

高等学校教材

现代系统建模与仿真技术

(修订版)

XIANDAI XITONGJIANMO
YU FANGZHENJISHU

刘兴堂 编著

西北工业大学出版社

高等学校教材

现代系统建模与仿真技术

(修订版)

刘兴堂 编著

西北工业大学出版社

编 委 会

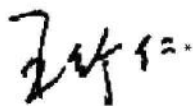
主 编:	刘兴堂	周自全	李为民
	吴晓燕	柳世考	
副主编:	袁 东	刘 力	李润玲
	戴革林	牟俊林	李小兵
编 者:	刘 宏	牛中兴	胡小明
	李体方	张 君	李保全
	邓建军	赵敏荣	马海英
	陈战辉	王 超	刘 君
	宋 坤	张双选	韦 刚

序

系统仿真走过了 60 多年光辉历程,在工农业生产、国民经济、科学研究和国防建设各个领域产生了举世瞩目的影响和效益,它逐渐形成独立的仿真科学与技术学科知识体系,成为一门多学科、综合性的共用高新科学技术,并在朝着网络化、智能化、虚拟化、自动化和普适化的方向发展。

原著《现代系统建模与仿真技术》是一部适用于全国各高等院校的系统仿真的基础教材,出版将近 10 年之久,收到了很好的社会效果,对教学和科研起到了积极的推动作用。这次修订再版,是件大好事,既可满足社会的新需求,又顺应了 10 年间系统仿真快速发展的新潮流,值得庆幸。

《现代系统建模与仿真技术》(修订版)一书紧紧抓住系统建模方法和计算机仿真技术两大核心内容,特意增添复杂系统建模与仿真和军用仿真技术及工程章节,以及仿真系统开发/运行的监测、分析与评估,从而在保持原著作特色的基础上,凸显出复杂系统仿真前沿领域和处于系统仿真领先地位的军用仿真技术与应用。这样,无疑会给广大读者带来更多、更新的系统建模与仿真信息和知识,也必将促进仿真科学与技术学科领域的繁荣昌盛,为我国的国民经济、科学研究和国防建设做出新贡献。



2010 年 3 月

* 王行仁,中国系统仿真学会原理事长,北京航空航天大学教授。

前 言

众所周知,科学试验是人类认识与改造世界最重要、最基本的活动和有效手段。科学试验一向有两条重要技术途径:其一是在实际系统上进行试验,叫做实物试验或物理试验;其二是利用模型完成试验研究,谓之“系统模拟”或“系统仿真”。在系统仿真中,模型充当着实际系统的替身,它反映了仿真对象的外部特征、内部特征及其功能;模型的建立、验证和运行是系统仿真的核心活动。

按说模型试验是一种最古老的工程方法和技术之一,其历史可追溯至我们祖先的仿鸟飞行、古代建筑和造船业中对此例模型(即样板)的应用。只是在计算机问世后它才逐渐形成为一门崭新的综合性科学技术学科——仿真科学与技术。

仿真科学与技术走过了 60 多年光辉历程,在工农业生产、国民经济和国防建设各个领域产生了举世瞩目的影响和效益。事实证明,凡是有科学研究、工程设计和人-机训练的地方都离不开它的支持。特别是面对一些重大的、复杂的棘手问题(如社会经济、生态环境、载人航天、军事作战、能源利用等)研究,采用传统的理论研究和实验研究方法往往不能奏效,势必转而应用模型研究手段(即建模与仿真方法),从而为决策者、设计师和工程技术人员提供灵活、适用、有效的技术平台和研究环境,以检验他们的关键性见解、创新性观点和所作决策或方案的合理性、正确性与可行性,高效地帮助人们推动科学技术进步,促进社会发展。因此,仿真科学与技术被认为是继理论研究和实验研究之后,与计算机科学一起为人们提供了认识与改造世界的又一种全新方法和手段,以及各门学科在当今研究手段上的“交汇点”。

目前,仿真科学与技术已发展成为集计算机科学、计算技术、图形/图像技术、网络技术、控制技术、人工智能、信息技术、系统工程、软件工程等多学科为一体的综合性高新科学技术。先进建模工具与环境、仿真高层体系结构、组件化/网络化/网格化、虚拟现实、虚拟环境、虚拟样机、虚拟制造、虚拟采办及嵌入式系统等技术的迅猛发展,进一步显示出仿真科学技术的巨大生命力和广阔前景。

在仿真科学与技术领域内,系统建模与仿真(M&S)是其核心内容,复杂系统 M&S 则是它的重要前沿领域,而军用仿真及工程始终走在仿真科学与技术发展的最前列,代表着领先的技术学术水平。

《现代系统建模与仿真技术》第 1 版已出版 10 年之久,这 10 年恰恰是仿真科学与技术发展最为迅速的时期,因此有必要对其进行全面认真的修改和切合实际的补充,以适应广大读者特别是高校本科生、研究生的新需求。这次修订主要体现在如下方面:①践行科学发展观,综合系统 M&S 的长足进步,深入系统地论述仿真科学技术的学科知识体系;②增加复杂系统 M&S 的理论、方法与技术及其应用;③强化仿真系统开发/运行的监测、分析与评估技术,以及仿真界最为关注的 VV&A 活动和可信度评估技术;④专门安排军用仿真技术及工程章节。

修订后的《现代系统建模与仿真技术》一书,分上、下两篇,共 14 章。第 1 章绪论。阐述系

统、模型、建模、仿真等基本概念;提出复杂系统 M&S 问题和军用仿真技术及工程;论述系统 M&S 技术现状与未来,以及仿真科学与技术学科知识体系。上篇介绍系统建模理论、方法、技术与应用,包括第 2 章至第 8 章。在论述系统建模与仿真的基础理论和常见数学建模方法的基础上,着重讨论和研究实际系统(包括连续系统、离散事件系统、随机过程系统和复杂系统)的数学建模技术与应用,并给出现代科学与工程和军事领域的典型数学模型或模型框架。下篇介绍计算机仿真技术与应用,包括第 9 章至第 14 章。综述计算机仿真方法、技术与支撑环境及工具;重点讨论和研究连续系统、离散事件系统和复杂系统的数学仿真技术与应用;论述仿真系统开发/运行的监测、分析与评估技术,以及 VV&A 活动与应用;讨论各类军用仿真技术及工程。

除“编委会”名单中的主编、副主编和其他编者外,参加本书部分章节撰写、修订和编辑等工作的还有:李小兵、张双选、李彦彬、吴静、李向峰、李旭昌等同志。

在本书编著和出版过程中,得到了空军工程大学和空军工程大学导弹学院领导、机关的大力支持,西北工业大学出版社领导尤其是策划编辑付高明同志付出了心血,在此一并深切诚挚谢意。这里还要感谢同仁们的热情鼓励,特意致谢中国系统仿真学会原理事长王行仁教授作序,以及参考文献作者的辛劳和智慧给予本书的重要支撑。

由于水平有限,书中难免有不妥之处,诚望广大读者批评指正。

作 者

2011 年 2 月于空军工程大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 系统概念与分类	1
1.2 连续系统、离散事件系统与混合系统	2
1.3 模型与建模	4
1.4 模型研究与系统仿真	8
1.5 复杂系统的建模与仿真(M&S)	9
1.6 军用仿真技术及其应用	13
1.7 系统仿真现状及未来	16
习题 1	20

上篇 系统建模理论、方法、技术与应用

第 2 章 系统建模的基础理论	23
2.1 引言	23
2.2 模型论及其相关理论	23
2.3 相似理论及演绎推理	38
2.4 系统辨识理论	41
2.5 系统层次分析理论	45
2.6 定性/模糊/云理论	50
2.7 灰色系统理论和马尔可夫理论	58
2.8 虚拟现实理论	65
2.9 复杂适应系统理论	67
2.10 综合集成“研讨厅”理念	71
习题 2	72
第 3 章 常见数学建模方法与应用	73
3.1 数学建模方法及一般选取原则	73
3.2 机理分析法	74
3.3 直接相似法	76
3.4 系统辨识法	77
3.5 试验统计法	79
3.6 层次分析法	83

3.7 量纲分析法.....	87
3.8 图解法.....	88
3.9 因果分析法.....	90
3.10 蒙特卡罗法	94
3.11 “隔舱”系统法	95
3.12 想定法	96
3.13 定性推理法	97
3.14 “灰色”系统法.....	105
3.15 计算机辅助法.....	108
习题 3	110
第 4 章 复杂系统建模方法与技术.....	112
4.1 概述	112
4.2 面向对象建模方法与技术	112
4.3 多分辨率建模方法与技术	117
4.4 基于模糊集论建模方法与技术	123
4.5 基于神经网络建模方法与技术	127
4.6 基于智能技术建模方法与技术	129
4.7 基于云理论建模方法与技术	133
4.8 基于 CAS 理论建模方法与技术.....	136
4.9 基于超高计算智能逼近建模方法与技术	139
4.10 基于混合专家系统建模方法与技术.....	146
4.11 混合建模方法与技术.....	149
4.12 组合建模方法与技术.....	156
4.13 基于分形理论建模方法与技术.....	159
4.14 综合集成建模方法与技术.....	162
习题 4	165
第 5 章 连续系统的数学建模技术与应用.....	166
5.1 连续系统的数学模型形式	166
5.2 连续物理系统数学建模	170
5.3 机械系统的数学建模	174
5.4 电子(电气)系统的数学建模	179
5.5 机电系统的数学建模	184
5.6 流体力学系统的数学建模	189
5.7 集中参数连续系统的数学建模	194
5.8 分布参数连续系统的数学模型	197
习题 5	201

第 6 章 离散事件系统的数学建模技术与应用	202
6.1 引言	202
6.2 离散事件系统的数学描述方法	202
6.3 排队服务系统的数学建模	203
6.4 存储系统的数学建模	207
6.5 采样数据系统的数学建模	211
6.6 增长或衰减过程的数学建模	217
6.7 离散型输入-输出问题的数学建模	220
习题 6	223
第 7 章 随机(过程)系统的数学建模技术与应用	224
7.1 引言	224
7.2 系统输入随机过程及其概率分布描述	224
7.3 系统输入随机过程的时间序列数学模型建立	236
7.4 科学试验中的几种典型概率模型	243
7.5 系统可靠性的数学建模及应用	251
7.6 随机状态转移与马氏链模型及应用	259
习题 7	265
第 8 章 科技与工程和军事领域的实用数学模型	266
8.1 引言	266
8.2 直接确定型模型及其建立过程	266
8.3 经验公式及其确定方法	269
8.4 周期性现象的数学模型	276
8.5 几种重要的系统工程模型	284
8.6 交通问题的数学模型	299
8.7 军事领域的常见数学模型	305
习题 8	323

下篇 计算机仿真方法、技术与应用

第 9 章 计算机仿真及其支撑环境与工具	327
9.1 概述	327
9.2 模拟仿真方法、技术及其应用	327
9.3 混合仿真技术及其应用	341
9.4 数字仿真及应用	346
9.5 系统 M&S 常用支撑环境与工具	356

习题 9	373
第 10 章 连续系统的数字仿真技术与应用	374
10.1 连续系统数字仿真的数值积分法	374
10.2 连续系统数字仿真的离散相似法	384
10.3 面向微分方程的仿真程序设计	392
10.4 面向结构图的线性系统数字仿真及程序设计	398
10.5 面向结构图的非线性环节数字仿真及程序设计	401
10.6 快速数字仿真方法	406
10.7 计算机控制系统的数字仿真及程序设计	414
习题 10	421
第 11 章 离散事件系统的数字仿真技术与应用	422
11.1 概述	422
11.2 离散事件系统仿真原理	423
11.3 均匀分布随机数的生成	427
11.4 随机变量的生成	430
11.5 排队服务系统仿真	436
11.6 存储系统仿真	440
11.7 防空武器系统作战仿真	444
习题 11	447
第 12 章 复杂系统仿真方法、技术及应用	448
12.1 引言	448
12.2 复杂系统仿真方法与技术的选取	448
12.3 数学仿真与应用	449
12.4 半实物仿真与应用	453
12.5 实物仿真与应用	462
12.6 面向对象仿真与应用	465
12.7 并行与分布式仿真及应用	468
12.8 多媒体/虚拟仿真与应用	473
12.9 网格/协同仿真与应用	476
12.10 基于 MAS 的仿真与应用	480
12.11 综合集成仿真与应用	482
习题 12	483
第 13 章 仿真系统开发/运行的监测、分析、评估技术	485
13.1 概述	485
13.2 仿真系统的 T&E 技术	486

13.3 仿真结果分析与评估技术.....	488
13.4 仿真系统的 VV&A 活动	501
13.5 仿真系统的可信度评估方法与技术.....	510
习题 13	522
第 14 章 军用仿真技术及工程综述	523
14.1 概述.....	523
14.2 军用仿真发展现状与趋势.....	523
14.3 军事科学技术研究仿真技术及工程应用.....	525
14.4 武器装备研制仿真技术及工程应用.....	528
14.5 军事训练仿真技术及工程应用.....	533
14.6 军事作战仿真技术及工程应用.....	537
14.7 军用仿真的关键支撑军事高技术及应用.....	541
14.8 军用仿真支持环境与应用.....	554
14.9 VV&A 技术及最新进展	558
习题 14	561
参考文献.....	563

第1章 绪 论

1.1 系统概念与分类

1.1.1 系统概念

系统是很普遍、常见的科学术语之一。系统概念通常包括定义、结构、层次、实体、属性、行为、功能、环境、演化与进化等。不过,人们更多关心的是系统的定义、实体、属性、行为和环境。这是因为一个独立的系统总是以其特有的外部表征和内在特性而区别于其他系统,并决定于构成该系统的实体、属性、行为及环境等方面的不同内容。同时,对于任何系统特别是复杂系统,都有着通过科学研究探索和描述系统实体、属性、行为及环境的任务,这同样是系统建模与仿真的最终目标。

最早的系统定义是由系统论创始人奥地利学者贝塔朗非给出的。他认为,系统是相互作用的多元素的复合体。我国著名科学家钱学森先生将系统定义为:系统是相互作用和相互依赖的若干组成部分结合的、具有特定功能的有机体。总之,在自然界和人类社会中,凡具有特定功能,按照某些规律结合起来相互关联、相互制约、相互作用、相互依存的事物总体,均可称之为系统。广义地讲,系统包括自然系统和人工系统,工程系统和非工程系统,并有简单系统与复杂系统,中小系统、大系统和开放复杂巨系统之分。显然,无源 RC 电路、测速电机和日常家用电器等是简单系统;现代飞行器(如飞机、导弹、卫星、飞船等)是高新技术密集的大系统;国家可持续发展教育、能源、金融等规划称得上是复杂系统,而社会系统、战争系统、生态环境系统、人体生命系统和宇宙系统则谓之典型的开放复杂巨系统。

简而言之,实体是具体系统对象(如汽车、火车、弹药、机器、设备等);属性系指描述实体特征的信息,常以状态、参数或逻辑等来表征,如连续系统、离散事件、随机过程、位置、速度、加速度,以及“非”“合”“并”等;行为是指随时间推移所发生的状态变化,如位移、速度变化、操作过程等;环境则表示系统所处的界面状况,如干扰、约束、关联因素等。

总之,系统是多样的、千姿百态的和最常见的,且经常不断变化并充满着惊奇。系统比比皆是,人们在认识和改造世界的过程中,总是针对自己感兴趣的系统进行着不懈的探索,包括理论研究、科学实验和仿真试验等,以求得科学技术发展和社会进步。

1.1.2 系统分类

为了便于对系统进行分析、研究、控制和管理,可从不同角度对其进行分类。常见分类方法有:

1)按照自然属性,系统被分为人工系统(如工程系统、社会系统等)与自然系统(如海洋系统、生态系统等)。

2)按照物质属性,系统被分为实物系统(如武器装备、机电产品等)与概念系统(如思想体系、战略战术等)。应该指出,实物系统可以是人工系统或自然系统,而概念系统必定为人工

系统。

3)按照运动属性,系统被分为静态系统(如平衡力系、古建筑群等)与动态系统(如控制系统、动力学系统等)。

4)按照状态变化对时间是否连续,系统被分为连续系统(如雷达天线位置随动系统、模拟计算机系统等)、离散事件系统(如电话服务系统、生产调度系统等)和混合系统(如数字计算机控制系统、半实物仿真系统等)。

5)按照参数性质和状态特点,系统被分为集中参数系统与分布参数系统、确定型系统与随机系统、线性系统与非线性系统。

6)按照对系统的认知和研究现状,系统被分为白盒系统、灰盒系统及黑盒系统;它们又可分别叫做白色系统、灰色系统和黑色系统。白色系统中具有充足的信息量,其发展变化规律明显、定量描述方便、结构和参数具体。黑色系统的内部特征全部是未知的。灰色系统是介于白色系统与黑色系统之间的一种具有“信息不确定性”或“信息缺乏”的系统。

7)按照结构和关联的复杂程度,系统被分为简单系统(如 RC 电路、稳压电源等)与复杂系统(如世界能源系统、国家人口控制系统等)。当然,复杂系统还以分为一般复杂系统与开放复杂巨系统。

除此,按照系统的静态、动态、时间与空间情况以及专业技术特点等,可对各个领域内的系统做出更详细的分类。如控制系统还可以分为经典控制系统和现代控制系统;进一步又能分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统;更细地还可分为计算机控制系统、模糊控制系统、变结构控制系统、鲁棒控制系统、智能控制系统、神经网络控制系统和自适应控制系统等等。

应强调指出,从系统建模和仿真的角度讲,通常将系统分为连续系统、离散事件系统与混合系统,以及简单系统与复杂系统是较为合理的。

从科学研究和科学发展观讲,钱学森等学者对于系统还做出了如下分类:

1)按照系统组成部分的数量规模大小,系统被分为小系统、大系统和巨系统三类。

2)按照系统层次结构简单与否,系统被分为简单系统和复杂系统两类。

3)按照客观世界物质系统空间尺度大小,系统被分为渺观、微观、宏观、宇观和胀观五个层次。

4)按照系统输入、输出特性的复杂特性程度不同,系统被分为线性系统、非线性系统和复杂性系统。

5)人工生命系统、社会系统、生态系统、生物系统、环境系统等均属于非常复杂的适应系统。这类系统被称为开放的复杂巨系统。

为简便起见,本书仅将系统分为一般系统和复杂系统。显然,这里的一般系统系指简单系统和中、小系统,而复杂系统涵盖着通常复杂系统、复杂大系统及开放的复杂巨系统。

1.2 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。如图 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。

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(见图 1.2)等。

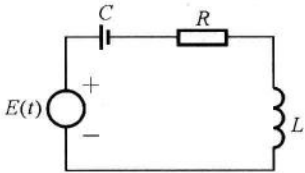


图 1.1 RLC 电路系统

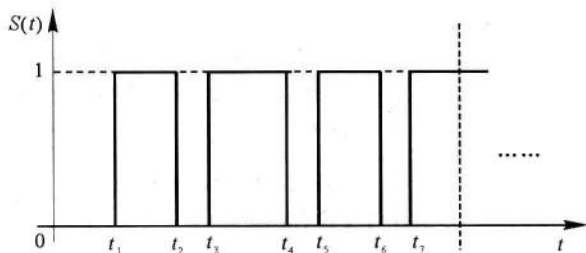


图 1.2 红灯状态变化

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(见图 1.3)。

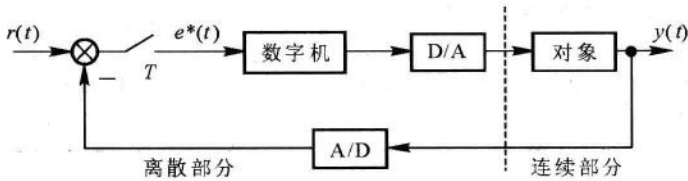


图 1.3 现代数字计算机控制系统

为了加深对连续系统、离散事件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 给出了实际系统示例。

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、静动态特性	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

续表

系统名称	类 型	实 体	属 性	活 动
程序系统	离散事件	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	离散事件	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	离散事件	外线、转接线、电话机、交换台	空间、占线	接通、阻断
急救室	离散事件	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	离散事件	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	连续事件	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	离散事件	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、存储销售

1.3 模型与建模

1.3.1 模型的概念及性质

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(见图 1.4)。

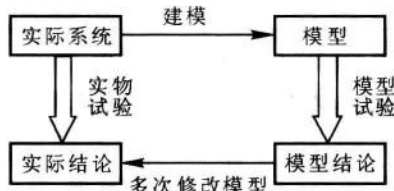


图 1.4 模型与模型研究

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,是指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非常复杂,甚至给模型研究带来困难(如计算量大、试验周期长、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中下的适当精确性。

(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(或可信度)。

(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,模型研究中将选择最方便、最合理的模型形式和结构。

(5)通过性,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。

1.3.2 模型分类

在模型研究中,为方便起见,同系统一样可将模型进行各种分类,如图 1.5 所示。

1.3.3 数学建模及其过程

系统数学模型的建立简称为数学建模。

所谓数学模型就是描述系统内、外部各变量间相互关系的数学表达式。它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、序列及程序等都是数学模型的描述形式。

数学建模的最终目标就是要确定系统的模型形式、结构和参数,获得正确反映系统表征、特征和功能的最简数学表达式。

数学建模的一般过程是:观察和分析实际系统→提出问题→做出假设→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、验证及确认)→修改模型→最终确认→模型使用。

目前,计算机辅助建模愈来愈多地被采用。如图 1.6 所示给出了现代数学建模的流程。

应强调指出,数学建模至今没有一个固定的程式可循,而是一个创造性的科研过程。为了获得高质量的数学模型,在建模中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、可靠性及标准化等基本要求。

(2)为了缩短建模周期,获取满意的有效数学模型,合理地选择建模方法至关重要。目前,常见的数学建模已有数十种,可归结为四大类:机理分析法、实验辨识法、定性推理法和综合集成法。随着复杂系统建模需求的不断增强,必须要有建模方法的创新意识,如研究人工智能方法、专家系统和研讨式方法等。

(3)建模时,须经常考虑模型功能是否满足所研究问题的需求,在满足需求的条件下,模型形式和结构是否合理、经济,模型是否容易实现和稳定运行,模型可否达到预期精度要求等。总之,必须使模型校核、验证及确认(即 VV&A 活动)贯穿于数学建模的全生命周期。

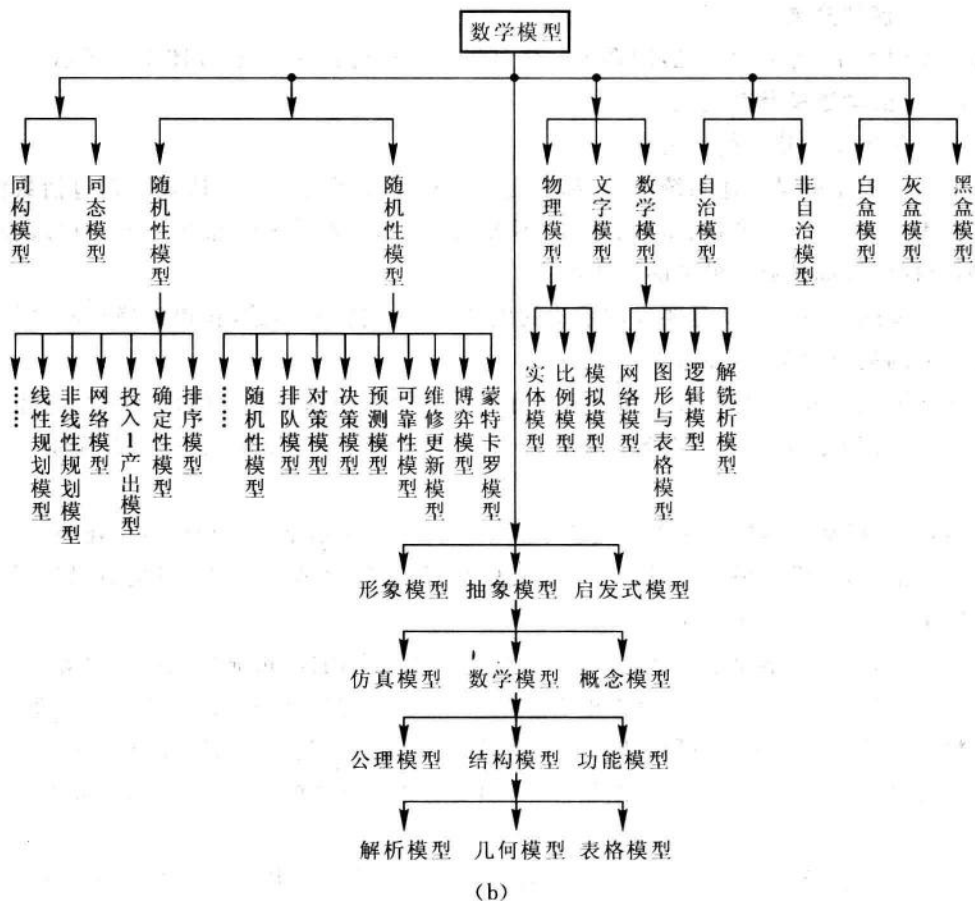
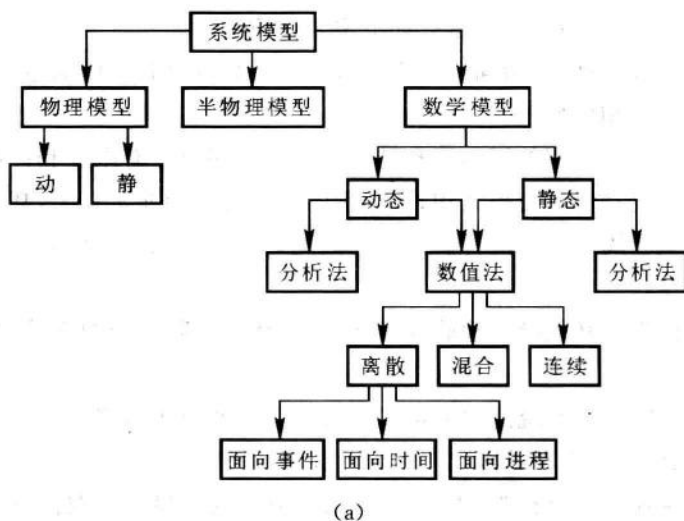


图 1.5 几种常见的模型分类