

///
XIANDAI XITONG JIANMO YU FANGZHEN JISHU

现代系统建模



仿真技术

刘兴堂 吴晓燕 编著

西北工业大学出版社

现代系统建模与仿真技术

刘兴堂 吴晓燕 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书系统、全面地讲述了系统建模与仿真技术的理论、方法和应用，其内容是作者多年来的教学与科研总结，同时反映了国内外在此领域的新近学术研究成果及发展趋势。

全书分现代系统数学建模、计算机仿真技术及应用两大部分。全书强调理论结合实际，涉及航空、航天、机械、电子、信息、控制、交通、通信、环境保护、系统工程及军事作战等多个学科。

本书可作为高等院校理工和军事类本科生和研究生的教科书，亦可供科学工作者与工程技术人员及高等院校教师参考。

图书在版编目（CIP）数据

现代系统建模与仿真技术/刘兴堂，吴晓燕编著．

西安：西北工业大学出版社，2001.8

ISBN 7-5612-1335-2

I．现...Ⅱ．①刘...②吴...Ⅲ．①系统建模②计算机仿真 N．TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2001）第 15159 号

出版发行：西北工业大学出版社

通信地址：西安市友谊西路 127 号，邮编 710072 电话：029—8493844

网 址：<http://www.nwpup.com>

印 刷 者：空军工程大学导弹学院印刷厂

开 本：787 mm×1 092 mm 1/16

印 张：26.25

字 数：636 千字

版 次：2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

印 数：1~2 000

定 价：35.00 元

序

系统仿真技术发展已有 50 多年的历史，目前在信息时代，系统仿真技术的发展更为迅速，已广泛应用于国防和国民经济各个领域，并产生了举世瞩目的影响和效益。分布式交互仿真、虚拟现实和虚拟样机技术的发展及应用，进一步显示了系统仿真这门多学科、综合性高技术的巨大生命力和广阔前景。因此，仿真技术被认为是继科学理论和实验研究之后的第三种认识和改造世界的工具以及各门学科研究手段的“交汇点”。

系统仿真的核心内容之一是系统建模，仿真计算机系统及其相应仿真软件是实现模型运转与分析研究的主要工具，作者紧紧抓住了这两个方面，系统、全面地论述了数学建模与计算机仿真的理论、方法及应用。内容丰富，涉及面广，综合性强，应用领域宽，既有作者的学术研究成果和科研成果，又反映了本学科技术的前沿动态。本书适合于在系统建模与仿真方面的教学中作教材之用，并可作为广大科学工作者和工程技术人员的重要参考书。

王行仁
2000年12月

前言

众所周知，科学实验是人类认识社会和改造自然的基本活动和有效手段。科学实验有两条重要途径：一是在实际系统上进行实验，叫做实物试验或称物理试验；二是利用模型完成试验研究，谓之“模拟”或曰“仿真”。在此，模型充当着实际系统的替身，自然应该反映被研究系统的表征和内在特性。

按说模型研究是一种最古老的工程方法和技术，其历史可追溯至我们祖先的仿鸟飞行和古代建筑及造船业中对比例模型（即样板）的应用。只是随着科学技术的发展，尤其是计算技术和计算机的发展，这种模型试验研究才逐渐形成一门崭新的综合性边缘科学技术，即系统仿真技术。

所谓系统仿真技术就是以相似原理、模型理论、系统技术、信息技术以及仿真应用领域的有关专业技术为基础，以计算机系统、与应用有关的物理效应设备及仿真器为工具，利用模型对系统（实际的或设想的）进行研究的一门多学科的综合技术。仿真技术的核心内容是模型的建立、验证、试验和运行。根据所采用的模型形式不同，系统仿真通常被分为物理仿真、数学仿真和半实物仿真。同时按照所使用的计算机系统各异，系统仿真还可分为模拟仿真、数字仿真和数-模混合仿真。

数学仿真的模型为纯数学模型，其模型运行工具为仿真计算机（包括模拟电子计算机、数字计算机和混合计算机）及支撑软件。因此，数学仿真又叫做计算机仿真。计算机仿真已成为目前系统仿真的基础和主流，所以本书将重点讲述计算机仿真中的系统数学建模与计算机仿真技术及应用，简称系统“建模与仿真”技术。

系统“建模与仿真”技术是一门通用的支撑性技术。它具有学科面广、综合性强、应用领域宽、无破坏性、可多次重复、安全、经济、可控、不受气候条件和场地空间的限制等独特优点，同时也是一门不断发展的高新技术，已成为现代实验工程和科学研究的主要技术手段，被广泛应用于国防和国民经济的各个领域。

系统“建模与仿真”技术被称为继科学理论和实验研究之后的第三种认识和改造世界的工具，它能以其他方法无法替代的独特功能为决策者、设计师和工程技术人员在面对一些重大、复杂的棘手问题时，

提供一个灵活的、适用的环境，以检验关键性见解、创造新观点和所作决断的正确性和有效性，高效地帮助人们理解实际系统的本质，便于进行科学决策与推断。因此，系统“建模与仿真”技术对于科学技术的发展越来越发挥着巨大的推动作用，被认为是各个学科的“交汇点”。

近年来，系统“建模与仿真”技术尤其被各国领导层和军事部门所高度重视，作为国防关键技术之一。之所以如此，是因为海湾战争后，美军公布了对伊拉克作战过程中，在战略战术的制订和在战役、战术上对兵力部署和调动前，采用系统“建模与仿真”辅助作战的成功案例，给予各国军事参谋部门以重要启示。这使人们清楚地看到：系统“建模与仿真”应用于国防和军事，不但是新型武器装备论证、研制、试验、定型、鉴定、作战效能评估、使用训练、作战训练、后勤支援、武器采办等不可缺少的重要手段，而且直接介入了先进武器系统运用，乃至现代作战行为的决策与谋划，确实起到了提高效率、节省经费、降低风险、保障质量和缩短周期的显著作用。

可见，作为军地两方面的本科生、研究生以及工程技术人员，学习和掌握系统“建模与仿真”技术都是十分必要的。为了使读者能获得这个领域内系统、全面的知识，并了解到它的最新进展，我们编写了这本著作。

全书除概论外，分两篇，共十二章。第一章概论，主要阐述系统、模型、数学建模和计算机仿真的基本概念，介绍系统“建模与仿真”技术的现状和发展前景。第一篇（二至七章）现代系统数学建模，在论述系统数学建模基本理论和主要方法的基础上，着重研究实际系统的数学建模技术及其应用，同时给出了现代科技工程领域的典型实用数学模型。第二篇（八至十二章）计算机仿真技术及应用，扼要讨论了模拟仿真与混合仿真的原理、方法及应用，重点研究了连续系统和离散事件系统的数字仿真方法与技术及其应用，同时介绍了计算机仿真语言与先进仿真技术，最后讲述了仿真输出结果分析与评估。

书中前言和一至七章由刘兴堂教授撰写，并进行了统稿，第二篇（八至十二章）由吴晓燕副教授撰写，并负责了全书校对，书中插图由张双选、李彦彬、邓建军及高翔等绘制。本书编著出版过程得到了空军工程大学导弹学院训练部的支持，获得了导弹学院政治部的资助。导弹学院“导航、制导与控制”专业研究生和导弹学院印刷厂同志们为之付出了艰辛劳动，在此一并深表诚挚谢意。这里，特别要感谢中国系统仿真学会理事长、北京航空航天大学王行仁教授给予我们的热情指导和鼓励，并为本书作序。

由于作者水平有限，不妥之处在所难免，诚望广大读者批评指正。

编 著 者

2001 年元月于空军工程大学

目 录

第一章 概论	1
§ 1.1 系统概念及分类	1
§ 1.2 模型概念及分类	3
§ 1.3 数学模型及其建立过程	6
§ 1.4 模型研究与计算机仿真	8
§ 1.5 计算机仿真技术现状与未来	11

第一篇 现代系统数学建模

第二章 系统数学建模的基本理论	19
§ 2.1 系统抽象与数学描述	19
§ 2.2 模型集总及模型有效性	25
§ 2.3 相似理论及演绎推理	28
§ 2.4 系统辨识与建模	33
§ 2.5 定性推理理论	37
§ 2.6 系统层次分析理论	39
§ 2.7 模型校核、验证与确认(VV&A)	44
§ 2.8 模型简化理论及方法	46
第三章 常用数学建模方法及范例	53
§ 3.1 综述	53
§ 3.2 机理分析法	54
§ 3.3 直接相似法	57
§ 3.4 系统辨识法	59
§ 3.5 概率统计法	61
§ 3.6 定性推理法	65
§ 3.7 层次分析法(AHP)	69

§ 3.8	数学建模的其他方法	74
§ 3.9	计算机辅助建模概述	87
第四章	连续系统的数学建模技术及其应用	94
§ 4.1	连续系统的数学模型形式	94
§ 4.2	连续物理系统的数学模型	99
§ 4.3	机械系统的数学建模	102
§ 4.4	电子(电气)系统的数学建模	108
§ 4.5	机电系统的数学建模	113
§ 4.6	流体动力学系统的数学建模	118
§ 4.7	集中参数连续系统的数学建模	123
§ 4.8	分布参数连续系统的数学建模	127
第五章	离散事件系统的数学建模技术及其应用	132
§ 5.1	引言	132
§ 5.2	离散事件系统的数学描述方法	132
§ 5.3	排队服务系统的数学建模	133
§ 5.4	存贮系统的数学建模	138
§ 5.5	采样数据系统的数学建模	142
§ 5.6	增长或衰减过程的数学建模	149
§ 5.7	离散型输入—输出问题的数学建模	152
§ 5.8	军事作战系统的基本模型建立	156
第六章	随机(过程)系统的数学建模技术及其应用	162
§ 6.1	引言	162
§ 6.2	系统输入随机过程及其概率分布描述	162
§ 6.3	系统输入随机过程的时间序列模型建立	174
§ 6.4	科学试验中的几种典型概率模型	182
§ 6.5	系统可靠性的数学建模及应用	191
§ 6.6	随机状态转移与马氏链模型及应用	200
§ 6.7	武器装备的作战效能评估模型研究	207
第七章	科技与工程中的实用数学模型	212
§ 7.1	引言	212
§ 7.2	直接确定型模型及其建立过程	212

§ 7.3	经验公式及其确定方法	215
§ 7.4	周期性现象的数学模型	222
§ 7.5	几种重要的系统工程模型	231
§ 7.6	交通问题的数学模型	248

第二篇 计算机仿真技术及应用

第八章	模拟仿真与混合仿真	257
-----	-----------------	-----

§ 8.1	模拟仿真	257
§ 8.2	混合仿真	272

第九章	连续系统的数字仿真技术	278
-----	-------------------	-----

§ 9.1	仿真数字机体系及选型	278
§ 9.2	连续系统数字仿真的数值积分法	281
§ 9.3	连续系统数字仿真的离散相似法	293
§ 9.4	面向微分方程的仿真程序设计	301
§ 9.5	面向结构图的数字仿真及程序设计(一)	307
§ 9.6	快速数字仿真方法	310
§ 9.7	面向结构图的数字仿真及程序设计(二)	319
§ 9.8	计算机控制系统的数字仿真及程序设计	324

第十章	离散事件系统仿真技术	332
-----	------------------	-----

§ 10.1	概述	332
§ 10.2	离散事件系统仿真原理	334
§ 10.3	均匀分布随机数的生成	338
§ 10.4	随机变量的生成	341
§ 10.5	排队服务系统仿真	348
§ 10.6	存贮系统仿真	352
§ 10.7	防空武器系统作战仿真	357

第十一章	仿真语言与先进仿真技术综述	361
------	---------------------	-----

§ 11.1	仿真语言	361
§ 11.2	面向对象的仿真方法	364
§ 11.3	分布交互式仿真(DIS)技术	367
§ 11.4	虚拟现实(VR)与分布式虚拟现实(DVR)技术	370

§ 11.5	多媒体仿真技术.....	373
§ 11.6	一体化仿真技术.....	375
§ 11.7	MATLAB/Simulink 仿真平台简介	377
§ 11.8	Excel 在离散事件系统仿真中的应用	388
第十二章	仿真输出结果分析与评估.....	391
§ 12.1	概述.....	391
§ 12.2	终态仿真输出结果分析.....	392
§ 12.3	稳态仿真输出结果分析.....	395
§ 12.4	仿真系统的可信度评估.....	398
§ 12.5	系统仿真中的贝叶斯(Bayes)方法应用	402
参考文献		407

§ 1.1 系统概念及分类

1.1.1 系统的一般概念

在我们周围,凡具有特定功能,按照某些规律结合起来,相互作用、相互依存的事物总体,都属于系统范畴。包括工程系统和非工程系统,自然系统和人工系统。系统亦有简单系统和复杂系统、中小系统与大规模之分。显然,无源 RC 电网络、测速电机等是简单系统;现代飞行器(如飞机、导弹、飞船、卫星等)是高新技术密集的复杂系统;而现代立体合成战役分布交互式仿真系统和我国 21 世纪初可持续发展能源规划则称得上大规模系统。

在系统科学中,一个系统以特有的表征和内在特性而区别于其他系统,这主要是构成系统的实体、属性、活动及环境等四方面内容确定的。实体是系统的具体对象;属性是描述实体特性的信息(常以状态和参数表征);活动是指随时间推移发生的状态变化;环境则表示系统所处的界面状况(包括干扰、约束等)。从建模角度讲,对于任何系统都有研究和描述这四方面的任务。因为模型作为实际系统的替身,必须能够反映系统的表征和主要特性。

1.1.2 系统分类

系统千差万别,十分众多。为了便于分析和研究,可从不同角度对系统进行分类。常见分类方法有:

(1) 按照自然属性分为人造系统(如工程系统、社会系统等)与自然系统(如太阳系、海洋系统、生态系统等)。

(2) 按照物质属性可分为实物系统(如建筑物、计算机、机床、兵器)与概念系统(如思想体系、管理、规章制度等)。

应指出,实物系统可以是人造系统或自然系统,而概念系统必定是人造系统。

(3) 按照运动属性可分为静态系统(如静态平衡力系等)与动态系

统（如人体系统、控制系统、经济系统、动力学系统等）。

（4）按照规模和结构状况可分为简单小系统（如数/模转换系统、稳压系统、一般控制系统等）与复杂大系统（如军事作战系统、国民经济系统、大型仿真系统等）。

（5）从控制理论角度可分为开环系统（如售票机、洗衣机等）与闭环系统（如舵系统、天线随动系统、宏观经济系统等）。

（6）按照状态变化对时间是否连接可分为连续系统、离散事件系统及连续—离散混合系统。

当然，在各个学科专业领域内对系统还可以作出更详细的分类。例如，在控制工程领域内，系统将分为：程控系统、恒值控制系统与随动系统；单输入—单输出系统与多输入—多输出系统；线性系统与非线性系统；低阶系统与高阶系统；等等。

应强调指出，从模型研究角度讲，把系统分为连续系统、离散事件系统及混合系统是非常合理的，因为连续系统与离散事件系统在模型形式、建模方法和仿真技术上是截然不同的。

1.1.3 连续系统、离散事件系统与混合系统

所谓连续系统是指状态随时间连续变化的系统。也就是说，系统“事件”所引起的效应大小和“事件时刻”之间的区间，在数学上都是无穷小量。这里，状态（或参数）的连续变化量被称为模拟量。图 1-1 所示的 RLC 电路就是一个典型的连续系统，其电流状态变化是连续变化的。

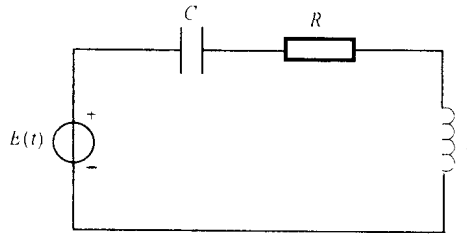


图 1-1 RLC 电路系统

若系统状态（或参数）只在一些特定时刻 $t = \{t_1, t_2, \dots\}$ 上被观测并产生相应离散数据，即系统操作和状态只在离散时刻发生，且常常是随机的，则被称之为离散事件系统。如电话系统、生产调度系统和交通管制红（绿）灯系统（参见图 1-2）等。

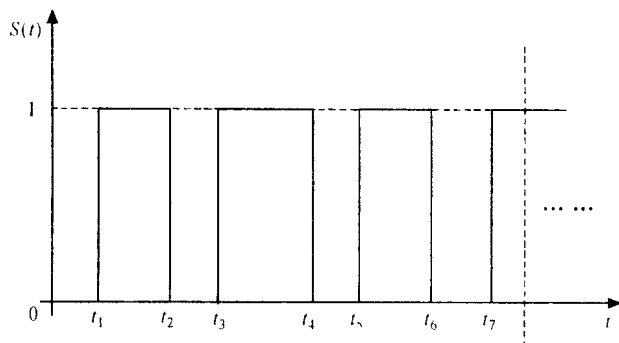


图 1-2 红灯状态变化

图中：红灯亮时 $S(t)=1$ ，反之 $S(t)=0$

系统中一部分具有连续系统特性，而另一部分具有离散事件系统特性，这样的系统谓

之连续—离散混合系统（简称混合系统）。现代数字计算机控制系统就是一种典型的混合系统（参见图 1-3）。

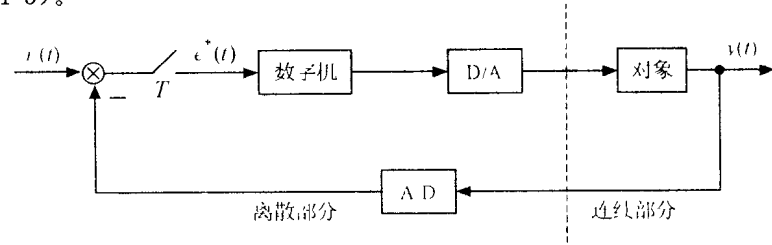


图 1-3 现代数字计算机控制系统

为了加深对连续系统、离散系统和混合系统及其被研究内容（实体、属性及活动）的理解，表 1-1 给出了实际系统举例。

表 1-1 系统实例

系统名称	类型	实体	属性	活动
炮塔	连续	比较器、放大器、电机、传感器、炮塔	输入—输出电压和炮塔角位移及其动、静态特性	炮塔定位、瞄准、射击
A/D 与 D/A 转换	混合	比较器、计数器、A/D 和 D/A 电路、脉冲装置	计数值、输入—输出电压、静态特性	开“门”、关“门”计数
遥控地空导弹武器	混合	弹体、发动机、战斗部、引信、弹上仪器及制导设备等	制导精度、命中概率、射击边界、抗干扰能力等	搜索和跟踪目标、发射、制导、遭遇、引爆近炸
程序系统	离散	功能模块、判别、转移、程序流、数据流	入口、出口信息、判断、转移参量、计算机状态字	转移、调子程序、仿真、输出信息、交互输入、挂起、就绪、运行……
数字机硬件系统	离散	CPU、存储器、外设、通道、接口、总线、指令驱动器……	状态字、容量吞吐率、指令周期执行时间、精度…	中断、出错、重构、开机、关机、外设操作、读写数据……
电话系统	离散	外线、转接线、电话机、交换台	空间、占线	接通、阻断
急救室	离散	护士、病床、医疗设备、药品、医生、病人	病类、病情、医生与护士服务速率、病人发病率、治愈率	病人到达、护士检查、医生就诊、病人离院
通信	离散	信道、接收台、信息、发送站	站名、信息量	信息忙、信息闲、发报、接收
雷达系统	连续	接收天线、发射机	发射功率、接收灵敏度、天线增益、波束宽度	搜索空间目标、提取回波信息
工厂	离散	材料、车间、部门、订货、零件、成品	机器数量、产量、成品类型、性能等	车间生产、部门管理、装配、存贮销售

§ 1.2 模型概念及分类

1.2.1 模型概念和性质

科学实验是人们改造自然和认识社会的主要、基本活动。在实际系统上进行实验叫做实物试验或曰物理试验。除此，人们往往希望在实际系统产生之前描述大型复杂系统，预

测它们的功能和性能，或者由于某种原因（如有毒、有害、有危险、太昂贵等）不易在现实系统上完成实验时，借助“模型”代替系统本身，在模型上进行实验。于是，产生了模型及模型研究的概念（参见图 1-4）。

模型是当今科技工作者常常谈论的重要科学术语之一。它是相对于现实世界或实际系统而言的。在模型研究中，被研究的实际系统叫做原型，而原型的等效替身则称为模型。这种模型能够反映被替代系统的表征和特性，且具有如下主要性质：

（1）普遍性。亦称等效性，是指同一个模型可从各个角度反映不同的系统。或者说一种模型与多个系统可能具有相似性。

（2）相对精确性。是说模型的近似度和精确性都不可超出应有有限度和许可条件。过于粗糙的模型将失去过多系统特性而变得无用；太精确的模型往往会造成非常复杂，甚至给模型研究带来困难（如计算量大、周期长、分析困难等）。因此，一个满意的模型应该具有考虑诸种条件折衷下的适合精确性。

（3）可信性。是指模型必须经过检验和确认，成为代表实际系统的有效模型，即具有良好的置信度。

（4）异构性。是指同一个系统的模型可以具有不同的形式和结构。为此，模型研究中选择最方便、最合理的模型形式和结构。

（5）通过性。这就是说，模型可以视为“黑箱”，通过向其输入信息并获取信息建立起模型的输入—输出概念。从而产生了实验辨识建模的现代方法。

1.2.2 模型分类

模型分类方法很多，图 1-5 给出了几种常见分类方法。

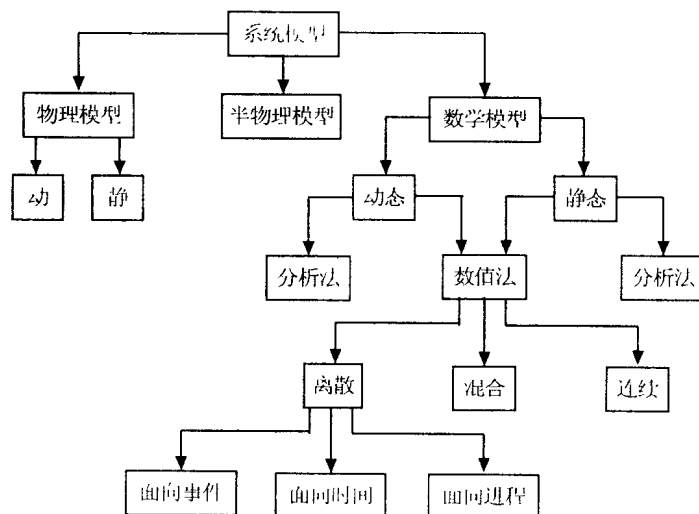


图 1-5 几种常见的模型分类

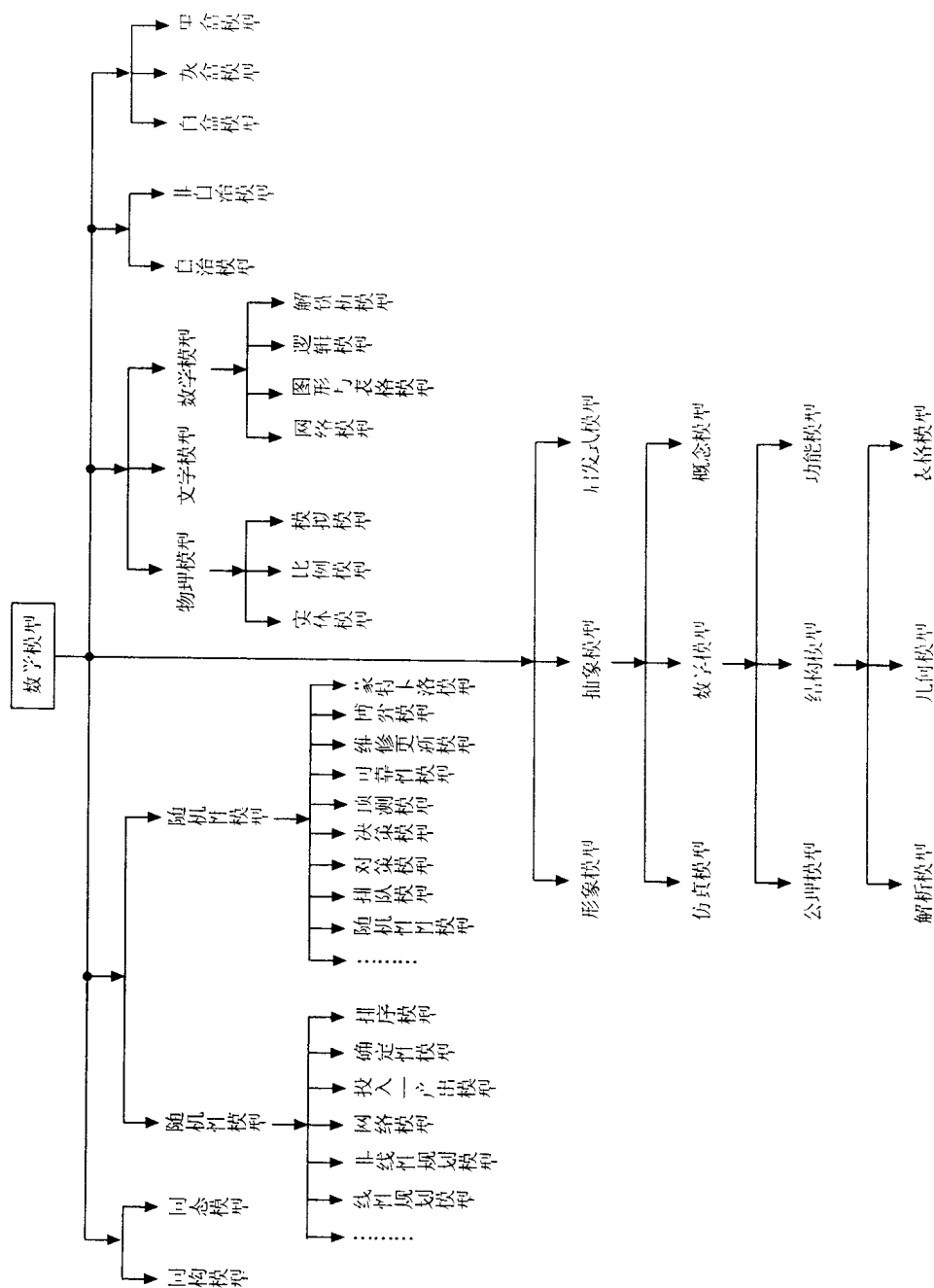


图 1-5 几种常见的模型分类 (续)

§ 1.3 数学模型及其建立过程

1.3.1 数学模型定义和一般描述

1. 定义

数学模型是描述实际系统内、外部各变量间相互关系的数学表达式。这种表达式主要包括数值表达式和逻辑表达式。常量、变量、函数、方程、不等式、并、交、如果……、那么……、图形、表格、曲线、序列以及程序等都是数学模型的重要形式。

应该指出，合理的数学模型应是能够正确反映系统表征和特性的最简数学表达式。

2. 一般描述

假定系统 S 的数学模型是取决于某个输入或强制函数 u 而产生输出 $y_S(u)$ 的一组数学模型 S_M ，而 S_M 同样决定于产生输出 $y_M(u_M)$ 的输入 u_M ，那么，对于模型 S_M 理想化地代表系统 S ，则有

$$y_S(u) = y_M(u) \quad (1-1)$$

这就是说，对系统 S 和模型 S_M 输入同样的函数 u ，将获得相同的输出。

但是，实际上任何理想化的数学模型都不可能无误差地描述实际系统，因此式 (1-1) 仅是一个近似式。于是

$$y_S(u) = y_M(u) + \epsilon(u) \quad (1-2)$$

式中， $\epsilon(u)$ ——模型描述误差。

可见，任何实际系统所得到的数学模型都将是一个被简化的近似数学模型。

通常，对于连续系统，其简化数学模型一般采用线性常微分方程、传递函数或状态空间表达式来描述。如果系统为分布参数，数学模型将是偏微分方程。对于具有非线性特性的连续系统，其数学模型通常是非线性偏微分方程（组）。

如果系统中包含数字机或数字元件，或者是离散事件系统，那么描述系统的简化数学模型一般是差分方程、时间序列、 z 传递函数、逻辑式、概率分布函数、网络图等。

就其描述方法而言，上述数学模型统称为形式化模型。除此，还有非形式化模型，它的描述包括四部分，即描述变量、分量、相互关系和假设说明。非形式化模型是数学模型的最初形式，最终将发展成为形式化数学模型。

另外，近年来，人工智能研究中出现了一类描述模型。这种模型不是数学表达式，而只能用自然语言或程序语言来描述，其模型解也是“探索”得到的，更接近人类思维过程，同时尚待数学化。

1.3.2 数学建模及其过程

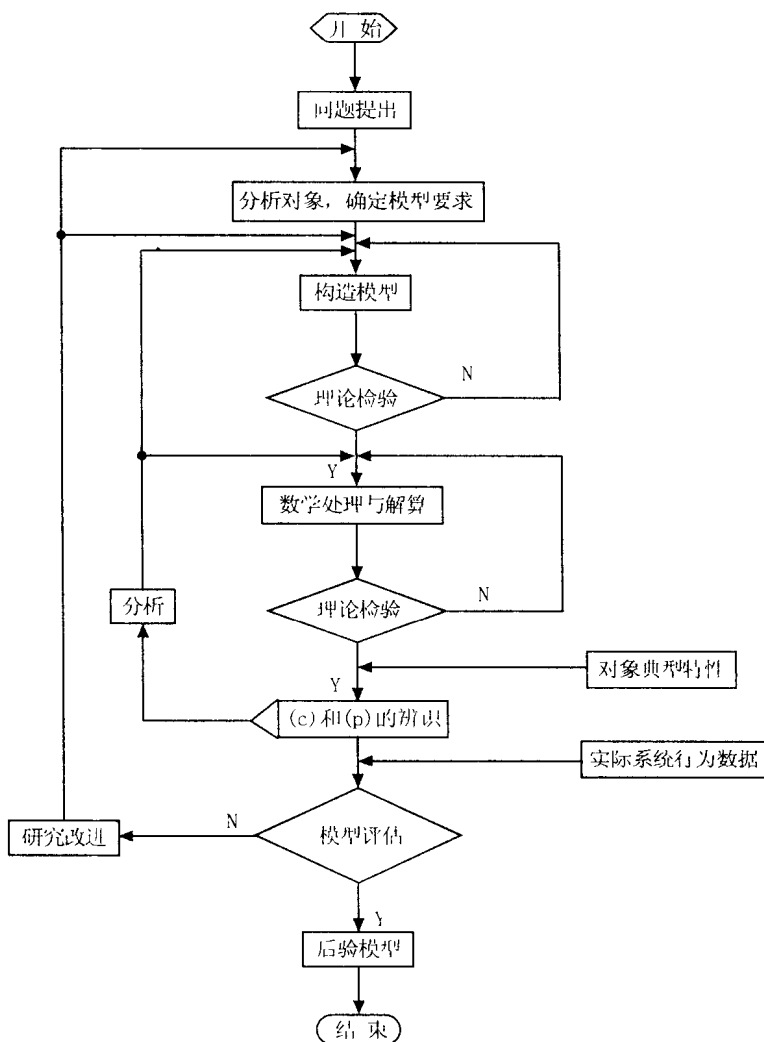
所谓数学建模就是确定系统的模型形式、结构和参数，以得到正确描述系统表征和性状的最简数学表达式。

数学模型的建立是一个创造性的科研过程。虽然没有固定程式可循，但是必须遵守如下几条基本原则：

(1) 必须满足对数学模型的精确性、简明性、层次性、多用性、可靠性及标准化等一

(2) 建模时须经常考虑, 模型功能是否满足所研究问题的需要; 在满足需要条件下, 模型形式是否合理、经济; 模型是否容易实现; 模型运转是否稳定; 是否可以达到预期的精度要求; 等等。

(3) 为了缩短建模周期, 获取高质量的数学模型, 必须合理选择建模方法。目前, 数学建模方法可归结为三大类: 机理分析法、实验辨识法和定性推理法。实际工程中的具体数学建模方法已有数十种。其中计算机辅助建模愈来愈多地被采用。图 1-6 给出了这种方法的流程图。



图中：(c) — 结构集；(p) — 参数集

(4) 系统数学模型的建立过程一般是：观察和分析实际系统→提出问题→作出假设→系统描述→构筑形式化模型→模型求解→模型有效性分析（包括模型校核、验证与确认）→