

名师策划 名师主理 教改结晶 教材精品



新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

丛书主编 邹逢兴

系统辨识基础

李鹏波 胡德文 等编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

系统辨识基础

李鹏波 胡德文 等编著

中国水利水电出版社

内 容 提 要

系统辨识是研究确定系统数学模型的一种理论和方法,它和状态估计、控制理论构成现代控制论三个互相渗透的领域。本书系统地介绍系统辨识和参数估计的基本原理、方法和应用。全书共分为10章,内容包括:绪论、传递函数的辨识、辨识的输入信号、相关辨识法、辨识的最小二乘法、极大似然法及其他辨识算法、系统阶次的辨识、闭环系统辨识、时间序列的建模分析基础以及系统辨识的应用。书中包含很多工程应用实例、Matlab 实例、例题和习题。

本书可作为自动化、机械、仪器仪表、认知科学、生物信息学等专业系统辨识、建模和参数估计课程的本科生教材,也可以供相关专业的研究生、教师 and 科技工作者参考。

本书所配电子教案可以从中国水利水电出版社网站免费下载,网址为:
<http://www.waterpub.com.cn/softdown/>。

图书在版编目(CIP)数据

系统辨识基础/李鹏波等编著. —北京:中国水利水电出版社, 2006

(新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材)

ISBN 7-5084-4104-4

I. 系… II. 李… III. 系统辨识—高等学校—教材 IV.N945.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 116327 号

书 名	系统辨识基础
作 者	李鹏波 胡德文 等编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)、82562819 (万水) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
经 售	
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京市天竺颖华印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 14 印张 339 千字
版 次	2006 年 10 月第 1 版 2006 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	22.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

编审委员会

顾问：

冯博琴（西安交通大学教授，第一届国家级教学名师）
蔡自兴（中南大学教授，第一届国家级教学名师）
蔡惟铮（哈尔滨工业大学教授，第一届国家级教学名师）

主任委员：

邹逢兴（国防科学技术大学教授，第一届国家级教学名师）

副主任委员：

刘甘娜（大连海事大学教授，教育部非计算机专业计算机基础课程
教学指导分委员会委员）
胡德文（国防科学技术大学教授，国家杰出青年科学基金获得者）
龚沛曾（同济大学教授，国家级精品课程负责人）
王移芝（北京交通大学教授，国家级精品课程负责人）

委员：

孙即祥	陈怀义	叶湘滨	马宏绪	张湘平	高 政
李 革	刁节涛	卢启中	潘孟春	陆 勤	黄爱民
宋学瑞	李云钢	陈立刚	彭学锋	徐晓红	杨益强
陈贵荣	王成友	史美萍	李 迅	徐 欣	王 浩

新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

总 序

电子信息与自动化系列课程是专业适用面很广的课程系列。随着电子信息时代的到来,特别是进入 21 世纪之后,我国各级各类本科院校相当多的理工科专业都或多或少地开设了该系列课程中的课程。因此,提高该系列课程的教学水平、教学质量,对于提高我国高等教育水平和质量,增强当代大学生应用先进的信息技术解决专业领域问题的能力和业务素质,具有特殊重要的意义。而教材是课程内容和课程体系的知识载体,对课程改革和建设既有龙头作用,又有推动作用,所以要提高课程教学水平和质量,关键是要有高水平、高质量的教材。

正是基于上述认识,中国水利水电出版社推动成立了“新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材”编审委员会,在经过近两年时间的深入调查研究的基础上,策划提出了本系列教材的编写、出版计划。

本系列教材总的定位是面向各级各类高等院校的本科教学,重点是一般本科院校的教学。整个教材系列大体分为电子信息与通信、计算机基础教育和测控技术与自动化三类,共约 50 本主体教材,它们既自成体系,具有信息类学科的系统性、完整性,又有相对独立性。参加本系列教材编写的作者全部是一些重点大学长期从事相关课程教学的教授、副教授,大多是所在单位的学科学术带头人或学术骨干,不少还是全国知名专家教授、国家级教学名师和教育部有关“教指委”专家、国家级精品课程负责人等,他们不仅有丰富的教学经验,而且有丰富的相关领域的科研经验,对有关课程的内涵、特点、内容相关性及应用等都有较深刻的认识和切身体验。这对编写、出版好本系列教材是十分有利的条件。

本系列教材在编写时均遵循了以下指导思想:

(1) 正确处理先进性和基础性的关系,努力实现两者的统一。

作为进入新世纪的新编信息类教材,既注意在原有同类教材的基础上推陈出新,努力反映学科技术的最新成就,使之具有鲜明的时代特征和先进水平,又注重符合教学规律、教学特点,突出基本原理、基本知识、基本方法和基本技术技能的阐述,着力培养学生应用基础知识分析、解决问题的创新思维能力和将来独立获取、掌握新知识,跟踪相关学科技术发展的能力。

(2) 正确处理理论与实践的关系,切实贯彻理论与实践紧密结合的原则。

本系列教材绝大多数都是理论与实际结合紧密、实用性很强的课程教材,因此特别强调从应用的角度组织内容,在重视理论系统性的同时,尤其突出实践性、应用性,使学生学了以后懂得有什么用、怎么用。在教材内容阐释时,积极引入“案例”,将基本知识单元、知识点的讲解融入典型案例的解决和研究过程中,以培养学生解决工程实际问题的能力作为突破口。

(3) 遵循“宽编窄用”的内容选取原则和模块化的内容组织原则。

凡教育部课程“教指委”制定了教学基本内容及要求的课程,所编教材均覆盖基本内容,

满足基本要求；其他教材的内容选取也都尽量符合多数学校和国内外同行专家的共识。在此基础上再改革创新，努力从继承与发展的结合上来准确把握（取舍）内容。模块化的内容组织主要有利于适应不同专业、不同层次、不同学时数的教学组织和安排。

（4）努力贯彻素质教育与创新教育的思想，尽量采用“问题牵引”、“任务驱动”的编写方式，融入启发式教学方法。

各知识单元尽量以实际问题、工程实例引出相关知识点，在启发学生分析、解决问题及实例的过程中，讲清原理和概念，提炼解决问题的思路和方法，着力培养学生的创新思维意识、习惯和能力，提高学生思考、分析、解决工程实际问题的素质和能力。

（5）注重内容编排的科学严谨性和文字叙述的准确生动性，务求好教好学。

在内容组织上，除条理清晰、逻辑严谨外，还尽量做到重点突出、难点分散、循序渐进，使学生易于理解。在文字叙述上，不仅概念准确、语言流畅，而且力求富有启发性、互动性、感染性、思想性，重视运用形象思维方法和通俗易懂语言，深入浅出地叙述复杂概念，说明难点问题。

（6）立足于形成立体配套的教材体系，以适应现代化教育教学方法手段的需要。

每本教材编写出版后都配套制作有 PowerPoint 电子教案，可从中国水利水电出版社网站上免费下载。大部分主教材出版后还将相继出版配套的辅助教材（包括教学辅导、习题解答、实验教程等），有的还将推出相应的多媒体教学资源库、CAI 课件和课程网站，为教师备课、教学和学生自主性、个性化学习提供更多更好的支持。

总之，本系列教材是近年来各位作者及所在学校、学科课程教学改革和科学研究成果的结晶，在内容上、体系上、模式上有一定创新。我相信，它的出版将对推动我国高校电子信息与自动化系列课程的改革发挥积极的作用。

但是，由于电子信息与自动化类学科的内涵十分丰富，课程覆盖面很广，在组织策划本系列教材时难免有挂一漏万和不妥之处，所编教材质量也未必都能如愿，恳请广大读者多提宝贵意见，以使本系列教材渐趋合理、完善。

邹逢兴
2005 年 6 月

前 言

在自然科学和社会科学的许多领域中，人们越来越重视对系统进行定量的系统分析、系统综合、仿真、控制和预测。而将被研究对象模型化，是开展这些工作的前提和基础。一般说来，建立系统的数学模型有两种基本方法，即机理分析法和测试法。机理分析法即理论建模方法，它主要是通过分析系统的运动规律（物理的、化学的或社会学的规律），利用数学方法推导出模型的结构和参数。机理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，在进行理论建模时，就必须提出合理的简化假定，否则会使问题过于复杂。这样建立模型有时是不够准确的，有时甚至是不可能的。测试法是通过分析未知系统的实验或运行数据（输入输出数据），来建立一个与所测系统等价的数学模型。测试建模的方法就是系统辨识。

在自动控制领域，系统辨识就是早期控制系统动态特性测试的延续。动态特性的测试，即通过试验得到系统的过渡过程曲线或频率特性曲线，再推算出系统的脉冲过渡函数或传递函数。现代的系统辨识则主要是由系统的输入输出直接求出动态方程式的结构和参数。辨识方法可以较好地解决系统噪声和测量噪声干扰的问题，可以处理多变量和非线性系统问题，而对于时变系统和分布参数问题，则可以在多级系统上作参数估计。

由动态特性测试方法直接得到的是非参数模型，而为了获得参数模型就必须探索应用更为普遍的参数估计方法。实际系统通过试验所获得的数据，都包含有测量噪声，而模型的假定和简化等过程所引起的误差也可以理解为噪声，从受到噪声干扰的观测值中寻求最接近被测值的估计值，这一过程称为参数估计。参数估计是系统辨识中的基础部分，在此，它解释为在系统结构已知的情况下从系统的观测数据中找出最接近观测值的估计值。

由于学科的发展，不同学科的重叠交叉成为学科发展中的普遍现象。系统辨识中普遍地采用了时间序列的概念和方法，这说明二者在方法上有许多共同之处。时间序列分析起步略早一些，20 世纪之初，许多数学家开始注意到气象、天文现象的时序特性，从而将静态模型参数估计的概率论和数理统计移到了离散时间序列的参数估计上来。时间序列分析相当于估计具有白噪声输入的系统，其输入信号是不可测量的，使用的信息只有系统或过程的输出观测值。与时序分析相比，系统辨识的内容则更为广泛些。它除了利用输出信号外，还有测量的输入控制信号，要求辨识的结果尽可能不受观测噪声或过程噪声的影响。可以说，正是数理统计学家大量深入的理论工作，为系统辨识奠定了扎实的理论基础。

计算机技术的不断发展和普及，为系统辨识的广泛应用提供了技术上的保证，这也是系统辨识发展的基础之一。可以说，研究系统辨识的算法，几乎不用担心它在计算上的可操作性问题。计算机具有强大的硬件支持、丰富的软件资源和高速的运算能力，可以在人工不干预的情况下，在线实时地完成系统的辨识，为控制策略的设计直接提供出数学模型。

系统辨识、状态估计和控制理论构成现代控制论三个互相渗透的领域。系统辨识是一门应用范围很广的学科,其实际应用已遍及许多领域,在工程控制、航空、航天、海洋工程、认知科学、医学、生物信息学、水文学及社会经济等方面的应用越来越广泛。

本书系统地讲述了系统辨识的理论和各种辨识方法,分析各种方法的特点和内在联系,并介绍辨识技术的实际应用。本书的内容共分为 10 章。第 1 章至第 4 章为绪论、传递函数的辨识、辨识的输入信号、相关辨识法,主要介绍与系统辨识有关的基础知识,分析经典的辨识方法。第 5 章分析最小二乘法,以及以最小二乘法为基础的辅助变量法、广义最小二乘法、增广最小二乘法、相关最小二乘法和多阶段最小二乘法等估计方法。第 6 章着重分析极大似然法、预报误差法、随机逼近法等参数估计方法以及各种递推算法。这些方法是系统辨识中常用的基本方法,是系统辨识的主要内容。第 7 章至第 9 章分别介绍系统结构的辨识、闭环系统辨识、时间序列的建模分析基础。第 10 章介绍系统辨识技术在工程技术、生物医学和社会经济系统中的应用。本书讲述系统辨识的基本原理、方法,介绍了大量的工程应用实例、Matlab 仿真实例、例题和习题,并附有 Matlab 系统辨识工具箱的介绍和上机实验说明。

阅读本书应具有自动控制原理、概率论和数理统计等方面的基础。

本书的编写过程受到了张金槐教授、邹逢兴教授、谢红卫教授、张湘平教授的热情支持、关怀和指导,尤其是本丛书的主编邹逢兴教授对本书进行了全面的评审,提出了宝贵的意见。此外,虞水俊副教授、周宗潭副教授、吴美平副教授、张明副教授、宫二玲副教授、沈辉副教授、董国华副教授以及李龙、孙志强、李晓龙、陈爽、王华、杜润乐等研究生也为本书提供了不少帮助。本书从系统性的角度出发,参考了国内外许多教材、专著和论文的研究成果和内容。在此,向他们一并表示诚挚的谢意。

书中的缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

2006 年 6 月

目 录

总序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 辨识的基本概念	2
1.1.1 模型的含义和表现形式	2
1.1.2 建立数学模型的基本方法	2
1.1.3 系统辨识的定义	3
1.2 系统辨识的研究目的	3
1.3 数学模型的分类	5
1.4 几种常见的数学模型的数学表示	6
1.5 辨识的步骤	12
思考题与习题	13
第 2 章 传递函数的辨识	15
2.1 传递函数辨识的时域法	16
2.1.1 一阶惯性滞后环节的辨识	17
2.1.2 二阶自衡对象的辨识	18
2.1.3 二阶欠阻尼自衡对象的辨识	20
2.1.4 高阶自衡对象的辨识	20
2.1.5 自衡等容对象的辨识	21
2.1.6 无自衡对象的传递函数辨识	23
2.1.7 面积法	23
2.2 传递函数辨识的频域法	25
2.2.1 由实验测定系统的频率响应	25
2.2.2 由实验频率响应辨识传递函数	28
思考题与习题	36
第 3 章 辨识的输入信号	37
3.1 白噪声及其产生方法	38
3.1.1 白噪声过程	38
3.1.2 白噪声序列	39
3.1.3 白噪声序列的产生方法	40
3.2 伪随机序列	42

3.2.1	M 序列的产生与性质	43
3.2.2	M3 序列的产生与性质	46
3.2.3	逆重复 M 序列	47
3.3	连续型伪随机信号	48
3.3.1	连续型伪随机信号的自相关函数	48
3.3.2	连续型伪随机信号的功率谱密度	49
	思考题与习题	51
第 4 章	相关辨识法	53
4.1	连续时域相关分析法	54
4.2	利用 M 序列作输入信号的相关分析法	56
4.3	用脉冲响应求传递函数	63
4.3.1	连续系统的传递函数	63
4.3.2	离散系统的脉冲传递函数	64
	思考题与习题	66
第 5 章	辨识的最小二乘法	67
5.1	最小二乘估计	68
5.2	最小二乘估计的统计性质	70
5.3	最小二乘递推算法	74
5.4	数据递推的饱和及解决办法	77
5.4.1	数据饱和现象	77
5.4.2	渐消记忆法	78
5.4.3	限定记忆法	79
5.4.4	振荡记忆法	80
5.5	广义最小二乘法	80
5.6	增广最小二乘法	83
5.7	辅助变量法	87
5.7.1	一次完成算法	87
5.7.2	辅助变量的选择	87
5.7.3	辅助变量递推算法	89
5.8	相关最小二乘法	90
5.9	多阶段最小二乘法	95
5.10	最小二乘类辨识算法的比较	101
	思考题与习题	103

第 6 章 极大似然法及其他辨识算法	105
6.1 极大似然法	106
6.1.1 极大似然原理	106
6.1.2 数值解法	108
6.1.3 递推的极大似然法	110
6.1.4 极大似然估计的统计性质	113
6.2 预报误差法	114
6.2.1 预报误差模型	114
6.2.2 预报误差法和极大似然法的关系	115
6.2.3 预报误差迭代算法	117
6.3 随机逼近法	118
6.3.1 随机逼近原理	118
6.3.2 随机逼近法	120
6.3.3 随机牛顿法	121
6.4 递推参数估计算法的收敛性描述	122
6.5 辨识算法的比较	125
思考题与习题	126
第 7 章 系统阶次的辨识	129
7.1 根据 Hankel 矩阵判定模型的阶次	130
7.2 根据残差特性判定模型的阶次	131
7.2.1 阶和目标函数	131
7.2.2 确定阶的 F 检验法	132
7.2.3 方程误差独立性检验法	134
7.3 确定阶的 AIC 准则	135
7.3.1 AIC 准则	135
7.3.2 AIC 法对线性定常系统定阶	135
7.3.3 AIC 准则与 F 检验法的关系	137
7.4 阶次增加时的参数递推估计算法	138
思考题与习题	140
第 8 章 闭环系统辨识	141
8.1 闭环系统的可辨识性条件	142
8.2 闭环系统的间接辨识法与可辨识性条件	144
8.3 闭环系统的直接辨识法	146
8.3.1 频率特性的直接辨识法	146
8.3.2 用辅助变量法来直接辨识	148

8.3.3 用相关最小二乘法来直接辨识	149
8.4 闭环系统切换调节器辨识	151
思考题与习题	153
第 9 章 时间序列的建模分析基础	155
9.1 时间序列模型的动态特性	156
9.1.1 格林函数	156
9.1.2 逆函数	157
9.1.3 自相关函数	158
9.1.4 偏自相关函数	159
9.2 时间序列建模	160
9.3 非平稳时序的处理方法	163
9.4 预报	166
思考题与习题	170
第 10 章 系统辨识的应用	171
10.1 辨识在轧钢机械系统中的应用	172
10.2 辨识在机床切削自适应控制系统中的应用	174
10.3 辨识在电力系统中的应用	177
10.4 辨识在化工系统中的应用	180
10.5 辨识在飞行器气动力参数辨识中的应用	185
10.6 辨识在生物医学工程中的应用	188
10.7 建模分析方法在社会经济系统中的应用	192
附录 A 系统辨识实验说明	197
实验 1 利用相关分析法辨识脉冲响应函数	197
实验 2 机床切削加工颤振模型的辨识	197
实验 3 离散模型的参数与阶次的辨识	198
实验 4 加热设备动态特性的辨识	200
附录 B Matlab 系统辨识工具箱简介	201
参考文献	209



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三个领域。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，但它的实际应用不能脱离被控对象的数学模型。有些控制系统的数学模型可以用理论分析的方法推导出来，如导弹等飞行器运动的数学模型，一般可根据力学原理较准确地推导出来，但其模型的参数在飞行过程中是变化的。为了实现自适应控制，在飞行器的飞行过程中，要不断地估计其模型参数。对化学生产过程、生物规律、药物反应或社会经济等问题进行定量分析时，也需要建立相应的数学模型。所谓系统辨识，就是研究如何确定系统的数学模型及其参数，它的理论正日趋成熟，其实际应用已遍及许多领域。

本章主要介绍辨识的一些基本概念，包括建模的方法、辨识的定义、模型的表达形式、辨识的内容和步骤等。

1.1 辨识的基本概念

1.1.1 模型的含义和表现形式

在自然科学和社会科学的许多领域中,人们越来越重视对系统进行定量的系统分析、系统综合、仿真、控制和预测。将被研究对象模型化,则是开展这些工作的前提和基础。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。

模型通常有如下的一些主要表现形式:

(1) 直觉模型。它是指系统的特性以非解析的形式直接储存在人脑中,靠人的直觉控制系统的变化。如司机靠直觉模型驾驶车辆,指挥员靠直觉模型指挥战斗等。

(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,或者是实际系统的一种物理模拟。如沙盘、风洞、水力学模型、传热学模型、飞行转台、微波暗室,以及电力系统动态模拟等均是物理模型。

(3) 图表模型。它是用图形或表格形式来表现系统的特性。如阶跃响应、脉冲响应和频率响应等,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。常用的有代数方程、微分方程、差分方程、状态方程,以及分布式参数方程等,又称为参数模型。

1.1.2 建立数学模型的基本方法

一般说来,建立系统的数学模型有两种基本方法。

1. 机理分析法

机理分析法即理论建模方法,它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,如力学原理、能量守恒定理、传热学原理、化学动力学原理、生物学定律等,利用数学方法进行推导,建立系统的数学模型。

机理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。这是因为在进行理论建模时,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。所谓系统辨识,就是测试建模方法,即通过分析未知系统的实验或运行数据(输入输出数据),来建立一个与所测系统等价的数学模型。

与机理分析法相比,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。因此在具体建模时,常常将机理分析法和测试法这两种方法结合起来使用,机理已知的部分采用机理分析法,机理未知的部分采用测试法。

另外,建立数学模型时,一般需要遵循以下一些基本原则:

- (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。

1.1.3 系统辨识的定义

从以下不同时期中学者对辨识的定义,我们可看出系统辨识技术的发展过程。

Zadeh(1962)曾给辨识作如下定义:“辨识就是在输入和输出数据的基础上,从一组给定的模型中,确定一个与所测系统等价的模型。”这个定义明确了辨识的三大要素,即输入输出数据、模型类和等价原则。其中,数据是辨识的基础,准则是辨识的优化目标,模型类是寻找模型的范围。当然,按照 Zadeh 的定义,寻找一个与实际过程完全等价的模型无疑是非常困难的。从实用观点出发,对模型的要求并非如此苛刻。

P. Eykhoff(1974)所作的定义:“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 对该定义作了如下的解释:“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。”

L. Ljung(1978)所作的定义则更加实用:“辨识有三个要素,即数据、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。”

系统辨识是控制论的一个分支,系统辨识、状态估计、控制理论构成了现代控制论的三大支柱。系统辨识的理论基础是数理统计学。

系统辨识的应用范围越来越广泛,这是由于各门科学的定量化所引起的,不仅是航空、航天、电力、化工、海洋工程等工程技术领域,还延伸到认知科学、生物信息学、医学工程、经济、社会、生态环境、水文、地质等各个学科。

1.2 系统辨识的研究目的

前面我们介绍了什么是模型,本节讨论为什么要建立被研究对象的数学模型。明确了建模的目的,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。

模型化是进行系统分析、仿真、设计、预测、控制和决策的前提和基础。具体地说,建立被研究的系统的数学模型有以下几个方面的目的。

(1) 系统仿真。为了研究不同输入下系统的输出情况,最直接的方法是对系统本身进行实验。但实际上这往往是难以实现的,原因有多方面。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,从而实验过程带有一定的危险性;系统的时间常数值会相当大,以致实验周期太长。为此,需要建立系统的数学模型,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。

(2) 系统预测。不论在自然科学还是在社会科学领域,往往需要研究系统未来发展演变的规律和趋势。掌握了系统的演变规律和趋势,才可能预先作出决策,采取措施,控制系统中有关的变量。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。科学的定量预测大多采用模型法,首先建立所预测系统的数学模型,根据模型对系统中某些变量的未来状态进行预测。

(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,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,建立了相应的数学模型,才能为系统的分析和设计提供基础,才可能根据系统特性设计控制器,按一定目标进行优化控制和系统决策。

(4) 系统分析。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转动机械等,需要经常监视和检测可能出现的故障,以便及时排除故障。这表明必须不断地收集系统运行过程中的信息,推断过程动态特性的变化情况。然后,根据过程特性的变化情况判断故障是否已经发生、何时发生、故障大小以及故障的位置等。

(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,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,从而更全面地理解系统的动态行为。

从模型的应用目的可以看出,系统模型的最终用途对于建模的要求(模型的类型、模型的精度以及建模的速度等)有着决定性的影响。例如,用于系统分析和设计(如参数监测、故障检测)的系统模型要比用于预报或控制的模型精度要高一些;用于最优控制的系统模型要比经典控制用的模型要求高得多。在建模速度上,用于分析、设计或预测的系统模型,不需要对建模速度提出特别的要求,可以进行离线的辨识,但对于在线控制的系统模型,尤其是在线自适应控制,要求有较高的建模速度。

1.3 数学模型的分类

数学模型的分类方法很多,常见的是按连续与离散、线性与非线性、定常与时变、集中参数与分布参数来分类,在自动控制原理等课程中已有详细介绍。还可按动态与静态、确定性与随机性、离线或在线等进行区分。

(1) 按提供的实验信息分:黑箱、灰箱、白箱。

如果系统的结构、组成和运动规律是已知的,适合于通过机理分析进行建模,则系统可以称为“白箱”。在系统的客观规律不清楚的情况下,称之为“黑箱”,只能从系统的试验中测量系统的外作用和响应数据,应用辨识方法建立系统的数学模型。如果已知系统满足的某些基本定律,但又有些机理还不清楚,则称之为“灰箱”。

(2) 从概率角度分:确定性的、随机性的。

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。而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。

(3) 按模型与时间的关系分:静态的、动态的。

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) 按时间刻度分:连续的、离散的。

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:定常的、时变的。

定常系统的模型参数不随时间的变化而改变,而时变系统是指模型的参数随着时间的变化而改变的系統。

(6) 按参数与输入输出关系分:线性的、非线性的。

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。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:参数的、非参数的。

非参数模型是指从一个实际系统的实验过程中,直接地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动态特性的非参数模型。采用推理的方法所建立的模型则总是一个参数模型,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) 按参数性质分:分布参数的、集中参数的。

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为偏