



普通高等教育“十二五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

系统辨识理论及 MATLAB仿真

刘金琨 沈晓蓉 赵 龙 编著



N945.14
20132

阅 览

电气工程、自动化专业规划教材

系统辨识理论及 MATLAB 仿真

刘金琨 沈晓蓉 赵 龙 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书从 MATLAB 仿真角度系统介绍了系统辨识的基本理论、基本方法和应用技术,是作者多年来从事控制系统教学和科研工作的结晶,同时融入了国内外同行近年来所取得的新成果。

全书共 9 章,包括绪论、系统辨识常用输入信号、最小二乘参数辨识方法及原理、极大似然参数辨识方法及其应用、传递函数的时域和频域辨识、神经网络辨识及其应用、模糊系统辨识、智能优化算法辨识及灰色系统辨识。书中有大量实例,每种实例都进行了仿真分析,并给出了相应的 MATLAB 仿真程序。本书各部分内容既相互联系又相互独立,读者可根据自己需要选择学习。

本书可作为高等院校自动化、计算机应用、机械电子工程等专业高年级本科生或研究生的教材或参考书,也可供相关专业的工程技术人员阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

系统辨识理论及 MATLAB 仿真/刘金琨,沈晓蓉,赵龙编著. —北京:电子工业出版社,2013.2

电气工程、自动化专业规划教材

ISBN 978-7-121-19473-3

I. ①系… II. ①刘… ②沈… ③赵… III. ①系统辨识—高等学校—教材②计算机仿真—Matlab 软件—高等学校—教材 IV. ①N945.14②TP317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 016763 号

责任编辑:凌毅

印刷:三河市鑫金马印装有限公司

装订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开本:787×1092 1/16 印张:18 字数:484 千字

印次:2013 年 2 月第 1 次印刷

印数:3000 册 定价:38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

对于实际的复杂系统,很难用理论分析的方法获得数学模型。系统辨识是指根据系统的实验数据来确定系统的数学模型,系统辨识为已经存在的系统建立数学模型提供了有效的方案。

系统辨识理论是一门应用范围很广的学科,其应用已经遍及许多领域。目前不仅在控制领域需要建立数学模型,在其他领域,如生物学、生态学、医学、天文学及社会经济学等也需要建立数学模型,从而根据数学模型来确定最终控制决策。

有关系统辨识理论及其工程应用,已有大量的论文和著作发表。本书介绍了系统辨识的基本理论、基本方法和应用技术,同时融入了国内外同行近年来所取得的新成果。为了使读者能了解、掌握和应用这一领域的最新技术,并学会用 MATLAB 语言进行系统辨识算法的设计,作者编写了这本书,以抛砖引玉,供广大读者学习参考。

本书具有几个特点:

(1) 系统辨识算法着重于基本概念、基本理论和基本方法,并介绍了一些有潜力的新思想、新方法和新技术。

(2) 针对每种系统辨识算法给出了完整的 MATLAB 仿真程序,并给出了程序的说明和仿真结果,具有很强的可读性。

(3) 着重从应用领域角度出发,突出理论联系实际,面向广大工程技术人员,具有很强的工程性和实用性。书中有许多应用实例及其结果分析,为读者提供了有益的借鉴。

(4) 所给出的各种系统辨识算法完整,程序设计结构设计力求简单明了,便于自学和进一步开发。

全书共 9 章,包括绪论、系统辨识常用输入信号、最小二乘参数辨识方法及原理、极大似然参数辨识方法及其应用、传递函数的时域与频域辨识、神经网络辨识及其应用、模糊系统辨识、智能优化算法辨识及灰色系统辨识。书中有大量实例,每种实例都进行了仿真分析,并给出了相应的 MATLAB 仿真程序。

本书是在 MATLAB R2011a 环境下开发的,并适用于其他更高级版本。各个章节的内容具有很强的独立性,读者可以结合自己的方向深入地进行研究。

本书由刘金琨、沈晓蓉、赵龙共同编著。其中,沈晓蓉编写第 2 章和第 4 章,赵龙编写第 3 章,其余各章由刘金琨编写。研究生袁瑞侠参与了书稿的整理和校对工作。

本书各部分内容既相互联系又相互独立,读者可根据自己需要选择学习。本书可作为高等院校自动化、计算机应用、机械电子工程等专业高年级本科生或研究生的教材或参考书,也可供相关专业的工程技术人员阅读。

本书提供免费的电子课件、MATLAB 仿真程序,读者可登录网站 <http://si.buaa.edu.cn> 下载;或登录电子工业出版社的华信教育资源网:www.hxedu.com.cn,注册后免费下载;或通过邮件与作者 ljkbuaa@buaa.edu.cn 联系索取。

由于作者水平有限,书中难免存在一些不足和错误之处,欢迎广大读者批评指正。

作者

2013 年 1 月于北京航空航天大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 建立数学模型的基本方法	1
1.2 系统辨识的定义	3
1.3 系统辨识的研究目的	3
1.4 数学模型分类	4
1.5 几种常见的数学模型的数学表示	5
1.6 系统辨识常用的误差准则	6
1.7 系统辨识的分类	7
1.7.1 离线辨识	7
1.7.2 在线辨识	7
1.8 辨识的内容和步骤	8
1.9 系统辨识方法	9
1.10 系统辨识方法分类	9
1.10.1 经典系统辨识方法	9
1.10.2 现代系统辨识方法	9
思考题与习题 1	12
第 2 章 系统辨识常用输入信号	13
2.1 系统辨识对输入信号的要求	13
2.2 系统辨识常用的输入信号	16
2.2.1 白噪声信号	16
2.2.2 白噪声序列的产生	17
2.3 M 序列的产生及其性质	21
思考题与习题 2	30
第 3 章 最小二乘参数辨识方法及应用	31
3.1 最小二乘参数辨识方法	32
3.1.1 基本原理	32
3.1.2 利用最小二乘法求取模型参数	32
3.1.3 仿真实例:热敏电阻和温度关系的最小二乘参数求解	33
3.2 加权最小二乘算法	35
3.2.1 一般最小二乘算法的分析与设计	35
3.2.2 加权最小二乘法的分析与设计	37
3.2.3 仿真实例	39
3.3 递推最小二乘算法	41
3.3.1 递推最小二乘算法的基本原理	41
3.3.2 递推最小二乘算法的分析与设计	41

3.3.3	仿真实例	43
3.3.4	时不变系统的递推最小二乘参数辨识方法	46
3.3.5	时变系统的递推最小二乘参数辨识方法	46
3.4	递推阻尼最小二乘算法	47
3.4.1	递推阻尼最小二乘算法的基本原理	47
3.4.2	递推阻尼最小二乘算法的分析与设计	48
3.4.3	仿真实例	49
3.5	增广最小二乘算法	52
3.5.1	增广最小二乘算法的基本原理	52
3.5.2	增广最小二乘算法的分析与设计	52
3.5.3	仿真实例	53
3.6	多变量系统的最小二乘辨识算法	55
3.6.1	多变量系统的最小二乘辨识算法的基本原理	55
3.6.2	多变量系统的最小二乘辨识算法的分析与设计	56
3.6.3	仿真实例	57
	思考题与习题 3	59
第 4 章	极大似然参数辨识方法	61
4.1	引言	61
4.2	极大似然参数估计的原理及性质	61
4.2.1	极大似然参数估计原理	61
4.2.2	似然函数的构造	62
4.2.3	极大似然参数估计的统计性质	63
4.3	动态系统参数的极大似然参数估计	64
4.4	Newton-Raphson 法应用于极大似然参数估计求解	67
4.5	递推的极大似然估计	70
	思考题与习题 4	78
第 5 章	传递函数的时域和频域辨识	79
5.1	传递函数辨识的时域法	79
5.1.1	一阶惯性滞后环节的辨识	80
5.1.2	二阶惯性加纯延迟的传递函数拟合	82
5.1.3	用 n 阶惯性环节加纯延迟的传递函数拟合	83
5.2	传递函数的频率辨识	83
5.2.1	利用 Bode 图特性求传递函数	84
5.2.2	利用 MATLAB 工具求系统传递函数	86
5.3	线性系统开环传递函数的辨识	87
5.3.1	基本原理	87
5.3.2	仿真实例	88
5.4	闭环系统传递函数的辨识和前馈控制	92
5.4.1	闭环系统辨识	92
5.4.2	仿真实例	93

5.4.3	零相差前馈控制基本原理	97
5.4.4	系统相移	98
5.4.5	仿真实例	99
	思考题与习题 5	102
第 6 章	神经网络辨识及其应用	103
6.1	神经网络理论基础	103
6.1.1	神经网络原理	103
6.1.2	神经网络学习算法	105
6.1.3	神经网络的要素及特征	106
6.1.4	人工神经网络辨识的特点	106
6.2	BP 神经网络辨识	107
6.2.1	BP 神经网络	107
6.2.2	网络结构	107
6.2.3	BP 网络的优缺点	107
6.3	BP 网络的逼近	108
6.3.1	基本原理	108
6.3.2	仿真实例	109
6.4	基于数据的 BP 网络离线建模	111
6.4.1	基本原理	111
6.4.2	仿真实例	113
6.5	基于模型的 BP 神经网络离线建模	116
6.5.1	基本原理	116
6.5.2	仿真实例	117
6.6	RBF 神经网络辨识及在自校正控制中的应用	120
6.6.1	RBF 神经网络	120
6.6.2	RBF 网络的逼近	120
6.6.3	仿真实例	121
6.7	基于未知项在线建模的 RBF 网络自校正控制	124
6.7.1	神经网络自校正控制原理	124
6.7.2	RBF 网络自校正控制	124
6.7.3	仿真实例	126
6.8	Hopfield 神经网络辨识	129
6.8.1	Hopfield 网络原理	129
6.8.2	Hopfield 网络线性系统参数辨识	131
6.8.3	仿真实例	133
6.9	RBF 网络建模应用——自适应神经网络控制	139
6.9.1	问题描述	139
6.9.2	RBF 网络逼近原理	139
6.9.3	仿真实例	140
	思考题与习题 6	144

第 7 章 模糊系统辨识	146
7.1 模糊系统的理论基础	146
7.1.1 特征函数和隶属函数	146
7.1.2 模糊算子	146
7.1.3 隶属函数	147
7.1.4 模糊系统的设计	151
7.2 基于 Sugeno 模糊模型的建模	152
7.2.1 Sugeno 模糊模型	152
7.2.2 仿真实例	152
7.2.3 基于 Sugeno 模糊模型的倒立摆模糊控制	154
7.2.4 仿真实例	155
7.2.5 基于 Sugeno 的倒立摆模糊控制	158
7.2.6 仿真实例	159
7.3 模糊逼近	164
7.3.1 模糊系统的设计	164
7.3.2 模糊系统的逼近精度	165
7.3.3 仿真实例	165
7.4 模糊系统建模应用——自适应模糊控制	170
7.4.1 问题描述	170
7.4.2 模糊逼近原理	170
7.4.3 控制算法设计与分析	171
7.4.4 仿真实例	172
思考题与习题 7	177
第 8 章 智能优化算法辨识	179
8.1 遗传算法基本原理	179
8.2 遗传算法的特点	180
8.3 遗传算法的应用领域	181
8.4 遗传算法的优化设计	182
8.4.1 遗传算法的构成要素	182
8.4.2 遗传算法的应用步骤	182
8.5 遗传算法求函数极大值	183
8.5.1 二进制编码遗传算法求函数极大值	184
8.5.2 实数编码遗传算法求函数极大值	188
8.6 基于遗传算法摩擦模型参数辨识的 PID 控制	191
8.6.1 问题描述	191
8.6.2 仿真实例	191
8.7 基于遗传算法的伺服系统静态摩擦参数辨识	196
8.7.1 伺服系统的静态摩擦模型	196
8.7.2 静摩擦模型 Stribeck 曲线的获取	196
8.7.3 基于遗传算法的静态摩擦参数辨识	197

8.7.4	仿真实例	197
8.8	基于遗传算法的机械手参数辨识	203
8.8.1	系统描述	204
8.8.2	仿真实例	206
8.9	粒子群优化算法	215
8.9.1	粒子群算法基本原理	215
8.9.2	参数设置	216
8.9.3	算法流程	216
8.10	基于粒子群算法的函数优化	217
8.11	基于粒子群算法的机械手参数辨识	221
8.12	基于粒子群算法的非线性系统参数辨识	225
8.12.1	辨识非线性静态模型	225
8.12.2	辨识非线性动态模型	228
8.12.3	基于粒子群算法的 VTOL 飞行器参数辨识	233
8.13	差分进化算法	240
8.13.1	标准差分进化算法	240
8.13.2	差分进化算法的基本流程	241
8.13.3	差分进化算法的参数设置	242
8.13.4	基于差分进化算法的函数优化	243
8.14	基于差分进化算法的非线性系统参数辨识	245
8.14.1	辨识非线性静态模型	245
8.14.2	辨识非线性动态模型	249
8.14.3	基于差分进化算法的 VTOL 飞行器参数辨识	253
8.15	基于微分器的微分信号提取	258
8.15.1	微分器的由来	258
8.15.2	微分器的工程应用	259
8.15.3	积分链式微分器	260
8.15.4	仿真实例	261
8.16	基于微分器的差分进化参数辨识	263
8.16.1	系统描述	263
8.16.2	仿真实例	263
	思考题与习题 8	269
第 9 章	灰色系统辨识	270
9.1	灰色系统辨识原理	270
9.1.1	生成数列	270
9.1.2	GM 灰色模型	270
9.2	灰色系统参数辨识	271
9.2.1	问题描述	271
9.2.2	灰色估计算法	271
9.2.3	仿真实例	273
	参考文献	275

第1章 绪论

对有些对象,如化学反应过程等,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参数的问题,这就是所谓的系统辨识问题。

对于许多领域,由于系统比较复杂,不能用理论分析的方法获得数学模型。凡是需要通过实验数据确定数学模型和估计参数的场合都要利用辨识技术,辨识技术已经推广到工程和非工程的许多领域,如化学化工过程、核反应堆、电力系统、航空航天飞行器、生物医学系统、社会经济系统、环境系统、生态系统等。为了实现自适应控制,要不断估计其模型参数,自适应控制系统是辨识与控制相结合的一个范例,也是辨识在控制系统中的应用。

系统辨识是控制论的一个分支,系统辨识、状态估计和控制理论是现代控制理论的三大支柱。这三大支柱是互相渗透的,系统辨识和状态估计离不开控制理论的支持,控制理论的应用不能脱离对象的数学模型和状态估计技术。

系统辨识是根据系统的试验数据来确定系统的数学模型。因此,系统辨识为已经存在的系统建立数学模型提供了有效的方案。

1.1 建立数学模型的基本方法

所谓模型,就是把关于实际过程的本质部分的信息简写成有用的描述形式。用数学结构和形式来反映实际过程行为特性的模型就是数学模型。一般来说,建立数学模型有两种基本方法。

1. 理论分析法

这种方法主要是通过分析系统的运动规律,运用已知的定律、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,建立系统的数学模型。这种方法也称为机理分析法。

【例 1.1】 Vertical Take-Off and Landing (VTOL) 空间飞行器的理论建模。

VTOL 空间飞行器是能够垂直起飞、垂直着陆的具有 3 个空间自由度的系统。如图 1-1 所示为 X - Y 平面上的 VTOL 受力图。由于只考虑起飞过程,因此只考虑横向 X 轴和垂直方向 Y 轴,忽略了前后运动(即 Z 方向)。 X - Y 为惯性坐标系, X_b - Y_b 为飞行器的机体坐标系。

设状态变量是飞行器质心的 X, Y 位置和滚转角 θ , 相应的速度为 $dX/dt, dY/dt$ 和 $d\theta/dt$, 控制输入 T, l 是推力(直接从飞机的底部推动)和滚动力矩。利用牛顿定理, VTOL 空间飞行器的动力学模型表示为

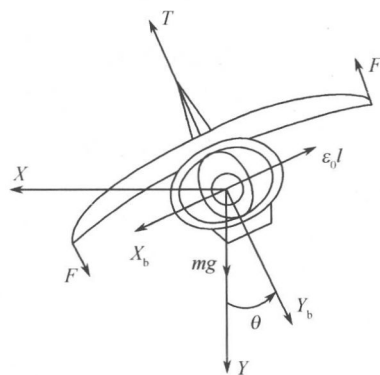


图 1-1 VTOL 空间飞行器坐标示意图

$$-m\ddot{X} = -T\sin\theta + \epsilon_0 l \cos\theta \quad (1.1)$$

$$-m\ddot{Y} = T\cos\theta + \epsilon_0 l \sin\theta - mg \quad (1.2)$$

$$I_x \ddot{\theta} = l \quad (1.3)$$

式中, g 是重力加速度; ϵ_0 是刻画滚动力矩和横向加速度关系的系数。进一步简化动态方程, 并定义 $x=X/g, y=-Y/g, u_1=T/(mg), u_2=l/I_x, \epsilon=\epsilon_0 l/(mg)$, 系统简化为

$$\ddot{x} = -u_1 \sin\theta + \epsilon u_2 \cos\theta \quad (1.4)$$

$$\ddot{y} = u_1 \cos\theta + \epsilon u_2 \sin\theta - g \quad (1.5)$$

$$\ddot{\theta} = u_2 \quad (1.6)$$

虽然 VTOL 飞行器的数学模型可以根据力学原理较准确地推导出来, 但要想获得精确的模型参数 ϵ_0, I_x, m , 就要进行辨识。

由例 1.1 可知, 理论分析方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。这是因为在建模时必须对实际的系统提出合理的简化假设, 然而这些假设未必符合实际情况。另外, 有时实际系统的机理也并非完全可知的。

2. 测试法

系统的输入、输出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。

与理论分析方法相比, 测试法的优点是不需要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要的大量信息, 而设计合理的试验是很困难的。

在实际研究中, 往往将理论分析方法和测试法相结合, 机理已知部分(名义模型)采用理论分析方法, 机理未知部分采用测试方法。

【例 1.2】通过实验确定一个热敏电阻的电阻 R 和温度 t 的关系, 为此在不同的温度 t 下, 对电阻 R 进行多次测量获得了一组测量数据 (t_i, R_i) 。由于每次测量中, 不可避免地含有随机测量误差, 因此想寻找一个函数 $R=f(t)$ 来真实地表达电阻 R 和温度 t 之间的关系。

假设模型结构为

$$R=a+bt$$

式中, a 和 b 为待估参数。

如果测量没有误差, 只需要两个不同温度下的电阻值, 便可以解出 a 和 b 。但是由于每次测量中总存在随机误差, 即

$$y_i=R_i+v_i \quad \text{或} \quad y_i=a+bt+v_i$$

式中, y_i 为测量数据, R_i 为真值, v_i 为随机误差。

显然, 将每次测量误差相加, 可构成总误差

$$\sum_{i=1}^N v_i = v_1 + v_2 + \cdots + v_N$$

如何使测量的总误差最小, 选择不同的评判准则会获得不同的方法, 当采用每次测量误差的平方和为最小时, 即

$$J_{\min} = \sum_{i=1}^N v_i^2 = \sum_{i=1}^N [R_i - (a + bt_i)]^2 \quad (1.7)$$

由于上式中的平方运算又称为“二乘”，而且又是按照 J 最小来估计 a 和 b ，称这种估计方法为最小二乘估计算法，简称最小二乘法。

利用最小二乘法辨识模型参数，若使得 J 最小，利用求极值的方法得

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial J}{\partial a} \right|_{a=a} = -2 \sum_{i=1}^N (R_i - a - bt_i) = 0 \\ \left. \frac{\partial J}{\partial b} \right|_{b=b} = -2 \sum_{i=1}^N (R_i - a - bt_i)t_i = 0 \end{cases} \quad (1.8)$$

对上式进一步整理，则 a 和 b 的估计值可由下列方程确定

$$\begin{cases} Na + \hat{b} \sum_{i=1}^N t_i = \sum_{i=1}^N R_i \\ \hat{a} \sum_{i=1}^N t_i + \hat{b} \sum_{i=1}^N t_i^2 = \sum_{i=1}^N R_i t_i \end{cases}$$

解方程组，可得

$$\begin{cases} \hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i \sum_{i=1}^N t_i^2 - \sum_{i=1}^N R_i t_i \sum_{i=1}^N t_i}{N \sum_{i=1}^N t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N t_i \right)^2} \\ \hat{b} = \frac{N \sum_{i=1}^N R_i t_i - \sum_{i=1}^N R_i \sum_{i=1}^N t_i}{N \sum_{i=1}^N t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N t_i \right)^2} \end{cases} \quad (1.9)$$

由于一定存在 a 和 b 使 J 取极小值，而 $\frac{\partial J}{\partial a}$ 和 $\frac{\partial J}{\partial b}$ 只有一个根，所以 a 和 b 使 J 取最小值。

1.2 系统辨识的定义

控制理论对系统辨识有多种定义。其通俗含义是根据被控对象或被辨识系统的输入、输出观测信息来估计它的数学模型。目前有几个比较典型的定义。

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，并用这个模型把客观系统表示成有用的形式。

③ L. Ljung 定义(1978年)：辨识有 3 个要素，即数据、模型类和准则。其中，数据是辨识的基础，准则是辨识的依据，模型类是辨识的范围。辨识就是按照一个准则在一组模型类中选择对一个数据拟合得最好的模型。

1.3 系统辨识的研究目的

在提出和解决一个辨识问题时，明确最终模型的使用目的是至关重要的。它对模型类(模型结构)、输入信号和等价准则的选择都有很大的影响。通过辨识建立数学模型通常有 6 个目的。

(1) 系统仿真

为了研究不同输入情况下系统的输出情况,最直接的方法是对系统本身进行实验,但实际上是很难实现的。例如,利用实际系统进行实验的费用太大;实验过程中系统可能会不稳定,从而导致实验过程带有一定的危险性;系统的时间常数可能会很大,以致实验周期太长。为此,需要建立数学模型,利用模型仿真系统的特性或行为,从而间接地对系统进行仿真研究。

(2) 系统预测

无论在自然科学领域还是在社会科学领域,往往需要研究系统未来发展的规律和变化趋势,才能预先作出决策和采取措施。科学的定量预测大多需要采用模型预测方法,即首先建立所预测系统的数学模型,根据模型对系统中的某些变量的未来状态进行预测。

(3) 系统设计和控制

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的总体设计要求(如产量指标、误差、稳定性、安全性和可靠性等)相适应。为此,需要建立数学模型,在设计中分析、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。

(4) 系统分析

根据试验数据建立起系统的数学模型之后,可以将所研究的系统的主要特征及其主要变化规律表达出来,将所要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线索和依据。

(5) 故障诊断

许多复杂的系统,如导弹、飞机、核反应堆、大型化工和动力装置以及大型传动机械等,需要经常监视和检测可能出现的故障,以便及时排除故障。这就要求必须不断地收集系统运行过程中的信息,通过建立数学模型,推断过程动态特性的变化情况。然后,根据动态特性的变化情况判断故障是否已经发生、何时发生、故障大小及故障的位置等。

(6) 验证机理模型

根据试验数据建立起系统的数学模型之后,将非常有利于理解所获得的试验数据,从而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,以检验所提出的理论,更全面地理解系统的动态行为。

1.4 数学模型的分类

数学模型分类方法有很多,常见的是按连续与离散、定常与时变、线性与非线性分类。

(1) 按提供的实验信息分为:黑箱、灰箱和白箱

如果系统的结构、组成和运动规律是已知的,适合用机理分析法进行建模,则系统称为“白箱”。如果对系统的客观规律不清楚,只能根据试验中测量系统的响应数据,应用辨识方法建立系统的数学模型,则称系统为“黑箱”。如果已知系统的某些基本规律,但又有些机理还不清楚,则称系统为“灰箱”。

(2) 按概率角度分为:确定性模型和随机性模型

确定性模型所描述的系统,当状态确定后,其输出响应是唯一确定的。而随机性模型所描述的系统,当状态确定后,其输出响应是不确定的。

(3) 按模型与时间的关系分为:静态模型和动态模型

静态模型用于描述系统处于稳态时(各状态变量的各阶导数为零)的各状态变量之间的关系,一般不是时间的函数。动态模型用于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) 按时间刻度分为:连续模型和离散模型

用来描述连续系统的模型有微分方程、传递函数等,用来描述离散系统的模型有差分方程、状态方程等。

(5) 按参数与时间的关系分为:定常模型和时变模型

定常系统的模型参数不随时间的变化而改变,而时变系统的模型参数随时间的变化而改变。

(6) 按参数与输入/输出关系分为:线性模型和非线性模型

线性模型用来描述线性系统,其显著特点是满足叠加原理和均匀性,而非线性模型用来描述非线性系统,一般不满足叠加原理。

(7) 按模型的表达形式分为:参数模型和非参数模型

非参数模型是指从一个实际系统的实验过程中,直接或间接地所获得的响应,是确定性的模型,例如阶跃响应、脉冲响应、频率响应都属于反映该系统特性的非参数模型。采用推理的方法所建立的模型则为参数模型,它可以由非参数模型转化而来,例如状态方程和差分方程。

(8) 按参数的性质分为:分布参数模型和集中参数模型

当系统的状态参数仅是时间的函数时,描述系统特性的状态方程组为常微分方程组,系统称为集中参数系统。当系统的状态参数是时间和空间的函数时,描述系统特性的状态方程组为偏微分方程组,则系统称为分布参数系统。

(9) 按输入/输出个数分为:单输入单输出(SISO)模型和多输入多输出(MIMO)模型

(10) 按模型的使用形式分为:离线模型和在线模型

对系统进行试验,获取全部数据后,运用辨识算法对数据进行集中处理,以得到模型参数的估计值,这种方法称为离线辨识。而在线辨识需要知道模型的结构和阶次,当获得新的输入、输出数据之后,采用递推辨识法对原来的参数估计值进行修正,得到新的参数估计值。

1.5 几种常见的数学模型的数学表示

在控制理论中,数学模型有多种形式。时域中常用的数学模型有微分方程、差分方程和状态方程;复数域中有传递函数和结构图;频域中有频率特性等。这里仅介绍系统辨识中常用的数学模型:离散脉冲响应函数、线性差分方程和状态空间模型。

1. 离散脉冲响应函数

SISO 系统的离散脉冲响应函数是指当初始条件为零时,线性系统对于单位脉冲序列产生的输出响应,记为 $\{g(k)\}$, $k=0, 1, 2, \dots$ 。则在任意输入 $u(k)$ 的作用下,系统的输出表示为

$$y(k) = \left(\sum_{i=0}^{\infty} g(i)z^{-i} \right) u(k)$$

式中, z 为时延因子, $z^{-1}u(k) = u(k-1)$ 。

对于稳态系统,有

$$y(k) = \left(\sum_{i=0}^{N_s} g(i)z^{-i} \right) u(k) \quad (1.10)$$

上式称为移动平均(Moving Average)模型,简称 MA 模型。记

$$B(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{N_s} g(i)z^{-i}$$

对于随机系统,考虑噪声项的影响,则

$$y(k) = B(z^{-1}) \cdot u(k) + e(k) \quad (1.11)$$

式中, $e(k)$ 为噪声项。

2. 线性差分方程

差分方程是离散系统最基本的一种模型,动态的离散系统输入、输出采样值序列 $u(k)$ 和 $y(k)$ 之间的关系可表示成如下的 n 阶线性差分方程

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \dots + b_n u(k-n) \quad (1.12)$$

该方程称为自回归滑动平均(Auto-Regressive Moving Average)模型,简称 ARMA 模型。

3. 状态空间模型

线性时不变连续系统的状态空间描述为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (1.13)$$

式中, $\mathbf{x}(t) \in R^n$ 为系统的状态变量, $\mathbf{u}(k) \in R^m$ 为系统的输入量, $\mathbf{y}(k) \in R^r$ 是系统的输出量, $\mathbf{A} \in R^{n \times n}$ 为系统矩阵, $\mathbf{B} \in R^{n \times m}$ 为输入矩阵, $\mathbf{C} \in R^{r \times n}$ 为输出矩阵。

线性时不变离散系统的状态空间模型为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (1.14)$$

式中, $\mathbf{x}(k) \in R^n$, $\mathbf{y}(k) \in R^r$, $\mathbf{u}(k) \in R^m$; $\mathbf{A} \in R^{n \times n}$, $\mathbf{B} \in R^{n \times m}$, $\mathbf{C} \in R^{r \times n}$; 系数矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 的维数分别为 $n \times n$ 、 $n \times m$ 、 $r \times n$ 。

1.6 系统辨识常用的误差准则

辨识时所采用的误差准则是辨识问题的 3 个要素之一,是用来衡量模型接近实际系统的标准。

误差准则常被表示为误差的泛函数,即

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N f(\epsilon(k)) \quad (1.15)$$

式中, $f(\cdot)$ 为 $\epsilon(k)$ 的函数, $\epsilon(k)$ 是定义在区间 $(0, N)$ 上的误差函数,一般指模型与实际系统的误差。其中

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

误差 $\epsilon(k)$ 的确定分为输出误差准则、输入误差准则和广义误差准则。系统辨识中一般采用输出误差准则,如图 1-2 所示,当实际系统的输出和模型的输出分别为 $y(k)$ 和 $y_m(k)$ 时,输出误差为

$$\epsilon(k) = y(k) - y_m(k) \quad (1.16)$$

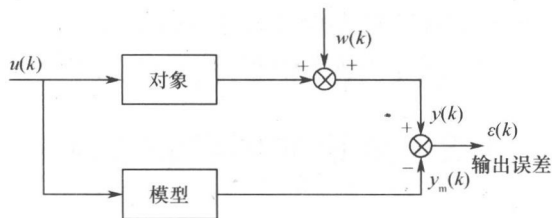


图 1-2 输出误差示意图

1.7 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辨识和非线性系统辨识、集中参数系统辨识和分布参数系统辨识;根据系统的结构可分为开环系统辨识与闭环系统辨识;根据参数估计方法可分为离线辨识和在线辨识等。另外,还有经典系统辨识和近代系统辨识、系统结构辨识和系统参数辨识等分类。其中,离线辨识与在线辨识是系统辨识中常用的两个基本概念。

1.7.1 离线辨识

如图 1-3 所示,离线辨识要求把被辨识对象从整个系统中分离出来,然后将大量输入、输出数据存储起来,并按照一定的辨识算法进行数据处理。如果系统的模型结构已经选好,阶数也已确定,在获得全部数据之后,用最小二乘法、极大似然法或其他估计方法,对数据进行集中处理后,得到模型参数的估计值,这种方法称为离线辨识。

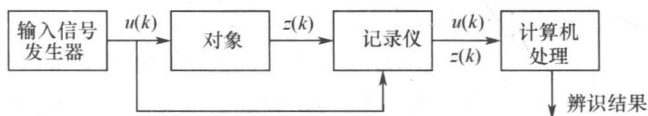


图 1-3 离线辨识

离线辨识的优点是参数估计值的精度较高,对于计算时间没有苛刻的限制;缺点是需要存储大量数据,运算量也大。

1.7.2 在线辨识

有些对象,为了进行离线辨识而中断系统的正常运行,会造成人力和生产线上的极大损耗。另外,有些对象根本不允许离线辨识。例如自适应控制系统和某些不允许中断正常运行的工业系统中的被控对象。这时,就必须采用在线辨识,如图 1-4 所示。

在线辨识时,系统的模型结构和阶数是事先确定好的。当获得一部分新的输入、输出数据后,在线估计采用递推方法进行处理,从而得到模型新的估计值。在线辨识不要求存储从过去到现在的全部输入、输出信息,而是在某个初值下,不断利用新信息进行递推运算从而不断修正模型参数的估计值。这就要求计算机在一个采样周期内,能够完成一次递推运算,要求递推算法有足够快的收敛速度。

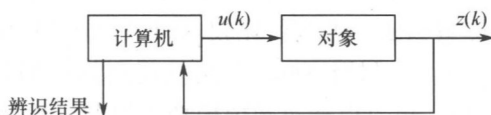
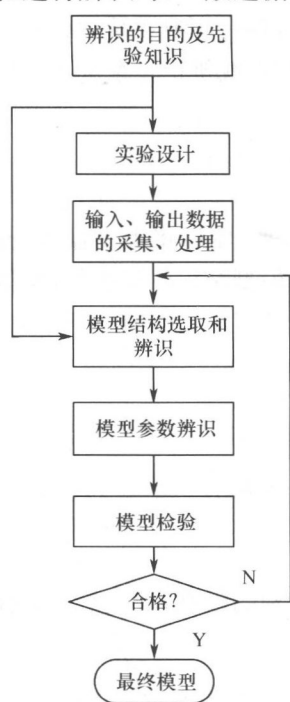


图 1-4 在线辨识

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,适合于实时控制;缺点是参数估计的精度较差,要求足够高的计算速度,相应地会增加设备费用。

1.8 辨识的内容和步骤

简单地说,辨识就是从一组观测到的含有噪声的输入、输出数据中提取数学模型的方法。然而,辨识具体应用到一个实际对象时,就需要做很多辅助工作。明确模型应用的最终目的是至关重要的,这将决定模型的类型、精度要求及采用什么辨识方法等问题。另外,系统辨识还应当解决一些问题,例如,如何选定和预测系统的数学模型,用什么输入信号及怎样产生这种信号,如何在系统的输出受噪声的污染的情况下进行数据处理和参数估计及如何验证建立的模型是否符合实际等。虽然系统辨识在数据、模型种类和准则的选择上有相当大的自由度,但在进行辨识时,一般遵循下面的步骤,如图 1-5 所示。



① 明确辨识的目的。它决定模型的类型、精度要求和所采用的辨识方法。

② 掌握先验知识。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的数学模型种类,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。

⑤ 数据预处理。输入和输出数据中常含有的低频成分和高频成分对辨识精度都有不利的影响,需要采用滤波器等方法进行去除。

⑥ 模型结构选取和辨识。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、纯延迟等。

⑦ 模型参数辨识。在假定模型结构确定之后,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。从不同的侧面检验模型是否可靠,检验模型的标准是模型的实际应用效果,最后验证所确定的模型是否恰当地表示了被辨识的系统。工程中常用的模型验证方法有以下 4 种。

图 1-5 辨识的一般步骤

i. 用不同时间段内采集的数据分别建模,如果模型基本符合,则认为模型是可靠的。

ii. 用采集到的部分数据进行建模,用其余的试验数据进行预测。然后与相同条件下实际测量到的数据进行比较,如果相差较小,可认为模型正确。

iii. 利用不同试验方法得到的结果相互验证。例如,气动力参数可以从飞行数据中辨识出来,也可以通过数值模拟和风洞试验获得,如果几种手段较为一致,也可验证模型的正确性。

iv. 利用模型和实测数据的残差进行验证。正确的模型对应的残差序列应该是零均值的白噪声,否则表明模型与系统有偏差。

如果所确定的系统模型合适,则辨识结束。否则,则必须改变系统的实验前模型结构,并重新执行辨识过程,即执行第④步至第⑧步,直到获得一个满意的模型为止。