



全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

系统建模与仿真

System Modeling and Simulation

齐欢 王小平 编著

Qi Huan Wang Xiaoping



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

清华大学出版社

全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

系统建模与仿真

System Modeling
and Simulation

齐欢 王小平 编著

Qi Huan Wang Xiaoping

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

系统建模与仿真技术的发展已经渗透到各行各业,特别是在社会经济系统、环境生态系统、能源系统、生物医学系统、教育训练系统等方面得到了广泛深入的应用。本书将建模与仿真相结合来组织编写,每一部分基本上是先论述建模的原理,然后讲解相应的仿真方法。全书共分12章,分别论述了连续系统建模与仿真的方法、离散事件系统建模与仿真的方法、分布参数系统建模与仿真的方法、随机系统建模与仿真的方法、分布式交互仿真以及建模与仿真的未来发展趋势,最后针对这些建模与仿真方法,分别给出了比较完整的实例,这些实例是作者的一些研究工作的总结。

本书是全国工程硕士指导委员会推荐用书,可以作为控制工程、系统工程专业的工程硕士生的教科书,同时也可以作为控制工程、系统工程、计算机科学、工业工程、管理科学等专业高年级本科生及硕士生的相关课程的参考用书,对于从事建模与仿真工作的专业技术人员,本书也是一本很好的参考书。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

系统建模与仿真/齐欢,王小平编著. —北京:清华大学出版社,2004

(全国工程硕士专业学位教学指导委员会推荐教材)

ISBN 7-302-08228-6

I. 系… II. ①齐… ②王… III. ①系统建模—教材 ②系统仿真—教材 IV. ①N945.12
②TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 017359 号

出 版 者: 清华大学出版社

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

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客户服务: 010-62776969

组稿编辑: 王一玲

文稿编辑: 陈 力

封面设计: 孟繁聪

版式设计: 刘伟森

印 刷 者: 北京牛山世兴印刷厂

装 订 者: 北京市密云县京文制本装订厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×230 印张: 27.5 字数: 563 千字

版 次: 2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-08228-6/TP·5936

印 数: 1~3000

定 价: 39.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704

前言

工程硕士教育具有其特殊性,工程硕士生通常实践知识比较丰富,而理论知识相对缺乏,因此让理论知识来指导实践工作是工程硕士教育的一个重点。目前,缺乏专门针对工程硕士教育的书籍,本书正是在这一背景下专门针对工程硕士教育编写的,已评为全国工程硕士指导委员会推荐用书。

建模与仿真是指构造现实世界实际系统的模型和在计算机上进行仿真的有关复杂活动,它主要包括实际系统、模型和计算机等三个基本部分,同时考虑三个基本部分之间的关系,即建模关系和仿真关系。最初仿真技术是作为对实际系统进行试验的辅助工具,而后用于训练目的,现在仿真系统的应用包括航空、航天、各种武器系统的研制部门、电力、交通运输、通信、化工、核能各个领域、系统概念研究、系统的可行性研究、系统的分析与设计、系统开发、系统测试与评估、系统操纵人员的培训、系统预测、系统的使用与维护等各个方面。随着仿真技术的发展,仿真技术应用的目的趋于多样化、全面化。它的应用领域已经发展到军用以及国民经济相关的各个重要领域。特别是近 20 年来,随着系统工程与科学的迅速发展,仿真技术已从传统的工程领域扩展到非工程领域,因而在社会经济系统、环境生态系统、能源系统、生物医学系统、教育训练系统中也得到了广泛的应用。

本书的目的是阐述建模与仿真的方法和思路。现实世界中各种系统的原理千变万化,也不可能找到一种以一概全的建模方法,所以我们不可能给读者讲解每种模型的原理,而是给读者介绍一个解决系统建模问题的思路,即使是本书中讲解的实例也只是为读者引导一种建模的思考方式。如果将来读者面对一个新的陌生系统并且要为之建立模型和仿真系统时,不再因为系统的复杂性而无从下手,那么我们的目的也就达到了。

本书摒弃了以往建模与仿真书籍建模和仿真分开独立编写的惯例,而是将建模与仿真相结合来组织编写,每一部分基本上是先论述建模的原理,然后讲解相应的仿真方法。全书共分 12 章,分别论述了连续系统建模与仿真的方法、离散事件系统建模与仿真的方法、分布参数系统建模与仿真的方法、随机系统建模与仿真的方法、分布式交互仿真以及建模与仿真未来发展趋势,最后针对这些建模与仿真方法分别给出了比较完整的实例,这些实例是我们一些研究工作的总结。通过这些实例,我们希望能起到抛砖引玉的作用,对

以后的建模与仿真能有所帮助。

第1章主要介绍了建模与仿真的基本概念,如系统、模型与仿真的定义,建模与仿真的历史、难点、主要方法、应用、主要研究领域以及未来发展趋势等。第2章概括了一些当前常用的系统建模方法,论述了系统模型的分类、建模方法的分类及原则、基本过程等,另外还论述了图解建模方法、层次分析法、概率统计法等。第3章、第4章和第5章分别详细论述了连续系统建模与仿真方法、离散事件系统建模和仿真方法,分别从各种方法的概念、基本原理、实际应用实例等角度来组织编写,力图使读者对这些方法能有一个全面、直观的体验。针对复杂系统的不确定性问题,在第6章和第7章对随机模型进行了阐述,包括随机模型常用的几种分布类型、随机变量的实现、随机数发生器等。在后续章节里,重点介绍了一些新兴的建模和仿真方法、新兴的系统体系结构,如面向对象技术、统一建模语言UML、基于Agent建模方法、模型校核、验证与确认、分布式交互仿真DIS、高层体系结构HLA,以及常用建模与仿真工具Matlab、Swarm、HLA开发平台等。为了使读者能对上述建模与仿真方法的综合使用有一个全面的理解,在本书的最后一章里,结合作者研究工作的实际情况,给出了一些研究实例,包括密闭空间内的气体泄漏扩散仿真、调节作用下投资策略的模型、三峡永久船闸运行可视化仿真、肿瘤细胞生长模型及仿真、钙离子扩散仿真。

本书的编写分工如下:王小平编写第1、10、11章,刘云峰编写第5、6、7、9章,肖恒辉编写第2、3章,吴金编写第4、8章,第12章由王小平、刘云峰、肖恒辉、吴金共同编写。全文由齐欢教授统稿。

本书的出版得到华中科技大学控制科学和工程系、华中科技大学系统工程研究所及其系统分析与集成研究室的大力支持,在此表示由衷的敬意和诚挚的谢意。本书的出版也是华中科技大学系统工程研究所系统分析与集成研究室多年来研究成果的一次总结和展望,在此对研究室以前研究生们的研究工作表示衷心的感谢。另外,还要特别感谢研究室的代建民老师,研究生唐青山、刘驰洋、张晓盼,他们仔细地阅读和校对了本书的原稿,并提出了宝贵的意见。

由于作者水平有限,书中难免出现错误,敬请读者批评指正。

作 者

2003年10月于武汉喻家山

目 录

第 1 章 绪论 /1

1.1 系统、模型、仿真的基本概念	1
1.2 系统建模与仿真的发展历史	3
1.3 系统建模与仿真的发展趋势	5
1.4 系统建模与仿真的应用	7
1.4.1 系统建模与仿真技术在军事领域中的应用	7
1.4.2 系统建模与仿真技术在工业领域中的应用	8
1.4.3 系统建模与仿真技术在教育与训练中的应用	8
1.4.4 系统建模与仿真技术在其他领域中的应用	9
1.5 关于复杂系统建模与仿真的几点补充	10
参考文献	12

第 2 章 常用系统建模方法 /13

2.1 系统模型的概述	13
2.1.1 系统模型的分类	14
2.1.2 建模方法的分类及建模原则	15
2.1.3 建模步骤的划分	15
2.2 建模的逻辑思维方法	19
2.2.1 抽象	19
2.2.2 归纳	21
2.2.3 演绎	22
2.2.4 类比	24
2.2.5 移植	25

2.3 图解建模法	26
2.3.1 图的概念	26
2.3.2 城市公共交通网络模型	27
2.3.3 网络模型的有向图结构	28
2.3.4 权值的设定	30
2.4 层次分析法	33
2.4.1 层次分析法的基本原理	33
2.4.2 层次分析法的计算方法	36
2.4.3 层次分析法的实例	38
2.5 概率统计法	40
2.5.1 时间序列预测模型	41
2.5.2 聚类分析在群决策问题中的运用	44
参考文献	53

第3章 连续系统建模与仿真方法 /54

3.1 连续系统模型的概述	54
3.2 微分方程建模方法	56
3.2.1 新产品销售模型	57
3.2.2 弱肉强食模型	61
3.3 分布参数建模方法	66
3.3.1 分布参数系统模型研究的必要性	66
3.3.2 分布参数模型的数学描述	67
3.3.3 分布参数系统模型的特点	67
3.3.4 一个典型的分布参数系统例子	68
3.4 频域建模方法	70
3.4.1 替换法	70
3.4.2 根匹配法	75
3.5 连续系统数值仿真方法	76
3.5.1 数值积分法	76
3.5.2 数值积分法的稳定性分析	85
3.5.3 分布参数系统仿真算法	86
参考文献	92

第4章 离散事件系统建模方法

/94

4.1 离散事件系统模型	94
4.1.1 离散事件系统的基本要素	95
4.1.2 离散事件仿真模型的部件与结构	97
4.2 Petri 网建模	99
4.2.1 Petri 网的基本概念	99
4.2.2 条件/事件系统	103
4.2.3 库所/变迁网	105
4.3 活动循环图法和实体流图法	109
4.3.1 活动循环图法	109
4.3.2 具有逻辑实体和到达活动的 ACD	115
4.3.3 实体流图法	117
4.4 排队系统	122
4.4.1 排队系统的基本概述	122
4.4.2 单服务员排队服务系统的仿真方法	123
4.4.3 快餐店排队问题	126
4.5 库存模型	129
4.5.1 库存系统的基本概念	130
4.5.2 确定型库存系统	130
4.5.3 随机型库存系统	133
4.5.4 库存系统的仿真方法	137
参考文献	137

第5章 离散事件系统仿真方法

/139

5.1 离散事件系统仿真基本策略	139
5.1.1 事件调度法	139
5.1.2 活动扫描法	142
5.1.3 进程交互法	145
5.2 仿真时钟推进机制	149
5.3 消息驱动的仿真机制	156
5.4 混合系统仿真策略	162

5.4.1 混合系统的一般模型	163
5.4.2 混合系统的仿真算法	165
5.5 蒙特卡罗仿真方法	167
5.5.1 蒙特卡罗法概述	167
5.5.2 股票价格的蒙特卡罗仿真	169
5.5.3 蒙特卡罗法在系统可靠性仿真中的应用	171
参考文献	175

第6章 随机模型的确定 /176

6.1 随机模型概述	176
6.2 已知分布类型估计分布参数	179
6.2.1 分布参数的类型	180
6.2.2 分布参数估计	182
6.3 假定分布类型	192
6.3.1 归纳统计量法	192
6.3.2 直方图法	194
6.3.3 概率图法	196
6.4 经验分布	197
参考文献	198

第7章 随机变量的实现 /199

7.1 随机变量实现的概述	199
7.2 随机数发生器设计	201
7.2.1 线性同余法	201
7.2.2 混合同余法	204
7.2.3 乘同余法	204
7.2.4 取小数法	205
7.2.5 其他随机数发生器的设计方法	206
7.3 随机数发生器测试	207
7.4 随机变量实现的原理	211
7.4.1 逆变法	212
7.4.2 组合法	215

7.4.3 取舍法	217
7.4.4 卷积法	220
7.5 常用分布类型随机变量的实现	221
7.5.1 常用连续分布类型随机变量的实现	221
7.5.2 常用离散分布类型随机变量的实现	225
参考文献	227

第8章 高层建模与仿真方法 /228

8.1 面向对象的建模与仿真	228
8.1.1 面向对象方法概述	228
8.1.2 面向对象的概念和技术	231
8.1.3 面向对象的离散事件系统的建模与仿真	238
8.1.4 面向对象的连续系统的建模与仿真	242
8.2 统一建模语言 UML	249
8.2.1 UML 的起源	249
8.2.2 UML 语义	250
8.2.3 UML 的图形表示	252
8.2.4 UML 的特点	260
8.3 基于 Agent 建模方法	261
8.3.1 Agent 的基本概念和原理	261
8.3.2 基于 Agent 的建模方法	265
8.4 多分辨率建模技术	271
8.4.1 概述及多分辨率建模的发展历史	271
8.4.2 多分辨率建模的基本概念	272
8.4.3 研究多分辨率建模的必要性	273
8.4.4 目前的研究方法的介绍	274
8.4.5 模型间的一致性问题	279
8.4.6 高层体系结构下多分辨率建模的实现问题	280
参考文献	281

第9章 建模与仿真的校核、验证与确认综述 /282

9.1 建模与仿真 VV&A 概述	282
-------------------	-----

9.1.1	VV&A 的基本概念	282
9.1.2	VV&A 的一般原则	284
9.1.3	VV&A 作用于 M&S 生命周期	286
9.2	校核与验证的技术与方法分类	288
9.3	随机模型拟合优良度常用检验方法	292
9.3.1	χ^2 检验	292
9.3.2	柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验	293
9.4	仿真系统输出统计分析	296
9.4.1	置信区间法	296
9.4.2	谱分析法	298
9.5	贝叶斯方法	300
	参考文献	302

第 10 章 分布式交互仿真 /304

10.1	分布式交互仿真的起源、发展与意义	304
10.1.1	分布式交互仿真的起源及发展历程	304
10.1.2	分布式交互仿真的意义与应用	305
10.2	DIS	306
10.2.1	DIS 系统的设计原则	307
10.2.2	DIS 系统的关键技术	308
10.2.3	DIS 系统体系结构	309
10.2.4	现有 DIS 标准简介	312
10.3	高层体系结构	317
10.3.1	高层体系结构的起源	317
10.3.2	HLA 的组成	319
10.3.3	HLA 规则	320
10.3.4	对象模型模板	323
10.3.5	RTI 接口规范分析	339
	参考文献	347

第 11 章 常用建模与仿真工具简介 /348

11.1	Matlab 简介	348
------	-----------------	-----

11.1.1	矩阵生成和运算	349
11.1.2	复杂矩阵运算	350
11.1.3	程序控制流与函数 M-文件	351
11.1.4	图形输出功能	353
11.1.5	高级数值计算	354
11.1.6	Simulink	356
11.2	Swarm——multi-Agent 的仿真平台	361
11.2.1	Swarm 与复杂适应系统简介	361
11.2.2	Swarm 的逻辑结构	362
11.2.3	Swarm 仿真系统结构	366
11.3	HLA 仿真开发平台	369
11.3.1	LabWorks 介绍	369
11.3.2	pRTI 介绍	377
11.3.3	其他 HLA 开发平台	380
	参考文献	380

第 12 章 建模与仿真实例汇编 /381

12.1	密闭空间内的气体泄漏扩散仿真	381
12.1.1	密闭空间内的气体泄漏后的自由扩散过程仿真	381
12.1.2	密闭空间内的气体泄漏后的对流扩散仿真	386
12.1.3	密闭空间打开通风口时气体对流扩散仿真	388
12.2	调节作用下投资策略的模型	391
12.2.1	项目价值路径的模拟	392
12.2.2	期权定价公式	393
12.2.3	数值求解期权价值	395
12.2.4	调节作用参数对期权价值的影响分析	396
12.3	三峡船闸运行二维可视化仿真	397
12.4	肿瘤细胞生长模型及仿真	406
12.4.1	含有抑制物质的肿瘤生长模型	406
12.4.2	含有肿瘤血管生长因子的数学模型	411
12.5	钙离子扩散仿真	413

12.5.1	钙振荡的意义·····	414
12.5.2	钙的调控机制·····	414
12.5.3	钙振荡形成机制的几种学说·····	415
12.5.4	三磷酸肌醇影响钙释放的数学模型·····	418
参考文献·····		422

第 1 章

绪 论

建模与仿真是指构造现实世界实际系统的模型和在计算机上进行仿真的有关复杂活动,它主要包括实际系统、模型和计算机等三个基本部分,同时考虑三个基本部分之间的关系,即建模关系和仿真关系,如图 1-1 所示。建模关系主要研究实际系统与模型之间的关系,它通过对实际系统的观测和检测,在忽略次要因素及不可检测变量的基础上,用数学的方法进行描述,从而获得实际系统的简化近似模型。仿真关系主要研究计算机的程序实现与模型之间的关系,其程序能为计算机所接受并在计算机上运行。

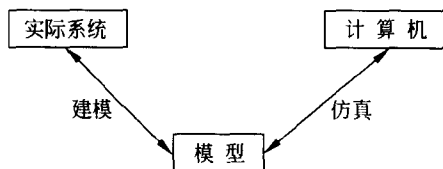


图 1-1 建模与仿真的基本组成与相互关系

1.1 系统、模型、仿真的基本概念

系统这一词最早见著古希腊原子论创始人德谟克利特(公元前 460 年至公元前 370 年)著作《世界大系统》一书。该书明确地论述了关于系统的含义:“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联系的总貌。”据此我们可以定义系统为“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”^[1]。系统可能是自然的或人工的、现在存在的

或是未来所计划的。例如,一个理发馆是一个人工系统,该系统中的实体有服务员和顾客。顾客按照某种规律到达,服务员根据顾客的要求,按一定的程序为顾客服务,服务完毕后顾客离去。在该系统中,顾客和服务员互相作用,顾客到达模式影响着服务员的工作忙闲状态和理发馆的排队状态,而服务员的多少和服务效率也影响着顾客接受服务的质量。

构造一个系统的模型,在模型上进行实验成为系统分析、研究的十分有效的手段。为了达到系统研究的目的,系统模型用来收集系统有关信息和描述系统有关实体。模型是对相应的真实对象和真实关系中那些有用的和令人感兴趣的特性的抽象,是对系统某些本质方面的描述,它以各种可用的形式提供被研究系统的描述信息。模型可分为三大类,一类是物理模型,就是采用一定比例尺按照真实系统的样子制作,沙盘模型就是物理模型的典型例子,有些风景名胜区的模型也是物理模型的典型例子。另一类是数学模型,就是用数学表达式形式来描述系统的内在规律,它通常是模型的形式描述。还有一类就是模型的非形式描述,模型的非形式描述,说明了模型的本质但不是细节,它帮助建模者随着对模型的深入研究能保持对模型的完整形态有清晰的认识。非形式描述帮助用户和同行抓住模型的基本轮廓,并能想象模型在概念框架中如何进行工作。因此模型的非形式描述是与读者直观建立联系的最自然而有效的方法,也是模型与其他的世界联系的自然而有效的方法。

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的系统的模型作实验。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。Oren在1984年在给出了仿真的基本概念框架“建模——实验——分析”的基础上,提出了“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。实际上,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”一文我们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,仿真是通过对模型的实验以达到研究系统的目的^[1,2]。

现代仿真技术均是在计算机支持下进行的,因此,系统仿真也称为计算机仿真。系统仿真有三个基本的活动,即系统建模、仿真建模和仿真实验,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(包括硬件和软件)。

在复杂系统仿真方法学的发展中,常常还提及以下一些概念^[4]:

(1) 黑箱。对于一个可观测到其输入和输出值,但不知其内部结构的系统,可以视为一个黑箱,黑箱方法认为系统的输入及输出值中包含了系统的结构信息,因此可以通过研究其外部特性去研究它的内部结构和关系。对于那些已知其内部结构的系统,则可视作

白箱。而介于白箱与黑箱之间的,是灰箱系统。复杂系统仿真方法主要研究的是黑箱和灰箱的问题。著名仿真学者卡普勒斯曾经提出了一个从白箱问题到黑箱问题的模型色谱,他把航空、航天、电力、化工等问题放在色谱带中白箱的一端,把社会、经济、生物放在色谱带的另一端——黑箱带。而在黑箱色带与白箱色带之间渐变的灰箱色带,则包含了生态、环境等问题。

(2) 信息源集成。系统仿真建模的信息源主要来自先验理论、观测数据和专家经验三个方面。在传统系统仿真方法中,先验理论一般是充分可用的、确定的。因此在系统建模中,特别是建立模型框架阶段,先验理论起着主要的作用。但在复杂系统仿真中,先验理论往往是不充分甚至是不可用的。因此,复杂系统仿真的建模过程需要对一切可用的信息源加以集成,一切可用的先验知识、专家经验及观测数据,包括定性和定量的、精确和模糊的、形式化和非形式化的统统集成起来,加以利用。这是复杂系统仿真方法一个重要的特征。

(3) 同构与同态。对于系统的描述,一般可以分为行为级、状态结构级和结构分解级三级。行为一级是最低一级,在这一级系统实际被视为黑箱。在系统与模型之间,如果在行为一级等价,称之为同态模型;如果在结构一级等价,则称之为同构模型。同态意味着系统与模型之间行为的相似,但并无结构上的对应关系。在复杂系统仿真中,低级阶段是建立系统的同态模型,它可用来复现和预测系统的行为。高级阶段则是建立系统的同构模型,从状态结构级一直到结构分解级,以认识系统运行的机理和规律。

(4) 演绎与归纳。传统仿真方法主要是演绎推理,主要应用先验理论,补充以某些假设和推理,然后通过数学的逻辑演绎来建模,它的基本特征是从一般到特殊。在复杂系统仿真中,它是从观测系统的行为出发,补充以某些假设和专家的经验,然后把所有可用的信息源集成起来,进行归纳推理。从系统描述的最低一级(行为级)开始,目的是获得系统更高一级(结构级)的描述。因此这是一个从特殊到一般的过程。归纳推理的结果往往不是惟一解。这就使得归纳推理建模的可信度研究变得十分重要。可信度分析一般归结为模型行为与真实系统行为之间的比较,以它们之间偏离程度来度量。

1.2 系统建模与仿真的发展历史

仿真技术的发展是与控制工程、系统工程及计算机技术的发展密切相联系的。控制工程和系统工程的发展促进了仿真技术的广泛应用,而计算机的出现以及计算技术的发展,则为仿真技术提供了强有力的手段和工具^[2]。仿真在工程系统研究的各个阶段,如方案论证、系统对象和基本部件的分析、初步设计、详细设计、分系统试验等各阶段,均发挥了显著的作用。表 1-1 提供了一个模型与仿真领域发展的系统总结^[2]。

表 1-1 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	工业操作过程的仿真
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 Prisker 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

20 世纪 50 年代初连续系统仿真在模拟计算机上进行,50 年代中期出现数字仿真技术,从此计算机仿真技术沿着模拟仿真和数字仿真两个方面发展。20 世纪 60 年代初出现了混合模拟计算机,增加了模拟仿真的逻辑控制工程,解决了偏微分方程、差分方程、随机过程的仿真问题。而在数字仿真方面,除了计算机的运算速度不断提高外,为了使仿真人员摆脱复杂的程序设计,20 世纪 60~70 年代广泛应用了 CSMP,CSSL,DSL,MIMIC,70 年代在我国就使用了 DSL,DARE-P 和 CSSL 系统。

20 世纪 80 年代末 90 年代初,以计算机技术、通信技术、智能技术等为代表的信息技术的迅猛发展,给计算机仿真技术在可视仿真基础上的进一步发展带来了契机,出现了多媒体仿真技术。它采用不同媒体形态描述性质不同的模型信息,建立反映系统内在运动规律和外在表现形式的多媒体模型,并在多媒体计算机上运行,产生定性、定量相结合的系统动态演变过程,从而获得关于系统的感性和理性认识。多媒体仿真技术充分利用了视觉和听觉媒体的处理和合成技术,更强调头脑、视觉和听觉的体验,仿真中人与计算机的交互手段也因之而更加丰富。我国的多媒体仿真技术正处于起步和发展时期,清华大学、北京大学、华中理工大学和一些部队院校已开始了有关这方面的研究。

虚拟现实仿真技术是继多媒体仿真之后兴起的又一仿真技术。自 20 世纪 70 年代以来,随着信息技术、计算机技术、计算机网络技术、图形图像处理技术等的高速发展,人们开始在计算机中描述和建立客观世界中的客观事物以及它们之间的关系。20 世纪 80 年代初正式提出了“virtual reality”(虚拟现实)一词^[2]。虚拟现实是一种由计算机全部或部分生成的多维感觉环境,给参与者有身临其境的感觉,同时参与者从定性和定量综合集成的虚拟环境中可以获得对客观世界中客观事物的感性和理性的认识。沉浸、交互、构思(immersion, interaction, imagination)是虚拟现实具备的三个基本特征。虚拟现实技术具有安全、经济、节能降耗、不受外界环境限制等突出优点,在今后必然会得到更深入的发