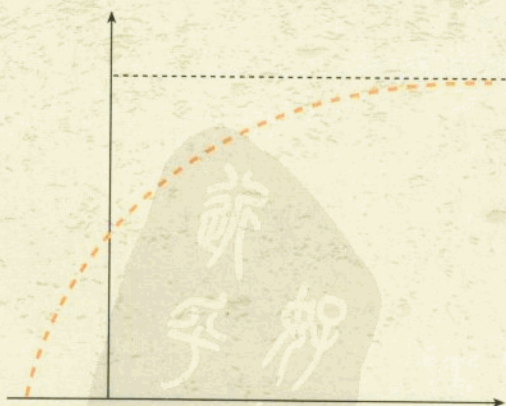


Jiaotong Yunshu Moni Jianmo Jishu

交 通 运 输 模拟建模技术

林国顺 李向文 著



大连海事大学出版社

交通运输模拟建模技术

林国顺 李向文 著

大连海事大学出版社

©林国顺, 李向文 2004

图书在版编目 (CIP) 数据

交通运输模拟建模技术 / 林国顺, 李向文著. — 大连: 大连
海事大学出版社, 2004.10

ISBN 7-5632-1795-9

I. 交… II. ①林… ②李… III. 交通运输—模拟—建立
模型 IV. U

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 099621 号

大连海事大学出版社出版

地址: 大连市凌海路 1 号 邮编: 116026 电话: 0411-84728394 传真: 84727996

<http://www.dmupress.com>

E-mail: cbs@dmupress.com

大连海事大学印刷厂印装

大连海事大学出版社发行

2004 年 11 月第 1 版

2004 年 11 月第 1 次印刷

幅面尺寸: 140 mm×203 mm

印张: 6.5

字数: 157 千字

印数: 1~550 册

责任编辑: 陈 航

封面设计: 王 艳

定价: 20.00 元

内 容 提 要

本书主要包括：模拟基本概念，随机模拟理论，模拟建模技术，模拟实验设计，排队模型，多流向随机模型OO建模，最新模拟技术介绍。本书主要面向工程和管理类研究生、科研人员 and 高级工程技术人员。

前 言

模拟又称仿真,从本质上说,它是一种在系统模型上进行试验的方法。计算机模拟,就是在计算机模型上做实验,直观、便捷、省钱、省力、没有风险是其优点。计算机模拟数十年的应用历史,已经确立了其作为解决实际问题的高级实用技术的地位。如今,模拟技术已广泛应用于军事、航空、交通等领域。

笔者长期从事交通运输及其他管理领域系统模拟研究,并一直在大连海事大学为信息专业本科和研究生开设管理系统模拟课程,书中一些理论和实例选自笔者博士课题研究内容。本书集成系统模拟的一般理论,展示了新的面向对象和可视化的模拟技术。

本书基本成稿于2000年,这几年,在研究生教学过程中,略有补充。出版前,几位研究生又对书稿进行了校对,其中王佳超同学负责1~3章,汪蓓蓓同学负责4~6章,闫会娟同学负责7~10章。在新书出版之际,对我北京大学的老师刘婉如教授、汪仁官教授,哈尔滨工业大学的老师黄梯云教授表示真诚的感谢!是他们把我领进了科学的殿堂;文中引用笔者的几篇论文,都渗透着他们的心血。感谢大连海事大学出版社,为我的专著提供了出版的机会。感谢年轻的研究生同学们,为专著的出版付出了辛勤的劳动。

计算机模拟,作为一种实用的计算机高级应用技术,应该被更多的科技工作者所掌握。在我国许多领域,这些研究工作有待于进一步开展,例如,航海运输、公路交通、物流管理、物资分配、电力调度等。笔者期待有更多的机会与大家交流,笔者e-mail地址: lgs@mail.dlptt.ln.cn。

作者

2004年10月 于大连海事大学

目 录

第 1 章	系统模拟概论	1
1.1	系统模拟的产生	1
1.2	系统模拟的概念	3
1.3	简单问题的人工模拟	15
1.4	系统模拟的原则和步骤	17
1.5	系统模拟的应用和发展	25
第 2 章	计算机产生随机数	29
2.1	均匀分布随机数的产生	29
2.2	连续分布随机数的产生	39
2.3	离散分布随机数的产生	45
2.4	随机模型中的计算问题	47
第 3 章	随机模型检验	53
3.1	假设检验的一般提法	53
3.2	参数检验	55
3.3	分布拟合检验	61
3.4	游程检验法	63
第 4 章	模拟建模基础	68
4.1	离散型模拟模型	68
4.2	模拟时钟与模拟策略	75
4.3	非离散型模拟模型	81
第 5 章	排队系统模拟	84
5.1	单服务台排队系统的模拟	84
5.2	排队系统建模	91
5.3	到达模式	96
5.4	排队规则和队列的度量	104

5.5	服务时间和服务质量	106
第 6 章	面向对象的模拟建模方法	117
6.1	OO 系统的三元模型	117
6.2	模拟模型中的“服务台”对象类	122
6.3	模拟模型中的“流动”对象类	125
6.4	面向对象的建模逻辑	127
6.5	随机变量对象的实现	129
6.6	随机变量对象的调用	131
6.7	随机变量可视化技术	132
第 7 章	模拟模型确认与实验设计	134
7.1	模拟模型验证	134
7.2	模拟模型确认的“三步法”	137
7.3	模拟实验设计	141
7.4	2^m 析因设计与正交设计	144
7.5	模拟输出的统计处理方法	147
第 8 章	多流向随机模型 OO 建模	151
8.1	多流向随机模型的结构与特征	151
8.2	基于流向规则库的模拟策略	152
8.3	一个简单城市交通问题的模拟案例	157
第 9 章	两个模拟实例	162
9.1	地铁客运模型系统模拟	162
9.2	港口集装箱装卸模拟	168
第 10 章	新一代模拟技术	174
10.1	发展的模拟建模技术	174
10.2	虚拟现实	176
10.3	遗传算法	184
10.4	智能模拟	189
参考文献		198

第 1 章 系统模拟概论

1.1 系统模拟的产生

“模拟” (simulation) 已成为人们逐渐熟悉的概念和用语。概括来说, 模拟是把某一现实的或抽象的系统的状态和特征, 用另一个称为模型的系统来代替或模仿。例如, 一个作战指挥系统可用一个沙盘来直观代替, 一个生物系统可用一个数学模型来描述, 一个管理系统可用一个计算机程序来模仿等等。总之, 人们利用构造的模型来做试验, 去学习、研究和分析一个原有的系统, 或用来设计一个新的系统。在模型上做的试验称为模型试验, 所构造的模型称为模拟模型。

相对于“模拟”一词, 人们对“蒙特卡洛”可能会感到一些惊讶。事实上, “蒙特卡洛” (Monte Carlo) 是摩纳哥王国的一个世界著名赌城。第二次世界大战期间, 冯·诺依曼 (Von Neumann) 和乌拉姆 (Ulam) 两人把他们所从事的研究原子弹的工作, 用赌城蒙特卡洛作为代号来秘密称呼, 他们的具体工作是对裂变物质的中子随机扩散进行直接模拟。用赌城名来比喻随机模拟, 既风趣又贴切, 很快得到人们的普遍赞许和接受。具体地说, 蒙特卡洛方法属于试验数学的一个分支, 它利用随机数进行统计试验, 以求得的数学期望值、方差等统计特征值作为待解决问题的数值解, 这种统计试验称为蒙特卡洛模拟。由此可见, 模拟与应用统

计数学两者紧密相关。人们把冯·诺依曼进行的工作看做是系统模拟现代概念的起源。

电子计算机的出现，为系统模拟提供了强有力的工具。人们通过在计算机上建立数学模型，进行模拟试验，从而大大推动了模拟和应用统计学的发展，同时，电子计算机的产生和发展同样受到模拟方法的巨大推动。事实上，世界上第一台数字电子计算机 ENIAC，就是用来解决弹道轨迹模拟计算问题的。与此同时，用机电器件组成模拟电路而建成的第一代模拟电子计算机，也是用来模拟飞机和导弹的飞行。数字电子计算机用来进行蒙特卡洛方法试验，即数值仿真。模拟或仿真的英文词均是 simulation，而利用电路的电压幅值变化进行连续系统实时仿真的计算机称为模拟电子计算机，其对应的英文词是 analog computer。本书所涉及的内容当然指的是前者的范畴之一，即管理系统模拟，而不是后者，模拟电子计算机的模拟。

1927 年，Vanevar Bush 在麻省理工大学着手研制第一台机械的通用微分模拟分析器，此后 20 年里，开发了加法辅助机器。机械的微分分析器能进行数学运算，并能以相当的精确度求解微分方程，但速度很慢。专用电子模拟计算机在二战期间广泛应用于消防、飞机自动导航、航海等领域，这时制造了许多电子模拟计算机，它们的结构以 Typhoon 的设计最为著名。早期的模拟计算机体积庞大，且不很可靠，它们的计算是有限的，必须对相对大些的系统的数学模型进行简化，才能使问题有效地适应计算机。

20 世纪 50 年代开始，是模拟电子计算机的“黄金时代”，但很快数字电子计算机取得惊人的发展，其精度高、逻辑运算能力强、数据贮量大、使用灵活等优点使模拟计算机相形见绌。在软件方面，FORTRAN 一类面向用户的程序语言，使用户更容易编制计算机程序进行更多领域的模拟，如随机服务系统等。因此，

20 世纪 50 年代到 60 年代,将模拟电子计算机与数字电子计算机联为一体的混合计算机在模拟领域中广泛采用,但很快又被后者取代。

20 世纪 70 年代以来,随着大规模集成电路技术的发展,数字电子计算机价格越来越低,运算速度越来越快。尤其是大型通用计算机“超级电脑”(supercomputer),如 CRAY-1、STAR-100、Fujitsu VP200,以及日立公司的 S810,有关报告指出,它们的运算能力大约在每秒 4 亿次^[1]。由于各种实用的专门用于数字电子计算机模拟的程序设计语言不断出现和完善,这一时期,绝大多数的模拟应用领域都使用数字电子计算机。尤其值得提出的是,微型计算机的出现,为计算机模拟提供了更方便、更廉价的有力工具。近 20 年来,随着管理科学、系统工程、现代数学和计算机的长足发展,系统模拟在工业发达国家获得了日益广泛的应用。无论在模拟模型、理论分析、软件开发与推广应用等方面都进展很快。自 20 世纪 70 年代末期以来,我国开展了系统模拟的研究和应用,尤其在管理系统模拟方面,如交通运输、采矿作业、作战指挥、城市规划等方面取得了可喜的成果。本书将以港口集装箱运输为主要应用背景,介绍计算机模拟的最新理论与应用。

1.2 系统模拟的概念

1.2.1 系统的概念

系统是由多个相互依赖、相互作用、共同配合实现预定功能的要素组成的有机集合体。这里所说的要素,可以是自然、物理形态的,也可以是社会、管理形态的。本书研究的管理系统,就是履行特定管理功能的诸要素的有机整体。关于系统的特征,我们归纳如下:

(1) 整体性。一个系统是由两个或两个以上的有效工作环节（或子系统）组合而成的。这些组成部分虽然具有一定的相对独立性，但是更重要的是，它们是根据逻辑统一性要求，相互联系构成一个有机整体。

(2) 关联性。要使一个系统有效地履行其功能，它的各个子系统之间必然相互联系和相互作用，存在着一定的逻辑关系。

(3) 目的性。系统履行其特定的功能，实现既定的目标。一个企业管理系统的基本功能就是合理地组织企业的各种要素（人员、物资、资金、信息），减少劳动消耗量和资金占有量，努力提高经济效益，提供满足社会需要的产品或服务。

(4) 环境适应性。任何系统都有一定的边界和环境，它与周围的外部环境有着一定的联系并且相互作用。从环境接受各种影响（包括正常输入以及干扰），经过系统的转换，产生一定的输出，从而对外部环境产生影响。外部环境及其影响是经常变化的，为了使系统达到优化，必须对系统进行相应的调节，使之适应环境的变化。

组成系统的要素，我们称之为实体，而实体则用属性进行定义。例如，为研究集装箱码头装卸效率，我们定义一个集装箱码头装卸系统。该系统描述见表 1-1。对应系统内部的实体，需要定义它们之间的关系，如泊位与船舶的关系可能有可以同时靠泊的船舶数量、泊位与船舶的相互选择等。

表 1-1 集装箱码头装卸系统描述

实体	属 性
泊位	长度、深度、费用
吊车	型号、装卸速度、吊高、吊重、费用
船舶	长度、吃水、装卸量、到达时刻、离去时刻

1.2.2 系统模拟的术语

在管理系统模拟当中，我们要运用到许多基本的模拟术语，现在分别说明如下：

1) 实体 (entity)

一个系统边界内部的客观对象称为实体。实体可分为永久性实体和临时性实体。永久性实体是指经常处于系统之内，其数量保持相对稳定的实体，如一个排队服务系统内的服务员。临时性实体是指先进入系统并在经过相应环节以后再离开系统，在系统内的数量经常发生变化的实体，如一个排队服务系统内的顾客。

2) 属性 (attributes)

属性是指系统的实体的特性。从某种意义上说，管理系统模拟的任务就在于分析和研究系统实体及其属性的运动规律，评价系统的工作性能，从而辅助系统设计和决策。因而，正确确定模拟的实体及其属性是系统建模的重要组成部分。表 1-2 列举了一个生产计划系统的实体及属性。

表 1-2 一个生产计划系统的实体及属性

实 体	属 性
产品	类型、需求量、生产量、库存量、交货期、单价、工时定额
元件	类型、需求量、生产量、库存量、单价、工时定额
原材料	类型、需求量、库存量、订货点、订货批量、消耗定额
机器	类型、拥有量、作业时间、调整时间、役龄
工人	工种、组别、级别、数量、作业时间、工资、工龄

3) 活动 (activity)

活动是占用一定时间和资源的导致系统状态发生改变的一定过程。譬如，网络计划系统中的一项作业、流水生产线的一道

工序等都属于一项活动。

4) 系统状态 (system state)

系统状态是指在某时间点该系统的所有实体、属性和活动的描述。当一个系统的所有实体处于状态协调并且有定义状态的属性时，我们说该系统处于特定状态。

5) 事件 (event)

事件是引起系统状态发生瞬间变化的事实。它可以是一个实体的产生或消失、系统实体的属性值的改变或者一项活动的开始或结束。事件可以分为时间事件和状态事件。时间事件是指依照系统的作业规则在预定时间发生的事件，状态事件是当系统状态符合某种条件而发生的事件。

6) 关于环境

(1) 存在于系统周围的对象和过程（实体和活动）称为系统的环境 (environment)。

(2) 产生于系统内部的活动称为内生活动 (endogenous activity)。

(3) 发生于环境并对系统产生影响的活动称为外生活动 (exogenous activity)。

(4) 将活动划分为内生活动和外生活动就确定了系统的边界。

7) 关于系统

(1) 没有外生活动的系统属于封闭系统；反之，具有外生活动的系统属于开放系统。

(2) 连续系统的变量可以为预定区间集合中的任意实数值，也即其系统状态呈光滑性变化。离散系统的变量只能为有限的特定值，即系统状态呈不连续变化。

(3) 一个系统的响应（输出）完全由它的初始状态和输入所决定则称为确定性系统。一个系统在既定的初始状态和输入的

情况下，其响应（输出）具有随机性，则称为随机性系统。

8) 模型验证 (verification of model)

模型验证就是检验计算机模拟程序是否正确反映系统模型。

9) 模型确认 (validation of model)

模型确认是指检验系统模型是否正确地描述现实系统。

在系统模拟中，主要研究的是随机系统。根据系统状态的变化，系统可以分为连续性系统与离散性系统、简单系统与复杂系统、线性系统与非线性系统、自然系统与“人造”系统、开放系统与封闭系统、静态系统与动态系统等。从宏观上看，可以将它们划分为企业管理系统、物资管理系统、国民经济计划系统、工业管理系统、农林牧渔管理系统、交通运输管理系统、邮电管理系统、建筑管理系统、教育管理系统、卫生与社会服务系统等。

1.2.3 系统模型及其分类

1) 系统模型的概念

系统模型是对一个现实存在的系统或计划建立的系统的抽象描述。建立和运用系统模型的目的在于指明系统的主要组成部分以及它们之间的逻辑关系。这样，模型成为研究现实系统而构造的用来收集有关信息的替代物。人们利用这些信息描述和预测系统的性能或状态，以便对系统的运动规律进行深入的分析、运用与控制。一般说来，系统模型在我们所研究的问题范围内能够更普遍、更集中、更深刻地反映现实系统的特征和变化规律，但并不需要考虑系统的全部细节，因此一个模型不是用来简单代替现实系统的，而应该是这个系统的简化。

2) 系统模型的分类

系统模型按存在形式可以分为物理模型和逻辑模型。物理模型一般用实际存在的物体构成模型，如产品形体结构模型、港口

平面布置模型，也称实物模型。逻辑模型一般指抽象的模型，如用数学解析表达式概括的数字模型，用文字形式表述的阐述性模型，用流程图显示的图解式模型，以及运用计算机程序语言编写的模拟程序等。逻辑模型由于其抽象性，有时也统称为数学模型。

一种模型并不能简单地归类于物理模型或逻辑模型，这两种大的分类之间没有明确的界限。图 1-1 反映了从物理模型到数学模型的一个渐进变化。

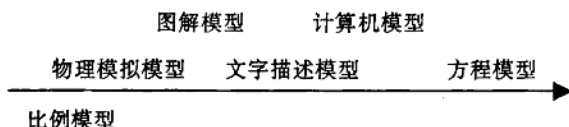


图 1-1 模型渐进分类示意图

比例模型：按一定的比例将物理模型比较直观地再现出来，比如水分子模型；

物理模拟模型：用一种直观的物理量来描述不直观的物理量，比如温度计；

图解模型：利用图表方式来描述现实中的数据，比如直方图；

文字描述模型：将现实的系统抽象出来，利用语言文字来描述；

计算机模型：利用计算机技术来描述系统，即通过编写程序（抽象），在计算机上对系统进行直观的再现；

方程模型：利用数学表达式来描述系统，具有较高的抽象性，是典型的数学模型，比如牛顿的力学模型 $F=ma$ 。

除上述分类外，系统模型按照系统状态可以分为静态模型和动态模型。静态模型描述系统在某个特定时刻的状态，或者说它不包含时间因素；而动态模型描述系统状态随时间的变化情况。

系统模型按是否包含随机因素可以划分为确定性模型和随机性模型。确定性模型是指系统某一时刻的新状态完全由系统的原

状态以及相应的活动所决定，即在一定的输入条件下，将产生确定对应的输出结果。而随机模型是在既定的条件和活动下，系统从一种状态转变为另一种状态具有随机性，它的输出结果，只能作为模型特性的一个估计。简单地说，随机模型往往用于描述一个随机系统。

系统模型依照系统变量的变化特征可以分为连续型模型和离散型模型。在连续型模型中，系统变量随时间呈连续性变化；而在离散型模型中，系统变量随时间呈间断性变化。应当说明，对系统的描述并不完全由系统本身特征所决定，而是与研究的目的有很大关系，对系统的分类以及状态变量的选取都是如此。

1.2.4 系统模拟的类型

系统模拟有 3 种类型：离散型，连续型，离散-连续复合型。在某些情况下，对于同样的系统，既可以采用离散性变化（突然变化）的模型进行模拟，也可以采用连续性变化（光滑变化）的模型进行模拟。通常，模拟时间是系统模拟的主要自变量，其他变量为因变量，因变量是模拟时间的函数。系统模拟的类型往往与因变量的特点有关。

1) 离散型模拟

在离散型模拟中，因变量在与事件时间有关的具体模拟时间点呈离散性变化，而模拟时间可以是连续性的或离散性的，这取决于因变量的离散性变化是可以在任何时间点发生还是仅能在某些特殊时间点发生。大量的管理系统可以采用离散型模拟进行研究。图 1-2 表示了离散型模拟的因变量与模拟时间的关系。

2) 连续型模拟

在连续型模拟中，因变量随模拟时间呈连续性变化。同样地，模拟时间可以是连续性的，也可以是离散性的。图 1-3、图 1-4

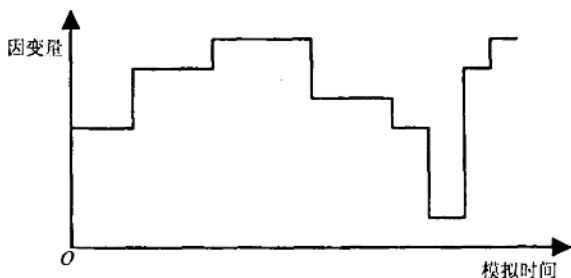


图 1-2 离散型模拟的因变量与模拟时间的关系

、分别表示了具有连续模拟时间或离散模拟时间的连续型模拟的因变量与模拟时间的关系。

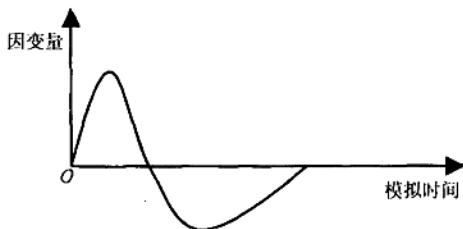


图 1-3 连续型模拟（具有连续模拟时间）

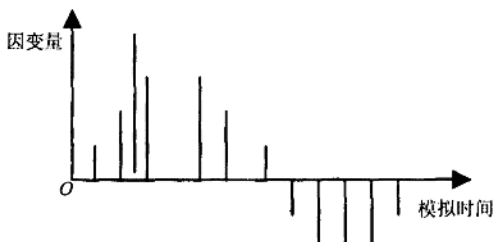


图 1-4 连续型模拟（具有离散模拟时间）