

国防电子信息技术丛书

 Springer

Design and Analysis of Simulation Experiments

# 仿真实验 设计与分析

[荷] Jack P.C. Kleijnen 著

张列刚 张建康 刘兴科 译



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国防电子信息技术丛书

# 仿真实验设计与分析

Design and Analysis of Simulation Experiments

[荷] Jack P. C. Kleijnen 著

张列刚 张建康 刘兴科 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书作为仿真实验设计方法研究的入门性指南,以高度凝练的方式概述了仿真实验设计与分析技术的主要内容,其最大特点是提供了内容丰富的参考文献,读者可以按图索骥,逐步了解仿真实验设计方法的历史发展脉络和实际应用的最新趋势,便于结合工作实际开展有针对性的理论研究和应用。

本书可以作为仿真实验工程人员和系统仿真专业高年级本科生和研究生的指导手册和入门教材,也适合作为相关科技人员的参考资料。

Translation from the English language edition:

“Design and Analysis of Simulation Experiments”(1st edition)

By: Kleijnen

ISBN: 978-0-387-71812-5

Copyright © 2007 Springer, The Netherlands

as a part of Springer Science + Business Media

All rights Reserved

本书简体中文专有翻译出版权由 Springer Science + Business Media 授予电子工业出版社。专有出版权受法律保护。

版权贸易合同登记号 图字:01-2010-0521

### 图书在版编目(CIP)数据

仿真实验设计与分析/(荷)克莱内(Kleijnen,J. P. C.)著;张列刚,张建康,刘兴科译.

北京:电子工业出版社,2010.7

(国防电子信息技术丛书)

书名原文:Design and Analysis of Simulation Experiments

ISBN 978-7-121-11011-5

I. ①仿… II. ①克… ②张… ③张… ④刘… III. ①计算机仿真-实验 IV. ①TP391.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第103267号

策划编辑:马 岚

责任编辑:许菊芳

印 刷:北京智力达印刷有限公司

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:11.75 字数:301千字

印 次:2010年7月第1次印刷

定 价:49.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

## 译者序

仿真科学与技术是以计算机科学、系统科学、控制理论和应用领域有关的专门技术为基础,以计算机系统和物理效应设备为载体,通过建立并利用模型和仿真系统,对研究对象开展分析、实验和评估的一门综合性学科。我国的仿真技术经过半个多世纪的发展,已经建立起了较为完备的理论和应用体系,逐步发展成为一门成熟的技术学科。作为一门以实验为基本研究手段的应用学科,随着学科理论体系的不断完善和应用领域的持续拓展,仿真应用理论与方法成为了学术界关注的热点领域。近年来,国内多家研究机构陆续开展了仿真实验设计理论与方法的研究,并且取得了可喜进展,有力地促进了仿真科学的健康发展。

在国外,仿真实验设计方法领域的研究可以追溯到20世纪60年代。自那时起,欧洲和美国的运筹、仿真和统计领域的学术杂志及一年一度的冬季仿真会议都会刊载大量仿真实验设计领域的理论与应用研究成果,涌现出一批以Jack P. C. Kleijnen、W. David Kelton、Russell R Barton、Zeigler Bernard P为代表的学术先驱,本书的作者Jack P. C. Kleijnen教授就是他们中的杰出代表。本书集作者多年潜心研究之大成,不仅详实地介绍了仿真实验设计方法的基本内涵、研究范畴和主要方法,而且还概述了本领域的最新成果及发展趋势,在学术界产生了广泛的影响,极大地推动了仿真实验设计方法学的研究与应用。

作为从事空军武器装备体系研究的专业机构,空军武器装备体系研究国防科技重点实验室长期致力于仿真实验技术的研究与应用。近20年来,实验室始终紧扣国际仿真技术的发展脉络,立足本领域前沿,坚持原始创新和引进创新相结合,主持完成了多项大型仿真实验项目,确立了仿真实验在空军武器装备体系和国防重大型号发展论证中的重要作用。近年来,为持续跟踪国际最先进的仿真实验技术的发展动态,实验室组织开展了对多部外文专著的引进吸收工作。2008年初,当本书刚刚由斯普林格出版社发行时,实验室即组织相关研究人员进行了学习研究,并很快将书中的部分理论与方法应用于实验项目,取得了令人满意的应用效果,进一步加深了对原书精髓的理解。“纸上得来终觉浅,绝知此事要躬行”,在实践应用的基础上,实验室决定将本书翻译出版,与国内仿真领域的同行共同分享最新学术成果,推动我国仿真实验设计方法学的发展进步。

本书的翻译工作由重点实验室张列刚主任领导的仿真实验团队共同开展,主要翻译整理工作由张列刚高工、张建康高工和刘兴科工程师完成,并由张列刚高工对全书进行了终稿审定。在本书原理与方法的实验验证过程中,得到了空军武器装备体系研究国防科技重点实验室仿真实验研究团队的鼎力支持,包括车万方高工、薄涛高工、兰新章高工、黄进佳高工、何新明研究员、郑瑜研究员、张旭工程师、要继斌工程师、胡金山工程师、李长青工程师等,实验室李明忠工程师对本书的部分内容提出了宝贵意见。本书的翻译还得到了空军装

备研究院总体所多位专家学者的指导和帮助。与此同时,Jack P. C. Kleijnen 教授高度重视中译本的出版,专门委托曾与其共事过的张金女士对本书译文进行了审校,在此对张金女士的付出表示衷心感谢!

鉴于自身经验和时间约束,翻译过程中难免存在未尽和不当之处,敬请广大同行读者批评指正。同时欢迎对仿真实验领域研究感兴趣的读者通过 [simdoe@163.com](mailto:simdoe@163.com) 与我们联系,共同探讨或对本书内容提出批评建议。

译者  
2010年6月于北京

# 前 言

本书是我所出版的几本同类专题著作的后续版本。我的第一部著作包括上、下两册,分别出版于1974年和1975年(已于1978年翻译成俄文),1987年又出版了该书的第二版。1992年,我和Willem van Groenendaal合著了一本较为通俗的仿真教科书,其中包括了对1987年那本书的部分更新。正是因为有了近四十年的理论和实践积累,因此我认为撰写一本关于仿真实验设计与分析方面的著作的条件已经成熟,以此系统总结我对该领域的认识。仿真实验设计与分析的英文名称(Design and Analysis of Simulation Experiments)可以缩写为DASE。这个缩写源自于DACE的启发,即计算机实验设计与分析(Design and Analysis of Computer Experiments)。如今,DACE已经成为确定性仿真领域通行的缩写。

本书将重点研究DASE问题,因为我认为自己在这个领域已经具有一定的造诣。尽管本书会着重研究离散事件仿真的DASE问题(包括排队系统和仓储管理仿真),但是也会讨论DASE在确定性仿真中的应用(如在工程、物理等领域的应用)。书中将涉及昂贵仿真和廉价仿真这两类仿真问题,其区别在于模型解算的计算代价不同。

本书假定读者已经具备了仿真领域的基础知识,比如已经了解中断仿真和稳态状态仿真的基本概念。读者还需对数理统计有一定的了解,懂得诸如分布函数、均值、方差等名词的基本概念。

为了提高本书的可读性,只要是合理的参考文献,我都会列在每个段落的末尾。因此,本书包含了多达400多篇参考文献。但是除非某篇早期文献是某个重要思想的出处(读者能够从中了解仿真实验设计理论的发展脉络),否则就不会列出那些在近期文献中涉及到的文献。

关于阅读方法,我建议前三章可以按照默认顺序阅读,而后续的章节是彼此独立的,因此读者可以根据自身不同的兴趣安排阅读顺序。

本书是用外文撰写的(即英语,而我的母语是荷兰语),因此在文体、拼写等方面难免出现瑕疵,我对此深表歉意。关于写作风格,需要指出的是括号中插入了冗余的解释性信息,而长破折号表示的是附加信息<sup>①</sup>。为了方便读者在不同章节间的浏览,即使在前面章节已经给出了缩略词的解释,我在特定的章节仍会对其重复定义。此外,书中包含很多以“注:”开始的段落,首次阅读时可以略过。

因为网址都比较长,常常会跨越页面的右边界或者需要使用连字号,而连字号可能被认为是网址的一部分,因此每个网址都独立成行。此时连字号都作为网址的一部分,而结尾处的逗号或句号不是网址的内容!

本书是我在Scientific Workplace工作期间撰写的,他们还帮助我解决了书中部分习题的运算工作(使用了那里的MuPAD计算引擎)。Winfried Minnaert(蒂尔堡大学)为我介

---

<sup>①</sup> 在翻译中,为符合中文行文习惯,对原文中多处破折号后的文字进行了转译——译者注。

绍了该引擎文本处理器的基本知识, Jozef Pijnenburg(蒂尔堡大学)帮助我学习了更多的高级特征。

在撰写本书各章的初稿阶段, 我收到了以下同事的宝贵建议, 他们是: Ebru Angün(伊斯坦布尔加拉塔萨雷大学), Russell Barton(宾西法尼亚大学), Victoria Chen(阿灵顿得克萨斯大学), Gabriella Dellino(巴里 Politecnico 大学), Dick den Hertog(蒂尔堡大学), Tony Giunta(Sandia 国家实验室), Yao Lin(佐治亚州科技学院), Carlo Meloni(巴里理工大学), Barry Nelson(西北大学), William Notz(俄亥俄州立大学), Huda Abdullah Rasheed(巴格达 alMustansiriyah 大学), Wim van Beers(蒂尔堡大学), Willem van Groenendaal(蒂尔堡大学), Jim Wilson(北卡罗莱纳州)和 Bernard Zeigler(亚利桑那州)。

我曾用本书的初稿在埃因德霍芬科技大学为“后勤管理系统国际项目研究生”开设了一门名为“后勤仿真”的课程, 这帮助我改进了书中的部分内容。几位同学解决了习题 1.6, 2.13 和 2.15, 他们是 Nicolas Avila Bruckner, Olla Gabali, Javier Gomes, Suquan Li, Xue Li, María Eugenia Martelli, Kurtulus Öner, Anna Otáhalová, Pimara Pholnukulkit, Shanshan Wang 和 Wei Zhang, 要特别感谢 Xue Li 和 Shanshan Wang 两位同学。

在这门课程中, 我还制作了幻灯片(PPT), 读者可以在下面网站下载到该课件的 PDF 格式:

<http://center.uvt.nl/staff/kleijnen/simwhat.html>

我的个人主页还将提供本书的更新内容, 包括错误更正, 新的参考文献和习题。请访问:

<http://center.uvt.nl/staff/kleijnen/>

然后单击“Publications”链接。

# 目 录

第 1 章 引言 .....	1
1.1 什么是仿真 .....	1
1.2 什么是 DASE .....	6
1.3 DASE 的符号和术语 .....	8
1.4 习题解答 .....	11
第 2 章 低阶多项式回归元模型及其设计:基本原理 .....	12
2.1 简介 .....	12
2.2 线性回归分析:基础理论 .....	15
2.3 线性回归分析:一阶多项式 .....	21
2.3.1 单因子一阶多项式 .....	21
2.3.2 多因子一阶多项式 .....	22
2.4 用于一阶多项式的分辨率 III 设计 .....	29
2.4.1 分辨率为 III 的 $2^{k-p}$ 设计 .....	29
2.4.2 分辨率为 III 的 Plackett-Burman 设计 .....	31
2.5 回归分析:因子交互作用 .....	32
2.6 两因子交互效应的设计方法:分辨率 IV 设计 .....	34
2.7 两因子交互效应设计方法:分辨率 V 设计 .....	37
2.8 回归分析:二阶多项式 .....	40
2.9 二阶多项式设计:中心复合设计(CCD) .....	40
2.10 最优设计和其他设计 .....	42
2.11 元模型验证 .....	43
2.11.1 决定系数和相关系数 .....	44
2.11.2 交叉验证 .....	46
2.12 更多仿真应用 .....	51
2.13 本章小结 .....	53
2.14 附录:名义因子的编码 .....	54
2.15 习题解答 .....	56
第 3 章 经典假设回顾 .....	59
3.1 简介 .....	59
3.2 多元仿真输出 .....	60
3.2.1 多元仿真输出设计 .....	62
3.3 非正态仿真输出 .....	62



3.3.1	正态分布假设的真实性 .....	63
3.3.2	检验正态分布假设 .....	64
3.3.3	仿真输入输出数据的变换, 折叠法和多步法 .....	64
3.4	非齐次方差仿真输出 .....	69
3.4.1	方差一致假设的真实性 .....	70
3.4.2	常数方差的检验 .....	70
3.4.3	方差稳定变换 .....	71
3.4.4	非齐次方差条件下的最小二乘估计 .....	71
3.4.5	非齐次方差条件下的设计 .....	73
3.5	公共随机数 .....	74
3.5.1	公共随机数假设的真实性 .....	75
3.5.2	可供使用的分析方法 .....	75
3.5.3	在公共随机数情况下的设计 .....	77
3.6	无效低阶多项式元模型 .....	77
3.6.1	检验元模型的有效性 .....	78
3.6.2	回归自变量和因变量的变换 .....	78
3.6.3	在低阶多项式模型中加上高阶项 .....	79
3.6.4	非线性元模型 .....	79
3.7	本章小结 .....	79
3.8	习题解答 .....	80
<b>第4章</b>	<b>仿真优化 .....</b>	<b>81</b>
4.1	简介 .....	81
4.2	响应面方法: 经典变量 .....	84
4.3	广义响应面方法: 多输出和限制条件 .....	88
4.4	检验估计最优: KKT 条件 .....	92
4.5	风险分析 .....	97
4.5.1	拉丁超立方体采样 .....	100
4.6	稳健优化: Taguchian 方法 .....	103
4.6.1	案例研究: 爱立信供应链 .....	106
4.7	本章小结 .....	108
4.8	习题解答 .....	108
<b>第5章</b>	<b>Kriging 元模型 .....</b>	<b>109</b>
5.1	简介 .....	109
5.2	Kriging 基础 .....	110
5.3	Kriging 的最新成果 .....	115
5.4	Kriging 设计 .....	116
5.4.1	随机仿真中的预测量方差 .....	118

5.4.2	确定性仿真中的预估量方差 .....	119
5.4.3	相关设计方法 .....	120
5.5	本章小结 .....	121
5.6	习题解答 .....	122
<b>第 6 章</b>	<b>筛选设计</b> .....	<b>123</b>
6.1	简介 .....	123
6.2	顺序分支法 .....	125
6.2.1	最简单 SB 方法概述 .....	125
6.2.2	最简单 SB 方法的数学描述 .....	129
6.2.3	案例研究:爱立信供应链 .....	130
6.2.4	两因子交互作用的 SB 方法 .....	132
6.3	本章小结 .....	134
6.4	习题解答 .....	134
<b>第 7 章</b>	<b>结束语</b> .....	<b>135</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>137</b>
<b>中英文术语对照</b>	.....	<b>171</b>

# 第1章 引言

本章按照如下结构组织编排。1.1节定义了仿真的各种类型；1.2节给出了仿真实验设计与分析(DASE)的研究内容；1.3节定义了DASE的符号和术语；最后给出的是本章全部习题的答案。

## 1.1 什么是仿真

本节包含以下三个方面的内容：

1. “仿真模型”的定义。
2. 介绍一个简单的确定性仿真模型，即用于估算贷款净现值(NPV)的模型。
3. 举两个简单的随机仿真示例，即单服务器队列模型和仓储管理模型。

**定义 1.1** 仿真模型是一个旨在通过实验手段解决实际问题的动态模型。

需要对该定义做如下注解。

仿真模型可以是一个物理模型——如风洞中缩小的飞机模型(或者汽车、轮船模型)。然而本书不会涉及这样的真实模型，而是主要研究数学模型。这些数学模型通常需要转化为计算机程序——也称为计算机代码。

术语“动态”意味着时间在模型中扮演着一个明确而特殊的角色，即数学模型中的变量具有时间量度。例如，变量 $x$ 记为 $x(t)$ ，其中 $t$ 表示一个时间点。静态模型可以通过实验手段来求解，例如著名的Newton-Ralphson方法可以用于搜索方程的根，内插点(IP)法可以用于寻找线性规划(LP)模型的最优解(见第4章)。

蒙特卡罗方法是与仿真关系密切的重要方法，该方法需要使用伪随机数(PRN)。伪随机数是通过计算机程序生成的，因此不具有真正意义上的随机性，但这些随机数被假定在 $[0, 1]$ 区间内均匀分布且相互独立，因此蒙特卡罗方法能够表现偶然性，这也解释了它的名字。蒙特卡罗方法通常用于解决物理学和数理统计学等学科中常见的多重积分问题。

显然，上面注解中讨论的所有方法都是数字方法。本书将主要研究具有动态特性的随机仿真，但是也会简明扼要地讨论确定性仿真问题(如例1.1)。此外，很多DASE方法都适用于静态蒙特卡罗方法。请参阅作者先前的一系列著述，向前可以追溯到1974年出版的专著(文献[181])中的第3~22页，最近的论述见2005年发表的论文(文献[193])。

**例 1.1** 假设给定如下数据:  $\theta$  是决策者设定的贴现因素,  $n$  是以年为单位的计划周期的长度,  $x_t$  是第  $t$  年内的现金流量 ( $t=0, \dots, n$ ), 那么现在净价值 (NPV)——也称现值 (PV)——的值可以通过如下方程进行计算 (若假设为连续时间, 工程师通常可以使用积分公式, 即将  $\Sigma$  换成  $\int$ ):

$$y = \sum_{t=0}^n \frac{x_t}{(1+\theta)^t} \quad (1.1)$$

这个 NPV 公式可以用来比较不同现金流类型的差异。比如由不同贷款类型导致的现金流量的差异, 其中某种贷款类型有固定偿还金额, 即每年年终的还款额  $z_t = z$ , 其中  $t=1, \dots, n$ ,  $z_0 = 0$ , 需要支付的利息决定于利率  $c$  和第  $t$  年年终的贷款余额  $w_t$ , 那么第  $n$  年的现金流量  $x_t$  为

$$x_t = -[\min(z_t, w_t) + cw_t] \quad \text{其中 } t=1, \dots, n \quad (1.2)$$

其中贷款余额  $w_t$  决定于:

$$w_t = w_{t-1} - z_t \quad \text{其中 } t=1, \dots, n \quad (1.3)$$

且

$$x_0 = w_0 \quad (1.4)$$

其中  $w_0$  为初始贷款总额, 因此  $x_0$  表示每个计划周期开始时的正现金流量, 而  $x_t$  ( $t=1, \dots, n$ ) 是负现金流量 (已经设定初始条件  $z_0 = 0$ )。最后, 还必须给出仿真运行的结束条件。在本例中, 结束条件是计划周期结束。显然, 这是一个简单的确定性动态模型, 包括一个一阶差分方程 [式 (1.3)]。编制这个模型的程序相对比较简单, 可以使用电子表格软件实现 (参阅文献 [340]、[417]、[92] 和 [299]), 例如 Excel。

**习题 1.1** 假设初始贷款  $w_0 = 100$ ,  $n = 2$ ,  $c = 0.10$ ,  $\theta = 0.15$ , 导出  $NPV = 6.238$  (因为债权人期望获得比银行存款更高的投资利润)。

假如贴现因素  $\theta$  或现金流量  $x_t$  是未知的, 它们的取值来自于某个分布函数的采样, 那么这个确定性仿真的例子便可以扩展为随机仿真。这种类型的仿真称为风险分析 (RA) 或不确定分析 (UA), 详细论述可参阅文献 [44]、[313]、[327] 和 [340], 也可参阅近期的教科书, 如文献 [110] 和 [392]。本书将在 4.5 节中详细论述风险分析问题。

确定性仿真的复杂应用经常出现在飞机、汽车、电视机、化学反应过程、计算机芯片等领域的模型中, 在波音、通用电器、飞利浦等大公司中得到广泛使用, 主要用于计算机辅助工程 (CAE) 和计算机辅助设计 (CAD) 领域。可参阅最近的综述性文献 [65]、[66]、[254]、[280] 和 [357] (文献 [254] 刊登在 AIAA 杂志上, AIAA 代表美国航空航天学会)。在过去的 10 年间, 多学科设计优化 (MDO) 已经发展成为一门新兴学科, 参阅文献 [5]。

**注:** 确定性仿真也可能出现数值误差, 使这类仿真与随机仿真产生了某种联系, 然而随机化仿真通常是指伪随机数内置于模型中。

确定性仿真的另一个主要类型是系统动力学(System Dynamics)仿真,该理论首先由Forrester以“工业动力学”(Industrial Dynamics)的概念提出,参阅他在1961年出版的教科书(文献[113])。系统动力学不仅是一种仿真方法,更是一种世界观。这种观点的一个关键概念就是反馈,即将输出与一个额定值进行比较,并对出现的不期望偏差做出反应。这种反馈通常产生违反直觉的作用。系统动力学可以应用于从商业、制造业(包括供应链)到国家乃至全球(如地球大气变暖)范围的仿真。2000年, Sterman 出版了一本长达千页的系统动力学教科书,参阅文献[364]。

总而言之,上述这些仿真类型通常是确定性的,但其中的参数[如式(1.1)中的 $\theta$ ]或输入变量[如式(1.2)中的 $x_i$ ]可以从一个预先给定的分布采样获得,从而令它们具备了随机性。从数学上看,这些仿真模型是差分方程,具有非线性和类随机的特征,因此仿真方法可以用于解决这类问题。

在前面的段落中,已经隐含地使用了下面两个源自 Zeigler 所著教科书中的定义,参阅文献[413]和1.3节。

**定义 1.2** 模型参数的值只能通过推导从真实世界中采集获得的数据得出,而不能从真实世界直接观测得到。

**定义 1.3** 模型输入变量的值可以直接由真实世界观测得到。

**习题 1.2** 考虑下面两个涉及例 1.1 中用于计算现在净价值(NPV)的贴现因素的案例。

(a)一名学生希望在多种贷款方案中选择 NPV 最低的那种,要求每一种方案具有相同的利息率,但是执行不同的分期偿还方案;(b)一家公司希望在多个投资方案中选择 NPV 最高的那种,使得公司保持与过去 5 年同样的投资回报率。那么在(a)和(b)中,贴现因素是参数还是变量呢?

与前面论述的仿真类型(主要是确定性仿真)对应的仿真类型,是离散事件动态系统(DEDS, Discrete-Event Dynamic System)仿真(DEDS 这一名称由于 Ho 及其合作者们而变得非常流行,参阅文献[147])。这类仿真具有固有的随机特性。换言之,如果失去随机性,问题性质就会发生彻底改变。例如,排队问题(或等待问题)是由于到达或服务时间的随机性产生的。假如这些时间是确定的,那么这类问题就演变为所谓的排定问题。被称为 M/M/1 的仿真模型,是 DEDS 仿真中最重要的模型(本书中将多次提及这个模型)。

**定义 1.4** M/M/1 模型是一个具有单服务器、到达间隔和服务时间符合马尔可夫过程的排队模型。

这些马尔可夫性质时间呈“独立”的指数分布,即到达间隔是相互独立的,且独立于服务时间。指数分布具有无记忆特性,意味着事件(如“到达间隔”)数量服从泊松分布。符号“M/M/1”表明服务器的优先权服从先进先出(FIFO)规则,队列空间容量没有限制,等等。M/M/1 模型可以描述为下面的形式。

**例 1.2** 令  $a_{i+1}$  表示第  $i$  个顾客和第  $i+1$  个顾客到达时刻之间的间隔,  $s_i$  为第  $i$  个顾客的服务时间,  $r$  是伪随机数。假设研究人员关注的输出是第  $i$  个顾客的等待时间  $w_i$ , 该输出由平均等待时间  $\bar{w}$  决定, 其定义为

$$\bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{n} \quad (1.5)$$

其中  $n$  表示使仿真运行停止的顾客数量。因此这个例子是终止型仿真(参阅文献[418]), 而不是稳态型仿真, 在稳态型仿真情况下,  $n$  将不是预先选定的或者设置为一个“非常大”的数值。此外, 假设仿真以空状态(系统中没有顾客)启动, 因此第一个到达的顾客无须等待:  $w_1 = 0$ 。单服务器系统的动态可以用 Lindley 递归公式来定义:

$$w_{i+1} = \max(0, w_i + s_i - a_{i+1}) \quad (1.6)$$

上式中的随机输入变量  $s$  和  $a$  可以从某种分布采集(或生成)获得, 因此这些变量具有服务速率  $\mu$  和到达速度  $\lambda$  (因此平均或期望服务时间和到达间隔分别是  $1/\mu$  和  $1/\lambda$ )。为了采集变量  $s$  和  $a$ , 仿真中可使用如下伪随机数  $r$ :

$$s_i = \frac{-\ln r_{2i-1}}{\mu} \quad (1.7)$$

和

$$a_{i+1} = \frac{-\ln r_{2i}}{\lambda} \quad (1.8)$$

其中使用了单个伪随机数序列  $(r_1, r_2, \dots, r_{2n-1}, r_{2n})$  ( $n$  个顾客每人需要两个伪随机数, 即一个用于表示到达时间, 另一个用于表示服务时间)。如需对这个模型进行编程, 分析员可以在众多软件包中进行选择。举例来说, Swain 在两年一次的 DEDS 仿真软件综述的第八版中(文献[373])就列出了 48 种软件产品。目前世界范围内最流行的软件当属 Arena, 文献 [174] 对该软件进行了详细介绍。

**习题 1.3** 考虑式(1.6)中的等待时间, 它能够直接导出一个类似的队列长度公式吗?

**习题 1.4** 对服从给定服务优先权规则(不一定是 FIFO)的单服务器仿真使用两个不同的伪随机数序列有哪些优点? 这样的服务器有两个输入进程(即服务和到达进程), 将其与式(1.7)和式(1.8)中单个伪随机数序列进行比较。

对 M/M/1 模型的数学分析表明, 基本输入参数是所谓的交通速率——也称为交通密度或交通负载——用  $\rho$  表示,  $\rho = \lambda/\mu$ , 其中  $\lambda$  和  $\mu$  在式(1.7)和式(1.8)中已经定义。换句话说, M/M/1 模型具有单输入参数(即  $\rho$ ), 而其计算机程序则有两个参数( $\lambda$  和  $\mu$ )。本书将经常使用 M/M/1 模型作为示例, 此外还需要一个多输入的例子。因此这里给出另外一个 DEDS 仿真模型中非常著名的例子, 即所谓的  $(s, S)$  模型。

**定义 1.5**  $(s, S)$  模型(要求  $s < S$ ) 是一个具有随机需求量  $D$  的仓储管理(或控制)系统。当库存减少到小于或等于再订购水平值的时候,需要对库存量  $I$  进行补充。订购量  $Q$  为

$$Q = \begin{cases} S - I & I \leq s \\ 0 & I > s \end{cases} \quad (1.9)$$

这个基本模型有很多变型。例如,对库存量[式(1.9)中的  $I$ ] 的检查既可以是连续的(以实时方式),也可以是定期的;订单的交货时间既可以是非负常数,也可以是非负随机变量;需求超过了库存量( $D > I$ )时既可忽略,也可做积压处理。管理成本由存储、订购和脱销等成本构成,这些成本可以用特定的数学函数来表示。举例来说,存货的运输(或者存储)成本可能是单位数量在单位时间内消耗固定费用。实际中的脱销成本则很难计算,因此可以用指定业务量(或者填充率)的约束来代替,如每年的脱销总量应小于同期总销售额的 10%。

仓储模型的编程难度要比  $M/M/1$  模型艰巨很多,后者的动态学模型可用相对简单的式(1.6)表示。对于这个模型的程序的深入研究,推荐进一步阅读相关教科书,如 Law 所著的仿真教科书,参阅文献[227]的第 48~61 页。

DEDS 仿真和连续仿真——分别用数值解答微分方程和差分方程问题——也可以通过合并成为混合仿真。DEDS 仿真的教科书中也会涉及到这种仿真类型,还可参阅这篇发表于 2006 年的论文(文献[125])。

综上所述,仿真是一个在多门学科中得到广泛应用的方法体系,它为复杂过程的分析提供了一种灵活、有力、直观的工具,其研究结果可以用于设计更好的系统。

关于仿真还有很多内容要讲,除了前面提及的参考文献以外,还有众多优秀的教科书可供参考。举例来说,其他 DEDS 仿真领域著名的教科书(最近已经更新)有文献[22]和[293](文献[293]还讨论了系统动态学问题)。如需阅读更多 DEDS 仿真领域的最新论文,推荐读者关注每年一度的冬季仿真会议,网址是 <http://www.wintersim.org>。

在 INFORMS 的顶级刊物《管理科学和运筹学研究》中,也刊登 DEDS 仿真方面的基础性论文,参阅文献[271]和 INFORMS 的网站 <http://www.informs.org>。

很多其他管理科学和运筹学(MS/OR)方面的杂志也发表仿真方面的论文,包含 DEDS 和其他仿真类型。此外,还推荐读者阅读文献[146]和[315]对这一领域的最新综述。仿真模型的灵敏度分析是模型输出灵敏度分析会议(Sensitivity Analysis of Model Output Conference)关注的重要领域,该会议自 1995 年开始每 3 年召开一届,可登录 <http://samo2007.chem.elte.hu>, 查看该会议的详细信息。博客 <http://simio.biz/blog/>, 旨在分享仿真领域取得的进展,面向有经验和新入行的仿真从业人员发起讨论,学习仿真的学生同样可在这里发现很多有用的东西。

**习题 1.5** 娱乐性游戏(如美国陆军,参阅文献[373])、商业游戏(如系统动态学中的啤酒游戏,参阅文献[354])和博弈模拟(如使用文献[351]中讨论的 Nash 平衡模型中的概念)符合“仿真”的定义吗?

## 1.2 什么是 DASE

本书是一本关于 DASE 的专著, DASE 是仿真实验设计与分析的缩写(已经在前言中做了说明)。在此需要对涉及到的术语进行定义, 因为仿真已成为广泛应用于众多科学领域的方法, 而每个领域都有其特定的专业术语。

仿真意味着分析员不是用数学计算来解答模型, 而是尝试使用不同的模型输入和参数值来观测模型输出的变化。例如, 在 NPV 示例中(例 1.1), 分析员可以使用不同的参数  $\theta$  (贴现因素)和输入变量(每年偿还金额)进行实验, 可再次回顾式(1.1)和式(1.2); 在 M/M/1 仿真中, 分析员可以使用不同的交通速率和优先权规则(替换原有的 FIFO 规则)进行实验; 在  $(s, S)$  仓储模型中, 可以使用  $s$  和  $S$  的不同限制条件的组合开展实验。

这类数值实验的目标(参阅文献[280]和[31])包括:

- 验证和确认(V&V)
- 灵敏度分析(全局或者局部), 或是假定推测分析
- 优化
- 风险分析

以上这些目标要求仿真分析员特别关注实验的设计。举例来说, 如果实验者将仿真模型的一个输入设定为常值, 那么就不能估计这个输入对输出构成的影响。然而实际工作中, 很多分析员将很多输入定为常数, 仅用少数几个因子进行实验。在第 6 章关于筛选设计方法的讨论中, 将演示对于具有多个因子的仿真模型, 如何使用更好的方法来运行仿真实验。另一种低效的方法是每次仅改变一个输入值(同时保持所有其他输入变量固定在某一基线值), 第 2 章中将会证明这种方法是无效的, 不能用来评估输入之间的交互效应。

实验的设计与分析密切相关。实际上, 这是一个鸡和蛋的问题。例子就是分析员假设输入对输出具有“线性”效应, 换言之, 他们假设一个近似的一阶多项式(回忆一下数学中的泰勒级数)或仅有主效应(数理统计中的术语)。在这一假设下, 仅用两个输入值进行实验就够了。此外, 分析员可以假设有  $k > 1$  个输入仅有主效应, 那么他们的设计方法只需要相对很少的实验( $k$  阶)。例如, 每次只改变一个输入就能够对所有的主效应进行无偏估计。但在第 2 章中, 将演示使这些估计量的方差达到最小化所需的另一种设计方法, 这种方法的实验次数与单次单因子(one-factor-at-a-time)设计大致相同。

这样的近似多项式可以称为元模型(见作者 1975 年发表的论文, 文献[182])。

**定义 1.6** 元模型是对由基础仿真模型定义的输入输出函数关系的一种近似。

元模型又称为响应面、代理人、仿真器、辅助模型、模型副本, 等等。元模型有很多不同类型, 最常见的是是一阶或二阶多项式元模型, 第 2 章和第 3 章中将分别讨论这两种元模型。在确定性仿真中, 另一种常用的元模型称为 Kriging(也称空间相关)模型, 第 5 章中将对其进行讨论。次要一些的方法有(排序不分先后): 分类和回归树方法(CART), 广义线性



模型法(GLM),多变量自适应回归样条法(MARS),(人工)神经网络法,非线性回归模型法,非参数回归分析法,径向函数法,有理函数法,样条函数法,支持向量回归法,符号回归法,小波法,博弈论方法,贝叶斯树高斯过程模型,等等。如需了解详细内容,请查阅文献[16]、[19]、[25]、[65]、[66]、[80]、[87]、[105]、[129]、[145]、[156]、[166]、[237]、[252]、[312]、[334]、[339]、[355]、[357]、[365]、[370]、[390]、[419]和[420],文献[421]和[422]综述了多种最新的元模型方法,也可参考 Sandia 国家实验室的 Surfpack 软件,网址是 <http://endo.sandia.gov/Surfpack>; 欧盟委员会联合研究中心(JRC)的 SIMLAB 软件,网址是 <http://simlab.jrc.cec.eu.int/>; Tom Dhaene 及其 COMS 研究小组开发的“多元元模型工具箱”,网址是 [http://www.coms.ua.ac.be/?q=m3\\_toolbox](http://www.coms.ua.ac.be/?q=m3_toolbox)。

理论上讲,分析员可以综合使用各种类型的元模型,根据各种方法的估计精度来衡量它们。然而在实际工作中,由于分析员通常仅熟悉一两种方法,因此这种综合方法非常少见。文献[133]和[423]中深入研究了综合使用不同元模型的方法。

术语“响应面”在响应面方法(RSM)中用做局部元模型,而在确定性仿真中用做全局元模型。“局部”的含义是仅考虑整个实验空间中一块很小的子区间。“小”分区的局限是该区域的规模趋于0,因此要考虑偏导数。这些导数是梯度的组成部分(梯度将在本章和第4章中做进一步讨论)。RSM 方法是由 Box 和 Wilson(参阅文献[51])在1951年提出的,它是一种用于优化真实(有形的)系统的迭代启发式方法,即化工系统优化(参阅最新的教科书文献[268])。本书将在第4章中讨论 RSM 方法如何用于优化仿真系统的问题。在确定性仿真领域,现在能够很快找到的涉及术语“响应面”的最早资料,是1985年美国的一篇论文(文献[97])和1984年欧洲出版的一本专著(文献[284])。更多最近的参考文献,包括附加资料,可参阅文献[25]、[168]、[314]和[327]。

DASE 在应用上有战略和战术两个层面。传统上,离散事件仿真研究人员主要关注战术问题,诸如稳态型仿真的运行时间问题,终止型仿真的运行次数问题和方差缩减技术(VRT)等。参阅 Conway 发表于1963年的经典论文(文献[83])和上一节提及的最新文献(特别是 Nelson 的综述性论文[271])。但是在确定性仿真中不存在这些战术问题,因此统计学家主要关注战略问题,即在仿真中使用哪些因子组合(想定)和如何分析仿真实验数据,参阅 Koehler 和 Owen 于1996年出版的专著(文献[222]), Santner、Williams 和 Notz 于2003年出版的教科书(文献[333])以及2006年最新出版的教科书(文献[424])。很少有统计学家会研究随机仿真,只有部分仿真分析员关注到这一战略问题。本书将主要研究仿真实验战略问题,并只研究与战略问题紧密相关的战术问题。

实验设计(DOE)的统计理论起源于20世纪20年代农业领域中的真实无模型的实验,见 Fisher 于1926年出版的专著(文献[65]),20世纪50年代以后,该方法开始逐步应用于工业、心理学等领域。在真实实验中,无法同时研究大量因子,最多不能操作超过10个因子。此外,每个因子使用多个水平值进行实验也是相当困难的,通常每个因子的取值限制在5个以内。然而,在仿真实验中,这些约束将不再成立。事实上,计算机程序可以有数以百计的输入和参数,每个输入和参数可以设置多个取值。因此,仿真实验可以处理大量想定。此外,仿真非常适合采用连续设计而不是“单触发”设计,因为在计算机上运行的仿