



XIANDAIWULIUXITONG  
FANGZHENYUYOUHUAJISHU

# 现代物流系统 仿真与优化技术

马向国 邬跃◎编著

中国物资出版社

# 现代物流系统仿真与优化技术

马向国 邬 跃 编著

中国物资出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代物流系统仿真与优化技术 / 马向国, 邬跃编著. —北京: 中国物资出版社, 2010. 12

ISBN 978 - 7 - 5047 - 3664 - 2

I. ①现… II. ①马…②邬… III. ①物流—计算机仿真②物流—系统最优化  
IV. ①F253.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 255117 号

策划编辑 司昌静

责任编辑 司昌静

责任印制 方朋远

责任校对 孙会香 杨小静

中国物资出版社出版发行

网址: <http://www.clph.cn>

社址: 北京市西城区月坛北街 25 号

电话: (010) 68589540 邮政编码: 100834

全国新华书店经销

三河市西华印务有限公司印刷

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 19 字数: 474 千字

2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

书号: ISBN 978 - 7 - 5047 - 3664 - 2/F · 1453

印数: 0001—2000 册

定价: 35.00 元

(图书出现印装质量问题, 本社负责调换)

# 前 言

现代物流是物品从供应地向接收地的实体流动过程，它存在于社会经济的各个方面和环节中。在社会经济活动中，现代物流不仅能够创造时间和空间价值，而且能够创造信息价值，使社会价值增值。现代物流系统也是一个区别于传统物流系统的复杂大系统，它是一个动态的网络系统，包含了交通运输、仓储、包装、信息等多个子系统。如何对物流系统进行整体优化，使其低成本、高效率、高质量地实现物品的移动是现代物流中一个亟待解决的问题。因此，研究此类系统必须采用有效可行的方法，其中最引人注目的研究领域为系统仿真与优化理论。

系统仿真是通过计算机建立能反映真实系统规律的仿真模型，对模型进行仿真实验，对实验数据进行分析，进而科学地开展系统方案评价和系统分析的关键技术。物流系统是企业生产的一个重要组成部分，物流合理化是提高企业生产率的重要方法之一。系统仿真技术能够在系统规划、运作等物流管理的各个层面进行仿真分析、评价和对比不同的系统方案，达到系统优化的目的。根据国外应用经验，应用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，对物流系统的设计和仿真的研究，已经日益受到普遍的关注和重视，物流系统的仿真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，列举的案例都是作者在长期科研和教学中积累的具有代表性的案例，对培养学生理论联系实际的能力具有很好的指导作用。

本书对物流系统仿真与优化的各个方面进行比较全面的介绍，既强调优化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。全书共分为十章，其中第一章是系统仿真概论，介绍了系统仿真的基本概念以及概括了系统仿真的应用；第二章介绍了物流系统仿真基础，详细阐述了几种物流系统的仿真方法；第三章介绍了物流系统 Petri 网概念、建模理论知识以及仿真算法；第四章介绍了物流系统仿真中的概率理论，详细论述了离散事件系统仿真中常用的概率分布形式、概率分布模型在离散事件系统中的应用以及随机过程的相关概念；第五章介绍了物流系统常用仿真软件，其中包括 Witness、Flexsim、Arena 等；第六章介绍了 Flexsim 的功能与特点、仿真环境、仿真模型的建立、仿真结果分析以及列举了 Flexsim 案例；第七章介绍了 Arena 的功能与特点、仿真环境、仿真模型的建立、仿真结果分析以及列举了 Arena 案例；第八章介绍了物流系统优化的原则、必要性以及物流系统的优化方法；第九章介绍了物流系统优化方法，包括遗传算法、禁忌搜索算法、模拟退火算法和蚁群算法等；第十章介绍了物流仿真领域的最新发展动态，并对发展前景做了展望。

本书由马向国编写，书稿经邬跃教授审阅，并提出了许多宝贵的修改意见。此外，本

书在编写过程中还得到了清华大学经济管理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。在编写过程中参考了大量的资料和文献，由于篇幅所限，没有列出参考文献，在此对这些资料的作者深表谢意。

本书还得到了中国物资出版社的大力支持，在此也要特别感谢本书的责任编辑为编辑工作提供的多方面帮助。

本书适合于物流管理、物流工程、交通运输、管理科学与工程、系统工程等专业的本科生和研究生作为系统仿真相关课程学习的教材或教参，也可供其他领域的学生、学者及科技人员参考使用。

由于编写时间仓促，加之作者水平和精力有限，许多内容未能进一步深入，书中难免有错漏之处，恳请读者批评指正。欢迎读者通过电子邮箱 [mxg105@163.com](mailto:mxg105@163.com) 与作者进行更多的交流和探讨。

作者

2010年12月

# 目 录

<b>第一章 系统仿真概论</b> .....	1
第一节 系统、建模与仿真 .....	1
第二节 系统仿真的基本概念 .....	6
第三节 系统仿真的应用 .....	10
第四节 物流系统仿真 .....	12
思考题 .....	15
<b>第二章 物流系统仿真基础</b> .....	16
第一节 离散系统仿真 .....	16
第二节 排队系统仿真 .....	21
第三节 库存系统仿真 .....	26
第四节 仿真结果分析 .....	31
思考题 .....	34
<b>第三章 物流系统 Petri 网建模及仿真算法</b> .....	35
第一节 物流系统 Petri 网建模 .....	35
第二节 仿真算法 .....	52
思考题 .....	60
<b>第四章 物流系统仿真中的概率理论</b> .....	61
第一节 概率统计的基本概念 .....	61
第二节 离散事件系统仿真中常用的概率分布形式 .....	67
第三节 随机数与随机数发生器 .....	71
思考题 .....	76

<b>第五章 物流系统仿真软件介绍</b> .....	77
第一节 Flexsim 软件介绍 .....	77
第二节 AutoMod 软件介绍 .....	81
第三节 Arena 软件介绍 .....	86
第四节 Extend 软件介绍 .....	92
第五节 Witness 软件介绍 .....	97
第六节 MATLAB 软件介绍 .....	101
思考题 .....	105
<b>第六章 Flexsim 软件在物流系统仿真中的应用</b> .....	106
第一节 Flexsim 的功能特点 .....	106
第二节 Flexsim 仿真环境及关键技术 .....	107
第三节 Flexsim 建模的相关概念 .....	120
第四节 Flexsim 仿真模型建立 .....	125
第五节 Flexsim 物流领域案例分析 .....	139
思考题 .....	177
<b>第七章 Arena 在物流系统仿真中的应用</b> .....	178
第一节 Arena 简介 .....	178
第二节 Arena 基础知识 .....	182
第三节 Arena 的输入分析工具 .....	197
第四节 Arena 建模 .....	201
第五节 Arena 的输出分析工具 .....	219
<b>第八章 现代物流系统优化概述</b> .....	229
第一节 优化问题概述 .....	229
第二节 现代物流系统的复杂性 .....	234
第三节 物流系统优化的原则及必要性 .....	238
第四节 物流系统优化方法 .....	242
<b>第九章 现代物流系统优化方法</b> .....	252
第一节 优化算法及其分类 .....	252

---

第二节	遗传算法 .....	255
第三节	禁忌搜索算法 .....	263
第四节	模拟退火算法 .....	269
第五节	人工神经网络 .....	272
第六节	蚁群算法 .....	279
思考题	.....	283
<b>第十章</b>	<b>现代物流系统仿真与优化技术发展趋势 .....</b>	<b>284</b>
第一节	物流系统仿真技术发展的技术支撑 .....	284
第二节	现代物流系统仿真与优化的研究进展 .....	285
第三节	现代物流系统仿真与优化的发展趋势 .....	287
第四节	物流仿真软件的发展与虚拟现实技术 .....	291



# 第一章 系统仿真概论

## 第一节 系统、建模与仿真

### 一、系统

#### (一) 系统的定义

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，吸引了众多领域的专家从事研究和应用工作。

“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。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。

“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，其中具有代表性的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，而且，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. 贝塔朗非(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(Ackoff, R. L.)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。”

一般我们采用如下的定义：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。

随着科学技术的不断进步，人们对系统的含义的理解和认识也在不断深化，其定义也在不断完善，但从上述几个定义中，不难看出其共同的特征，即：

第一，系统是由两个以上的要素组成的整体。要素是构成系统的最基本的部分，没有要素就无法构成系统，单个要素也无法构成系统。

第二，系统的诸要素之间、要素与整体之间以及整体与环境之间存在着一定的有机联系。要素之间若没有任何联系和作用，则也不能称之为系统。

第三，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。

系统表达的本质是复杂的研究对象。在现实生活中，很多问题是复杂的系统问题，比如卫星系统、核能系统、汽车动力系统、物流系统，又比如教育系统、法制系统、农业系统，等等。采用“系统”这个概念和相应的一系列研究方法，是一种认识世界的角度和方法，强调了客观对象的整体性、层次性、交互性和协调可控性。系统思想是进行分析和综合的辩证思维工具，它在辩证唯物主义那里吸取了丰富的哲学思想，在运筹学、控制论、各门工程和社会科学那里获得了定性定量相结合的科学方法，并通过系统工程充实了丰富的实践内容。

## (二) 系统的特性

一般系统都具有以下特性：

(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所组成的。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、程序设计、数据库等软件，从而形成一个完整的集合。

(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) 阶层性。系统作为一个相互作用的诸要素的总体，它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。系统层次结构表述了不同层次子系统之间的从属关系或相互作用关系。在不同的层次结构中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。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、阶层性）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，否则它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都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，要达到既定的目的，系统都具有一定的功能，

而这正是区别这一系统和那一系统的标志。系统的目的通常用更具体的目标来体现，一般说来，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。管理的过程也就是系统的有序化过程，使它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。不能适应外部环境变化的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。

### (三) 系统的分类

根据性质的不同，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。这类系统就更离不开仿真技术的帮助，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。

## 二、建模

### (一) 建模的概念

在自然科学、工程技术和社会科学的许多领域中，定量的系统分析、系统综合已受到人们越来越多的重视。模型是开展这些工作的有效工具，而模型化则是开展这些工作的前提和基础。

所谓模型，就是对实际系统的一种抽象、本质的描述。第一，模型必须是对现实系统的一种抽象反映，它是在一定假设条件下对系统的简化。第二，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，而至少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以上各项要求，并且需要适合于仿真环境下，通过模仿系统的行为来求解问题。

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。它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。

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。

建立和运用系统模型的目的在于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地分析和研究。系统建模主要用于三个方面：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。

## （二）模型的分类

按表达形式的不同，模型一般可粗略地分为实体模型和抽象模型两大类。

实体模型包括：实物模型（如城市规划模型、作战沙盘等）和模拟模型（如地图、电路图、电路模拟机械运动等）。

抽象模型也称符号模型，这是模型中最丰富多彩的部分。其中包括数学模型、结构模型、仿真模型及诸如化学、音乐、美术等学科的符号模型，也包括用自然语言表达的直观描述式模型。

除上述分类外，还可按其形式、结构、用途和对象等分类。在众多分类的模型中，数学分析模型是发展最快、内容最丰富、最受人偏爱的一种。它又可以细化为以下几种：

- （1）按变量分为确定模型或随机模型。
- （2）按变量之间的关系分为线性模型或非线性模型。
- （3）按变量取值分为连续模型或离散模型。
- （4）按时间分为动态模型或静态模型。
- （5）按功能用途分为结构模型、评价模型、工程设计模型和预测模型等。

## （三）建模的原则

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，因此既不可能也没必要把实际系统的所有细节都列举出来。一个理想的数学模型应该既能反映实体的全部重要特性，同时在数学上又易于处理，即原则上要满足：

- （1）现实性：即模型需充分立足于现实问题的描述上。
- （2）简洁性：模型中的变量的选择不能过于烦琐，模型的数学结构不宜过于复杂。
- （3）适应性：模型应易于数学处理和计算。
- （4）强壮性：指模型对现实问题的变动不敏感，对问题的描述和解释具有一般性。

## （四）建模的步骤

建构数学模型需要想象力和技巧。有人说，数学模型是应用数学的艺术。要掌握一门艺术，需见多识广，善于揣摩别人的思想方法，多实践、多体会。这里从方法论的角度总结建模步骤如下：

（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其对目标的影响。

（4）确定模型的数学结构及参数辨识。建立各变量之间的定量关系，主要的工作是选择合适的数学表达形式，数据来源是该步骤的难点，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。在数学模型构建过程中,可用统计检验的方法和现有的统计数字对变量之间的函数关系进行检验。模型建构后,可根据已知的系统行为来检验模型的计算结果。如用计算结果解释现实世界尚能令人接受,不致相悖,便要判断它的精确程度和模型的应用范围。如果精度比期望的要低,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。

经过以上五个步骤,数学模型便可在实际中应用,但不能离开检验过的情況太远,每应用一次模型都应看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,凭着对原型对象的认识而对模型的真实性和作出判断。然而,在能够实际试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。

### 三、仿真

#### (一) 仿真的概念

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。

仿真(Simulation)是真实过程或系统在整个时间内运行的模仿。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,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。

#### (二) 仿真的作用

总的来说,管理系统仿真扮演着管理试验手段的角色。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。对于现有的实际运行的系统,如果为了深入了解它以及改进它,而在实际的系统中进行实验,则往往花费大量的人力、物力、财力和时间,有时甚至是不可能的,而通过计算机仿真,可以使现有系统不受干扰,经过分析仿真结果,对现有系统作出正确评价,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,先不必花费大量的投资去建立它,而是采用计算机仿真,对新系统的可行性和经济效果作出正确的评价。

(3) 作为决策支持系统辅助决策。在管理决策中,针对具有不同的决策变量或参数组合的不同决策方案,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,从而辅助管理决策。

- (4) 作为预测方法去预报和辅助计划系统的未来发展。
- (5) 作为分析工具去确定系统的关键组成部分或项目。

### (三) 仿真与解析方法的比较

在系统模型不太复杂的情况下，往往运用数学方法，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如此复杂以至于它的模型不可能采用上述解析方法求得解决。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用解析方法评价，于是仿真通常成为解决这类问题的好方法。
- (2) 它允许对一段系统工作时间进行压缩，用一小段时间仿真大量时间段的工作情况。
- (3) 不需要打乱真实系统就可以使人们对现有系统在重新设计的工作条件下的工作成果作出分析判断。
- (4) 能帮助人们选择最优的系统设计方案。

与此同时，仿真也存在如下缺点：

- (1) 它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) 由于现实生活的复杂性，不能完成全部仿真，而只能是其中一部分，所以会影响到仿真结果的可信度。
- (3) 仿真的精度受到许多因素的影响，较难控制和测定。
- (4) 模型的参数设定是非常困难的，即难以确定合适的系统仿真初始条件。

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。

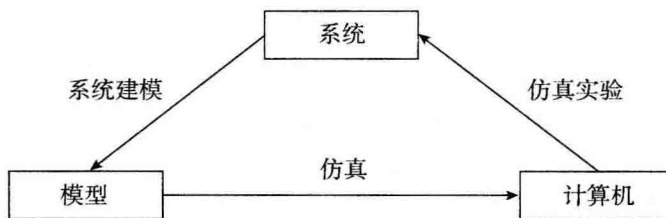


图 1-1 系统、模型与仿真的关系

## 第二节 系统仿真的基本概念

系统仿真是 20 世纪 40 年代末以来，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、实际系统试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任何复杂系统,特别是高新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。

## 一、系统仿真的定义

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变化的过程,并通过对仿真运行过程的观察和统计,得到被仿真系统的仿真输出参数和基本特性,以此来估计和推断实际系统的真实参数和真实性能。相似论是系统仿真的主要理论依据。

任何系统都存在需要研究的三方面内容,即实体、属性和活动。实体是存在于系统中的每一项确定的物体。属性是实体所具有的每一项有效的特性。活动是导致系统状态发生变化的一个过程,活动是在一段时间内发生的情况,反映了系统的变化规律。存在于系统内部的实体、属性和活动组成的整体称为系统的状态。处于平衡状态的系统称为静态系统,状态随时间不断变化的系统为动态系统。

## 二、系统仿真的分类

### (一) 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) 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。计算机问世之前,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,周期也比较长,并且在物理模型上做实验,很难修改系统的结构,使实验受到一定的限制。

(2) 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) 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试验。

### (二) 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,随时间连续的变化的系统。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是由微分方程组成。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將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,应先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。
- (6) 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。
- (7) 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C3I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。它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。

#### (三) 根据仿真时钟与实际时钟的比例关系分类

实际动态系统的时间基称为实际时钟，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。当被仿真系统中存在物理模型或实物时，必须进行实时仿真，例如各种训练仿真器就是这样。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。

### 三、系统仿真的步骤

系统仿真的一般步骤为：

#### (一) 调研系统，建立目标

通过调研，仿真者应对研究的系统有全面、深入地了解，能够对系统进行尽可能详细