

计算机仿真

Computer Simulation



何江华 著

中国科学技术大学出版社

当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书

中国科学技术大学
校友文库

计算机仿真

Computer Simulation

何江华 著

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书是结合国内外研究成果撰写的计算机仿真方面的专著,着重论述了仿真的理论基础(应用数学方面的知识)、仿真的技术基础(计算机方面的技术)、计算机仿真对象(仿真的对象的相关专业知识),并注重这三者的有机结合;描绘了计算机仿真的整体轮廓,既有理论基础,又有实际应用,内容涵盖了计算机仿真的主要领域。

本书适合于从事计算机仿真研究、开发的工程技术人员和教学人员,以及相关专业的本科生、研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

计算机仿真/何江华著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2010.1
(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书:中国科学技术大学校友文库)
“十一五”国家重点图书
ISBN 978-7-312-02206-7

I. 计… II. 何… III. 计算机仿真 IV. TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 214308 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026
网址 <http://press.ustc.edu.cn>
印刷 合肥晓星印刷有限责任公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 710 mm×1000 mm 1/16
印张 29.5
字数 450 千
版次 2010 年 1 月第 1 版
印次 2010 年 1 月第 1 次印刷
印数 1—2500 册
定价 88.00 元

编 委 会

顾 问 吴文俊 王志珍 谷超豪 朱清时

主 编 侯建国

编 委 (按姓氏笔画为序)

王 水	史济怀	叶向东	伍小平
刘 兢	刘有成	何多慧	吴 奇
张家铝	张裕恒	李曙光	杜善义
杨培东	辛厚文	陈 颢	陈 霖
陈初升	陈国良	周又元	林 间
范维澄	侯建国	俞书勤	俞昌旋
姚 新	施蕴渝	胡友秋	骆利群
徐克尊	徐冠水	徐善驾	翁征宇
郭光灿	钱逸泰	龚 昇	龚惠兴
童秉纲	舒其望	韩肇元	窦贤康

总 序

侯建国

(中国科学技术大学校长、中国科学院院士、第三世界科学院院士)

大学最重要的功能是向社会输送人才。大学对于一个国家、民族乃至世界的重要性和贡献度,很大程度上是通过毕业生在社会各领域所取得的成就来体现的。

中国科学技术大学建校只有短短的 50 年,之所以迅速成为享有较高国际声誉的著名大学之一,主要就是因为她培养出了一大批德才兼备的优秀毕业生。他们志向高远、基础扎实、综合素质高、创新能力强,在国内外科技、经济、教育等领域做出了杰出的贡献,为中国科大赢得了“科技英才的摇篮”的美誉。

2008 年 9 月,胡锦涛总书记为中国科大建校五十周年发来贺信,信中称赞说:半个世纪以来,中国科学技术大学依托中国科学院,按照全院办校、所系结合的方针,弘扬红专并进、理实交融的校风,努力推进教学和科研工作的改革创新,为党和国家培养了一大批科技人才,取得了一系列具有世界先进水平的原创性科技成果,为推动我国科教事业发展和社会主义现代化建设做出了重要贡献。

据统计,中国科大迄今已毕业的 5 万人中,已有 42 人当选中国科学院和中国工程院院士,是同期(自 1963 年以来)毕业生中当选院士数最多的高校之一。其中,本科毕业生中平均每 1000 人就产生 1 名院士和 700 多名硕士、博士,比例位居全国高校之首。还有众多的中青年才俊成为我国科技、企业、教育等领域的领军人物和骨干。在历年评选的“中国青年五四奖章”获得者中,作为科技界、科技创新型企业界青年才俊代表,科大毕业生已连续多年榜上有名,获奖总人数位居全国高校前列。

鲜为人知的是,有数千名优秀毕业生踏上国防战线,为科技强军做出了重要贡献,涌现出 20 多名科技将军和一大批国防科技中坚。

为反映中国科大五十年来人才培养成果,展示毕业生在科学研究中的最新进展,学校决定在建校五十周年之际,编辑出版《中国科学技术大学校友文库》,于 2008 年 9 月起陆续出书,校庆年内集中出版 50 种。该《文库》选题经过多轮严格的评审和论证,入选书稿学术水平高,已列为国家“十一五”重点图书出版规划。

入选作者中,有北京初创时期的毕业生,也有意气风发的少年班毕业生;有“两院”院士,也有 IEEE Fellow;有海内外科研院所、大专院校的教授,也有金融、IT 行业的英才;有默默奉献、矢志报国的科技将军,也有在国际前沿奋力拼搏的科研将才;有“文革”后留美学者中第一位担任美国大学系主任的青年教授,也有首批获得新中国博士学位的中年学者;……在母校五十周年华诞之际,他们通过著书立说的独特方式,向母校献礼,其深情厚意,令人感佩!

近年来,学校组织了一系列关于中国科大办学成就、经验、理念和优良传统的总结与讨论。通过总结与讨论,使我们更清醒地认识到,中国科大这所新中国亲手创办的新型理工科大学所肩负的历史使命和责任。我想,中国科大的创办与发展,首要的目标就是围绕国家战略需求,培养造就世界一流科学家和科技领军人才。五十年来,我们一直遵循这一目标定位,有效地探索了科教紧密结合、培养创新人才的成功之路,取得了令人瞩目的成就,也受到社会各界的广泛赞誉。

成绩属于过去,辉煌须待开创。在未来的发展中,我们依然要牢牢把握“育人是大学第一要务”的宗旨,在坚守优良传统的基础上,不断改革创新,提高教育教学质量,早日实现胡锦涛总书记对中国科大的期待:瞄准世界科技前沿,服务国家发展战略,创造性地做好教学和科研工作,努力办成世界一流的研究型大学,培养造就更多更好的创新人才,为夺取全面建设小康社会新胜利、开创中国特色社会主义事业新局面贡献更大力量。

是为序。

2008 年 9 月

前 言

在中国科学技术大学网站上看到母校 50 周年校庆校友文库约稿函,没有在意。科大毕竟是人才济济、成果累累、卧虎藏龙的地方。可是中国科学技术大学出版社来函指名道姓约稿,虽与他们素昧平生,也不好意思拒绝了,就参与申请“中国科学技术大学校友文库”,后获准出版。作者出版了《计算机仿真导论》等 3 本这方面的书和 1 本内部资料,社会反映比较好,得到了专家和读者的认可,作者在该领域做了大量的研究工作,希望写好这本书。“文章千古事,得失寸心知。”虽然达不到“经国大业,不朽盛事”,但也不能做成“官样文章”、“应景文章”。作者对写作还是比较严谨的,对读者还是比较负责的。

中国科学技术大学 50 周年校庆校友文库仿佛是一条时间隧道,将作者带回四十多年前的科大。在科大 6 年,这是众所周知的特殊年代,特别是前两年,科大的校风和学习氛围以及著名的科学家郭沫若、华罗庚、严济慈、钱学森等使我们学会了从事科学研究的方法和做学问的态度,使我们终身受益。记得 641 同学第一次见面会的话题是:“你为什么上科大数学系?”几乎是异口同声:“我们是奔华罗庚来的!”开学第一课是华罗庚讲的,并给我们留下了“怎样让客人尽快喝上茶”的思考题。严济慈给物理系、数学系讲的物理大课,郭沫若在全校大会上声情并茂地朗诵他的诗作,钱学森的现代力学专题讲座等,“不要命的上科大”还历历在目。

家乡的安徽桐城中学和桐城派的影响也不可低估,中学对人的成长

也是很重要的。作者之所以对写作有兴趣,与中学的培养是分不开的。

作者的整体思路是:整合《计算机仿真导论》等3本书,提炼精华,再融进最近两年的最新研究成果。希望本书能有科学性(要以学科专业理论为主,做到内容准确,层次分明,条理清楚,文字精练,举例恰当)、前沿性(虚心吸取当代优秀成果,反映本学科的难点和热点问题,把握国内外理论动态和较为成熟的最新学术成果)、稳定性、系统性和规范性。实际上,《计算机仿真》是《计算机仿真导论》等的增订版或再版。

计算机仿真是一种科学方法,科学研究通常有三种途径:理论推导、科学实验和仿真模拟。本书是结合国内外研究成果撰写的计算机仿真方面的专著,着重论述了仿真的理论基础(应用数学方面的知识)、仿真的技术基础(计算机方面的技术)、计算机仿真对象(即要仿真的对象的相关专业知识),并注重这三者的有机结合;描绘了计算机仿真的整体轮廓,既有理论基础,又有实际应用。其内容涵盖了计算机仿真的主要领域:计算机仿真概论、相似理论、同态理论、分形几何、计算机仿真模型、计算机仿真硬件、计算机仿真软件、计算机仿真应用、虚拟现实技术、计算机仿真发展的展望等。

本书包含了我们单位许多同志的智慧,作者的同事一直是本书创意的源泉,他们的才智和见解是本书成功的关键。本书由何江华、肖无云(博士后、副研)、艾宪芸(博士、副研)、耿娜(博士、助研)、骆景豪(博士、助研、研究室副主任)、梅刚高工、孙茂盛硕士、陈晓雷硕士、左钦文硕士、谢利平硕士、汪海玲硕士、翁京娟工程师等撰写。全书由何江华统稿定稿。参加前期工作的有郭果敢、王德才、胡强、刘平、王良厚、王锋、郑毅、宋立军、郭敦俊、邹士亚、钟鸣、陈聪、范江兵、梁睿、曾琼、肇文丽、张雪芹、李英男、程先友、邱彦强、李兴玮、吴端恭、何粦、刘向军、王逸明、李磊、肖凯涛、姜燕、邹志云、桂新军、丁宇征、李晓军、刘晓霞、田晓涛、苏秀玲、王联华、丁忠杰等。

本书包括了与计算机仿真相关的学会、协会的同行们的聪明才智,在各种学术会议上聆听老前辈的谆谆指导,分享年轻有为同行的创新研究成果。仿真未来,未来是年轻人的。

衷心感谢作者的同事、同行!衷心感谢防化研究院、防化指挥工程

学院、武警警种指挥学院历届领导和机关的大力支持！要感谢的人数以百计，不一一列举，从内心永远感谢他们！

“出版，真是一个伟大的行业。因为出版，我们前后代的智慧才得以传承，同代之间的智慧才得以互通。人类，也才得以真正进化，与其他动物日益有所不同。我不可自己地为出版的魅力与风华而目眩神迷。”（郝明义《工作DNA》）感谢母校，感谢母校出版社。

本书适合于从事计算机仿真研究、开发的工程技术人员和教学人员，以及相关专业的本科生、研究生阅读。

书中有不妥之处，请读者批评指正。

作 者

于北京西北郊石鹰头

2009 年 9 月

目 录

总序	i
前言	iii
第 1 章 计算机仿真综述	1
1.1 计算机仿真发展历史	2
1.2 仿真的定义和分类	7
1.3 仿真的历史与发展现状	9
1.4 仿真计算机	13
1.5 仿真软件	15
1.6 仿真的实现	16
1.7 仿真系统的作用和意义	17
第 2 章 相似理论	19
2.1 相似及其理论发展	19
2.2 相似的概念及类型	21
2.3 相似定理	25
2.4 相似方法	28
2.5 相似理论是科学实验的基础	32
第 3 章 同态理论	35
3.1 同态学是复杂系统的科学	35

3.2 同态学研究对象	37
3.3 数学上同态概念	42
第4章 分形几何	50
4.1 分形几何与经典几何	51
4.2 分形几何概念	53
4.3 分形几何的产生	55
4.4 分形几何的内容	57
4.5 分形几何学的应用	60
4.6 分形的数学描述	62
4.7 分形几何和计算机仿真	69
第5章 矩阵理论	75
5.1 矩阵运算	75
5.2 线性代数方程组	83
5.3 LU 分解	88
5.4 正交变换	91
5.5 正交相似变换和酉相似变换	94
5.6 QR 方法	97
5.7 矩阵的范数	101
5.8 矩阵的条件数	104
5.9 广义逆矩阵	107
5.10 矩阵的奇异值分解	108
第6章 计算机仿真模型	112
6.1 概述	112
6.2 数学模型及分类	116
6.3 系统类型	126
6.4 建模与仿真	128
6.5 实现建模的方法	133

6.6 数学模型变换	137
第 7 章 参数最优化技术	163
7.1 优选法	163
7.2 单变量函数极值问题解法	167
7.3 多变量函数极值问题解法	172
7.4 无条件极值问题解法	183
7.5 条件极值问题解法	189
7.6 变分法	199
7.7 最小(大)值原理	214
7.8 动态规划	219
第 8 章 计算机仿真硬件	226
8.1 仿真计算机	226
8.2 跟踪系统	230
8.3 图像生成系统	232
8.4 音频系统	235
8.5 可视化显示设备	238
8.6 触觉系统	244
8.7 CAVE 沉浸式投影系统	248
第 9 章 计算机仿真软件	251
9.1 概论	251
9.2 仿真程序 CSS	257
9.3 连续事件系统仿真语言 DARE - P	261
9.4 离散事件系统仿真语言 GPSS	267
9.5 其他仿真语言简介	276
第 10 章 计算机仿真应用	286
10.1 军用仿真技术应用	286
10.2 基于微机的三维图形实时成像技术在虚拟仿真中的应用	294

10.3	基于 PC 的虚拟现实演示系统	330
10.4	CAD/CAM 技术在防毒面具研制中的应用	343
10.5	兰彻斯特作战模型	359
10.6	装备仿真与装备战损仿真求解	376
10.7	医学图像的计算机仿真技术应用	395
第 11 章	计算机仿真与虚拟现实	401
11.1	计算机仿真	401
11.2	虚拟现实	404
11.3	计算机仿真与虚拟现实的关系	413
第 12 章	计算机仿真发展的展望	425
12.1	计算机仿真技术的历史回顾	425
12.2	计算机仿真技术的进展	426
12.3	几种计算机仿真技术	435
12.4	计算机仿真发展趋势	437
参考文献		442

第 1 章 计算机仿真综述

据最新的统计资料表明,计算机仿真(Computer Simulation)技术是当前应用最广泛的实用技术之一。

根据国际标准化组织(ISO)标准中的《数据处理词汇》部分的名词解释,“模拟(Simulation)”与“仿真(Emulation)”两词含义分别为:“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”即用另一数据处理系统,主要是用硬件来全部或部分地模仿某一数据处理系统,以至于模仿的系统能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,因此本书所讨论的仿真概念也就这样泛指。

计算机仿真技术综合集成了网络技术、图形图像技术、面向对象技术、多媒体、软件工程、信息处理、自动控制等多个技术领域的知识。

计算机仿真技术是以数学理论、相似原理、信息技术、系统技术及其应用领域有关的专业技术为基础,以计算机和各种物理效应设备为工具,利用系统模型对实际的或设想的系统进行试验研究的一门综合性技术。

计算机仿真技术的应用不仅仅限于产品或系统生产集成后的性能测试试验,仿真技术已扩大为可应用于产品型号研制的全过程,包括方案论证、战术技术指标论证、设计分析、生产制造、试验、维护、训练等各个阶段,也应用于由多个系统综合构成的复杂系统。

1.1 计算机仿真发展历史

1.1.1 蒙特卡罗方法

仿真又称作蒙特卡罗方法,它是一种通过用随机数做实验来求解随机问题的技术。这种方法最早可以追溯到 1773 年法国自然学家 G. L. L. Buffon 为了估计 π 的值所进行的物理实验。然而,第一个利用这种方法做随机数实验的人是美国统计学家 E. L. De Forest,那是在 1876 年。比较早而且著名的蒙特卡罗方法使用者是 W. S. Gosset。他在 1908 年以“Student”为笔名发表论文时,使用了蒙特卡罗方法来证明他的 t 分布法;在这之前已经由“theory”发展了 t 分布法,当然还不是十分精确。尽管蒙特卡罗方法起源于 1876 年,但是直到约 75 年之后 S. Ulam 和 J. Von Neumann 才将它命名为蒙特卡罗方法。为什么这么多年过去了它才被命名呢?其原因是直到数字计算机出现之前,这种方法在许多重要问题上都不能被加以利用。从 1946 年到 1952 年间,数字计算机在一些科研机构得到发展。这些研究机构有:宾夕法尼亚大学、麻省理工学院、国家标准局和国际商用机器公司。现代化的具有程序储存功能的计算机使冗长的计算成为可能,而这种计算正是蒙特卡罗方法所要求的。

1.1.2 计算机性能越来越高

与今天的计算机相比,早期的计算机运算速度慢而且几乎不能储存任何东西。比如,在 20 世纪 60 年代初期,利用计算机进行算术运算,每秒钟少于 1 万次,在 60 年代中期达到约 50 万次,到 70 年代初期达到 2000 万次,而如今的超级计算机每秒钟进行同样的计算可超过百万亿次(2007 年 11 月的最新数字是 478.2 万亿次)。自计算机诞生以来,性能的提高几乎是以每四五年提高 100 倍,每 10 年提高 1 万倍的速度持续发展着。

20 世纪 90 年代初,向量并行是主流。世界第一台亿次高性能计算机是美国的向量计算机 CRAY-1。中国在 80 年代初期由国防科学技术大学研制成功了双向量阵列的向量计算机 YH-1,是我国首台亿次高性能计算机。其后,多处理机并行处理开始起步,处理机的数目达到 4~8 个,美国 Cray 公司的紧耦合共享存储并行向量计算机 CRAY-XMP 成为典型代表。我国在 80 年代末研制成功了并行向量计算机 YH-2,应用于数值天气预报领域。

90 年代开始,大规模并行处理开始发展并逐渐成为主流,采用商用微处理器技术,处理器的数目达到 1000 量级。典型的大规模计算机系统如美国 Thinking Machine 公司的 CM-5 采用 SPARC 微处理器,处理器数目超过 1000。我国在 90 年代中期开始大规模并行计算机系统的研制,典型的有曙光 1000 并行计算机、神威 I 大规模并行计算机、银河-III 可扩展并行计算机。1996 年美国的 ASIC RED 大规模并行计算机突破了万亿次计算;2000 年我国研制成功万亿次计算机。

90 年代后期,集群技术逐渐成为主流,遵循大规模的并行技术路线,基于商用微处理器和互联技术,集群系统快速发展,到 2006 年 6 月,最大规模的集群系统 Dell 公司构建的 ThunderBird,处理器数目达到 9000 余个,系统 Linpack 测试性能达到 39 TFLOPS。我国的集群系统也在快速发展,曙光、联想等公司开发了达到国际先进水平的集群系统。2004 年曙光 4000A 集群系统突破 10 万亿次峰值运算,位列 TOP500 第十名。2003 年日本研制了采用定制向量处理器技术的大规模并行向量计算机“地球模拟器”,该机器连续两年位居 TOP500 首位,标志着定制技术路线开始在高端高性能计算机研制中崛起。其后美国 IBM 公司采用定制通用微处理器研制的 BlueGene/L(蓝色基因/L),突破了百万亿次计算。到 2006 年 6 月,IBM BlueGene/L 的 Linpack 测试性能最高,达到 280TFLOPS,而且 TOP500 的前 3 名都是不同规模的 BlueGene/L。

美国能源部劳伦斯·伯克利国家实验室 2004 年 6 月 21 日公布的全球超级计算机 500 强名单,中国曙光计算机公司研制的超级计算机“曙光 4000A”排名第十。这是中国超级计算机首次跻身世界十强,见图 1.1。

曙光公司为上海超级计算中心研制的“曙光 4000A”,采用了美国芯片制造商 AMD 制造的 2 560 枚芯片,运算速度可达每秒 8.061 万亿次。这是



图 1.1 上海超级计算中心的“曙光 4000A”2004 年入围全球超级计算机十强

此次 500 强排名中唯一跻身前十名的非美国和日本研发的超级计算机。

这次 500 强排名中,日本 NEC 公司为日本地球模拟中心制造的超级计算机“地球模拟器”仍居首位,其运算速度为每秒 35.86 万亿次,这已是它连续三年蝉联冠军。在前十名中,美国继续占据绝对优势,除了排名第一和第七的两台日本超级计算机和排名第十的中国超级计算机外,其余全部为美国产品。

据新华社 2007 年 7 月 5 日电,在新揭晓的全球超级计算机 500 强排行榜上,日本制造的超级计算机 8 年多来首次跌出前 10 名,由美国制造、部署在美国和欧洲的超级计算机垄断了前 10 名。

据日本《读卖新闻》网站 2007 年 7 月 4 日报道,日本制造的超级计算机从 1999 年起一直在全球超级计算机前 10 强中榜上有名。从 2002 年 6 月起,日本产的“地球模拟器”曾连续两年半在全球超级计算机排行榜上占据首位。但是在 2007 年 6 月底公布的全球超级计算机最新排名中,日本目前速度最快的超级计算机“燕”仅列第 14 名,曾经辉煌一时的“地球模拟器”已跌至第 20 名。

2007 年全球超级计算机十强榜:

① 安置在美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室的“蓝色基因/L”,研制者为美国 IBM 公司,浮点运算速度为每秒 280.6 万亿次;② 安置在美国橡树岭国家实验室的“美洲虎”,研制者为美国克雷公司,浮点运算速度为每秒 101.7 万亿次;③ 安置在美国桑迪亚国家实验室的“红色风暴”,研制者为克雷公司,浮点运算速度为每秒 101.4 万亿次;④ 安置在美国 IBM 公司托马斯·沃森研究中心的“BGW”,研制者为 IBM 公司;⑤ 安置在美国纽约计算科学中心的“纽约蓝”,研制者为 IBM 公司;⑥ 安置在美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室的“ASCPurple”,研制者为 IBM 公司;⑦ 安置在美国伦塞勒理工学院纳米技术