

模拟 导论

〔美〕 P. 布雷特利
B. L. 福克斯 著
L. E. 舒瑞茨

机械工业出版社

模 拟 导 论

P. 布雷特利

〔美〕 B. L. 福克斯 著

L. E. 舒瑞茨

杨惟高 林迪生 孙婉如 译
何 静 袁子仁

袁 宁 何 静 校



机 械 工 业 出 版 社

模拟是一种容易理解、应用广泛的有效方法，它能帮助人们评价解决问题的各个不同方案，或预计各种条件发生的可能结果。

本书避开了繁琐的数学和理论推导，从实用模拟的角度出发，系统地论述和介绍了模拟的基本概念、随机数的产生方法、合理选择输入分布、输出分析及计算机模拟编程方法。各章节后面附有习题。书末附有产生各种分布的程序。

本书内容简炼，实用性强，适于作为高校模拟课教材，并可供广大科研人员和管理人员自学、参考。

模 拟 导 论

P. 布雷特利

〔美〕 B. L. 福克斯 著

L. E. 舒瑞茨

杨惟高 林迪生 孙婉如 译

何 静 袁子仁

袁 宁 何 静 校

*

责任编辑：王霄飞 版式设计：张世琴

封面设计：郭景云 责任校对：熊天荣

责任印制：王国光

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 14 · 字数 363 千字

1991年9月北京第一版·1991年9月北京第一次印刷

印数 0,001—1,650 · 定价：12.30元

*

ISBN 7-111-02733-7/O·65

译 序

计算机模拟、线性规划和统计方法统称为现代管理科学的三大支柱。目前，对模拟技术的研究日益深入，已综合成为一门独立的学科，并在工程技术、自然科学和经济管理等领域得到了广泛的应用。

本书论述和介绍了模拟的基本概念、方法和有关的模拟程序设计，其目的在于使读者懂得如何有效地进行模拟。本书具有内容简炼、实用性强、明白易懂的特点，是一本系统介绍模拟方法的专著，适于作为高等院校管理专业和计算机应用专业的教材，并可供广大企业管理人员和工程技术人员参考。

参加本书翻译的有：林迪生（前言、第一和第二章及附录）、袁子仁（第三章）、何静（第四章）、杨惟高（第五、六章）、孙婉如（第七、八章）。由杨惟高、何静统稿。限于我们的水平，译文中难免有误，祈望读者批评指正。

译者

前 言

模拟是指用适当的输入激励系统模型，并观察其相应的输出。它广泛应用于工程、企业以及自然科学和社会科学。模拟方法涉及计算机科学、统计学和运筹学，现已得到充分的发展，并综合成为一门独立的学科。在所有运筹学或计算机科学教学大纲中，模拟方法是必不可少的，这些领域中的大部分应用工作都包括模拟技术。模拟技术作为一种工具，就象线性规划和编译程序设计一样，是基本的工具。有时人们误认为模拟很容易，但仔细阅读本书后，你将发现其中有意想不到的难度。许多模拟研究工作在统计学上不完善，许多模拟程序的效率很低，我们希望这本书将有助于改善这种状况，并且告诉读者如何有效地进行模拟。

一个模拟项目有三个关键部分，每部分都必须认真对待。这三个部分是：

- (1) 数据收集，建立模型和验证；
- (2) 统计设计和估计；
- (3) 编程和上机实现。

随机数的生成（第5、6章）虽然贯穿整个模拟过程，但它不象上述三部分那样，没有必要对每个项目都构造随机数生成程序。通常可以利用产生随机数的软件包。这就是把有关随机数（包括主要参考资料）的各章节，放在讨论实验设计和输出分析各章之后的理由。

没有实际应用的感性认识，就不会真正理解模拟技术。因此我们给出了一些实际例子来说明理论问题。掌握建模的唯一途径是身体力行，但为了帮助尚无经验的读者形成正确的观点，本书从详细讨论建模原理入手。书中不时给出的一些具体模型，仅仅

是为了说明技术要点，而不能严格作为实际问题的合理描述，它们都是经过简化了的模型。另一方面，我们指出了模拟模型中存在的通病，即过于详尽。

模拟课程应力求只包括直接与模拟有关的主要材料，要把概率论、统计学、计算机编程以及数据结构内容都概括进去，时间不允许。为了看懂本书的大部分内容，能掌握以上各学科中的一门就足够了，但要求有一定的数学修养，例如在严格的大学课程中，通常学过高等微积分或线性代数。如果教师在课堂上简单地复习一下要点，那么优秀学生就几乎不需要正式的预备知识。书中偶尔提到的一些复杂内容，可以一带而过，不会影响连续性。第七章讨论模拟程序，几乎不需要数学基础。只有1.7节、1.9节中的若干问题以及第七章，需要有超出编制普通程序的计算机科学知识，才能完全看懂。

本书内容安排次序，反映了最自然的逻辑流程。叙述过程并不总是从易到难：第2、3章或许是本书最难的部分，1.9节中有一些很复杂的问题。正如目录后面的阅读次序图所示，它的安排次序肯定是可行的。次序图在某种程度上只说明相互关联的各章节间最重要的关系，而课程的结构是灵活的。

例如，教师以本书为基础，把集中在第一、五、六、七章的内容开设一门面向计算机科学的课程，放在大学生课程的最后一年讲授。2.1.1节、3.1节、3.2节和4.1至4.8节也不难放在涉及计算机模拟方面的大学生课程中讲授。模拟程序语言在1.1节至1.5节、1.8节以及第七章集中讨论。这一内容在详细讨论至少一种专用语言后，将结合具体编程实例加以补充。这里不打算用第七章替代语言比较参考手册；相反，我们旨在讲授一般原理的关键内容。为了充分理解本书起见，学生至少应参阅一些补充文献，理想上要求学生应该具有运用几种语言的能力。

虽然这样一本教程对计算机科学的学生或程序员来说或许认为是足够了，但对一个负责整个模拟项目的设计师来说却是不够的。在这些广泛的内容中，我们认为学生在突然上机运行模拟程

序之前，应该对理论有正确的理解。本书各章节的安排次序正是遵循这一原则。本书强调模拟统计学方面的知识；因此，若以本书做为教材，通常要求读者具有相当于一年级研究生的水平。如果学生已经具备了一些我们所希望的计算机科学基础知识，那么本书第一、七、八章可留作阅读材料。

书中大部分内容可在一学期内讲完。当然，教师也可以把它作为两个学期的课程讲授，这就还需要提供案例研究并让学生建立和验证模型，编写模拟程序并进行统计分析。如果还有剩余时间，可以从最近的研究文献中选出几篇来讨论，或者详细地研究某种实用模拟语言。全书也适合于读者自学，还可供具有不同专业、不同基础的实际工作人员参考。

习题常常是内容展开的不可分割的部分，其中有些用来测验对内容的理解程度，有些则包含不同的研究结果，而这些结果往往后面还会用到。习题中有些比较常见，有些则很难。我们将习题安排在我们认为能对读者帮助最大的地方。在继续学习后面内容之前，应该尽量多做一些前面各章节的习题。

模拟可能是通过精确的试验设计来减少性能估计值方差的唯一办法，本书充分探讨了这种可能性。在引入方差缩减法中具有适当符号的相关性时，我们突出单调性和同步性的作用。一个结论是：我们倾向于使用反演法生成非均匀随机数。这样就能从有关该主题的大量文献中，更有选择性地挑出非均匀随机数生成程序来讨论。在这些文献中有很多只是提了一下，但没有详细讨论。

有时我们也持有并非公认的观点，强调别人所不以为然的方面。我们提出的同步性和后来强调的反演的重要作用，就是这样的例子。有限水平模型一般是适用的，特别是在模拟范围内适用，这种观点在一些领域可能有争议。对这种模型进行多次重复实验，形成了十分简明的估计和统计推断基础。无限水平模型是一种技巧，偶尔也许是一种恰当的假定。它们有时很有用，常常也是有效的。对这种模型，在所有方面既完全精确又比较实用地

构造出未知参数置信区间的方法，还没有设计出来。这也许能够解释为什么在有关模拟的文献中要讨论如此之多的方法。本书涉及到的一些主要方法有：批平均值法、再生法、频谱法和自回归法。如果本书会引起尖刻的讽刺而不是温和的批评，我们的态度是：坦率地承认我们是有倾向性的。

本书详细讨论了离散事件数字模拟的所有方面，在第 1.4.2 和 1.4.3 节中也简单地讨论了所谓连续系统和混合系统的模拟。序言后面附有目录、符号的概括说明和阅读次序图。引用的参考文献单独辟为一节，放在书的末尾，它是按作者和发表年份的顺序排列的。为了避免书中内容过于杂乱，我们把较长的程序例题作为附录放在书后。

在编写本书时，我们得到很多同事和朋友的帮助。非常感谢 Robert Cooper, Eric Denardo, Luc Devroye, U. Dieter, Peter Glynn, Donald Iglehart, Donald Knuth, Patrice Marcotte, Barry Nelson, Bruce Schmeiser 以及 Ludo Vander Heyden，他们对本书前几版所提出的意见、批评和建议特别有价值。Edward Russell 提供了图 X.7.5 的实例程序，Kevin Cunningham 编写了很多绘图程序，在此一并致谢。我们还特别感谢那些虽不赞同我们的观点，但毕竟给予我们以大量帮助的朋友。

Denise St-Michel 在地方教材编审系统通过不断修改，审阅了我们的手稿，对她的细心校订深表谢意。我们还感谢 Yves Courcelles，他的软件使模型更容易理解。Noah Webster 解决了很多有争议的问题。

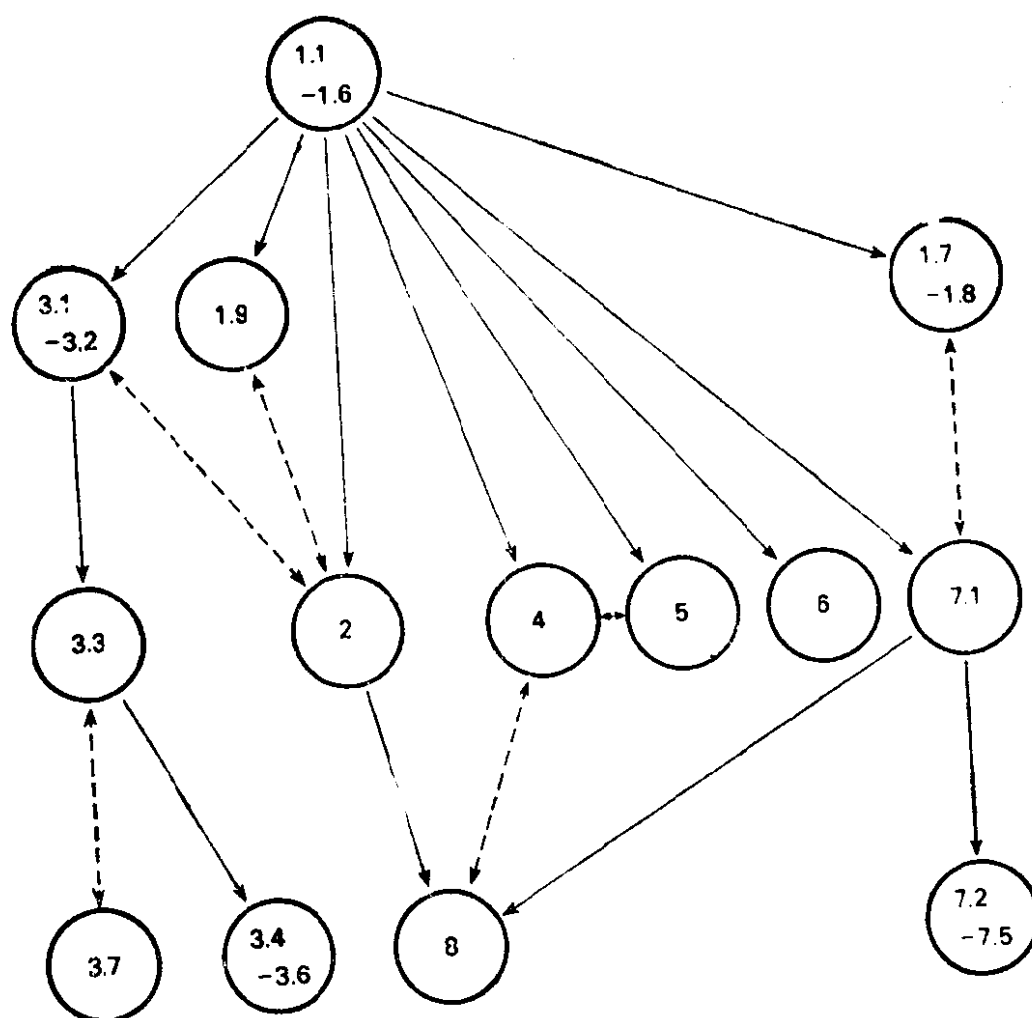
我们的工作得到了加拿大自然科学和工程科学研究委员会的大力支持。

符号说明

下列符号和缩写在书中使用时将不再加以说明。

$\log$	自然对数
$\log_2$	以 2 为底的对数
$\lceil x \rceil$	x 的上限, 等于 $\geq x$ 的最小整数
$\lfloor x \rfloor$	x 的下限, 等于 $\leq x$ 的最大整数
$g(n) = O(f(n))$	表示对所有足够大的 n , 存在一个有限常数 M , 使得 $ g(n) \leq M f(n) $
$g(n) = o(f(n))$	表示当 $n \rightarrow 0$ 或 $n \rightarrow \infty$ 时 (视上下文情况而定), $g(n)/f(n) \rightarrow 0$
ϕ	空集
$A/B/c$ 排队	具有到达时间分布 A 、服务时间分布 B 和 c 个服务台的排队 (用 M 取代 A 或 B , 则说明对应的分布为指数分布)
FIFO	先进先出排队规则 (有时也称为 FCFS, 即先来先服务规则)
LIFO	后进先出排队规则 (有时称为 LCFS)
$\Rightarrow$	随机变量分布的收敛性 (以及概率测度的弱收敛性)
iid	独立且服从相同分布
cdf	累积分布函数
pdf	概率密度函数
pmf	概率总体函数

除了少数例外, 我们用大写字母表示随机变量, 对应的小写字母表示该随机变量值。 U 总是表示 $(0, 1)$ 区间上均匀分布的随机变量, 除非上下文另有说明。



阅读次序图

1.2 = 第1章、第2节

3 → 4 = 学习第3章是学习第4章的前提

5 ↔ 6 = 第5章和第6章平行阅读为佳

目 录

符号说明

阅读次序图

第一章 概述	1
1.1 系统、模型和模拟	1
1.2 验证、近似和确认	9
1.2.1 程序验证	10
1.2.2 近似和确认	10
1.3 状态、事件和时钟	13
1.4 模拟——分类和例子	15
1.4.1 同步和非同步离散事件模拟	19
1.4.2 连续模拟	20
1.4.3 混合模拟	28
1.5 随机数概述	28
1.6 实验设计和估计的展望	30
1.7 时钟机构	34
1.8 模拟编程须知	37
1.9 其它问题	40
第二章 方差缩减法	52
2.1 公用随机数法	57
2.1.1 非正规方法	57
2.1.2 正规推导	60
2.1.3 辅助结果	66
2.2 对偶变量法	67
2.3 控制变量法	71
2.4 层次法	76
2.5 重要性抽样法	79
2.6 条件蒙特卡罗法	83

2.7 折刀法(Jackknifing)	88
第三章 输出分析	91
3.1 引言	91
3.1.1 有限范围与稳态特性	92
3.1.2 固定样本量与序贯抽样比较	95
3.2 有限范围特性的分析	96
3.2.1 绝对特性估计	96
3.2.2 相对特性估计	98
3.3 稳态特性分析	100
3.3.1 批平均值法	104
3.3.2 再生法	109
3.3.3 谱分析法	115
3.3.4 自回归分析法	120
3.3.5 几点建议	123
3.4 处理业务基准的特性分析	124
3.5 有效估计值和间接估计值	125
3.6 习题	126
3.7 更新理论初步	130
第四章 合理选择输入分布	139
4.1 加法和正态分布	142
4.2 乘法和对数正态分布	144
4.3 无记忆性与指数分布	144
4.4 叠加、泊松分布与指数分布	145
4.5 最小化和威布尔分布	145
4.6 经验-指数混合分布	146
4.7 极值与间距	148
4.8 何时不采用理论分布	149
4.9 非平稳泊松过程	152
第五章 非均匀随机数	163
5.1 引言	163
5.2 一般方法	164
5.2.1 反演法	165

X

5.2.2	逆变换的列表近似法	168
5.2.3	经验累积分布函数法	169
5.2.4	经验分布和指数分布的混合方法	169
5.2.5	舍选法	170
5.2.6	广义舍选法	172
5.2.7	组合法	175
5.2.8	离散分布的化名方法	178
5.2.9	逆变换的函数近似法	181
5.2.10	其它灵活方法	182
5.3	连续分布	185
5.3.1	非标准正态分布	185
5.3.2	多维 (相关) 正态分布	186
5.3.3	对称稳定变量	186
5.3.4	柯西分布	189
5.3.5	对数正态分布	190
5.3.6	指数分布	190
5.3.7	超指数分布	191
5.3.8	拉普拉斯分布和指数幂分布	192
5.3.9	爱尔朗分布和伽玛分布	194
5.3.10	β 分布	195
5.3.11	X^2 -分布	198
5.3.12	F -分布	198
5.3.13	t -分布	199
5.3.14	威布尔分布	199
5.3.15	冈贝尔分布	200
5.3.16	对数分布	202
5.3.17	广义 λ 分布	202
5.3.18	非均匀泊松过程	202
5.4	离散分布	205
5.4.1	二项分布	205
5.4.2	泊松分布	206
5.4.3	混合泊松分布	207

5.4.4	超几何分布	208
5.4.5	几何分布	209
5.4.6	负二项分布和帕斯卡分布	210
5.4.7	多维泊松分布	210
5.5	习题	211
5.6	时间测定	214
第六章 均匀随机数		217
6.1	随机数概述	217
6.2	随机性的构成	217
6.3	发生器的分类	219
6.3.1	随机装置	220
6.3.2	随机数表	220
6.3.3	中值平方法	220
6.3.4	黄金分割法 (Fibonacci) 和附加同余发生器	221
6.3.5	线性同余发生器	221
6.3.6	线性递推模 2 发生器	224
6.3.7	发生器的组合	229
6.4	在理论指导下选择良好的发生器	232
6.4.1	线性同余发生器的序列相关	232
6.4.2	线性同余发生器的周期长度	233
6.4.3	Tausworthe 发生器的周期长度	235
6.4.4	频数检验	235
6.5	均匀随机数发生器的实现	238
6.5.1	模为 2^k 的乘法发生器	238
6.5.2	具有素数模的乘法发生器	240
6.5.3	Tausworthe 发生器的实现	244
6.6	均匀随机数发生器的经验检验	245
6.6.1	χ^2 检验	246
6.6.2	柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫 (Kolmogorov-Smirnov) 检验	247
6.6.3	均匀随机数序列的特殊检验	248
6.7	均匀随机数发生器的正确使用	250

Ⅺ

6.7.1 生成任意区间内均匀分布的随机整数·····	250
6.7.2 乘法发生器低位中的非随机性·····	252
6.7.3 线性同余发生器和 Box-Muller方法 ·····	252
6.8 均匀发生器特殊性质的利用·····	253
6.8.1 利用乘法同余发生器生成对偶变量·····	253
6.8.2 生成逆序随机数流·····	254
6.8.3 生成不相交序列·····	256
第七章 模拟程序设计·····	257
7.1 采用通用语言的模拟·····	258
7.1.1 最简单可能的时钟机构·····	259
7.1.2 生成随机变量·····	262
7.1.3 Fortran中的数据结构 ·····	263
7.1.4 Fortran的完整模拟 ·····	264
7.1.5 Fortran模拟程序包 ·····	267
7.1.6 标准例子——自然方法·····	268
7.1.7 采用 Pascal 语言的模拟 ·····	272
7.2 Simscript语言 ·····	275
7.2.1 Simscript的数据结构 ·····	277
7.2.2 Simscript语言与模拟 ·····	279
7.2.3 Simscript的完整模拟 ·····	281
7.2.4 使用Simscript语言的标准例子 ·····	284
7.2.5 进程和资源·····	285
7.2.6 小结·····	285
7.3 GPSS 语言·····	286
7.3.1 基本概念·····	286
7.3.2 GPSS 的资源·····	289
7.3.3 生成随机变量·····	291
7.3.4 GPSS 的完整模拟·····	294
7.3.5 使用 GPSS语言的标准例子·····	297
7.3.6 小结·····	299
7.4 Simula 语言 ·····	301
7.4.1 Simula 中的类程概念 ·····	301

7.4.2 采用系统类程和程序的模拟	304
7.4.3 Simula 的完整模拟	309
7.4.4 Demos 语言	311
7.4.5 在 Simula 中使用 Demos 的标准例子	315
7.4.6 小结	316
7.5 模拟程序设计中的一般考虑	318
7.5.1 语言设计	318
7.5.2 模拟中的系统考虑	321
7.5.3 统计考虑	323
第八章 缩减方差的程序设计	324
8.1 选择输入分布	325
8.1.1 采用精确方法	325
8.1.2 列表分布的求逆	325
8.1.3 采用经验-指数混合分布	327
8.1.4 检验健全性	329
8.2 公用随机数法	331
8.3 对偶变量法	334
8.4 控制变量法	336
8.4.1 简单方法	336
8.4.2 分裂回归法	339
8.4.3 折刀回归法	340
8.5 分层抽样法	341
8.6 重要性抽样法	343
8.7 条件蒙特卡罗法	346
8.8 总结	347
附录 A Shapiro-Wilk 正态性检验	350
附录 L 随机数生成程序	354
附录 X 模拟程序设计举例	393
参考文献	419

第一章 概 述

本书的每位读者应该首先阅读这一章的前6节：模型（1.1节）；验证和确认（1.2节）；状态、事件和时钟（1.3节）；模拟的分类和一些例子（1.4节）；随机数概述（1.5节）；实验设计和估计的展望（1.6节）。这几节为本书其余部分奠定了基础。第1.4.2小节（连续模拟）和第1.4.3小节（混合模拟）在后面章节中没有用到，故第一次阅读时可以跳过。

第1.7节论述时钟机构，1.8节论述编程，在第一次阅读时可以浏览一下，而把注意力主要放在模拟的统计方面。虽然我们建议把第1.7节、1.8节与第七章放在一起阅读，但这两节都不是阅读其它章节的前提条件。

第1.7节和可选读的第1.9节完全是技术性的，这点对以后各章具有代表性。其它各节的内容更是综合性的。这里，为避免干扰我们的叙述，将使数学符号保持最少。第1.8节是使用模拟程序的一些提示，第七章和第八章中还会进一步讨论。

1.1 系统、模型和模拟

模型是对系统的一种描述，它想要预测：当对系统采取某种行动时，将会发生什么情况。事实上，任何有用的模型都必须加以简化和理想化。系统和模型的边界条件，往往多少是人为规定的。与系统相关的大多数约束条件，都必须根据经验加以忽略，以保证模型容易处理，即使这种忽略的正确性没有得到严格的证明时也必须如此。可以预料，模型比实际系统容易定义。对一个有用的模型，重要的问题是给出合理的有限描述符集合，系统的有关行为和特性能用实际方法确定，其中包括解析法、数值法，或者用某种输入（典型的是随机输入）激励模型并观察对应的输出，后一种方法称为模拟。