

仿真建模与分析

(原书第5版)

[美] 埃弗里尔 M. 劳 (Averill M. Law) 著

范文慧 肖田元 等译

*Simulation Modeling
and Analysis
Fifth Edition*

SIMULATION
MODELING
AND
ANALYSIS

Averill M. Law



机械工业出版社
China Machine Press

仿真建模与分析

(原书第5版)

[美] 埃弗里尔 M. 劳 (Averill M. Law) 著

范文慧 肖田元 等译

*Simulation Modeling
and Analysis
Fifth Edition*

SIMULATION
MODELING
ANALYSIS

Averill M. Law



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

仿真建模与分析 (原书第 5 版) / (美) 埃弗里尔 M. 劳 (Averill M. Law) 著; 范文慧等译.
—北京: 机械工业出版社, 2016.12

(国外工业控制与智能制造丛书)

书名原文: Simulation Modeling and Analysis, 5E

ISBN 978-7-111-55746-3

I. 仿… II. ①埃… ②范… III. ①离散事件系统—系统仿真 ②离散事件系统—系统建模
IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 311243 号

本书版权登记号: 图字: 01-2014-7263

Averill M. Law: Simulation Modeling and Analysis, 5E (978-0-07-340132-4).

Copyright © 2015 by McGraw-Hill Education.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and China Machine Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2017 by McGraw-Hill Education and China Machine Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可, 对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播, 包括但不限于复印、录制、录音, 或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和机械工业出版社合作出版。此版本经授权仅限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)销售。

版权 © 2017 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与机械工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

本书对离散事件系统仿真的重要方面进行了阐述, 主要内容包括仿真建模入门、复杂系统建模、仿真软件、基础概率知识、仿真模型的建立、输入概率分布的选择、随机数发生器、随机变数的产生、单系统输出数据的分析、不同系统配置的比较、方差的缩减、实验设计与优化, 以及基于 Agent 的仿真和系统动力学等。本书适合作为工程、计算机科学等相关专业的仿真课程教材, 也可以供相关专业人士使用。

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: 王颖 谢晓芳

责任校对: 董纪丽

印刷: 中国电影出版社印刷厂

版次: 2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm×260mm 1/16

印张: 32

书号: ISBN 978-7-111-55746-3

定价: 119.00 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: hzjsj@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

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出 Alan V. Oppenheim Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Hassan K. Khalil、Gene F. Franklin、Rex Miller 等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气技术丛书”和“国外工业控制与智能制造丛书”为系列出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzjsj@hzbook.com

联系电话：(010)88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

译者序

埃弗里尔 M. 劳的《Simulation Modeling and Analysis》从 1982 年的第 1 版问世以来，不断修订发行，1991 年的第 2 版、2000 年的第 3 版、2007 年的第 4 版相继出版，2015 年修订与发行了第 5 版。本书的每一版都在前一版的基础上结合建模与仿真技术的发展不断地进行扩充与完善，是许多美国大学相关课程教学的主要参考书之一，也是进入该领域的研究人员的自学教材之一。

如前言所述，本书第 5 版的目标和前 4 版仍然一致：提供仿真研究的所有重要方面综合的与最新的进展，包括建模、仿真软件、模型校验和确认、输入建模、随机数发生器、随机变量和过程的产生、统计设计和仿真实验的分析，以及强调像制造这样最重要的应用领域。本书力图促进读者直观理解仿真与建模，并以技术上正确但更清晰的方式来阐述它们。全书有许多例子和习题，并有广泛的仿真参考文献和著作供读者进一步研究。

本书着眼于离散事件系统建模与仿真的原理、方法学的阐述，从概念出发，由浅入深，结合实际例子加以阐述与讨论，而不依赖于某一种商业化软件，因此适于作为专业课程的教材使用。对用本书作为教材的教师来说，可以从网址 www.mhhe.com/law 下载各种技术支持资料^①，包括习题答案的全集、仿真模型和随机数发生器的相关代码。

机械工业出版社华章分社王颖编审根据本书在国内外的影响，决定引进第 5 版，并委托我们完成本书的翻译工作。参与本书翻译的人员是清华大学自动化系的部分教师与研究生，他们是范文慧、肖田元、王丽萍、徐炜达、部震霄、马成、李犁、孙宏波、刘雁兵等，全书由范文慧校核，最后由范文慧审定。限于译者的水平，书中的文字表达可能有不尽完善和不当之处，敬请读者批评指正。

译者

① 关于本书教辅资源，用书教师可向麦格劳·希尔教育出版公司北京代表处申请，电话：8008101936/010-62790299-108，电子邮件：instructorchina@mcgraw-hill.com。——编辑注

作者简介

埃弗里尔 M. 劳是 Averill M. Law & Associates 公司(亚利桑那州图森市)总裁, 该公司专门从事仿真培训、咨询并提供软件。他以前是亚利桑那大学决策科学专业教授和威斯康星大学工业工程专业副教授。他在加州大学伯克利分校获得工业工程与运筹学硕士和博士学位, 在加州大学长滩分校获得数学硕士学位, 在宾夕法尼亚州立大学获得数学学士学位。

劳博士在 19 个国家讲过超过 525 个“仿真与统计”短期课程, 包括许多内部讲座, 如美铝(ALCOA)公司、AT&T 公司、波音公司、卡特彼勒公司、可口可乐公司、CSX 公司、加拿大国防研究与开发组织、通用电气公司、通用汽车公司、IBM 公司、Intel 公司、洛克西德·马丁公司、洛斯·阿尔莫斯国家实验室、美国导弹防御局、摩托罗拉公司、NASA、美国国家安全局、北大西洋公约组织(NATO)、诺斯罗普·格鲁门(Northrop Grumman)公司、挪威国防研究基础设施部、南非萨索尔公司、3M 公司、时代华纳公司、UPS 公司、美国空军部、美国陆军部、驻韩美军部、美国海军部、威瑞森公司、惠而浦(Whirlpool)公司, 以及施乐公司。劳博士一直是许多机构的仿真顾问, 例如埃森哲(Accenture)公司、波音公司、博思艾伦(BoozAllen & Hamilton)公司、康菲石油(ConocoPhillips)公司、美国国防建模与仿真办公室、惠普(Hewlett-Packard)公司、凯撒铝业(Kaiser Aluminum)公司、金伯利·克拉克(Kimberly-Clark)公司、M&M/Mars 公司、美国科学应用国际公司(SAIC)、桑迪亚国家实验室(Sandia National Labs)、瑞典国防材料管理部(Swedish Defense Materiel Administration)、3M 公司、Tropicana 公司、美国空军部、美国陆军部、美国潜艇公司、美国海军部、美国退伍军人管理局(Veteran's Administration), 以及施乐公司。

他是 ExpertFit 分布拟合软件的开发者, 该软件自动进行仿真输入概率分布选择。ExpertFit 在全世界多于 2000 个单位得到使用。他还开发了《Simulation of Manufacturing Systems》(制造系统仿真)与《How to Conduct a Successful Simulation Study》(怎样进行成功的仿真研究)的录像带。

2009 年, 劳博士获得 INFORMS 仿真学会终身成就奖, 撰写了三本书, 发表了大量文章, 涉及领域包括仿真、运筹学、统计学、制造和通信网络。他的文章“仿真输出数据的统计分析”(Statistical Analysis of Simulation Output Data)曾经是仿真领域《Operations Research》期刊上的第一篇特邀文章。他关于制造系统仿真的系列论文获 1988 年工业工程最佳论文奖。在其学术生涯期间, 美国海军研究办公室支持其仿真研究连续达 8 年之久。他曾任 INFORMS 仿真学院院长。在 1990 年和 1991 年间, 他为《Industrial Engineering》杂志撰写过关于仿真的专栏, 也在国际仿真会议上做过大会主题发言。

符 号 表

符号或缩写	符号或缩写	符号或缩写	符号或缩写
A_i	FITA	$M/G/1$	SFD
ABS	$f(x)$	$M/M/1$	Skart
AR, ARMA	$F(x)$	$M/M/2$	(s, S)
ARTA	$f(x, y)$	$M/M/s$	S_i
ASAP3	F^{-1}	MLE	$S^2(n)$
AV	$\Gamma(\alpha, \beta)$	MRG	SME
A^T	$\text{geom}(p)$	MRG32k3a	t_i
Δb	GFSR	MSCO	$t_{n-1, 1-a/2}$
Bernoulli(p)	$GI/G/s$	MSE	$T(n)$
$\beta(a_1, a_2)$	GPM	MSER	TGFSR
$B(t, p)$	$h(x)$	MT19937	$\text{triang}(a, b, m)$
$B(a_1, a_2)$	H_0	$N(\mu, \sigma^2)$	$u(n)$
$B(t)$	H_1	$N(0, 1)$	$\hat{u}(n)$
C_{ij}	H&W	$N_d(\mu, \Sigma)$	U
C_j	HLA	NC	$U(a, b)$
CCD	IID	$\text{negbin}(s, p)$	$U(0, 1)$
CNI	$\text{JSB}(a_1, a_2, a, b)$	NETA	$\text{var}()$
cor	$\text{JSU}(a_1, a_2, \gamma, \beta)$	N&M	VARTA
cov	KN	NORTA	VIP
CPU	KN++	NSGS	VRT
CRN	$l(\theta)$	OCBA	WASSP
cv	L	PMMLOG	Weibull(a, β)
CV	$L(\theta)$	$p(x)$	WELL
d	L&C	$p(x, y)$	$w, p.$
D&D	LCG	$P()$	w
DES	LFC	$\text{Pareto}(c, a_2)$	$w(n)$
$d(n)$	LFSR	$P(\lambda)$	$\hat{w}(n)$
$\hat{d}(n)$	LHD	$\text{PT5}(a, \beta)$	$\tilde{w}(n)$
df	LIFO	$\text{PT6}(a_1, a_2, \beta)$	W_i
D_i	$LL(a, \beta)$	Q	x_q
$DU(i, j)$	$LN(\mu, \sigma^2)$	$q(n)$	$x_{0.5}$
$E()$	$L(t)$	$\hat{q}(n)$	$\mathbf{x}$
EAR	m	$Q(t)$	$\mathbf{X}$
Erlang	MC	R	$\mathbf{X}_k$
$\text{expo}(\beta)$	MCB	RTI	$X_{(i)}$
FIFO	$M/E_2/1$	SBatch	$\bar{X}_{(n)}$

(续)

符号或缩写	符号或缩写	符号或缩写	符号或缩写
$\overline{Y}_i(w)$	$\Lambda(t)$	Σ	$\sim$
$z_{1-a/2}$	μ	$\hat{\Sigma}$	$\xrightarrow{D}$
α	$\mu, \hat{\mu}$	$\Phi(z)$	$\binom{t}{x}$
β	v	$\chi^2_{k-1, 1-a}$	$\lfloor x \rfloor$
γ	ρ	$\Psi(\hat{a})$	$\lceil x \rceil$
$\Gamma(a)$	ρ_{ij}	ω	$\{ \}$
ζ	ρ_j	$\wedge$	
λ	σ	$\approx$	
$\lambda(t)$	σ^2	$\in$	

本书第 5 版的目标和前 4 版仍然保持一致：提供仿真研究的所有重要方面综合的与最新的进展，包括建模、仿真软件、模型校验和确认、输入建模、随机数发生器、随机变量和过程的产生、统计设计和仿真实验的分析，以及强调像制造这样的最重要的应用领域。本书旨在促进读者直观理解仿真与建模，并以技术上正确但更清晰的方式来阐述它们。全书有许多例子和习题，并有广泛的仿真参考文献和著作以供读者进一步研究。

本书可作为各种课程的基本内容，例如：

- 工程、制造、商业或计算机科学专业的高年级大学生或低年级研究生的第一门课程（第 1~4 章以及第 5~9 章和第 13 章的一部分）。在结束该课程时，学生要准备进行完整而有效的仿真学习，并进行高级仿真课程的学习。
- 上述任意学科的研究生的第二门仿真课程（第 5~12 章的大部分）。完成该课程后，学生应该熟悉仿真学习中更高级的方法学问题，也应该准备理解并进行仿真研究。
- 作为运筹学和管理科学中通用课程一部分的仿真导论（第 1 章、第 3 章、第 5 章、第 6 章、第 9 章及第 13 章的一部分）。

对用本书作为教材的教师来说，可以从网址 www.mhhe.com/law 下载各种教学辅助支撑资料。这些资料包括习题答案的全集，第 1 章、第 2 章和第 7 章中的全部仿真模型以及随机数发生器的代码。

本书还可以作为仿真从业者和研究人员的权威参考书。本书末尾对作者本人的诸多实践和咨询项目的实际例子进行了详细讨论。作者还做了巨大努力将主题与相关的研究文献联系起来，既有纸质的，也有在线的，并保持这些材料实时更新。理解本书的前提是有微积分、概率与统计学方面的基础知识（虽然第 4 章也涉及这些主题），以及会用计算机做一些实验。对第 1 章和第 2 章，读者还应该熟悉通用编程语言，例如 C 语言。偶尔书中也会用到少量的线性代数或矩阵理论。较深或有技术难度的内容放在标有星号的节中或在各章的附录中。

对第 4 版的内容进行了大量的修改和补充完成了第 5 版，但结构绝大部分仍然保持相同。第 1 章中部分仿真内容移到第 13 章，留到后面讨论。第 2 章关于复杂系统建模的内容已经更新，反映了有效事件列表管理的最新研究内容。第 3 章进行了重写和扩展，反映了仿真软件的最新进展，给出了三个用通用仿真软件包实现的一个通用的仿真案例。第 4 章讨论了置信区间与假设检验，补充了较多新内容，这一章中概率与统计学方面的基础知识为后面章节提供了基础。第 5 章对校验和标定做了更为清楚的区别，以避免混淆两者。第 6 章说明了输入模型不确定性和模型到达过程的最新进展。第 7 章提供了最有用的随机数发生器。第 8 章少量更新了关于随机变量和随机过程产生的内容。许多统计设计与分析方法在第 9~12 章进行扩展和更新，以反映当前的实践水平和近期的研究进展。特别是，第 9 章综合讨论了用于估计仿真系统的稳态均值的最新方法。更新了第 10 章中排序与选择程序的讨论以反映其较新的、有效的方法，这些方法并非基于传统的一致区间方法。第 11 章涉及的方差缩减技术仅有少量改动。第 12 章讨论了广泛得多且独立的经典实验设计与元模型，还特别强调了哪些设计和元模型专门用于仿真模型。新增的第 14 章讨论制造系统仿真，内容参见本书的配套网站，而不包含在纸质书里。第 14 章中关于制造系统仿真应用和最新仿真软件包的内容已经进行了同步更新。本书增加了第 13 章，讨论了基于 Agent 的仿真和系统动力学，以及在第 4 版第 1 章中提及的其他类型的仿真。学生版的

ExpertFit 分布拟合软件可以在本书配套网站中找到，它可以用来分析第 6 章例子和习题中相关的数据集。为了方便读者阅读和节约篇幅，书后列出了所有参考文献。最后的中英文名词对照增强了本书作为参考文献的价值。

www.CourseSmart.com 网站上有本书的电子版。在该网站中购买电子版图书可以节约购买纸质书的费用，减少环境污染，也可利用网站上的工具进行学习。CourseSmart 电子书可以在线阅读和下载到计算机上。电子书允许读者全文搜索、高亮显示与注释，以及与别人共享注释。CourseSmart 电子书在任何一个地方都可以使用，访问 www.CourseSmart.com 可以了解很多细节和试读样章。

首先应该感谢本人以前的合作者 David Kelton，他对本书的前三版做出了巨大贡献。第 5 版的评审人员给予了我极大的帮助并对初稿给出了深入的反馈意见，从而使本书在内容和表达两个方面都得到了极大的加强。这些评审人员有：Christos Alexopoulos (佐治亚理工学院)，Russell Barton (宾夕法尼亚州立大学)，Chun-Hung Chen (乔治梅森大学)，Shane Henderson (康奈尔大学)，Jack Kleijnen (蒂尔堡大学)，Pierre L'Ecuyer (蒙特利尔大学)，Michael North (美国阿贡国家实验室)，以及 Douglas Samuelson (InfoLogix 公司)。众所周知，本书一定会有不少因疏忽而产生的令人遗憾的错误，虽然如此，本人还是感谢以各种方式给予帮助的以下人员：Wayne Adams, Mark Anderson, Sigrun Andradottir, Jay April, Robert Axtell, Emmett Beeker, Marco Better, Edmund Bitinas, A. J. Bobo, Andrei Borshchev, Nathanael Brown, John Carson, Loren Cobb, Eric Frisco, David Galligan, Nigel Gilbert, Fred Glover, David Goldsman, Daniel Green, Charles Harrell, Thomas Hayson, James Henriksen, Raymond Hill, Kathryn Hoad, Terril Hurst, Andrew Hachinski, Jeffrey Joines, Harry King, David Krah, Emily Lada, Michael Lauren, Steffi Law, Thomas Lucas, Gregory McIntosh, Janet McLeavey, Anup Mokashi, Daniel Muller, Rodney Myers, William Nordgren, Ernie Page, Dennis Pegden, David Peterson, Stuart Eobinson, Paul Sanchez, Susan Sanchez, Lee Schruben, David Siebert, Jeffery Smith, David Sturrock, Ali Tafazzoli, Andrew Waller, Hong Wan, Robert Weber, Preston White, James Wilson。

埃弗里尔 M. 劳
于亚利桑那州图森市

出版者的话
译者序
作者简介
符号表
前言

第 1 章 仿真建模入门 1

1.1 仿真的本质 1

1.2 系统、模型及仿真 2

1.3 离散事件仿真 4

1.3.1 时间推进机制 4

1.3.2 离散事件仿真模型的组件与结构 6

1.4 单服务台排队系统的仿真 7

1.4.1 问题描述 7

1.4.2 直观解释 11

1.4.3 程序组织与逻辑 17

1.4.4 C 程序 19

1.4.5 仿真输出与讨论 26

1.4.6 其他终止规则 27

1.4.7 事件和变量的确定 30

1.5 库存系统的仿真 31

1.5.1 问题描述 31

1.5.2 程序组织和逻辑 33

1.5.3 C 程序 35

1.5.4 仿真输出和讨论 40

1.6 并行/分布式仿真和高层体系结构 42

1.6.1 并行仿真 42

1.6.2 分布式仿真和高层体系结构 43

1.7 一个有效的仿真研究的步骤 45

1.8 仿真的优点、缺点和缺陷 47

附录 1A 固定增量时间推进 48

附录 1B 排队系统入门 48

习题 51

第 2 章 复杂系统建模 56

2.1 引言 56

2.2 仿真中的表处理 56

2.2.1 计算机中存储表的方法 56

2.2.2 链式存储分配 57

2.3 简单仿真语言: Simlib 60

2.4 单服务台排队系统的 Simlib 仿真 66

2.4.1 问题描述 66

2.4.2 Simlib 程序 66

2.4.3 仿真输出与讨论 71

2.5 分时计算机模型 72

2.5.1 问题描述 72

2.5.2 Simlib 程序 72

2.5.3 仿真输出与讨论 78

2.6 可换队的多出纳台银行 80

2.6.1 问题描述 80

2.6.2 Simlib 程序 81

2.6.3 仿真输出与讨论 89

2.7 加工车间模型 91

2.7.1 问题描述 91

2.7.2 Simlib 程序 92

2.7.3 仿真输出与讨论 101

2.8 高效的事件表处理 102

附录 2A Simlib 的 C 代码 103

习题 115

第 3 章 仿真软件 126

3.1 引言 126

3.2 仿真软件包与编程语言的比较 126

3.3 仿真软件分类 127

3.3.1 通用与面向应用的仿真软件包的比较 127

3.3.2 建模方法 127

3.3.3 通用建模元素 128

3.4 期望的软件特点 129

3.4.1 通用能力 129

3.4.2 软硬件需求 130

3.4.3 动画和动态图形 130

3.4.4 统计能力 131

3.4.5 客户支持和文档 132

3.4.6 输出报告和图表	133	5.6.3 时间序列方法	182
3.5 通用仿真软件包	133	5.6.4 其他方法	182
3.5.1 Arena 软件包	133	习题	182
3.5.2 ExtendSim	135	第 6 章 输入概率分布的选择	184
3.5.3 Simio	140	6.1 引言	184
3.5.4 其他通用仿真软件包	143	6.2 常用的概率分布	187
3.6 面向对象的仿真	144	6.2.1 连续分布的参数化	187
3.7 面向应用的仿真软件包		6.2.2 连续分布	187
举例	144	6.2.3 离散分布	187
第 4 章 基础概率与统计回顾	145	6.2.4 经验分布	202
4.1 引言	145	6.3 评估样本独立性的方法	204
4.2 随机变量及其性质	145	6.4 活动 I: 假设分布类别	205
4.3 仿真输出数据和随机过程	152	6.4.1 求和统计	205
4.4 均值、方差和相关系数的		6.4.2 直方图	207
估计	153	6.4.3 分位数求和与盒形图	208
4.5 均值的置信区间和		6.5 活动 II: 参数估计	211
假设检验	156	6.6 活动 III: 判断拟合分布的	
4.6 强大数定律	160	代表性	214
4.7 用均值来替代概率分布的		6.6.1 启发式方法	215
危险性	160	6.6.2 拟合优良度检验	219
附录 4A 协方差平稳过程的		6.7 ExpertFit 软件与扩展的	
说明	161	例子	228
习题	161	6.8 分布平移与截断	231
第 5 章 建立有效、可信、适度详细的		6.9 贝塞尔分布	233
仿真模型	164	6.10 确定多元分布、相关性及	
5.1 引言及定义	164	随机过程	233
5.2 确定模型详细程度的准则	166	6.10.1 确定多元分布	234
5.3 仿真计算机程序校验	167	6.10.2 确定任意边际分布与	
5.4 提高模型有效性和可信性的		相关性	236
方法	170	6.10.3 确定随机过程	237
5.4.1 收集系统高质量的信息和		6.11 缺少数据时分布的选择	238
数据	170	6.12 到达过程模型	241
5.4.2 与管理者定期沟通	171	6.12.1 泊松过程	241
5.4.3 维持一份书面的假设文档,		6.12.2 非平稳泊松过程	242
并执行一次结构化走查	171	6.12.3 批到达	244
5.4.4 采用定量技术确认模型组件 ..	172	6.13 不同数据集的同质性评测	244
5.4.5 确认整个仿真模型的输出	173	附录 6A 伽马分布和贝塔分布的	
5.4.6 动画	177	MLE 表	245
5.5 管理者在仿真过程中的作用 ..	177	习题	247
5.6 比较实际观测值和仿真输出		第 7 章 随机数发生器	250
数据的统计程序	177	7.1 引言	250
5.6.1 检测法	178	7.2 线性同余发生器	253
5.6.2 基于独立数据的		7.2.1 混合发生器	254
置信区间法	180	7.2.2 乘法发生器	254

7.3 其他类型的发生器	256	8.4.5 几何分布	300
7.3.1 更一般的同余	256	8.4.6 负二项分布	300
7.3.2 组合发生器	256	8.4.7 泊松分布	300
7.3.3 反馈移位寄存器发生器	258	8.5 随机向量、相关随机变量与 随机过程的产生	301
7.4 随机数发生器的检验	261	8.5.1 利用条件分布	301
7.4.1 实验检验	261	8.5.2 多变量正态分布与多变量对数 正态分布	301
7.4.2 理论检验	265	8.5.3 相关伽马随机变量	302
7.4.3 关于检验的某些一般看法	267	8.5.4 由多变量族中产生	303
附录 7A PMMLCG 的可移植 C 源码	267	8.5.5 具有任意规定的边际分布和 相关性的随机向量的产生	303
附录 7B 组合 MRG 的可移植 C 源码	269	8.5.6 随机过程的产生	304
习题	271	8.6 到达过程的产生	305
第 8 章 随机变量的产生	274	8.6.1 泊松过程	305
8.1 引言	274	8.6.2 非平稳泊松分布	305
8.2 产生随机变量的通用方法	275	8.6.3 批到达	307
8.2.1 反变换法	275	附录 8A 舍选法的正确性	307
8.2.2 组合法	280	附录 8B 别名法的准备	308
8.2.3 卷积法	282	习题	309
8.2.4 舍选法	283	第 9 章 单系统输出数据分析	312
8.2.5 均匀比法	285	9.1 引言	312
8.2.6 特性法	287	9.2 随机过程的瞬态和稳态行为 特性	314
8.3 连续随机变量的产生	288	9.3 关于输出分析的仿真类型	315
8.3.1 均匀分布	288	9.4 终止型仿真的统计分析	317
8.3.2 指数分布	288	9.4.1 均值估计	317
8.3.3 m 厄兰分布	289	9.4.2 其他性能度量的估计	323
8.3.4 伽马分布	289	9.4.3 初始条件选择	325
8.3.5 韦布尔分布	291	9.5 稳态参数的统计分析	326
8.3.6 正态分布	291	9.5.1 初始瞬态问题	326
8.3.7 对数正态分布	292	9.5.2 均值的重复运行/删除法	333
8.3.8 β 分布	293	9.5.3 均值的其他方法	335
8.3.9 皮尔逊 V 型分布	293	9.5.4 估计性能的其他度量	344
8.3.10 皮尔逊 VI 型分布	294	9.6 稳态周期参数的统计分析	345
8.3.11 对数逻辑斯蒂分布	294	9.7 性能的多种度量	347
8.3.12 有界约翰逊分布	294	9.8 重要变量的时距图	348
8.3.13 无界约翰逊分布	294	附录 9A 期望比与对折估计	349
8.3.14 贝塞尔分布	294	习题	350
8.3.15 三角分布	294	第 10 章 比较不同的系统配置	353
8.3.16 经验分布	295	10.1 引言	353
8.4 离散随机变量的产生	296	10.2 两个系统的期望响应差的 置信区间	355
8.4.1 伯努利分布	296	10.2.1 双 t 置信区间	356
8.4.2 离散均匀分布	296		
8.4.3 任意离散分布	296		
8.4.4 二项分布	300		

10.2.2 改进的双样 t 置信区间	357	第 12 章 实验设计与优化	400
10.2.3 两种方法的对比	357	12.1 引言	400
10.2.4 基于稳态性能度量的 比较	358	12.2 2^k 析因设计	401
10.3 两个以上系统比较的 置信区间	359	12.3 2^{k-p} 部分析因设计	413
10.3.1 与标准比较	359	12.4 响应面与元模型	418
10.3.2 两两比较	360	12.4.1 库存模型的介绍与分析	418
10.3.3 与最好的进行多重比较	361	12.4.2 捕食者-猎物模型	424
10.4 排序与选择	362	12.4.3 空间填充设计和克里金法	425
10.4.1 在 k 个系统中选择最好的	362	12.5 基于仿真的优化	430
10.4.2 包含 k 个系统中最好系统且 大小为 m 的子集的选择	366	12.5.1 优选法	431
10.4.3 补充的问题和方法	367	12.5.2 与仿真软件有接口的优选法 软件包	431
附录 10A 选择方法的有效性	370	习题	437
附录 10B 选择方法中的常量	370	第 13 章 基于 Agent 的仿真及 系统动力学	439
习题	371	13.1 引言	439
第 11 章 方差缩减技术	373	13.2 基于 Agent 的仿真	439
11.1 引言	373	13.2.1 详细示例	444
11.2 公共随机数	374	13.2.2 基于 Agent 仿真的时间 推进机制	446
11.2.1 基本原理	374	13.2.3 基于 Agent 仿真的总结	448
11.2.2 适用性	374	13.3 连续仿真	448
11.2.3 同步性	376	13.4 离散-连续混合仿真	451
11.2.4 实例	379	13.5 蒙特卡罗仿真	452
11.3 对偶变量法	384	13.6 电子表格仿真	454
11.4 控制变量法	387	习题	455
11.5 间接估计法	392	附录 相关分布的临界点	456
11.6 调节法	394	参考文献	458
习题	396	中英文名词对照	488

第1章

仿真建模入门

1.1 仿真的本质

这是一本有关如何使用计算机对现实世界中各种设备或过程进行模拟或仿真的技术书。所关心的设备或过程通常称为系统。为了更科学地研究系统，我们往往需要对其如何运行建立一系列假设，这些假设就构成了模型。模型通常以数学公式或逻辑关系的形式表示，力图用于更好地理解相关系统的行为表现如何。

如果组成模型的关系足够简单，则可用数学方法(例如代数、微积分理论或概率论等)对于所关心的问题获得所需的精确信息，称之为解析解。然而大多数现实世界中的系统都过于复杂，对实际模型无法使用解析方法进行评估，这些模型必须通过仿真方法进行研究。在仿真中，通过计算机对模型进行数值评估，通过搜集数据来估计该模型的期望真实特征。

作为仿真应用的一个例子，考虑一个制造企业，该企业正考虑扩建一个工厂，但并不确知所获得的产量增加是否能弥补扩建的费用。如果扩建达不到这个要求而将其拆除，则显然是不合算的。然而，深入的仿真研究能解决上面所提到的问题，办法是对该工厂现在的运作以及扩建后的运作进行仿真。

仿真应用的领域是十分广泛的，人们发现，仿真对于下列问题是常用且有效的工具：

- 制造系统的设计与分析；
- 军用武器系统及其后勤保障的评估；
- 通信网络中硬件需求或协议的确定；
- 计算机系统软硬件需求的确定；
- 运输系统(如机场、高速公路、港口、地铁等)的设计与运营；
- 服务组织(如呼叫中心、快餐店、医院、邮局等)的评估设计；
- 业务流程的重组；
- 供应链分析；
- 库存系统订货策略的确定；
- 采矿作业的分析。

仿真是运筹学和管理科学最广泛应用的技术之一，至少在这两个领域，仿真是应用最广泛的。冬季仿真会议就说明了这一点，它每年吸引了 600 至 800 人参加。此外，还有其他一些仿真会议，每年有超过 100 人参加。

还有一些关于运筹学技术应用的调查。例如，Lane, Mansour 和 Harpell(1993)从一项长期研究中指出，自 1973 年至 1988 年，仿真一直被评为三个最重要的“运筹学技术”之一。另外两个技术是数学规划(该术语包括诸如线性规划、非线性规划等许多单项技术)和统计学(它本质上并不是一项运筹学技术)。Gupta(1997)分析了期刊“Interfaces”(有关运筹学应用的引领杂志之一)中从 1970 年至 1992 年的 1294 篇文章，得出在所考虑的 13 项技术中仿真是仅次于数学规划的一项技术。

但是，仍存在影响人们更广泛接受和应用仿真的几个障碍。首先，用于大规模系统的模型变得非常复杂，编写计算机程序来执行这些模型的确可能是一件烦琐的任务。近年来开发出来的一些优秀的仿真软件产品使得这一任务变得比较容易了，它们具有对仿真模型

编程所需要的许多特点。复杂系统仿真的第二个问题是仿真往往需要耗费大量时间。但是，随着计算机运行速度越来越快，费用越来越低，这一困难也就变得不那么严重了。最后，有一种不幸的印象，虽然仿真复杂一些，但是有人认为仿真只是一个计算机编程练习，因此，为得到“答案”，很多仿真“研究”仅包括启发式模型建立、编程，以及程序的一次运行。我们担心的是，这种态度无疑使得很多仿真研究得出了错误的结论，因为它忽视了如何用一个正确编码模型对所感兴趣的系统进行推断这样一个重要问题。仿真方法学中的这些问题与使用的软硬件很大程度上是独立的，它们构成了在本书后面的章节的一个完整的部分。

有关仿真建模的历史发展的评述可参阅 Nance 和 Sargent(2002)的文献。

在本章的后续内容(以及第 2 章)中，我们将更详细地讨论系统和模型，然后展示如何用通用语言编写计算机程序来仿真不同复杂程度的系统。本章中给出的所有计算机代码均可从 www.mhhe.com/law 下载。

1.2 系统、模型及仿真

系统是实体的集合，例如人或机器，它们为实现某一逻辑目标而动作和相互作用(该定义由 Schmidt 和 Taylor 于 1970 年提出)。在实际应用中，“系统”的含义往往取决于一个特定研究的目标。在某项研究中组成一个系统的实体集合可能是另一项研究中整个系统的一个子集。例如，研究一个银行，确定需要多少出纳员以满足顾客需求。如果仅考虑存取款情况，系统可定义为银行的一部分，仅由服务员以及排队等待或正被服务的顾客组成；如果还要考虑贷款负责人以及保险箱，则系统显然要再进一步扩大[参见 Fishman, (1978, 第 3 页)]。我们将系统的状态定义为变量的集合，相对于研究目标，这些变量对描述某一特定时刻的系统是必需的。在研究银行时，忙期出纳员数、银行中的顾客数，以及银行中每个顾客的到达时间是可能的状态变量。

我们将系统归为两种类型：离散的和连续的。离散系统是指状态变量在一些离散时间点上发生瞬时变化的系统。银行就是一个离散系统的例子，因为状态变量(例如，银行中的顾客个数)只有当顾客到达或离开银行时才发生变化。连续系统是指状态变量随时间变化而连续变化的系统。例如，一架在空中飞行的飞机就是一个连续系统的例子，因为如位置、速度等状态变量可随时间变化而连续变化。实际中，很少有系统是完全离散或完全连续的；但是，对大多数系统来说，因为总有一种类型占主导地位，将一个系统分类为连续或离散通常是可能的。

在大多数系统存活期的某些点上，研究系统的要求是尽可能深入了解各个组件之间的关系，或是预测系统在考虑某些新条件时的性能。图 1.1 勾画了研究一个系统的不同方法。

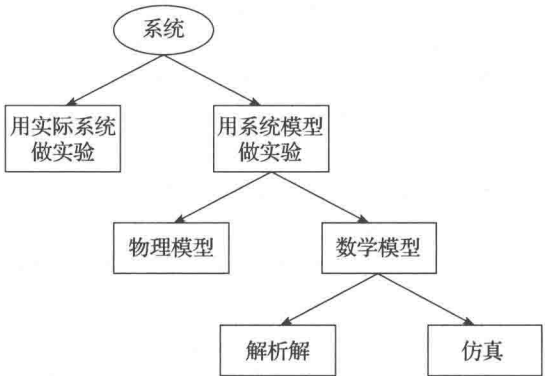


图 1.1 研究系统的方法

● 用实际系统的实验与用系统模型的实验

如果物理上改变系统可能(并且合算)且在新条件下可操作，这样做恐怕是所希望的，因为在这种情况下，有关我们的研究是否有效是没有疑问的。然而，做到这一点是非常少见的，因为这样的实验往往花费巨大或者造成系统破坏。例如，某银行正考虑削减出纳员以减少开支，但是这样一来将会导致顾客等待时间加长甚至流失顾客。更形象地说，这个“系统”甚至可能不存在，然而，无论如何，我们要首先用各种备选配置看看应该如何构建系统，这种情况的例子，如一个建议的通信网络或者一个战略核武器系统。基于这些原

因,通常需要建立一个模型来代表一个系统,并将其作为该实际系统的替代来研究它。当用到一个模型时,总会有一个疑问:该模型是否根据要做的决策精确地反映了系统,这个模型的有效性问题的将在第5章中详细介绍。

● 物理模型与数学模型

对大多数人来说,“模型”一词让人想起风洞里面的泥汽车、飞机上拆下来的用于飞行员训练的驾驶座,或者水池中行驶的模拟巨轮模型。这些都是物理模型(或称为形象模型)的例子,并且通常不是运筹学或者系统分析中感兴趣的典型模型。然而,建立物理模型来研究工程或者管理系统有时偶尔也是有用的,如物料储运系统的桌面规模模型,并且至少有一个案例,在仓库中建立一个快餐馆的全尺度物理模型,具有全尺度的、真实(假设饥饿)人群[参见 Swart 与 Donno(1981)]。但是为此目的而建立的绝大多数模型都是数学模型,用逻辑或数量关系来描述一个系统,通过操作或改变这些关系观察模型的反应,从而观察系统是如何反应的——如果数学模型有效的話。也许数学模型的一个最简单的例子就是人们熟知的关系 $d=rt$, 其中 r 是移动的速率, t 是移动所花费的时间, d 是移动的距离。这个关系式在一种场景中可能提供了一个有效模型(比如,一个已获得飞行速度的向另一行星驶去的航天探测器),但对其他目的则可能是非常糟糕的模型(比如在拥挤的城市高速公路的高峰期计算)。

● 解析解与仿真

一旦我们建好一个数学模型,则需要检查它是如何用于回答其假设所代表的系统中我们所关注的问题的。如果这个模型足够简单,则可能通过其关系式和数值得到一个精确的解析解。在 $d=rt$ 这个例子中,如果已知移动距离和速率,则根据模型我们能得到 $t=d/r$ 作为所要求的时间。这是一个非常简单的例子,仅仅通过纸笔就可求得闭式解,但是某些解析解会变得非常复杂,需要大量计算资源。求解一个大的非稀疏矩阵的逆就是这样一个众所周知的例子,虽然有原理上已知的解析公式,但是对具体例子的数值求解却并非易事。如果一个数学模型的解析解是可求的,并且其计算效率是可接受的,则通常直接用解析方法求解模型,而不是用仿真。然而,很多系统相当复杂,从而其有效的数学模型本身很复杂,不可能解析求解。在这种情况下,对模型的研究必须用仿真的方法,即对模型进行数字实验,对其施加输入,观察它们如何影响系统的输出性能。

有时将具有贬义的老锯(老方法)用于描述仿真,像“最后一招”这样的,虽然也许有点对,但事实是在很多情况下,我们一下子就想到要用仿真,因为所感兴趣的系统以及以有效的方式表示系统的模型都是非常复杂的。

进一步,已知用仿真的方法来研究的数学模型(以下我们称之为仿真模型),我们必须找到特定的工具来完成仿真。为此,可以按三个不同的域来对仿真模型进行分类。

● 静态与动态仿真模型

静态仿真模型是系统在某一特定时刻的表示,或者是可用于表示一个时间不起作用的系统。某些蒙特卡罗模型是静态仿真的例子,这将在第1.8.3小节中讨论。另一方面,动态仿真模型描述随时间变化而不断变化的系统,例如工厂中的传送带系统。

● 确定的与随机的仿真模型

如果一个仿真模型不含任何概率(即随机)成分,则称为确定性的;一个描述某化学反应的微分方程的复杂(且难以解析求解的)系统可能就是这样——一个模型。不管它需要花费多少时间来计算以及评价该系统到底如何,在确定性模型中,一旦给定模型的输入数值及关系,其输出结果是“确定的”。然而,很多系统建模都必须至少有一些随机输入成分,这就形成了随机仿真模型(系统建模时忽略随机因素的危险的例子参见第4.7节)。大多数排队和库存系统都是随机模型。随机仿真模型所产生的输出结果本身是随机的,从而只能将其看做模型真实特征的一个估计,这也是仿真的主要缺点之一(参见第1.8节),这将在本书第9章至第12章中讨论。