



普通高等学校管理科学与工程类学科专业主干课程教材

# 系统建模与仿真

罗国勋 罗 昕 蒋天颖 丛祝辉 编著



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等学校管理科学与工程类学科专业主干课程教材

XITONG JIANMO YU FANGZHEN

# 系统建模与仿真

罗国勋 罗 昕 蒋天颖 丛祝辉 编著



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容简介

本书系统介绍建模与仿真的理论与方法。全书共 10 章:第一章简要介绍系统、模型、仿真的基本概念;第二章讨论建模的方法论和常用的建模方法;第三章介绍 Spreadsheets 方法的平台 Excel 基础,讨论如何以 Excel 为平台建立电子表格模型;第四章介绍离散事件系统模型;第五章、第六章讨论蒙特卡罗方法及随机数、随机变量生成的方法;第七章、第九章就输入、输出数据的分析作简要说明;第八章讨论如何用 Spreadsheets 方法建立及运行电子表格仿真模型,还特别介绍在仿真模型中利用 Excel 的插件 @ RISK;第十章简要介绍用 ED 建立二维、三维动画仿真的内容。

本书不强调数学公式的推导与计算,而是注重如何对复杂的实际系统进行描述与建模,并用计算机求解,以大量计算机截图配合说明,同时配有课件供教师授课使用。

本书可作为经济、工商管理、工业工程以及其他管理专业的研究生、本科生的教材,也可用作各类管理人员、工程技术人员的参考书。

如果广大读者希望试用 ED 物流仿真软件,请联系北京格瑞纳公司,电话:13910760339,邮箱:victor.Chen@vip.sina.com。

## 图书在版编目(CIP)数据

系统建模与仿真 / 罗国勋等编著. —北京:高等教育出版社,2011.4  
ISBN 978-7-04-031635-3

I. ①系… II. ①罗… III. ①系统建模-高等学校-教材 ②系统仿真-高等学校-教材 IV. ①N945.12 ②TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 030198 号

策划编辑 解琳 责任编辑 边晓娜 封面设计 杨立新 责任绘图 尹文军  
版式设计 张杰 责任校对 王效珍 责任印制 韩刚

---

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
印刷 高等教育出版社印刷厂  
开本 787 × 1092 1/16  
印张 22  
字数 500 000  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
版 次 2011 年 4 月第 1 版  
印 次 2011 年 4 月第 1 次印刷  
定 价 33.90 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。  
版权所有 侵权必究  
物料号 31635-00

# 前 言

仿真(Simulation)是通过建立模型对系统进行实验研究的过程,是20世纪40年代末以来伴随着计算机技术发展而形成的一门新兴学科。近年来,仿真的应用领域越来越广泛,从航空、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领域,电力、石油、化工、冶金、机械等工业部门,到社会系统、经济系统、交通运输系统、生态系统等一些非工程系统领域均有成功仿真的范例。系统仿真在系统分析、研究、设计、评价、决策和训练等方面的作用和效益十分明显。尤其是当面临的问题尚无成熟的系统理论可依,也不能凭借实验手段解决时,仿真是一个可供选择的解决问题的途径。可以说,系统仿真正在成为继理论研究 with 实验研究之后认识世界、改造世界的“第三种手段”。

因为建模、仿真以及结果的分析需要一定的数学基础以及相应的计算机应用能力。特别是在早期,需要编制较为复杂的程序,这使一些试图运用仿真的管理者、非仿真专业人员及相关人士望而却步。事实上,仿真试验的过程虽非坦途,亦非蜀道,只要具备初步运用计算机的能力,就不难掌握仿真的基本原理和方法,至少可以看懂仿真,并能对所得结果作初步的分析,从而帮助系统进行分析、研究、设计、评价、决策和训练。特别是,软件开发商针对不同用途研制开发了相应的仿真软件,简化了仿真过程,并降低了门槛,这使仿真的普及成为可能。本书通过计划、库存、生产、营销、投资、决策等方面的事例,介绍建模及仿真。本书虽然是为管理类学生学习建模与仿真而写,但也希望它能够对从事实际工作又想在需要使用仿真这一工具研究、解决实际问题的经济、管理工作者在学学习、运用系统仿真时有所帮助。

现代仿真由真实系统、模型和计算机三个基本要素构成。模型是仿真过程中复现实际系统运转的载体,模型能否再现实际系统是仿真成功与否的关键,因此建立正确的仿真模型是仿真至关重要的环节。仿真模型是被仿真对象的相似物或其结构形式。它可以是物理模型或数学模型,但并不是所有对象都能建立物理模型。例如为了研究飞行器的动力学特性,在地面上只能用计算机来仿真。为此首先要建立研究对象的数学模型,然后将它转换成适合计算机处理的形式,即仿真模型。建立仿真模型不仅需要一定的数学知识,更需要对所研究问题有深入的了解,因此建模小组应该是一个由各方面人员参与的团队。建模不仅是一门科学,更是一门艺术、一门技艺。虽不存在一个对所有问题均适用的建模方法,但有一般可循的原则。本书从方法论角度讨论建模的思想,并介绍一些常用的建模方法。

本书主要讨论离散事件系统的建模与仿真,介绍离散事件系统仿真的基本原理,用 Excel 建立电子表格模型,以及用电子表格模型进行仿真实验等方面的内容。全书共 10 章:第一章讲述系统仿真的基本概念,发展历史及仿真适用的范围;第二章讨论模型的分类及建模的方法;第三章介绍 Excel 基础以及以 Excel 为平台的 Spreadsheet 建模,同时,为帮助理解 Spreadsheet 建模的方法,本章给出 Spreadsheet 在目标规划、财务、组合投资、判别分析、数据包络、预测等方面建模的例;第四章讨论离散事件系统仿真的基本原理;第五章、第六章讨论与蒙特卡罗方法有关的随机数、随机变量及其生成方法;第七章介绍仿真输入数据分析;第八章介绍运用 Spreadsheet 仿真;第九章讨论输出数据的分析;第十章介绍 Enterprise Dynamics 仿真软件及其应用。

3D 动画仿真是仿真的一个趋向,在仿真中使用 3D 动画技术,可以其逼真的图像和丰富的动作,形象地再现系统运作的状态。目前推出的商用软件有很多。例如, Arena, AutoMod, Extend, Enterprise Dynamics, Flexsim, ProMod, SIMUL8, QUEST, WITNESS 等,这些仿真商用软件均可在 Microsoft Windows 2000/XP 等版本操作系统下的 PC 机上运行,它们都有友善的图形化用户界面、动画和自动收集输出用来度量系统性能;仿真的结果可在标准的报告或在运行过程中交互显示为表格或图形;提供性能测量和比较的统计方法,还可给出时间线、条形图和饼图形式的动态图。由于仿真的这一一般趋势,我们觉得有必要介绍在实践中广泛应用的商用软件。Enterprise Dynamics(ED)提供装配设备、操作员、机器人、输送机、货架、升降机、起重机、转车台、托车等丰富的对象类型,可用于生产、仓储以及其他各种各样的物料处理系统优化仿真,可仿真模拟任何复杂动态的生产、物流系统。ED 是一个以对象为导向的建模、仿真的工具,使用较为方便,还提供直观生动的 3D 可视化仿真环境;此外,可以从 ED 的官方网站下载到它的教育版。因此本书选择 ED 仿真软件进行讲解。

Spreadsheet 方法是以 Excel(或其他背景)为平台,将所需解决的问题进行描述与展开,然后建立数学模型,并使用 Excel 的命令与功能进行预测、决策、模拟和优化等运算。该方法便捷、灵活、容易学习和掌握。Spreadsheet 已成为问题描述、数据处理、模型建立与求解的有效工具,是近年来美国各大学全面推广的一种管理科学教学法。这种教学法的重点不在于数学公式的推导与计算,而是注重于如何对复杂的实际系统进行描述与建模,并用计算机求解,因而避免了大量繁琐的数学公式,使得管理科学的理论方法简明直观、容易理解与应用,为企业决策人员和管理人员掌握与应用管理科学开辟了广阔的前景。因此,我们将 Spreadsheet 作为贯穿全书的主要工具。Excel 的功能非常强大,但作为一般通用工具,在处理系统建模与仿真的某些方面不甚方便,于是作为 Excel 插件的商业软件应运而生,诸如 @RISK, Crystal Ball 等。本书介绍如何在建模及仿真中应用 @RISK。在此,我们要感谢 Palisade 公司,因为 Palisade 公司愿意向本书读者提供 Decision Tools Suite(含 @RISK)最新版一年免费的学生版,供读者学习和研究使用。本书读者可以通过邮件和电话与 Palisade 公司亚洲区高级经理刘海翔(Freeman LIU)先生联系获取上述的免费版本,联系方式为电话(+61 2 9252 5922)或 email(fliu@palisade.com)。特别是,Decision Tools Suite 的中文版已面世,这将为国内的使用者提供极大的便利。

另外本书附有与仿真有关的一些网站,以便检索。

本书原为讲稿,经过多年教学实践,汲取了不少有益的建议,通过修改补充,遂成此书。在编写过程中参考了许多有关著作,主要的参考书列于书后,谨对全部作者以及提供大量资料的格瑞纳公司表示诚挚的感谢。

北京科技大学的吴清一教授在百忙中审阅本书,并提出许多宝贵的建议。高等教育出版社的边晓娜编辑为本书出版做了大量认真细致的工作,使本书避免不少错误。在此深表谢忱。

参加本书编写的还有罗昕、蒋天颖、丛祝辉,此外梁科在本书的编写中做了不少工作。

作者水平有限,时间仓促,选材和内容的处理不妥之处在所难免,望不吝赐教。

罗国勋

2010年11月

# 目 录

<b>第一章</b>	<b>绪论</b> .....	1
	第一节 系统、模型、仿真 .....	1
	第二节 系统建模与仿真的发展历史及趋势 .....	3
	第三节 仿真的局限和优缺点 .....	5
	第四节 仿真研究的步骤 .....	6
	本章小结 .....	9
	思考练习题 .....	9
<b>第二章</b>	<b>建模方法</b> .....	10
	第一节 数学模型 .....	10
	第二节 建模的一般原则和步骤 .....	13
	第三节 建模的方法 .....	16
	第四节 模型的有效性评价 .....	45
	本章小结 .....	46
	思考练习题 .....	46
<b>第三章</b>	<b>Spreadsheet 建模</b> .....	47
	第一节 Excel 基础 .....	47
	第二节 Spreadsheet 建模 .....	68
	第三节 Spreadsheet 建模的例 .....	79
	本章小结 .....	99
	思考练习题 .....	100
<b>第四章</b>	<b>离散事件系统</b> .....	102
	第一节 离散事件系统模型 .....	102
	第二节 理论模型的建模方法 .....	109
	第三节 仿真模型的建模策略 .....	117
	本章小结 .....	121
	思考练习题 .....	122

<b>第五章</b>	<b>蒙特卡罗方法与随机数</b> .....	125
	第一节 蒙特卡罗方法 .....	125
	第二节 随机数的生成 .....	128
	第三节 随机数的检验 .....	134
	本章小结 .....	142
	思考练习题 .....	143
<b>第六章</b>	<b>随机变量的生成</b> .....	144
	第一节 逆变法 .....	144
	第二节 函数变换法 .....	150
	第三节 组合法 .....	153
	本章小结 .....	154
	思考练习题 .....	154
<b>第七章</b>	<b>仿真输入数据分析</b> .....	155
	第一节 数据收集 .....	155
	第二节 分布的识别 .....	157
	第三节 参数估计 .....	164
	第四节 假设检验 .....	166
	本章小结 .....	169
	思考练习题 .....	170
<b>第八章</b>	<b>运用 Spreadsheet 仿真</b> .....	172
	第一节 Spreadsheet 仿真模型 .....	172
	第二节 用@RISK 建模 .....	176
	第三节 库存系统仿真 .....	205
	第四节 排队系统仿真 .....	213
	第五节 项目管理 .....	220
	本章小结 .....	232
	思考练习题 .....	232
<b>第九章</b>	<b>仿真输出数据分析</b> .....	237
	第一节 系统性能测度及其估计 .....	237
	第二节 仿真类型 .....	238
	第三节 终态仿真结果分析 .....	238
	第四节 稳态仿真结果分析 .....	244
	本章小结 .....	254
	思考练习题 .....	254



<b>第十章 Enterprise Dynamics</b> .....	256
<b>第一节 Enterprise Dynamics 基础</b> .....	256
<b>第二节 建立简单仿真模型</b> .....	265
<b>第三节 模型运行与分析</b> .....	274
<b>第四节 基于 Enterprise Dynamics 的物流案例</b> .....	289
<b>本章小结</b> .....	321
<b>附录</b> .....	326
<b>参考文献</b> .....	340

# 第一章 绪论

20 世纪中期以来,随着计算机技术的发展,仿真试验正在成为继理论研究 with 实验研究之后认识世界、改造世界的“第三种手段”。本章主要介绍系统、模型、仿真的基本概念,系统仿真的历史、应用领域及发展趋势,系统仿真的优缺点,以及仿真研究的一般步骤。

## 第一节 系统、模型、仿真

### 一、系统

“系统”这个术语已经在各个领域得到如此广泛的应用,以致很难给它下一个定义。

系统一词最早见于古希腊原子唯物论学说创始人德谟克利特(Democritus,约公元前 460~公元前 370 年)的著作《宇宙大系统》,系统定义为:“任何事物都是在联系中显现出来的,都是在系统中存在的,系统联系规定每一事物,而每一联系又能反映系统的总貌”。

韦氏(Webster)大辞典的定义为:“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”。

日本工业标准(JIS)对系统的定义:“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. Bertalanffy 将系统定义为:“相互作用的诸要素的综合体”。

美国学者 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”。

综上所述,系统可定义为:“按照某些规律结合起来、互相作用、互相依存的所有实体的集合或总和”。

系统可能是自然的或人工的、现在存在的或未来所计划的。例如一个理发馆是一个人工系统,构成这一系统的实体是理发员和顾客,理发员根据顾客的要求,按一定的程序为顾客服务,理发完毕顾客即离开。由自然界的动植物形成一个十分复杂的自然生态系统,构成生态系统的实体是地球上的动物和植物,它们彼此相关,形成环环相扣的生物链,一旦其中某一环被打破,就会产生无法估计的后果。

### 二、模型

模型是实际系统的抽象,是对相应的真实对象和真实关系中的有用的和令人感兴趣的特性的刻画,是对系统某些本质方面的描述,以各种有用的方式提供被研究系统的描述信息。

模型可分为两大类:形象模型和抽象模型。

形象模型(Iconic Model),又称物理模型,是采用一定比例尺寸按照真实系统的“样子”制作的,它看起来与实际的东西基本相似。沙盘模型就是物理模型的典型例子。

抽象模型(Abstract Model)是用符号、图表等来描述客观事物所建立起来的模型。抽象模型又可分为如下模型。

数学模型(Mathematics Model)是用字母、数字、数学符号建立起来的公式、图表、图像及框图等来描述客观事物的特征及其内在联系的模型,是现实世界的抽象,如描述物体质量、运动加速度与所受力之间关系的牛顿第二定律, $F=ma$ ;电学中的电压、电流强度与电阻间关系的(欧姆定律) $V=RI$ ;锥体的高、底面积与体积的关系 $V=\frac{1}{3}hS$ 等。

仿真模型(Simulation Model),也称模拟模型(Analog Model),是用便于控制的一组条件代表真实事物的特征,通过模仿性的试验来了解真实事物的规律。例如,一个长为 $l$ ,质量为 $m$ 的单摆的简谐运动的周期是

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

由电感 $L$ 及电容 $C$ 构成的电路系统的解是一个以 $T=2\pi\sqrt{LC}$ 为周期的简谐振动。因此,建立对应的关系: $L\Rightarrow l$ 及 $1/C\Rightarrow g$ ,即可用电路系统模拟力学系统(图 1.1.1)。

概念模型(Concept Model)是一类最抽象的模型。

### 三、仿真

1961年,G. W. Morgenthater首次对“仿真”进行了技术性定义,即“仿真意指在实际系统尚不存在的情况下对于系统或活动本质的实现”。另一个典型的对“仿真”进行技术性定义的是Korn,他在1978年的著作《连续系统仿真》中将仿真定义为“用能代表所研究系统的模型作实验”。1982年,Spriet进一步将仿真的内涵加以扩充,定义为“所有支持模型建立与模型分析的活动即为仿真活动”。

1984年,Oren在给出了仿真的基本概念框架“建模——实验——分析”的基础上,提出“仿真是一种基于模型的活动”的定义,被认为是现代仿真技术的一个重要概念。随着科学技术的进步,特别是信息技术的迅速发展,“仿真”的技术含义不断地得以发展和完善,从A. Alan和B. Pritsker撰写的《仿真定义汇编》一文中可以清楚地观察到这种演变过程。无论哪种定义,仿真基于模型这一基本观点是共同的。

现代仿真技术均在计算机支持下进行,因此系统仿真也称计算机仿真。系统仿真有三个基本的活动:系统建模、系统仿真和仿真实验,联系这三个活动的是系统仿真的三要素,即系统、模型、计算机(图 1.1.2)。

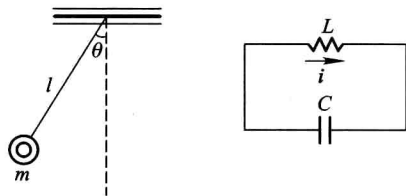


图 1.1.1 电路模拟力学系统

应该指出,“Simulation”最初译为“模拟”,后改译为“仿真”,但仍有采用模拟称谓的。事实上,“仿真”与“模拟”是有区别的,根据国际标准化组织(ISO)标准,“模拟”(Analog)与“仿真”(Simulation)两词的含义分别为:

“模拟”即选取一个物理的或抽象的系统的某些行为特征,用另一系统来表示它们的过程;

“仿真”则是用另一数据处理系统,主要是用硬件来全部或部分地模仿另一数据系统,以致模仿的系统像被模仿的系统一样接受同样的数据,执行同样的程序,获得同样的结果。

鉴于目前实际上已将上述“模拟”和“仿真”两者所含的内容都统归于“仿真”的范畴,而且都用英文 Simulation 一词来代表,因此现在所讨论的仿真(或模拟)的概念,是广义(即泛指)的含义。

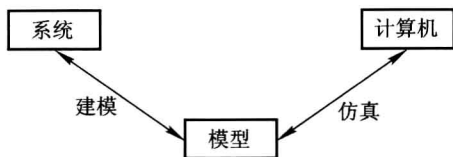


图 1.1.2 建模与仿真的基本组成部分与相互关系

## 第二节 系统建模与仿真的发展历史及趋势

20 世纪 40 年代,计算机的诞生使人们能对复杂事物和复杂系统建立模型并利用计算机求解,这些手段与方法形成了计算机仿真技术。

计算机仿真把复杂系统(问题)的在某一期间的行为建立数学模型并在计算机上运行,通过对所建模型在不同条件下的实验求解与分析比较,得出最佳的方案和行动方针。许多问题可用计算机仿真解决。由于计算机仿真有节省时间、节约资金、规避风险并能模拟尚不存在的系统等优点,因而得到广泛应用。例如:

银行顾客服务系统,根据顾客到达的统计规律和服务时间的分布,确定银行服务窗口设置和不同时间开放的窗口数量;

航空公司售票系统,根据不同类型旅客的历史统计数据,决定给不同等级的座位预留数量,配合不同的机票定价政策,模拟机票销售情况,为优化决策提供依据;

交通道路系统,模拟区域内各种车辆在道路系统中的运行情况,改变交通信号灯设置,作出最优的选择;

存储系统,研究不同的订货政策对供货、生产、销售及资金占用的影响;

生产系统,研究生产线的平衡、机器出现故障的频率、生产计划及控制、设施规划及物流的设计;

服务系统,根据需求波动的特点,使服务人员供给与顾客需求达到最佳的配合。

系统建模与仿真已成为当今现代科学技术研究的主要内容,并已渗透到各学科和工程领域。

建模与仿真领域的发展可分为两个阶段:计算机出现之前的建立在物理科学基础上的建模;计算机诞生以后出现的计算机仿真技术。建模与仿真的历史可用表 1.2.1 表示。

表 1.2.1 建模与仿真的历史发展

年 代	发展的主要特点
1600—1940 年	在物理科学基础上的建模
20 世纪 40 年代	电子计算机的出现
20 世纪 50 年代中期	仿真应用于航空领域
20 世纪 60 年代	工业控制过程的仿真
20 世纪 70 年代	包括经济、社会和环境因素的大系统仿真
20 世纪 70 年代中期	系统与仿真的结合,如用于随机网络建模的 SLAM 仿真系统
20 世纪 70 年代中期	系统仿真与更高级的决策结合,如决策支持系统 DSS
20 世纪 80 年代中期	集成化建模与仿真环境,如美国 Pritsker 公司的 TESS 建模仿真系统
20 世纪 90 年代	可视化建模与仿真,虚拟现实仿真,分布交互仿真

系统仿真的发展,经历了 20 世纪 40 年代至 70 年代的传统仿真,以及 80 年代以来的复杂系统仿真阶段。传统仿真主要面向工程系统,如航空、航天、电力、化工等,由于这类系统有良好的定义及结构,在理论上已有较深入的研究,有充分可用的理论知识,可采用演绎推理的方法建模。而诸如社会、经济、生态、生物等复杂的非工程系统,因其系统的病态定义及结构,又无充分可利用的理论和先验知识,不能照搬传统仿真的建模方法与手段,必须根据复杂系统的非工程技术特点,建立系统的非形式化模型,用一种抽象的表示方法以获得对客观世界和自然现象的深刻认识。

特别是进入 90 年代后,作为仿真的支撑技术之一的计算机技术取得异乎寻常的进展,使得用微机和工作站进行复杂系统的仿真成为可能。在软件设计中广泛采用面向对象的思想和方法,计算机图形技术的进步,仿真过程中人机交换愈来愈方便直观。计算机仿真技术正朝着一体化建模与仿真环境的方向稳步发展。

如上所述,由于所研究领域不断拓展,以及仿真支持技术的日益进步,近年来系统仿真出现以下研究热点:

- (1) 面向对象仿真(Object-Oriented Simulation, OOS);
- (2) 定性仿真(Quantitative Simulation, QS);
- (3) 智能仿真(Intelligence Simulation, IS);
- (4) 分布交互仿真(Distributed Interactive Simulation, DIS);
- (5) 可视化仿真(Visual Simulation, VS);
- (6) 多媒体仿真(Multimedia Simulation, MS);
- (7) 虚拟现实仿真(Virtual Reality Simulation, VRS);
- (8) Internet 网上仿真。

仿真技术的发展与控制工程、系统工程及计算机技术的发展密切联系。控制工程和系统工程的发展促进了仿真技术的广泛应用,而计算机的出现及计算机技术的发展,为仿真技术提供了

有力的手段和工具。

### 第三节 仿真的局限和优缺点

如前所述,仿真在制造业、建筑工程与项目管理、军事、物流和供应链、交通运输、经营管理、医院管理及健康护理的报告领域得到广泛应用。必须指出,仿真并非适用于任何场合、任何时间。Banks 和 Gibson 给出 10 条不适合仿真的规则:

- (1) 当问题可用普通方法解决时,不应使用仿真;
- (2) 问题可得到解析解时,不应使用仿真;
- (3) 如果直接实验更为简单,不应使用仿真;
- (4) 如果成本超过仿真节约的费用,不使用仿真;
- (5) 如果没有足够的资源,不使用仿真;
- (6) 如果没有足够的时间,不使用仿真;
- (7) 如果无数据可用,甚至无法估计,则不建议使用仿真;
- (8) 如果没有足够的时间或无人可用,则仿真是不适合的;
- (9) 如果对仿真有不合理的预期(如要求过多过快,或仿真的能力被过高估计),则仿真是不适合的;
- (10) 如果系统行为太复杂或不可定义,则不适合使用仿真。

由于仿真模型在运行时,模仿了实际系统中发生的事情或在设计阶段时系统可以察觉的东西,并通过对仿真行为的观测产生评估的场景,提出一个较好的解决方案,因而对客户具有直觉的吸引力。

作为系统分析、设计的一种有效工具,仿真有许多优点,但也存在一些缺点。

仿真的优点主要有以下 4 点。

(1) 节省时间。仿真可在短时间内多次调整参数,进行多次试验,分析系统的变化,为决策提供依据。

(2) 节约资金。运用仿真技术,尤其是计算机仿真,与实际试验相比,不但可以节省时间,还可以节约资金。例如,用计算机仿真研究汽车、机翼的空气动力学性能,远比用风洞试验所需资金少;对城市交通系统,可通过运行计算机仿真模型,模仿不同方案而无需建设不同的道路;可通过计算机模拟来替代核试验,不但节约资金,且保护环境。

(3) 虚拟现实。仿真不但可在不干扰实际系统运行或不能对实际系统作实验的场合通过实验研究系统的性态,还可在系统尚未建立或并不存在的情况下进行试验研究。例如,实验研究一个尚未建成工厂的设施布局方案;研究我国若不采取计划生育政策,人口将会如何变化;应用仿真模拟长江三峡大坝在 200 m 水位时的状态,而大坝实际设计水位为 175 m,等等。这就是说,不能将仿真狭义地理解为对现实系统的模仿和近似,它还可以回答“如果……就会……”的问题(what-if question)。实际上,它研究某些现象怎样发生、为何发生或在何种条件下可以发生,理

解系统如何运行,探索系统要素间相互作用的规律,发现系统运行的瓶颈与存在的问题,进而寻求解决的途径。

(4) 规避风险。由于仿真可不干扰实际系统的运行,可虚拟现实,因此在仿真模型上实验,可以避免实际系统运行新方案时因不可预见原因而造成的损失。例如,某公司要考察关闭某一分店会带来什么影响,如果真的关闭,那么再次恢复营业就不太可能重新吸引原来那么多的顾客,通过运行仿真模型来研究即可避免上述风险;机场拟采用一种新的检票登机程序,若该程序发生不可预见的问题,将会造成大量乘客误机,但利用仿真模型试验则可避免由此导致的损失。

通过仿真可更深入地了解要素间的相互关系和系统的性能。仿真也存在一些缺点,主要有如下几个。

(1) 仿真模型的建立需要特殊的培训,这是一门需要花费时间、需要有一定积累经验的艺术。

(2) 仿真的结果可能难于解释。由于大多数仿真的输出是基于随机输入的随机变量,因此很难区分观察结果是与系统相关的还是随机的。

(3) 仿真结果不能保证求得最优解,而且也不能知道所得的答案离最优解还有多大的可能误差。

(4) 仿真建模和分析非常耗时,而且成本高。当建模、分析的资源紧张时可能会导致仿真模型分析不充分。

为克服上述缺点和便于仿真,软件开发商开发了包含模型元素,并有输出分析功能的软件包。分析人员只要用元素“搭建”模型,输入数据便可运行,并可利用软件的输出分析功能进行非常“彻底”的分析。随着计算机技术的不断发展,软件的功能越来越先进,仿真的速度越来越快,使用也越来越方便,从而使可解决的问题越来越复杂。附录提供了一些可供仿真的软件及软件供应商的名录。

## 第四节 仿真研究的步骤

仿真研究的步骤一般如下(如图 1.4.1 所示)。

### 1. 问题描述

每项研究都从问题描述开始,通过对问题的表述,去发现问题的本质,并确定目标。

### 2. 目标设定与项目计划

研究所描述的问题和确定的目标是否适合用仿真的方法来解决,若仿真是适合的,则应指出仿真需要回答的问题。同时应设定项目的阶段计划,确定各阶段的预期目标。

### 3. 模型概念化

模型概念化就是根据系统运转机制或要素间相互依存、相互制约的逻辑关系,建立理论或概念模型的结构。系统建模是仿真的关键,而模型的建立需要技术。虽然没有一种普遍适用的系统建模的方式,但仍有一些可遵循的一般原则。这就是根据抽象出来的问题的本质,从最简单的

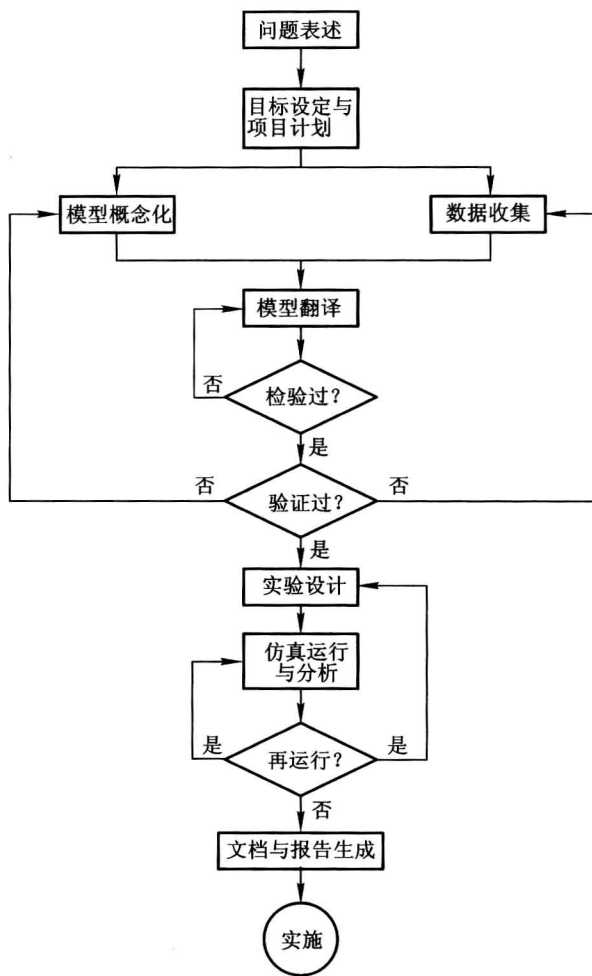


图 1.4.1 仿真研究的步骤

模型入手,逐步完善,以建立更为复杂的模型。没有必要在模型与真实系统之间建立一一对应关系,抓住问题的本质才是必要的。为此,让模型用户参与模型的概念化,既可以提高模型的质量,又可以增加用户在应用模型时的信心。

#### 4. 数据收集

数据收集在仿真全过程中十分重要。模型结构和需输入的数据间总是相互影响的。当模型复杂性改变时,所需数据元素也将改变。收集数据所花费的时间,在仿真的全过程中占很大比重。因此常常在建模早期就开始收集数据。

#### 5. 模型翻译

模型翻译就是将模型转换成计算机可识别的格式,通常称为“编程”。建模者应当选用适宜



的仿真软件对模型编程。

#### 6. 检验与验证

检验是检查为仿真模型准备的计算机程序是否能正常运行。而验证则是对模型的校准,是一个迭代过程,将模型与实际系统行为对比,用两者的差异和由此而得的对实际系统的认识改进模型,直至模型的准确性被认为可接受为止。

#### 7. 实验设计

应当给出仿真的初始条件,确定仿真运行的长度以及每次运行需要重复的次数。

#### 8. 仿真运行与分析

仿真运行以及后续的分析用于估计仿真的系统设计的性能指标(这将在第八章仿真输出的分析中讨论)。

#### 9. 文档与报告生成

文档有两种:程序文档和进展报告。程序文档便于理解程序如何运行,有利于分析者对程序建立信心,以便再次使用,并有利于模型用户及决策者基于分析做出决策。程序文档的给出,便于用户随意修改参数,有利于理解输入参数与输出量之间的关系,还可以发现能“优化”某些输入性能度量的输入参数。进展报告记录仿真项目的历史,提供记录完成的工作和做出决定时间。

最终报告应当简明扼要地说明全部分析结果,应包括明确的最终表述形式、备选系统、备选方案对比准则、实验结果以及建议的问题。在最终报告前应提交模型说明、原型演示、动画、培训结果、中间分析、程序文档、进展报告以及介绍。

#### 10. 实施

实施的成功取决于前面步骤的执行。

仿真建模的过程可分为以下四个阶段。

第一阶段是问题的发现期或导向期,由问题描述、目标设定与项目计划组成。在这一阶段,问题的描述由“模糊”逐步清晰,开始对象经过不断调整、设定,项目计划也会随之不断被调整。

第二阶段与建模和数据收集有关,包含模型概念化、数据收集、模型翻译以及模型的检验与验证。

第三阶段是模型的运行与分析,包括实验设计、仿真运行与分析。在这一阶段必须对模型实验作深入细致的考虑。因为离散事件系统仿真的本质是统计实验,模型输出存在随机误差,故必须要正确地进行统计分析。

第四阶段是实施阶段,包括文档与报告生成。成功的实施依赖用户的参与和每一步骤的成功,其中模型的检验和验证是成功的关键,通过检验和验证的模型才能保证模型的有效性。此外,输入数据的正确性也至关重要,因为仅有有效的模型,而若输入的是“垃圾”,则其结果也只能是“垃圾”。