



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

物流系统仿真

张晓萍 石伟 刘玉坤 主编





普通高等教育“十一五”国家级规划教材

物流系统仿真

张晓萍 石伟 刘玉坤 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书分为两篇,共 15 章。第 1 篇是原理与应用篇,主要介绍物流系统仿真原理及其应用。第 2 篇是操作篇,以 Flexsim 软件为例,介绍运用系统仿真软件进行系统仿真的步骤与方法,并提供了一套完整的教学实验指示书。

通过本书的学习,读者不仅可以初步掌握物流系统仿真的基本理论,同时可以掌握实际仿真的步骤与方法。

本书可作为经济管理、物流管理、物流工程、工业工程、系统工程、自动化等专业的本科生教材,也可供上述领域的工程技术人员阅读。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

物流系统仿真/张晓萍,石伟,刘玉坤主编. —北京:清华大学出版社,2008.7
ISBN 978-7-302-17042-6

I. 物… II. ①张… ②石… ③刘… III. 物流—计算机仿真 IV. F253.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 018183 号

责任编辑:张秋玲

责任校对:赵丽敏

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京密云胶印厂

装 订 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:25 字 数:574 千字

版 次:2008 年 7 月第 1 版 印 次:2008 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:39.80 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:023159-01

前言

FOREWORD

仿真是利用模型研究系统的方法。仿真技术已经有近 50 年的发展历史。在宇航、军事、自动化、电力等领域得到了广泛和有效的应用。随着计算机技术的发展和人们对各个领域研究的深入,系统仿真技术日臻成熟,应用领域不断扩大。

近年来,现代物流得到了人们广泛的关注。物流具有覆盖面宽、综合性强、涉及面广的特点。它覆盖了工业、农业和服务业;综合了管理与工程的多个领域;涉及交通运输、仓储、包装、服务、信息等多个过程。物流的发展不仅关系到企业自身的发展,也对整个国民经济的发展起到了至关重要的作用。因此,推动传统物流向现代物流的转变成为人们追求的共同目标。

将系统仿真技术引入现代物流的研究,能够辅助人们科学地规划设计物流系统、科学地控制物流运行过程、科学地调配物流资源,从而促进物流系统的整体优化。同时,物流产业的蓬勃发展也将促进系统仿真技术的发展并为系统仿真的应用开拓了一个全新的领域。

为了方便读者的教学和自学,我们将系统仿真基本原理与软件操作指导汇集在一起,把本书分为上、下两篇。第 1 篇介绍系统仿真的基本原理及其在物流领域中的应用;第 2 篇以系统仿真软件 Flexsim 为例,详尽介绍软件的使用。

第 1 篇 原理与应用篇。共分为 10 章。其中,第 1 章是概述,主要介绍系统仿真技术的发展历史、特点、应用以及相关技术;第 2 章介绍系统仿真的基本知识,包括基本概念、离散事件系统仿真、单服务台排队系统仿真以及单品种库存系统仿真;第 3 章介绍随机数与随机变量的基本概念、常用分布、随机数发生器、随机数性能测试以及随机变量的产生方法;第 4 章介绍输入数据建模概念和方法;第 5 章介绍几种主要的系统仿真算法,包括事件调度法、活动扫描法和进程交互法;第 6 章介绍仿真结果与系统方案分析的有关概念和方法;第 7~10 章分别介绍供应链库存系统、自动化物流系统、物流配送中心系统和离散制造系统的仿真应用。

第 2 篇 操作篇。共分为 5 章。其中,第 11 章是 Flexsim 仿真软件简介“综述”;第 12 章介绍 Flexsim 的应用基础;第 13 章是 Flexsim 建模指导;第 14 章介绍物流仿真实验;第 15 章介绍系统建模方法与仿真模型验证。

本书第 2 篇的编写遵循从粗到细,由浅入深的基本原则。对于 Flexsim 的很多基本概念,在前面的章节里先进行必要的定义和概要的介绍,在后面的章节里再进行详细介绍和使用方法的辅导。读者在使用本教程时可以前后呼应,对相关的内容反复学习。物流实验一章里安排的 5 个实验也是从简单到复杂。随着实验课的完成,将实体、工具等的应

用逐步加入到实验中,达到循序渐进学习的目的。建议开设“物流系统仿真”课程的高校,在参考这些实验开设实验课时,可根据学生学习的进度和学生程度灵活安排。本科生可以只选做前面几个基本实验,后面比较复杂系统的仿真实验可以供有余力的本科生和研究生选做。

与以往出版的物流系统仿真书籍不同的是,本书分为原理与应用和操作两大部分,信息含量大,内容丰富,除了从原理到应用对物流仿真系统进行了详尽介绍外,同时通过详尽介绍一个典型软件的使用,使读者不仅能够掌握仿真的基本理论,同时也可学会运用仿真软件进行实际的仿真建模与应用。书中的原理部分可供初学者阅读学习,同时可以提供专门研究物流系统仿真的读者参考。书中所列的物流系统应用部分,可以启发读者将系统仿真技术灵活应用于物流各领域的规划设计及流程分析方面。书中所列的仿真实验是我们多年教学实验的积累,可供开设物流实验的教师和学生参考使用。

本书由清华大学深圳研究生院现代物流研究中心张晓萍、石伟、刘玉坤主持编写。

物流系统仿真及应用是一个较新的课题,物流系统仿真正处于应用推广和深入发展阶段,编写本书的目的就是希望能对这一过程有所帮助和促进。由于水平所限,书中难免有不足之处,欢迎选用本书的广大读者提出批评和建议。

作者

2008年1月

目 录

CONTENTS

第 1 篇 原理与应用篇

第 1 章 概论	3
1.1 系统仿真技术的发展历史	3
1.2 系统仿真技术的特点	4
1.3 系统仿真的应用	5
1.4 物流现代化与系统仿真	5
1.5 系统仿真的相关技术	7
习题	8
第 2 章 系统仿真的基本知识	9
2.1 系统仿真的基本概念	9
2.1.1 系统、模型与系统仿真	9
2.1.2 连续系统和离散事件系统的仿真	9
2.1.3 离散事件系统的基本要素	10
2.1.4 仿真钟	12
2.2 离散事件系统仿真	12
2.2.1 离散事件系统仿真的分类	12
2.2.2 离散事件仿真模型的组成与构造	15
2.2.3 离散事件系统仿真的基本步骤	16
2.3 单服务台排队系统仿真	19
2.3.1 问题描述	19
2.3.2 建立仿真模型	20
2.3.3 模型运行与结果输出	21
2.3.4 系统服务状况分析	23
2.4 单品种库存系统仿真举例	23
2.4.1 问题描述	23
2.4.2 建立仿真模型	24
2.4.3 模型运行与结果输出	26
2.4.4 日买进量与利润分析	27
习题	28

第3章 随机数与随机变量	29
3.1 确定性系统与随机系统	29
3.2 随机事件与概率	30
3.3 随机变量与随机数	31
3.4 常用分布	32
3.5 随机数发生器	33
3.5.1 线性同余发生器	34
3.5.2 组合发生器	35
3.6 随机数性能测试	36
3.6.1 χ^2 测试	37
3.6.2 运行测试	37
3.6.3 自相关测试	38
3.6.4 随机数性能的理论测试	39
3.7 随机变量的产生方法	41
3.7.1 逆变换法	41
3.7.2 卷积法	43
3.7.3 合成法	45
3.7.4 取舍法	45
3.7.5 函数变换法	46
习题	46
第4章 输入数据建模	48
4.1 简介	48
4.2 收集原始数据	49
4.3 随机变量分布的辨识	50
4.4 参数估计	56
4.5 拟合度检验	58
4.5.1 χ^2 测试	59
4.5.2 Kolmogorov-Smirnov 测试	60
4.6 随机变量的相关与回归分析	62
4.7 经验分布	66
4.7.1 离散型变量的经验分布	67
4.7.2 连续变量的经验分布	68
习题	69
第5章 系统仿真算法	71
5.1 事件调度法	71
5.1.1 事件调度法设置	71
5.1.2 事件调度法的步骤	72
5.1.3 事件表的处理	73

5.2 活动扫描法	73
5.2.1 活动扫描法的设置	73
5.2.2 活动扫描法的步骤	74
5.3 进程交互法	75
5.3.1 进程交互法的设置	75
5.3.2 进程交互法的步骤	76
5.4 事件调度法、活动扫描法和进程交互法的比较	78
习题	78
第6章 仿真结果与系统方案分析	80
6.1 简介	80
6.2 仿真结果的瞬态与稳态特征	82
6.3 系统仿真的类型	83
6.3.1 终止型仿真	83
6.3.2 非终止型仿真	84
6.4 区间估计与置信区间	84
6.4.1 基本概念	85
6.4.2 置信区间的构造方法	85
6.4.3 置信区间的可靠程度	87
6.5 终止型仿真的结果分析	88
6.5.1 固定样本数量法	88
6.5.2 序贯法	89
6.6 稳态仿真的结果分析	90
6.6.1 重复/删除法	90
6.6.2 批均值法	91
6.7 随机变量的比较	92
6.8 敏感度分析	93
6.9 正交设计	95
6.10 参数优化	97
习题	100
第7章 供应链库存系统仿真	102
7.1 供应链库存系统及其控制	102
7.1.1 供应链库存系统的概念	102
7.1.2 供应链库存系统的控制	103
7.1.3 仿真在供应链库存研究中的应用	104
7.2 采用库存仿真软件实现供应链库存系统仿真	106
7.2.1 库存仿真软件中的供应链库存系统模型	106
7.2.2 供应链库存系统的控制策略建模	107
7.2.3 供应链库存系统模型的属性参数	107

7.2.4	供应链库存系统的评价指标	109
7.2.5	模型的输入输出	110
7.2.6	仿真算法与控制策略的实现	110
7.3	基于 StokPN 的供应链库存系统仿真	112
7.3.1	StokPN 方法	113
7.3.2	StokPN 的供应链库存系统建模步骤	115
7.3.3	StokPN 模型的仿真分析	116
7.3.4	模型的验证和确认	119
7.3.5	StokPN 的仿真算法实现	120
7.4	供应链库存系统仿真案例	121
案例 1	供应链库存仿真软件的应用实例	121
案例 2	基于 StokPN 的供应链库存系统控制策略优化	126
案例 3	较大规模多品种库存系统控制决策应用	133
习题		140
第 8 章	自动化物流系统仿真	141
8.1	自动化物流系统简介	141
8.2	AS/RS 仿真	142
8.2.1	AS/RS 简介	142
8.2.2	AS/RS 的构成与分类	143
8.2.3	AS/RS 仿真的内容	144
8.2.4	AS/RS 仿真建模与分析	145
8.3	AGVS 仿真	147
8.3.1	AGVS 简介	147
8.3.2	AGVS 的构成和分类	148
8.3.3	AGVS 仿真的内容	148
8.3.4	AGVS 的建模与分析	150
8.4	ASS 仿真	152
8.4.1	ASS 简介	152
8.4.2	ASS 的构成和作业过程	154
8.4.3	分拣方式及拣选策略	155
8.4.4	ASS 仿真的内容	157
8.4.5	ASS 的建模与分析	158
8.5	自动化物流系统仿真应用案例	159
习题		165
第 9 章	物流配送中心仿真	168
9.1	物流配送中心简介	168
9.1.1	配送中心的基本功能与作业流程	168
9.1.2	配送中心的类型	170

9.1.3 配送中心规划设计的要点	171
9.2 物流配送中心仿真的内容	172
9.2.1 管理调度策略仿真	172
9.2.2 作业过程仿真	173
9.2.3 系统配置与布局仿真	174
9.3 物流配送中心仿真的基本要素	175
9.4 物流配送中心仿真模型	176
9.5 配送中心仿真实例	178
9.5.1 货位分配的仿真	178
9.5.2 关键流程的仿真	179
习题	182
第 10 章 离散制造系统仿真	184
10.1 离散制造系统仿真简介	184
10.2 离散制造系统的仿真方法	185
10.2.1 确定仿真范围和仿真目标	185
10.2.2 进行数据收集	186
10.2.3 确认仿真模型	187
10.3 仿真在系统设计中的应用	187
10.3.1 仿真目标	188
10.3.2 建立仿真模型	188
10.3.3 仿真运行结果与系统分析	189
10.4 仿真与生产调度	191
10.4.1 基于仿真的调度方法	191
10.4.2 系统仿真方法在生产调度中的应用	192
10.5 离散制造系统的仿真软件	193
10.6 油漆车间的仿真分析	196
10.6.1 油漆车间的生产流程	196
10.6.2 油漆车间仿真的目标	197
10.6.3 油漆车间的建模	197
10.6.4 油漆车间的仿真分析	199
习题	200

第 2 篇 操 作 篇

第 11 章 Flexsim 仿真软件简介	205
11.1 Flexsim 概述	205
11.2 Flexsim 的基本概念	206
11.3 实体库与实体	217

11.4 实体的参数	229
11.5 实体的属性	255
第 12 章 Flexsim 应用基础	262
12.1 菜单和工具栏	262
12.2 模型视图与鼠标键盘操作	267
12.2.1 正投影/透视视图的使用与操作	267
12.2.2 平面视图的使用与操作	268
12.2.3 正投影编辑器	268
12.2.4 键盘交互	268
12.2.5 菜单与设定	270
12.3 窗口与对话框	273
12.4 建模工具	276
12.5 模型调试、运行与实验控制	285
12.6 命令、函数与逻辑表达(语法)	287
12.7 下拉菜单	293
12.8 3D 媒体的使用	298
12.9 任务序列	304
第 13 章 Flexsim 建模指导	315
13.1 基础教程 1	315
13.1.1 简介	315
13.1.2 模型 1 描述	315
13.1.3 模型 1 数据	316
13.1.4 建模步骤	316
13.2 基础教程 2	324
13.2.1 简介	324
13.2.2 统计设定的方法与步骤	324
13.2.3 模型 2 描述	325
13.2.4 模型 2 数据	327
13.2.5 建模步骤	327
13.3 基础教程 2 增补	334
13.3.1 简介	334
13.3.2 建模步骤	335
13.4 基础教程 3	344
13.4.1 简介	344
13.4.2 Flexsim 软件概念学习	344
13.4.3 模型 3 描述	344
13.4.4 模型 3 数据	345
13.4.5 建模步骤	345

13.5 进阶教程	352
13.5.1 拉式逻辑使用模型	353
13.5.2 标签使用模型	353
13.5.3 操作员使用模型	354
13.5.4 条件中断响应使用模型	355
13.5.5 优先级与先占使用模型	355
13.5.6 全局表使用模型	357
13.5.7 合成器使用模型	357
13.5.8 库存使用模型	359
13.5.9 任务序列使用模型	360
13.5.10 延迟消息使用模型	360
13.5.11 常用命令格式	361
第 14 章 物流仿真实验	363
14.1 离散型流水作业线系统仿真	363
14.2 自动分拣系统仿真	365
14.3 循径运动系统仿真	367
14.4 生产-库存系统仿真	370
14.5 离散事件系统仿真大作业	372
第 15 章 系统建模方法与仿真模型验证	374
15.1 离散事件动态系统建模	374
15.2 实体流程图法	375
15.3 活动周期图法	377
15.4 Petri 网简介	378
15.5 系统模型的可信性与确认方法	380
15.5.1 模型的可信性	381
15.5.2 模型的确认与验证	381
15.5.3 增强模型可信性的方法	383
附表 A	385
表 A.1 t 分布在显著度为 0.05 和 0.025 时的临界值	385
表 A.2 χ^2 分布在显著度为 0.1 和 0.05 时的临界值	385
主要参考文献	386

第

1

章

原理与应用篇

概 论

1.1 系统仿真技术的发展历史

系统仿真是建立在系统理论、控制理论、相似理论、数理统计、信息技术和计算机技术等理论基础之上,以计算机和其他专用物理效应设备为工具,利用系统模型对真实或假想的系统进行实验,并借助于专家经验知识、统计数据和系统资料对实验结果进行分析研究,做出决策的一门综合性和实验性的学科。

早在几千年前,我们的先人就懂得了系统仿真的基本原理。中国象棋是用于仿真古代战争的游戏;军事沙盘用来仿真两军对阵的战略;建筑中用木模研究实际建筑物的结构与承载性能等。直到 20 世纪 40 年代,冯·诺依曼正式提出了系统仿真的概念,随后,1952 年美国成立了仿真学会,1963 年出版了仿真领域最具权威性的学术刊物《SIMULATION》后,系统仿真逐渐成为一门独立的学科。

人们在研究一个较为复杂的系统时,通常可以采用两种方法:一种是直接在实际系统上进行研究;另一种就是在系统的模型上进行研究。在实际系统上研究固然有其真实可信的优点,但是很多情况下是不合适甚至是不可行的。这主要有以下几方面的原因:

(1) 需要考虑安全性。在研究重要的、涉及人身安全或设备安全的系统时,不允许在实际系统上进行实验,例如宇航系统、核能系统、航空系统等。

(2) 系统具有不可逆性。有很多系统是不可逆的,例如已经发生的灾害、生态系统等。

(3) 投资风险过大。一些重大的工程项目、重大设备系统很复杂,投资巨大,不允许在实际系统上进行破坏性的实验。

(4) 研究时间过长。多数情况下,在实际系统上研究问题往往需要较长的时间。例如研究复杂的生态系统一般需要数十年;研究一个交通运输系统也至少需要数天甚至数月。

(5) 真实的系统尚未建成。如果希望在系统规划设计阶段评价方案的优劣,显然无法在真实系统上进行。

出于以上主要原因,利用模型来研究系统不仅是必要的,甚至在某些情况下是唯一可行的方法。

系统仿真技术可以有多种分类方法。按模型的类型,可分为连续系统仿真、离散事件

系统仿真、连续/离散混合系统仿真和定性系统仿真；按仿真的实现方法和手段及模型的种类，可分为物理仿真与数学仿真；根据人和设备的真实程度，可分为实况仿真、虚拟仿真和构造仿真等。

连续系统仿真和离散事件系统仿真是根据系统状态变化的不同进行分类。连续系统仿真是指系统状态随时间连续变化的系统的仿真；离散事件系统仿真则是指系统状态只是一些时间点上发生变化的系统的仿真。在系统仿真技术的发展历史中，连续系统仿真较早得到发展和成熟的应用。最为成熟的领域包括自动控制、电力系统、宇航、航空等。离散事件系统仿真是随着管理科学的不断发展和先进制造系统的发展而逐渐被重视和发展起来的。目前，在交通运输管理、城市规划设计、库存控制、制造物流等领域都开展了离散事件系统仿真的理论和应用研究。

物理仿真是建立系统的物理模型。最早的仿真起源于物理仿真，例如航空飞行用空洞实验研究气流对飞机飞行的影响。数学仿真则是通过建立系统的数学模型进行研究。数学仿真又分为模拟仿真和数字仿真。数字仿真就是建立系统的数字模型。由于数字仿真依赖计算机，并需要处理大量数据，要求能快速计算，因此数字仿真是随着计算机的发展而形成和不断成熟起来的。随着计算机的发展，数字仿真的研究和应用在系统仿真中占有越来越大的比重。

国外工业发达国家系统仿真技术的应用非常普遍。20世纪90年代初，美国提出了22项国家关键技术，系统仿真技术被列为第16项；美国国防部提出了21项国防关键技术，系统仿真技术被列为第6项。美国已严格规定所有重要的武器研究，必须进行仿真实验后才可投入正式生产和使用。

根据20世纪80年代末的统计，日本企业运用系统工程解决管理与决策问题时，采用系统仿真方法的已经超过80%。英国制造业也普遍采用系统仿真方法解决物料控制、人力配置、调度评估、投资策略及均衡生产等问题。据国外应用统计，运用系统仿真优化系统设计规划可减少投资约30%，在库存控制方面可减少库存约15%。

1.2 系统仿真技术的特点

系统仿真技术是模型(物理的、数学的或非数学的)的建立、验证和实验运行技术。现代仿真技术的特点可归纳为以下几点：

(1) 系统仿真技术是一门通用的支撑性技术。在决策者们面对一些重大的、棘手的问题时，能以其他方法无法替代的特殊功能，为其提供关键性的见解和创新的观点。

(2) 系统仿真技术学科的发展具有相对的独立性，同时又与光、机、电、声，特别是信息等众多专业技术领域的发展互为促进。因此，系统仿真技术具有学科面广、综合性强、应用领域宽、无破坏性、可多次重复、安全、经济、可控、不受气候条件和场地空间的限制等独特优点，这是其他技术无法比拟的。

(3) 系统仿真技术的发展与应用紧密相关。应用需求牵引、系统带技术、技术促系统、系统服务于应用，这是一个辩证的关系。应用需求是推动系统仿真技术发展的原动力，系统仿真技术应用效益不但与其技术水平的高低有关，还与应用领域的发展密切相关。

关。大量实例表明,系统仿真技术的有效应用必须依托于先进的仿真系统,只有服务于应用的仿真系统向前发展了,才能带动系统仿真技术的发展。

(4) 系统仿真技术应用正向全系统、系统全生命周期、系统全方位管理发展,这些都基于仿真技术的发展。

1.3 系统仿真的应用

仿真本质上是一种知识处理的过程,典型的系统仿真过程包括系统模型建立、仿真模型建立、仿真程序设计、仿真实验和数据分析处理等,它涉及多学科、多领域的知识与经验。随着现代信息技术的高速发展以及军用和民用领域对仿真技术的迫切需求,系统仿真技术也得到了飞速的发展。

理论上系统仿真可以解决任何系统分析的问题。然而,由于先验知识和手段所限,迄今为止,并不是任何系统都能运用系统仿真分析得到满意的结果。系统仿真技术的发展和应用首先在人们对其规律比较熟悉、已经可以进行较准确描述的某些领域中取得突破。我们面对的系统各式各样,有政治系统、人文系统、生态系统、经济系统、医学系统、工程系统等。最先成功应用系统仿真技术的是工程系统,其中,宇航、航空航天、自动控制、电力等系统已经运用得相当成熟。而在其他领域,例如经济系统、生态系统、医学系统等,人们也已经开始了系统仿真的研究和应用,但是不够成熟也不够普遍。

系统仿真的应用最有魅力的地方正是其不拘一格的应用对象和近乎神奇的手段方法。美国在调停波黑参战三方时就进行了仿真,将三方的地图、地区、人员情况、武器装备、司令部、弹药库的位置以及采用的战术等建立起系统模型,再运用逻辑模型模拟整个战斗的过程。模拟的结果是三败俱伤。看完仿真演示后,三方立即在停战协议上签了字。1990年美国一栋大楼失火,根据失火前大楼的初始状态、火熄灭后的终止状态以及火与烟的运动规律归纳出大楼着火的逻辑模型,根据线索找到了起火点。在演示了着火的全过程后,法官据此找到着火原因,并做出了相应的判决。20世纪90年代,为了制定更加科学的人口生育计划,以利于中国人口的计划生育以及中国经济的发展,我国建立了人口模型,模拟各种计划生育策略对中国人口增长、经济发展产生的影响,为我国制定计划生育的国策提供帮助。宇航仿真系统用来供宇航员进行地面训练,反导弹仿真系统用来研究反导弹系统的性能,等等。

以上实例中的系统虽然各不相同,研究目标各不相同,但它们的共同之处则是:系统都十分复杂,问题非常棘手,用现有的方法无法着手进行研究。这些例子说明了一个共同的事实:在研究处于山穷水尽的时候,系统仿真往往成了唯一可求助的方法。这就是系统仿真给我们的启示。它提醒人们,问题越是复杂,越是无计可施,不妨试试用系统仿真来解决。

1.4 物流现代化与系统仿真

近年来,随着国内外市场竞争的激烈,我国加入WTO,企业面临巨大的挑战。物流的现代化越来越受到人们的关注。传统物流是一个流通与制造过程的附属品,其基本任