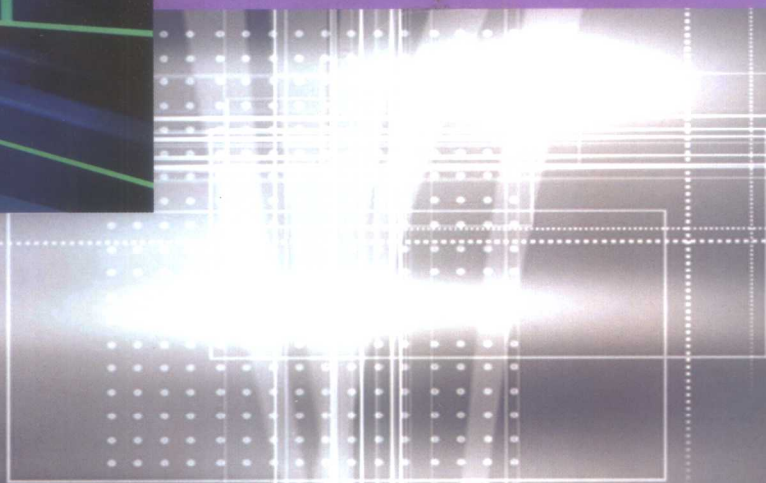
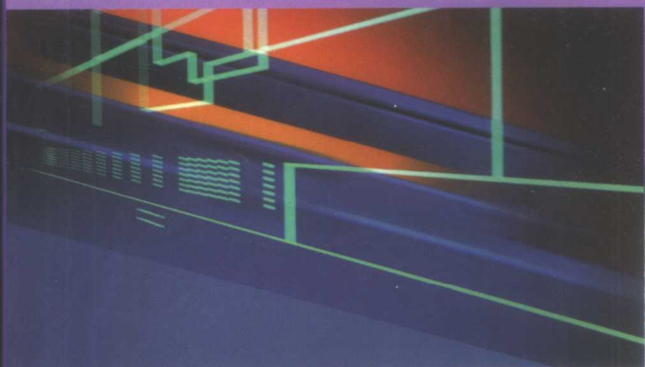


李言俊 张科 编著

系统辨识理论 及应用

XITONG BIANSHI LILUN
JI YINGYONG



國防工業出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

系统辨识理论及应用/李言俊, 张科编著. —北京:
国防工业出版社, 2003.5

ISBN 7-118-03065-1

I. 系… II. ①李… ②张… III. 系统辨识
IV. N945.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 105020 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15³/₄ 359 千字
2003 年 5 月第 1 版 2003 年 5 月北京第 1 次印刷
印数: 1—2500 册 定价: 22.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

内 容 简 介

本书主要介绍系统辨识的基本原理和常用基本方法。全书共 14 章，主要为绪论、系统辨识常用输入信号、线性系统的经典辨识方法、动态系统的典范表达式、最小二乘法辨识、极大似然法辨识、时变参数辨识方法、多输入—多输出系统的辨识、随机时序列模型的建立、系统结构辨识、闭环系统辨识、系统辨识在飞行器参数辨识中的应用、神经网络在系统辨识中的应用。

本书可作为高等学校自动控制类和航空航天类专业研究生教材，也可供本科高年级学生和工程技术人员参考。

前 言

系统辨识、状态估计和控制理论是现代控制理论中相互渗透的3个领域。系统辨识和状态估计离不开控制理论的支持，控制理论的应用又几乎不能没有系统辨识和状态估计技术。

系统辨识主要研究如何确定系统数学模型及其参数的问题，是一门应用范围很广的学科，它的理论正在日趋成熟，其实际应用已遍及许多领域，在航空、航天、海洋工程、工程控制、生物学、医学、水文学及社会经济等方面的应用愈来愈广泛。

本书主要阐述系统辨识的基本原理及应用。全书共分14章。第1章至第4章为绪论、系统辨识常用输入信号、线性系统的经典辨识方法和动态系统的典范表达式，主要是回顾和介绍了与系统辨识有关的一些基础知识。第5章至第12章为最小二乘法辨识、极大似然法辨识、时变参数辨识方法、多输入-多输出系统的辨识、其它一些辨识方法、随机时序列模型的建立、系统结构辨识和闭环系统辨识等，介绍了系统辨识常用基本方法，是系统辨识的主要基本内容。第13章和第14章分别介绍了系统辨识在飞行器参数辨识中的应用和神经网络在系统辨识中的应用。

本书第1章至第12章由李言俊编写，第13章和第14章由张科编写。

西北工业大学研究生院和国防工业出版社对本书的出版给予了热情支持，在此深致谢忱。书中如有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2002年7月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 系统数学模型的分类及建模方法	2
1.1.1 模型的含义	2
1.1.2 模型的表现形式	2
1.1.3 数学模型的分类	2
1.1.4 建立数学模型的基本方法	3
1.1.5 建模时所需遵循的基本原则	4
1.2 辨识的定义、内容和步骤	4
1.2.1 辨识的定义	4
1.2.2 辨识的内容和步骤	4
1.3 辨识中常用的误差准则	5
1.3.1 输出误差准则	5
1.3.2 输入误差准则	6
1.3.3 广义误差准则	6
1.4 系统辨识的分类	6
1.4.1 离线辨识	6
1.4.2 在线辨识	7
思考题.....	7
第 2 章 系统辨识常用输入信号	8
2.1 系统辨识输入信号选择准则	8
2.2 白噪声及其产生方法	9
2.2.1 白噪声过程	9
2.2.2 白噪声序列.....	11
2.2.3 白噪声序列的产生方法.....	11
2.3 伪随机二位式序列——M 序列的产生及其性质	13
2.3.1 伪随机噪声.....	13
2.3.2 M 序列的产生方法	16
2.3.3 M 序列的性质	17
2.3.4 二电平 M 序列的自相关函数	18
2.3.5 二电平 M 序列的功率谱密度	21
思考题	24

第3章 线性系统的经典辨识方法	25
3.1 用M序列辨识线性系统的脉冲响应	25
3.2 用脉冲响应求传递函数	30
3.2.1 连续系统的传递函数 $G(s)$	30
3.2.2 离散系统传递函数——脉冲传递函数 $G(z^{-1})$	33
思考题	34
第4章 动态系统的典范表达式	36
4.1 节省原理	36
4.2 线性系统的差分方程和状态方程表示法	39
4.2.1 线性定常系统的差分方程表示法	39
4.2.2 线性系统的状态方程表示法	40
4.3 确定性典范状态方程	40
4.3.1 可控型典范状态方程 I	41
4.3.2 可控型典范状态方程 II	41
4.3.3 可观测型典范状态方程 I	42
4.3.4 可观测型典范状态方程 II	42
4.3.5 多输入—多输出系统可观测型典范状态方程 I	42
4.3.6 多输入—多输出系统可观测型典范状态方程 II	43
4.4 确定性典范差分方程	45
4.5 随机性典范状态方程	46
4.6 随机性典范差分方程	47
4.7 预测误差方程	48
思考题	49
第5章 最小二乘法辨识	50
5.1 最小二乘法	50
5.1.1 最小二乘估计算法	52
5.1.2 最小二乘估计中的输入信号问题	53
5.1.3 最小二乘估计的概率性质	55
5.2 一种不需矩阵求逆的最小二乘法	61
5.3 递推最小二乘法	62
5.4 辅助变量法	65
5.5 递推辅助变量法	68
5.6 广义最小二乘法	68
5.7 一种交替的广义最小二乘法求解技术(夏氏法)	73
5.8 增广矩阵法	76
5.9 多阶段最小二乘法	77
5.9.1 第1种算法	77

5.9.2 第 2 种算法	80
5.9.3 第 3 种算法	81
5.10 快速多阶段最小二乘法	84
思考题	90
第 6 章 极大似然法辨识	92
6.1 极大似然参数辨识方法	92
6.1.1 极大似然原理	92
6.1.2 系统参数的极大似然估计	94
6.2 递推极大似然法	100
6.2.1 近似的递推极大似然法	100
6.2.2 按牛顿-拉卜森法导出极大似然法递推公式	105
6.3 参数估计的可达精度	108
思考题	110
第 7 章 时变参数辨识方法	112
7.1 遗忘因子法、矩形窗法和卡尔曼滤波法	112
7.1.1 遗忘因子法	112
7.1.2 矩形窗法	113
7.1.3 卡尔曼滤波法	114
7.2 一种自动调整遗忘因子的时变参数辨识方法	114
7.3 用折线段近似时变参数的辨识方法	116
思考题	119
第 8 章 多输入-多输出系统的辨识	120
8.1 多输入-多输出系统的最小二乘辨识	120
8.2 多输入-多输出系统的极大似然法辨识——松弛算法	122
8.3 利用方波脉冲函数辨识线性时变系统状态方程	125
8.3.1 状态方程的方波脉冲级数展开	126
8.3.2 矩阵 $A(t)$ 的辨识	128
8.3.3 矩阵 $B(t)$ 的辨识	129
8.4 利用分段多重切比雪夫多项式系进行多输入-多输出线性时变系统辨识	132
8.4.1 分段多重切比雪夫多项式系的定义及其主要性质	133
8.4.2 多输入-多输出线性时变系统参数辨识的 PMCP 方法	136
思考题	139
第 9 章 其它一些辨识方法	140
9.1 一种简单的递推算法——随机逼近法	140
9.1.1 随机逼近法基本原理	141

9.1.2	随机逼近参数估计方法	142
9.1.3	随机牛顿法	145
9.2	2类不同概念的递推最小二乘辨识方法	146
9.2.1	随观测方程个数递推的最小二乘估计	146
9.2.2	随未知参数个数变化的递推最小二乘估计	147
9.2.3	利用递推最小二乘法导出 EMBET 公式	149
9.3	辨识 Box-Jenkins 模型的递推广义增广最小二乘法	151
9.4	辨识 Box-Jenkins 模型参数的新息修正最小二乘法	152
9.4.1	最小二乘法的增参数递推公式	153
9.4.2	CAR(p) 模型的辨识	154
9.4.3	偏差的消除及 MA 阶次的确定	154
	思考题	156
第 10 章	随机时序列模型的建立	157
10.1	回归模型	157
10.1.1	一阶线性回归模型	157
10.1.2	多项式回归模型	158
10.2	平稳时序列的自回归模型	159
10.3	平稳时序列的移动平均模型	162
10.4	平稳时序列的自回归移动平均模型	163
10.5	非平稳时序列模型	164
	思考题	165
第 11 章	系统结构辨识	167
11.1	模型阶的确定	167
11.1.1	按残差方差定阶	167
11.1.2	确定阶的 Akaike 信息准则	169
11.1.3	按残差白色定阶	172
11.1.4	零极点消去检验	172
11.1.5	利用行列式比法定阶	172
11.1.6	利用 Hankel 矩阵定阶	173
11.2	模型的阶和参数同时辨识的非递推算法	175
11.3	同时获得模型阶次和参数的递推辨识算法	177
11.4	多变量受控自回归滑动平均模型的结构辨识	180
11.4.1	递推最小二乘法参数估计	181
11.4.2	子模型阶的确定	181
11.4.3	简练参数模型、子阶和时滞的确定	182
	思考题	184

第 12 章 闭环系统辨识	185
12.1 闭环系统判别方法	185
12.1.1 谱因子分解法	185
12.1.2 似然比检验法	187
12.2 闭环系统的可辨识性概念	189
12.3 单输入—单输出闭环系统辨识	191
12.3.1 直接辨识	191
12.3.2 间接辨识	196
12.4 多输入—多输出闭环系统的辨识	197
12.4.1 自回归模型辨识法	197
12.4.2 更换反馈矩阵辨识法	199
思考题	201
第 13 章 系统辨识在飞行器参数辨识中的应用	202
13.1 引言	202
13.1.1 气动力参数辨识	202
13.1.2 气动热参数辨识	203
13.1.3 结构动力学参数辨识	203
13.1.4 液体晃动模态参数辨识	204
13.1.5 惯性仪表误差系数辨识	204
13.2 极大似然法辨识导弹导引头噪声模型	205
13.2.1 导引头噪声模型的描述	205
13.2.2 极大似然法辨识噪声模型参数	207
13.2.3 目标视线角速度噪声模型辨识	210
13.2.4 目标接近速度噪声模型辨识	211
13.2.5 噪声模型校验	212
13.2.6 极大似然法辨识算例	212
13.3 时间序列法的导引头系统输出噪声建模	213
13.3.1 方案设计	213
13.3.2 噪声模型的建立	214
13.3.3 噪声模型的参数辨识	216
13.3.4 时间序列法辨识算例	217
13.4 系统辨识在飞行器气动参数辨识中的应用	218
13.4.1 战术导弹气动力参数辨识	219
13.4.2 闭环的辨识仿真算例	227
第 14 章 神经网络在系统辨识中的应用	229
14.1 神经网络简介	229
14.1.1 神经网络的发展概况	229

14.1.2 神经网络的结构及类型·····	229
14.2 线性系统辨识·····	230
14.2.1 基于单层神经网络的线性系统辨识·····	230
14.2.2 基于单层 Adaline 网络的线性系统辨识方法·····	231
14.3 BP 算法在神经网络中的应用·····	232
14.3.1 BP 网络简介·····	232
14.3.2 BP 网络数学原理·····	233
14.4 线性时变系统辨识·····	235
14.4.1 网络结构与逼近能力分析·····	235
14.4.2 学习算法·····	238
14.4.3 仿真结果·····	239
参考文献 ·····	241

第 1 章 绪 论

系统辨识、状态估计和控制理论是现代控制论中相互渗透的 3 个领域。系统辨识和状态估计离不开控制理论的支持,控制理论的应用又几乎不能没有系统辨识和状态估计技术。随着控制对象复杂性的提高,控制理论的应用日益广泛。但是,它的实际应用不能脱离被控对象的数学模型。当我们在其它课程中讨论线性系统理论、最优控制理论和最优滤波理论时,都是假定系统的数学模型已经知道。有些控制系统的数学模型可用理论分析的方法推导出来,例如飞机和导弹运动的数学模型,一般可根据力学原理较准确地推导出来。虽然飞机和导弹的数学模型可以较容易地用理论分析方法推导出来,但其模型参数随着飞行高度和飞行速度而变。为了实现自适应控制,在飞机和导弹的飞行过程中,要不断估计其模型参数。对有些控制对象,如化学生产过程等,由于其复杂性,很难用理论分析的方法推导出数学模型,有时只能知道数学模型的一般形式及部分参数,有时甚至连数学模型的一般形式都不知道,因此提出了怎样确定系统的数学模型及其参数的问题,这就是所谓的系统辨识问题。

系统辨识理论是一门应用范围很广的学科,它的理论正在日趋成熟,其实际应用已遍及许多领域。目前不仅工程控制对象需要建立数学模型,而且在其它领域,如生物学、生态学、医学、天文学以及社会经济学等领域也常常需要建立数学模型,并根据数学模型确定最优控制决策。对于上述各领域,由于系统比较复杂,人们对于其结构和支配其运动的机理,往往了解不多,甚至很不了解,因此不可能用理论分析的方法得到数学模型,只能利用观测数据来确定数学模型,所以系统辨识受到了人们的重视。目前,系统辨识理论的研究愈来愈深入,在航空、航天、海洋工程、工程控制、生物学、医学、水文学及社会经济等方面的应用愈来愈广泛。

由于系统辨识是根据系统的试验数据来确定系统的数学模型,所以必须存在实际系统。因此,系统辨识是为已经存在的系统建立数学模型。但是如果在设计系统时,系统还不存在,这样就无法用辨识的方法来确定数学模型。在这种情况下,只好依靠理论分析的方法来建立数学模型,即使是很粗略的数学模型,也是很需要的。根据用理论分析方法所建立的数学模型,在计算机上进行模拟计算,可得到许多有用的结果,为设计系统提供依据。因此,在讨论系统辨识的时候,不能否定理论方法建立数学模型的重要性。

本章主要介绍系统辨识的一些基本概念,包括建模的方法、辨识的定义、误差准则、辨识的内容及分类等。

1.1 系统数学模型的分类及建模方法

1.1.1 模型的含义

所谓模型(model)就是把关于实际系统的本质的部分信息简缩成有用的描述形式。它可以用来描述系统的运动规律,是系统的一种客观写照或缩影,是分析系统和预报、控制系统行为特性的有力工具。但是,实际系统到底哪些部分是本质的,哪些部分是非本质的,这要取决于所研究的问题。例如,在研究导弹飞行过程中的动态特性时,常常忽略导弹系统中的高频环节和非线性因素的影响,而将整个系统简化为一个二阶或三阶系统。而在推导制导律时,为了使制导律便于工程实现,又有可能将导弹看做一个质点。可见,模型所反映的内容将因其使用的目的而不同。

对实际系统而言,模型一般不可能考虑到所有因素。在这种意义上来说,所谓模型是根据使用目的对实际系统所作的一种近似描述。当然,如果要求模型越精确,模型就会变得越复杂。相反,如果适当降低模型的精度要求,只考虑主要因素而忽略次要因素,模型就可以简单一些。因而在建立实际系统的模型时,存在着精确性和复杂性的矛盾,找出这两者的折中解决办法往往是建立实际系统模型的关键。

1.1.2 模型的表现形式

模型通常有如下一些主要表现形式。

(1)直觉模型。它指系统的特性以非解析形式直接储存在人脑中,靠人的直觉控制系统的变化。例如,司机对汽车的驾驶,指挥员对战斗的指挥,依靠的就是这类直接模型。

(2)物理模型。它是根据相似原理把实际系统加以缩小的复制品,或是实际系统的一种物理模拟。例如,风洞、水洞模型,传热学模型,电力系统动态模拟等,均是物理模型。

(3)图表模型。它以图形或表格的形式来表现系统的特性。如阶跃响应、脉冲响应和频率特性等。图表模型也称为非参数模型。

(4)数学模型。它用数学结构的形式来反映实际系统的行为特性。常用的数学模型有代数方程、微分方程、差分方程、状态方程、传递函数、非线性微分方程及分布参数方程等。这些数学模型又称为参数模型。当模型的阶和参数确定之后,数学模型也就确定了。

1.1.3 数学模型的分类

数学模型分类方法很多,常见的是按连续与离散、定常与时变、集中参数与分布参数来分类,这在线性系统等课程中已介绍得很多,此处不再重述。还可按线性与非线性、动态与静态、确定性与随机性、宏观与微观进行区分。

(1)线性模型。线性模型用来描述线性系统。它的显著特点是满足叠加原理和均匀性,即满足下列算子运算:

$$(\alpha_1 + \alpha_2)x = \alpha_1 x + \alpha_2 x$$

$$\alpha_1(\alpha_2 x) = \alpha_2(\alpha_1 x)$$

$$\alpha_1(x + y) = \alpha_1 x + \alpha_1 y$$

式中： x 和 y 为系统状态变量； α_1 和 α_2 分别为作用于 x 和 y 的算子。

(2) 非线性模型。非线性模型用来描述非线性系统，一般不满足叠加原理。

(3) 动态模型。动态模型用来描述系统处于过渡过程时的各状态变量之间的关系，一般为时间的函数。

(4) 静态模型。静态模型用来描述系统处于稳态时(各状态变量的各阶导数均为零)的各状态变量之间的关系，一般不是时间的函数。

(5) 确定性模型。由确定性模型所描述的系统，当状态确定之后，其输出响应是惟一确定的。

(6) 随机性模型。由随机性模型所描述的系统，当状态确定之后，其输出响应仍然是不确定的。

(7) 宏观模型。宏观模型用来研究事物的宏观现象，一般用联立方程或积分方程描述。

(8) 微观模型。微观模型用来研究事物内部微小单元的运动规律，一般用微分方程或差分方程描述。

另外，在讨论线性和非线性问题时，需要注意以下 2 点区别。

(1) 系统线性与关于参数空间线性的区别：如果模型的输出关于输入变量是线性的，称之为系统线性；如果模型的输出关于参数空间是线性的，称之为关于参数空间线性。例如，对于模型 $y = a + bx + cx^2$ 来说，输出 y 关于输入 x 是非线性的，但关于参数 a, b, c 却是线性的，即模型是系统非线性的，但却是关于参数空间线性的。

(2) 本质线性与非本质线性的区别：如果模型经过适当的数学变换可将本来是非线性的模型转变成线性模型，则原来的模型称作本质线性，否则原来的模型称作本质非线性。

1.1.4 建立数学模型的基本方法

建立数学模型常采用理论分析和测试 2 种基本方法。

1) 理论分析法

理论分析法又称为机理分析法或理论建模。这种方法主要是通过分析系统的运动规律，运用一些已知的定律、定理和原理，例如力学原理、生物学定律、牛顿定理、能量平衡方程、传热传质原理等，利用数学方法进行推导，建立起系统的数学模型。

理论分析法只能用于较简单系统的建模，并且对系统的机理要有较清楚的了解。对于比较复杂的实际系统，这种建模方法有很大的局限性。这是因为在理论建模时，对所研究的对象必须提出合理的简化假定，否则会使问题过于复杂。但是，要使这些简化假设都符合实际情况，往往是相当困难的。

2) 测试法

系统的输入输出信号一般总是可以测量的。由于系统的动态特性必然表现于这些输入输出数据中，故可以利用输入输出数据所提供的信息来建立系统的数学模型。这种建模方法就是系统辨识。

与理论分析法相比，测试法的优点是不需深入了解系统的机理，不足之处是必须设计一个合理的试验以获取所需的最大信息量，而设计合理的试验往往是困难的。因而在具

体建模时,常常将理论分析法和测试法 2 种方法结合起来使用,机理已知部分采用理论分析法,机理未知部分采用测试法。

1.1.5 建模时所需遵循的基本原则

- (1)建模的目的要明确,因为不同的建模目的可能采用不同的建模方法。
- (2)模型的物理概念要明确。
- (3)系统具有可辨识性,即模型结构合理,输入信号持续激励,数据量充足。
- (4)符合节省原理,即被辨识模型参数的个数要尽量少。

1.2 辨识的定义、内容和步骤

1.2.1 辨识的定义

很多学者都曾给辨识下过定义,下面介绍几个比较典型适用的定义。

(1)L. A. Zadeh 定义(1962 年):辨识就是在输入和输出数据的基础上,从一组给定的模型类中,确定一个与所测系统等价的模型。

(2)P. Eykhoff 定义(1974 年):辨识问题可以归结为用一个模型来表示客观系统(或将要构造的系统)本质特征的一种演算,并用这个模型把对客观系统的理解表示成有用的形式。

V. Strejc 对该定义所做的解释是:“这个辨识定义强调了一个非常重要的概念,最终模型只应表示动态系统的本质特征,并且把它表示成适当的形式。这就意味着,并不期望获得一个物理实际的确切的数学描述,所要的只是一个适合于应用的模型。”

(3)L. Ljung 定义(1978 年):辨识有 3 个要素——数据、模型类和准则。辨识就是按照一个准则在一组模型类中选择一个与数据拟合得最好的模型。

1.2.2 辨识的内容和步骤

由 1.2.1 节定义可以看出,辨识就是利用所观测到的输入和输出数据(往往含有噪声),根据所选择的原则,从一类模型中确定一个与所测系统拟合得最好的模型。下面介绍辨识的步骤和方法。

(1)明确辨识目的。明确模型应用的最终目的十分重要,因为它将决定模型的类型、精度要求及所采用的辨识方法。

(2)掌握先验知识。在进行系统辨识之前,要尽可能多掌握一些系统的先验知识,如系统的非线性程度、时变或非时变、比例或积分特性、时间常数、过渡过程时间、截止频率、时滞特性、静态放大倍数、噪声特性、工作环境条件等,这些先验知识对预选系统数学模型种类和辨识试验设计将起到指导性的作用。

(3)利用先验知识。选定和预测被辨识系统数学模型种类,确定验前假定模型。

(4)试验设计。选择试验信号、采样间隔、数据长度等,记录输入和输出数据。如果系统是连续运行的,并且不允许加入试验信号,则只好用正常的运行数据进行辨识。

(5)数据预处理。输入和输出数据中常含有直流成分或低频成分,用任何辨识方法都

难以消除它们对辨识精度的影响。数据中的高频成分对辨识也有不利影响。因此,对输入和输出数据可进行零均值化和剔除高频成分的预处理。处理得好,能显著提高辨识精度。零均值化可采用差分法和平均法等方法,剔除高频成分可采用低通滤波器。

(6)模型结构辨识。在假定模型结构的前提下,利用辨识方法确定模型结构参数,如差分方程中的阶次 n 和纯延迟 d 等。

(7)模型参数辨识。在模型结构确定之后,选择估计方法,利用测量数据估计模型中的未知参数。

(8)模型检验。验证所确定的模型是否恰当地表示了被辨识的系统。

如果所确定的系统模型合适,则辨识到此结束。否则,就必须改变系统的验前模型结构,并且执行第(4)步至第(8)步,直到获得一个满意的模型为止。

1.3 辨识中常用的误差准则

辨识时所选用的误差准则是辨识问题中的 3 个要素之一,是用来衡量模型接近实际系统的标准。因此误差准则也称为等价准则、损失函数、准则函数、误差准则函数等。它通常被表示为误差的泛函数,记作

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N f(\epsilon(k)) \quad (1.3.1)$$

式中: $f(\cdot)$ 是 $\epsilon(k)$ 的函数; $\epsilon(k)$ 是定义在区间 $(0, N)$ 上的误差函数。 $\epsilon(k)$ 应广义地理解为模型与实际系统的误差,它可以是输出误差或输入误差,也可以是广义误差。选择不同的误差准则可导出不同的辨识算法,应用中用得最多的是平方函数,即

$$f(\epsilon(k)) = \epsilon^2(k) \quad (1.3.2)$$

1.3.1 输出误差准则

当实际系统的输出和模型的输出分别为 $y(k)$ 和 $y_m(k)$ 时,则

$$\epsilon(k) = y(k) - y_m(k) \quad (1.3.3)$$

称为输出误差。如果扰动是作用在系统输出端的白噪声,则理所当然地选择这种误差准则。但是,输出误差 $\epsilon(k)$ 通常是模型参数的非线性函数,因而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。例如,若模型取脉冲传递函数形式

$$G(q^{-1}) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \quad (1.3.4)$$

式中

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n} \\ B(q^{-1}) &= b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_m q^{-m} \end{aligned}$$

则输出误差为

$$\epsilon(k) = y(k) - \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(k) \quad (1.3.5)$$

误差准则函数为

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N \left[y(k) - \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(k) \right]^2 \quad (1.3.6)$$

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、共轭梯度法等迭代的最优算法,因而使得辨识算法变得比较复杂。

1.3.2 输入误差准则

定义输入误差为

$$\epsilon(k) = u(k) - u_m(k) = u(k) - S^{-1}[y_m(k)] \quad (1.3.7)$$

式中: $u_m(k)$ 表示产生输出 $y_m(k)$ 的模型输入;符号 S^{-1} 表示模型是可逆的。也就是说,总可以找到一个产生给定输出的惟一输入。如果扰动是作用在系统输入端的白噪声,则自然选用这种误差准则。由于输入误差 $\epsilon(k)$ 也是模型参数的非线性函数,因此辨识算法也是比较复杂的。因而这种误差仅具有理论意义,实际中几乎不用。

1.3.3 广义误差准则

在更一般的情况下,误差可以定义为

$$\epsilon(k) = S_2^{-1}[y(k)] - S_1[u(k)] \quad (1.3.8)$$

式中 S_1, S_2^{-1} 称为广义模型,且模型 S_2 是可逆的,这种误差称为广义误差。在广义误差中,最常用的是方程式误差。例如,当模型结构采用差分方程时,式(1.3.8)中的 S_1 和 S_2^{-1} 分别为

$$S_1: \quad B(q^{-1}) = b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \cdots + b_m q^{-m}$$

$$S_2^{-1}: \quad A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \cdots + a_n q^{-n}$$

则方程式误差为

$$\epsilon(k) = A(q^{-1})y(k) - B(q^{-1})u(k) \quad (1.3.9)$$

并且误差准则函数为

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N [A(q^{-1})y(k) - B(q^{-1})u(k)]^2 \quad (1.3.10)$$

显然,误差准则函数 $J(\theta)$ 关于模型参数空间是线性的,求它的最优解比较简单,因而许多辨识算法都采用了这种误差准则。

1.4 系统辨识的分类

系统辨识的分类方法很多,根据描述系统数学模型的不同可分为线性系统和非线性系统辨识、集中参数系统和分布参数系统辨识;根据系统的结构可分为开环系统与闭环系统辨识;根据参数估计方法可分为离线辨识和在线辨识等。另外还有经典辨识与近代辨识、系统结构辨识与系统参数辨识等分类。由于离线辨识与在线辨识是系统辨识中常用的2个基本概念,本节将对这2个基本概念加以解释,其它概念将在后面的有关章节中加以介绍。

1.4.1 离线辨识

如果系统的模型结构已经选好,阶数也已确定,在获得全部记录数据之后,用最小二

乘法、极大似然法或其它估计方法,对数据进行集中处理后,得到模型参数的估值,这种辨识方法称为离线辨识。

离线辨识的优点是参数估值的精度比较高,缺点是需要存储大量数据,要求计算机有较大的存储量,辨识时运算量也比较大。

1.4.2 在线辨识

用在线辨识时,系统的模型结构和阶数是事先确定好的。当获得一部分输入和输出数据后,马上用最小二乘法、极大似然法或其它估计方法进行处理,得到模型参数的不太准确的估值。在获得新的输入和输出数据后,用递推算法对原来的参数估值进行修正,得到参数的新估值。所以在线辨识要用到递推最小二乘法、递推极大似然法或其它递推估计算法。

在线辨识的优点是所要求的计算机存储量较小,辨识计算时运算量较小,适合于进行实时控制,缺点是参数估计的精度差一些。为了实现自适应控制,必须采用在线辨识,要求在很短的时间内把参数辨识出来,参数辨识所需时间只能占1个采样周期的一小部分。

在下面各章中将主要讨论线性系统的经典辨识方法、动态系统的典范表达式、离线辨识和在线辨识算法、闭环系统辨识、系统结构和阶的确定,以及系统辨识在一些工程问题中的应用等内容。

思 考 题

1.1 阐述系统模型的分类及各类模型间的关系,并尝试用形象的方法建立各模型间的相互关系图。

1.2 关于线性模型有系统线性和关于参数空间线性及本质线性和非本质线性之分,举例说明之。

1.3 请根据辨识的定义来阐述辨识的基本原理。

1.4 辨识问题中的3个要素是什么?为什么说它们是辨识中的重要因素?

1.5 辨识中最常用的误差准则是什么?在自动控制领域中你还了解何种误差准则,它们之间有何异同?

1.6 请结合一个实际控制对象来阐述辨识的步骤。

1.7 在自动控制理论中经常要求系统是因果系统,在系统辨识中是否仍然要求系统是因果系统?