



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

教育部面向21世纪信息管理与信息系统系列教材

Modeling
and Simulation
of Complex Systems

复杂系统建模与仿真


(第二版)

方美琪 张树人 / 编著


 中国人民大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

教育部面向21世纪信息管理与信息系统系列教材



Modeling
and Simulation
of Complex Systems



复杂系统建模与仿真

(第二版)

中国人民大学出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

复杂系统建模与仿真/方美琪, 张树人编著. —2 版. —北京: 中国人民大学出版社, 2011. 5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 教育部面向 21 世纪信息管理与信息系统系列教材

ISBN 978-7-300-13696-7

I. ①复… II. ①方…②张… III. ①系统建模-高等学校-教材 IV. ①N945. 12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 080282 号

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
教育部面向 21 世纪信息管理与信息系统系列教材

复杂系统建模与仿真 (第二版)

方美琪 张树人 编著

Fuza Xitong Jianmo yu Fangzhen

出版发行	中国人民大学出版社	邮政编码	100080
社 址	北京中关村大街 31 号		
电 话	010-62511242 (总编室)		010-62511398 (质管部)
	010-82501766 (邮购部)		010-62514148 (门市部)
	010-62515195 (发行公司)		010-62515275 (盗版举报)
网 址	http://www.crup.com.cn		
	http://www.ttrnet.com (人大教研网)		
经 销	新华书店	版 次	2005 年 9 月第 1 版
印 刷	北京昌联印刷有限公司		2011 年 5 月第 2 版
规 格	170 mm×228 mm 16 开本	印 次	2011 年 5 月第 1 次印刷
印 张	35.75 插页 1	定 价	52.00 元
字 数	547 000		

版权所有 侵权必究

印装差错 负责调换

总 序

自 1997 年教育部调整专业目录以来，新组成的“信息管理与信息系统”专业得到了非常迅速的发展。据统计，设置这个专业的高等学校已经接近 500 所。随着信息化建设的进一步深化，社会各界对于信息管理人才的需求越来越多，要求越来越高。特别是电子商务和电子政务的兴起、物流管理的发展以及首席信息官（CIO）的出现，使得这种需求的增长趋势更为引人注目。这表明，“信息管理与信息系统”作为管理科学的一个重要分支，不但没有由于某些泡沫的破灭而销声匿迹，而且还健康地、稳步地、越来越快地向前发展。培养这方面的专业人才已经成为信息时代不可缺少的一个重要方面。

当初由 5 个分别来自工学、管理学等不同门类的学科，组成“信息管理与信息系统”这个新学科的时候，曾有不少同志对之表示过疑虑：这些背景不同、来源不同的学科能够形成一个有确定内涵、有统一培养目标和学科体系的新学科吗？几年来的事实已经给出了肯定的回答。信息化建设的实践已经表明，信息技术的巨大潜力只有同各行各业的具体业务紧密地、有机地结合在一起，才能充分地发挥出来。它与商业，特别是营销活动的有机结合，派生出了越来越广泛的电子商务；它与政府工作的具体实际相结合，引出了方兴未艾的电子政务，如此等等。现代信息技术这支“利箭”，必须切实瞄准各行各业的业务需求这个“的”，做到“有的放矢”，才能真正发挥作用。现代信息技术造就了“利箭”本身，但是并没有回答如何做到“有的放矢”的问题。正因为如此，近 20 年来，许多学校苦于没有合适的教材，而只是简单地用计算机专业的部分教材，加上管理专业的若干教材，形成了所谓“拼盘式”的教学方案，并没有实现交叉与融合的初衷。出现这种情况的原因，在于我们对信息管理的内涵与实质还没有深入理解。简单地把“矢”和“的”罗列出来，还没有达到“有的放矢”的高度。要做到“有的放矢”，必须认真

地研究和认识人们做事的规律。这就是美国著名学者赫伯特·西蒙提倡的“关于人为事物的科学”，也正是我国著名学者许国志先生提倡的“事理学”。具体到教材来说，要求我们针对“有的放矢”的要求，编写具有本专业特色的，真正能够回答如何做到“有的放矢”的教材。这种教材的立足点在于如何在各行各业用好信息技术，而不是信息技术本身，与介绍“矢”本身的教材是有根本区别的。这就是我们组织编写这套教材的出发点。

从 20 多年的实践中，我们深深地体会到信息管理与信息系统这个新专业具有的特点：综合性、实践性、新颖性。从传统的学科分类体系看，这个专业确实有点“不三不四，非驴非马”，然而这正是它的特色与生命力所在。它在实践中的发展非常迅速，以致人们常常困惑于新名词、新概念的层出不穷，然而，这也正是它与社会实践相互促进、相互影响的具体表现。当今时代（包括技术与社会）确实变化太快，理论研究与学科建设不得不追着实践跑步前进。这也许可以为这 20 多年来一直困扰着这个专业的种种议论和非议，找到一点根源和缘由。

当然，这并不等于为理论研究的不足找借口，也不等于这个专业根本就没有理论，或者不需要理论思维。恰恰相反，实践的源头活水为人类深入认识和掌握“事理学”的规律提供了持续不断的推动力和取之不尽的营养和素材。我们相信，以信息化建设的伟大实践为背景和基础，信息管理与信息系统这个专业一定会继续迅速健康地成长，逐步走向成熟和完善，最终成为人类知识宝库中一个有机的、不可缺少的一部分。

基于上述认识，我们对于“信息管理与信息系统”专业教材的理解，就和一般的专业有所不同。在内容的选择上，我们把视野放得比较宽。作为综合性、交叉性、实践性非常突出的一个学科，开阔学生的眼界是非常重要的。我们的信条是：“不是给学生金条，而是给学生点金的手指；不是给学生将来要用的具体知识，而是为学生终身的主动学习打好基础。”具体地说，对于现代信息技术的各个领域，让学生对将来可能用到的“利箭”有广泛的了解；对于当今社会应用信息技术比较广泛的各个领域，让学生对于目标，即“的”有所了解和准备；对于科学的认识论和方法论，是为学生如何做到“有的放矢”做准备的。因此，我们考虑了从计算机、通信等基本技术到信息安全、数据挖掘等一系列课程。其次，我们考虑了企业的信息管理、电子商务、电

子政务以及物流管理等方面的内容。再次，主要是系统科学的内容。简单地说，就是这三个方面构成了我们这个学科的三大支柱。

与此相关，本套教材的另一个特殊的地方就是它的使用方法。我们绝不是认为任何一个学校的“信息管理与信息系统”专业，包括我们自己学校的这一专业，都必须开设这里列出的所有课程。我们认为，各学校必须根据自己的具体情况和环境，有重点、有选择地设计符合自己学校的教学计划。教育是实事求是的、需要因势利导的艺术。教条和僵化与培养创新型人才是水火不相容的。我们希望尽可能地为各位老师，提供充分的选择余地，而不是设置新的条条框框。

另外，需要说明的是有关教学方法。从前面的说明很自然地引出，我们的教学方法必须简明扼要、突出实践。每门课程的时间短一些，开设的课程多一些，少讲一点，多练一点。所谓突出实践，包括两个方面，直接联系社会实践，充分利用实验条件。在有条件的课程和章节，尽可能地为创造直接接触和了解最新的社会实践的机会。同时，大力建设实验室，为学生动手提供现代技术（包括教育技术）支持的平台和环境。关于这方面，我们正在准备另外一套课程和教材。

总之，这个学科是相当年轻的，相当不成熟的。我们编写这套教材，并不是表明我们已经有了完全成熟的想法，而是为了总结已有的认识，与同行共勉和交流，共同推动这个学科的发展。因此，我们真诚地期待着同行和社会各界的批评意见，因为，只有通过集思广益、互相切磋，才能逐步形成比较成熟的、新的学科体系，这是人类认识发展的规律，也是任何新学科成长的必由之路。

中国人民大学 信息学院

陈禹

2005年5月29日 于北京

前 言

在 15 世纪前的整个漫长的历史时期中，人类的认识思维基本上是一种无分析的整体性、综合性的模糊思维。当时，科学是综合性的学问，它把自然、社会、人自身的知识统统包容于哲学母体中，真正独立的自然科学还没有形成。伽利略和牛顿开创了近代科学，笛卡儿发展了一种从“自明性”的原理出发进行演绎的方法，以及把研究课题分得越来越细的分析方法，人类进入了科学发展史上的一个新时代——“还原论时代”。近代自然科学正是以追求精确、清晰、周密的“拆零实验”式的还原分析方法为基础的。这种还原分析方法大大提高了人类的认识水平，使人类对自然界的认识达到了空前的广度、深度和精度。

然而，随着科学的不断发展和科学研究的不断深入，人们的认识逐步向宇观、宏观、微观、渺观等各个领域迅速扩展，随着认识对象的日趋复杂化，这种还原分析方法就越来越暴露出其局限性。其一，这种“拆零实验”的分析方法固然可以使科学研究不断深化，但是，它把整体肢解为部分，忽略并割裂了事物之间的固有联系，使理论无法全面地、系统地反映事物的整体性。其二，在这种方法基础上形成的理论，基本上属于一种静态的理论，仅是对现有事物及其运动的说明，很难对事物未来的发展变化做出科学的预测和解释。其三，还原分析方法对精确的严格追求与认识对象的复杂性产生了难以调和的矛盾。认识研究对象的数量之大、层次之繁、结构之复杂、因素之众多日益呈现出前所未有的局面，同时认识对象还出现了大量的不确定性因素，如隶属的不确定性、外延的不清晰性、内部信息的不完全性、内涵的不确定性、关系的不明确性等。在以精确为目标的探索中，人们认为自己正在逼近客观世界时，实际上却越来越远地背离了客观世界。复杂性与精确性的矛盾日益尖锐，科学的发展面临着严重危机，人们亟须寻找新的认识方式。

到 20 世纪中叶，这种发展模式已达到了顶峰，出现了科学重新统一的历史需要。各分支学科在自己的对象领域的中心部分充分研究之后，必然要向与其他学科接壤的边缘地段拓展，导致边缘科学、交叉科学和横断科学纷纷出现。原本分明的学科界限模糊了，不同领域相互过渡的道路打通了，科学逐渐演变为一个在任何一处都没有鸿沟的整体。现代社会日趋大型化、复杂化，出现了大工业、大农业、大经济、大军事、大政治、大科学、大教育、大文化等。任何一个大型复杂问题的解决都不能由某一学科单独完成，必须综合应用多学科知识，进行跨学科研究。跨学科研究促使不同学科在更深层次上交叉和沟通，系统科学的分支学科几乎都是这种跨学科研究的产物。大型化、复杂化的突出后果是使社会生活的各方面都离不开大规模的规划、组织、协调，必须有相应的科学理论和技术方法。当然，应当明确的是，科学重新统一并非取消学科划分，回到古代科学的状况，而是分支化继续存在，新的学科继续产生；科学重新统一指的是各门类学科的知识表示形式上的规范化，能纳入统一的逻辑体系，根据哥德尔不完备性定理，一个逻辑体系不可能既是完备的，又是无矛盾的，科学应当追求的是一个无矛盾的、逻辑自恰的、非完备的统一体系，这个体系有着清晰规定的边界和开放的问题定义。

正是由于人类对于知识明晰性和完整性的渴望，目前不同学科的相互沟通、交叉、渗透和综合成为一种主要趋势，新学科大多是综合性科学。重新统一的科学作为一种系统，要求有一种能把现有纵向划分的学科沟通连缀起来的横断学科，提供不同学科都使用的概念、原理和方法，使科学在整体上具有纵横交错的网络结构。系统科学就是这种横断科学，它的科学使命是使新型科学成为一个按多维网络结构组织起来的复杂巨系统，是一种新型跨学科的学问。

同时，在人类文明已经跨入 21 世纪之际，全面提高民众的科学文化素质，培养兼通文理、善于综合掌握和创造性运用信息和知识的跨学科人才，也成为激烈的国际性竞争的焦点。正是在这样的时代背景下，中国人民大学经济科学实验室一直坚持交叉学科的综合研究，注重对国外研究前沿中出现的新思潮、新方法的跟踪与引介，特别关注系统科学与复杂理论在经济学和社会科学中的应用这一新兴领域的前沿研究。

在不断变化的科学世界里，新的研究手段常常导致重大的发现，从而戏

剧性地转变我们的认识。20 世纪最伟大的发明——计算机便是这样一种新手段。但是，在复杂自适应系统与基于复杂自适应系统的多主体仿真建模这门新学科之前，除工程管理领域外，计算机在社会科学中的应用大多还停留在作为一种记录文档、统计数字的辅助工具，而不能像在自然科学或工程技术领域内一样为社会科学提供一种新的研究手段。然而，随着复杂性科学的兴起，越来越多的社会科学研究者逐渐发现计算机仿真是理解复杂的社会—经济系统动态过程的优良手段。于是自 20 世纪 90 年代以来，国外社会科学界开展了复杂系统理论与计算机仿真建模相结合的广泛深入的研究，并明显呈现出越来越深远广泛的发展前景。然而，相应的研究在国内社会科学界却没有引起应有的重视。一些高等院校或机构虽然对国外的这场复杂性科学运动有所认识，但由于学科设置存在的问题以及缺乏基本的自然科学素养等原因，进行的一些相关研究多是概念描述性、综述介绍性的，真正能够自觉以复杂性理论为指导，用来解决现实社会问题的研究则比较薄弱。而且因为缺乏研究规范，相关的模拟实验的过程无法重现论证，缺乏共同沟通的基础，从而无法有效交流和获得更多社会科学界同仁的认可。此外，由于计算机仿真是一个相当新的研究领域，众多的社会科学界研究同仁们在试图进入时常面临着学科分割造成的技术鸿沟。在国内的学术交流中，我们作为最早引入计算机复杂性仿真研究的科研教学机构，经常接到一些兄弟院校科研机构的咨询；在国际交流中，我们发现一些国家主要以短期研讨班和教学培训的方式，推动不同学科的研究人员掌握这一全新的研究方法；正是这些发现促使我们撰写这样一本教材。因此，我们把本教材的宗旨定位于：面向国内有志于社会科学交叉研究的学生和教师们介绍复杂性科学在社会科学研究中的实际应用。本书先介绍复杂性科学的理念和背景，总结计算机模型研究方法在社会科学中的地位 and 作用；然后通过一些成功的典型案例，介绍用计算机仿真的方法进行社会科学复杂性研究的有效性；最后，结合本实验室的研究，分章节介绍一些通用的计算机模型方法和相应的模拟软件工具。

所有的研究都需要具备丰富的理论知识和复杂的方法技巧，对社会科学仿真研究来说尤其如此，因为这是一个相当新的研究领域，没有多少可资借鉴的经验，但存在很多的仿真方法要加以选择。此外，进入这个领域还需要一些额外的使用计算机的能力（现在所有的仿真都在计算机中运行）。本书的

前半部分没有涉及编程方面的知识，后半部分和附录部分介绍了一些常见的建模仿真软件，要求读者具备入门级的编程水平，因此本书适合于有初步计算机应用基础和计算机程序概念的社科类高年级本科生或研究生，或对社会科学有兴趣、有志于从事交叉学科研究、有理工科背景的第二学位教育，或作为跨学科的研究生教育进行教学的基础课程教材，也可供勇于更新知识的社会科学研究者们自学与研究参考。在课程设置上，根据不同的学科，本课程的先行课程可以有高等数学或经济数学、数理统计、社会科学研究方法论、数学模型、运筹学以及计算机程序设计等。

本书的第一、五、七、八章由方美琪编写，第二、三、四、六章由张树人编写。书中内容综合了作者最近几年的教学讲义。在全书编写过程中，作者还参考了大量国内外相关的研究报告和实验室多年来的研究积累（包括已经发表的论文、作为学位论文或工作报告存档的资料等），这些都附在章后引文出处中。因为来源众多，这里不一一言谢，但没有前人的研究成果和集体的共同努力，是不可能形成这样一本教材的。我们编写这本教材的目的，也是为了传承薪火，引介新知。

对于这样一门新兴的交叉学科，其跨越的学科和应用是如此广泛，国内相关的资料又是如此稀少，因此，对我们而言，编写这样一本教材性质的书籍是很有挑战性的，但由于作者学识有限，疏漏不妥之处在所难免，恳请同行和广大读者不吝赐教。

方美琪

中国人民大学经济科学实验室

目 录

第一章 引论	1
第一节 计算机建模方法导论	3
第二节 计算机建模兴起的时代背景	11
第三节 计算机建模方法的基础理论	19
关键词	30
习题与思考	30
延伸阅读	31
第二章 基于多主体系统的计算机模型	33
第一节 多主体系统及建模	35
第二节 作为方法论的多主体建模	43
第三节 多主体建模的一般流程	53
第四节 多主体建模的设计准则和适用范围	60
关键词	69
习题与思考	69
参考文献	69
延伸阅读	71
第三章 基于主体的计算经济学	75
第一节 超越新古典经济学	77
第二节 ACE 的理论框架	87
第三节 ACE 的研究范畴	99
第四节 ACE 研究的共性与一般过程	109
关键词	114
习题与思考	114

参考文献	114
延伸阅读	116
第四章 多主体建模的软件工具	123
第一节 多主体建模软件综述	125
第二节 Swarm	135
第三节 Repast	154
第四节 Ascape	207
第五节 软件的选取与比较	220
关键词	232
习题与思考	232
第五章 Swarm 多主体模型实例	233
第一节 阿克洛夫模型	235
第二节 ASPEN 的 Swarm 模型	248
第三节 国会山保姆公司模型	258
第四节 SARS 的爆发和控制机制模拟	261
关键词	272
习题与思考	272
参考文献	272
延伸阅读	273
第六章 Repast 多主体模型实例	277
第一节 一步步学 Repast 实例模型	279
第二节 行为金融学模型	297
第三节 企业间网络模型	320
第四节 网商生态系统模型	335
关键词	360
习题与思考	360
延伸阅读	360
第七章 进化模型	367
第一节 人工神经网络	369
第二节 遗传算法	374

第三节 分类器系统	391
关键词	408
习题与思考	409
参考文献	409
第八章 系统动力学与 DYNAMO 语言	411
第一节 系统动力学概述	413
第二节 DYNAMO 语言	432
第三节 模型实例	454
关键词	484
习题与思考	484
延伸阅读	484
附录 A 计算实验室平台——TNG Lab	491
一、安装	493
二、体系结构	493
三、特征	501
四、用户界面	503
附录 B 一个简单易学的 MAS 仿真工具——StarLogo	509
一、建模步骤	511
二、语言参考手册	522

第一章



引 论

复杂系统由若干元素组成，元素间互相作用从而产生了整个系统的行为特征，由于系统的行为特征不等价于组成元素个体行为特征线性叠加之和，所以无法用传统的数量方程或回归统计进行线性分析。随着计算机计算能力的提高，人们发现可以把复杂系统中各个因素之间的非线性关系转化为可执行的程序，以模型程序自动运行的方式推演模拟系统，从而能以简化换时间的方式对那些实际中需要长时间演化的系统进行动态仿真。这就是计算机建模方法。计算机建模方法目前成为研究动态复杂系统的有效手段，在越来越广泛的学科领域内获得应用。本书第一章的任务就是对计算机模型方法做一个整体的说明。

第一节 计算机建模方法导论

人类认识世界的过程，就是不断地建立世界模型的过程，所有的描述世界的知识，都是在对世界建模。随着人类文明的不断发展，人类对世界的视角也越来越朝着更广泛、更深入、更细致和更具体的方向演化，整体上增加了认识对象的复杂度。作为描述世界图像的模型，也由非常原始的静态抽象模型，发展为逻辑公理体系表征的理论模型，或高度抽象和形式化的数理模型，再到目前的各种计算机程序表征的动态模型。本节以模型和人类认识发展之间的关系为线索，简要回顾人类历史上的各种模型形态、建立模型的各种动机，最后重点介绍计算机建模方法，并介绍研究方法适合的研究领域和特点。

一、模型与认识

建立模型是人类认识世界的基本方法，模型是对认识对象所做的一种简化描述，是对原型进行模拟所形成的特定样态。我们可以为模型构造一个等式：

$$\text{模型} = \begin{matrix} \text{概念模式} \\ \text{(含公共知识)} \end{matrix} + \begin{matrix} \text{个体} \\ \text{观察} \end{matrix} + \begin{matrix} \text{抽取} \\ \text{和筛选} \end{matrix} + \text{架构} + \text{修订}$$

在上述等式中，所谓公共知识是构建模型时具有的预设知识，它确保模型可以在一定范围内进行讨论和传播，并给予模型一定的理论基础。个体观察是建模者根据公共知识以及个人的概念模式对模型对象操作的行为，强调信息收集。抽取和筛选是根据建模的目的、观测的数据、建模的手段等对信息进行分析的过程，强调寻找主要指标刻画模型以及建立可行的计划。架构是建模者具体化模型的过程，完成从现实观测到模型空间的选择性映射。修订是将模型运行提供的结果与实际系统进行比较，调整模型参数、结构、功能的过程，以使模型在建模者目的的指导下接近现实系统。

模型是对现实系统有关结构信息和行为的某种形式的描述。它是真实对象和真实关系中那些令人感兴趣的特性的抽象与简化。模型的建立不是“原型的重复”，而是按研究目的的实际需要和侧重面，寻找一个便于进行系统研

究的“替身”。不同的人由于研究的目标不同，就会对某些方面做出不同的简化。人们之所以可以用模型来模仿原系统，是因为各种系统有一定的相似性、同形性。虽然很多系统的组成元素不同，其组成元素的微观结构不同，但通过一定的组织表现出几乎同样的行为。例如，细菌的繁殖、化学元素的衰变、人口的增长、科学书籍种类的增加、银行中本息总额的增加，都符合幂律，又称为齐普夫律（Zipf Law）。

在原型系统及模型之间存在着“反馈”的关系，根据对原型系统规律的认识，可以建立模型。而建立模型进行实验的过程又可发现一些新的规律，由此预测未来或丰富对原型系统的认识。图 1—1 表示模型与原型在认识过程中的关系。

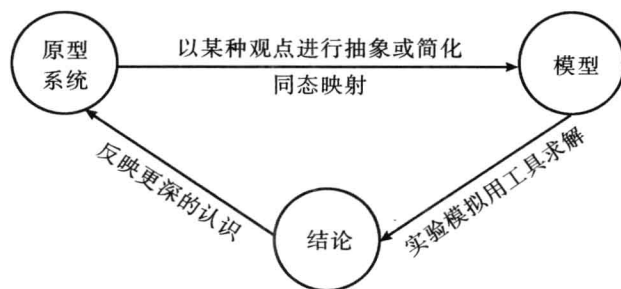


图 1—1 模型与原型

原型系统有时简称为系统。模型一般比原型系统要简单，建模的过程是对原型系统简化的过程。简化的初衷是，根据系统性质的重要性寻找典型性指标，降低观测、计算和分析成本，在可计算能力的范围内得到关于系统的近似逼近。

人类对世界的探索过程，就是建立各种模型表示的过程。人类知识积累的过程，也是修正和具体化各种形态的模型的过程。描述事物静态结构的模型称为静态模型，描述事物发生、发展、演化过程的模型称为动态模型。在远古时代，各种文明中就存在着许多不同的宇宙创生故事。如基督教的上帝七天创世说，印度的湿婆之舞，中国的道生一、一生二、二生三、三生万物说等，这些都是事物的动态模型表述。从地心学到日心学，从天圆地方的盖天说到张衡的浑天仪、地动仪，人类对于世界的认识也随着认知模型的革新而不断深化。历史地看，模型形态的变化也有一个逐渐从简单到复杂的发展