



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

离散事件系统建模与仿真

(第二版)

王维平 等 编著



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

离散事件系统建模与仿真

(第二版)

王维平 朱一凡 李 群 编著
杨 峰 曹星平

科学出版社

北 京

内 容 简 介

离散事件系统仿真是仿真技术的重要领域,在规划论证、方案评估、计划调度、加工制造、产品试验、生产培训、训练模拟、管理决策等方面得到广泛应用。

本书比较全面、深入地介绍了离散事件系统建模仿真的理论、方法和技术,突出了对理论建模方法和计算机实现技术的讲解,对离散事件系统建模仿真的发展和应用情况也有比较详尽的介绍。本书每章后附有练习题,适合用作有关专业本科生的教材,也可供在职人员学习深造使用。

图书在版编目(CIP)数据

离散事件系统建模与仿真/王维平等编著. —2版. —北京:科学出版社, 2006

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-03-017636-3

I. 离… II. 王… III. 离散系统(自动化)-系统仿真-高等学校-教材
IV. TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 078367 号

责任编辑:资丽芳 毛莹 杨然 / 责任校对:李奕莹
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1997年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007年8月第 二 版 印张:24 1/2

2007年8月第一次印刷 字数:463 000

印数:1—3 000

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈文林〉)

第二版前言

经过近二十年的发展,离散事件系统建模与仿真的应用已经渗透到国防和国民经济的各个领域,成为科学探索和实践分析中最活跃的学科之一。实践证明,继理论研究、实验研究之后,系统仿真研究正在成为人类认识世界和改造世界的“第三种手段”,而且这种手段的应用范围越来越广阔。

本书首先介绍系统仿真的基本概念和仿真建模的数学基础,然后介绍具体的建模手段和方法以及仿真模型的设计与实现,其后是仿真结果的分析与模型校验,最后是仿真语言与仿真应用。考虑到本科生学习的特点,本书在介绍理论方法的同时,注重对其来龙去脉的讲解,特别是在系统建模方法和模型设计方面,结合具体实例进行详尽说明,使学生容易掌握。关于建模的具体方法和步骤的介绍,在国内相关书籍中较少见到。正因为如此,本书第一版被国内多家大学列为教材和教学参考书,并被列为全国大学生数学建模竞赛的重要参考书籍。

结合本书第一版出版十年来的使用情况以及作者对离散事件系统建模与仿真的应用体会,在第一版的基础上,作者对书稿进行了较大幅度的改动,重点修改了第1章概论,第4章仿真模型设计与实现,第7章离散事件系统建模仿真应用,重新撰写了第6章仿真语言,其他各章也做了一定程度的修改,使之更符合教学与实践的需要。

全书由王维平组织改写和统稿。第1章由王维平和李群负责改写,第2章由朱一凡负责改写,第3、4章由王维平和朱一凡负责改写,第5章由朱一凡和曹星平负责改写,第6章由李群负责改写,第7章由杨峰负责改写。

本书的出版得到了科学出版社的大力支持和帮助,特别是资丽芳编辑和毛莹编辑,为本书的出版倾注了大量的心血,在此作者表示衷心感谢。

感谢美国 CACI International Inc. 公司提供的 Simscript II.5 软件和技术文档,以及在本书相关内容编写过程中给予的支持。

本书第一版的作者华雪倩老师和张汉江老师,尽管已经不再从事系统仿真领域的工作,但仍然对本书给予了关心和支持,在此表示敬意和感谢。

感谢作者所在实验室的刘晨、陈超、仲辉、许永平等博士研究生,在书稿的编写过程中帮助收集了大量资料,并对书稿进行了认真仔细的校对。

感谢所有关心和支持本书编写和出版的人们。

书中不当之处敬请读者批评指正。

编 者

2007年6月于长沙

第一版前言

离散事件系统是一类重要的系统。由于这类系统的状态变化仅在一些离散时刻点上由随机事件引发,而且其内部机制比较复杂,因此系统的模型一般无法表示成一组数学方程式。20世纪70年代开展了离散事件系统建模与仿真技术的研究,随后得到发展,并在系统工程及其相关领域得到广泛应用。但是,国内目前专门讲授离散事件系统仿真的教科书并不多见。

本书是为系统工程本科专业编写的教材,讲授离散事件系统仿真的基本原理、数学基础、建模方法、计算机模型实现、仿真语言、决策应用,以及仿真结果分析和模型校验等方面的内容。在内容安排上,突出了建模方法及仿真模型设计与实现,弥补了其他有关书籍在这方面的不足。书中例题较多,每章附有练习题,适于教学使用;部分章节引入了作者最新科研成果,具有新颖独到之处。通过本书的学习,可以使系统较为系统、全面、深入地掌握离散事件系统建模与仿真方面的知识和技能。

全书由王维平组织编写和统稿。第1、2章由朱一凡编写,第3、4章由王维平编写,第5章由华雪倩、张汉江合作编写,第6章由王维平、朱一凡合作编写,第7章由华雪倩编写。在编写过程中,参考了很多有关的著作,主要参考书名及作者已列于书后。这里,谨对全部作者表示诚挚的感谢,恕不一一列出作者的姓名。

在书稿的审定过程中,殷洪义教授提出了中肯的意见,在此表示衷心的感谢。

由于时间比较仓促,作者水平有限,书中的某些内容恐有不妥之处,望读者不吝赐教。欢迎相关专业的读者选用本书,并向读者致意。

编 者

1996年10月于长沙

目 录

第二版前言

第一版前言

第 1 章 概论	1
1.1 仿真基本概念	1
1.1.1 物理仿真	2
1.1.2 计算机仿真	3
1.1.3 仿真及其应用	8
1.1.4 仿真建模的基本原则	12
1.1.5 仿真研究的基本步骤	14
1.2 连续系统仿真	15
1.2.1 连续系统模型	15
1.2.2 连续系统仿真算法	20
1.3 离散事件系统仿真	22
1.3.1 离散事件系统模型	22
1.3.2 离散事件系统仿真策略	24
1.3.3 模型的形式化描述规范	25
1.4 现代仿真技术发展	27
1.4.1 建模方法	28
1.4.2 仿真软件	31
1.4.3 分布交互仿真技术	36
1.4.4 计算机技术在仿真中的应用	37
练习 1	40
第 2 章 仿真的概率统计基础	42
2.1 概率统计的基本概念	42
2.2 常用概率分布	45
2.2.1 离散型分布	45
2.2.2 连续型分布	46
2.2.3 系统概率分布模型	51

2.3	分布假设与检验	54
2.3.1	分布类型假设	54
2.3.2	分布参数估计	57
2.3.3	分布假设检验	59
2.4	伪随机数及其生成	68
2.4.1	伪随机数	69
2.4.2	伪随机数生成方法	71
2.4.3	伪随机数序列的检验和确认	74
2.5	随机变量的生成算法	81
2.5.1	常用的随机变量生成方法	81
2.5.2	常用分布的随机变量生成	88
	练习 2	92
第 3 章	理论模型建模方法	95
3.1	基本概念和术语	95
3.2	实体流图法	96
3.2.1	实体流图	96
3.2.2	实体流图模型的人工运行	103
3.3	活动周期图法	106
3.3.1	活动周期图	107
3.3.2	ACD 模型的人工运行	116
3.4	Petri 网方法	119
3.4.1	Petri 网的定义及其建模方法	119
3.4.2	网系统	120
3.4.3	Petri 网的特性	125
3.4.4	小结	128
3.5	Euler 网方法	128
3.5.1	Euler 图与奇异 Euler 图	129
3.5.2	Euler 网	131
3.5.3	初级 Euler 网系统	132
3.5.4	高级 Euler 网系统	136
	练习 3	143
第 4 章	仿真模型设计与实现	146
4.1	离散事件系统仿真策略	146

4.1.1	事件调度法	146
4.1.2	活动扫描法	147
4.1.3	三段扫描法	148
4.1.4	进程交互法	150
4.2	仿真模型设计	152
4.2.1	面向事件的仿真模型	153
4.2.2	面向活动的仿真模型	155
4.2.3	面向进程的仿真模型	161
4.3	仿真模型的计算机实现	162
4.3.1	简单排队系统模型的 C++ 语言实现	163
4.3.2	基于 SimuLib 的仿真模型实现	169
练习 4		197
第 5 章	SIMSCRIPT II.5 仿真语言	198
5.1	SIMSCRIPT II.5 的功能特点	198
5.2	SIMSCRIPT II.5 程序设计基础	200
5.2.1	程序结构	200
5.2.2	主程序	201
5.2.3	变量	201
5.2.4	Preamble	204
5.2.5	赋值语句和表达式计算	204
5.2.6	输入和输出	205
5.2.7	程序逻辑控制	207
5.2.8	程序例程	211
5.2.9	预定义元素	214
5.3	进程交互法仿真的概念和定义	214
5.3.1	仿真时间	215
5.3.2	实体	218
5.3.3	集合	220
5.3.4	进程	223
5.3.5	资源	231
5.3.6	预定义属性	233
5.3.7	概率统计	233
5.4	进程交互法仿真示例	236

5.4.1	加油站模型示例	236
5.4.2	银行模型示例	241
5.4.3	海港模型	245
5.5	事件调度法仿真示例	249
5.5.1	进程和事件	250
5.5.2	基于事件调度的加油站模型	251
5.5.3	附加的事件命令	253
5.6	连续系统仿真示例	253
5.6.1	连续系统模型的性质	253
5.6.2	微分方程解法	254
5.6.3	离散事件-连续系统混合模型	254
5.6.4	SIMSCRIPT II.5 的连续特征	255
5.6.5	积分控制语句	257
5.6.6	应用示例	257
练习 5		268
第 6 章	仿真结果分析与模型校验	270
6.1	终态仿真结果分析	270
6.1.1	重复运行法	270
6.1.2	序贯程序法	272
6.2	稳态仿真结果分析	274
6.2.1	批均值法	274
6.2.2	稳态序贯法	276
6.2.3	再生法	278
6.3	灵敏度分析	280
6.4	模型有效性校验	282
6.4.1	VV&A 基础	282
6.4.2	VV&A 方法	285
6.4.3	VV&A 管理	300
练习 6		305
第 7 章	离散事件系统仿真应用	307
7.1	排队系统仿真	307
7.1.1	基本知识	307
7.1.2	系统建模	310

7.1.3 仿真实例	313
7.2 库存系统仿真	320
7.2.1 基本知识	320
7.2.2 系统建模	320
7.2.3 仿真实例	324
7.3 加工制造系统仿真	334
7.3.1 问题描述	334
7.3.2 系统建模	335
7.3.3 仿真实例	336
7.4 作战系统仿真	345
7.4.1 应用 Petri 网方法建模	345
7.4.2 应用 Euler 网方法建模	349
7.4.3 反舰导弹攻防对抗仿真实例	351
练习 7	356
参考文献	358
附录 A SimuLib 库函数参考	360
附录 B 常用数表	374

第 1 章 概 论

随着科学技术的不断进步及其应用领域的不断拓展,人类认识世界、改造世界的方法和手段也在不断发展和提高。纵观人类科技进步的历程,理论研究在科学探索和技术创新中始终发挥着重要作用。以物理学为例,从开普勒的行星运动三大定律,到牛顿的万有引力定律,再到爱因斯坦的相对论,理论研究越来越深入,理论体系越来越完善。同样,实验研究也是科学探索和技术创新的重要手段,从物质结构的微观分析,到技术原理的研究开发,都离不开先进的实验手段。20 世纪中期以来,计算机技术和信息技术的发展,推动了仿真技术的发展和应用。利用某种建模方法描述所研究的对象,采用一定的求解方法和计算机平台解算模型进而求得问题的解答,成为分析和解决复杂问题的一种普遍而有效的途径。可以说,继理论研究、实验研究之后,仿真试验正在成为人类认识世界和改造世界的“第三种手段”,而且这种手段的应用范围越来越广阔。

1.1 仿真基本概念

对系统进行试验、分析并寻求问题的解答,是人们在科学研究和实践中经常要做的工作。但是,有时用实际系统做试验是难以实现的,乃至无法获取分析所需的数据。典型的情况有:实际系统不存在,例如,系统可能还处于论证或设计阶段,在样机生产出来之前无法直接进行试验;试验具有危害性,例如,汽车安全性能试验、核电站生产控制方案试验等,直接在实际系统上试验可能会造成较大损失乃至严重后果;试验受到较大制约,例如,试验周期太长且代价无法接受(如某些社会学、经济学、生态学试验),试验环境难以设置(如武器装备的攻防对抗试验),试验受到国际公约限制(如核试验);试验的花费过大,例如,飞机发动机和火箭发动机的设计过程中,需要进行大量的试验,而每次试验都要消耗巨额经费等。

为了能够在上述限制条件下对系统的特征和规律进行分析,人们在实践过程中不断总结和摸索出了一系列解决问题的方法。例如,对于正在论证和设计的系统,为了能够预测和评价系统的性能,可以采用系统设计相关领域的技术原理,建立反映系统性能及其变化规律的方程,通过解算方程达到研究目的。又如,在研究社会、经济和军事等领域的复杂系统问题时,基于对系统本质的了解和认识,建立反映系统动态变化过程的流程框图,通过推演的方式研究系统的动态变化规律。再如,对于有人参加的并且比较危险或耗费巨大的系统试验,利用计算

机和控制设备，通过某种算法产生与真实系统相同的场景和感受，并对人员的操作做出响应。这里提到的系统分析过程中的数学方程解算、动态过程推演、操作过程响应等就是非真实系统的试验过程；而试验过程中的方程、框图、虚拟设备和算法等非真实系统的试验对象就是系统的模型。显然，模型是真实系统的替代品，其中包含了反映所研究系统的特征和规律的相关信息。模型是为了达到系统分析研究的目的，经过对系统的抽象和简化所构建的反映系统特征和规律的相关信息的载体。对模型进行试验应当获取与真实系统试验一致的观测数据，而这种利用模型代替真实系统进行试验和分析的过程称为仿真。

1.1.1 物理仿真

仿真（simulation）是一种利用模型开展模拟试验研究的科学活动。构造系统的模型，用模型代替实际系统进行试验，在很多情况下是十分必要的，有时甚至是研究和解决问题的唯一可行手段。早在古代，用替代品模拟原物做试验这一朴素的仿真思想就已经出现并得到应用。当时，仿真模仿的对象一般是工程制品，实现的办法一般是拟制原物的缩比替代品，仿真模拟的目的一般是进行性能试验和设计。例如，古代建筑中的房屋屋顶多数为桁梁式结构，在建房过程中需要使用大量的木料。为了使屋顶稳固牢靠，除了要选择材质好、粗细适当的木料外，整个屋顶的桁架结构也必须满足一定的几何形状要求。也就是说，桁梁上的每一根木料都有确定的长度尺寸要求，不论木料长了还是短了都可能影响整个屋顶结构的稳定性。那么如何来确定屋顶上每一根木料的具体长度呢？显然不能拿木料到实际的屋顶上去试，这样既费时费力又可能造成不必要的木料浪费。这个问题对现代人来说是非常简单的，利用简单的力学原理和几何学的知识即可解决。但在科学尚不发达的古代，只能在地面上按实际尺寸的缩减比例模仿、拟制一个屋顶。经过若干次试验，确定一种稳定的结构之后，测量出模拟屋顶上每一根相应木料的长度，再按比例放大，从而得到实际所需的木料长度。

虽然上述构造原物替代品并进行试验的仿真方法源自古代，但至今在某些情形下仍发挥着重要甚至是不可替代的作用。例如，在飞机设计中对气动外形的要求非常严格。由于飞机外形尺寸较大且造价昂贵，用飞机原物直接做试验将受到很大限制。为了获得飞机外形（尤其是机翼）的气动数据，可以制作各种不同外形的飞机（或机翼）缩比模型放到风洞中进行试验。这种以原物的物质替代品作为模型（物理模型）的仿真，称为物理仿真，其主要特点是：仿真的对象是某种工程制品或其部件，仿真的目的是对研究对象的设计性能进行分析和优化，仿真的模型不易改变，仿真的试验受到一定限制，仿真的形式比较单一，仿真的成本比较昂贵。

无论是古代已经出现的仿真雏形，还是后来逐步发展成熟的物理仿真，都展现了仿真的基本特点：都要有一个对象系统，都要有一个或一组模型，都要在模

型上做试验以获取所需的数据结果。由此可见,系统、模型、试验是仿真研究的基本要素,任何包含系统、模型和试验的科学活动,都可称之为仿真。系统是仿真的对象和问题的本源,试验是解决问题、达到研究目的的手段,而模型则是连接系统和试验(问题和手段)的桥梁。

1.1.2 计算机仿真

计算机的出现为仿真技术的发展提供了现代手段。随着计算机及相关信息技术的发展,计算机逐步成为仿真研究的主要手段,仿真进入了以计算机技术为支撑的信息时代。目前,一般语义下(没有特殊限定词)的仿真均指计算机仿真,而且一般是指数字计算机仿真(简称数字仿真)。

计算机仿真以计算机为平台建立系统模型并进行试验和分析的技术,计算机仿真随着计算机技术及相关信息技术的发展而进步。随着1946年第一台数字计算机诞生,20世纪40年代末出现了模拟计算机仿真。在随后的近60年中,数字计算机技术迅速发展,计算能力和信息处理能力快速提高,数字计算机仿真逐步替代模拟计算机仿真成为普遍采用的仿真方法。微型计算机价格低廉和易于推广,计算机工作站运算速度快、存储容量大、人机交互环境好、图形和网络功能强,都为计算机仿真的广泛应用提供了坚实的基础。对于大型、高速、实时或超实时系统,可以将数字仿真和模拟仿真灵活结合,进行混合计算机仿真。

计算机仿真突破了物理仿真的限制,以物质形式存在的模型被以抽象形式或抽象与实物相结合的形式存在的模型所取代,不同的模型可在同一台计算机上建立和运行,并可方便、灵活、高效地进行多次重复的试验,仿真试验的结果也可以借助计算机进行存储、表现和分析,从而将仿真技术提高到了前所未有的水平,仿真的应用也因之而拓展到大部分工程和非工程领域。

计算机仿真同样具备仿真的三项基本要素,下面逐一进行讨论。

1. 系统

计算机仿真的研究对象是不断运行、发展和变化的动态系统。在计算机仿真中,可以将系统划分为两大类,即工程系统和非工程系统。工程系统是指人类为满足某种需要,利用工业手段构造的具有预定功能的系统,例如机械、电气、动力、化工、武器等系统。在自然和人类发展过程中自身形成的系统称为非工程系统,例如生物、山脉、河流、社会、经济、军事、管理、交通等系统。系统类型的划分是相对的,复杂情况下某些系统可能是两类系统的混合系统。在一定条件下,系统可以分解为若干既相对独立又相互联系的子系统(或称分系统)。

图1.1所示的弹道导弹飞行控制系统是一个工程系统,其任务是保证弹道导弹以足够的精度把战斗部投送到预定的位置。弹道导弹的飞行控制包括两个方面,一是飞行弹道的控制,即控制导弹的质心运动,二是对飞行姿态进行控制,

即控制导弹绕其质心的运动。制导系统和姿态稳定系统是整个控制系统的两个子系统。制导系统能够根据预定目标的信息和打击要求，形成导弹沿着预定弹道飞行所需的指令和控制信号。姿态稳定系统可以使导弹保持飞行的稳定性，并为制导系统正常工作提供基础。

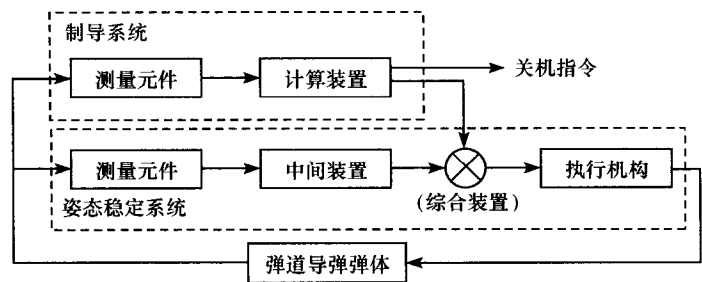


图 1.1 弹道导弹飞行控制系统

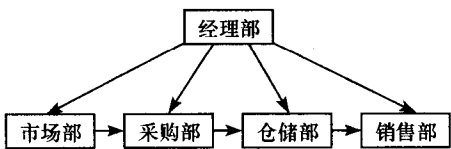


图 1.2 商品销售系统

图 1.2 所示的商品销售系统是一个非工程系统。在这个系统中，各部门之间既相对独立又相互联系，经理部负责各个部门之间的协调，并做出最终的决策。

系统由若干物理或逻辑上相对独立的单元及其相互关系构成，单元间影响关系的总和称为系统的结构。仿真研究中，一般将构成系统的物质、能量、信息和组织等有实际意义的物理或逻辑单元统称为实体（entity）。例如，弹道导弹飞行控制系统中的实体有弹道导弹弹体、测量单元、计算装置、执行机构等，商品销售系统中的实体有管理部门、管理人员、商品、货币以及设备、设施等。

凡实体总有属性（attribute）。所谓属性，是对实体所具有的主要特征的描述。例如，在弹道导弹飞行控制系统中，导弹弹体与控制系统有关的属性有导弹的飞行速度、飞行高度、飞行姿态角等，测量单元的属性有测量范围、测量误差等；在商品销售系统中，部门的属性有人员数量、职能范围等，商品的属性有生产日期、销售价格、销售数量、库存数量等。

属性可以用参数或状态（state）变量加以描述。在某一仿真应用中，如果实体的某一属性不会发生明显变化，或者所发生的变化具有事先可以预知的规律，且对所研究问题没有本质的影响，那么就可以将其作为固定或时变的参数来考虑；不同的参数设置，代表不同的仿真方案。由于实体自身的运行以及实体间的相互作用，实体的某些属性可能会随着时间的变化而持续发生变化，例如，弹道导弹的飞行速度和飞行高度；实体的其他属性可能在一段时间内保持不变，而因某类事件的发生在某些时刻点上发生变化，例如商品的销售价格和库存数量

等, 这些属性通常作为状态变量来考虑。实体状态随时间变化而改变的过程称为实体的行为, 这里, 实体的行为可能表现为其状态随时间的持续变化, 也可能表现为其状态随事件的跳跃变化。

任何仿真研究都是为了达到解决某一问题的目的而进行的。因此, 在对一个系统进行仿真研究时, 首先要根据研究的目的, 对系统的边界进行合理的划定, 即将所研究的系统与其所处的环境区分开来。系统的边界决定了系统中所包含的实体, 研究目的不同, 系统的实体可能会因之而发生变化。例如, 对于商品销售系统, 如果仅研究商品库存量的变化情况, 那么系统只需包括销售部、采购部及仓储部即可。但若若要研究商品的销售与进货关系时, 系统中还要包括市场部门, 因为该部门负责调查、分析商品的需求、销售情况及其对进货的影响。

系统由实体构成, 其整体当然也可以作为一个实体来描述, 因此, 上述用于实体分析和描述的思想, 也可以用于分析系统的属性和状态变化, 从而确定系统的参数和状态变量。系统状态变量的选取应当服从仿真研究的目的; 同时, 系统状态变量的值必须是可观测、可获取的, 一般与实体的状态变量相关。

2. 模型

模型(model)是对系统特性和规律的描述, 用于提供关于系统的有用信息。计算机仿真中的模型, 一般用数学、逻辑或其他抽象的方法进行描述, 而且最终用计算机语言加以实现; 尽管它们并非都具有精确的数学表达形式, 但统称为数学模型, 以区别于物理模型。模型具有一些基本性质, 例如相似性, 即模型与所对应的系统必须具有相似的特性和规律; 简化性, 即模型只是对系统的近似表达; 多样性, 即同一系统的模型表示并不一定是唯一的, 等等。

根据时间集合的特点, 可以将模型分为连续时间模型和离散时间模型。连续时间模型中的时间用实数来表示, 即系统的状态可以在任意时刻点获得。离散时间模型中的时间用整数来表示, 即系统的状态只能在离散的时刻点上获得, 这里的整数时间只定性地表示时间离散, 而不一定是绝对时间。根据状态变量的特点, 可以将模型分为连续变化模型和离散变化模型。在连续变化模型中, 系统的状态变量是随时间连续变化的。在离散变化模型中, 系统状态变量的变化是不连续的, 即它只在特定时刻变化, 而在两个特定时刻之间保持不变。按照这两种分类方法, 各类模型中状态变量的轨迹特征可以用图 1.3 综合表述。图中, 第 I 类模型的系统状态随时间连续变化, 且在任意时刻皆可获得系统状态变量值, 此类系统是纯粹意义上的连续系统, 其对应的一般是常微分方程模型和连续时间的偏微分方程模型; 第 II 类模型的系统状态随时间连续变化, 但只能在离散时间点上获取系统状态变量值, 一般称为采样系统, 所对应的是离散时间的偏微分方程模型和系统动力学模型; 第 III 类模型的系统状态在离散时间点上变化, 在其他

时刻点系统的状态变量值却可以看作是连续不变的，对应的是离散事件系统模型；第 IV 类模型的系统状态变化和时间集合都是离散的，对应的是差分方程模型。第 I、II、IV 类模型统称连续系统模型。

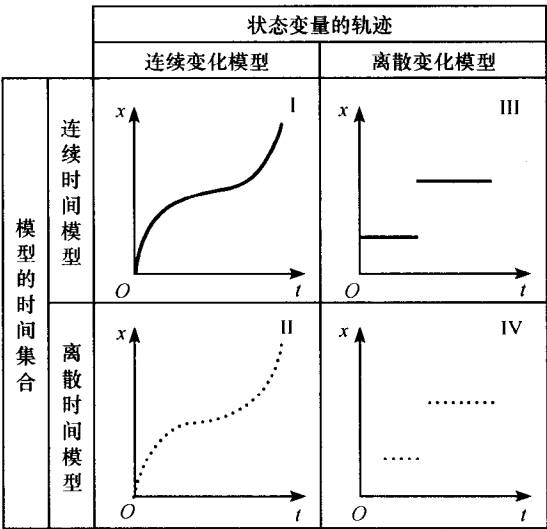


图 1.3 连续模型与离散模型

数学模型具有理论模型（theoretical model）和仿真模型（simulation model）两种存在形式，一般情况下数学模型泛指前者。理论模型是对所研究系统的理论描述（称为系统的一次建模），仿真模型是在理论模型基础上建立的更易于在计算机上编程实现的模型（称为系统的二次建模）。仿真模型可以直接采用某种通用程序设计语言实现，也可以采用某种基于通用程序设计语言的专用仿真语言加以实现，后者有利于提高仿真建模的能力和效率。模型是否有效，直接影响到仿真结果的可信度和可用性。对于所要解决的问题，在所允许的精度范围内，模型是否正确、有效，必须加以确认和验证，并最终得到权威部门的认定。

根据仿真研究目的和仿真对象系统的性质，可以采用不同的方法建立系统理论模型。国际仿真专家、美国 Florida 大学计算机信息科学与工程系的 P. A. Fishwick 教授按照模型描述方法的内在一致性，将计算机仿真的理论模型分为概念模型、描述模型、功能模型、约束模型、空间模型等五种基本类型。这五类模型可以结合使用，在一定条件下有的还可以互相转换。

① 概念模型（conceptual model）：以形象的方式对系统的实体、属性、行为和关系等进行概念性的描述。对象图是一种比较自然、规范和完善的概念建模方法，它采用类、对象、属性和方法函数等来描述系统的基本特征和变化规律。

② 描述模型（declarative model）：基于状态、事件以及二者之间的转移关

系描述系统的行为,并通过状态变化序列研究系统的行为。常用的描述模型包括有限状态机、有限事件机、Markov 链、Petri 网等。

③ 功能模型 (functional model): 基于功能和变量描述系统的行为,并能够以图形符号进行表达。常见的功能模型有功能框图、信号流程图、随机网络图、系统动力学流图等,其中功能框图模型最为典型,它通过功能模块之间的输入输出关系对系统的行为进行描述。

④ 约束模型 (constraint model): 用代数方程、常微分方程等数学方法或 Bond 图描述系统的内在规律和行为。常微分方程是一种典型的约束模型,并可以转换为相应的功能框图模型。Bond 图是工程技术人员经常采用的一种约束模型,它基于能量和能量转换关系,采用统一的方法对电磁学、力学、水力学、空气动力学、热力学和材料力学等领域的物理学原理进行描述,为不同工程领域的建模提供统一的视图。根据领域知识和能量的流向关系,可以将 Bond 图转换为微分方程及功能框图。

⑤ 空间模型 (spatial model): 根据空间分布关系对系统进行分解,并通过子空间的行为、规则和相互关系描述系统的整体行为。目前主要采用相格法建立空间模型。将相格空间的规则与气体分子的扩散特性结合起来,可以建立气体或粒子的扩散模型。将相格空间的规则与交通规则和车辆行驶速度等因素结合起来,可以建立复杂的交通系统模型。将相格空间向三维空间扩展时,根据植物的空间生长规则,可以建立植物生长模型。空间模型还可用于建立偏微分方程的求解算法。

3. 试验

在计算机上对模型进行试验,采集数据并进行分析,是计算机仿真的一项重要工作。可以说,仿真试验的科学性,在很大程度上决定了仿真研究的科学性。仿真试验是一项很专业化的工作,其主要任务是:根据试验需求所规定的试验类型与试验目的,明确试验所应用的仿真背景、试验类型与试验方法,确定试验因子及其变化规律,建立试验指标与模型响应的关联,明确仿真试验的终结方式,制定试验方案,依据方案进行仿真试验并收集仿真试验数据,对试验数据进行分析 and 处理。

仿真试验的主要步骤如下:

(1) 设置试验需求

设置内容包括:试验的目的,试验的客体,试验的分析指标,试验所关心的影响因素,支撑试验的模型等。

(2) 确定试验方法

针对试验类型不同,试验方法亦有所不同。仿真试验方法包括“蒙特卡罗法”、“正交设计法”、“均匀设计法”、“析因设计法”以及“自由设计法”等。