



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

物流系统仿真

卜隽志才 孙宝凤 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

物流系统仿真

隽志才 孙宝凤 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书分为 11 章, 主要包括离散事件仿真理论与方法、物流系统仿真实例、系统动力学方法及其在物流系统仿真中的应用等内容。

本书系普通高等教育“十一五”国家级规划教材, 适合作为理工科工业工程、物流工程、管理工程、制造工程等专业高年级大学生和研究生教材, 亦可作为工程技术人员继续学习用书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

物流系统仿真/隗志才, 孙宝凤编著. —北京: 电子工业出版社, 2007.10

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-121-05185-2

I. 物… II. ①隗… ②孙… III. 物流-计算机仿真-高等学校-教材 IV. F253.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 157938 号

责任编辑: 夏平飞 特约编辑: 吕亚增

印 刷: 北京中科印刷有限公司

装 订:

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: 787×1 092 1/16 印张: 23 字数: 589 千字

印 次: 2007 年 10 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 38.00 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 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。



计算机仿真技术是设计和研究复杂系统的一种基本的理论方法和重要的技术手段。计算机技术的飞速发展,使得仿真技术的应用领域不断扩大。计算机仿真已经成为理工科学生必须掌握的基本理论,也是他们必须会使用的一种技术手段。

物流系统仿真是物流系统设计、开发、评价和优化的重要实验研究工具,例如机场、高速公路、港口和地铁设计、规划与管理,物流作业流程再造,库存系统订单策略研究等方面,仿真都是有效的工具。特别是近年来,现代物流领域广泛开展的信息化、一体化运作模式对物流系统计算机仿真技术提出了更高要求。国内介绍离散事件系统仿真原理与方法的教科书较多,但仿真应用领域以物流为重点的却不多,并且物流系统仿真软件发展迅速,需要跟踪学科前沿进展的新的教材。本书适应这一需求,按照国家“十一五”教材规划教材立项要求,结合作者十几年本课程教学实践和科研成果编著。本书具有如下特色:

1. 介绍了物流系统仿真的最新进展

本书注意吸取本学科、本领域的最新研究成果,编写过程中收集、分析、研究了大量国内外理论成果和实践经验,结合我国物流发展状况和教学实践的具体材料,在理论上和实践中反映物流领域系统分析的最前沿。物流系统仿真是一个随着计算机仿真技术的快速发展而动态变化的领域,教材要不断介绍本领域的最新成果,满足经济建设的需求。

2. 理论性、适用性、实践性相结合

本书注重理论性和适用性的结合,数学表达和文字描述相结合,符合普通管理学科和理工学科本科生、研究生的认知规律;同时,本书在论述物流系统仿真理论、新思想的同时,还详细介绍与之相关的建模方法,从而做到理论与方法的统一。力求做到理论论述与具体案例分析相结合。物流系统仿真是从物流业发展和物流实践过程中总结出来的,反过来又推动现代物流的实践。对现代物流系统仿真建模理论、方法的论述,不能不结合物流实践来进行,这样既有利于学生认识相应的理论与思想,又有利于通过物流管理的实践学习物流系统仿真方法。

3. 系统性和逻辑性

本书突出了系统性和逻辑性。按照离散事件仿真的基本原理,从随机数和随机变量的产生到仿真建模方法、仿真模型设计与实现,再到仿真结果分析与模型校验,将物流系统仿真的一般步骤、建模方法和计算机程序实现有机组织起来,各章之间都有内在的逻辑关系。本书虽然涉及很多物流系统分析、运筹学、统计学的方法,但不是单纯地研究方法,而是从仿真对象出发,按照仿真对象的仿真目标将各种方法编入到具体内容中。从第8章至第10章,系著作者多年仿真实践积累的具体案例,在撰写过程中,注重仿真对象的特殊性和仿真建模方法一般性的结合,从而加强了本书的系统性。

4. 可读性和可操作性相结合

本书辅以案例分析,规范运用相关图示、例表、模型、程序和数据,以保证理论方法分析的科学性、可理解性和可应用性。同时,书中配有思考题和仿真习题内容,知识点明确,

重点突出；书中仿真程序适宜读者操作，可再现仿真结果，有助于激发读者的兴趣，进一步增强对仿真软件和技术的应用技能。

全书共三部分 11 章。第一部分，离散事件仿真理论与方法，包括第 1 章至第 6 章。第 1 章物流系统仿真概论，主要介绍了关于系统的定义、特性和分类，系统模型、系统仿真以及物流系统仿真的基本步骤等，使读者对系统仿真及其在物流系统分析中的应用状况有一个基本的了解。

离散事件系统内部实体的活动是不确定的，事件的发生具有随机性，一般系统中含有多个随机变量，因而随机变量在离散事件系统仿真中起着重要的作用。第 2 章主要介绍了随机数和随机变量的基本知识和产生原理，包括概率统计的基本知识、离散事件系统仿真中常见的概率分布形式、随机数和随机变量的产生方法等。

建模是仿真的前提，是计算机仿真的关键技术内容之一；模型不正确，仿真的结果就失去意义。离散事件系统的建模方法有着与连续系统截然不同的特点。第 3 章讲述了离散事件系统建模基本方法，也是学习后续各章的基础。第 3 章首先叙述了离散事件系统模型的组成要素；其次叙述了三种典型的离散事件建模方法，即（1）实体流程图；（2）活动周期法；（3）Petri 网建模方法。

离散事件系统中最基本的要素是事件，事件发生引起系统状态发生变化。第 4 章重点介绍事件调度法的建模思想及其应用，在此基础上分别针对两种典型的离散事件系统——排队系统和库存系统，来说明离散事件建模与仿真的通用原理和一般过程。

第 3 章和第 4 章给出了离散事件系统模型的建模方法，但是只建立了系统模型还不能实现仿真，为了使系统模型能在计算机上运行，需要将其转换为计算机仿真模型（Computerized Model），这是从模型到计算机仿真的一个必要的步骤。这一过程称为仿真模型的设计与实现。第 5 章重点讲述了仿真模型的设计与实现，需要完成的三部分工作：设计仿真策略，即确定仿真模型的控制逻辑和仿真时钟推进机制；构造仿真模型，即确定模型的具体操作；仿真程序设计及实现，即采用某种程序设计方法及语言，实现仿真策略和仿真模型。其中，常用的四种仿真策略包括事件调度法、活动扫描法、三段扫描法、进程交互法；仿真模型设计包括面向事件、面向活动、面向进程的仿真模型设计过程；以仿真语言 SIMLIB 为例，介绍了仿真模型的设计与实现过程和几个较为复杂的建模实例。

仿真的目的是分析比较系统的性能，仿真实验的结果必须由计算机计算得出，而在多数情况下，计算机输出的数据并不能直接反映系统的性能，必须经过分析整理形成报告。因此仿真结果分析是系统仿真中的一个重要步骤。第 6 章首先介绍了仿真的类别和系统的性能测度，并说明了终止型仿真结果分析和稳态仿真结果分析的统计方法，前者包括重复运行法和序贯程序法；后者包括批均值法、稳态序贯法和再生法。为了改进估计的精度，有必要在仿真中采用方差缩减技术，常用的方差缩减技术包括公共随机数法、对偶变量法等方法。仿真模型是否有效是所有仿真者都面临的又一重要问题，它涉及模型验证和确认问题。模型验证是一个过程，它确定模型的计算机实现是否准确地表示了模型开发者对系统的概念表达和描述；模型确认也是一个过程，它从预期应用的角度确定模型表达实际系统的准确程度。第 6 章对此进行了细致的阐述。

第二部分，物流系统仿真实例，包括第 7 章至第 10 章，其中第 7 章为 Arena 仿真软件及应用；第 8 章至第 10 章分别从生产物流系统、物流配送中心、供应链库存系统三个方面进行了仿真建模方法及其实例研究，是离散事件仿真理论与方法的具体运用。

第7章介绍了Arena仿真软件初级建模的功能和应用技术。其中包括Arena软件的功能特点；以典型案例为背景，分别讲述了Arena的基础模块（流程图模块和数据模块）和高级模块的主要功能和建模技术；并针对仿真初学者经常遇到的输入和输出分析的困难，分别讲解了如何使用Arena输入分析器（Input Analyzer）进行概率分布函数的标定，以及如何使用Arena过程分析器（Process Analyzer）进行输出分析。

第7章是后续第8章至第10章物流系统仿真实例的工具基础。第8章生产物流系统仿真，围绕生产物流系统的定义和特点，列举了当前生产物流系统的仿真基本内容，包括工艺流程、生产节拍、生产计划优化、生产能力、物料搬运系统仿真和工厂布局仿真六项内容。限于篇幅，第8章针对流程仿真这一内容进行了深入的案例研究，以再制造生产物流系统仿真实例和生产与采购物流系统仿真实例给出了工艺流程和业务流程的仿真建模与实现过程，具体包括初始状态描述、仿真模型构架、仿真输出分析、仿真模型验证以及仿真目标效果评价；以及运用Arena软件实现仿真目标的具体过程。

第9章物流配送中心仿真，给出了物流配送中心的常见仿真内容：作业过程仿真；订单流程优化仿真以及管理调度策略仿真；并针对物流配送中心作业系统仿真建模系列问题，重点指出了物流配送中心作业系统仿真建模的一般方法和步骤，从七个方面进行了细致说明，即问题描述、仿真目标、仿真基本要素、作业系统仿真建模、作业系统主要性能指标、输入数据分析和模型校核和验证。最后，引入一个仿真实例，对其进出货作业系统运营状况进行详细分析，以及对资源优化配置前后改善程度进行了纵深研究，并为企业发展提供切实可行的建议。

第10章从供应链库存系统的概念及其库存系统控制模式入手，系统地介绍了有关供应链库存系统控制方面的一些基本知识；并且通过一个完整的供应链仿真案例，介绍了供应链仿真建模的一般过程、相应的简单参数提取以及数据分析过程。

第三部分，即第11章，简要介绍系统动力学方法及其在物流系统仿真中的应用。

全书结构由上海交通大学隽志才确定。第1、2、3、4、5、6、11章由隽志才编写，第7、8、9、10章由吉林大学孙宝凤编写。上海交通大学研究生乔晋、姚婷、刘玲，吉林大学研究生冯淑珍、谭云龙、富晓艳、钟伟、陈国龙、侯继娜、王婉聪、刘艳敏、邓丹丹、韩佳辰、高晶鑫、崔丽霞参加了资料整理和案例编写。全书由隽志才统稿。

本书在编写过程中参阅了大量中外文参考书和文献资料，主要参考资料已列在书后。在此对国内外有关作者表示衷心的感谢。

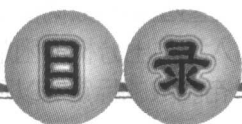
本书编著获得吉林大学研究生教材建设立项资助，表示感谢。

本书系普通高等教育“十一五”国家级规划立项教材，适合用作理工科工业工程、物流工程、管理工程、制造工程等专业高年级本科生和研究生教材，亦可作为工程技术人员继续学习用书。在教学过程中，可以根据本科生和研究生的教学要求，选择适当章节进行讲解。

由于编者水平有限，书中如有不妥之处，敬请读者批评指正。

编著者

2007年9月



第1章 物流系统仿真概论	(1)
1.1 系统及其特性	(1)
1.2 系统模型和系统仿真	(4)
1.3 现代物流与系统仿真	(10)
1.4 物流系统仿真软件简介	(11)
本章小结	(13)
思考题	(13)
参考文献	(13)
第2章 随机数与随机变量	(14)
2.1 随机变量模型的确定	(14)
2.2 拟合优良度检验	(27)
2.3 均匀分布随机数的产生	(31)
2.4 随机数的检验	(33)
2.5 随机变量产生的原理	(35)
2.6 典型随机变量的产生	(42)
本章小结	(50)
思考题	(50)
练习题	(50)
参考文献	(52)
第3章 离散事件系统仿真建模方法	(53)
3.1 离散事件系统模型的组成要素	(53)
3.2 实体流图法	(56)
3.3 活动周期图法	(60)
3.4 Petri 网建模方法	(68)
本章小结	(76)
思考题	(76)
练习题	(76)
参考文献	(78)
第4章 排队系统与库存系统的建模与仿真	(79)
4.1 事件调度法模型组成与仿真时钟推进方法	(79)
4.2 单服务台排队系统的建模与仿真	(81)
4.3 库存系统的建模与仿真	(96)
本章小结	(110)
思考题	(111)
练习题	(111)

参考文献	(113)
第5章 离散事件仿真模型设计与实现	(114)
5.1 仿真策略	(114)
5.2 仿真模型设计	(119)
5.3 面向事件仿真模型实现与表处理技术	(128)
5.4 面向活动仿真模型的实现	(132)
5.5 仿真语言 simlib	(139)
5.6 分时计算机模型	(145)
5.7 多工序加工模型	(152)
本章小结	(163)
思考题	(163)
练习题	(163)
参考文献	(164)
第6章 仿真结果分析与模型校验	(165)
6.1 概述	(165)
6.2 仿真的类别和系统的性能测度	(165)
6.3 终止型仿真的结果分析	(166)
6.4 稳态仿真结果分析	(168)
6.5 方差缩减技术	(171)
6.6 仿真模型确认、验证与认定 (VV&A)	(172)
6.7 系统性能比较	(180)
6.8 仿真结果分析应用举例	(183)
本章小结	(185)
思考题	(185)
练习题	(186)
参考文献	(188)
第7章 Arena 仿真软件及应用	(189)
7.1 Arena 功能与特点	(189)
7.2 Arena 仿真环境	(190)
7.3 Arena 流程图模块应用	(195)
7.4 Arena 数据模块应用	(203)
7.5 Arena 变量、集合和子模型	(209)
7.6 Arena 输入分析与分布参数标定	(211)
7.7 Arena 输出与优化分析	(214)
本章小结	(218)
思考题	(219)
练习题	(219)
参考文献	(222)
第8章 生产物流系统仿真	(223)
8.1 生产物流系统仿真简介	(223)

8.2 生产物流系统仿真内容	(225)
8.3 再制造生产物流系统仿真	(234)
8.4 再制造生产物流系统仿真实例	(242)
8.5 生产与采购物流系统仿真实例	(251)
本章小结	(265)
思考题	(266)
练习题	(266)
参考文献	(269)
第9章 物流配送中心仿真	(271)
9.1 物流配送中心简介	(271)
9.2 物流配送中心的仿真内容	(276)
9.3 物流配送中心作业系统仿真	(278)
9.4 物流配送中心作业系统仿真实例	(282)
本章小结	(296)
思考题	(297)
参考文献	(297)
第10章 供应链库存系统及其仿真	(299)
10.1 供应链库存系统定义	(299)
10.2 仿真在供应链库存系统中的应用	(300)
10.3 供应链多级库存系统仿真案例	(301)
本章小结	(326)
思考题	(326)
参考文献	(326)
第11章 系统动力学及应用	(327)
11.1 系统动力学建模原理与方法	(327)
11.2 系统动力学仿真语言——DYNAMO	(333)
11.3 Vensim 软件与物流系统仿真	(337)
11.4 应用案例——超市配送中心库存策略模型	(342)
参考文献	(346)
附录A 仿真系统参数设置	(347)
附录B 再制造生产物流系统仿真模型图示	(351)
附录C 物流配送中心作业系统仿真模型图示	(356)

第1章 物流系统仿真概论

仿真(simulation)是对客观世界实际过程或系统在一段时间内运行的模仿。仿真要产生一个人造的系统的经历,然后观察这个人为的经历,以便描绘推断出和实际系统有关的运行特征。在计算机出现以前,人们采用物理的方法进行仿真,如军事上的作战沙盘模型,工程上用电学系统仿真水利和力学系统等等。那时的仿真技术附属在其他有关的学科之中。随着系统科学、现代数学方法和计算机技术的发展,在仿真领域出现了大量的共同性的理论、方法和技术问题,仿真技术逐渐成为一门独立的学科。

计算机仿真技术是设计和研究复杂系统的一种基本的理论方法和重要的技术手段。计算机技术的飞速发展,使得仿真技术的应用领域不断扩大。计算机仿真已经成为理工科学生必须掌握的基本理论,也是他们必须会使用的一种技术手段。设计和运行物流与运输系统,例如机场、高速公路、港口和地铁设计、规划与管理,物流作业流程再造,库存系统订单策略研究等方面,仿真都是有效的工具。计算机仿真技术在生产管理、工程技术、军事研究、科学试验、国民经济等自然科学和社会科学领域内都得到了广泛的应用。

本章主要介绍有关系统、系统模型、系统仿真的一些基本概念,系统仿真的基本步骤,计算机仿真在现代物流系统中应用和系统仿真软件,以使读者对系统仿真及其在物流系统分析中的应用有一个基本的了解。

1.1 系统及其特性

1.1.1 系统的定义和特性

系统是由多个相互依赖、相互作用的要素按某种规律组合起来的、实现特定功能的有机整体。一个系统又可以由若干个子系统构成。

系统有如下特性:

第一,系统的整体性。系统由两个或两个以上要素(或子系统)构成,各个组成部分具有一定的独立性,但它们又互相联系构成一个有机整体。

第二,系统的关联性。要使一个系统能够实现它的功能,各组成要素或子系统必然是相互关联和相互作用的。这表现在某个子系统接受输入而产生输出,而这个子系统的输出又往往成为另外一个子系统的输入。系统的这种关联性表现为各子系统之间产生一定的物质流动、信息流动和信息反馈关系。

第三,系统的目的性。我们设计和运行一个系统是为了一定的目的,即为了实现特定的功能和最优化。

第四,系统的环境适应性。任何系统都有一定的边界和环境,它与周围的外部环境产生一定的联系和相互作用,从环境接受各种影响(包括正常的输入和随机干扰),经过系统的转换,产生一定的输出,从而对外部环境发生一定的作用。外部环境及其影响是经常变化的,

为了使系统达到最优化，必须对系统进行调节，使之适应环境的变化。

在定义一个系统时，首先要确定系统的边界。尽管世界上的事物是相互联系的，但当我们研究某一对象时，总是要将该对象与其环境区别开来。边界确定了系统的范围，边界以外对系统的作用称为系统的输入，系统对边界以外的环境的作用称为系统的输出。

世界上的系统千差万别，但人们总结出描述系统离不开“三个要素”，即实体、属性和活动。实体确定了系统的构成，也就确定了系统的边界；属性也称为描述变量，描述每一实体的特征；活动定义了系统内部实体之间的相互作用，从而确定了系统内部发生变化的过程。

1.1.2 系统分类

系统的分类方法很多，按照不同的分类方法可以得到各种类型的系统。我们仅从系统仿真研究的需要出发，对系统进行分类。

1. 确定性系统和随机系统

按照系统输入与输出之间的关系，可以将系统分为确定性系统和随机系统。

确定性系统是指输出完全由系统的输入以及相应的转换关系（包括决策、措施等）所决定的系统。这里，系统的输入、转换关系和输出都是确定的，只要知道输入，就可预先确定系统的输出。

随机系统在既定的输入下，系统的输出是非确定的，带有随机的性质。产生随机性的原因是由于在系统的输入过程和转换过程中存在多种难以预知的偶然因素的作用。然而，尽管随机系统的输出不能完全预知，但它们通常遵循一定的统计分布规律。确定系统输出（或输入）的统计分布以及对系统的输出进行估计，是系统仿真的主要任务之一。

大多数管理系统都属于随机系统。对于这类系统，当其复杂性超过一定限度时，运用数学解析方法建立系统模型并求解往往是很困难的，甚至是不可能的。在这种情况下，系统仿真方法就显示出其优越性。

需要指出的是，把一个实际的物流管理系统看做确定性系统还是随机系统，取决于研究的目的和手段。例如，对于如图 1-1 所示的系统，如果研究的目的是系统对市场订货变化（突然增加或减少）的动态响应过程的特性，就可以将系统作为确定性系统来处理，即将订单率、投入率、生产率、交货率看做常数或与相应的累积量成正比的量。而如果研究的目的是系统如何适应市场需求的不断变化并保持自身的相对稳定，就应将系统看作随机系统，也就是将订单率、生产率等看做随机变量。

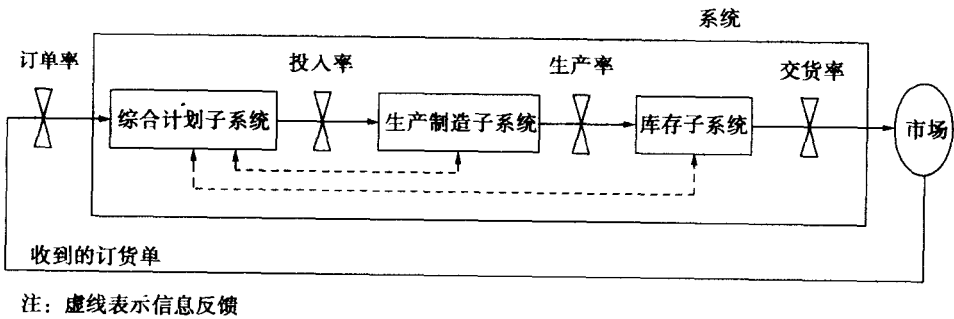


图 1-1 简单的订货—生产—库存—销售系统

一般来说，如果是研究系统的结构、作用机理，就可以将系统看做是确定性的。而若是

研究系统的参数优化、作业计划的合理安排以及预测等，通常应将系统看做是随机的。确定性假定的简化程度高，而随机性假定更接近真实情况。

2. 连续系统和离散系统

在系统仿真中最重要的一种分类方法是按系统中起主导作用的状态变量的变化是否连续分为连续系统和离散系统。我们把与特定时间和研究目的有关的描述系统所需变量的集合定义为系统的状态。在排队系统的研究中，状态变量可能是正忙着的服务员数、在系统中的顾客数以及每个顾客到达系统的时间。

(1) 连续系统

连续系统是指系统的状态变量随时间变化而发生连续变化。例如一个飞机飞行系统就是一个连续系统，因为状态变量位置、速度等都随时间的变化连续变化。这类系统的动态特性可以用微分方程或一组状态方程来描述，也可以用一组差分方程或一组离散状态方程来描述。究竟采用哪一种，这取决于研究者是对系统状态随时间连续变化的整个过程感兴趣，还是仅对某些时间点感兴趣，或者是所能得到的数据资料仅仅限于某些时间点。例如，在一些社会经济系统中，往往所能得到的数据也只有按月、季度，甚至是按年的。尽管这类系统实际的状态变化是连续的，但是也只能用差分方程和离散状态方程来描述。

不论它们是用微分方程还是用差分方程来描述，只要实际状态变化是连续的，都应该归为连续系统一类。有时为了区别，用差分方程描述的这一类系统，人们又称之为采样系统。

(2) 离散系统

离散系统就是指系统的状态变量在某些离散的时间点瞬时变化。排队系统就是一个离散系统，因为状态变量顾客人数只有当有顾客达到或者离开时才会发生变化。按照系统仿真的术语，称状态的瞬间变化为事件，将发生事件的时刻称为事件时间。如果事件时间是一些非均匀离散时点，这样的事件称为离散事件，相应的系统称为离散事件系统。在系统仿真中，凡提到离散系统时，如不特别说明，则是指离散事件系统。在工程和计划管理中许多这样的系统，例如，经济管理系统、物流配送系统、库存系统、通信系统、计算机系统、道路交通系统等。这些系统一般规模庞大、结构复杂，很难用解析法求得结果，因此，一般用计算机仿真技术来进行系统分析和设计。

实际的管理系统大多是一些复合系统，但是可以根据系统起主导作用的状态变量的类型，而把系统简化成离散或连续系统。一个系统划分为连续系统还是离散系统，除了取决于系统中起主导作用的状态变量的变化是否连续之外，还取决于对系统的研究目的。例如，对图 1-1 所示的系统，若研究的目的是考察系统动态响应的模式（指数增长、振荡、稳定性等），就适宜将系统作为连续系统来处理；如果研究的目的是生产制造子系统加工顺序的合理安排，以便能够按期履行订货合同，并使得设备利用率尽可能地提高，那就适宜将系统作为离散系统来处理。这样，可以按一定的分布产生订货单和每份订单的订货数量，追踪每一份订单的制造和交货过程，从大量的仿真试验中得出最佳排序准则和期量标准。又例如，对道路上的交通流模型化，如果与研究目的来说，单个车辆的运动和特性是重要的，交通流模型应当是离散的；如果汽车可以作为集合体来看待，交通流模型则可以用微分方程描述为连续模型，可见一个系统描述为连续的还是离散的是相对的。

一般来说，若研究对象是宏观系统，或研究的目的是系统动态行为的模式及其结构原因，就适宜将系统看做连续系统；若研究对象是微观系统或研究的目的是处理过程的优化和参数的优化等，就适宜将系统作为离散系统来处理。

3. 线性系统和非线性系统

根据系统要素之间相互作用的性质, 可以将管理系统分为线性系统和非线性系统。由于要素之间的关系最终会影响到系统输入与输出之间的依赖关系, 所以, 只要系统中含有非线性环节, 就是非线性系统。

实际的物流管理系统大多是非线性系统, 而将其看做线性系统不过是一种抽象和简化。线性系统模型比较简单, 可以应用成熟的线性系统分析方法进行研究。由于线性模型在建模、分析和求解方面的优点, 我们在构造系统模型时, 总是尽可能地使之线性化, 即使对于一些无法将其完全线性化的非线性关系, 我们也设法使之分段线性化。但这种线性化的简化不应改变系统原有的主要特性, 由此引入的误差不应超过允许的限度。

是否要作线性假设, 主要取决于研究目的和可能采用的研究方法。

一般来说, 构造系统的解析模型并试图求得解析解时, 线性的假设是必不可少的, 而采用系统仿真方法将不受这种限制。有时, 在仿真模型中引入一些关键的非线性关系, 将使模型的输出更丰富和更接近实际系统, 从而使得分析的结论更可靠。

1.2 系统模型和系统仿真

1.2.1 系统模型及其结构

要研究一个系统, 可能的话最好直接对系统进行试验。但绝大多数情况是系统还未构造出来, 或者对实际系统进行试验是代价昂贵的, 甚至是不可能的, 这时, 就需要构造系统的模型, 以便借助模型对系统进行研究。系统仿真, 简单地说, 就是利用模型在计算机上做试验。

系统模型是对一个存在的系统或计划建立的系统的某种形式的表述。它是由那些与研究目的有关的因素构成的, 它体现了诸因素之间的关系。建立和运用系统模型的目的是指明系统的主要组成部分以及它们的主要关系, 以便系统的分析者和设计者对系统的行为和功能进行深入的分析和研究。在绝大多数情况下, 并不需要考虑系统的一切细节, 因此, 模型不只是对系统的描述, 而且是对系统的抽象概括和简化。不使模型的复杂程度超过对模型的要求, 应当作为构造模型的一般原则。

1. 系统模型的分类

数学模型是用符号和方程式来表示一个系统。系统仿真模型一般是动态的、随机的和只能用数值方法求解的数学模型。

构造系统模型是一个对系统进行抽象的过程, 要进行抽象总离不开一定的观点和概念, 构造系统模型总要依据某种构模观点。所谓构模观点就是看问题的方法, 它是构造模型的一套描述和分析问题的观点、概念和方法的总称。采用不同的构模观点, 会将系统抽象为不同的形式, 得出不同的模型。这里显然有一个选择的问题。在构造系统模型时, 一定要注意所采用的构模观点是否适合研究对象的性质及研究目的的要求。关于构模观点, 将在叙述连续系统和离散事件系统的仿真方法时详细讨论。

也可以按照系统仿真的建模方法和过程对模型进行分类。

① 描述模型: 运用文字形式简明叙述系统构成、边界和主要功能、系统分析和设计的目的与任务等。

② 物理模型：又叫实体模型，是根据系统之间的类似性而建立起来的模型。例如，电学系统与力学系统、水力学系统之间都有某些类似性，可用电学系统仿真它们；工业产品样机、建筑模型、军事作战沙盘模型、工厂生产线平面布置等都是物理模型。

③ 数学逻辑模型：它们是系统各种变量的数学逻辑关系的抽象表述。通常是一些代数方程和微分方程的组合，用来描述系统的结构和性能。如果模型中不含时间因素，则称为静态模型，若模型与时间有关，则称为动态模型。

④ 流程图和图解式模型：运用表格或图解形式比较直观、明确地说明系统各组成部分以及它们之间的基本逻辑关系。

⑤ 计算机程序：在上述模型基础上，运用计算机语言编写计算机程序作为计算机仿真的工具。

一个真实系统，它的内在联系和与外界的关系，一般是很复杂的，用系统模型完全准确地抽象描述系统是很困难的，只能是近似地描述。建立在物理属性相似基础上的物理模型描述系统的真实感虽然较强，但是对于复杂系统，建立物理模型所需的费用大，而且修改参数或改变结构都很困难。因此，将系统的内在联系和它与外界的关系抽象为数学模型是当今使用最广泛的系统描述方法。系统仿真以数学模型为基础的。

按系统仿真的观点，可以对模型进行以下的简单分类，参见图 1-2。

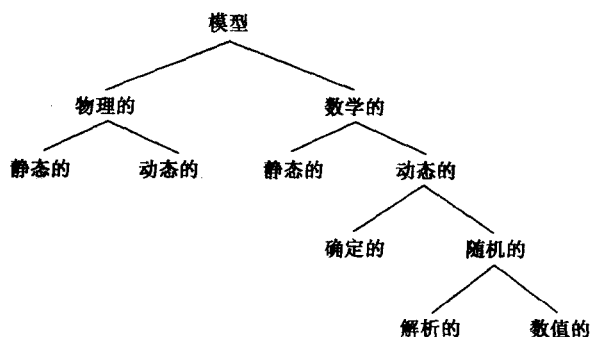


图 1-2 模型的分类

2. 系统模型的结构

为了建立和研究系统模型，必须了解系统模型的结构。系统模型可以用如下的数学形式表示：

$$E=f(x_i, y_i)$$

式中： E ——系统的工作性能；

x_i ——可以控制的变量和参数，它们能够由决策者加以控制和利用，以便使模型的解优化。通常，决策变量 x_i 是主要部分；

y_i ——不可控制的变量和参数，它往往不能为决策者所控制，在某种程度上表达了系统模型的环境，作为模型的输入信息反映其对模型解的影响；

f ——产生 E 的 x_i 和 y_i 之间的关系。

一般来说，系统模型由以下几个方面的某种组合构成：（1）组成要素；（2）变量；（3）参数；（4）函数关系；（5）约束条件；（6）目标函数。



1.2.2 系统仿真

上一节中已经未加说明地多次使用过系统仿真的概念,那么什么是系统仿真呢?系统仿真是一种用数值方法求解动态系统模型的过程。它从某个初始状态开始,按照时间的进程,一步一步地求解,最后得到系统模型的一个特解。每步计算的结果,都是实际系统在相应时点上的一种可能的状态。因此我们定义的系统仿真是在建立数学逻辑模型基础上,通过计算机实验,对系统按照一定的作业规则由一个状态变换为另一个状态的动态行为进行描述和分析的过程。或者说在特定的时间内通过对系统动态模型性能(由系统变量反映)的观测来求解问题的技术。

由于每次仿真的结果只是系统模型的一个特解,故要得到系统模型在可能的初始状态下的全部解答,就必须反复多次地运行模型。如果仿真的是随机系统,为了得到一个独立的样本观察值,以便对系统的某个性能测度进行估计,同样需要独立地重复运行模型。如果研究的目的是为了获取系统的一组最佳参数,则不仅需要通过独立重复运行模型以便对参数进行估计,还需要对设计方案的不同参数组合分别进行仿真,以便从中选优。由此可见,系统仿真是在计算机上用某个实际系统的模型进行试验的过程,系统仿真技术是一种实验技术。

物流系统仿真就是用系统仿真方法研究物流管理问题,或者说是对物流系统用计算机进行仿真研究。这里,仿真既可用于分析的目的,也可用于设计的目的。可以这样认为,物流系统仿真是一门数学、物流科学和计算机仿真技术相结合的学科,是计算机在物流系统中应用的一个重要领域,是“物流系统分析的实验室”。

我们常常给出一系列关于系统如何工作的假设。通常,把这些采用数学公式或逻辑关系的假设构造成数学模型,用这种模型进行实验并取得对系统行为的某些了解。如果构成模型的关系简单,就可以用各种数学方法(代数微积分或概率论运筹学中线性规划等方法)取得精确的解析解。由于大多数大系统,特别是交通运输、经济管理这样的系统太复杂,难以通过解析方法计算模型的值。这种系统模型,就需要通过仿真的方法来研究。在这种仿真中用计算机在所研究的时间间隔里计算、估量模型中的变量值,再经过反复计算得到其期望值。

目前,系统仿真作为管理系统研究和实践中的一个重要技术手段,在求解一些复杂系统问题中,具有下列几个特点。

(1) 仿真是一种数值技术。对于大多数具有随机因素的复杂系统,往往很难甚至无法用准确的数学模型表述,从而也无法采用解析方法评价,于是系统仿真通常就成为解决这类问题的好方法。系统仿真面向实际过程和系统问题,将不确定性作为随机变量纳入系统来处理,建立系统的内部结构关系模型,从而使我们对复杂的、带有多种随机因素的系统,可以方便地通过计算机仿真试验求解,避免了求解复杂的数学模型的困难。这也是目前系统仿真得到广泛应用的最根本的原因。

(2) 由于电子计算机可以加速仿真过程和减少仿真误差,所以计算机在系统仿真中占有十分重要的地位。系统仿真以问题导向方式来建模分析,并使用人一机友好的计算机软件,使建模与仿真直接面向分析人员,他们可以集中精力研究问题的内部因素及其相互关系,而不是计算机编程、调试及实现,从而使系统仿真为广大科研人员及管理人员所接受。

(3) 仿真是一种“人工”的实验手段。通过仿真我们能够对所研究的系统进行类似物理实验、化学实验等那样的实验。它和现实系统实验的主要差别在于仿真实验所依据的不是现实系统本身及其所存在的实际环境,而是作为系统映像的系统模型以及相应的“人工”环境。

显然, 仿真结果的正确程度取决于仿真模型和输入数据是否客观地、正确地反映现实系统。系统仿真为分析人员和决策人员提供了一种有效的实验环境, 他们的设想和方案可以通过直接调整模型的参数或结构来实现, 并通过模型的仿真运行得到其实施结果, 从而可以从中选择满意的方案。因此, 系统仿真被看做是“政策实验室”。

然而, 仿真技术也并非十全十美, 它也有其自身固有的缺点。

(1) 开发仿真软件、建立运行仿真模型是一项艰巨的工作, 它需要进行大量的编程、调试和重复运行试验, 这也是要消耗时间、人力和资金的。

(2) 系统仿真只能得到问题的一个特解或可行解, 不可能获得问题的通解或者最优解。仿真参数的调整往往具有极大的盲目性, 寻找优化方案将消耗大量的人力、物力。

(3) 系统建模直接面向实际问题, 对于同一问题, 由于建模者的认识和看法有差异, 往往会得到不同的模型, 模型运行的结果也就不同。因此, 系统建模常被称为非精确建模, 或认为建模是一种“艺术”而不是纯粹的技术。

虽然以上缺点是由仿真本身的性质所造成的, 但随着计算机科学(包括硬件和软件)的发展和系统仿真方法研究的深入, 这些问题正在得到改善。随着计算机软硬件性能的提高, 出现了所谓的图形建模、可视建模方法和工具, 从而使建模工作变得更加轻松、方便; 由于智能化技术的引入, 也产生了所谓的自动建模环境, 使建模的科学性进一步得到提高。此外, 仿真理论的发展, 也使模型的验证、确认、优化工作进一步自动化, 仿真的精确性得以提高。计算机技术中的多媒体技术、虚拟现实技术、分布式网络技术的引入更使系统仿真如虎添翼, 使系统仿真技术的研究与应用水平达到了新的高度。

系统仿真是一种崭新的辅助管理决策和系统设计的现代化管理技术。具体地说, 它起着以下几个方面的作用:

(1) 现行运行系统的性能评价。对于现有的实际运行的系统, 如果为了深入了解以及改进它, 而在实际系统中进行实验往往要花费大量的人力、物力、财力和时间, 有时甚至是不可能的, 而通过计算机仿真可以使系统正常工作不受干扰, 经过分析仿真结果, 对现有系统在拟订工作条件下的性能做出正确分析与评价, 并预测其未来发展, 提出改进方案。

(2) 新建系统的性能预测。对于所设计的新系统, 在未能确定它的优劣情况下, 可以不必要花大量投资去建立它, 而是采用计算机仿真对新系统的可能性和经济效益做出正确的评价, 帮助人们选择最优或较优的设计方案。

(3) 决策方案评价与优化。在管理的宏观、微观决策中, 通过收集、处理和分析有关信息, 可能拟订多个不同的决策方案, 它们具有不同的决策变量和参数组合。针对这些不同的决策方案, 进行计算机仿真的多次运行, 按照既定的目标函数对不同的决策方案进行分析比较, 从中选择最优方案, 辅助最优管理决策。

仿真模型的作用是作为解释手段去说明一个系统或问题; 作为分析工具去确定系统的关键组成部分或项目; 作为设计准绳综合分析和评价所建议的决策措施; 作为预测方法去预报和辅助计划系统的未来发展。

1.2.3 物流系统仿真的基本步骤

系统仿真是一项应用技术, 根据它的基本概念和求解问题的出发点及思路, 在实施系统仿真应用时, 一般遵循以下几个基本步骤。

1. 问题描述与定义

系统仿真真是面向具体问题而不是面向整个实际系统,因此,首先要在分析、调查的基础上,明确要解决的问题以及实现的目标,确定描述这些目标的主要参数(变量)以及评价准则。根据目标,要清晰地定义系统边界,辨识主要状态变量和主要影响因素,定义环境及控制变量(决策变量)。同时,给定仿真的初始条件,并充分估计初始条件对系统主要参数的影响。

2. 建立仿真模型

模型是关于实际系统某一方面本质属性的抽象描述和表达。建立仿真模型具有其自身的特点。首先它是面向问题和过程的。在离散系统仿真建模中,主要应根据随机发生的离散事件、系统中的实体流以及时间推进机制,按系统的运行进程来建立模型;而在连续系统仿真建模中,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或微分方程来实现仿真建模。其次,建立仿真模型与所选用的仿真语言密切相关。例如,选用 Arena 仿真语言时,仿真模型将采取实体流和模块图的形式;当选用带排队功能的图示评审技术 QGERT 语言,或风险评审技术 VERT (Venture Evaluation Review Technique) 仿真语言时,仿真模型将为随机网络的形式;如果采用多功能仿真语言 SLAM 时,则既可构造随机网络和离散事件的仿真模型,也可构造微分方程或差分方程的仿真模型。当实际系统特别是社会经济系统属于连续型问题时,则可构成因果关系和系统流程图模型,并采用系统动力学 DYNAMO 仿真语言来实现仿真。

3. 数据采集

为了进行系统仿真,除了要有必要的仿真输入数据以外,还必须收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,因此需要对真实系统的这些参数或类似系统的这些参数做必要的统计调查,通过分布拟合、参数估计以及假设检验等步骤,确定这些随机变量的概率密度函数,以便输入仿真模型,实施仿真运行。

此外,某些动态模型,如系统动力学、计量经济模型等,还需要对历史数据进行误差检验和模型有效性检验。

4. 模型的确认

在系统仿真中,所建立的仿真模型能否代表真实系统,是决定仿真研究成败的关键。按照统一的标准对仿真模型的代表性进行衡量,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模型作直观和有内涵的分析评价;第二步是对模型的假设、输入数据的分布进行必要的统计检验;第三步是对模型作试运行,观察初步仿真结果与实际系统估计的结果是否相近,以及改变主要输入变量的数值时仿真输出的变化趋势是否合理。通过以上三个步骤,一般可认为该模型已得到了确认。然而,由于仿真模型确认的理论和方法目前尚未达到完善的程度,仍有可能出现不同仿真模型都能得到确认的情况。因此改进仿真模型的确认方法,使之更趋于定量化,仍然是系统仿真技术研究中的一项重要课题。

5. 模型的编程实现与验证

在建立仿真模型之后,就需要按照所选用的仿真语言编制相应的仿真程序,以便在计算机上作仿真运行实验。为了使仿真运行能够反映仿真模型的运行特征,必须使仿真程序与仿真模型在内部逻辑关系和数学关系方面具有高度的一致性,使仿真程序的运行结果能精确地代表仿真模型应当具有的性能。通常这种一致性由仿真语言在编程和建模的对应性中得到保证。但是,在模型规模较大或内部关系比较复杂时,仍需对模型与程序之间的一致性进行验