

21 世纪高等院校教材·工业工程系列

# 生产物流系统 建模与仿真

——Witness 系统及应用

主 编 王亚超 马汉武

副主编 陈友玲 陈 杰 鞠彦兵 刘明周

 科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

21 世纪高等院校教材·工业工程系列

# 生产物流系统建模与仿真

——Witness 系统及应用

主 编 王亚超 马汉武

副主编 陈友玲 陈 杰 鞠彦兵 刘明周

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书立足于企业管理实际,参考了国内外相关领域的最新研究内容,以及作者与企业实践相结合的科研成果,同时还吸收了作者在教授本课程时积累的一些学生感兴趣的教学实例。

本书结合生产物流系统中的主要环节,讲解了与生产物流系统相关的系统建模的知识,并介绍了生产物流系统中典型事件的计算机仿真模型建模方法。

本书可作为工业工程、管理科学与工程、工商管理、系统工程等专业高年级本科生及硕士生的教学用书;也可作为工业工程领域、物流工程领域工程硕士与生产物流建模相关课程的教学参考书和实验参考书;对于在企业中希望通过应用计算机系统建模仿真手段改善管理工作的工业工程师们,也是一本很好的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

生产物流系统建模与仿真: Witness 系统及应用/王亚超,马汉武主编.  
—北京:科学出版社,2006

21世纪高等院校教材·工业工程系列

ISBN 7-03-017426-7

I. 生… II. ①王… ②马… III. 企业管理-物流-管理信息系统-高等学校-教材 IV. F273.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第062384号

责任编辑:林建 贾瑞娜/责任校对:李奕莹

责任印制:张克忠/封面设计:陈敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2006年8月第一版 开本:B5(720×1000)

2006年8月第一次印刷 印张:18 1/4

印数:1—3 000 字数:342 000

定价:28.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<明辉>)

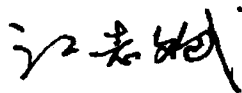
## 序 言

仿真技术的发展已经渗透到各行各业，特别是在现代工业工程领域，计算机仿真一直是不可缺少的决策支持工具，它在大型工程项目的前期规划、投资平衡分析、生产物流的运行控制、供应链与库存管理、作业排序、资源分配、流程再造等众多方面发挥了巨大作用。本书在介绍系统仿真的基本方法的基础上，基于 Witness 平台编写了大量与实际相结合的仿真实例，这些实例是多所院校具有丰富的教学和科研经验的教师们教学积累和科研成果的提炼。通过这些实例说明如何使用、建立生产仿真模型，仿真模型优化的实施，仿真模型文档的生成等，使读者了解仿真技术的相关知识，提高应用仿真手段发现生产系统中的关键问题的能力，并通过改进措施的实现，提高生产能力。

本书在简要介绍离散系统仿真基本方法的基础上，重点介绍了当前在仿真领域中呼声很高的 Witness 平台。Witness 是一个很好的离散事件动态系统仿真软件。本人所在的上海交通大学工业工程系与朗讯科技合作建立的运作管理仿真实验室是国内最早应用该软件的单位之一，后来又升级到 2003 版。我们在该系统上完成了“上海国际航运中心洋山深水港集装箱集疏运仿真分析”、“江淮汽车集团瑞风商务车底盘装配线计算机仿真”等科研和开发项目，取得了很好的效果。

本书可作为工业工程、管理科学与工程、工商管理、系统工程等专业高年级本科生及硕士生的教学用书；也可作为工业工程领域、物流工程领域工程硕士与生产物流建模相关课程的教学参考书和实验参考书；对于在企业中希望通过应用计算机系统建模仿真手段改善管理工作的工业工程师们，也是一本很好的参考书。

上海交通大学教授、博士生导师  
中国工业工程专家（国家级认证）  
中国机械工程学会工业工程分会理事



2006年5月

# 前 言

计算机仿真技术的发展已经渗透到各行各业，仿真技术已成为战略研究、系统分析、运筹规划、预测决策、宏观及微观管理等领域的有效工具。正因为计算机仿真技术的可试验性、可量化性和快速性，使得仿真技术比其他分析工具有着更强的说服力和直观性。

生产物流管理是仿真技术应用最广泛、产生经济效益最大的领域之一。虽然生产物流管理的重要性在近几年内得到广泛关注，但生产物流管理的有效应用却仍踟躇不前。一个生产物流系统是一个高度动态、高度变化的复杂系统，客户的需求永远在波动，原材料的供货周期不会永远一成不变。生产物流任何一个环节的表现很大程度上依赖于其他环节的表现。正如单方面减少成品库存可能会牺牲分销商补货的及时性一样，优化生产物流的一个环节未必会带来整体效率的提高，有时甚至会牺牲其他环节的效率。因此，企业的共识是将生产物流系统作为一个整体系统来研究，而与此同时，企业对复杂的生产物流系统的分析研究却束手无策，无处着手。面对上述问题，计算机仿真技术可以通过建立模型分析讨论，进行计算机模拟，经过一个不断实践反馈、再实践再反馈的往复过程，并用统计分析方法对输出的结果进行分析，然后得出结论。

“生产物流系统建模与仿真”是面向企业实际的应用型课程，是一门实践性较强的课程，是工业工程专业的主干课程之一。学生通过本课程的学习能够初步运用仿真技术来发现生产物流系统中的关键问题，并通过改进措施的实现，提高生产能力和流程绩效。

本书的编写过程中参考了国内外相关领域的最新研究内容，以及作者与企业实践相结合的科研成果；同时还吸收了作者在教授本课程时积累的一些学生感兴趣的教学实例，可以使学生在了解与掌握先进的计算机仿真知识同时，通过仿真手段进一步掌握工业工程领域中的知识，提高学习兴趣，并培养学生理论联系实际的应用能力，从中体会到计算机仿真方法在企业管理中的重要性。这是本书具有的一大特色。

本书分上下两篇内容：上篇系统地介绍了生产物流系统的基本特征、系统仿真的基本概念、仿真模型的建立思路以及仿真研究的步骤；下篇介绍单服务台排队系统仿真、库存系统仿真设计、生产线物流路径系统及物流成本分析、配送中心系统仿真设计、连续系统仿真——液体灌装线仿真设计、供应链系统的仿真设计与改善、装卸服务中心人员调度仿真系统设计、单品种流水线生产计划设计、

混合流水线系统仿真设计、垃圾回收物流仿真系统和看板生产系统优化仿真设计实例等。

本书共 18 章，由天津工业大学王亚超、江苏大学马汉武、重庆大学陈友玲、南京理工大学陈杰、北京理工大学鞠彦兵和合肥工业大学刘明周等共同编写。其中，第 1、5、10~15 章由王亚超编写，第 2、4、7、18 章由马汉武、王建华编写，第 3、8、16 章由陈友玲、王春编写，第 6 章 6.1~6.5 节由陈杰编写，第 6 章 6.6 节、第 17 章由鞠彦兵编写，第 9 章由刘明周编写。全书由王亚超统稿，并对部分章节做了调整。天津工业大学的许洪峰、郭玉萍等参与了资料整理和部分程序的编写。

本书在编写过程中得到了 Witness 软件北京代表处北京威特尼斯科技中心的帮助和技术支持，在此表示感谢。有兴趣的读者可以访问北京威特尼斯科技中心网站 (<http://www.witness-china.com>)，以得到进一步的帮助和获得本书的案例模型，联系电话：010-64744968。

本书在编写过程中得到工业工程专家、上海交通大学江志斌教授的指导，并作序，在此表示谢意。另外，本书在编写过程中还参考吸收了国内外许多学者的研究成果，对此也表示由衷的感谢。

由于作者的水平有限，再加上计算机建模仿真技术在生产物流系统中的应用才刚刚起步，因此本书难免会有疏漏和谬误的地方，恳切希望广大读者批评指正。

编者

2006 年 5 月

# 目 录

序言  
前言

## 上篇 生产物流系统建模与仿真的理论知识

第 1 章 绪论	3
1.1 仿真技术的产生与发展	3
1.2 计算机仿真在生产物流中的应用	9
第 2 章 系统仿真	14
2.1 系统仿真常用概念	14
2.2 仿真的分类	17
2.3 计算机仿真	17
2.4 系统仿真的一般步骤	19
第 3 章 离散事件系统仿真	22
3.1 基本概念	22
3.2 离散事件系统仿真方法	23
3.3 仿真方法	24
3.4 离散事件系统仿真的一般步骤	25
第 4 章 生产系统典型事件	31
4.1 生产运营系统	31
4.2 生产系统典型事件的分析	33
第 5 章 物流系统典型事件	52
5.1 物流	52
5.2 物流系统的典型事件	66
第 6 章 Witness 仿真系统	76
6.1 Witness 综述	76
6.2 Witness 元素——模型的重要组成部分	76
6.3 Witness 随机分布函数	87
6.4 Witness 规则	97
6.5 Witness 程序设计基础	105
6.6 Witness 常用系统函数	110
第 7 章 生产物流系统可视化建模与仿真	120
7.1 Witness 建模与仿真过程	120
7.2 Witness 建模与仿真过程应用举例	126

## 下篇 基于 Witness 系统建模与仿真的实例

<b>第 8 章</b>	<b>单服务台排队系统仿真</b> .....	137
8.1	单服务台排队系统系统描述与仿真目的 .....	137
8.2	单服务台排队系统工作流程 .....	137
8.3	仿真模型的设计 .....	138
8.4	模型运行和数据报告 .....	142
<b>第 9 章</b>	<b>库存系统仿真设计</b> .....	144
9.1	库存系统描述与仿真目的 .....	144
9.2	库存系统工作流程 .....	144
9.3	仿真模型的设计 .....	145
9.4	模型运行和数据分析 .....	154
9.5	其他方案的运行及分析 .....	154
<b>第 10 章</b>	<b>生产线物流路径系统及物流成本分析</b> .....	156
10.1	生产线物流路径系统描述与仿真目的 .....	156
10.2	生产线路径系统数据 .....	156
10.3	仿真模型的设计 .....	156
10.4	运行模型 .....	165
10.5	生产线物流路径成本分析 .....	166
<b>第 11 章</b>	<b>配送中心系统仿真设计</b> .....	168
11.1	配送中心系统描述与仿真目的 .....	168
11.2	配送中心系统数据 .....	168
11.3	仿真模型的设计 .....	169
11.4	模型运行和数据分析 .....	176
11.5	改善 .....	176
<b>第 12 章</b>	<b>连续系统仿真——液体灌装线仿真设计</b> .....	177
12.1	液体灌装系统描述与仿真目的 .....	177
12.2	液体灌装线工作流程 .....	177
12.3	液体灌装线的设计 .....	177
12.4	模型运行和数据分析 .....	185
12.5	运行结果及分析 .....	186
<b>第 13 章</b>	<b>供应链系统的仿真设计与改善</b> .....	188
13.1	模型概述与仿真目的 .....	188
13.2	供应链系统的数据 .....	188
13.3	仿真模型的设计 .....	189
13.4	模型运行和数据分析 .....	193
13.5	改善 .....	193
<b>第 14 章</b>	<b>装卸服务中心人员调度仿真系统设计</b> .....	194
14.1	装卸中心系统描述与仿真目的 .....	194



14.2	装卸服务中心工作流程	194
14.3	仿真模型的设计	195
14.4	模型运行和数据分析	199
<b>第 15 章</b>	<b>单品种流水线生产计划设计</b>	<b>200</b>
15.1	单品种流水线生产计划描述与仿真目的	200
15.2	混合流水线系统工作流程	200
15.3	仿真模型的设计	201
15.4	投产计划组合最优化 (Optimization) 选择	207
<b>第 16 章</b>	<b>混合流水线系统仿真设计</b>	<b>211</b>
16.1	混合流水线系统描述与仿真目的	211
16.2	混合流水线系统工作流程	211
16.3	仿真模型的设计	212
16.4	工艺流程图的显示	216
16.5	模型运行和数据分析	217
16.6	统计在制品数	217
<b>第 17 章</b>	<b>垃圾回收物流仿真系统</b>	<b>221</b>
17.1	垃圾回收物流系统描述	221
17.2	垃圾回收物流系统数据	221
17.3	系统逻辑结构	223
17.4	仿真模型的设计	224
17.5	模型运行和数据分析	234
<b>第 18 章</b>	<b>看板生产系统优化仿真设计</b>	<b>237</b>
18.1	看板生产系统简介	237
18.2	看板生产系统工作流程	241
18.3	看板生产系统仿真模型设计	243
18.4	模型运行和优化	257
18.5	看板生产系统仿真程序	259
	<b>参考文献</b>	<b>279</b>

**上篇 生产物流系统建模与仿真的  
理论知识**



# 第 1 章 绪 论

在现实世界中，事物并不是孤立存在的，它们之间存在着内在的和有机的联系。作为一个研究对象，我们将这种由相互联系、相互作用的事物或元素构成的统一整体称为系统。

随着人们认识自然和改造自然的能力和手段的不断增强，作为实践经验总结的科学技术水平也有了迅猛的发展。从开普勒的行星运动三大定律，到牛顿的万有引力定律，再到爱因斯坦的相对论，利用数学手段对事物描述的理论越来越完善，而且研究的范围也越来越广，从身边发生的自然现象到广袤无垠的宇宙奇观无所不包。长期以来，人们已经充分认识到利用数学模型去描述所研究系统的优越性，并且逐渐发展出系统研究和系统分析理论。但是，由于数学手段的限制，人们对复杂事物和复杂系统建立数学模型并进行求解的能力是非常有限的。电子计算机的出现，对科学技术的发展产生了无可估量的、深远的影响。许多复杂的数学模型可以通过计算机来进行计算求解，由此，利用数学模型描述系统的特征并进行求解的手段逐步发展成为现代的计算机仿真技术。计算机仿真技术有着巨大的优越性，利用它可以求解许多复杂而无法用数学手段解析求解的问题，利用它可以预演或再现系统的运动规律或运动过程，利用它可以对无法直接进行实验的系统进行仿真试验研究，从而节省大量的能源和费用。由于计算机仿真技术的优越性，它的应用领域已经非常广泛，而且也越来越受到普遍的重视。诚然，计算机仿真技术中仍然存在着许多需要解决的问题，需要不断进行努力探索。

## 1.1 仿真技术的产生与发展

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但正在开发的系统进行研究的过程中，为了了解系统的内在特性，必须进行一定的实验；而由于系统不存在或其他一些原因，无法在原系统上直接进行实验，只能设法构造既能反映系统特征又能符合系统实验要求的系统模型，并在该系统模型上进行实验，以达到了解或设计系统的目的。由此可以看出，系统仿真本质上是由三个要素构成的，即系统、系统模型和实验。系统是问题的本源，是系统分析的目的；实验是解决问题达到目的的手段；而系统模型则是连接系统和实验（目的和手段）之间的桥梁。

显然，系统仿真是一项社会实践活动。凡是包含系统、系统模型和系统实验

三个要素的活动都可以广义地理解为系统仿真活动。

系统仿真方法的研究和应用已经有了很长的历史。在古代，人们已经从长期的生产劳动实践活动中总结出了朴素的仿真思想。例如，古代的房屋屋顶多数为桁梁式建筑，在建房过程中需要使用大量的木料。为了使屋顶稳定牢靠，除了要选择材质较好粗细适当的木料外，整个屋顶的桁架结构也必须满足一定的几何形状要求；也就是说，桁梁上的每一根木料都有确定的长度尺寸要求，不论木料长了还是短了都可能影响整个屋顶结构的稳定性。那么如何来确定屋顶上每一根木料的具体长度呢，显然不能拿实际的木料到屋顶上去试。这样既花费工时又可能造成木料不必要的浪费。这个问题对现代人来说是非常简单的，利用几何和三角学的原理立刻可以解决。但在古代科学尚不发达的情况下，解决的办法只有一个，即在地面上按实际尺寸的一定比例模拟制作一个屋顶。经过若干次实验确定了稳定的结构之后，量出模拟屋顶上每一根相应木料的长度，再按比例放大，即可得到实际木料所需的长度。这是一个很典型的通过构造模型并进行实验从而获得系统特性的系统仿真实例。

仿真作为一门技术科学是在 19 世纪末 20 世纪初工业技术有了长足的发展之后确定下来的。而且伴随着工业技术的进步，仿真技术也在不断地发展。例如，随着电子技术的发展，人们发现可以利用模拟电路去研究工业控制过程中的实际问题，由此而产生了现代控制理论。而这个模拟电路就是工业控制系统的一个模型，通过在这个模型上进行实验，就可以解决实际控制过程中产生的问题。又例如，在飞机设计过程中，对飞机的外形要求是非常严格的，因为气动外形将最终影响整个飞机的飞行特性，由于飞机造价的昂贵，用真实的飞机去进行实验是不现实的。为了获得飞机外形的气动数据，尤其是飞机机翼的气动数据，必须制作各种不同形状的机翼模型放到风洞中进行实验。风洞实验的结果改进了飞机的设计理论，而利用这个理论又可以去设计新型的飞机。在这个时期，人们在利用仿真方法研究或求解问题时，都是利用实物去构造与实际系统成比例的物理模型，再在这个模型上进行实验。如果这种实验是破坏性的，那么每次实验都要重新构造实物模型，带来很大的麻烦和浪费。

1946 年，世界上第一台电子计算机在美国诞生。在随后的 50 年中，计算机技术的发展速度惊人，当今计算机的计算能力和信息处理能力已经比最初的那台笨重的以电子管为主体的机器提高了成千上万倍。如果说早期的仿真主要是利用实际物理模型的比例仿真，那么，现代仿真技术则是与计算机的发展密切相关的。目前通常所讲的仿真技术一般就是指计算机仿真技术。随着计算机硬件和软件水平的提高，计算机仿真技术也得到了很大的发展。

### 1.1.1 仿真软件的发展

数字仿真软件泛指一类面向仿真用途的应用软件。它的特点是面向问题和面向用户。它的功能包括模型描述的规范及处理、仿真实验的执行与控制、仿真结果的分析与演示、模型和数据的存储与检索。根据功能，仿真软件可以分为仿真程序包、仿真语言及仿真环境三大类。仿真软件的发展离不开计算机软件尤其是计算机程序设计语言的发展。随着计算机从电子管到晶体管再到大规模集成电路不断地发展和进步，计算机的运算速度和存储能力都有了显著的提高，因此也就有了计算机程序设计语言从机器语言到汇编语言再到高级程序设计语言的发展历程。而这一切又为仿真软件的产生与发展提供了必要的条件。

历史上第一个仿真软件是由塞尔弗里奇 (R. G. Selfridge) 在 1955 年开发的。他完成了利用辛普森方法进行数值积分的仿真程序设计工作。从那之后，仿真软件的发展经历了四个阶段：

第一阶段是从 20 世纪 50 年代到 60 年代初期，以 Fortran 语言为代表的通用程序设计语言阶段，Fortran 语言是达到成熟的第一个高级程序设计语言。当时几乎所有用于求解数学表达式的程序都是用 Fortran 语言编写成的，即使在目前，也有许多大型通用仿真语言是基于 Fortran 语言编制的。

第二阶段是 20 世纪 60 年代到 70 年代，出现了多种仿真程序包括初级仿真语言。这个时期仿真软件主要解决的问题是利用数字仿真方法求解常微分方程组。例如，1961 年由贝尔实验室开发的用于实现数据采集系统仿真的面向框图的程序 BLODI (block diagram compiler)，1962 年为了工业动力学系统仿真专门开发的语言 DYNAMO (dynamic models)。1983 年发表的用于求解常微分方程组的仿真程序 MIDAS (modified integration digital analog simulator) 等，直到 1967 年，为了促进已有的几十种数字仿真语言的标准化，美国计算机仿真学会 SCS 提出了 CSSL (continuous system simulation language) 标准，后来开发的仿真语言大都遵循这个标准。在此阶段的仿真语言中，比较典型的还有 1964 年由 IBM 公司的 G. 戈登 (G. Gordon) 开发的高度结构化的利用进程交互法进行排队问题仿真的专用仿真语言 GPSS (general purpose simulation system)。

第三阶段在 20 世纪 70 年代到 80 年代初期，出现了高级完善的商品化仿真语言。这个阶段仿真语言的特点在以下几个方面比早期的仿真语言更加成熟和全面。

- 1) 模型的表达能力。
- 2) 数值性能和算法。
- 3) 语言的结构特征。
- 4) 模型验证。

- 5) 程序执行方式。
- 6) 数据管理和处理能力。
- 7) 输入输出特性。

例如，在 20 世纪 70 年代中期推出的算法全面、功能强大的求解常微分方程和差分方程问题的仿真语言 CSSL-IV 和 ACSL (advanced continuous simulation language)，以及 1971 年推出的用于离散事件仿真的可以用类似自然语言自由格式描述系统模型的仿真语言 Simscript 1.5 和应用广泛的随机网络建模的 SLAM 仿真语言。

第四阶段是 20 世纪 80 年代中期开始的一体化建模与仿真环境研究。其背景是：

- 1) 随着建模与仿真工作要求的提高，已开发的各种仿真软件经常不能协调地工作。
- 2) 对仿真语言的要求越来越复杂。
- 3) 存在大量的数据处理及文档化工作。
- 4) 不同的用户（建模者，仿真实验人员，决策者）对仿真工具有不同的要求。
- 5) 计算机网络技术和数据库技术有较大的发展。

一体化建模与仿真环境的主要性能表现在：

- 1) 支持建模与仿真的全寿命周期活动。
- 2) 集成化程度高。
- 3) 方便友好的用户接口。
- 4) 初步的知识处理能力。
- 5) 模型与仿真的质量保证措施。
- 6) 开放性。

目前，仿真可以使用专用软件来实现。下面列举了一些仿真软件：20-sim、Arena、Automod、Ageism、Easy5、Idef、Intrax、Manufacturing Engineering、Matlab、Modsim、Promodel、Prosolvia、Quest、SDI supply chain 及 Witness。

**Witness (SDX)：**该软件提供离散事件仿真。该软件具备的多种工具使得对自动化制造系统进行仿真非常容易。周转时间、损坏模式和定时、调整模式和定时、缓冲设备容量和保存时间、机器类型等，连同路径信息都为仿真提供了方便性。该软件还包括物料流动优化和虚拟现实功能，有效地物流流动可以最小化设备间物料和产品流动的费用。

### 1.1.2 仿真建模方法学的发展

仿真是在系统模型上进行实验的过程。利用计算机进行仿真就必须建立能够

被计算机识别并能在计算机上运行的系统模型,也就是说,通过对系统进行分析,首先建立描述系统行为规律的系统模型,再将其转换为计算机仿真程序。仿真运算过程就是对系统模型求解的过程。为了通过仿真分析能够准确地掌握系统的内在运动规律,在仿真中以下两个方面是非常重要的:一是建立准确的系统模型,二是获得正确的仿真结果。

早期计算机仿真的对象是对工程技术领域中的实际物理过程进行仿真。该领域中的问题(如系统的控制和优化)涉及机械、电子、制造、航空等诸多背景,这些问题的特点是可以建立起以时间为基准的数学模型,即连续时间模型和离散时间模型,包括常微分方程、偏微分方程和差分方程等。利用实际工程背景中的原理和定理可以推导出所研究问题的时间微分或差分方程模型,而根据系统自身的特征和试验数据可以确定模型中的参数。在20世纪50年代到60年代,人们在差分方程和微分方程模型的结构特征化和参数辨识方面花费了相当大的精力并取得了很大的成果,与此同时,对求解这些方程算法的研究也在不断地发展,产生了能够满足快速和实时等多种不同要求的仿真算法和仿真软件。

进入20世纪70年代,仿真逐步向政治、经济、军事等社会科学领域渗透,出现了许多用于求解这些领域中问题的数学模型。而随着对这些问题的深入分析和了解,数学模型从早期的微分方程和差分方程模型逐渐向能够反映问题离散和随机特点的离散事件逻辑流图和网络图模型过渡。同时,从求解静态模型的蒙特卡罗(Monte Carlo)法到研究系统动态模型的以事件调度法、活动扫描法和进程交互法为代表的仿真策略,离散事件模型的仿真算法研究也取得了很大的发展。

由于离散事件模型的构造比微分方程和差分方程复杂,而且建立的模型多种多样,即使对同一个系统也可以建立许多不同的模型,因此人们一直在探索用统一的建模方法来指导和简化离散事件模型的建模过程。20世纪70年代中期B. P. 齐格勒(B. P. Zeigler)提出了模型的规范化和形式化描述理论,使得建模方法学前进了一大步。从那时起,结合计算机软件方法学的发展,系统建模理论中引入了层次化、模块化方法和面向对象的思想,为建立集成化交互式建模环境提供了良好的基础。

### 1.1.3 系统建模与仿真的发展趋势

计算机仿真技术不论是在理论上还是在实践中都已经取得了丰硕的成果,积累了大量的系统仿真模型和行之有效的仿真算法。但仿真技术目前仍然存在一些缺陷,如建模方法尚不完善,研究同一个系统的同一个问题可以建立出不相同的模型,而且有些社会经济系统中的问题尚无法建立准确的模型进行求解。同时,决策者必须通过建模者和仿真实验人员才能介入到对系统的仿真分析中。随着对建模与仿真的理论和方法研究的不断深入,以及作为其支撑技术之一的计算机技



术的不断发展和进步, 计算机仿真技术在应用过程中出现的问题将逐步得到解决。进入 20 世纪 90 年代, 计算机技术的各个方面都取得了异乎寻常的进展。微处理器性能的增长使得利用微型计算机和 workstation 进行复杂系统的仿真分析成为可能, 当然像中长期天气预报这样模型复杂、数据繁多、实时性要求高的问题的计算仍离不开巨型机。在软件设计中广泛采用了面向对象的思想和方法, 再加上计算机图形技术的进步, 仿真过程中的人机交互越来越方便直观。总之, 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。

近年来, 由于问题域的扩展和仿真支持技术的发展, 系统仿真方法学已致力于更自然地抽取事物的属性特征, 寻求使模型研究者更自然地参与仿真活动的方法。在这些探索的推动下, 产生了一批新的研究热点:

#### (1) 面向对象仿真 (object-oriented simulation, OOS)

面向对象仿真从人类认识世界的模式出发, 使问题空间和求解空间相一致, 提供更自然直观且具可维护性和可重用性的系统仿真框架。

#### (2) 定性仿真 (qualitative simulation, QS)

定性仿真用于复杂系统的研究, 由于传统的定量数字仿真的局限, 仿真领域引入定性研究方法将拓展其应用。定性仿真力求非数字化, 以非数字手段处理信息输入、建模、行为分析和结构输出, 通过定性模型推导系统定性行为描述。

#### (3) 智能仿真 (intelligence simulation, IS)

智能仿真是以知识为核心和人类思维行为为背景的智能技术, 引入整个建模与仿真过程, 构造各处基本知识的仿真系统 (knowledge based simulation system, KBSS), 即智能仿真平台。智能仿真技术的开发途径是人工智能 (专家系统、知识工程、模式识别和神经网络等) 与仿真技术 (仿真模型、仿真算法、仿真语言和仿真软件等) 的集成化。因此, 近年来各种智能算法, 如模糊算法、神经算法、遗传算法的探索也成了智能建模与仿真中的一些研究热点。

#### (4) 分布交互仿真 (distributed interactive simulation, DIS)

分布交互仿真是通过计算机网络将分散在各地的仿真设备互联, 构成时间与空间互相耦合的虚拟仿真环境。实现分布交互仿真的关键技术是网络技术、支撑环境技术、组织和管理。其中网络技术是实现分布交互仿真的基础, 支撑环境技术是分布交互仿真的核心, 组织和管理是完善分布交互仿真的信号。

#### (5) 可视化仿真 (visual simulation, VS)

为数值仿真过程及结果增加文本提示、图形、图像、动画表现, 使仿真过程更加直观, 结果更容易理解, 并能验证仿真过程是否正确。近年来还提出了动画仿真 (animated simulation, AS), 主要用于系统仿真模型建立之后的动画显示, 所以原则上仍属于可视化仿真。