

 高等教育规划教材

现代物流系统建模、仿真及应用

—— 基于 Flexsim

马向国 梁艳 杨惠惠 著

免费提供电子教案

下载网址 <http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



非外借

高等教育规划教材

现代物流系统建模、仿真及 应用——基于 Flexsim

马向国 梁 艳 杨惠惠 著

机械工业出版社

本书从理论和工程案例两个角度对物流系统建模、仿真的方法和工程应用进行介绍,共分为6章,包括系统仿真基础、物流系统仿真基础、典型物流系统建模与仿真方法、仿真输入数据和输出数据分析、Flexsim 软件应用基础、Flexsim 软件在物流系统仿真中的应用。

本书既强调建模和仿真的方法和技术,又立足于物流系统管理决策问题的解决。尤其是书中列举的生产物流、离散流水线、配送中心、自动化立体库以及分拣作业的案例都是作者在长期科研、校企合作和教学中积累的具有代表性的案例。通过这些案例,可以充分培养学生使用物流系统仿真软件综合设计和优化物流节点的能力,对丰富实践教学、促进学科发展以及培养学生理论联系实际的能力具有很好的指导作用。随书配有电子课件以及书中所有案例模型,以方便读者使用。

本书适合物流管理、物流工程、系统工程、管理科学与工程等专业的本科生或研究生作为教材使用,也可供其他领域的学生、学者及科技人员参考。

本书配套授课电子课件,需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册,审核通过后下载,或联系编辑录取(QQ:2966938356,电话:010-88379739)。

图书在版编目(CIP)数据

现代物流系统建模、仿真及应用:基于 Flexsim /马向国,梁艳,杨惠惠著. —北京:机械工业出版社,2017.8

高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-57934-2

I. ①现… II. ①马… ②梁… ③杨… III. ①物流-系统建模-高等学校-教材 ②物流-系统仿真-高等学校-教材 IV. ①F253.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 218911 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王 斌 责任校对:张艳霞

责任印制:张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2017 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·12.25 印张·303 千字

0001-3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-57934-2

定价:39.00 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

出版说明

当前,我国正处在加快转变经济发展方式、推动产业转型升级的关键时期。为经济转型升级提供高层次人才,是高等院校最重要的历史使命和战略任务之一。高等教育要培养基础性、学术型人才,但更重要的是加大力度培养多规格、多样化的应用型、复合型人才。

为顺应高等教育迅猛发展的趋势,配合高等院校的教学改革,满足高质量高校教材的迫切需求,机械工业出版社邀请了全国多所高等院校的专家、一线教师及教务部门,通过充分的调研和讨论,针对相关课程的特点,总结教学中的实践经验,组织出版了这套“高等教育规划教材”。

本套教材具有以下特点:

1) 符合高等院校各专业人才的培养目标及课程体系的设置,注重培养学生的应用能力,加大案例篇幅或实训内容,强调知识、能力与素质的综合训练。

2) 针对多数学生的学习特点,采用通俗易懂的方法讲解知识,逻辑性强、层次分明、叙述准确而精炼、图文并茂,使学生可以快速掌握,学以致用。

3) 凝结一线骨干教师的课程改革和教学研究成果,融合先进的教学理念,在教学内容和方法上做出创新。

4) 为了体现建设“立体化”精品教材的宗旨,本套教材为主干课程配备了电子教案、学习与上机指导、习题解答、源代码或源程序、教学大纲、课程设计和毕业设计指导等资源。

5) 注重教材的实用性、通用性,适合各类高等院校、高等职业学校及相关院校的教学,也可作为各类培训班教材和自学用书。

欢迎教育界的专家和老师提出宝贵的意见和建议。衷心感谢广大教育工作者和读者的支持与帮助!

机械工业出版社

前 言

现代物流系统是一个区别于传统物流系统的复杂大系统，是一个动态的网络系统，包含了交通运输、仓储、包装、配送和信息处理等多个子系统。如何对现代物流系统进行整体优化，使其低成本、高效率、高质量地实现物品在供应链上的移动是现代物流中的一个亟待解决的课题。因此，研究此类系统必须采用有效可行的方法，其中最引人注目的是系统建模仿真与优化理论。根据国外应用经验，应用建模仿真分析方法改进物流系统方案后可使总投资减少 30% 左右。因此，对物流系统的设计、建模和仿真的研究，已经受到普遍的关注和重视；物流系统的建模、仿真及优化技术也日益成为物流系统工程技术人员必备技能之一。

全书从实用角度出发，理论联系实际，图文并茂。首先讲解了现代物流系统建模的基本理论和基本方法，然后是仿真中输入数据的采集方法及仿真结果的分析方法，最后为生产物流、离散流水线、配送中心、自动化立体库以及分拣作业几个典型的物流系统仿真案例。列举的案例都是作者在长期科研、校企合作和教学中积累的具有代表性的案例。通过上述案例可以充分培养学生使用物流系统仿真软件综合设计和优化物流结点的能力，对培养学生理论联系实际的能力具有很好的指导作用。

全书共 6 章，其中第 1 章是系统仿真基础，介绍了系统仿真的基本概念、系统仿真的应用以及物流系统仿真所解决的问题；第 2 章是物流系统仿真基础，介绍了离散系统仿真、仿真的基本方法及原理以及手工仿真；第 3 章详细阐述了排队系统、库存系统和生产系统几种典型物流系统的建模与仿真方法；第 4 章介绍了物流系统仿真输入数据模型的确定以及物流系统仿真输出数据分析；第 5 章介绍了 Flexsim 软件的功能与特点、仿真环境、仿真模型的建立、仿真结果分析；第 6 章基于 Flexsim 软件列举了典型的生产物流、分拣作业、离散流水线、配货系统、自动化仓储中心以及现代物流配送中心物流系统仿真案例。随书配有电子课件以及书中所有案例模型，以方便读者使用。

本书由马向国、梁艳、杨惠惠著。姜旭教授审阅全书，并提出了许多宝贵的修改意见。此外本书在写作过程中还得到了陕西科技大学机电学院刘昌祺教授、清华大学经管学院刘丽文教授的指导，以及北京物资学院物流学院领导、同事的热情支持，在此一并表示感谢。同时感谢物流工程专业研究生睢力铭、于亚弟、杨平哲、苏辉辉在本书写作过程中给予的协助。

由于时间仓促，加之作者水平和精力有限，许多内容未能完善和进一步深入，书中难免有错漏之处，恳请读者批评指正。

本书采用的是 Flexsim 6.0 软件，适用于使用 Flexsim 4.0 以上各版本软件的读者参考与学习。购买本书的读者可通过作者电子邮箱 mxg105@163.com 获取教学软件、Flexsim 7.0 DEMO 排版软件以及本书中的所有案例模型。

作 者

目 录

| | |
|----------------------|----|
| 前言 | |
| 第1章 系统仿真基础 | 1 |
| 1.1 系统、模型、仿真概述 | 1 |
| 1.1.1 系统 | 1 |
| 1.1.2 模型 | 3 |
| 1.1.3 仿真 | 6 |
| 1.1.4 系统、模型与仿真的关系 | 7 |
| 1.2 系统仿真 | 7 |
| 1.2.1 系统仿真概述 | 7 |
| 1.2.2 系统仿真应用 | 11 |
| 1.2.3 系统仿真结果 | 13 |
| 1.3 物流系统仿真及解决问题 | 16 |
| 1.3.1 物流系统的概念与分类 | 16 |
| 1.3.2 物流系统的特性 | 16 |
| 1.3.3 物流系统仿真 | 17 |
| 1.3.4 物流系统仿真的类型 | 17 |
| 1.3.5 物流系统仿真解决的问题 | 18 |
| 1.4 思考题 | 19 |
| 第2章 物流系统仿真基础 | 20 |
| 2.1 离散系统仿真概述 | 20 |
| 2.1.1 离散系统仿真的基本要素 | 20 |
| 2.1.2 离散事件系统仿真的组成与构造 | 22 |
| 2.1.3 离散事件系统仿真的基本步骤 | 22 |
| 2.1.4 离散事件系统仿真方法 | 24 |
| 2.2 离散系统事件仿真算法 | 25 |
| 2.2.1 事件调度法 | 25 |
| 2.2.2 活动扫描法 | 26 |
| 2.2.3 进程交互法 | 27 |
| 2.2.4 三种仿真策略的比较 | 28 |
| 2.2.5 时间推进算法 | 29 |
| 2.3 手工仿真 | 30 |
| 2.3.1 手工仿真步骤 | 30 |
| 2.3.2 手工仿真案例 | 30 |
| 2.4 仿真实例 | 34 |
| 2.5 思考题 | 37 |
| 第3章 典型物流系统建模与仿真方法 | 38 |
| 3.1 排队系统建模与仿真 | 38 |
| 3.1.1 排队系统的概念及特点 | 38 |
| 3.1.2 排队系统的基本参数 | 39 |
| 3.1.3 排队系统的类型 | 41 |
| 3.1.4 排队系统的性能指标 | 42 |
| 3.1.5 排队系统的仿真实例 | 43 |
| 3.2 库存系统仿真 | 47 |
| 3.2.1 库存系统的基本概念 | 48 |
| 3.2.2 库存系统的分类及仿真特点 | 48 |
| 3.2.3 库存系统仿真的建模参数 | 50 |
| 3.2.4 确定性库存系统 | 51 |
| 3.2.5 随机性库存系统 | 52 |
| 3.2.6 库存系统的仿真实例 | 52 |
| 3.3 生产物流系统建模与仿真 | 56 |
| 3.3.1 生产物流系统的基本概念 | 56 |
| 3.3.2 生产物流系统仿真特点 | 57 |
| 3.3.3 生产物流系统仿真的步骤 | 58 |
| 3.3.4 生产系统仿真实例 | 60 |
| 3.4 思考题 | 62 |
| 第4章 仿真输入数据和输出数据分析 | 63 |
| 4.1 仿真输入数据分析 | 63 |
| 4.1.1 仿真输入数据分析概述 | 63 |
| 4.1.2 数据的收集与处理 | 63 |
| 4.1.3 数据分布的分析与假设 | 64 |
| 4.1.4 分布参数的估计 | 67 |
| 4.1.5 拟合优度检验 | 69 |
| 4.2 仿真输出数据分析 | 71 |

| | | | |
|---|------------|-----------------------------|-----|
| 4.2.1 仿真输出数据概述 | 71 | 6.1.1 问题描述与模型参数 | 107 |
| 4.2.2 终态仿真的结果分析 | 71 | 6.1.2 Flexsim 仿真建模 | 109 |
| 4.2.3 稳态仿真的结果分析 | 73 | 6.1.3 仿真结果分析 | 112 |
| 4.2.4 系统性能比较分析 | 76 | 6.2 分拣系统仿真案例 | 118 |
| 4.3 案例分析 | 77 | 6.2.1 问题描述与模型参数 | 118 |
| 4.4 思考题 | 79 | 6.2.2 Flexsim 仿真建模 | 120 |
| 第5章 Flexsim 软件应用基础 | 80 | 6.2.3 仿真结果分析 | 126 |
| 5.1 Flexsim 的功能特点 | 80 | 6.3 配货系统仿真案例 | 129 |
| 5.2 Flexsim 仿真环境及关键技术 ... | 81 | 6.3.1 问题描述与模型参数 | 129 |
| 5.2.1 Flexsim 仿真环境 | 81 | 6.3.2 Flexsim 仿真建模 | 129 |
| 5.2.2 Flexsim 中鼠标操作及键盘 交互 | 90 | 6.3.3 仿真结果分析与优化 | 138 |
| 5.3 Flexsim 建模的相关概念 | 91 | 6.4 离散流水线仿真优化案例 | 141 |
| 5.3.1 面向对象的思想 | 92 | 6.4.1 问题描述与模型参数 | 141 |
| 5.3.2 Flexsim 的对象层次结构 | 92 | 6.4.2 Flexsim 仿真建模 | 141 |
| 5.3.3 结点和树 | 93 | 6.4.3 仿真结果分析 | 145 |
| 5.3.4 任务序列 | 94 | 6.5 自动化仓储中心建模仿真 案例 | 146 |
| 5.4 Flexsim 仿真模型建立 | 95 | 6.5.1 问题描述与模型参数 | 146 |
| 5.4.1 Flexsim 仿真模型的基本组成 | 95 | 6.5.2 Flexsim 仿真建模 | 148 |
| 5.4.2 Flexsim 建模的基本步骤 | 96 | 6.5.3 仿真结果分析 | 160 |
| 5.4.3 建模步骤示例 | 98 | 6.6 现代物流配送中心仿真案例 ... | 164 |
| 5.5 思考题 | 106 | 6.6.1 问题描述与模型参数 | 164 |
| 第6章 Flexsim 软件在物流系统仿真中 的应用 | 107 | 6.6.2 Flexsim 仿真建模 | 166 |
| 6.1 生产系统仿真案例 | 107 | 6.6.3 仿真结果分析 | 187 |

第1章 系统仿真基础

本章引入了系统、模型、仿真的概念，从其定义、特性、分类、作用等方面进行阐述。

系统作为研究的对象，模型是系统的抽象，仿真则像一座桥梁，通过对模型的实验来研究系统。由系统、模型、仿真进一步拓展至系统仿真，解释了其发展历程、分类、仿真步骤以及应用等。最后单独对物流系统仿真开展研究，分析其特性、类型和解决的问题。物流系统仿真在物流设备的配置、物流场地布局规划、物流结点改善等方面发挥了举足轻重的作用。

1.1 系统、模型、仿真概述

1.1.1 系统

半个多世纪以来，“系统”作为一个研究对象，在国际上引起了很多学者的注意，也吸引了众多领域的专家从事研究和应用工作。

1. 系统来源

系统这一概念来源于人类长期的社会实践。人类认识现实世界的过程，是一个不断深化的过程。客观世界中的一切事物的发生和发展，都是矛盾的对立和统一，科学的发展也不例外。在古代，自然科学界往往把世界看成一个整体，寻求共性和统一，但由于缺乏观测和实验手段，科学技术理论又很贫乏，所以对很多事物只能看到一些轮廓及表面现象，往往是只见森林、不见树木。随着科学技术的发展，理论丰富了，工具更先进了，认识逐步深化了，但仍受到当时科学技术水平的限制和世界观的局限，往往又只看到一些局部现象而不能纵观整体，以致只见树木而不见森林。只有当认识不断深化，在对个体、对局部有了更多、更深的了解以后，再把这些分散的认识联系起来，才看到了事物的整体，以及构成整体的各个部分之间的相互联系，从而形成了科学的系统观。

2. 系统定义

系统 (System) 一词源于拉丁文的 “Sytema”，表示群体、集合等。人们对于系统的定义有很多，其中具有代表性是我国著名系统工程学家钱学森给出的定义：“把极其复杂的研究对象称为系统，即由内部相互作用和相互依赖的若干组成部分（称为子系统）结合而成的，具有特定功能的有机整体集合，而这个整体又是它所从属的更大的系统的组成部分”。在美国的韦氏 (Webster) 大辞典中，“系统”一词被解释为“有组织的或被组织化的整体；结合着的整体所形成的各种概念和原理的综合；由有规则的相互作用、相互依存的形式组成的诸要素集合等等”。在日本的 JIS 标准中，“系统”被定义为“许多组成要素保持有机的秩序，向同一目的行动的集合体”。一般系统论的创始人 L. V. 贝塔朗菲 (L. V. Bertalanffy)

把“系统”定义为“相互作用的诸要素的综合体”。美国著名学者阿柯夫（R. L. Ackoff）认为：系统是由两个或两个以上相互联系的任何种类的要素所构成的集合。

一般采用如下的定义：系统（system）是具有特定功能的、相互间具有有机联系的许多要素（element）所构成的一个整体。

3. 系统特性

无论什么样的系统，从系统的定义中可以看出其共同拥有的特性。

(1) 集合性

系统的集合性表明，系统是由两个或两个以上的可以相互区别的要素或子系统所组成的，而要素是构成系统的最基础部分。例如，一个计算机系统，一般都是由中央处理器（CPU）、存储器、输入与输出设备等硬件所组成，同时，还包含有操作系统、数据库等软件，这是一个由要素组合而成的完整系统。而物流系统则可以由运输系统、装卸搬运系统、仓库系统、配送系统、物流信息管理系统等各子系统组成。

(2) 相关性

组成系统的要素是相互联系、相互作用的，相关性说明这些联系之间的特定关系。

(3) 层次性

系统作为一个相互作用的诸要素的总体，可以分解为一系列的子系统，并存在一定的层次结构。这是系统空间结构的特定形式。系统的层次性主要表现在它是其构成要素的上级，同时它也是其上级系统的子系统。在系统层次结构中表述了不同层次子系统之间的从属关系或相互作用关系。在不同的层次结构存在着动态的信息流和物质流，构成了系统的运动特性，为深入研究系统层次之间的控制与调节功能提供了条件。

(4) 整体性

系统是由两个或两个以上的可以相互区别的要素，按照作为系统所应具有的综合整体性而构成的。由于系统要素之间的联系与相互作用，使系统作为一个整体具有特定的功能或效能，这是各要素个体所不具备的。系统整体性说明，具有独立功能的系统要素以及要素间的相互关系（相关性、层次性）是根据逻辑统一性的要求，协调存在于系统整体之中。就是说，任何一个要素都不能离开整体去研究，要素间的联系和作用也不能脱离整体的协调去考虑。系统不是各个要素的简单集合而是一种非加和性的关系，否则就不会具有作为整体的特定功能。脱离了整体性，要素的机能和要素间的作用便失去了原有的意义，研究任何事物的单独部分不能得出有关整体的结论。系统的构成要素和要素的机能、要素的相互联系要服从系统整体的目的和功能。在整体功能的基础之上展开各要素及其相互之间的活动，这种活动的总和形成了系统整体的有机行为。在一个系统整体中，即使每个要素并不都很完善，但它们可以协调、综合成为具有良好功能的系统；反之，即使每个要素都是良好的，但作为整体却不具备某种良好的功能，也就不能称之为完善的系统。

(5) 目的性

通常系统都具有某种目的，要到达既定的目的，系统都具有一定的功能，而系统具备的功能正是区别这一系统和那一系统的标志。系统的目的一般用更具体的目标来体现，比较复杂的系统都具有不止一个目标，因此需要一个指标体系来描述系统的目标。为了实现系统的目的，系统必须具有控制、调节和管理的功能。控制、调节和管理的过程也就是系统的有序化过程，使其进入与系统目的相适应的状态。

(6) 环境适应性

任何一个系统都存在于一定的物质环境之中，因此，它必然也要与外界环境产生物质的、能量的和信息的交换，外界环境的变化必然会引起系统内部各要素之间的变化。系统必须适应外部环境的变化，否则系统是没有生命力的，而能够经常与外部环境保持最优适应状态的系统，才是理想的系统。

4. 系统分类

1) 根据系统的变化特性，系统可分为离散系统和连续系统。离散系统是指变量只在某个离散时间点集合上发生变化的系统。连续系统是指状态变量随时间连续改变的连续系统。实际上很少有系统是完全离散的或完全连续的，但对于大多数系统来说，由于某一类型的变化占据主导地位，就把系统类型归为该类型。

2) 根据系统的物理特征，系统可以分为工程系统和非工程系统两大类。工程系统是航空、航天、核能、电气、机械、热工、水力等工程技术系统，它们通常是用微分方程描述的连续系统。虽然从原则上讲这类系统是允许在实际系统上进行试验的，但是利用仿真技术对它们进行分析研究，既可以保证安全，又能节省大量费用。非工程系统是社会、经济、交通、管理、农业、生态环境等系统，它们属于离散系统。这类系统离不开仿真技术，因为这类系统往往不允许在实际系统上进行试验，如经济系统中一般不允许随意改变销售和供给以避免对市场的冲击。

3) 根据系统的形成方式不同，系统可分为自然系统和人工系统。自然系统形成的主体是自然界，而人工系统主体是人类自身对自然界的改造或者是人类创造的系统。

4) 根据系统的实体性质不同，系统可分为实体系统和概念系统。实体系统是可见的，而概念系统是不可见的、需要借助一定的实体才能体现出来，例如虚拟的网络系统。

5) 根据系统的开放程度，系统可分为孤立系统、封闭系统和开放系统。孤立系统是指该种系统与环境之间既无物质交换又无能量交换，封闭系统与环境之间仅有能量交换没有物质交换，开放系统是指与环境之间既有物质交换又有能量交换。

6) 根据运行性质不同，系统可分为静态系统和动态系统。这种分类方式主要取决于被观察系统是否处于不断变化中。

1.1.2 模型

为了指明系统的主要组成部分以及它们之间的主要关系，以便于人们对系统进行深入的分析研究，往往通过模型来实现。系统模型主要用于三个方面：第一，分析和设计实际系统；第二，预测或预报实际系统某些状态的未来发展趋势；第三，对系统实行最优控制。

1. 模型定义

模型是所研究的系统、过程、事物或概念的一种表达形式，也可指根据实验、图样放大或缩小而制作的样品，一般用于展览、实验或铸造机器零件等用的模子。

系统模型是对实际系统的一种抽象，反映系统内部要素的关系，系统某些方面本质特征，以及内部要素与外界环境的关系；是系统本质的表述，是人们对客观世界反复认识、分析，经过多级转换、整合等相似过程而形成的最终结果。系统模型具有与系统相似的数学描述形式或物理属性，以各种可用的形式，给出研究系统的信息。从概念中可以看出系统模型只是模型中的一种，为了简化描述文中出现的模型均指系统模型。对于系统模型的理解将从

三个方面进行。首先，模型必须是对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，系统模型必须包含系统中的主要因素，模型不可能与实际系统一一对应，但至少应当包含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，使模型对系统而言具有代表性。仿真模型同样必须符合以上各项要求，并且适合于仿真环境下，通过模仿系统的行为来求解问题。

从某种意义上说，模型是系统的代称，同时也是对系统的简化。在简化的同时，模型应足够详细以便从模型的实验中取得相关于实际系统的有效结论。

建模就是建立模型。建立系统模型的过程，又称模型化。建模是研究系统的重要手段和前提。凡是用模型描述系统的因果关系或相互关系的过程都属于建模。

2. 模型特性

由实际系统构造出一个模型的任务主要包括两方面的内容：一是建立模型结构，二是提供数据。在建立模型结构时，主要确定系统的边界，鉴别系统的实体、属性和活动。模型结构根据数据中包含的活动的各个属性之间的关系来确定。在构建模型结构时，要满足两个前提条件：一是要细化模型研究的目的；二是要了解有关特定的建模目标与系统结构性质之间的关系。

一般来说，系统模型的结构具有以下一些性质。

1) 相似性：模型与所研究的系统具有相似的特征和变化规律，这就是真实系统与模型之间具有相似的物理属性或数学描述。

2) 简单性：从实用的观点来看，由于在模型的建立过程中，忽略了一些次要因素和某些不可测变量的影响，因此实际的模型已是一个被简化了的近似模型，一般来说，在实用的前提下，模型越简单越好。

3) 多面性：对于由许多实体组成的系统来说，由于其研究目的不同，就决定了所要收集的与系统有关的信息也是不同的，所以用来表示系统的模型并不是唯一的。由于不同的分析者所关心的是系统的不同方面，或者由于同一分析者要了解系统的各种变化关系，对同一个系统可以产生相应于不同层次的多种模型。

3. 模型分类

系统模型按结构形式分为实物模型、图示模型、模拟模型和数学模型。

1) 实物模型。实物模型是现实系统的放大或缩小，它能表明系统的主要特性和各个组成部分之间的关系，如桥梁模型、电视模型、城市模型、建筑模型、风洞实验中的飞机模型等。这种模型的优点是比较形象，便于共同研究问题；缺点是不易说明数量关系，特别是不能揭示所要的内在联系，也不能用于优化。

2) 图示模型。图示模型是用图形、图表、符号等把系统的实际状态加以抽象的表现形式，如网络图（层析顺序、时间与进度等）、物流图（物流量、流向等）。图示模型是在满足约束条件的目标值中选取较好值的一种方法，在选优时只起辅助作用。当维数大于2时，该种模型作图的范围受到限制。其优点是直观、简单；缺点是不易优化，受变量因素数量的限制。

3) 模拟模型。用一种原理上相似，而求解或控制处理容易的系统代替或近似描述另一种系统，前者称为后者的模拟系统。模拟模型一般有两种类型，一种是可以接受输入进行动态模拟的可控模型，如对机械系统的电路模拟，可用电压模拟机械速度、电流模拟力、电容

模拟质量；另一种是用计算机和程序语言表达的模拟模型，例如物资集散中心站台数量的模拟，组装流水线投料批量的模拟等。通常用计算机模型模拟内部结构不清或复杂系统是行之有效的。

4) 数学模型。数学模型是指对系统行为的一种数量描述。当把系统及其要素的相互关系用数学表达式、图像、图表等形式抽象地表示出来时，就是数学模型。它一般分为确定型和随机型、连续型和离散型。

4. 建模原则

对于同一个实际系统，人们可以根据不同的用途和目的建立不同的模型。所建模型只是实际系统原型的简化，因此既不可能又没必要把实际系统的所有细节都列举出来。一个理想的模型应该既能反映实体的全部重要特性，同时又易于处理，即原则上要满足以下几点。

1) 清晰性。一个复杂的系统是由多个子系统构成的，因此对应的系统模型也是有许多子模型构成的。模型之间除了研究目的所必需的信息外，结构要尽可能清晰。

2) 相关性。模型中应该包括系统中与研究目的有关的信息。虽然与研究目的无关的信息包含在系统模型中可能不会有很大害处，但是因为它会增加模型的复杂性，从而使得求解模型时增加额外的工作，所以应该把与研究目的无关的信息排除在外。

3) 准确性。建立模型时应该考虑所收集的、用以建立模型的信息的准确性，包括确认所应用的原理、理论和应用范围的正确性，以及检验建模过程中针对系统所做假设的正确性。例如在建立工厂设施规划与运输系统模型时，应该将运输工具视为一个三维实体而不能视为一个质点，因为运输工具的长度和宽度影响了运输通道的布局。

4) 可辨识性。模型结构必须具有可辨识的形式。可辨识性是指系统模型必须有确定的描述和表示方式，而在这种描述方式下与系统性质相关的参数必须有唯一确定的解。若一个模型结构中具有无法估算的参数，则此结构就无实用价值。

5) 集合性。建立模型还需要进一步考虑能够把一些个别实体组成更大实体的程度，即模型的集合性。例如对物流与供应链系统的研究中，除了能研究每个物流中心的物流细节和规律之外，还应可以综合计算多个物流中心构建成一个供应链系统的效能。

5. 建模步骤

建构模型需要想象力和技巧。这里从方法论的角度总结的建模步骤如下。

1) 形成问题。在明确目标、约束条件及外界环境的基础上，规定模型描述哪些方面的属性，预测何种后果。

2) 选定变量。按前述影响因素的分类筛选出适合的变量。

3) 变量关系的确定。定性分析各变量之间的关系及对目标的影响。

4) 确定模型的结构及参数辨识。建立各变量之间的定量关系，主要的工作是选择合适的表达形式，数据来源是这一步骤的难点，有时由于数据难以取得，不得不回到步骤2)甚至步骤1)。

5) 模型真实性检验。模型构建过程中，可用统计检验的方法和现有统计数字对变量之间的函数关系进行检验。模型构建后，可根据已知的系统行为来检验模型的结果。如要使结果解释现实世界能令人接受，不致相悖，便要判断它的精确程度和模型的应用范围。如精度比期望的要低，则需弄清其原因，可能是原先的设定错误或者忽略了不该忽略的因素。

经过以上 5 个步骤，模型便可在实际中应用，但不能与检验过的情况误差太大，应把每次模型应用都当成是对模型的一次检验。有些模型，特别是社会经济系统的模型，难以实际检验，另一些模型虽可检验，但花费太大或需要特殊条件，这时，个人经验很重要，凭着对原型的印象进而对模型的真实性和可靠性做出判断。然而，在能够实际检验的场合总应力求进行试验。不经过试验的建模过程总是不完整的。

1.1.3 仿真

系统仿真是利用人为控制的环境条件，改变某些特定的参数，观察模型的反应，研究真实系统的现象或过程。当前，仿真技术已经成为分析、研究各种复杂系统的重要工具，它广泛用于工程领域和非工程领域。

1. 仿真定义

仿真就是对真实过程或系统在某个时间区间内运行的模仿。利用模型复现实际系统中发生的本质过程，并通过对系统模型的实验来研究存在的或设计中的系统，又称模拟。在研究、分析系统时，对随着时间变化的系统特性，通常是通过一个模型来进行研究。在某些情况下，若所研究的模型足够简单，可以用数学方法表示并求解，这些解通常由一个或多个成为系统性能测度的数学参数组成。但是许多真实系统是非常复杂的，无法用数学方法来求解。这时利用仿真就可以像观察、测试真实系统那样，在仿真模型中得到系统性能随时间而变化的情况，从仿真过程中收集数据，得到系统的性能测度。所以，仿真包括两个过程：建立模型和对模型进行实验、运行。

2. 仿真作用

仿真模型已经在描述、设计和分析系统中充分显示了它的作用，具体地说有以下几个方面。

1) 作为解释手段去说明一个系统或问题。为了深入了解以及改进现有的实际运行的系统，而在其上进行实验，则往往会花费大量的人力、物力、财力和时间。而通过计算机仿真，可以使现有系统不受干扰，经过分析仿真结果，对现有系统做出正确评价，并可预测其未来的发展趋势，提出改进方案。

2) 作为设计准绳去综合分析和评价所建议的决策措施。对于所设计的新系统，在未能确定其优劣的情况下，不必花费大量的投资去建立它，而是先采用计算机仿真，对新系统的可行性和经济效果做出正确的评价后再作决策。

3) 作为决策支持系统辅助决策。在管理决策中，对具有不同的决策变量或参数组合而成的决策方案，进行多次计算机仿真，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，从而辅助管理决策。

4) 作为预测方法预报和辅助计划系统的未来发展。

5) 作为分析工具确定系统的关键组成部分或项目。

3. 仿真与解析方法的比较

在系统模型不太复杂的情况下，可运用数学方法，如线性代数、微积分、数学规划等求解问题。但是，大多数的实际系统是不可能采用上述解析方法来求解问题。这时，仿真就能发挥它应有的作用。在这种情况下，系统设计与分析人员运用计算机仿真，求解系统模型，并收集相应的资料用以估计所研究的系统的各项特征。

与数学解析方法相比，仿真有着以下优点。

1) 对于复杂系统具有良好的适应性，大多数具有随机因素的复杂系统无法用准确的数学模型表述从而采用解析方法评价，于是仿真通常就成为解决这类问题的好方法。

2) 允许对一段系统工作时间进行压缩，用小段时间仿真出大量时间段的工作情况。

3) 不需要打乱真实系统就对现有系统在重新设计的工作条件下的工作成果做出分析判断。

4) 能帮助人们选择最优的系统设计方案。

与此同时，仿真也存在着如下的缺点。

1) 需要花费大量的费用和时间，这是由仿真系统开发的复杂性及仿真所需的计算机存储量大和计算时间长所造成的。

2) 不能完成现实系统的全部仿真而只能仿真其中一部分，仿真结果的可信度会受影响。

3) 仿真的精度受到许多方面因素的影响，较难控制和测定。

4) 模型的参数设定是非常困难的，也即难以确定合适的系统仿真初始条件。

1.1.4 系统、模型与仿真的关系

系统、模型与仿真三者之间有密切的关系。系统是研究的对象，模型是系统的抽象，仿真是通过对模型的实验以达到研究系统的目的。三者的关系如图 1-1 所示。

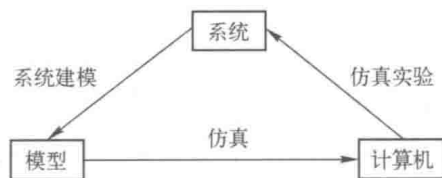


图 1-1 系统、模型与仿真的关系

1.2 系统仿真

1.2.1 系统仿真概述

1. 系统仿真发展

系统仿真是 20 世纪 40 年代末伴随着计算机技术的发展而逐步形成的一门新兴学科。最初，仿真技术主要应用于航空、航天、原子反应堆等价格昂贵、周期长、危险性大、实际系统实验难以实现的少数领域，后来逐步发展到电力、石油、化工、冶金、机械等一些主要工业部门，并进一步扩大到社会系统、经济系统、交通运输系统等一些非工程系统领域。可以说，现代系统仿真技术和综合性仿真系统已经成为复杂系统，特别是高技术产业不可缺少的分析、研究、设计、评价、决策和训练的重要手段，其应用范围在不断扩大，应用效益也日益显著。

2. 系统仿真定义

从一般意义上讲，系统仿真可以被理解为：在对一个已经存在或尚不存在的系统进行研究的过程中，为了解系统的内在特性，必须进行一定的实验；由于一些原因（未存在、危

险性大或者成本高昂),无法在原系统上直接进行实验,只能设法建立既能反映系统特征又能满足系统实验要求的系统模型,然后在该模型上进行实验,以达到了解或设计系统的目的。

从近现代意义上讲,所谓系统仿真,是指:利用计算机来运行仿真模型,模仿实际系统的运行状态及其随时间的变化情况,并通过对仿真过程的观察和统计,得到仿真模型的输出参数和基本特征,以此来估计和推断实际系统的真实性能。

系统仿真就是根据系统分析的目的,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、且具有一定逻辑关系或数量关系的仿真模型,据此进行试验或定量分析,以获得正确决策所需的各种信息。

3. 系统仿真分类

(1) 根据模型的种类分类

根据模型种类的不同,系统仿真可以分为三种:物理仿真、数学仿真、半实物仿真。

1) 物理仿真。按照真实系统的物理性质构造系统的物理模型,并在物理模型上进行实验的过程,称为物理仿真。其优点是直观、形象化。计算机问世以前,基本上是物理仿真,也称为模拟。物理仿真的缺点是:花费的投资较大,周期一般也比较长,并且在物理模型上做实验,很难修改系统的结构,实验受到一定的限制。

2) 数学仿真。对实际系统进行抽象,并将其特性用数学关系加以描述而得到的系统的数学模型,对数学模型进行试验的过程称为数学仿真。计算机技术的发展为数学仿真创造了环境,使得数学仿真变得方便、灵活、经济,因而数学仿真亦称为计算机仿真。数学仿真的缺点是受限于系统建模技术,即系统的数学模型不易建立。

3) 半实物仿真。第三类称为半实物仿真,即将数学模型和物理模型甚至实物联合起来进行实验。对系统中比较简单的部分或对其规律比较清楚的部分建立数学模型,并在计算机上加以实现;而对比较复杂的部分或对其规律尚不十分清楚的系统,由于其数学模型的建立比较困难,则采用物理模型或实物。仿真时将两者连接起来完成整个系统的实验。

(2) 根据系统模型的特性分类

计算机仿真根据被研究系统的特性可以分为连续系统仿真、离散事件系统仿真和离散-连续复合系统仿真三大类。

1) 连续系统仿真。

连续系统是指系统中的状态变量随时间连续变化的系统。由于连续系统的关系式要描述每一实体属性的变化速率,所以连续系统的数学模型通常由微分方程组成。当系统比较复杂尤其是引进非线性因素后,此微分方程经常不可求解,至少求解非常困难,所以采用仿真方法求解。

连续系统计算机仿真的中心问题是将微分方程描述的系统转变为能在数字机上运行的模型。用于该类系统的数学方法可以分为以下两种:常微分方程的数值积分法和连续系统的离散化方法。

① 数值积分法。在连续系统仿真中,系统模型数学描述的最基本形式是微分方程,所以微分方程的数值计算方法即数值积分法的基本算法是主要研究内容。

数值积分法主要可分为单步法、多步法和预测校正法等。单步法中最简单的是欧拉(Euler)法,常用的是龙格-库塔(Runge-Kutta)法。多步法中则以阿达姆斯(Adams)

法用得最为普遍。

对连续系统进行数字仿真时，首先应保证这一数值解的稳定性，即在初始值有误差，计算机在舍入误差影响下，误差不会积累而导致计算失败。所以，在进行仿真时必须正确选择积分步长，积分步长过大将影响计算稳定性及计算精确度，而积分步长过小则大大增加计算量与计算时间，故应在保证计算稳定性与计算精度的要求下选择最大步长。

② 离散相似法。离散相似法是将连续系统进行离散化处理，用离散化的模型直接代替连续系统的数学模型，其数字描述是以常系数差分方程来近似“等效”原来的常系数微分方程，这样就可以方便地用迭代方法在数字计算机上直接求解差分方程。

采取了合理的算法，就可以将数学模型转为仿真模型，然后编程、运行，得到连续系统的仿真结果。

2) 离散事件系统仿真。

离散事件系统是状态变量只在一些离散的时间点上发生变化的系统。这些离散的时间点成为特定时刻。在这些特定时刻系统状态发生变化，在其他时刻系统状态保持不变，而在这些特定时刻是由于有事件发生所以引起了系统状态发生变化。常见的离散事件系统有排队系统、库存系统等。

总体说来，离散事件系统具有如下特点。

- ① 不连续性，离散事件系统的物理状态在本质上都是离散的。
- ② 性能测度的连续性，如平均输出、等待时间等。
- ③ 随机性，系统在运行过程中总有诸如失效等不可预知的因素在起作用。
- ④ 层次性，这是产生系统复杂的原因之一。
- ⑤ 动态性，在对离散事件系统进行动态控制时尤其要注意所选模型必须能充分描述系统的动态性。第一，计算的复杂性，这是因为离散事件系统物理状态呈指数增长；第二，应用的广泛性，离散事件系统的应用领域十分广泛，如FMS分布式系统、计算机系统、军事C31系统等。

3) 离散—连续复合系统仿真。

在离散—连续复合系统仿真中，参变量可以做连续性及离散性的变化，或者做连续性变化并具有离散型突变。它的自变量——仿真时间可以是连续性的或离散性的。

4) 连续系统与离散事件系统的区别。

比较连续系统与离散事件系统，可以看出二者存在如下几方面的区别。

① 时间基。连续系统的时间基是一个确定的值。离散事件系统的时间基则是可变的，而且随着时间基的变化，仿真结果也各不相同。这两种仿真，系统的初始状态不同，仿真的结果也不相同。因为离散事件系统仿真的结果是一个统计结果，与统计的区段大小有关。

② 输入变量和输出变量。连续系统的输入变量通常是一个确定性变量，而离散事件系统的变量往往带有随机性，因此离散事件系统的模型也被称为随机模型。输出变量与输入变量情况相同。

③ 状态变量。连续系统的状态变量一般也是一个连续变量，而离散事件系统的状态变量则可能是非连续的，例如仓库货位的状态是空或非空。

④ 状态转移函数。在连续系统中，存在一个状态转移函数，可通过其推算出状态变量的变化过程，而离散事件系统则不存在状态转移函数，人们无法找到一个函数来表达状态变

量变化的规律。

⑤ 状态空间。状态空间是状态变量的集合所表述的空间。对于一个被研究的连续系统，引进不同组合的状态变量，可以构造不同的状态空间模型。这一点与离散事件系统是相同的。

从上述分析可知，离散事件系统与连续系统最主要的区别在于离散事件系统输入/输出变量的随机性以及状态变化的不确定性。由此，连续系统与离散事件系统仿真方法有很大的差别。连续系统仿真借助数字积分算法和离散相似算法等来求解表征系统变量之间关系的方程；离散事件系统则是建立系统的概率模型，采用数值方法“执行”仿真模型。系统的变量是反映系统各部分相互作用的一些确定或者随机事件，系统模型则反映这些事件和状态的值集，仿真结果，也就是“执行”的结果，是产生处理这些事件的时间历程。

(3) 根据仿真时钟与实际时钟的比例关系分类

实际动态系统的时钟称为实际时钟，而系统仿真时模型所采用的时钟称为仿真时钟。根据仿真时钟与实际时钟的比例关系，系统仿真分类如下。

1) 实时仿真，即仿真时钟与实际时钟完全一致，也就是模型仿真的速度与实际系统运行的速度相同。当仿真系统中存在物理模型或实物时，必须进行实时仿真。有时也称为在线仿真。

2) 亚实时仿真，即仿真速度慢于实际时钟，也就是模型仿真的速度慢于实际。

4. 系统仿真步骤

系统仿真的一般步骤如下。

(1) 调研系统，建立目标

通过调研应对研究的系统有全面的、深入的了解，能够对系统进行尽可能详细的描述，明确仿真的目标和系统涉及的范围。一般来说，仿真目标不同，所建立的模型也不同，为建立模型所需要采集的数据也不同。

(2) 收集仿真数据，建立模型

根据仿真的目标，对系统进行选择和整理，这是一件费时费力的工作。在收集数据时，应注意考虑系统运行的循环周期。正确的收集方法是对完整的循环周期收集数据。建立模型的过程，是一个抽象和简化的过程。为了保证所建模型符合真实系统，在建立模型后，应对模型进行检查，反复修改，直至模型正确为止。所需检查的项目包括系统流程、逻辑关系、循环周期、随机变量等。

(3) 编制程序

程序可以用通用语言编写，如 Fortran, C, Pascal 等，也可以用专门的仿真语言编写，如离散事件系统的仿真语言有 GPSS, SIMULA, SIMAN, SLUM, WITNESS 等，还可以用专门的仿真软件编写，如 ARENA, AUTOMOD 等。

(4) 运行仿真模型

在计算机上进行仿真运行，获取模型的输出数据。许多仿真语言和仿真软件如 ARENA, WITNESS 可以做到边建模边试运行。

(5) 输出结果分析

输出结果分析在仿真活动中占有十分重要的地位，特别是对离散事件系统来说，其输出