

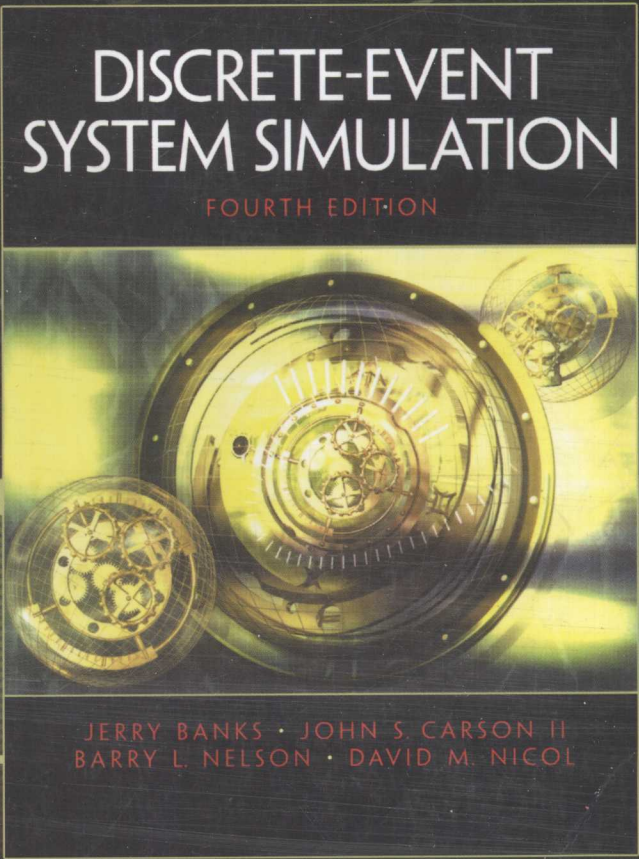
离散事件系统仿真

(原书第4版)

Discrete-Event System Simulation

(Fourth Edition)

Jerry Banks
John S. Carson II 著
(美) Barry L. Nelson
David M. Nicol
肖田元 范文慧 译



7P391.9

23

离散事件系统仿真

(原书第4版)

Discrete-Event System Simulation

(Fourth Edition)

(美) Jerry Banks
John S. Carson II 著
Barry L. Nelson
David M. Nicol

肖田元 范文慧 译



机械工业出版社
China Machine Press

TP391.9

23

本书全面论述了离散事件系统仿真的所有重要方面，并特别注重离散事件系统仿真在制造、服务及计算方面的应用。全书共分五部分，第一部分介绍了离散事件系统仿真的一般理论和基本概念，第二部分介绍了数学模型与统计模型，第三部分介绍了随机数，第四部分介绍了有关仿真数据分析方面的内容，第五部分给出了制造与物料储运系统、计算机系统以及计算机网络系统中的仿真应用。

本书可作为高等院校工程系、管理系、计算机科学系等高年级本科生或低年级研究生的仿真课程的教材。

Simplified Chinese edition copyright © 2007 by Pearson Education Asia Limited and China Machine Press.

Original English language title: *Discrete-Event System Simulation, Fourth Edition* (ISBN 0-13-144679-7) by Jerry Banks, John S. Carson II, Barry L. Nelson, and David M. Nicol, Copyright © 2005, 2001, 1999.

All rights reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

本书封面贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书版权登记号：图字：01-2005-1618

图书在版编目 (CIP) 数据

离散事件系统仿真(原书第4版)/(美)班克斯(Banks, J.)等著;肖田元,范文慧译. -北京:机械工业出版社, 2007.7

书名原文: Discrete-Event System Simulation, Fourth Edition

ISBN 978-7-111-21340-6

I. 离… II. ①班… ②肖… ③范… 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(2007)第 055925 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:迟振春

北京慧美印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2007 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 26.5 印张

定价:52.00 元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010)68326294

译者序

仿真科学与技术已广泛应用于管理、经济、军事、能源、交通、通信、气象、工业、农业、商业、生物、医疗、卫生、文化娱乐等领域，成为继理论研究和实验研究之后第三种认识和改造客观世界的重要方法。

离散事件系统是指系统状态在某些随机时间点上发生离散变化的系统。引起状态变化的行为称为“事件”，“事件”往往发生在随机时间点上，因而离散事件系统一般都具有随机性，其动态特性很难用人们所熟悉的数学方程（如微分方程或差分方程等）形式加以描述，也难以得到系统动态过程的解析表达。经典的概率及数理统计理论、随机过程理论虽然为研究离散事件系统提供了理论基础，并能对一些简单系统提供解析解，但对实际中的大量系统，唯有依靠计算机仿真技术才能提供较为完整的结果，因而仿真是研究这类系统最重要、最有效的工具。

正如作者在“前言”中所述，本书全面论述了离散事件系统仿真的所有重要方面，并特别注重离散事件系统仿真在制造、服务及计算方面的应用。本书是美国许多大学高年级本科生或硕士生相关课程的主要参考教材之一。其主要特色在于：

1. 内容丰富，详略得当。对基本概念、理论、方法、技术等，力求准确与深入；对应用案例，抓住核心及关键；对最新的发展，则着眼于方向性说明。
2. 体系结构合理、完整。从基本概念出发，由浅入深，逐渐展开，符合认识规律。既有概念、方法的论述，又有实际举例说明，既有理论论证，又有应用案例，相得益彰。
3. 适于教学与自学。本书兼有满足教材和自学两方面需要的特点。它不依赖于某一种商业化软件，但为读者提供了学习和掌握本课程知识的工具；它对离散事件系统仿真的原理、方法、技术进行了系统讨论，同时又提供了大量例题和习题，这对于教学及学生理解和掌握是非常必要而重要的。另外，在本书的网站 www.bcn.net 上提供了丰富的教辅资料，这对于教学与自学是十分有益的。

参加本书翻译的人员是清华大学自动化系国家 CIMS 工程技术研究中心仿真与虚拟制造研究室的老师、博士、硕士，他们在相关领域进行过不同程度的学习、研究和实践，这为翻译此书提供了较好的专业背景和理论基础。

限于译者水平，难免会出现一些错误之处，敬请广大读者批评指正。

Jerry Banks
John S. Carson II
Barry L. Nelson
David M. Nicol

前 言

本书的主要目的是全面论述离散事件系统仿真的所有重要方面,并特别注重离散事件系统仿真在制造、服务及计算方面的应用。和早期版本一样,本书可以作为高年级本科生或硕士研究生的仿真导论教材,或在与应用相关的第二门课程中使用。第4版对全书内容进行了广泛的更新,并对某些章节进行了彻底的修订,同时针对计算机网络仿真增加了新的一章。读者可以从网站 www.bcn.net 中获取本书的相关资料。

第1章已经被广泛更新。第2章中的每一个例子在网站上都有 Excel 格式的电子表格解决方案。做书中的习题需要下载这些电子表格解决方案。为反映仿真软件的持续演进,第3章已经被更新,包含了当前仿真语言的特点和操作。在第4章中,用 Java 语言代替了 C++ 语言来进行仿真。书中对当前可用仿真软件的特点展开了最新讨论,但是,仿真软件变化太快了,因此只给出本书所提到的所有软件销售商的网站。

第5章包含了其他一些模型: β 分布、负二项分布以及非平稳泊松过程。这些模型基于与各种模型的仿真(第8章)及拟合(第9章)相关的新材料。为了清楚起见,第8章进行了全面的重新组织。在第7章中,由于现代发生器的周期很长,以至于基于采样的测试变得不可行,因此不再强调随机数发生器的统计试验。

第10章用置信区间的方法取代假设检验来对输入、输出的有效性进行验证。

仿真输出分析的核心章节是第11章和第12章。第11章进行了全面的重新组织,并加入了新材料,包括预测区间以及仅从累积统计估计概率和分位数的内容。第12章提供了一个新程序,用于筛选大量的系统设计来提取较小的一组最优设计。

第13章增加了一个小型制造系统的扩展的例子,并对其进行了分析。

第14章取消了对用于计算机仿真的 C++ 仿真工具的讨论,取而代之的是对另一种工具的讨论,这种工具在通常情况下使用 Java,而在特殊情况下使用 SSFNet 仿真器。第15章是新增加的,其中讨论的仿真例子(用 Java 语言编写)可以在网站上找到,网站上还提供了对支持材料的广泛链接。

本书可以作为以下几类课程的教科书:

1. 工程、计算机科学或管理类的仿真导论课程(如果没有使用配套语言教材,则讲述第1~9章以及第10~12章的部分内容;如果使用配套语言教材,则可跳过第4章,并根据需要选择第13~15章这些应用章节)。
2. 仿真的第二课程(第10~12章、配套语言教材以及外部的项目;并根据需要增加第13、14或15章)。

我们非常感谢 Ganze Tokol 和 Dave Goldsman 所提供的帮助,他们把未使用 LATEX 软件排版的几章转换成 LATEX 格式。同时感谢 Feng Yang 的帮助,他帮助核对了许多章节的参考文献及习题。

Jerry Banks
John S. Carson II
Barry L. Nelson
David M. Nicol

关于作者

Jerry Banks 佐治亚理工大学工业及系统工程学院教授，于1999年退休。随后，他在Brooks Automation公司任高级仿真技术顾问，目前他是一名独立的咨询专家。他独立或与他人合作编著了11本书、一系列会议文献、教科书的多个章节、大量技术文章。他是《Handbook of Simulation》的编者，该书于1998年由John Wiley出版社出版，获得了美国出版者协会专业学术出版部的优秀工程手册奖。他也是下面几本书的作者：《Getting Started with AutoMod》第2版、《Introduction to SIMAN V and CINEMA V》、《Getting Started with GPSS/H》第2版、《Forecasting and Management of Technology》和《Principles of Quality Control》。他是仿真咨询公司Carson/Banks & Associates的合伙创始人，该公司后来被AutoSimulations公司（现在是Brooks Automation公司的一部分）并购。他是包括工业工程师协会（IIE）在内的许多技术学会的全职会员；他连续8年作为IIE冬季仿真会议委员会的代表，其中两年担任委员会主席。他在1999年获得了INFORMS学院颁发的仿真杰出服务奖，并在2002年成为IIE的特别会员（Fellow）。

John S. Carson II Brooks Automation公司AutoMod产品部咨询技术经理。他在仿真应用领域里有超过28年的经验，包括制造、分销、仓储及物料储运、运输及快递系统、港口作业（集装箱集散站及散装处理）、卫生保健系统等。目前，他正在参与下一代仿真产品的设计及工具研发工作，以加速半导体制造、分销中心、集装箱集散站等领域的模型开发。他是一家独立仿真服务公司的合伙创始人，并管理了8年时间。他是一名独立的仿真咨询专家，并在佐治亚理工大学、佛罗里达大学以及威斯康星大学麦迪逊分校任教。

Barry L. Nelson 西北大学工业工程及管理科学系James N.和Margie M. Krebs教授，并且是工程管理计划专业的硕士生导师。他的研究方向为随机系统模型的计算机仿真实验的设计和分折，专注于多变量输入建模和输出分析以及基于仿真的优化。他发表了大量文章，并出版了两本专著。他是《Operations Research》杂志仿真领域的编辑，并担任INFORMS（后来是TIMS）仿真学会的主席。他在每年的冬季仿真会议上担任许多职务，包括1997年担任会议议程主席，目前是冬季仿真会议委员会的成员。

David M. Nicol 伊利诺伊大学厄巴纳-尚佩恩分校电气及计算机工程系教授。他在并行及分布式离散事件系统仿真领域有着丰富的经验。他的工作还包括并行算法、并行结构中的负荷映射算法、性能分析以及可靠性建模和分析。他在前沿的计算机科学期刊及会议上发表了150篇有关其研究成果的文章。他的研究很大程度上由工业界及政府遇到的问题所驱动——他和来自NASA、IBM、AT&T、Bellcore、Motorola及Los Alamos、Sandia、Oak Ridge国家实验室的科学家一起工作。他目前的研究方向是超大系统特别是通信及其他基础设施的建模与仿真，用于系统安全性评估。从1997年到2003年，他是《ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation》的主编。Nicol教授同时也是IEEE的特别会员（Fellow）。

坚持十幾已坚持半幾 代語二第

101 坚持十幾的中共 章二第

101 願回念謝時謝朱 1.2

801 坚持十幾的中共 5.2

10 願回念謝時謝朱 5.2

50 坚持十幾的中共 1.2.2

50 願回念謝時謝朱 5.2.2

10 坚持十幾的中共 5.2.2

80 坚持十幾的中共 4.2.2

目 录

译者序	3.3 小结	66
前言	参考文献	66
关于作者	习题	66
第一部分 离散事件系统仿真入门	第4章 仿真软件	68
第1章 仿真绪论	4.1 仿真软件的历史	68
1.1 仿真何时适用	4.1.1 探索阶段(1955~1960)	69
1.2 仿真何时不适用	4.1.2 出现阶段(1961~1965)	69
1.3 仿真的优缺点	4.1.3 形成阶段(1966~1970)	69
1.4 应用领域	4.1.4 发展阶段(1971~1978)	70
1.5 系统和系统环境	4.1.5 巩固和改进阶段 (1979~1986)	70
1.6 系统的成分	4.1.6 集成环境阶段(1987~现在)	70
1.7 离散系统和连续系统	4.2 仿真软件选集	70
1.8 系统的模型	4.3 一个仿真实例	73
1.9 模型的类别	4.4 用Java语言仿真	74
1.10 离散事件系统仿真	4.5 用GPSS仿真	80
1.11 仿真研究的步骤	4.6 用SSF仿真	84
参考文献	4.7 仿真软件	87
习题	4.7.1 Arena	87
第2章 仿真实例	4.7.2 AutoMod	88
2.1 排队系统的仿真	4.7.3 Extend	89
2.2 库存系统的仿真	4.7.4 Flexsim	89
2.3 其他仿真实例	4.7.5 Micro Saint	89
2.4 小结	4.7.6 ProModel	90
参考文献	4.7.7 QUEST	90
习题	4.7.8 SIMUL8	91
第3章 基本原理	4.7.9 WITNESS	92
3.1 离散事件仿真中的概念	4.8 实验和统计分析工具	92
3.1.1 事件调度/时间推进算法	4.8.1 一般特性	92
3.1.2 世界观	4.8.2 产品	92
3.1.3 采用事件调度法手工仿真	参考文献	94
3.2 表处理	习题	95
3.2.1 表:基本性质和操作	第二部分 数学模型与统计模型	
3.2.2 使用数组进行表处理	第5章 仿真中的统计模型	104
3.2.3 使用动态分配和链表	5.1 术语和概念回顾	104
3.2.4 高级技术	5.2 有用的统计模型	108

5.3 离散分布	111	7.3 产生随机数的方法	175
5.4 连续分布	114	7.3.1 线性同余法	175
5.5 泊松过程	128	7.3.2 组合线性同余发生器	178
5.5.1 泊松过程的性质	129	7.3.3 随机数流	179
5.5.2 非平稳泊松过程	130	7.4 随机数的检验	180
5.6 经验分布	131	7.4.1 频率检验	181
5.7 小结	133	7.4.2 自相关性检验	184
参考文献	133	7.5 小结	185
习题	133	参考文献	186
第6章 排队模型	138	习题	186
6.1 排队系统的特点	138	第8章 随机变量的产生	189
6.1.1 拟到达总体	139	8.1 反变换技术	189
6.1.2 系统容量	140	8.1.1 指数分布	189
6.1.3 到达过程	140	8.1.2 均匀分布	192
6.1.4 排队行为与排队规则	141	8.1.3 韦布尔分布	192
6.1.5 服务时间与服务机制	141	8.1.4 三角分布	193
6.2 排队标记	143	8.1.5 经验连续分布	194
6.3 排队系统的长时间运行性能指标	144	8.1.6 无封闭形式反函数的 连续分布	197
6.3.1 系统 L 中的时间平均数	144	8.1.7 离散分布	197
6.3.2 每个顾客在系统中花费的 平均时间 w	145	8.2 舍选技术	201
6.3.3 守恒方程: $L = \lambda w$	146	8.2.1 泊松分布	201
6.3.4 服务台利用率	147	8.2.2 非平稳泊松过程	203
6.3.5 排队问题中的费用	151	8.2.3 伽马分布	204
6.4 无限总体马尔可夫模型的稳态 行为特性	152	8.3 特殊性质	205
6.4.1 具有泊松到达及无限容量的 单服务台队列: $M/G/1$	153	8.3.1 正态分布和对数正态分布的 直接变换	205
6.4.2 多服务台队列: $M/M/c/\infty/\infty$	157	8.3.2 卷积法	207
6.4.3 具有泊松到达及有限容量的 多服务台队列: $M/M/c/N/\infty$	161	8.3.3 更多的特殊性质	207
6.5 有限总体模型($M/M/c/K/K$)的 稳态行为特性	163	8.4 小结	208
6.6 排队网络	165	参考文献	208
6.7 小结	167	习题	208
参考文献	168		
习题	168		
第三部分 随机数			
第7章 随机数的产生	174	第四部分 仿真数据分析	
7.1 随机数的性质	174	第9章 输入建模	212
7.2 伪随机数的产生	174	9.1 数据收集	212
		9.2 用数据辨识分布	214
		9.2.1 直方图	214
		9.2.2 选择分布簇	217
		9.2.3 分位点-分位点($q-q$)图	219
		9.3 参数估计	220
		9.3.1 统计学原理: 样本均值和 样本方差	220
		9.3.2 建议使用的估计量	222

9.4 拟合优良度检验	226	11.5.2 稳态仿真的误差估计	284
9.4.1 χ^2 检验	226	11.5.3 稳态仿真的重复运行方法	287
9.4.2 具有相等概率的 χ^2 检验	228	11.5.4 稳态仿真中的样本量	290
9.4.3 科尔莫戈罗夫-斯米尔诺夫 拟合优良度检验	230	11.5.5 稳态仿真中区间估计的 批均值	291
9.4.4 p 值和“最佳拟合”	231	11.5.6 分位数	293
9.5 拟合非平稳泊松过程	232	11.6 小结	294
9.6 选择无数据的输入模型	233	参考文献	294
9.7 多变量与时间序列输入模型	234	习题	295
9.7.1 协方差和相关系数	234	第12章 系统设计方案比较与 评价	300
9.7.2 多变量输入模型	235	12.1 双系统设计方案比较	300
9.7.3 时间序列输入模型	236	12.1.1 具有相等方差的独立采样	303
9.7.4 正态分布到任何分布的变换	237	12.1.2 具有不相等方差的独立 采样	303
9.8 小结	239	12.1.3 公共随机数	304
参考文献	240	12.1.4 具有规定精度的置信区间	310
习题	241	12.2 多个系统设计方案比较	311
第10章 仿真模型的检验和验证	246	12.2.1 用于多方案比较的 Bonferroni 法	311
10.1 模型的建立、检验和验证	246	12.2.2 用 Bonferroni 法选择最佳 方案	315
10.2 仿真模型的检验	247	12.2.3 用 Bonferroni 法进行筛选	317
10.3 模型的校验和验证	250	12.3 元建模	318
10.3.1 表面效度	251	12.3.1 简单线性回归	318
10.3.2 模型假设的验证	251	12.3.2 回归的显著性检验	321
10.3.3 输入-输出变换的验证	252	12.3.3 多重线性回归	323
10.3.4 输入-输出验证: 利用历史 输入数据	259	12.3.4 回归的随机数分派	324
10.3.5 输入-输出验证: 利用 图灵机检验	262	12.4 基于仿真的优化	324
10.4 小结	263	12.4.1 “基于仿真的优化”指的 是什么	325
参考文献	263	12.4.2 为什么基于仿真的优化 很困难	326
习题	264	12.4.3 鲁棒启发方法的应用	327
第11章 单一模型的输出分析	266	12.4.4 一个例证: 随机搜索	328
11.1 关于输出分析的仿真类型	266	12.5 小结	330
11.2 输出数据的随机性	268	参考文献	331
11.3 性能度量及其估计	271	习题	331
11.3.1 点估计	271	第五部分 应用	
11.3.2 置信区间估计	272	第13章 制造与物料储运系统 仿真	336
11.4 终止型仿真的输出分析	273	13.1 制造与物料储运仿真	336
11.4.1 统计学基础	274	13.1.1 制造系统的模型	337
11.4.2 具有规定精度的置信区间	276		
11.4.3 分位数	277		
11.4.4 由求和数据估计概率和 分位数	278		
11.5 稳态仿真的输出分析	279		
11.5.1 稳态仿真中的初始化偏差	280		

13.1.2 物料储运系统的模型	338	14.3 模型输入	364
13.1.3 一些常用的物料储运装置	338	14.3.1 调制泊松过程	364
13.2 目标与性能度量	339	14.3.2 虚拟内存参照	366
13.3 制造与物料储运仿真中的问题	340	14.4 高层次的计算机系统仿真	372
13.3.1 停工期和故障建模	340	14.5 CPU 仿真	374
13.3.2 跟踪驱动模型	343	14.6 内存仿真	377
13.4 制造与物料储运系统仿真的 案例研究	344	14.7 小结	380
13.5 制造实例: 一个装配生产线 的仿真	346	参考文献	380
13.5.1 系统描述和模型假设	346	习题	381
13.5.2 仿真前的分析	348	第 15 章 计算机网络仿真	383
13.5.3 仿真模型以及系统设计 的分析	349	15.1 引言	383
13.5.4 工位利用率分析	349	15.2 通信流量建模	384
13.5.5 潜在系统改进的分析	350	15.3 媒介访问控制	387
13.5.6 结束语	351	15.3.1 令牌传递协议	387
13.6 小结	351	15.3.2 以太网	389
参考文献	351	15.4 数据链路层	391
习题	352	15.5 传输控制协议	392
第 14 章 计算机系统仿真	358	15.6 模型构建	397
14.1 引言	358	15.6.1 构建	397
14.2 仿真工具	360	15.6.2 例子	398
14.2.1 面向进程仿真工具	361	15.7 小结	400
14.2.2 面向事件仿真工具	363	参考文献	401
		习题	401
		附录 A	402

第一部分

离散事件系统仿真入门

第1章 仿真绪论

仿真是对现实世界的过程或系统随时间运行的模仿。不论是通过手工完成还是通过计算机完成,仿真都包括产生一个系统的人为演变过程以及这个过程的观测结果,以便推断出实际系统的运行特性。

系统随时间演进的的行为的研究是通过开发一个仿真模型来进行的。该模型的形式通常是采用一组与运行相关的假设,这些假设用系统的实体或感兴趣的对象间的数学、逻辑及符号关系来表示。模型一旦开发出来并通过有效性验证,就可以用于解答现实世界系统各种各样的“如果……就会……”问题。系统可能的改变可以先进行仿真,以便预测其对系统性能的影响。在系统建立之前,仿真也可用于研究处于设计阶段的系统。这样,仿真模型既可以作为分析工具用于预测对已有系统进行改变所带来的影响,也可以作为设计工具预测新系统在不同环境条件下的性能。

在某些情况下,开发的模型简单到可以通过数学方法“求解”。通过使用微分学、概率论和代数方法或其他数学方法,就可以得到这样的解。解通常由一个或多个数值参数组成,这些参数被称为系统性能的量度。然而,许多现实世界系统非常复杂,以至于这些系统的模型事实上不可能通过数学求解。在这些情况下,基于计算机的数值仿真可以用于模拟系统随时间变化的行为。通过仿真,数据被收集起来,仿佛观察实际系统一样。这些通过仿真生成的数据用于估计系统性能的量度。

本书对仿真建模的一种形式——离散事件仿真建模的概念和方法进行了介绍。第1章先介绍何时使用仿真、仿真的优点和缺点,以及仿真的实际应用领域。然后,深入介绍系统及模型的概念。最后,对建立和使用系统仿真模型的步骤进行概括。

1.1 仿真何时适用

随着专用仿真语言产生,大规模计算因每次运行费用不断下降而成为可能,而仿真方法学的进步,使得仿真成为运筹学及系统分析中最广泛使用和采纳的工具。从 Naylor et al. [1966] 到 Shannon [1998],许多学者都对仿真在何种环境下使用才恰当进行了研究。仿真可被用于以下目的:

1. 仿真使得对复杂系统内部的相互作用和复杂系统的子系统内部的相互作用的研究和实验成为可能。
2. 可以仿真信息、组织及环境的变更,以观察这些改变对模型行为的影响。
3. 在仿真模型设计过程中获取的知识可能具有很大的价值,可对被研究系统的改进提出建议。
4. 改变仿真的输入并观察产生的输出,可以使我们深入了解哪些变量是最重要的,以及了解变量间是如何相互作用的。
5. 仿真可以作为教学设备来增强解析求解方法学的能力。
6. 仿真可以用于在新设计或策略实施前进行实验,以便为可能发生的事情做好准备。
7. 仿真可以用于验证解析解。
8. 对机器的不同能力进行仿真有助于确定其需求。

9. 设计用于训练的仿真模型使得学习成为可能, 无需费用及现场指导。

10. 动画显示仿真运行中的系统, 从而使计划具有可视性。

11. 现代系统(工厂、晶圆生产厂、服务组织等)非常复杂, 只能通过仿真来处理其内部的作用。

1.2 仿真何时不适用

本节基于 Banks and Gibson [1997] 的一篇文章, 他们两人给出了十条不适合仿真的规则。第一条规则是, 当问题可通过普通方法解决时, 就不应使用仿真。举个例子, 一个自动打标签设备为以 100 人/小时的速率随机抵达的客户服务, 该设备的服务速度是平均 12 人/小时。为决定最少所需的服务器数量, 并不需要用仿真。只需计算 $100/12 = 8.33$, 就表明需要 9 台或更多的服务器。

第二条规则是, 当问题可以通过解析解决时, 就不应使用仿真。例如, 在某些情况下, 上面例子中的平均等待时间可以从 Hillier and Lieberman [2002] 研究的曲线中找到。

第三条规则是, 如果直接进行实验更为简便, 则不应使用仿真。例如, 对一个可以免下车的路边快餐店, 接收订单的人员配备手持终端及语音通信设备, 为确定再增加一个订单接收站对客户等待时间的影响, 实验的开销更低一些。

第四条规则是, 如果成本超过仿真节省的开销, 则不使用仿真。完成一个仿真需要很多步骤, 正如将在 1.11 节所讨论的那样, 这些步骤必须深入地完成。如果仿真成本估计为 20 000 美元, 而仿真只节省 10 000 美元, 则建议不要将资金投入仿真系统中。

类似地, 如果需要在两周内做出决定, 而仿真需要花费一个月的时间, 则不建议进行仿真研究。

第五条和第六条规则是, 如果没有足够的资源或时间, 就不应使用仿真。例如, 如果仿真成本估计为 20 000 美元, 而只有 10 000 美元, 则不建议进行仿真。

第七条规则是, 仿真需要数据, 有时需要大量的数据。如果无数据可用, 甚至数据都无法估计, 则不建议使用仿真。第八条规则与检验和验证模型的能力有关。如果没有足够的时间或无人可用, 则仿真是适合的。

第九条规则是, 如果负责人有不合理的预期, 如果他要求过多过快, 或者如果仿真的能力被过高估计, 则仿真也是不适合的。

第十条规则是, 如果系统行为太复杂或不可定义, 则不适合使用仿真。对人类行为建模有时是极为复杂的。

1.3 仿真的优缺点

仿真对客户具有直觉的吸引力, 因为它模仿了实际系统中发生的事情或在设计阶段系统可察觉的东西。仿真的输出数据应直接对应于由实际系统可记录的输出。另外, 如果一个系统的模型可数学求解, 那么在没有不确定的假设时(例如每个随机变量具有相同的统计分布), 能够开发出该系统仿真模型。由于这样或那样的原因, 仿真经常作为解决问题的技术选择。

与最优模型相比, 仿真模型与其说是被求解, 不如说是在“运行”。给定一组特定的输入和模型特性, 然后运行模型, 观测仿真的行为。这个改变输入及模型特性的过程产生了一组被评估的场景。然后, 无论是分析已有系统, 还是设计新的系统, 一个好的解决方案被推荐实施。

仿真有很多优点, 但也有一些缺点。Pegden, Shannon, and Sadowski [1995] 列出了这些优缺点。其中一些优点是:

1. 新的策略、操作程序、决策规则、信息流、组织程序等的研究可以干扰实际系统正在

进行的操作。

2. 新的硬件设计、物理布局、运输系统等测试可在不具备获得它们的必要资源的前提下进行。

3. 关于某些现象怎样发生或为什么发生的假设可以测试其可能性。

4. 可以压缩或扩展时间来加速或减缓被研究的现象。

5. 可以获得有关变量的相互作用的深入了解。

6. 可以获得变量对系统性能的重要性的深入了解。

7. 可以进行瓶颈分析,进而发现在过程、信息、物料等工作中的哪个地方被过分延迟。

8. 仿真研究可以帮助理解系统是如何运行的,而不是一个人去思考系统如何运行。

9. 可以回答“如果……就会……”这样的问题。这在新系统设计中特别有用。

一些缺点是:

1. 建模需要特殊的培训。这是一门需要花费时间、需要累积经验来学习的艺术。而且,如果两个模型是由不同的竞争对手建立的,则它们也许有相似之处,但它们很有可能是不一致的。

2. 仿真结果可能难于解释。大多数仿真输出基本上都是随机变量(它们通常基于随机的输入),因此很难区分观察结果是与系统相关的还是随机的。

3. 仿真建模和分析非常耗时,而且成本高。对一个任务来说,建模和分析资源的紧张会导致仿真模型或分析不充分。

4. 正如在 1.2 节讨论的那样,有可能得到解析解的一些场合可以应用仿真,这种场合甚至是更适于采用仿真。对于闭式排队模型可用的一些等待队列的仿真尤其如此。

为保证仿真进行,这 4 个缺点可以分别通过下列方法克服:

1. 仿真软件的经销商主动开发包含模型的软件包,这些模型只需要输入数据便可运行,这样的模型通常标记为“仿真器”或“模板”。

2. 许多仿真软件经销商已经对其软件包开发了输出分析功能,以进行非常彻底的分析。

3. 如今,仿真执行比以前已经快了很多,而且在将来会更快,这是由于硬件的升级允许快速地运行场景,而且很多仿真软件包都具有先进的功能。例如,一些仿真软件包包含物料储运系统建模的构架,可使用诸如叉车、传送带及自动导引车等运输工具建模。

4. 闭式模型不能分析实际遇到的大多数复杂系统。两位作者的多年咨询经验表明,没有一个遇到的问题可以通过闭式解决方案来求解。

1.4 应用领域

仿真的应用领域非常广泛。冬季仿真会议(Winter Simulation Conference, WSC)是了解更多有关仿真应用及理论最新进展的一个很好途径,还有大量初级及高级水平的指南。WSC 是由六个技术学会及国家标准和技术局(NIST)赞助的。技术学会包括美国统计协会(ASA),计算机协会/仿真专门兴趣组(ACM/SIGSIM),电气与电子工程师协会:计算机学会(IEEE/CS),电气与电子工程师协会:系统、人及控制协会(IEEE/SMCS),工业工程师协会(IIE),运筹学及管理科学协会:仿真学会(INFORMS/CS)以及计算机仿真协会(SCS)组成。需要指出的是,IEEE 是由两个分会作为代表。即将召开的 WSC 的信息可以从 www.wintersim.org 上获得。WSC 的会议安排以及全部文章可以从 www.informs-cs.org/wscpapers.html 上获得。下面按照学科列出了近期的 WSC 的一些演讲:

制造应用

- 采用模拟电气系统的方法,对连续制造系统进行动态建模。

- 在仿真测试平台上对随机生产计划模型进行检验。

- 在汽车装配中减少喷涂线的颜色变化。
- 对钢缆制造中的质量及生产能力建模。
- 在生物工艺制造中的共享资源能力分析。
- 用于加工车间操作仿真的神经信息模型。

半导体制造

- 恒定时间间隔生产计划及其在制品控制的应用。
- 在面向交货期的调度规则下加速生产。
- 300mm 晶圆生产工厂自动物料储运系统的设计框架。
- 下一代剂量工具的最优设计决策。
- 在 300mm 晶圆生产工厂中群工具建模的应用。
- 在 300mm 半导体制造中批密室工具基于常驻实体的仿真。

建筑工程及项目管理

- 多任务化与合并偏差对复杂设备采购的影响。
- 排灌工程运行维护人员的无冗余概念及仿真的应用。
- 为钢铁制造建立虚拟车间模型。

军事应用

- 终止型仿真基于频率的设计：一个维和的例子。
- 支持 3 维环境中军事交互式仿真的多库框架。
- 规范计算机生成兵力的行为而无需编程。
- 逼真度和有效性：人类行为描述问题。
- 通过贸易区域开发和评估，评价技术对人的表现的影响。
- 自动后勤系统对突发产生过程的影响。
- 城区军队行动的建模和仿真的研究计划开发。

物流、供应链及分布式应用

- 一个服务器 - 计算机制造环境中的库存分析。
- AGV 系统的各种瓶颈检测方法的对比。
- 半导体供应网络仿真。
- 一个机场候机区的国际出发旅客流的分析。
- 离散仿真技术在液化天然气供应链上的应用。
- 公共建筑物内行人流的在线仿真。

运输模式及交通

- 航班延迟合并仿真。
- 通过仿真优化确定飞机跑道调度。
- 高速公路交汇及分叉性能的仿真。
- 澳大利亚红十字会急救服务建模。
- 诺福克紧急救火支持的仿真建模。
- 船舶到港建模。
- 运送汽油的游艇运输系统优化。
- 一个内陆水路游艇交通系统的迭代优化及仿真。

经营过程仿真

- 个性化定价的商店性能基于代理的建模及仿真。

- 随机经营模型的可视化。
- 电话呼叫中心的建模及仿真。
- 使用仿真近似求解服务系统的凸性性能指标的子梯度。
- 机场行李扫描中仿真的作用。
- 连续操作中人的疲劳危险仿真。
- 电信记账系统的优化。
- 对客户库进行分段以获得最大回报。

健康护理

- 流动健康护理训练的前台与病人护理建模。
- 急诊部门与医疗遥测单位间的医院操作的评估。
- 预估急诊室的最大容量。
- 减少急诊部门的等待长度。
- 医院急诊部门的 6 希格玛改进思想的仿真。
- 用于急诊室工作人员调度的基于整数线性编程规划的仿真工具。

仿真应用的一般趋势如下：目前，风险分析的仿真日益增多，包括诸如保险、期权定价以及证券分析等方面在内。另一个呈增长趋势的领域是呼叫中心分析，由于其复杂性，这种分析并不服从排队模型。由于软硬件能力的增强，可以在合理的时间内处理大量的实体，像因特网骨干网、无线网以及供应链这样的大系统的仿真也在不断增长。

最后，自动物料储运系统 (AMHS) 的仿真模型正被用做控制系统软件的开发和功能测试的实验平台。所谓“模拟” (emulation)，是指仿真模型实时连接到控制系统软件或软件模拟器上；使用它，就像使用实际的 AMHS 一样向控制系统提供相同的响应（例如，一个盒子阻塞或清洗摄像头或一条开始获取订单的命令）。在 AMHS 的安装和试运行中，软件开发可以提前很早开始，以便在尝试开通新系统或继续运行已有系统时，减少花费在调试控制软件上的时间。模型可以通过不同级别的控制系统来驱动——从高级监管系统（诸如仓库管理系统 (WMS) 或 AGV 分发系统）到低级控制系统（诸如用来控制传送带系统合并的可编程逻辑控制器 (PLC)）。

1.5 系统和系统环境

为了对系统进行建模，有必要理解系统的概念及系统的范围。系统被定义为一组连接在一起的对象，它们以某种规则的相互作用或相互依赖去达到某种目的。制造汽车的生产系统就是一个例子，机器、零部件以及工人一起在装配线上运作，以生产高质量的交通工具。

系统通常受到系统外部发生的变化的影响。这种变化被称为在系统环境 (Gordon [1978]) 中发生。在对系统进行建模的过程中，决定系统和其环境间的边界是有必要的。这种决定可能依赖于研究的目的。

举例来说，在工厂系统中，控制订单到达的因素可以被认为是处于工厂的影响之外，因此是环境的一部分。然而，如果考虑供应对需求的影响，则在工厂输出和订单到达之间将会存在一种关系，而该关系必须被认为是系统的一个活动。类似地，在银行系统中，可以有最大可支付利率的限制。对于单一银行的研究，这可被认为是环境赋予的限制；然而，在研究银行业货币法时，该限制的设定将会是系统的一种活动 (Gordon [1978])。

1.6 系统的成分

为理解和分析系统，必须定义大量术语。实体是系统中感兴趣的对象。属性是一个实体的特征。活动表示一段特定长度的时期。如果要研究银行，客户也许是实体之一，其经常账户的余额

也许是一项属性，而存款则是一项活动。

为某个研究而进行组成系统的实体的收集也许仅仅是用于另一项研究的整个系统的一个子集(Law and Kelton [2000])。例如，如果正在研究前面提到的银行，来决定所需要的用于付款和收款的出纳员的数量，则该系统可以被定义为组成日常出纳及排队等候的客户的银行的一部分。如果研究的目的扩大到决定所需特殊出纳员数量(用于为现金支付者准备支票、卖出旅行者的支票，等等)，则系统的定义必须被扩大。

系统的状态定义为变量的集合，这些变量对描述在任意时刻、相对于研究对象的系统来说是必需的。在银行的研究中，可能的状态变量为忙碌的出纳员的数量、排队等候或正接受服务的顾客的数量以及下一个客户到达的时间。事件定义为可能会改变系统状态的即时发生的事情。术语内生的(endogenous)用于描述系统内部发生的活动和事件，而术语外生的(exogenous)用于描述影响系统的环境中的活动和事件。在银行的研究中，客户到达是外生事件，而客户服务的完成是内生事件。

表1-1列出了几个系统的实体、属性、活动、事件以及状态变量的例子。这里只给出了部分系统成分的列表。除非知道研究的目的，否则无法开发出完整的列表。根据研究的目的，系统的不同方面都将受到关注，然后成分列表才能完整。

表 1-1 系统和成分的例子

系统	实体	属性	活动	事件	状态变量
银行	顾客	经常账户余额	存款	到达；离去	处于忙态的出纳员数目； 等待的顾客数目
高速铁路	乘客	出发地；目的地	旅行	到达站；到达目的地	每站等待的乘客数；正在运输的乘客数
制造	机器	速度；容量；故障率	焊接；冲压	故障停机	机器的状态(忙、闲、停机)
通信	信息	长度；目的地	传输	到达目的地	等待传输的数目
仓储	仓库	容量	出货	需求	库存水平；库存需求量

1.7 离散系统和连续系统

系统可以被划分为离散的或连续的两类。“实际上很少有系统是完全离散的或完全连续的，但对于大多数系统来说，由于某一类型的变化占据主导地位，因此会有可能将系统划分为离散的或连续的”(Law and Kelton [2000])。离散系统是指状态变量只在某个离散时间点集合上发生变化的系统。离散系统的一个例子是银行：作为状态变量的银行中的客户数量，只在当客户到达或提供给客户的服务完成时才发生改变。图1-1显示了客户数量如何在离散时间点上发生改变。

连续系统是指状态变量随时间连续改变的系統。例如，水坝后的水位。暴雨期间或暴雨后某一段时间，水流到大坝后面的湖中。为控制水流和发电，水从坝里流出；另外，蒸发也会降低水

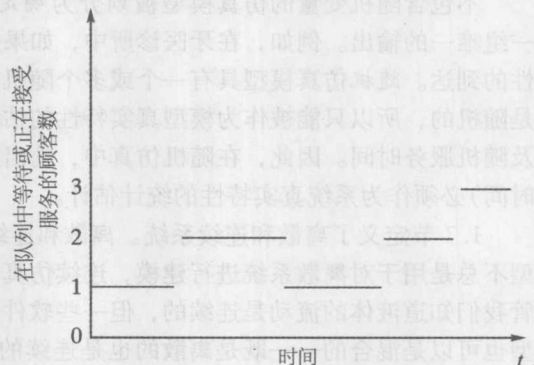


图 1-1 离散系统状态变量