

原书第5版

离散事件系统仿真

杰瑞·班克斯 (Jerry Banks)

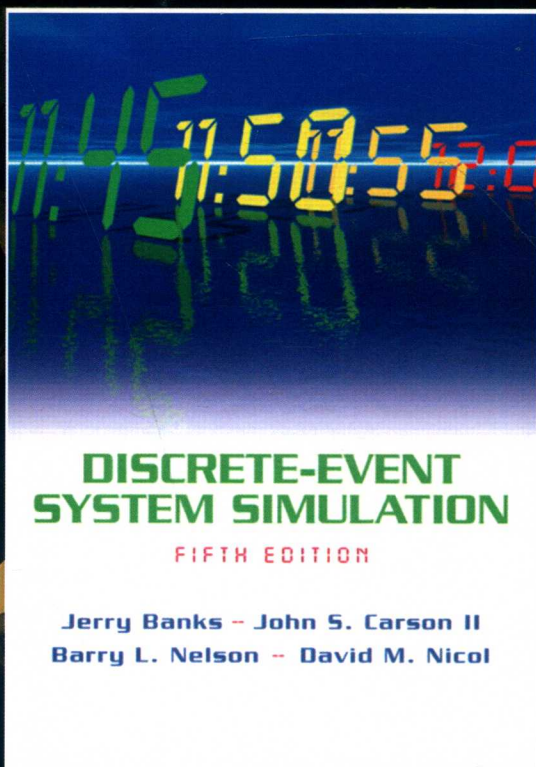
[美] 约翰·S. 卡森二世 (John S. Carson II) 著

巴里·L. 尼尔森 (Barry L. Nelson)

戴维·M. 尼科尔 (David M. Nicol)

王谦 译

Discrete-Event System Simulation
Fifth Edition



原书第5版

离散事件系统仿真

杰瑞·班克斯 (Jerry Banks)

[美] 约翰·S. 卡森二世 (John S. Carson II) 著

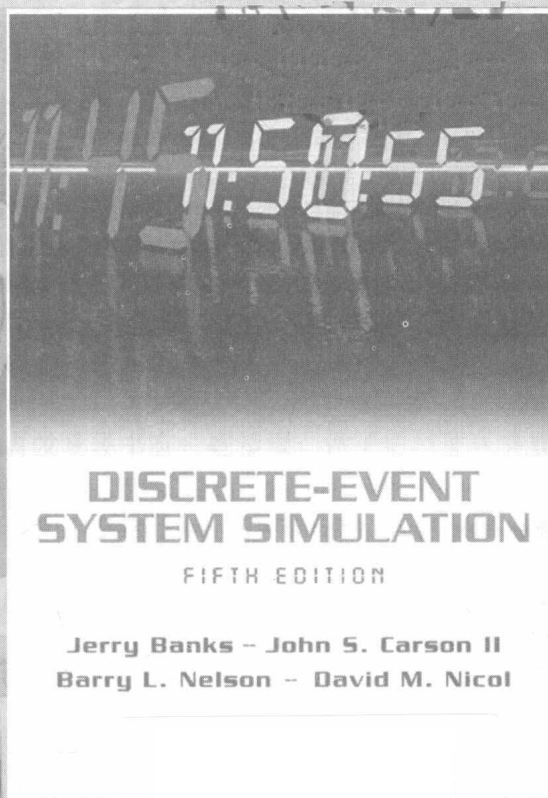
巴里·L. 尼尔森 (Barry L. Nelson)

戴维·M. 尼科尔 (David M. Nicol)

王谦 译

Discrete-Event System Simulation

Fifth Edition



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

离散事件系统仿真 (原书第 5 版)/(美) 杰瑞·班克斯 (Jerry Banks) 等著; 王谦译. —北京: 机械工业出版社, 2019.4

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

ISBN 978-7-111-61956-7

I. 离… II. ①杰… ②王… III. 离散事件系统 - 系统仿真 IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 025549 号

本书版权登记号: 图字 01-2017-0485

Authorized translation from the English language edition, entitled Discrete-Event System Simulation, Fifth Edition, ISBN: 978-0-13-606212-7 by Jerry Banks, John S. Carson II, Barry L. Nelson, David M. Nicol, published by Pearson Education, Inc, Copyright © 2010 Pearson Education.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

Chinese simplified language edition published by China Machine Press, Copyright © 2019.

本书中文简体字版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

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

本书全面论述了离散事件系统仿真的所有重要方面, 讨论了数据收集与分析、解析技术的使用、模型的验证以及适当的仿真实验设计, 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。本书共五部分, 分为 14 章。主要内容包括: 离散时间系统仿真基础知识、电子表格仿真案例、基本原理、仿真软件、仿真中的统计模型、排队模型、随机数的生成器、随机变量的生成、输入建模、仿真模型的校核和校准及验证、绝对性能的估计、相对性能的估计、生产与物料搬运系统仿真、网络化计算机系统仿真等。本书适合作为高等院校计算机、电子信息类专业的本科生、硕士生教材, 也可供相关专业人士参考使用。

出版发行: 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: 唐晓琳

责任校对: 李秋荣

印刷: 北京瑞德印刷有限公司

版次: 2019 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm×260mm 1/16

印张: 30.5

书号: ISBN 978-7-111-61956-7

定价: 139.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

Jerry Banks 教授的《Discrete-Event System Simulation》(Fifth Edition) 是国际仿真界的经典著作之一, 国际上许多知名大学将这本书作为教科书或参考书, 与 Averill Law 的《System Modeling and Analysis》一书并称国际仿真学界的两本圣经级教材, 畅销不衰, 具有很大的影响力。相比而言, Jerry Banks 的教材在学术性、体例性方面更适合日常教学使用。

作为运筹学领域的一项新技术, 系统仿真在工业工程、供应链管理等领域的应用由来已久, 历经数十年的理论发展和产业应用, 日臻成熟, 并作为与数学规划、统计学并驾齐驱的三大定量化管理技术而蓬勃发展, 目前已经广泛应用于生产、服务、金融、医疗、港口、交通、计算机通信、呼叫中心等行业。在中国, 系统仿真在管理领域的应用刚刚起步, 译者从 2009 年开始接触了很多国内企业的管理咨询项目, 这些企业涉及多个行业和领域, 其中不乏国际知名企业, 我们发现中国企业管理者对于系统仿真知之甚少, 更谈不上应用仿真技术解决实际管理问题。多年来, 感觉自己像一个布道者, 向诸多企业和企业家介绍系统仿真的应用价值和效果。同时, 我们也发现国内高水平的、面向管理决策领域的中文仿真教材实在太少了, 并且大多侧重于理论描述, 案例内容过少, 学生学习起来有难度, 也不容易掌握仿真的应用方法和应用问题, 本书则规避了这些不足, 在综合性和整体性方面表现得更好。

随着系统仿真理论不断发展和技术上不断突破, 以系统仿真为手段和工具, 可以解决越来越多的复杂问题(企业管理中的大部分问题都适合采用系统仿真方法加以研究和解决, 其中不乏 NP-Hard 问题), 尤其是与优化算法(比如遗传算法、模拟退火等)进行集成, 更是未来仿真应用的发展趋势。但是本书在这个方面着墨较少, 需要读者进行拓展阅读。

本书可以作为本科生和研究生的教材。其中, 本科生教学可使用前 8~10 章, 这部分内容主要介绍仿真基础知识和相关理论, 书中的很多案例对理论学习具有很好的支撑作用; 硕士研究生的讲授内容可侧重第 9~14 章, 主要涉及方案比较、仿真优化和仿真应用等知识。

在翻译过程中, 译者发现原书有一些错误, 做了适当更正并在相应页以脚注的形式加以说明。另外, 对于书中未深入介绍但译者认为对读者有指导性的概念也以脚注的形式给出。译稿中可能存在错误和不足之处, 恳请广大读者不吝批评、指正。

稍有遗憾的是, 作为教材, 本书并未涉及具体仿真软件的学习使用, 对于初学者会降低实践体验性, 影响学生的学习热情。译者在多年的仿真课程教学中使用 SIMIO 和 ARENA 软件, 采用理论和实践相结合的方式, 获得了不错的教学效果, 并且建立了一个仿真学习网站(www.simcourse.com), 网站涵盖了教学课件和相关资料, 以及针对 SIMIO 和 ARENA 的教学视频, 供大家免费在线学习使用。今后还将持续更新和完善, 希望与本书相结合, 解决学生实践教学中的困难和问题。

在本书翻译过程中, 得到了很多人的帮助和支持。南开大学商学院管理科学与工程系的一些学生参与部分章节的翻译工作, 在此对(排名不分先后)陈妍希、耿丽萍、赵子琪、秦源、马潇逸、于艺、赵琳等同学表示感谢! 美国西北大学的 Barry Nelson 教授(原书作

者之一)对本书的出版非常支持,并提供了必要的信息和帮助。本书在翻译过程中也得到了中国台湾“清华大学”林则孟教授、美国加州周玮民教授、中国南京大学王少尉教授,以及南开大学商学院梁峰教授的悉心指正,在此一并表示感谢!机械工业出版社华章公司的编辑朱劼老师对本书出版给予了大力支持,同时对我的拖延症也非常容忍,衷心感谢她的理解与宽容;唐晓琳编辑在后期校对、校核工作上也付出了极大的热情和耐心,在此深表谢意!机械工业出版社华章公司的张敬柱、温莉芳两位总经理和张玖龙老师对译者给予了充分的信任,在选题和立项过程中给予了大力支持,谨此致以诚挚的感谢!

在本书近两年的翻译过程中,一直得到家人的大力支持,感谢他们的无私付出和耐心陪伴!

译者

2018年12月

在本书中，我们介绍了离散事件仿真知识体系的主要内容，尤其强调使用案例介绍仿真原理及其在制造业、服务业和计算机领域的应用。与早期版本一样，第5版仍然面向高年级本科生或硕士生，为他们介绍仿真的基础知识，也适用于进阶课程或中级课程。与上一版相比，我们增加了更多的材料，并对部分章节进行了全面修订。网站 www.bcn.net 可以搭配本书使用。虽然本书不依托任何一种仿真语言，但是我们延续使用 Excel 制作案例并作为仿真支持工具，第4版就是如此。

本书第一部分包含第1~4章。第1章回答如下问题：仿真是什么？仿真的用途做什么？仿真在什么情况下才是合适的工具？仿真的优点和缺点分别有哪些？仿真包含哪些类型？如何开展仿真项目？在这一版中，我们增加了很多真实仿真案例的摘要信息。

第2章介绍如何使用 Microsoft Excel 进行仿真。该章利用抛掷硬币、使用简单离散分布模拟随机服务时间和到达时间等例子，介绍什么是随机数。从随机数定义出发，教师可以从该章后续给出的排队论、库存系统或其他类型系统案例中，选择合适的内容讲授给学生。该章所有的例子都基于公共框架构建，并且强调模型定义、使用 Excel 建模所需定义的变量、系统输入的规范化、系统输出和系统性能度量——所有这些知识点都以简单方式呈现给学生，因为第5章才会介绍统计学知识。应用 Excel 进行仿真建模（相关内容可以在本书网站上找到），有助于实现手动实验，这样可以很好地向学生展示仿真概念。此外，学生还可以通过学习相关 Excel 案例，完成该章后面的练习题。

虽然使用 Excel 有助于教师讲授仿真概念、演示统计变量的影响，尤其是分析和展示仿真结果，但是使用电子表格讲授仿真的基础知识还存在严重的缺陷。因此，第3章讨论“事件”和“流程”这两个概念的核心通用架构，“事件”和“流程”是几乎所有离散事件仿真软件的设计基础。第4章对于仿真工具的发展进行了历史回顾，并以 GPSS 和 Java 为例进行介绍。我们也介绍当前常见仿真软件的最新特性和实施能力。仿真软件发展的很快，该章给出了软件供应商的网址，以便读者可以获取最新的信息。

本书第二部分包括第5章和第6章，知识内容涉及系统仿真所用到的统计学和排队论的相关背景知识。第5章汇集本书后续会用到的所有统计学背景知识。第6章介绍排队队列的概念、几个简单的稳态排队系统模型，以及评价排队系统性能的测度指标。在这一版中，我们增加了“粗略建模”技术的介绍，“粗略建模”是在开展排队系统仿真之前实施的一个步骤。该章中的一些案例基于 MATLAB 编程。电子表格文件 QueueingTools.xls 在本书网站上可以找到，该文件用于计算该章所有排队系统案例的系统性能指标。

本书第三部分包含第7章和第8章。这部分内容旨在介绍生成仿真输入的相关概念及算法，最终目的不是为学生传授最新的方法，而是让他们能够明智而慎重地选择所用工具。电子表格文件 RandomNumberTools.xls 包含能够生成大量随机数的 VBA 代码，这部分内容在第7章中论及。第8章介绍一些生成随机变量的相关算法。

本书第四部分包括第9~12章。

第9章聚焦于如何使用数据驱动仿真过程，特别是研究如何选用统计分布代表仿真模型中的随机输入变量。在这一版中，替换了该章关键的例子，新的例子更加短小，用于描

述在输入建模过程中会出现的困难之处,尤其是可能出现的违背“独立同分布假设”的情况。该章也介绍如何在无数据可用的情况下实现输入建模。

第 10 章提出了这样一些问题:我们怎样才能知道所建模型是正确的?模型的精确度是怎样的?有哪些技术可以帮助我们评价和评估模型的准确性和正确性。

在这一版中,我们对仿真输出分析的章节进行了重新命名:第 11 章为“绝对性能评价”,第 12 章为“相对性能评价”。这代表了我们观念的变化,即关键问题不在于模拟多少个系统方案,而是彼此孤立或相互关联的系统性能指标是否值得我们去研究。我们使用时效性更强的案例替换了这两章的全部原有案例。电子表格文件 SimulationTools.xls 内含多种统计分析方法,全部功能操作可以使用菜单点选完成,并可在本书配套网站上获得。此外,在这一版中,第 12 章关于元建模的内容,特别强调了仿真实验过程的相关问题,而不像一般教材中讨论回归分析问题。

本书第五部分也是最后一部分,包含生产与物料搬运系统仿真,以及网络化计算机系统仿真两部分内容。

第 13 章分析生产与物料搬运系统性能测度的一些问题,也包括一个小型车间系统仿真的扩展案例及其分析。

第 14 章由第 4 版中第 14 章和第 15 章合并而成,但是删除了 CPU 和内存的仿真内容,增加了关于无线网络系统仿真的新内容。特别地,我们介绍描述用户移动性的一般模型,介绍无线电信号广播模型的复杂性和难度范围。本书配套网站包含了该章所使用的仿真案例,也提供了包含更多支持材料的链接地址。

本书在以下两种课程中可以作为教材使用:

针对工程学、计算机科学或管理学专业的学生开设的介绍性仿真课程(如果不使用仿真工具辅助教学,可以包括第 1~9 章全部以及第 10~12 章的部分内容;如果教学过程中使用仿真软件作为配套工具,那么可以不讲授第 4 章的内容,并依据需要适当增加第 13~14 章的内容)。

进阶课程或中级课程(包含第 10~12 章的所有内容,使用配套仿真软件作为教学工具时,适当选取第 13 章或第 14 章的内容)。

我们由衷地感谢通用汽车公司研发部允许我们使用本书第三位作者为该公司开发的软件工具作为 SimulationTools.xls 的主要内容,同时也非常感谢 Feng Yang 和 Jun Xu 为本书所使用的程序代码做的修改工作。Ira Gerhardt 应用 MATLAB 语言对以前版本中使用 Maple 语言开发的例子进行了重新编写,在此一并致谢。

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

第1章增加了很多真实案例的摘要信息。

第2章以三个简单的电子表格仿真案例为开端，覆盖了仿真的基本知识——如何获得随机数，如何从某个简单离散分布中获取随机变量的值，以及诸如活动、系统状态等几个关键概念，教师可以从随后给出的9个例子(抛掷硬币、排队论、库存策略、可靠性以及项目活动网络等)中任选几个，用于介绍仿真建模的基本概念以及如何使用仿真模型开展仿真实验。

第4章更新了仿真软件的相关材料。

第6章增加了关于在排队系统仿真之前应做的“粗略建模”工作的案例研究，并使用MATLAB替换了Maple程序代码。电子表格文件QueueingTools.xls实现了对排队系统性能指标的计算过程，该文件可以在本书配套网站上找到。

第7章和第8章新增了一个电子表格文件RandomNumberTools.xls，其中包含使用VBA开发的长周期随机数发生器和随机变量生成器，可用于第8章所涉及的所有统计分布。

第9章使用多个简单例子更换了以前版本所用的核心案例，新案例介绍了输入建模过程中可能出现的难点。案例原有的Maple程序代码也使用MATLAB代码进行替换。

第11章和第12章分别重新命名为“绝对性能评价”和“相对性能评价”。这两章的部分案例进行了更新，还包含一个电子表格文件SimulationTools.xls(同样可以在本书配套网站上找到)，这两章所涉及的统计学方法在该电子表格文件中都可以找到具体的实现方式。第12章关于元模型的内容，在本书中更强调仿真实验中会出现的问题，而不像一般教科书中常会提及的回归分析方法。

第14章包含对计算机系统和网络系统的仿真分析，更新了关于无线网络系统仿真的材料。我们介绍了如何对用户 in 无线网域的移动过程建模，也特别介绍了使用随机路点模型可能出现的问题。我们也介绍了对无线电信号广播过程进行建模的方法(以便读者了解什么时候广播信息才能被实际接收)，并指出其复杂性：从最简单的自由传输模型，到需要强大算力支撑的射线追踪模型。

Jerry Banks 教授于 1999 年从佐治亚理工学院工业工程与系统工程学院退休,其后他在 Brooks 自动化公司担任高级仿真技术顾问;本书发表之际,他还是墨西哥蒙特雷科技大学的教授。他以第一作者、联合作者、编著者或合作编著者的身份,承担或参与了 12 本书、一套文献汇编、多本教材的编写工作,并发表了大量的科技论文。他也是 John Wiley 公司于 1998 年发行的《仿真手册》的编者,该书获得了美国出版商协会专业学术出版部颁发的“杰出工程手册奖”。他还是以下几本书的作者或联合作者:《AutoMod 入门指南(第 2 版)》《SIMAN V 和 CINEMA V 语言介绍》《GPSS/H 入门指南(第 2 版)》《技术预测与管理(第 2 版)》以及《质量控制原理》。他是从事仿真咨询业务的 Carson/Banks 联合公司的共同创始人,其后该公司被 AutoSimulations 公司收购。他还是很多技术学会的正式会员,其中包括工业工程学会(IIE),并作为该学会在冬季仿真大会委员会中的机构代表服务了八年时间,期间担任了两年的冬季仿真大会委员会主席一职。他是 1999 年 INFORMS 学院所颁发的“仿真杰出服务奖”的获得者,并于 2002 年获得 IIE 会士称号。

John S. Carson II 是一名独立的仿真顾问。早期在仿真服务机构和软件行业中从事管理和咨询工作,包括曾经供职于 AutoSimulations 公司和 Brooks 自动化公司的 AutoMod 工作组。他是提供仿真服务的 Carson/Banks 联合公司的共同创始人和总裁,在多个仿真应用领域有超过 30 年的实践经验,涉及的领域包括制造业、分销、仓储和物流、订单履行系统、邮政系统、交通与捷运系统、港口运营(集装箱码头和大宗散货装卸),以及医疗系统。他还在佐治亚理工学院和佛罗里达大学讲授仿真和运筹学等课程。

Barry L. Nelson 是美国西北大学工业工程与管理科学系 Charles Deering McCormick 讲席教授、系主任。他的研究主要涉及随机系统模型的计算机仿真实验的设计与分析,特别是多元输入建模和输出分析、仿真优化和元建模。所涉及的应用领域包括金融工程、计算机性能建模、质量控制、制造和运输系统。他是《Naval Research Logistics》杂志主编、INFORMS 会士、《Operations Research》杂志仿真领域的编辑、INFORMS(后来的 TIMS)学院仿真分部主席,以及冬季仿真大会执行委员会主席。

David M. Nicol 是伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校电子与计算机工程学教授,长期耕耘在并行与分布式离散系统仿真领域,并做出了巨大的贡献,他的博士论文是该领域早期为数不多的几篇论文之一。他也曾投身于并行算法、并行架构下工作负荷映射算法、系统仿真性能分析以及可靠性建模及分析等研究。他的研究贡献包括 180 多篇论文,这些成果均发表于计算机科学杂志和会议论文集。他的研究工作很大程度上基于产业界和政府所面临的问题,他曾与来自美国国家航空航天局、IBM、美国电话电报公司、贝尔通信研究所、摩托罗拉公司、洛斯阿拉莫斯国家实验室、桑地亚国家实验室以及橡树岭国家实验室的学者们紧密合作,同时也是多个航天公司和通信公司的成员。他的近期研究关注超大规模系统的建模与仿真问题,尤其是通信系统和其他电信基础设施的系统安全评估问题。1997~2003 年,他曾任《ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation》杂志的主编。Nicol 教授是 IEEE 会士、ACM 会士,以及 ACM SIGSIM 杰出贡献奖的首位获得者。

译者序	
前言	
新版内容调整	
关于作者	

第一部分 离散事件系统仿真概述

第1章 仿真初识	2
1.1 何时适用仿真	2
1.2 何时不适用仿真	3
1.3 仿真的优势与劣势	3
1.4 应用领域	4
1.5 近年来的应用	7
1.6 系统与系统环境	8
1.7 系统要素	9
1.8 离散系统与连续系统	9
1.9 系统模型	10
1.10 模型的种类	10
1.11 离散事件系统仿真	11
1.12 仿真研究的步骤	11
参考文献	15
练习题	16
第2章 电子表格仿真案例	17
2.1 电子表格仿真基础	17
2.1.1 如何模拟随机性	18
2.1.2 案例中的随机数生成器	19
2.1.3 如何使用电子表格	20
2.1.4 如何进行硬币投掷仿真	21
2.1.5 如何模拟随机服务时间	22
2.1.6 如何模拟顾客随机到达时间	24
2.1.7 电子数据表格的仿真框架	25
2.2 硬币投掷游戏	27

2.3 使用电子表格进行排队系统仿真	29
2.3.1 排队模型	29
2.3.2 单服务台排队系统仿真	32
2.3.3 双服务台排队系统仿真	37
2.4 使用电子表格进行库存系统仿真	40
2.4.1 报刊经销商问题仿真	42
2.4.2 (M, N)库存策略仿真	45
2.5 其他仿真案例	47
2.5.1 可靠性问题仿真	47
2.5.2 飞机轰炸仿真	50
2.5.3 订货提前期需求的分布估计	52
2.5.4 活动网络仿真	54
2.6 小结	56
参考文献	57
练习题	57

第3章 基本原理	65
3.1 离散事件仿真的相关概念	65
3.1.1 事件调度/时间推进算法	68
3.1.2 全局视角	71
3.1.3 采用事件调度法进行手工仿真	73
3.2 列表处理	81
3.2.1 列表的基本属性和操作	81
3.2.2 使用数组处理列表	82
3.2.3 使用动态分配链表	84
3.2.4 先进仿真技术	86
3.3 小结	86
参考文献	86
练习题	86

第4章 仿真软件	88
4.1 仿真软件历史	88

4.1.1 探索期(1955~1960)	89	5.2.4 有限数据	137
4.1.2 诞生期(1961~1965)	89	5.2.5 其他分布	138
4.1.3 初始期(1966~1970)	90	5.3 离散分布	138
4.1.4 发展期(1971~1978)	90	5.3.1 伯努利试验和伯努利 分布	138
4.1.5 增强期(1979~1986)	90	5.3.2 二项分布	138
4.1.6 集成期(1987~2008)	91	5.3.3 几何分布与负二项分布	139
4.1.7 远期(2009~2011)	91	5.3.4 泊松分布	140
4.2 仿真软件的选择	92	5.4 连续分布	142
4.3 一个仿真案例	94	5.4.1 均匀分布	142
4.4 使用 Java 进行仿真	95	5.4.2 指数分布	143
4.5 使用 GPSS 语言进行仿真	103	5.4.3 伽马分布	145
4.6 使用 SSF 进行仿真	108	5.4.4 爱尔朗分布	146
4.7 仿真环境	110	5.4.5 正态分布	148
4.7.1 AnyLogic	111	5.4.6 韦布尔分布	151
4.7.2 Arena	111	5.4.7 三角分布	153
4.7.3 AutoMod	112	5.4.8 对数正态分布	154
4.7.4 Enterprise Dynamics	113	5.4.9 贝塔分布	155
4.7.5 ExtendSim	113	5.5 泊松分布	155
4.7.6 Flexsim	114	5.5.1 泊松分布的性质	157
4.7.7 ProModel	115	5.5.2 非平稳泊松过程	157
4.7.8 SIMUL8	115	5.6 经验分布	158
4.8 实验和统计分析工具	116	5.7 小结	160
4.8.1 共同特性	116	参考资料	161
4.8.2 产品	116	练习题	161
参考文献	118		
练习题	119		

第二部分 数学模型和统计模型

第5章 仿真中的统计模型

5.1 术语和概念回顾	130
5.1.1 离散型随机变量	130
5.1.2 连续型随机变量	131
5.1.3 累积分布函数	132
5.1.4 数学期望	133
5.1.5 众数	135
5.2 一些有用的统计模型	135
5.2.1 排队系统	135
5.2.2 库存和供应链系统	137
5.2.3 可靠性和可维护性	137

第6章 排队模型

6.1 排队系统的特点	167
6.1.1 顾客总体	168
6.1.2 系统容量	168
6.1.3 到达过程	169
6.1.4 排队行为和排队规则	170
6.1.5 服务时间和服务规则	170
6.2 排队论中的符号	172
6.3 排队系统长期性能度量指标	172
6.3.1 按时间衡量的系统中顾客 平均数 L	172
6.3.2 顾客在系统中的平均逗留 时间 w	174
6.3.3 守恒公式: $L = \lambda w$	175

6.3.4 服务台利用率	176
6.3.5 排队系统的成本问题	180
6.4 无限总体马尔可夫模型的稳态 行为	181
6.4.1 符合泊松到达且具有无限 容量的单服务台排队系统: $M/G/1$	182
6.4.2 多服务台排队系统: $M/M/c/\infty/\infty$	185
6.4.3 具有泊松到达、有限容量 的多服务台排队系统: $M/M/c/N/\infty$	188
6.5 有限顾客源模型的稳态表现 ($M/M/c/K/K$)	189
6.6 排队网络	192
6.7 粗略建模: 简单描述	193
6.8 小结	195
参考文献	196
练习题	196

第三部分 随机数

第7章 随机数的生成	202
7.1 随机数的性质	202
7.2 伪随机数的产生	202
7.3 随机数生成技术	203
7.3.1 线性同余法	203
7.3.2 组合线性同余生成器	206
7.3.3 随机数流	208
7.4 随机数检验	208
7.4.1 频度检验	210
7.4.2 自相关检验	212
7.5 小结	214
参考文献	215
练习题	215

第8章 随机变量的生成

8.1 逆变换法	218
8.1.1 指数分布	219
8.1.2 均匀分布	221
8.1.3 韦布尔分布	222

8.1.4 三角分布	222
8.1.5 经验型连续分布	223
8.1.6 不存在闭式反函数的连续型 分布	226
8.1.7 离散分布	227
8.2 舍选法	230
8.2.1 泊松分布	231
8.2.2 非平稳泊松过程	233
8.2.3 伽马分布	234
8.3 特征法	235
8.3.1 正态分布和对数正态分布的 直接变换	235
8.3.2 卷积法	236
8.3.3 其他特征法	237
8.4 小结	237
参考文献	237
练习题	238

第四部分 仿真数据分析

第9章 输入建模	242
9.1 数据采集	242
9.2 透过数据识别分布	246
9.2.1 直方图	246
9.2.2 选择分布族	249
9.2.3 Q-Q图	250
9.3 参数估计	252
9.3.1 基准统计量: 样本均值和 样本方差	252
9.3.2 建议采用的估计量	254
9.4 拟合优度检验	259
9.4.1 卡方检验	259
9.4.2 等概率区间卡方检验	261
9.4.3 K-S拟合优度检验	263
9.4.4 p 值和“最佳拟合”	264
9.5 拟合非平稳泊松过程	265
9.6 不依赖数据选择输入模型	266
9.7 多元输入模型及时间序列输入 模型	267
9.7.1 协方差和相关系数	268

9.7.2 多元输入模型	269	11.5.3 稳态仿真的重复仿 真法	323
9.7.3 时间序列输入模型	270	11.5.4 稳态仿真的样本容量	325
9.7.4 由正态分布转换为任意 分布	271	11.5.5 稳态仿真的组均值法	327
9.8 小结	273	11.5.6 稳态分位数	329
参考文献	274	11.6 小结	330
练习题	275	参考文献	331
第 10 章 仿真模型的校核、校准与 验证	281	练习题	331
10.1 模型的构建、校核与验证	282	第 12 章 相对性能评价	338
10.2 仿真模型的校核	282	12.1 两个系统方案的比较	338
10.3 模型的校准和验证	286	12.1.1 独立抽样法	341
10.3.1 表面效度	287	12.1.2 公共随机数法	341
10.3.2 模型假设的验证	287	12.1.3 满足特定精度的置信 区间	346
10.3.3 输入-输出转换验证	288	12.2 多个系统方案的比较	346
10.3.4 输入-输出验证: 使用历史 输入数据	295	12.2.1 用于多重比较的 Bonferroni 法	347
10.3.5 输入-输出验证: 使用图灵 测试	298	12.2.2 最优方案择选	349
10.4 小结	299	12.3 元建模技术	353
参考文献	299	12.3.1 简单线性回归	353
练习题	301	12.3.2 元建模与计算机仿真	357
第 11 章 绝对性能评价	303	12.4 仿真优化	359
11.1 依据输出分析划分的仿真 类型	303	12.4.1 仿真优化的含义	360
11.2 输出数据的随机特性	305	12.4.2 仿真优化的困难	361
11.3 绝对性能指标及其估计	307	12.4.3 使用稳健启发式算法	362
11.3.1 点估计	307	12.4.4 描述: 随机搜索	364
11.3.2 置信区间估计	309	12.5 小结	366
11.4 终态仿真输出分析	310	参考文献	366
11.4.1 统计背景	310	练习题	367
11.4.2 特定精度下的置信 区间	313	第五部分 应用	
11.4.3 分位数	314	第 13 章 生产与物料搬运系统 仿真	374
11.4.4 通过摘要数据估计概率和 分位数	316	13.1 生产与物料搬运仿真	374
11.5 稳态仿真的输出分析	316	13.1.1 生产系统模型	375
11.5.1 稳态仿真的初始偏差	317	13.1.2 物料搬运系统模型	376
11.5.2 稳态仿真的误差估计	320	13.1.3 一些常见的物料搬运 设备	377
		13.2 仿真目标和性能测度	378

13.3 生产与物料搬运系统仿真的 相关问题	379	14.2.2 面向事件的方法	405
13.3.1 对宕机和故障建模	379	14.3 模型输入	406
13.3.2 轨迹还原模型	382	14.3.1 调制泊松过程(MPP)	407
13.4 生产与物料搬运系统仿真的 案例研究	384	14.3.2 泊松-帕累托过程	409
13.5 生产案例: 组装生产线 仿真	386	14.3.3 帕累托-长度相位时间 ...	411
13.5.1 系统描述和模型假设	386	14.3.4 万维网流量	413
13.5.2 预仿真分析	388	14.4 面向无线系统的移动模型	413
13.5.3 仿真模型与设计系统 分析	389	14.5 OSI 堆栈模型	415
13.5.4 站点利用率分析	389	14.6 无线系统的物理层	417
13.5.5 潜在系统改进方案 分析	390	14.6.1 传播模型	417
13.5.6 gizmo 装配线仿真总结 ...	391	14.6.2 确定接收器	421
13.6 小结	391	14.7 媒体访问控制	423
参考文献	392	14.7.1 令牌传输协议	423
练习题	392	14.7.2 以太网	426
第 14 章 网络化计算机系统 仿真	400	14.8 数据链路层	428
14.1 引言	400	14.9 TCP 协议	429
14.2 仿真工具	402	14.10 模型结构	435
14.2.1 面向进程的方法	403	14.10.1 结构	435
		14.10.2 DML 案例	436
		14.11 小结	439
		参考文献	439
		练习题	440
		附录 A	442
		索引	455

离散事件系统仿真概述

- 第 1 章 仿真初识
- 第 2 章 电子表格仿真案例
- 第 3 章 基本原理
- 第 4 章 仿真软件

仿真初识

所谓**仿真**，就是按照时间进度模拟现实世界中各种处理过程或系统过程的操作。无论采用手工操作还是计算机处理，仿真都是通过人类智慧活动对系统进行研究，并基于这种研究活动的观测结果，对实际系统进行合理分析和推断，以了解其特性。

对于一个行为随时间而变化的系统，可以使用**仿真模型**来研究它。该仿真模型往往需要对所研究系统进行一系列假设。这种假设会以数学的、逻辑的、符号关联的形式实现，涉及系统中的各类**实体**和研究对象。仿真模型一旦开发和验证完毕，即可用于研究现实系统所面临的各种 what-if 问题。在仿真过程中，通过考察系统元素的各种可能变化，可以预测其对系统整体性能的影响。应用仿真研究某个系统，不必等到该系统建成之后，而是在系统设计阶段就可以进行。综上所述，仿真模型既可以作为分析工具对现有系统进行基于因素变化的系统效果预测，也可以作为设计工具检验新系统在各种潜在环境下的运行性能。

某些实际案例可对应的模型非常简单，可以使用数学方法求解。这些**解**(solution)可以使用微积分、概率论、代数或其他数学技法获得。此类解通常包括一个或多个数值型参数，这些参数被称为**系统性能指标**(measures of performance of the system)。然而，很多现实系统过于复杂，以至于无法使用数学方法求解。这种情况下，可以使用基于数值求解和计算机技术的仿真方法，用于模拟随时间变化的系统行为。通过仿真获得的输出数据，可视为现实系统的观测抽样。这些仿真生成的数据被用于评价系统性能。

本书只针对一类仿真建模(即离散事件仿真建模)进行概念和方法的介绍。第1章首先讨论何时适用仿真、仿真的优势和劣势，以及仿真应用的范围。然后介绍系统和模型的相关概念。最后给出建立和应用系统仿真模型的步骤。

1.1 何时适用仿真

专用仿真语言的出现、基于低成本完成大规模计算的能力，以及仿真所具有的优势，这些因素使得系统仿真跻身于广泛使用和可接受的运筹学和系统分析工具之列。包括 Naylor[1966]和 Shannon[1998]在内的很多学者都讨论过仿真在何种情况下可以作为合适的工具加以使用。他们普遍认为，仿真可用于如下目标：

- 1) 仿真技术使得研究复杂系统或其子系统之间的内部互动关系成为可能。
- 2) 可对影响系统的信息变化、组织变化和环境变化进行模拟，进而观测这些变化对模型行为的影响。
- 3) 仿真模型设计过程中所获得的相关知识，对于研究系统改进具有重要价值。
- 4) 通过调整仿真输入，就可以观测对应输出的变化情况，从而有助于我们了解哪一个输入是关键变量，以及变量之间是如何相互影响的。
- 5) 仿真可以作为教学工具来弥补解析法的不足。
- 6) 仿真可在新方案或新策略实施之前，对其进行实验，以便对可能发生的情况做出预判。

- 7) 仿真可用于验证解析解。
- 8) 可通过模拟设备的不同能力, 确定设备所需数量。
- 9) 以训练为目的而设计的仿真模型使得离线学习成为可能, 这既不会对正常运作的系统造成影响, 也不会因此而增加成本。
- 10) 仿真动画可以展示系统的运行过程, 从而使方案可视化。
- 11) 现代系统(工厂、晶圆制造厂、服务组织, 等等)是如此复杂, 以至于其内部交互过程只能通过仿真进行研究。

1.2 何时不适用仿真

Banks 和 Gibson[1997]的文章给出了不适用仿真的十条法则。

法则一: 当能够借助常识(common sense)解决系统问题时, 就不应该使用仿真。例如, 某机构提供自动发号机供顾客使用, 如果每小时到达 100 名顾客, 一台发号机平均每小时可服务 12 名顾客。确定所需发号机的最低数量, 就不必使用仿真。通过计算($100/12=8.33$)即可知道至少需要 9 台设备。

4

法则二: 如果能够使用解析方法求解, 就不必借助仿真。例如, 某种条件下, 上例中顾客在队列中的平均排队时间可以使用本书第 6 章介绍的工具求解(该工具可在 www.bcnn.net 网站找到)。

法则三: 如果仿真成本高于直接实验的成本, 就不要使用仿真。例如, 在免下车(drive-in)快餐店, 决定到底是采用手持终端和语音通信设备供顾客订餐, 还是增加额外的订餐台, 是以缩短顾客的等待时间, 由此产生的直接实验费用并不高昂, 因而无须使用仿真。

法则四: 如果仿真成本超过所节省的费用, 则不要使用仿真。完整的仿真过程有很多步骤且必须完全执行(将在 1.12 节中介绍)。如果一项仿真研究的投入为 2 万美元, 而由此只能节省 1 万美元, 那么就不需要仿真了。

法则五和法则六: 如果资源或者时间不充裕, 不要应用仿真。如果仿真投入需要 2 万美元而目前只有 1 万美元, 建议不要进行仿真。与此类似, 如果决策需要在两周内完成, 而应用仿真需要一个月才能给出结论, 那么也不建议使用。

法则七: 仿真过程需要使用数据, 有时是大量的数据。如果没有数据可用, 甚至连估计的数据都没有, 则不建议使用。

法则八: 该法则关心模型校核(verify)和验证(validate)能力的问题。如果可用于校核和验证的时间或人力不足, 则不宜采用仿真。

法则九: 如果管理者有不切实际的期望, 比如他们要求太多, 但预留的时间很少, 或者仿真的作用被高估, 则不建议使用仿真。

法则十: 如果系统行为过于复杂或者无法进行定义, 则不建议使用仿真。人的行为有时对于建模而言过于复杂。

1.3 仿真的优势与劣势

直观上, 仿真能够迎合用户, 因为它模仿实际系统可能出现的情况, 或者帮助认知一个尚在设计阶段的系统。仿真输出数据是对实际系统输出的直接写照。此外, 不依赖于牵强的假设(比如假设不同随机变量遵从同一个统计分布)而建立一个系统的仿真模型是可能的, 而这些假设多用于解析模型之中。由于这样或那样的原因, 仿真成为问题求解的常用技术。