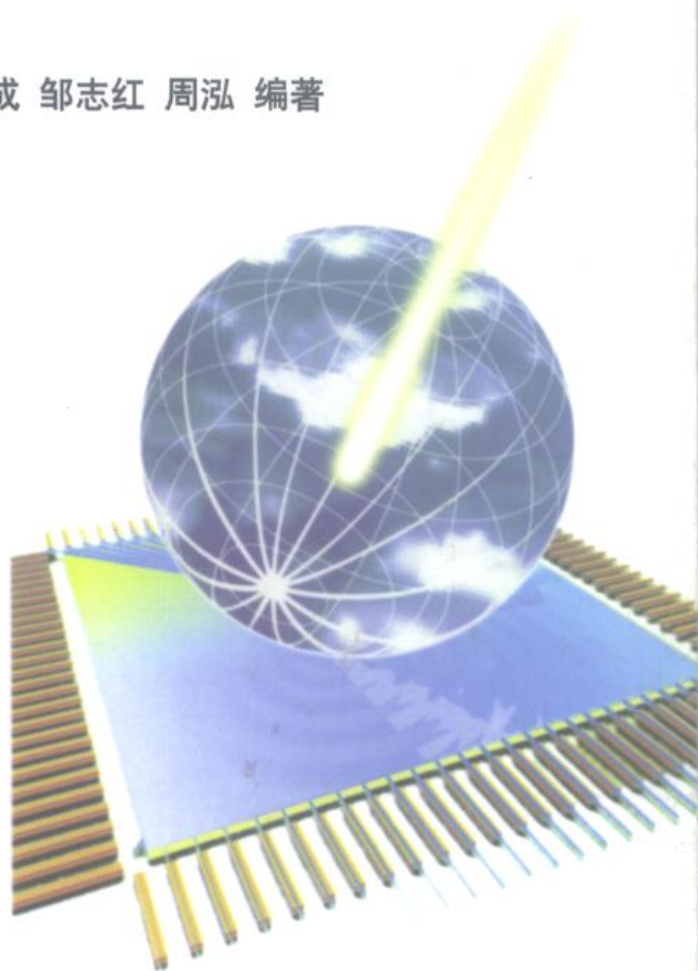


机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

离散系统仿真

冯允成 邹志红 周泓 编著



机械工业出版社

离散系统仿真

冯允成 邹志红 周泓 编著



机械工业出版社

离散系统仿真是系统仿真中的一个重要分支,具有广泛的应用前景。本书是在总结我们十余年研究成果的基础上,综合国内外最新研究发展趋势,对离散系统仿真进行系统论述和分析的一本专门著作。本书包括系统仿真和蒙特卡洛方法论、离散系统仿真的基本原理、伪随机数和随机变量的生成与检验、仿真输出数据的统计分析、仿真模型的确认、仿真优化理论、智能化仿真系统以及面向对象的仿真等内容。

本书可供广大科研人员、技术人员、管理人员阅读和参考。也可用作高等院校工科、管理学科、经济学科的博士研究生、硕士研究生及有关专业本科生的教学和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

离散系统仿真/冯允成等编著. —北京:机械工业出版社, 1998. 12

ISBN 7-111-06675-8

I. 离… II. 冯… III. 离散系统(自动化) — 系统仿真 IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 27380 号

出版人:马九荣(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:商红云 王霄飞 版式设计:冉晓华

责任校对:李汝康 封面设计:海之帆

责任印制:路琳

北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₃₂·11 印张·239 千字

0 001—2 000 册

定价:19.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

系统仿真以多种学科理论为基础，以计算机及相应的仿真软件为工具进行实验研究的理论和方法论体系。它体现了实验思考的方法，用以探索复杂系统深层次的运动机理和规律性，具有科学的先验性。

海湾战争以后，美军公布了在战胜伊拉克过程中，在战略战术的制订和在战役、战术上对兵力部署和调动前，采用系统仿真辅助作战的成功案例，给予各国军事参谋部门以重要启示。美国总统办公室和国防部从 1992 年以来，每年均修订和公布其国家关键技术和国防关键技术实施规划，其中“仿真与建模”一直列入优先发展的先进技术，并认为是经济的高技术。我国国防系统也于 1993 年制订了相应的国防关键技术规则，“仿真与建模”也列入规划。这表明各国领导层都对系统仿真给予了高度重视。

从 60 年代末期离散系统仿真软件 GPSS 问世以来，系统仿真（特别是离散系统仿真）已在工业、交通运输、通信网络、航空航天、医疗卫生、林业、军事作战以及社会服务系统、金融银行等领域得到广泛的应用，取得十分可观的经济效益和社会效益。我国航天工业部门为适应导弹和宇航研究与设计的需要，于 90 年代初期建立了我国规模最大的航天系统仿真中心，对航天系统的研制起到重要的作用。深圳市也成立了系统仿真公司，主要进行电力系统仿真。此外，我国交通、能源、化工等部门在新建项目立项前都进行相应的仿真运行实验和评估。这些都表明系统仿真已在领导层得到认可。

在学术研究方面，国内外研究工作都有长足进展，在离散仿真的机制，仿真的统计性质和输出数据统计分析，随机数发生器的算法与检验，仿真优化理论，连续、离散混合仿真系统，智能化仿真系统，分布式仿真系统，多媒体可视化仿真系统，虚拟现实仿真，因特网上实时仿真以及定性仿真等方面均有大量的研究成果。国内在离散系统仿真的理论研究方面也取得较好的成果，但与国外相比仍有差距。

本书是在我们对离散系统仿真十余年研究工作的基础上，综合国内外最新研究成果进行编写的，内容覆盖离散系统仿真的主要领域，力图系统地论述离散系统仿真的理论和方法，使之成为一本系统仿真领域中的专门著作。

在研究工作和成书过程中，我们也体会到系统仿真是继理论分析和实物实验（或演习）之后，认识客观世界规律性的有力手段，它可以把复杂系统的运行放在实验室中进行，具有良好的可控性、无破坏性和经济性，在辅助决策、计划优化、管理调度、方案比较、军事训练、投资风险、辅助设计以及谈判策略等方面均有巨大的应用潜力。希望本书读者在阅读本书之后也能得到一定的启示。

全书由冯允成组织撰写并统稿。第一、二章由冯允成编写；第三、四、五、六、七章第一、二、三节由邹志红编写；第七章第四节、第八、九、十、十一、十二章由周泓编写。编写过程中，还得到了张正军、冯惠军、陈智民等人的帮助和支持，在此谨表诚挚的谢意。

本书得到国家自然科学基金委员会的资助。

由于作者水平有限，不妥之处在所难免，诚望广大读者批评指正。

作者

目 录

前言

第一章 系统仿真概论	1
一、概述	1
二、系统仿真的建模和类别	3
三、系统仿真的基本步骤	6
四、系统仿真的发展	13
第二章 离散系统仿真原理	19
一、蒙特卡罗 (Monte-Carlo) 方法论	19
二、离散系统仿真基本原理	31
第三章 均匀分布随机数的生成与检验	48
一、概述	48
二、(伪) 随机数的生成及其本质	49
三、常用随机数发生器	52
四、随机数发生器的性能检验	66
第四章 随机变量的生成	76
一、逆变法	76
二、函数变换法	80
三、卷积法	85
四、组合法	88
五、取舍法	89
六、近似法	95
七、随机向量的生成	98
第五章 仿真输入数据分析	101

一、样本的独立性判别	101
二、分布形式假定	103
三、参数估计	109
四、概率密度函数估计	113
五、分布函数的 Bootstrap 估计	114
六、分布假设检验	118
七、利用计算机图形进行分布拟合	122
第六章 仿真输出数据分析	129
一、系统的性能测度及其估计	129
二、仿真类型	131
三、终态仿真输出分析	132
四、稳态仿真的置信区间	135
五、系统性能测度的贝叶斯估计方法	147
六、系统平均性能测度的稳健估计	154
七、其它性能测度的估计	167
八、系统性能测度的 Bootstrap 估计	176
九、方差衰减技术	186
第七章 仿真模型的确认	191
一、仿真模型的验证	191
二、仿真模型确认的“三步法”	194
三、比较仿真输出数据与实际观察数据的统计方法	198
四、仿真模型确认专家系统	205
第八章 仿真优化的基本原理与方法	211
一、仿真优化问题的描述	212
二、求解仿真优化问题的基本方法简介	216
三、仿真优化中的梯度估计问题	224
四、仿真优化算法的试验与评价	227
五、仿真优化理论的新进展	233
第九章 仿真优化的响应曲面方法	239

一、一阶响应曲面的试验设计·····	240
二、终态仿真模式下—阶响应曲面参数的估计·····	243
三、稳态仿真模式下—阶响应曲面参数的估计·····	249
四、一阶响应曲面上的统计检验·····	252
五、一阶响应曲面上的寻优过程·····	255
六、二阶响应曲面分析·····	259
七、响应曲面下的约束最优化问题·····	264
第十章 仿真优化的随机逼近方法 ·····	268
一、随机逼近算法的基本原理·····	268
二、无约束仿真优化问题的随机逼近法·····	270
三、约束仿真优化问题的随机逼近法·····	275
第十一章 智能离散仿真系统 ·····	280
一、人工智能与仿真·····	280
二、基于知识的离散系统仿真方法·····	284
三、智能化仿真建模辅助系统·····	289
四、智能化仿真数据分析系统·····	292
五、基于知识的仿真系统的开发与建造·····	297
第十二章 面向对象的仿真系统 ·····	303
一、面向对象的方法·····	303
二、面向对象的离散事件系统仿真建模框架·····	310
三、面向对象的离散事件系统仿真模型结构·····	320
四、面向对象的辅助仿真建模系统·····	324
附录 ·····	328
参考文献 ·····	336

第一章 系统仿真概论

一、概述

系统仿真是以系统理论、形式化理论、随机过程与统计学理论和优化理论为基础，以计算机和仿真系统软件为工具，对现实系统或未来系统进行动态实验研究的理论和方法。

从系统仿真的实施过程来看，系统仿真是通过对所研究系统的认识和了解，抽取其中的基本要素的关键参数，建立与现实系统相对应的仿真模型，经过模型的确认和仿真程序的验证，在仿真实验设计的基础上，对该模型进行仿真实验，以模仿系统的运行过程，观察系统状态变量随时间变化的动态规律性，并通过数据采集和统计分析，得到被仿真系统参数的统计特性，据此推断和估计系统的真实参数和性能测度，为辅助决策提供依据。

首先，系统仿真是一种实验技术，它为一些复杂系统创造了一种计算机实验环境，使系统的未来性能测度和长期动态特性，能在相对极短的时间内在计算机上得到实现。其次，为了有效地进行仿真实验，就需要在一定仿真语言支持下，建立经过抽象和简化的仿真模型，通常仿真模型具有面向实际问题和面向运行过程的特征，模型中可以包含反映系统本质的逻辑关系和数学关系。第三，系统仿真的输出结果

是在仿真实验运行过程中，不断对系统行为和系统状态进行观察和统计而得到的，并且，这种观察和统计是由仿真软件自动完成的。第四，系统仿真研究的对象往往包含多种随机因素的综合作用，每次仿真运行只是对系统行为的一次随机抽样。因此，一次完整的仿真实验往往由多次独立的重复仿真运行所组成，所得到的仿真结果也只是对所研究系统进行具有一定样本量的仿真实验的随机样本。有鉴于此，必须通过科学的统计推断，才能得出真实的系统性能估计。

从学科领域来看，系统仿真是运筹学的一个重要分支，它与线性规划和网络技术一起被称为运筹学在应用领域中的三大支柱。在求解复杂系统中，系统仿真具有不可忽视的优越性。

从系统仿真的进程中，人们逐渐认识到：

①系统仿真技术已成为继理论分析和实物实验之后，认识客观世界规律性的新型手段，它可以将研制过程、运行过程和实施过程放在实验室中进行，具有良好的可控制、无破坏性、可复现性和经济性等特点。

②系统仿真在理论上体现了实验思考的方法论。用它可以探索高技术领域和复杂系统深层次的运动机理和规律性，给出人们直观逻辑推理不能预见的系统动态特征，具有科学的先验性。

③对于包含多种随机因素的复杂系统，通常难以用数学模型或解析方法作精确地描述和求解。系统仿真则可根据系统内部的逻辑关系和数学关系，面向系统的实际过程和行为来构造仿真模型，在很少假设或不作假设的前提下建立包括系统主要因素和具体细节的模型框架，并通过仿真实验运行，得到复杂系统的解。因而被称为科学技术领域中“最后

的方法”。

④系统仿真建模具有面向过程的特点，仿真模型与所研究系统的运行过程在形式上和逻辑上存在对应性，避免了建立抽象数学模型的困难，显著简化了建模过程，具有直观性，使广大科技人员和管理、决策人员都能成为系统仿真的直接使用者。

⑤随着系统仿真实理论和计算机技术的发展，系统仿真已跻身于高新技术领域，使系统仿真与人工智能技术、并行处理技术、分布式仿真、优化理论、三维图像处理技术以及多媒体技术等融为一体，并逐步步入虚拟现实仿真、互联网上仿真以及群决策仿真研讨厅等领域。目前已列入我国国家和国防关键技术发展计划。

鉴于系统仿真的优点，已在工业生产、交通运输、能源供应、医疗卫生、航空航天、军事作战、制造过程以及社会服务等领域得到广泛的应用。在各行各业中，应用于生产运行管理、设计方案论证、企业诊断、高层次决策分析、投资风险、谈判策略等等方面，具有巨大的应用潜力。

二、系统仿真的建模和类别

人们要研究一个真实系统或未来系统的性能，往往需要建立对应于该系统的模型，通过对模型的详细研究，从中抽取出系统的基本性能测度。

所谓模型就是对实际系统的一种抽象的、本质的描述。首先，模型必须是现实系统的一种抽象，它是在一定假设条件下对系统的简化。其次，模型中必须包含系统中的主要因素，模型不可能与实际系统完全对应，而只应当包含那些决定系统本质属性的重要因素。第三，为了进行定量分析，模

型中必须反映出各主要因素之间的逻辑关系和数学关系，使模型对系统具有代表性。

仿真模型同样必须符合上述各项要求。仿真模型的特点在于面向问题和面向过程的建模过程，并且适合于在仿真环境下，通过模仿系统的行为来求解问题。

仿真模型基本上可分为离散系统仿真模型和连续系统仿真模型两类，它们主要取决于所研究系统的性质。在离散性系统中，表示系统性能的状态变量只在随机的时间点上发生跃变，而在两个时间点之间，系统的状态不发生任何变化。例如公共汽车的运行状态可以用行驶和到站停车，受交通灯控制而暂时停车，以及车上乘客人数、售票金额等表示。公共汽车在行驶过程中受到交通拥挤程度和交通信号灯等随机因素的影响，其状态变量将在离散的随机时点上发生变化，车上的乘客人数的变化仅在到站停车的时点上发生，由于乘客所去目的地的随机性和不同车站上乘客到达的随机性，车上乘客人数和售票金额等将是离散型随机变量，其数值仅在离散的随机时点上发生跃变。

在连续性系统中，系统的状态变量与时间和某些参变量（如时间、温度、压力等）之间存在某种连续的函数关系，当参变量发生变化时，系统状态也随之发生相应的连续变化。例如，飞机的飞行高度与飞行速度的关系，导弹的飞行轨迹方程，以及人口变化的动态方程等，都可构造成连续性仿真模型。

由于系统的复杂性日益提高以及不同系统之间的集成被广泛应用，从而出现了离散和连续性存在于同一系统的情况，于是需要建立既包含离散型随机变量又包含连续型随机变量的仿真模型，或称混合型仿真模型。在仿真过程中，系

统的状态变量随仿真时钟的推进而连续地变化，当该变量的值达到某一阈值时，或出现某一离散随机事件时，该变量也将发生跃变。例如，油船船队向港口输油与炼油系统输送原油的过程，就是一种典型的混合仿真模型。当油船到达港口并与输油管道连接时，系统中输入原油流量、贮油罐贮量及炼油厂炼油量等状态变量均呈连续变化状态，但是当油船输完原油离港时，或油船船队均处于航行中时，系统的输入流量将降低至0。而当油罐贮量达到最低贮量时，停止向炼油厂供油，则炼油量也将降低到0。因此系统的状态变量将呈现离散与连续交替变化的状态。

图 1-1 表明不同仿真模型中，状态变量的动态变化特征。

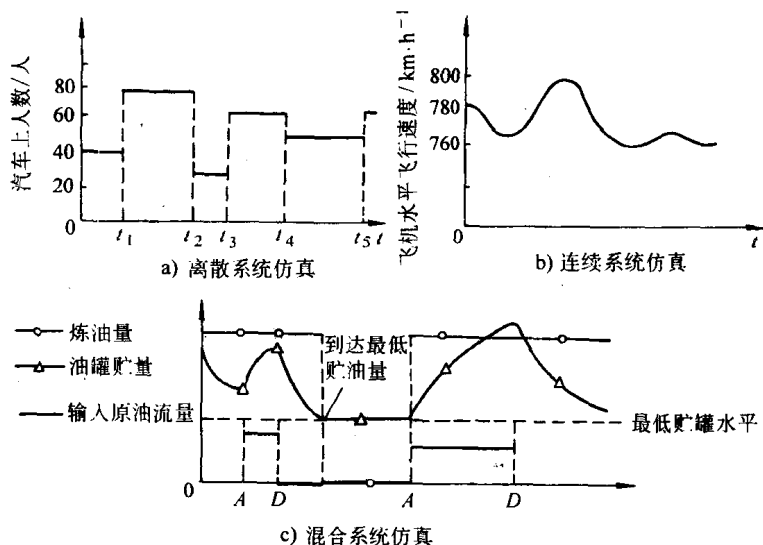


图 1-1 仿真模型的类别

应当看到,在仿真领域中,对仿真模型的分类并不是绝对的。有的连续系统往往通过离散化技术来建模,例如按固定步长来进行积分。而有些离散系统也可以建立连续仿真模型,如人口仿真模型将离散的人口变量转化为连续变量来处理。有些确定型的问题,也可转化为随机型仿真模型,如用 Monte-Carlo 方法求积分时,采用随机抽取样本点和条件判断方法,可以得到相当精确的结果。

三、系统仿真的基本步骤

系统仿真的建模求解与其它建模方法论的不同点主要在于其建模的不唯一性和求解过程的实验性。有鉴于此,系统仿真必须遵循一定的步骤,才能保证建模的有效性和仿真运行结果的正确性。

1. 阐明问题和目标设定

每项仿真研究都应从所研究系统的说明开始,只有对该系统具有深入的了解,明确需要解决的问题和应达到的目标,并且在这些问题上与决策者取得一致意见,才能为仿真建模与仿真运行提供可靠的基础。所谓仿真建模的目标是指通过仿真能够回答的问题,因此在问题阐述阶段中,必须首先对应用系统仿真是否能够回答这个问题和达到预定目标作出判断。如果确实可行,通常还需要制定一种非仿真建模的方案,以便于对不同方法所得到的结果进行比较,验证仿真模型的正确性和经济性。

在确定一致认可的目标以后,还需选择描述这些目标的主要环节和状态变量,明确定义所研究问题的范围和边界,凡是与目标和主要状态变量密切相关的环节,都应包含在仿真模型之中,那些与仿真目标或状态变量无关或影响不大的

环节, 则应排除在外或作为仿真的外部环境加以考虑。此外, 还应规定仿真的初始条件, 并充分估计初始条件对系统主要性能的影响。

2. 仿真建模

仿真模型是对所研究系统运行过程的一种抽象描述并能反映系统的本质属性。

仿真建模具有本身所固有的特点, 通常仿真建模是面向问题和运行过程的建模方式。在离散系统仿真的建模中, 主要应根据随机发生的离散事件、代表系统中所描述主要对象的实体流以及仿真时间的推进机制, 按照系统的运行进程来建立模型。对于连续系统的仿真建模, 则主要根据系统内部各个环节之间的因果关系, 系统运行的流程, 按一定方式建立相应的状态方程——差分方程或微分方程来进行仿真建模。对于混合系统而言, 则既需要针对连续变量建立相应的状态方程, 同时, 也要在模型中设定相应的随机离散事件和相应的动态实体流。特别是在出现离散事件和连续变量达到阈值时, 状态变量的跃变过程。通常, 在混合仿真中均采用固定步长的时间推进机制, 以适应离散、连续两类变量的要求。

应该指出的是, 仿真建模, 尤其是离散系统建模, 所给出的仿真模型, 往往不具有唯一性。对于同一系统中的同一问题, 由于仿真建模人员的背景和偏好不同, 可能建成迥然不同的仿真模型。不同人员对问题描述的逻辑思维、繁简程度以及模型结构等都可能存在差异, 但是它们的运行结果却又可能比较相近或均能满足仿真目标的基本要求。也就是说, 存在仿真模型的风格问题。因此, 仿真建模在一定程度上是一种“建模艺术”, 并不单纯是仿真技术。仿真建模人

员由于其艺术风格不同，可以也允许建立具有特殊风格的仿真模型，从而带有一定的特色。从本质上说，仿真过程仍是一种科学的实验过程，仿真模型必须经受理论和实践的检验，因而在仿真建模过程中还必须有严格的“确认（Validation）”和“验证”（Verification）环节，以保证建模的科学性。

3. 数据采集

仿真模型给出了系统仿真的构架和驱体，只有在输入正确数据的基础上，仿真运行才能调动模型内部的逻辑关系和数学关系，进行相应的运算和统计计算，并给出准确的仿真输出结果。缺乏正确的输入数据，只能使系统仿真起到误导决策的严重后果。

随着系统复杂性和随机性的增强，数据采集在系统仿真中所占的份额也越来越大，从确定仿真目标开始就应进行数据采集工作，并贯穿于系统仿真的全过程。除了必要的仿真输入数据以外，还必须采集与仿真初始条件及系统内部变量有关的数据。这些数据往往是某种概率分布的随机变量的抽样结果，通常需要大量系统运行的历史数据，或对类似现实系统进行大量实验才能获得。许多输入数据还需经过分布拟合、参数估计以及假设检验等步骤，确定随机变量的概率密度函数或经验分布函数，以便输入仿真模型，实施仿真运行。

4. 仿真模型的确认

在仿真建模中，所建立的仿真模型能否代表所研究的真实系统，这是决定仿真成败的关键。按照统一的标准对仿真模型和代表性进行衡量，这就是仿真模型的确认。目前常用的是三步法确认，第一步由熟知该系统的专家对仿真模型作

直观的和内涵的分析评价，第二步是对模型所作的假设、输入数据的合理性进行检验，第三步是对模型作试运行，观察初步仿真结果与真实系统的统计数据是否一致，或改变主要输入变量的数值时，仿真输出变量的变化趋势是否合理。通过以上三个步骤，一般认为仿真模型已得到了确认。但是，仿真模型确认是一个不断修改和改善的过程，在上述各个阶段中都可能发现模型中的错误或不合理处，在确认中对模型进行局部或较大的修改则是正常现象。从系统仿真的发展过程来看，对仿真模型的确认无论从理论上或方法上都尚未达到完善的程度，这仍是今后的重要研究课题之一。

5. 仿真程序的编制和验证

仿真模型只是系统的一种抽象和运行框架，必须将仿真模型转化成计算机能识别和执行的代码，以便通过计算机进行必要的仿真实验。早期的仿真程序往往采用通用程序语言进行编程（如 Fortran、Basic 和 Algol 语言等），由于仿真器本身的复杂性和用户对仿真输入/输出数据的苛刻要求，使用通用程序设计语言编程将会耗用巨大的工作量，并且使系统仿真成为少数程序设计专家的领域，而将广大的科技人员、管理人员和决策人员排除在外。

近三十年来，随着系统仿真的推广和应用，许多面向事件、面向过程和面向对象的仿真语言纷纷问世，如面向事件的 SIGMA、GASP 等仿真语言，面向过程的 GPSS/H、SIMSCRIPT/II .5, SLAM/II、SIMAN/V 等，面向对象的 SIMPLE++，SIMULINK 等，明显地方便了用户的编程工作。同时，由于仿真语言均以宏语句形式编程，从而使仿真程序显得紧凑而精练。据统计，对于同样的模型，用仿真语言编程比用通用程序语言编程，程序语句的数目约可减少