



教育部高等学校管理科学与工程类学科专业  
教学指导委员会推荐教材

# 离散系统仿真与优化 ——面向工业工程的应用

Discrete-Event System  
Simulation and Optimization:  
Industrial Engineering Oriented Applications

主 编 王 谦  
副主编 李 波



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

教育部高等学校管理科学  
与工程类学科专业教学指导委员会推荐教材

# 离散系统仿真与优化

——面向工业工程的应用

王 谦 主 编  
李 波 副主编



机械工业出版社

本书系统地介绍了离散系统仿真与优化的相关理论,基本按照系统建模、仿真与优化的应用步骤展开,并包含该领域的最新研究成果。全书包括系统建模理论、仿真软件、模型校验和确认、输入数据分析、随机数和随机变量生成、仿真输出分析、基于仿真的系统优化方法等章节,以及应用实例分析等内容。

## 图书在版编目(CIP)数据

离散系统仿真与优化:面向工业工程的应用/王谦主编. —北京:机械工业出版社, 2016. 5

教育部高等学校管理科学与工程类学科专业教学指导委员会推荐教材  
ISBN 978-7-111-55090-7

I. ①离… II. ①王… III. ①离散系统—系统仿真—高等学校—教材  
②离散系统—离散优化—高等学校—教材 IV. ①O231

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第244936号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

总策划:邓海平 张敬柱

策划编辑:易敏 责任编辑:易敏 李乐 刘丽敏

责任校对:樊钟英 封面设计:张静

责任印制:李飞

北京云浩印刷有限责任公司印刷

2016年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·12.25印张·276千字

标准书号:ISBN 978-7-111-55090-7

定价:32.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

教育部高等学校管理科学与工程类学科  
专业教学指导委员会推荐教材

编 审 委 员 会

主 任：齐二石

委 员（按拼音排序）：

陈友玲 程 光 池仁勇 戴庆辉 邓修权 丁荣贵 杜 纲 方庆瑄  
冯海旗 甘卫华 高举红 顾 问 郭 伏 韩同银 何 楨 洪 军  
侯云先 胡奇英 贾铁军 蒋祖华 雷家骅 雷 明 李 华 刘炳辉  
刘正刚 鲁建厦 吕建军 罗 党 马寿峰 马义中 马志强 梅 强  
宁 凌 戚安邦 綦振平 邱菀华 沈 江 宋明顺 宋 伟 宋宇辰  
苏 秦 孙明波 唐楚生 田 军 王长峰 王 成 王福林 王建民  
王金凤 王雷震 王 谦 王淑英 王 旭 吴爱华 吴凤祥 相里六续  
向 阳 肖 明 许映秋 薛恒新 杨 铭 余晓流 张勤生 张 新  
赵喜仓 郑永前 周宏明 周 泓 周 宁 周跃进 朱永明

秘 书 长：王 媛

副 秘 书 长：邓海平 张敬柱

# 序

当前，我国已成为全球第二大经济体，且经济仍维持着较高的增速。如何在发展经济的同时，建设资源节约型、环境友好型的和谐社会，如何从资源消耗型、劳动密集型的粗放型发展模式，转变为“科技进步，劳动者素质提高，管理创新”型的低成本、高效率、高质量、注重环保的精益发展模式，就成为摆在我们面前的亟待解决的课题。应用现代科学方法与科技成就来阐明和揭示管理活动的规律，以提高管理的效率为特征的管理科学与工程类学科，无疑是破解这个难题的重要手段和工具。因此，尽快培养一大批精于管理科学、精于工程理论和方法，并能将其灵活运用于实践的高层次人才，就显得尤为迫切。

为了提升人才育成质量，近年来教育部等相关部委出台了一系列指导意见，如《高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》等，以此来进一步深化高等学校的教学改革，提高人才培养的能力和水平，更好地满足经济社会发展对高素质创新型人才的需要。教育部高等学校管理科学与工程类专业教学指导委员会（以下简称教指委）也积极采取措施，组织专家编写出版了“工业工程”“工程管理”“信息管理与信息系统”“管理科学与工程”等专业的系列教材，如由机械工业出版社出版的“21世纪工业工程专业规划教材”就是其中的成功典范。这些教材的出版，初步满足了高等学校管理科学与工程学科教学的需要。

但是，随着我国国民经济的高速发展和国际地位的不断提高，国家和社会对管理学科的发展提出了更高的要求，对相关人才的需求也越来越广泛。在此背景下，教指委在深入调研的基础上，决定全面、系统、高质量地建设一批适合高等学校本科教学要求和教学改革方向的管理科学与工程类学科系列教材，以推动管理科学与工程类学科教学和教材建设工作的健康、有序发展。为此，在“十一五”后期，教指委联合机械工业出版社采用招标的方式开展了面向全国的优秀教材遴选工作，先后共收到投标立项申请书300多份，经教指委组织专家严格评审、筛选，有60余部教材纳入了规划（其中，有20多种教材是国家级或省级精品课配套教材）。2010年1月9日，“全国高等学校管理科学与工程类学科系列规划教材启动会”在北京召开，来自全国50多所著名大学和普通院校的80多名专家学者参加了会议，并对该套教材的定位、特色、出版进度等进行了深入、细致的分析、研讨和规划。

本套教材在充分吸收先前教材成果的基础上，坚持全面、系统、高质量的建设原则，从完善学科体系的高度出发，进行了全方位的规划，既包括学科核心课、专业主干课教材，也涵盖了特色专业课教材，以及主干课程案例教材等。同时，为了保证整套教材的规

范性、系统性、原创性和实用性，还从结构、内容等方面详细制定了本套教材的“编写指引”，如在内容组织上，要求工具、手段、方法明确，定量分析清楚，适当增加文献综述、趋势展望，以及实用性、可操作性强的案例等内容。此外，为了方便教学，每本教材都配有 CAI 课件，并采用双色印刷。

本套教材的编写单位既包括了北京大学、清华大学、西安交通大学、天津大学、南开大学、北京航空航天大学、南京大学、上海交通大学、复旦大学等国内的重点大学，也吸纳了安徽工业大学、内蒙古科技大学、中国计量学院、石家庄铁道大学等普通高校；既保证了本套教材的较高的学术水平，也兼顾了普适性和代表性。这套教材以管理科学与工程类专业本科生及研究生为主要读者对象，也可供相关企业从业人员学习参考。

尽管我们不遗余力，以满足时代和读者的需要为最高出发点和最终落脚点，但可以肯定的是，本套教材仍会存在这样或那样的不尽如人意之处，诚恳地希望读者和同行专家提出宝贵的意见，给予批评指正。在此，我谨代表教指委、出版者和各位作者表示衷心的感谢！

教育部高等学校管理科学与工程类专业教学指导委员会主任



# 前 言

本书以系统仿真与优化在工业工程领域的应用为背景,全面介绍了系统仿真建模和优化的主要理论和技术方法,并结合相关仿真软件工具的使用进行了深入的分析,旨在使学生对系统仿真与优化在工业工程领域的应用有一个全面的理解和认识,通过理论学习,掌握系统仿真方法的实践技能。

本书主要介绍离散系统仿真,对于另外两类仿真类型——基于 Agent 的系统仿真、系统动力学仿真没有涉及。

本书由王谦和李波共同编写完成,由王谦负责全书的结构设计、案例设计和最终的审校工作。其中,王谦编写了第 1 章至第 6 章、第 8 章和第 9 章,李波编写了第 7 章、第 10 章。此外,南开大学商学院黄敬尧、侍雨琪、杨旭等同学协助完成 [www.simcourse.com](http://www.simcourse.com) 网络中部分仿真建模教学视频的录制,郭大力同学提供了第 2 章中的 C++ 语言程序代码;天津大学管理学院李楠、刘波、蒋雨珊、徐永辉等同学参与了部分章节的编写,在此一并表示感谢!

本书的编写得到了 Rockwell 公司 Arena 产品团队的大力协助, Arena 前全球销售总监 Ted Matwijec 先生提供了很多有价值的资料和技术支持;北京慧忠恒升科技有限公司陈辉副总经理也一直给予我们关心和帮助,在此对于两位的大力支持表示由衷的感谢!

笔者在本书的写作过程中得到了家人和朋友的悉心关怀,感谢他们的陪伴与信任,其中的艰辛和欢乐,令我铭刻在心,终生难忘!

本书配套网站为 [www.simcourse.com](http://www.simcourse.com),网站上集中了与本书相关的学习资源,包括 Arena、Simio 等仿真软件的学习文档、学习视频和相关项目介绍等内容。读者如有进一步的问题,也可直接联系作者本人,邮箱为 [wang qian 70@nankai.edu.cn](mailto:wang qian 70@nankai.edu.cn)。

由于编者水平有限,书中存在不足之处在所难免,恳请读者提出并批评指正。

王 谦

2016 年 2 月于南开园

# 目 录

序	
前言	
第1章 系统仿真概述 .....	1
1.1 系统、模型与系统仿真 .....	1
1.2 为什么需要系统仿真 .....	3
1.3 系统仿真分类 .....	4
1.4 仿真应用的步骤 .....	8
1.5 系统仿真在管理活动中的应用范围 .....	11
1.6 仿真软件 .....	14
思考题 .....	22
第2章 离散事件仿真原理 .....	24
2.1 离散事件仿真的术语和概念 .....	24
2.2 列表处理 .....	28
2.3 高级语言实现 .....	31
2.4 几个仿真案例 .....	32
思考题 .....	54
第3章 概率与统计相关理论知识 .....	55
3.1 术语和概念 .....	55
3.2 随机过程与马尔可夫链 .....	67
3.3 离散分布 .....	72
3.4 连续分布 .....	74
3.5 经验分布 .....	76
3.6 排队论 .....	78
3.7 大数定律和中心极限定理 .....	82
思考题 .....	84
第4章 随机数生成器 .....	85
4.1 随机数与伪随机数 .....	85
4.2 随机数生成方法 .....	86
4.3 随机数的检验 .....	94
思考题 .....	102
第5章 随机变量的产生 .....	103
5.1 综述 .....	103



5.2	随机变量生成的通用型方法 .....	103
5.3	几种主要分布生成随机变量的方法 .....	111
	思考题 .....	115
<b>第6章</b>	<b>输入数据分析 .....</b>	<b>116</b>
6.1	相关知识 .....	116
6.2	统计分布的特征分析 .....	117
6.3	数据的独立性检验 .....	121
6.4	确定输入数据概率分布的方法和步骤 .....	123
6.5	一种数据拟合工具——ExpertFit .....	130
	思考题 .....	131
<b>第7章</b>	<b>仿真模型的校核、验证和确认 .....</b>	<b>132</b>
7.1	模型的校核、验证与确认概述 .....	132
7.2	M&S、VV&A 与 T&E 的关系 .....	136
7.3	影响模型有效性的因素 .....	138
7.4	仿真模型 VV&A 的意义 .....	140
7.5	模型校核的一般方法 .....	142
7.6	模型验证的一般方法 .....	143
7.7	模型确认的一般方法 .....	147
	思考题 .....	148
<b>第8章</b>	<b>仿真输出分析 .....</b>	<b>149</b>
8.1	综述 .....	149
8.2	相关概念 .....	150
8.3	瞬态仿真统计分析 .....	152
8.4	稳态仿真统计分析 .....	155
8.5	多重指标分析 .....	158
	思考题 .....	159
<b>第9章</b>	<b>系统设计方案比较及优化 .....</b>	<b>160</b>
9.1	综述 .....	160
9.2	方案比较方法 .....	160
9.3	排序与选择方法 .....	163
9.4	方差缩减技术 .....	167
	思考题 .....	171
<b>第10章</b>	<b>仿真优化工具-OptQuest 介绍 .....</b>	<b>172</b>
10.1	OptQuest 介绍 .....	172
10.2	使用 OptQuest for Arena .....	175
	思考题 .....	184
	参考文献 .....	185

仿真最早应用于技术领域，是对技术研发和产品设计过程的效果评价。随着计算机技术的进步和成熟，以及在企业管理的重要性日益凸显的情况下，近年来，系统仿真在工业工程和企业管埋领域的应用得到快速发展，并从生产管理、设施布局、设备调度等传统制造业领域，逐步拓展到医疗、金融、物流等服务业领域。本章将就系统仿真的目的、意义、作用、内容和步骤做概略性的介绍。

## 1.1 系统、模型与系统仿真

现实世界由多种多样的系统构成，这些系统具有各自的特征和运行模式，系统之间相对独立，又相互依赖，构造出纷繁复杂的世界，系统多样性使得现实世界丰富多彩。

### 1. 系统

尽管系统一词频繁地出现在社会生活和学术领域中，但不同的人在不同的场合往往赋予它不同的含义。长期以来，系统定义和其特征描述尚无统一规范的定论。一般我们采用如下的定义：由诸多相互联系、相互制约、相互依存的要素按照一定规律构成的集合体，它们共同组成具有特定结构和功能的整体。

一般认为，系统是相互联系相互作用的诸元素的综合体。系统具有多元性、相关性和整体性等特性。多元性是指系统是多样性的统一和差异性的统一；相关性是指系统不存在孤立的组成元素，系统是能量、物质、信息流不同要素所构成的，所有元素或组分间相互依存、相互作用、相互制约，并实现系统的动态变化和发展；整体性是指系统是所有元素构成的复合统一体。此外，还应该看到，任何系统都有其构成组分，或者称为子系统，即系统由子系统构成，同时该系统又可能是一个更大系统的构成组分，这种系统角色的多重性，使得我们考察和研究任何一个系统的时候，都需要从不同的维度出发，探究系统运动形式和形态展现的成因。

系统分为离散系统和连续系统两种。离散系统（discrete system）是那些只有当在某个时间点上有事件（event）发生时，系统状态才会发生改变的系 统，其各个变量的状态（state）是可列可数的，状态变量随时间的变化是间断性的，例如机械零件的生产车间、汽车装配线、库存系统、交通路口、银行系统、餐厅系统。连续系统（continuous system）的状态变量随着时间而发生连续变化，例如电力生产、供电网络、石油炼制、自来水生产、电路系统、药品生产等。

当我们对某一个系统进行研究时，当然希望可以直接地观察、审视和剖析，这是快捷、直观的方式，但是这种方式对于简单系统更有效，对于更多的复杂系统而言，则需要

借助模型，间接性地开展研究。

## 2. 模型

模型是对实际或设计中系统的某种形式的抽象、简化与描述，通过模型可以分析系统的结构、状态、动态行为和能力。简单说来，模型是人们依据研究的特定目的，在一定的假设条件下，再现原型客体的结构、功能、属性、关系、过程等本质特征的物质形式或思维形式。本书所讲的模型，是和企业管理活动相关的，是对管理系统内涵的逻辑勾画与反映，模型内容依据研究关注点的不同而不同，也就是说针对同一个系统，具有不同研究目的的模型是有差异的。对于我们的研究目标而言，不是系统中所有的内容都是我们需要关注的，这就需要对研究的系统或实体进行必要的简化，并用适当的表现形式或规则把它的主要特征描述出来，这样所得的系统刻画物为模型。

按照模型的表现形式可以分为物理模型和数学模型。

物理模型 (physical model) 又称实体模型，可分为实物模型和类比模型，其中实物模型是那些按原系统比例缩小 (也可以是放大或与原系统尺寸一样) 的实物，例如风洞实验中的飞机模型、水力系统实验模型、建筑模型、船舶模型等。

数学模型 (mathematical model) 以逻辑抽象的方式将系统以数学或符号表达，描述的是系统的行为和特征而不是系统的实际结构。

数学模型可以进一步分为解析模型和仿真模型 (或称计算机仿真模型)。解析模型 (analytical model) 基于解析方法求解，可以是一个或一组代数方程、微分方程、差分方程、积分方程或统计学方程，或者以上技术的组合，通过这些方程定量地或定性描述系统各变量之间的相互关系或因果关系。除了用方程描述的数学模型外，还有用其他数学工具，如代数、几何、拓扑、数理逻辑等描述的模型。仿真模型 (simulation model) 基于数值方法 (numerical method)，获得对所研究问题的近似求解，多用于求解复杂问题，大多为基于计算机的程序模型，需要借助适当的仿真语言或工具软件。

## 3. 系统仿真

系统仿真 (system simulation) 也称为系统模拟，是从特定目的出发，在分析系统各要素性质及其相互关系的基础上，建立能描述系统结构或行为过程的、具有一定逻辑关系或数量关系的仿真模型，通过对系统模型的实验，研究已存在的或者尚处于设计阶段的系统性能的方法和技术，或者提供决策活动所需的支持信息。仿真是基于模型的活动。

仿真是对现实世界的过程或系统随时间变化过程的模拟。无论采用何种方式进行仿真 (手工或计算机)，仿真都包括人为的系统演变过程以及这个过程的观测结果，以便推断出实际系统的运行特性。通俗地说，系统仿真就是针对现实问题建立仿真模型，通过研究仿真模型，获得解决现实问题的方法或方案，并指导现实世界的实践活动。系统仿真过程如图 1-1 所示。

目前，我们所进行的系统仿真大多依赖于计算机技术和计算机系统，通过仿真模型得以实现，仿真过程是一个随时间推演的人机互动过程。仿真模型通常采用一组与问题相关的假设，这些假设采用系统实体或对象间的数学、逻辑及符号关系来表示。仿真模型一旦开发并通过有效性验证，就可以作为研究系统的工具，回答 “if... then...” 的问题。

系统仿真以系统论、概率论、数理统计为理论基础，以信息技术 (information

technology) 为技术依托。系统仿真与数学规划 (math programming)、统计学 (statistics) 并称为现代运筹学三大主流技术。

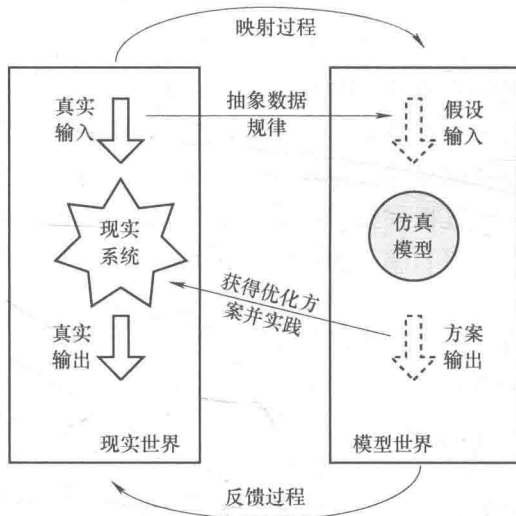


图 1-1 系统仿真过程

## 1.2 为什么需要系统仿真

当我们对一个系统进行研究的时候，需要借助多种方式和方法，图 1-2 对此进行了说明。

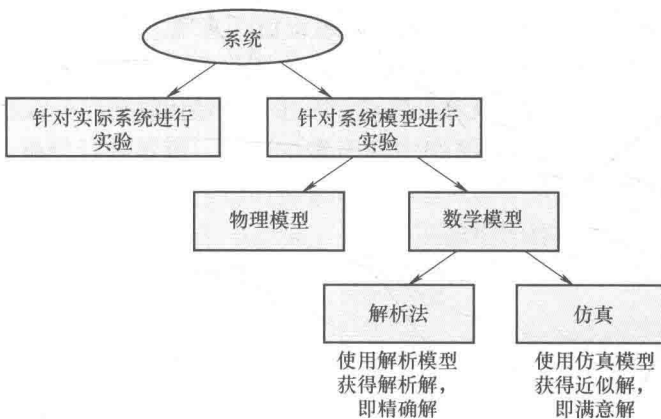


图 1-2 系统研究方法

如果某些系统可以直接用于实验或测试，或者系统可以进行复制，复制后的系统可用于实验，这样所开展的实验效果是最理想的，如武器系统实验、汽车碰撞试验等。但是还有一些系统，由于存在成本、风险、可能性、可行性等各方面的限制，不能进行现场试验，那么就需要通过建立模型的方式，间接地进行系统的验证和测试，这种方法就是采用

模型的系统研究方法, 这样的系统有水坝、核武器、航天试验等。对于模型的研究需要进行有效性验证, 即确保所建立的模型与真实系统具有本质上的一致性, 否则不能保证实验结果的价值性。

对于水坝、飞机风洞等系统, 可以通过建立全尺寸模型或者缩微模型, 构建一个一致的物理模型, 并以此环境的实验结果作为考察系统特性的依据。有些时候我们所面对的系统及其问题, 具有一定的抽象性和逻辑性, 无法建立物理模型, 此时可以建立数学模型, 用方程、公式、函数等对系统特征进行描述, 并应用数学方法求解系统问题。

数学模型的建立和求解过程会受到现有理论和技术的制约, 只有部分数学模型可以通过解析法获得精确解 (也称解析解, analytical solution), 这样的模型大多比较简单, 结构不复杂, 可以在有限时间内求得最优解。但是, 还有更多的数学模型, 例如针对经济系统、管理系统、社会系统等包含人为因素的复杂系统所构建的数学模型, 其本身结构就异常复杂, 还包含了很多的不确定性 (uncertainty), 无法使用解析方法求解, 这时只能依靠仿真方法, 求得近似解或满意解。

系统仿真方法可以用于求解复杂的现实系统问题, 这类系统一般具有灰箱性或黑箱性, 求解成本很高或者基本无法使用解析法求解, 甚至对于某些复杂系统, 我们根本无法建立有效的数学模型, 因此使用仿真方法就成为可行的选择, 甚至是唯一可行的选择。

仿真的作用是再现系统的状态、动态行为及性能特征, 用于分析系统配置是否合理、性能是否满足要求, 预测系统可能存在的缺陷, 为系统设计提供决策支持和科学依据。

系统仿真方法具有如下优势:

- 1) 对于尚处于研发或者未建成的真实系统 (实体), 通过系统仿真方法可以对其开展全方位的性能指标评价, 用于指导和修正设计过程。
- 2) 某些情况下, 实验会对现实系统造成破坏, 可以借助系统仿真模拟实验过程, 达到同样的检测效果。
- 3) 真实系统实验的成本过高, 可以借助系统仿真实现。
- 4) 现实世界中难以找到实验所需环境, 仿真方法可以辅助解决。
- 5) 现实系统改进方案很多, 无法一一尝试从中寻找最优方案, 可以通过仿真方法解决。
- 6) 通过仿真手段, 可对现实系统中的因素、流程、瓶颈进行分析, 从而获得有效分析结果。

同样的, 系统仿真也具有天生的劣势:

- 1) 仿真模型难以还原真实系统的所有影响因素, 所以其与真实系统的一致性难以做到百分之百。
- 2) 当仿真的输入指标中包含很多随机因素的时候, 系统输出中的随机噪声较大, 影响对系统真实特征的鉴别。
- 3) 对于某些复杂系统, 输入数据分析、仿真建模和输出分析需要耗费较多时间和经费。

### 1.3 系统仿真分类

系统仿真按照不同的类型可以进行不同的划分, 例如, 按照系统所处环境的不同, 可

以分为静态型 (static) 和动态型 (dynamic); 按照系统是否包含不确定性因素 (uncertainty factor) 或随机因素 (random factor), 可以分为确定型 (deterministic) 和随机型 (stochastic); 按照系统状态变量的取值形态, 可以分为离散型 (discrete) 和连续型 (continuous)。

我们主要介绍蒙特卡罗仿真、离散系统仿真和连续系统仿真等三种仿真形式。离散系统仿真也称为离散事件仿真 (discrete-event simulation), 它还包含基于 Agent 的仿真 (agent-based simulation); 连续系统仿真包括系统动力学仿真 (system dynamic simulation)。其关系如图 1-3 所示。

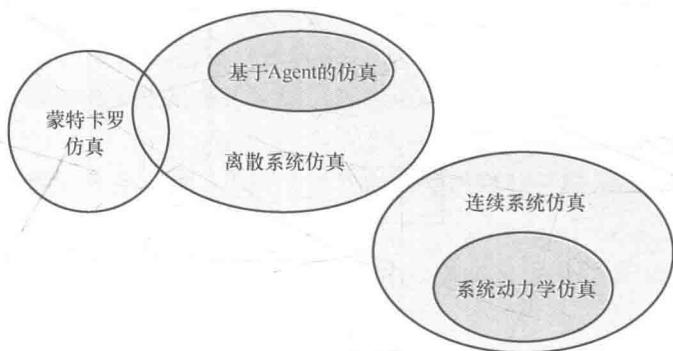


图 1-3 系统仿真的分类

### 1.3.1 蒙特卡罗仿真

蒙特卡罗仿真 (Monte Carlo simulation) 是基于蒙特卡罗方法 (Monte Carlo method) 的仿真模式。所谓蒙特卡罗方法, 又称随机抽样或统计模拟方法, 泛指所有基于统计采样进行数值计算的方法。蒙特卡罗方法适用于两类问题, 第一类是本身就具有随机性的问题; 第二类是能够转化为概率模型进行求解的确定性问题。

蒙特卡罗仿真是一种通过设定随机过程, 反复生成时间序列, 计算参数估计量和统计量, 进而研究其分布特征的方法。举例来说, 当系统中各个单元的可靠性特征量已知, 但系统过于复杂, 难以建立可靠性预计的精确数学模型或模型太复杂而不便应用时, 可用随机模拟法近似计算出系统可靠性的预计值; 随着仿真次数的增多, 其预计精度也逐渐增高。由于涉及时间序列的反复生成, 蒙特卡罗模拟法是以高容量和高速度的计算机为前提条件的, 因此只是在近些年才得到广泛推广。

蒙特卡罗仿真方法使用随机数, 而不考虑时间因素。考虑下面的例子:

**例 1.1** 使用蒙特卡罗仿真方法计算圆周率  $\pi$  的值。

我们可以建立一个边长为 2 的正方形, 内置一个半径为 1 的圆, 如图 1-4 所示。现在向正方形内随机抛洒谷粒, 假设谷粒落点是随机且等可能的, 即落点在正方形内是均匀分布的, 则计算圆周率的值可以采用以下步骤:

步骤一: 设参数  $m=0$ ,  $n=0$ , 以及  $M$  值 ( $M$  表示执行的总次数)。

步骤二: 以随机的方式在  $[-1, 1]$  之间分别选取一对  $x$  和  $y$  的值。

步骤三：若  $x^2 + y^2 \leq 1$ ，则  $m = m + 1$ 。

步骤四： $n = n + 1$ ；若  $n \leq M$ ，则回到步骤二；否则到步骤五。

步骤五：使用以下公式计算圆周率  $\pi$  值：

$$\frac{\pi r^2}{2^2} = \frac{m}{M}, \text{ 即 } \pi = \frac{4m}{M}$$

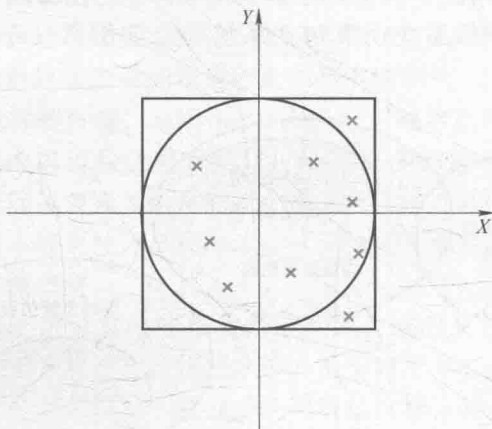


图 1-4 利用蒙特卡罗仿真计算圆周率  $\pi$

布丰投针实验 (Buffon's needle experiment) 是蒙特卡罗方法的一个著名应用，同样用于计算圆周率的值，如图 1-5 所示。布丰在桌板上绘制宽窄相同的格线 (line)，将一枚针随机投到桌板上，此时针与格线有两种可能：相交或不相交。格线宽度  $t$  与投针长度  $l$  之间的关系可以是  $l \leq t$  或  $l > t$ 。如果  $l \leq t$  (投针长度不大于格线宽度)，则投针与格线相交的概率为  $p = \frac{2l}{\pi t}$ ，如果

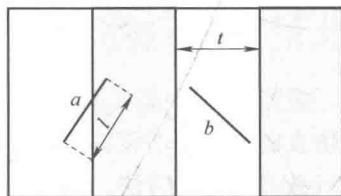


图 1-5 布丰投针实验

$l > t$  (投针长度大于格线宽度)，则投针与格线相交的概率为

$$p = \frac{2l}{\pi t} - \frac{2}{\pi t} \left[ \sqrt{l^2 - t^2} + t \arcsin \left( \frac{t}{l} \right) \right] + 1$$

或

$$p = \frac{2}{\pi} \arccos \frac{t}{l} + \frac{2l}{\pi t} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{t}{l} \right)^2} \right]$$

证明略。

简单地说，蒙特卡罗方法是一种计算随机变量函数均值的方法。均值可以是定义在多个随机变量上的多维概率密度函数的某个特定的平均值，而且任何一个量都可以表示为一个或者多个随机变量的函数的均值。

蒙特卡罗方法针对的是复杂空间上的多维平均估值问题，因此它为建立和分析复杂模型提供了一种潜在的和可行的工具。在系统工程领域，“维数魔咒”限制了很多解析方法

的应用,蒙特卡罗方法最大的优点是其计算的收敛速度和误差的大小与问题的复杂度或相空间的维数无关。这一性质使得蒙特卡罗方法在科学和工程领域得以广泛应用。

### 1.3.2 离散系统仿真

离散系统属于动态类型仿真,是由事件驱动(event-driven)的,事件的发生(occur)是离散且随机的,即系统状态变量(state variables)的取值是依时间轴离散且随机分布的,此类系统无法使用数学方程来描述,针对此类系统的仿真称为离散事件仿真(Discrete-Event Simulation, DES)。

DES是最常见的一种仿真方式,在工业工程领域应用最广泛,绝大部分的工业工程问题都可以借助DES解决。DES往往与排队论(queueing theory)相结合,解决工厂中的生产排程问题、码头堆场的集装箱装卸问题、呼叫中心的人员排班问题,以及医院中的手术室调度问题等。

DES使用两种时间推进机制,即后续事件时间推进机制,以及固定累积步长的时间推进机制。

由于本书内容将围绕DES理论及其应用展开,因此关于DES的内容,将在后续章节详细讨论,在此不做过多论述。

当我们着重研究离散系统中的个体行为以及众多个体行为所导致的系统整体特征,采用DES会有一些困难,因而一种新方法应运而生,即基于Agent的仿真(Agent-Based Simulation, ABS)方法。ABS是DES的衍生和变化(variation),不是孤立于DES之外的方法。

Agent称为代理(个体、实体),个体具有自治性,可以感知系统环境的变化以及系统中其他个体的行为,以所获得的信息进行决策并做出反应,个体具有记忆和思维的能力,依据既定的规则进行决策,还可以调整自身的行为以实现对系统的自适应(self-adaption)。对于复杂系统而言,当众多个体遵从既定规则进行活动时,系统会产生涌现性(emergence),即系统表现出个体所不具备的特征。系统科学把这种整体才具有、孤立部分及其总和不具有的性质称为整体涌现性(whole emergence)。涌现性是组成成分按照系统结构方式相互作用、相互补充相互制约而激发出来,是一种组分之间的相干效应,即结构效应。例如,天空中的飞鸟群、海洋中的沙丁鱼群,其运动行为都具有一定的涌现性。

ABS可以很好地对此类系统进行仿真,通过个体行为的描述,实现对系统整体性能的度量和评价,具有重要的实践意义。

### 1.3.3 连续系统仿真

连续系统仿真也属于动态类型仿真,是一种基于活动(activity-based)的仿真模式,仿真时钟将时间轴分成很多细小的连续的碎片(slice),时钟沿着碎片有序地推进,系统变量在每个时间碎片上依据活动的动态变化进行相应的取值。一般来说,连续系统仿真比离散系统仿真的速度要慢一些,因为其系统时钟推进的步长更小,取值点更多。

连续系统仿真中,经常会使用微分方程(differential equation),对系统变量在某时刻的变化率进行记录和推演。当系统足够简单的时候,微分方程方法可以给出系统模型的解



析解，但是当系统复杂的时候，微分方程就无能为力了，只能依靠基于数值分析技术的仿真方法加以解决。

系统动力学仿真（System Dynamic Simulation, SDS）是近年来发展比较快的一种连续系统仿真方法，多用于社会系统、商业、政府和军事等领域，重点解决政策评价和战略评估等方面的问题。

SDS 大多是确定型的，但仿真模型具有纳入随机因素的能力。SDS 可以比 DES 处理层级更多、更复杂的系统分析，因而具有对宏观问题的仿真和分析能力。

## 1.4 仿真应用的步骤

系统仿真项目应该按照项目管理的要求，严格遵守一定的程序或逻辑顺序，这样才能保证仿真过程的可控性和仿真结果的严谨性，如图 1-6 所示。

一般来说，仿真应用过程由三部分工作组成，即输入数据的采集和准备、仿真模型构建与验证、仿真结果的优化与分析。



图 1-6 系统仿真项目的基本步骤

系统仿真应用项目实施可以进一步细分为如下步骤：

### (1) 表述问题，界定范围

开展任何一项研究工作之前，首先要对所研究的问题进行细致的描述，使得所有项目相关人员对“待研究问题”有一致的、清晰的认识，这样就可以减少因歧义而造成的误解，进而避免仿真研究从一开始就偏离了最初的设想。

清晰地描述问题，还可以有效地界定项目范围。范围管理是项目管理中的基础内容，一个范围界定不清的项目（或研究问题），容易造成所考察因素（输入和输出变量）数量的变化，即可能丢掉了必要的因素，或增加了不必要的因素，会造成仿真项目从一开始就偏离问题的核心，模型可能过于简单，或者过于复杂，项目工作量、仿真输出结果都有可能带来剧烈的变化。所以项目范围的界定，是这一阶段工作的重点内容。

### (2) 采集数据，分析整理

在界定项目范围之后，就需要采集仿真建模所需要的数据。对于大部分仿真项目而言，数据采集工作是繁重而枯燥的，也是最重要的环节。任何组织都不太可能有我们建模所需要的全部数据，相当部分的数据是不存在的，需要我们现场采集，或者利用组织现有数据进行整理。例如，机械加工企业也许会记录每个大型齿轮的加工时间数据，但是没有齿轮在加工机台上的装卸时间数据，也没有齿轮在不同机台之间的搬运时间数据；医院信息系统可以记录病人挂号时间以及病人开始就诊的时间，而无法提供病人步行至门诊科室