



普通高等教育“十二五”规划教材

系统建模 与计算机仿真



陈无畏 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

系统建模与计算机仿真

主 编	陈无畏	
参 编	王其东	赵林峰
主 审	何 仁	

机 械 工 业 出 版 社

本书主要从考虑培养车辆、机械、机电和交通等领域的应用型人才来安排内容体系,实用性较强,理论讲解与实例分析相结合,以加深学生对理论的理解和掌握。全书共11章,主要包括绪论、数学模型与系统建模、系统仿真方法、非线性系统的建模与仿真、分布参数系统的建模与仿真、随机系统的建模与仿真、离散事件系统建模与仿真、分布式交互仿真、实时仿真、先进仿真技术及展望等内容,并简单介绍了仿真软件与仿真实例。本书在编写过程中,注意吸收相关学科的最新成果,突出新颖性,以适应21世纪教学改革的需要和市场经济对人才的培养的要求。

本书可作为车辆、机械领域的高等学校本科生教材,也可供研究生、工程技术人员和相关研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

系统建模与计算机仿真/陈无畏主编. —北京:机械工业出版社,2013.7
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-43120-6

I. ①系… II. ①陈… III. ①系统建模—高等学校—教材②计算机仿真—高等学校—教材 IV. ①N945.12②TP391.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第146136号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:尹法欣 责任编辑:尹法欣 冯春生

责任校对:刘怡丹 封面设计:路恩中

责任印制:杨 曦

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2013年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17印张·420千字

标准书号:ISBN 978-7-111-43120-6

定价:35.00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

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

系统建模与计算机仿真技术是以相似原理、模型理论、系统技术、信息技术以及建模与仿真应用领域的有关专业技术为基础,以计算机系统、物理效应设备及仿真器为工具,根据研究目标,利用共性或专用支撑技术,建立仿真系统,对研究对象进行抽象、映射、描述和实验、分析、评估的一门多学科的综合性和交叉性技术。其中,模型是对实体、过程、系统、现象的数学、物理或逻辑的描述,仿真是模型随时间运行的手段和方法。

目前,建模与仿真技术在各类应用需求的牵引及有关学科技术的推动下,已不再是某一学科或领域的分支,它已经发展成为较完整的综合性学科专业体系,并正迅速地发展成为一项通用性、战略性的技术。从我国建模与仿真技术几十年的发展历史来看,最初是作为对实际系统进行试验的辅助工具,而后用于训练,现在的应用则包括了航空航天、各种武器系统的研制部门、电力电子、交通运输、通信、化工、机械、车辆等与军事和国民经济相关的各个领域,还包括系统概念研究、系统可行性研究、系统分析与设计、系统开发、系统测试与评估、系统预测、系统的使用与维护等各方面。随着仿真技术的发展,其应用领域已从传统的工程领域扩展到非工程领域,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。建模与仿真技术和高性能计算机一起,已成为与理论研究、实验研究并列的第三种科学研究方法,并朝着一体化建模与仿真环境的方向稳步发展。

“系统建模与计算机仿真”是一门综合性、实用性很强的专业基础课。本书适用于机械工程、车辆工程、交通工程、机电类等专业的课程教学。开设该门课程的目的是让学生通过该门课程的学习,掌握系统建模与仿真技术的基本方法,并具备对车辆系统、机械系统和其他系统进行分析、计算、实验和设计的初步能力,为今后参加工程实践打好必要的理论基础,掌握一定的专门技术。

由于“系统建模与计算机仿真”涉及诸多学科的知识,本书无法面面俱到,重点放在基本的建模原理、仿真方法与思路上。现实世界中各种系统的原理千变万化,不可能找到一种以一概全的建模方法,也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,即以介绍系统建模的基本原理、概念及方法为主,结合仿真实验,对其基本内容讲深讲透。对车辆、机械、自动化等系统建模与仿真所涉及的较深理论知识和众多内容只作一般介绍。

本书在编写上注意与数值分析、线性代数、控制工程基础、现代设计技术、计算机语言等课程密切联系,并将建模与仿真紧密结合起来编写,注重实际应用,有针对性地给出了较多、较完整的实例。这样,便于学生结合不同专业的系统动力学理论和不同的研究对象所具有的不同性能,扎实掌握实际的建模与仿真技术。此外,本书在编写内容、体系等方面紧密结合建模与仿真的新理论和新技术研究成果,遵循拓宽知识面、内容新颖和强调应用的原则,力求做到既方便课堂教学和自学,也可供科研和工程技术人员参考。

本书系统地讲述了系统建模与仿真的基本方法、基本原理及应用实例,全书共11章。

第1章介绍了系统、模型、仿真的概念、发展历史及应用领域；第2章讲述了数学模型的主要形式、工程系统常用的数学模型和数学模型之间的转换，并给出了复杂系统的几种建模方法；第3章内容主要包括数字仿真算法、不同算法的选择和比较、仿真模型误差和稳定性问题、建模与仿真的可信度评估等；第4章就非线性系统的数学模型、数字仿真算法和非线性振动系统作了简单介绍；第5章就分布参数系统建模与仿真方法作了简单介绍，并给出了典型的分布参数系统实例；第6章内容包括随机系统模型、随机变量的分布参数估计以及仿真方法、系统辨识等，并给出了随机系统建模与仿真的实例；第7章简述了离散事件模型、Petri网建模、排队系统、库存系统以及加工系统等；第8章就分布式交互仿真作了简单介绍，并给出了应用实例；第9章内容主要包括物理仿真、半实物仿真、采样系统仿真以及数据的采集、通信与处理等，并给出了多个应用实例；第10章讲述了当前工程领域应用较为普遍的一些先进仿真技术，涉及并行仿真、虚拟现实、虚拟设计、虚拟制造、虚拟产品开发、智能仿真等方面；第11章简要论述了仿真建模水平、仿真手段及仿真应用的发展趋势。

本书由合肥工业大学陈无畏、赵林峰和安徽理工大学王其东编写，陈无畏任主编。其中，第1、4、8、11章由王其东教授编写，第5章和附录由赵林峰讲师编写，第2、3、6、7、9、10章由陈无畏教授编写。全书由陈无畏教授统稿。

本书的出版得到了合肥工业大学研究生培养处的大力支持，在此表示由衷的敬意和诚挚的感谢。此外，还要特别感谢研究生肖灵芝、郝芳芳、李超、王洪成、韦端利，他们对本书的编写做了很多的资料收集和文字工作。

江苏大学何仁教授审阅了全部书稿，并提出了许多宝贵意见，在此深表谢意。另外，在编写本书时，参阅了一些国内外有关著作和学术资料，有的还引用了其中的部分内容，谨向有关作者表示衷心的感谢。

限于作者水平和实践经验，书中难免存在不足和错误，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 系统、模型、仿真的基本概念	1
1.2 系统建模与仿真技术的发展历史	3
1.3 系统建模与仿真技术的研究与应用	4
1.4 系统建模与仿真技术的发展趋势	11
参考文献	13
第2章 数学模型与系统建模	14
2.1 概述	14
2.2 数学模型	16
2.3 数学建模的基本方法	21
2.4 数学模型常用的表述形式	30
2.5 工程系统常用的数学模型	32
2.6 数学模型之间的转换	35
2.7 常用系统建模方法	46
参考文献	62
第3章 系统仿真方法	63
3.1 系统仿真概述	63
3.2 数字仿真算法	65
3.3 稳定性分析与计算步长的选择	75
3.4 仿真算法的选择	77
3.5 建模与仿真的可信度评估	78
参考文献	84
第4章 非线性系统的建模与仿真	85
4.1 非线性系统的数学模型	85
4.2 非线性系统的数字仿真	88
4.3 非线性系统自由振动的建模与仿真	90
4.4 非线性系统强迫振动的建模与仿真	94
参考文献	99
第5章 分布参数系统的建模与仿真	100
5.1 分布参数系统的数学描述	100
5.2 典型的分布参数系统实例	103
参考文献	108
第6章 随机系统的建模与仿真	109
6.1 随机系统基本知识	109
6.2 随机系统模型简介	115
6.3 随机变量的分布参数估计	116
6.4 随机系统的仿真方法	121
6.5 几种常见的模型	126

6.6 系统辨识	128
6.7 随机系统建模与仿真实例	136
参考文献	140
第7章 离散事件系统建模与仿真	141
7.1 离散事件系统模型	141
7.2 Petri 网建模	142
7.3 排队系统	147
7.4 库存系统	151
7.5 加工系统	156
参考文献	160
第8章 分布式交互仿真	161
8.1 分布式交互仿真的起源及发展历程	161
8.2 DIS 系统	162
参考文献	168
第9章 实时仿真	170
9.1 物理仿真	170
9.2 半实物仿真	173
9.3 采样系统仿真	182
9.4 数据采集、通信与处理	186
参考文献	191
第10章 先进仿真技术	192
10.1 并行仿真	192
10.2 虚拟现实	202
10.3 虚拟设计	207
10.4 虚拟制造	211
10.5 虚拟产品开发	215
10.6 智能仿真	220
参考文献	227
第11章 展望	229
11.1 仿真建模水平	229
11.2 仿真手段	231
11.3 仿真应用的发展	234
参考文献	236
附录 仿真软件简介与仿真实例	237
附录 A 多体动力学理论与仿真 软件 ADAMS	237
附录 B Matlab/Simulink 软件与应用	248
附录 C 仿真实例	253
参考文献	266

第1章 绪 论

“系统建模与仿真技术”是以相似理论、模型理论、系统技术、信息技术以及建模与仿真应用领域的有关专业技术为基础，以计算机、物理效应设备及仿真器为工具，利用共性或专用支撑技术，建立仿真系统，对研究对象（系统）进行抽象、映射、描述和实验、分析、评估的一门多学科的综合性和交叉性技术。目前，建模与仿真技术在各类应用需求的牵引及有关学科技术的推动下，已发展成为较完整的综合性学科体系，并正迅速地发展成为一项通用性、战略性的技术。建模与仿真技术和高性能计算机一起，已成为继理论研究、实验研究之后人们认识世界的第三种科学研究方法。

1.1 系统、模型、仿真的基本概念

1.1.1 系统

美国国际商业机器公司（IBM）的 G. Golden 在他的著作《系统仿真》一书中写道：“系统这个术语已经在各个领域用得如此广泛，以致很难给它下一个定义，一方面要使这个定义足以概括它的各种应用，另一方面又要能简明地把这个定义应用于实际。”第一位“百科全书式的人物”古希腊原子论创始人德谟克利特（公元前 460—公元前 370 年）在他的著作《宇宙大系统》中明确阐述了系统的含义：“任何事物都是在联系中显示出来的，都是在系统中存在的，系统联系规定每一实物，而每一联系又能反映系统的联系总貌。”这也是关于系统的最早的定义。G. Golden 将系统定义为“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”。简单地说，系统指的是同类事物按一定的关系组成的整体。它包括工程系统（如：建筑物、工厂、通信网络、机器等）、非工程系统（如：经济、交通、管理、生态等）、自然系统（如：植物、动物、物理、化学等）和人工系统（如：文化、政治、教育等）。

举个简单的例子：按照上述定义，可以将一个超市定义为一个系统。在该系统中，服务员和顾客即为实体。顾客按照某种规律到达，服务员根据顾客不同按一定程序为顾客服务，服务完毕后顾客离开系统。在这个系统中，顾客和服务员相互作用，顾客到达模式影响着服务员的工作忙闲状态和超市的排队状态，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。

在定义一个系统时，首先要确定系统的边界。尽管世界上的事物是相互联系的，但当研究某一对象时，总要将该对象与其环境区别开来。边界确定了系统的范围，边界以外对系统的作用称为系统的输入，系统对边界以外的环境的作用称为系统的输出。

描述系统的“三要素”包括：实体、属性、活动。实体确定了系统的构成，也就确定了系统的边界；属性也称为描述变量，描述每一实体的特征；活动定义了系统内部实体之间的相互作用，从而确定了系统内部发生变化的过程。

1.1.2 模型

模型是系统的一种表示,是为了研究系统而开发的,是系统的内在联系及它与外界的关系的一种表述。简单地说,模型是对实际问题的抽象,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。根据模型的表示方式可以简单地将模型分为两大类,即物理模型和数学模型。所谓物理模型就是采用一定比例尺按照真实系统的“样子”制作的模型,例如现代大多数售楼中心的模型。而所谓数学模型,就是为了某种目的,用字母、数字及其他数学符号建立起来的等式或不等式以及图表、图像、框图等描述客观事物的特征及其内在联系的数学结构表达式。

一个系统可以定义为如下集合结构

$$S = (T, X, \Omega, Q, Y, \delta, \lambda)$$

式中, T 为时间基,描述系统变化的时间坐标, T 为整数则称为离散时间系统, T 为实数则称为连续时间系统; X 为输入集,代表外部环境对系统的作用。通常 X 被定义为 R^n , 其中 $n \in I^+$, 即 X 代表 n 个实值的输入变量; Ω 为输入段集,描述某个时间间隔内的输入模式,是 (X, T) 的一个子集; Q 为内部状态集,是系统内部结构建模的核心; δ 为状态转移函数,定义系统内部状态是如何变化的,它是一个映射: $\delta: Q \times \Omega \rightarrow Q$, 其含义是若系统在 t_0 时刻处在状态 q , 并施加一个输入段 $\omega: \langle t_0, t_1 \rangle \rightarrow X$, 则 $\delta(q, \omega)$ 表示系统处于 t_1 状态; Y 为输出集,系统通过它作用于环境; λ 为输出函数,它是映射: $\lambda: Q \times X \times T \rightarrow Y$, 输出函数给出了一个输出段集。

上面给出了系统建模的一般描述。一般来说,一个真实系统的内在联系以及它和外界的联系是很复杂的,涉及许多因素,因此很难用一个模型来进行准确的描述。所以在建模过程中,要舍弃次要因素,抓住主要因素,从而突出客观事物的本质特征。对于复杂的系统来说,建立物理模型所需要的费用较大,而且要修改参数或改变结构都很困难。因此,常用的方法是将系统的内在联系及其与外界的关系抽象为数学模型。

1.1.3 仿真

仿真 (Simulation) 就是通过建立实际系统模型并利用所建模型对实际系统进行试验研究的过程。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”进行的技术性定义是由美国亚利桑那大学的科恩教授给出。他在 1978 年的著作《连续系统仿真》中将仿真定义为: “用能代表多个研究的系统的模型做试验”。1982 年, 比利时学者 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, 加拿大 Oren Tuncer 教授给出了仿真的基本概念框架“建模—试验—分析”, 并提出“仿真是一种基于模型的活动”的定义。总的来说, 仿真是基于模型的, 通过对模型的试验以达到研究系统的目的。可以看出, 无论哪种定义, 仿真基于模型这一基本观点是一致的。

综合上述, “系统、模型、仿真”三者之间有着密切的关系。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试验以达到研究系统的目的。

在没有计算机之前, 仿真都是利用实物或者它的模型来进行研究的, 又称为物理仿真,

其特点是直接、形象、可靠度较高。但是,由于物理模型受到各种限制,并且容易受到破坏和难以重复使用,所以,发展的速度相对来说较慢。随着计算机的发展,其求解复杂系统模型的能力越来越强,现代仿真技术都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。

计算机仿真有三个基本的活动,即系统建模、仿真建模和仿真实验,同时,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),它们之间的关系如图 1-1 所示。

系统是仿真的对象和问题的本源,试验是解决问题、达到研究目的的手段,而模型则是连接系统和试验(问题和手段)的桥梁。

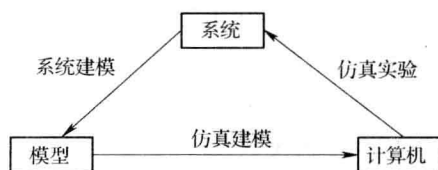


图 1-1 计算机仿真的三要素及三个基本活动

所谓系统仿真,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。它是建立在系统科学、系统识别、控制理论、计算技术与控制工程基础上的一门综合性很强的试验科学技术,是分析、综合(设计)各类系统,特别是大系统的一种研究方法和有力的工具。

1.2 系统建模与仿真技术的发展历史

仿真技术的发展是与控制工程、系统工程、计算机、网络技术、图形图像技术、多媒体、软件工程、信息处理、自动控制等多项高新技术的发展密切联系的。这些技术的发展,不仅促进了仿真技术的广泛应用,而且为仿真技术提供了强有力的手段和工具。

仿真技术的发展大致经历了五个发展阶段。

1) 20 世纪 40 年代以前,由于受到计算机发展的影响,在数值计算、数据处理、统计分析等方面受到限制。所以,所进行的仿真主要是物理仿真,即以原物的物质替代品作为模型(物理模型)的仿真。例如用于风洞试验的飞机比例模型等。物理仿真的主要特点是:仿真对象是某种工程制品或其部件,仿真的目的是对研究对象的设计性能进行分析和优化,仿真的模型不易改变,仿真的实验受到一定限制,仿真的形式比较单一,仿真的成本比较昂贵。

2) 随着电子计算机的出现,在 20 世纪 40 年代第一台模拟计算机被用于三自由度飞机系统的仿真,50 年代中期出现数字仿真技术,这个过程中主要进行的是模拟计算机(Analog Computer)仿真,而数字计算机(Digital Computer)仿真则刚刚起步。从此计算机仿真技术沿着模拟仿真(Analog Simulation)和数字仿真(Digital Simulation)两个方向发展。计算机仿真突破了物理仿真的限制,以物质形式存在的模型被以抽象形式或抽象与实物相结合的形式存在的模型所取代,不同的模型可在同一台计算机上建立和运行,并可方便、灵活、高效地进行多次重复的实验。仿真实验的结果也可以借助计算机进行存储、表现和分析,从而将仿真技术提高到了前所未有的水平,仿真的应用也因之而扩展到大部分工程和非工程领域。

3) 20 世纪 60~70 年代这十几年时间中,混合仿真与数字仿真都得到了迅速发展,其中混合仿真成为当时仿真的主流技术。60 年代初出现的混合模拟计算机,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。在 70 年代末,我国自行研制的混合计算机系统已先后用于工程、教学、科研等领域。在数字仿真方面,除了计算机的运行速度不断提高外,为了使仿真人员摆脱复杂的程序设计,这一期间广泛应用了 CSMP、CSSL、DSL、MIMIC 等数字仿真语言,大大普及了数字仿真的应用。

4) 20 世纪 80 年代末 90 年代初,微型计算机技术迅速发展,促进了以计算机技术、通信技术、智能技术等为代表的信息技术的迅猛发展。在这一时期,多媒体仿真技术崭露头角。它是一种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。

5) 20 世纪 90 年代末至今,虚拟现实仿真技术不断兴起。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联系。20 世纪 80 年代初正式提出了“虚拟现实”(Virtual Reality, VR)一词。虚拟现实亦称“灵境技术”,是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机系统。虚拟世界是全体虚拟环境或给定仿真对象的全体。虚拟环境是由计算机生成的,通过视觉、听觉、触觉等作用于用户,给参与者有身临其境的感受的交互式视景仿真。同时参与者从定性和定量综合集成的虚拟环境中,可以获得对客观事物的感性和理性认识。沉浸(Immersion)、交互(Interaction)、构想(Imagination)是虚拟现实具备的三个基本特征。美国科学家 G. Burdea 在 1993 年曾提出一个“虚拟现实的三角形”,即三个“I”,如图 1-2 所示。

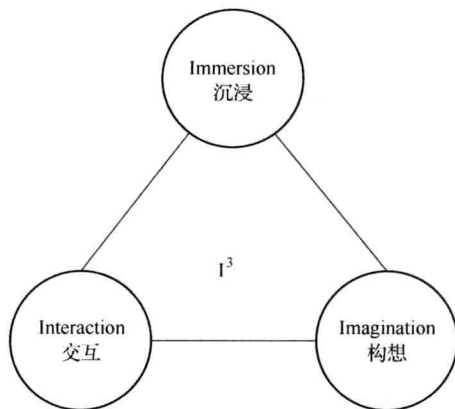


图 1-2 虚拟现实的三角形

按美国从事虚拟现实研究的哲学家 Michael Heim 的说法,虚拟现实有仿真性、交互性、人工性、沉浸性、电子现场、全身心投入、网络化通信等七个特征。虚拟现实技术具有安全、经济、节能降污、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展和更广泛的应用。

1.3 系统建模与仿真技术的研究与应用

最新的统计资料表明,系统建模与计算机仿真技术是当前应用最广泛的实用技术之一,研究、应用计算机仿真技术已经成为许多行业的一种潮流。随着仿真技术的发展,仿真技术应用目的趋于多样化、全面化。最初,仿真技术主要用于航空航天、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。近 20 年来,随着系统工程与科学的迅速发展,仿真技术已经从传统的工程领域扩展到非工程领域,在社会经济系统、环境生态系统、能源系统、生物医学系统、教育训练系统等也得到了广泛的应用。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，并且其应用效益也日益显著。

1.3.1 系统建模与仿真技术的研究成果

1.3.1.1 建模理论与方法

模型是仿真的基础，是客观事物的抽象描述。各个应用领域大多采用机理建模方法来描述客观事物的特性和行为，包括连续系统建模（线性/非线性、定常/时变、集中/分布参数、确定/随机）、离散事件系统建模（面向事件、面向进程、面向活动）或混合系统建模。当仿真对象的机理不清楚时可采用辨识建模方法。该方法就是采用系统辨识技术，根据系统实际运行或实验过程中所取得的输入/输出数据，利用各种辨识算法来建立系统的动静态模型。近些年来，系统辨识技术得到了飞速发展，在仿真技术领域得到了广泛应用。此外，为探索 and 解决具有不确定性、非线性、智能性的对象建模和仿真问题，智能建模方法在许多领域也都得到了广泛应用。例如，通过模糊逻辑推理形式来描述系统的输入—输出关系，通过归纳出的规则形式来描述系统的特性，以得到被辨识对象的定性和定量相结合的模型。虽然模糊建模方法是经验性的，但近些年来已在非线性动力系统建模、基于规则的学习控制、模式识别中得到了大量应用。智能建模的另一种方法，即神经网络建模方法应用也十分广泛。该方法是采用大量的非线性处理单元连接而成的网络，依赖于实际系统的试验或实测数据，建立起具有神经网络结构形式的模型。由于它具有高度非线性等特点，用于非线性系统的建模问题取得了非常好的效果。近些年来，人们还将处理不确定信息的模糊推理和依据样本数据学习的神经网络结合起来，既利用了神经网络的学习能力，又利用了模糊逻辑的表达能力，使模糊神经网络模型比传统的神经网络模型效果更好。目前，仿真工作者关注的研究问题主要集中在模糊逻辑和神经网络的映射关系、模糊神经网络的结构、模糊神经网络应用范围和学习算法的拓展等。

仿真对象是错综复杂的，可以由多个系统和子系统组成。除建立描述系统内部特性和行为的数学模型外，还要建立描述系统之间相互关系的模型，使模型具有可操作性和可重用性。因此，更高层次的统一建模语言和方法，如面向对象建模、面向组件建模、多智能体（Multi-agent）建模、元建模、面向服务建模等在我国各仿真领域都不同程度地得到了研究和应用。总之，多种建模方法相结合、定量和定性相结合的建模与仿真已在各个应用领域获得重视。

1.3.1.2 仿真语言、仿真软件和仿真支撑环境

早在 20 世纪 70 年代，我国一些单位就开发了连续系统仿真语言、离散事件系统仿真语言和混合系统仿真语言，用于数字计算机上的仿真，加快了编程进度。

建模/仿真支撑平台是建模和进行仿真试验的软硬件环境，20 世纪末我国许多单位根据仿真任务的需要开始建立适合本应用领域的建模/仿真支撑环境，它是在计算机、网络、数据库、工具软件、可视化、操作系统的基础上构建的，其体系结构从资源、通信、应用三方面来设计。

1.3.1.3 建模与仿真的可信度评估

仿真的问题归根到底是模型问题。20 世纪 70 年代中期，鉴于对仿真模型和仿真结果评估问题的重视，美国计算机仿真学会（SCS）成立了“模型可信度技术委员会”，简称 TC-

MC, 其任务是建立与模型可信度相关的概念、术语和规范, 这是一个重要的里程碑。1984 年, 第 9 届国际自动控制联合会 (IFAC) 世界大会首次有了关于模型可信度的专题讨论。1991 年, 美国国防部成立了国防建模与仿真办公室 (DMSO), 负责建模与仿真的可信度研究工作。在我国, 对建模与仿真的可信度研究工作近些年开展得很深入, 尤其是在实物或半实物的实时仿真过程中, 因为这类仿真是最接近实际、最为复杂的仿真过程, 它涉及可信度评估的几乎所有方面。建模与仿真的可信度评估包括校核 (Verification)、验证 (Validation) 和确认 (Accreditation), 简称 VV&A。

1.3.1.4 实时仿真系统

实时仿真是指仿真模型的时间比例尺与真实系统的时间比例尺完全相同的仿真。当仿真系统有实物 (半实物) 介入或有人在回路中时, 由于实物和人是按真实时间变化和运动的, 因此就需要进行实时仿真。早在 20 世纪 60 年代, 我国飞机飞行控制系统和导弹制导系统的研制过程就采用了半实物仿真系统, 又称为硬件在环仿真系统, 将陀螺仪、大气传感器、导引头、舵机等实物接入仿真回路, 进行闭环动态仿真试验。仿真器则是一种有人在回路中的仿真系统, 它利用计算机不断计算对象及环境的运动方程, 然后通过运动系统、视景系统、音响系统及仪表系统将其复现出来, 给被训者一种逼真的感觉。我国电站仿真始于 1975 年, 第一台电站培训模拟器花了 7 年时间于 1982 年完成, 获得 1985 年国家科技进步一等奖。目前, 我国拥有的电站模拟器已有数百台, 居世界首位, 而且 95% 以上都是我国自行研发的。1996 年 12 月, 吉林大学汽车动态模拟国家重点实验室自行研制的首台开发型汽车性能模拟器通过国家验收。该模拟器已达世界先进水平, 其研制总投资仅为国外同样规模的汽车性能模拟器的 1/10。在该模拟器上, 开展人车闭环系统的动态仿真与控制等前沿的共性基础技术研究, 用实物在环嵌入式仿真替代实物样机试验, 减少了实物样机的加工制造轮次, 缩短了汽车产品的开发周期。

1.3.1.5 网络化分布交互仿真系统

20 世纪 80 年代计算机网络的发展, 促进了分布交互仿真系统的发展和应用。构建分布交互仿真系统的关键技术是研究和提出一种具有通用性、互操作性和开放性的标准协议和规范并开发其运行支持软件。20 世纪 90 年代, 美国国防建模与仿真办公室提出了高层体系结构 (HLA), 2000 年 HLA 被批准为 IEEE 标准, 在国际上得到广泛应用。在我国, 不仅推广应用了 HLA, 而且现已开发出功能更完善、通用性更好的运行支撑软件及开发工具, 如层次化分布自治的 TH-RTI, 其在高速动车组开发中发挥了重要作用。

1.3.1.6 复杂系统建模与仿真

包含非线性、时变性、不确定性、不稳定性等的复杂系统, 在基础科学、工程建设、社会、经济、军事等领域大量存在, 采用传统方法难以解决。目前主要有两类研究, 一类是研究演化动力学的机理, 其代表如复杂适应系统、人工生命、遗传算法、演化算法和建模等; 另一类是研究具体对象 (经济系统、社会系统等) 的建模与仿真应用, 对系统的演化过程则通过人机结合与交互, 实现模型的修正与演化, 其代表如系统动力学、综合集成方法等。20 世纪 80 年代钱学森先生提出从定性到定量的综合集成方法, 将各类相关专家、数据、信息和计算机技术有机结合起来。该方法曾用于我国财政补贴、价格、国民经济预测中, 取得了很好的效果。近几年来, 基于学习、进化和适应特征的面向 Agent 的仿真 (Agent-Directed Simulation) 也已在社会、经济、军事和工程技术等方面取得了较多的研究成果。

1.3.2 系统建模与仿真技术的应用成果

1.3.2.1 系统建模与仿真技术在汽车工业中的应用

在汽车工业中,仿真技术的应用方面有:汽车设计、汽车制造、汽车试验和驾驶培训等。在早期的CAD/CAM发展为CIMS基础上,研究汽车虚拟样机技术,为产品的结构调整提供依据。在20世纪90年代中期,我国开展了汽车产品的虚拟制造技术研究,涉及虚拟设计、虚拟加工、虚拟装配、虚拟车间等的虚拟制造体系结构和多学科集成优化的产品协同开发平台。

在汽车产品设计中,采用虚拟产品开发技术可最大限度缩短产品开发周期、降低成本。此外,使用虚拟设计技术也可以快捷地建立产品的模型族,可实现并行、闭环的工作模式,实现远程协同产品开发,实现产品的变型设计和系列化设计。

在汽车制造中,虚拟制造除能为设计人员自身提供有关信息外,还能为决策者提供影响产品性能、制造成本、生产周期的相关信息,以便能够正确地处理性能、成本、进度和风险之间的平衡关系。

在传统的汽车设计开发中,需要进行大量的样件制造和试验。数字化仿真技术是对传统设计方法的一次历史性的革命,改变了传统以物理样机为基础的设计,使用户可以直接在计算机上快速分析和比较多种设计方案并进行优化设计,大大减少了物理样机制造及试验过程的费用与时间周期。仅以汽车悬架设计中一个并不复杂的横向稳定杆为例,若不经系统建模和仿真计算,仅对横向稳定杆的侧倾刚度,就需要制造一系列不同形状和直径的样件来进行试验,将耗费大量的资源和人力。而仿真计算可以快速确定刚度值,并寻求合适的稳定杆形状,极大地减少了样件的数量和试验次数,从而可节省开发成本和缩短开发时间。

此外,设计师设计出的新型汽车是否合理,往往需要经过风洞、碰撞等试验加以检验。最初检验新型汽车性能的方法是:在进行汽车开发时,将车身先制成1:1的汽车泥模,然后在风洞中做试验,根据试验情况对车身各部分进行细节修改,使风阻系数达到设计要求,再用三维坐标测量仪测量车身外形,绘制车身图样,进行车身冲压模具的设计、生产等技术工作。这种方法不仅存在着严重的误差,而且需先把样车做出来,不仅费事,而且费力。现在,采用虚拟试验方法,可以在理论计算和分析的基础上动态地模拟汽车模型在风洞中的实际情况,优化车身形状,减少风洞试验,大量节省模型制作和试验费用,提高设计的可靠性,并且可以减少约一半的设计费用及时间。

从总体上看,汽车工业应用仿真技术开发、制造产品尚处于起步阶段。目前,该项技术主要应用于概念车和车身内外模型的开发,另外在汽车装配中亦有少量应用。但随着仿真技术自身的不断发展完善,有理由相信,它必将引起汽车各个领域的革命性变化。

1.3.2.2 系统建模与仿真技术在军事领域中的应用

在军事方面,仿真技术的应用是很广泛的,如运用交战模型进行的计算机仿真、新型武器装备发展过程中的仿真、部队作战训练方面的仿真、高层次论证和规划计划中的仿真、军事作战理论和学术研究中的仿真、作战指挥和战争计划的仿真,以及战争中后勤保障的仿真等。就作战仿真的方法而言也还有很多,比如采用沙盘、图上作业缩微实体模型等建立物理模型的方法,采用蒙特卡洛法、兰彻斯特方程或指数法等建立数学模型的方法,采用实兵演习的方法,以及采用最先进的分布式交互网络、图形图像处理与显示、多媒体、虚拟现实、

人工智能和专家系统及计算机仿真方法等。计算机网络技术、多媒体技术、虚拟现实技术、面向对象技术、并行处理技术以及分布式处理与群集式处理技术的有机结合与综合应用,展示出计算机与计算机科学技术的宏伟前景,从而,必将大大加速人类社会信息化进程。在这种大背景下,作为计算机应用的一个重要分支,计算机仿真技术必将发挥其重要效能。

在电子战方面,在存有混杂媒体信号的环境中,融合来自多个信息源的不同信息是实施电子战的一种十分重要的能力。运用建模与仿真的方法以及专家系统的方法来获得更加智能的算法,可以比以前更快、更详尽地描述和控制信息知识,从而能更及时地完成探测装置和数据信息融合任务。此外,为了能够在军事平台上真正实现“一体化电子设备”,必须将一些完全不同的技术设备加以集成,并使它们能够互操作,以便组成最佳的武器系统。一些技术包括:电子系统的体系结构(建模与仿真、互连、标准与接口、故障容错等)、资源与信息技术(自动辅助决策、多信息融合、多传感器集成等)、电子设备处理器(机器智能与智能化软件集成)等。

在作战训练与人才培养等方面,仿真及应用主要体现在以下几个方面:首先是彻底检查部队的训练战略,更新传统的训练观念;其次是研讨发展趋势;另外还有在过去成功的作战模拟系统的基础上,继续向一体化、联合作战的模拟系统发展;更多的则包含作战模拟设施的作战演习。以检查部队的训练为例,现代化的科学技术已经允许军队以一种过去完全想象不到的方式来培训战术、战役和战略军官,这种方法就是虚拟战场的方法,比如美国陆军已经在“军官高级教程”中开设了“模拟沉浸”的训练课程。类似这样的课程可以培训面向21世纪战争的作战部队。

此外,仿真和建模方法也可以应用在核武器使用上,应用到信息作战中去。综上所述,利用军事建模与仿真技术来开发新技术,并努力使其转化为经济上能够承受的、决定性的军事能力,正是当前国际上质量建军的重要方向之一。

1.3.2.3 系统建模与仿真技术在教育与训练中的应用

一般来说,凡是需要有一个或一组熟练人员进行操作、控制、管理与决策的实际系统,都需要对这些人员进行训练、教育与培养。早期的培训大都在实际系统或设备上进行的。随着系统规模的加大、复杂程度的提高,特别是设备的造价日益昂贵,训练时因操作不当引起破坏而带来的损失大大增加。因此,提高系统运行的安全性事关重大。

以石油化工行业为例,许多重大生产事故、设备故障可能百年不遇,但一旦发生紧急情况,留给操作人员处理的时间非常短暂,如果不能及时正确处理,其后果不堪设想。因此,对岗位操作人员的素质要求很高。但由于石油化工行业大多数生产装置是连续作业、高压、高热、易燃易爆,设备昂贵,无法在生产装置上进行培训、考核。因此,为了保证生产装置安全、满负荷、长期、稳定、优质地运行,自20世纪80年代起,中国石化总公司、中国石油天然气总公司和化工行业的企业,投入大量资金,组织力量开发计算机仿真模拟训练考核装置,并在全行业推广应用。还要求所属企业能配置仿真模拟训练考核装置,并根据各企业的产品、生产流程、技术要求,组织开发培训、考核鉴定软件(包括开工、停工、故障判断、排除、考核等),按照生产规范要求严格的训练。考核时在模拟训练考核装置上设置各种故障,要求考核人员在规定的时间内找出故障并正确排除,对考核合格者颁发上岗证书。

对于汽车驾驶训练来说,科研人员开发了低成本高真实度的宽屏驾驶仿真系统。该系统

由多个可融合的通道构成,每个通道都由一台网络同步的工作站和一台高流明的投影仪组成。通过融合拼接得到的宽屏幕实现了大视角,同时,多个工作站分别实现了后视镜和侧视镜的功能。驾驶舱内装有许多复杂传感器,用以采集转向盘,节气门、制动踏板、离合器、挡位、信号灯等信号。将驾驶员操作数据和开发的驾驶仿真场景相结合,研究人员就能分析驾驶行为。同时,研究人员也可以设计特定的驾驶仿真场景来训练新驾驶员。

在电力工业方面,随着单元发电机组容量越来越大,系统越来越复杂,对它的经济运行、安全生产提出了更高的要求,仿真系统是实现这个目的的最佳途径。通过仿真系统可以优化运行过程,可以培训操作人员,电站仿真系统已成为电站建设与运行中必须配套的设备。

在核能工业方面,仿真技术在该领域的应用非常成功。在能源日趋紧张的今天,核能备受青睐,核电站得到很大的发展和普及。但由于核电站要求运行必须安全,操作人员的技术素质、技能是保证安全运行的前提,培训提高操作人员素质、技能的有效手段是仿真培训系统。

我国在研制各类训练仿真系统方面已经取得了不少成果,如用于飞机起落训练的飞行仿真器,用于舰船进出港训练的船舶操纵训练仿真器,用于电厂运行人员训练的电厂训练仿真器,以及用于海战训练的海军战术训练仿真器。

1.3.2.4 系统建模与仿真技术在制造领域中的应用

仿真技术在制造领域中的应用,大致有以下几个方面:

(1) 评价生产系统的规划设计 在新系统建立前,设计人员可以通过仿真,将系统的整体配置及运行过程呈现在设计者面前,通过仿真分析,找到设计存在的问题,寻求优化的设计方案,以减少投资风险。

(2) 控制物料 通过对物料库存系统的仿真,可动态地掌握出库、入库情况,正确掌握订货的时机与尺度。

(3) 协调各工序的生产节奏 多工序组成的生产加工系统,各工序生产节奏一般是不协调的,可通过对生产过程仿真找到生产“瓶颈”所在,调整设备,调配人力,使系统发挥最大潜力,达到协调高效生产。

(4) 辅助生产调度 生产调度者下达生产调度计划前,对该计划进行仿真,可以预测生产运行结果,并根据调度者的目的修改计划,直到满意为止。

在机械制造工业方面,经历了从手工业到大机器再到大规模流水生产线的发展历程,柔性制造系统和计算机集成制造系统使得机械制造工业的自动化程度有了很大的提高。在自动化生产线上加工产品,其生产工艺流程安排是通过计算机仿真完成的。每个工件什么时候通过自动小车运送到机床上加工,什么时候送到哪一个缓冲站等候加工,其中存在着复杂的优化决策问题,通过计算机仿真可以寻找最佳控制方案。

此外,虚拟现实技术、虚拟产品开发、虚拟制造技术以及虚拟样机技术等先进的仿真技术是目前计算机仿真技术在制造业应用的研究热点。这些先进的计算机仿真技术为产品的设计开发提供了强有力的工具和手段,对整个制造业产生了革命性的影响。

1.3.2.5 系统建模与仿真技术在交通领域中的应用

计算机仿真技术在交通领域中的应用相当广泛,根据交通仿真系统模型对交通系统描述细节程度的不同,可将交通仿真分为微观交通仿真、中观交通仿真和宏观交通仿真三种

类型。

(1) 微观交通仿真 仿真模型是用描述交通运行微观规律的参数来设计模型进行仿真的,它通过考察单个驾驶员和车辆及其相互作用特征来描述系统的状态,其对交通系统的要素及行为的细节描述程度最高。

(2) 中观交通仿真 仿真模型是在宏观交通网络的基础上,将个体车辆放入到宏观交通流中进行分析。它根据模拟的需要,对特定车辆的速度、位置及其他属性进行标识;或对个体车辆分组,从而对每组车辆的速度、位置及其他属性进行标识,其对交通系统的要素及行为的细节描述程度较高。

(3) 宏观交通仿真 仿真模型是用描述交通运行宏观规律的参数来设计模型进行仿真的。它通过考察交通流特征,即车队的“平均”行为来描述系统的状态,其对交通系统的要素及行为的细节描述处于一个较低的程度。

计算机交通仿真,尤其是微观交通仿真技术具有非常明显的优势。首先,系统仿真可以根据系统内部的逻辑关系和数学关系,面向系统的实际过程和系统行为来构造模型,从而得到复杂随机系统的解;其次,交通分析的开放性,借助于计算机技术,通过良好的用户输入输出界面,模型的运算结果可方便地与用户交互,增强了模型应用的实用性和方便性;最后,强大的路网动态交通状态描述能力、时间扫描技术为路网的动态交通状态提供了最大的支持。

交通是国民经济的命脉,随着经济的发展,交通拥堵、交通事故、环境污染以及能源短缺等交通问题成为世界各国面临的共性问题。为了解决这些交通问题,降低经济损失,提高交通运营的效率和安全,不少国家提出发展智能交通。

20 世纪 60 年代以来,国外交通仿真系统得到了较大发展。目前,公开发表的道路交通仿真软件已有近百个,有一定应用的软件系统也有数十个。交通仿真软件的新用途是为智能交通系统(Intelligent Transport System, ITS)提供论证手段。ITS 应用的一个重要特点是要考察整个网络的全局效果,而能够满足这一目标的传统软件并不太多。近年来,针对 ITS 开发的软件主要有 Dynasmart、Vissim、Integraion、Mitsim、Thoreau、Transims、Watsim 与 Plansim-T 等。Dynasmart 与 Integration 采用的模型多数属于中观范畴,可研究动态交通分配问题。Plansim-T、Paramics 与 Integration 由于采用了并行处理技术,可用于大规模道路网络的仿真。

1.3.2.6 系统建模与仿真技术在其他领域中的应用

在航天工业中,仿真是运载火箭、卫星、飞船等复杂大系统分析、设计、验证和操作训练的重要手段。此外,飞行器的设计制造和驾驶训练都离不开仿真技术的支持。例如,飞行模拟器被广泛用于飞行训练,由计算机系统、六自由度运动系统、视景系统等构成的模拟驾驶装置,其成本远远低于飞机及其飞行的成本,且安全性高。

在民航方面,随着经济的发展,民用航空市场的竞争日益激烈,乘客要求飞机必须保证安全、舒适、准点。因此,各大航空公司非常重视职工的培训工作。中国国际航空公司引进了波音 747 飞行器仿真模拟培训平台。在飞行员培训中心,飞行员首先要在仿真模拟飞行器上训练起飞、驾驶、降落等操作程序。此外,该平台还用于训练乘务员规范化服务。

此外,仿真也可以用于工程领域中某类特定系统的设计及其理论研究。例如,在工业控制系统设计中大量应用计算机仿真技术,以便对控制器的性能进行验证,非线性控制系统的

设计尤其依赖于仿真。在最优控制、自适应控制、大系统分解协调等理论研究中,仿真还被用来验证理论成果的正确性。

社会、经济、军事作战等非工程领域问题有一个普遍的特点,就是系统状态的变化具有多重性和不确定性等复杂的性质,因此大多数很难用解析方法求解。对于解决非工程领域中的预测、评价、优化和决策等问题,计算机仿真能够起到很大的作用。

例如在社会、经济、生态等方面的宏观决策和政策研究中,应用控制论的思想方法建立“系统动力学”模型,研究人口增长、环境污染、能源损耗等对社会经济的影响及其控制策略问题,辅助决策者制定规划和政策。在系统动力学仿真中,模型建立容易受到主观因素的影响,而且许多模型参数往往是通过估计和推测得到的,因此仿真结果与实际情况之间往往存在偏离,但是利用仿真结果进行一些定性的趋势分析还是有意义的。例如,“世界模型”用于预测人类社会发展中的某些共同问题,模型中主要考虑了人口增长、工业发展、环境污染、资源消耗、食物供给等五个方面的因素及其相互制约关系,是系统动力学仿真应用的一个典型案例。

除了在上述领域中的应用,仿真技术正在不断向教育、通信、社会、经济、娱乐等多个领域扩展,仿真技术和虚拟现实技术在各个行业中都显示出广阔的发展前景。

1.4 系统建模与仿真技术的发展趋势

计算机仿真技术不论是在理论上还是在实践上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,例如建模方法尚不完善,研究同一个系统的同一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。随着对建模和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然离不开巨型计算机。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,具体来讲主要体现在以下几个方面:

(1) 建模方法学 (Modeling Methodology, MM) 在早期的仿真技术中,重点是如何利用数学模型求解问题,侧重于研究建模过程中数学模型的结构特征以及操作数学模型所利用的数学工具和手段。如今计算机的功能已经有了很大的提高,仿真技术的研究领域有了很宽的拓展。从建模方法角度讲,除了继续研究如何利用抽象的数学模型描述系统外,还要研究能够充分利用计算机功能的新的建模方法。

(2) 面向对象仿真 (Object-Oriented Simulation, OOS) 从人类认识世界模式出发,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。

(3) 定性仿真 (Qualitative Simulation, QS) 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,以非数字化手段处理信息输入、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