



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

计算机仿真

■ *computer
simulation*

郭齐胜 徐享忠 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等教育“十一五”国

计算机仿真

郭齐胜 徐享忠 主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书旨在比较全面、系统地介绍计算机仿真的主要内容和动态,分为仿真基础、仿真技术和仿真应用三个层次。仿真基础篇论述系统、模型、仿真、仿真科学与技术学科等基本概念。仿真技术篇包括定量仿真(含数学仿真和数学—物理仿真)和定性仿真,其中,数学仿真又分为面向过程仿真(含连续系统仿真、采样控制系统仿真、离散事件系统仿真)、面向对象建模与仿真、面向 Agent 仿真以及并行仿真,数学—物理仿真又分为半实物仿真、先进分布仿真。仿真应用篇包括仿真的可信度、计算机仿真试验设计与数据分析。

本书可作为计算机应用等专业本科生和相关专业硕士研究生的教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员自学和参考。

图书在版编目(CIP)数据

计算机仿真/郭齐胜,徐享忠主编. —北京:国防工业出版社,2011.6

ISBN 978-7-118-07265-5

I. ①计... II. ①郭... ②徐... III. ①计算机仿真 IV. ①TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 060970 号



开本 787 × 1092 1/16 印张 21 1/2 字数 492 千字

2011 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 45.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

编委会

主 编 郭齐胜 徐享忠

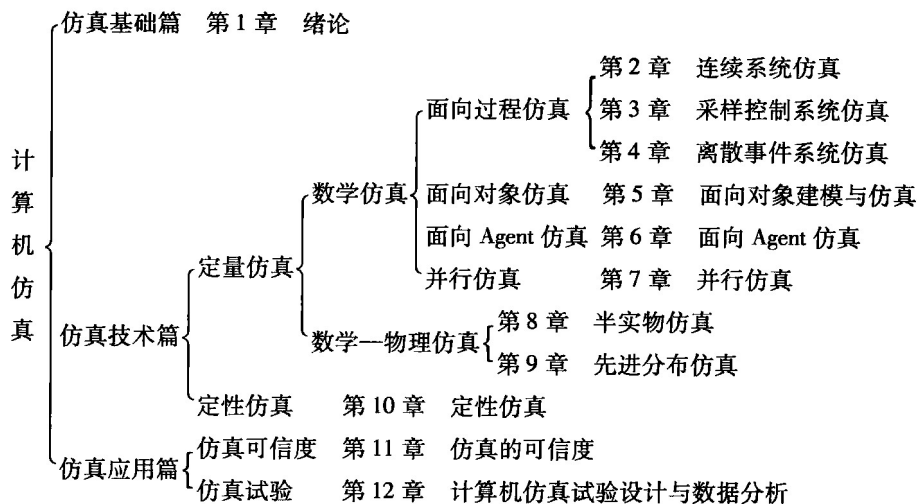
副主编 董志明 张 伟

编写人员 (按姓氏笔画排序)

李 雄	李巧丽	杨学会	宋敬华
张 伟	单家元	赵定海	徐享忠
徐豪华	郭齐胜	黄一斌	曹军海
董志明	韩安媛	谭亚新	穆 歌

前 言

计算机仿真已成为科学研究的一种重要的有效手段。本书是在《系统仿真》(郭齐胜等编著,国防工业出版社,2006年8月)的基础上,结合编者的最新科学研究与教学改革成果,经完善和增加内容(如仿真科学与技术学科、并行仿真、面向 Agent 仿真、蒙特卡洛法)编写而成,旨在比较全面、系统地介绍计算机仿真的主要内容和动态。全书的体系结构如下:



本书可作为计算机应用等专业本科生和相关专业硕士研究生的教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员自学和参考。为便于教学或自学,每章附有习题与思考题;考虑到计算机仿真是一门理论性和实践性都很强的学科,书末附有拉普拉斯变换和 Z 变换、常用仿真工具与仿真语言、连续系统仿真实验、离散事件系统仿真实验。

本书部分内容得到了总装备部“1153”人才工程专项经费资助;在编写过程中,参阅了大量著作和文献,吸收了同行们辛勤劳动的成果,在此一并表示感谢。

因水平所限,不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

郭齐胜
2010年6月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 系统	1
1.2.1 系统的定义	1
1.2.2 系统的特性	2
1.2.3 系统的分类	3
1.3 模型	4
1.3.1 模型的定义	4
1.3.2 模型的分类	5
1.3.3 系统模型	8
1.4 仿真	9
1.4.1 仿真的定义	9
1.4.2 仿真的过程	9
1.4.3 仿真的分类	11
1.5 仿真系统	13
1.6 仿真技术	14
1.6.1 仿真技术的特点	14
1.6.2 仿真技术的应用	14
1.7 仿真科学与技术学科	16
1.7.1 仿真科学与技术学科的产生	16
1.7.2 仿真科学技术的定义和内涵	16
1.7.3 仿真科学与技术学科的理论体系	17
1.7.4 仿真科学技术的学科体系	22
习题与思考题	23
参考文献	23
第2章 连续系统仿真	25
2.1 引言	25
2.2 常用的数学模型	25
2.2.1 面向方程的模型	25
2.2.2 面向结构图的模型	26
2.3 常用的仿真算法	29
2.3.1 概述	29

2.3.2	数值积分法	29
2.3.3	离散相似法	42
2.3.4	快速数字仿真算法	50
2.3.5	仿真算法的几个问题	52
2.4	面向方程的仿真	55
2.4.1	系统的数学模型	55
2.4.2	系统的仿真模型	55
2.4.3	仿真程序的开发	56
2.5	面向结构图的仿真	56
2.5.1	系统的数学模型	56
2.5.2	系统的仿真模型	56
2.5.3	编程技巧问题	57
	习题与思考题	60
	参考文献	60
第3章	采样控制系统仿真	61
3.1	引言	61
3.1.1	采样控制系统的组成	61
3.1.2	采样控制系统的特点	61
3.1.3	采样控制系统的仿真方法	62
3.2	采样控制系统仿真的一般方法	62
3.2.1	$T = T_s$ 仿真法	62
3.2.2	$T = T_s/M$ 仿真法	64
3.2.3	数字控制器采样周期的调整与 Z 传递函数的修正	66
3.2.4	纯延迟环节的仿真	67
3.3	采样控制系统仿真示例	68
	习题与思考题	70
	参考文献	72
第4章	离散事件系统仿真	73
4.1	引言	73
4.1.1	离散事件系统仿真的基本概念	74
4.1.2	离散事件系统建模结构	77
4.1.3	离散事件系统仿真的一般步骤	78
4.2	离散事件系统的仿真策略	79
4.2.1	事件调度法	79
4.2.2	活动扫描法	81
4.2.3	三段扫描法	82
4.2.4	进程交互法	83
4.2.5	四种仿真策略的比较	85

4.3 蒙特卡罗法	86
4.3.1 基本思想	86
4.3.2 随机数的产生与检验	86
4.3.3 随机事件模拟	89
4.3.4 效率指标和模拟精度	91
4.3.5 基本步骤	93
4.3.6 基本特点	94
4.4 离散事件系统仿真举例——机器修理车间仿真	94
4.4.1 问题描述	94
4.4.2 模型建立	95
4.4.3 仿真结果	97
习题与思考题	98
参考文献	100
第5章 面向对象建模与仿真	101
5.1 引言	101
5.1.1 面向对象技术的发展历程	101
5.1.2 面向对象的概念与特征	102
5.1.3 面向对象分析	104
5.1.4 面向对象设计	105
5.2 面向对象建模	105
5.2.1 面向对象建模技术	106
5.2.2 面向对象建模的一般过程	108
5.3 面向对象仿真	110
5.3.1 面向对象仿真技术	110
5.3.2 面向对象仿真的优点	113
5.3.3 面向对象仿真的基本内容	114
5.3.4 面向对象仿真软件	117
5.4 面向对象建模与仿真实例——战场环境建模与仿真	117
5.4.1 系统需求分析	118
5.4.2 面向对象分析	118
5.4.3 面向对象设计	120
5.5 小结	123
5.5.1 综合运用多种方法	123
5.5.2 从 OOA 过渡到 OOD	123
5.5.3 提高软件的重用性和可扩充性	123
习题与思考题	123
参考文献	124
第6章 面向 Agent 仿真	125
6.1 引言	125

6.2	Agent 基础	126
6.2.1	Agent 的概念	126
6.2.2	Agent 的分类	129
6.2.3	Agent 的结构	133
6.3	面向 Agent 仿真框架	135
6.3.1	面向 Agent 仿真过程	135
6.3.2	面向 Agent 仿真的重点内容	143
6.3.3	面向 Agent 仿真的主要优势	151
6.4	面向 Agent 仿真应用	152
6.4.1	面向 Agent 仿真应用概述	152
6.4.2	面向 Agent 仿真应用案例	153
	习题与思考题	164
	参考文献	164
第 7 章	并行仿真	166
7.1	引言	166
7.1.1	并行仿真的产生	166
7.1.2	并行仿真的概念	166
7.1.3	并行仿真的应用情况	167
7.2	并行仿真的框架体系	167
7.2.1	并行计算操作系统	168
7.2.2	并行仿真内核	168
7.2.3	并行仿真支持环境	169
7.2.4	应用实现	169
7.3	并行仿真的任务实现	169
7.3.1	实际系统的层次化分解	169
7.3.2	并行算法的设计过程	170
7.3.3	逻辑模块 LP	172
7.3.4	仿真编程	172
7.4	并行连续系统仿真	173
7.4.1	部分并行仿真	173
7.4.2	完全并行仿真	173
7.5	并行离散事件仿真	175
7.5.1	仿真时间	175
7.5.2	串并行关系事件与因果关系事件	175
7.5.3	并行离散事件仿真的时间推进机制	177
7.5.4	并行离散事件仿真的实现	177
7.6	并行仿真同步策略	178
7.6.1	保守策略	178
7.6.2	乐观策略	179

7.6.3 混合策略	179
7.6.4 自适应策略	179
7.7 并行仿真任务的分配策略	179
7.7.1 处理器负荷平衡原则	180
7.7.2 任务分配算法	180
7.8 小结	180
习题与思考题	181
参考文献	181
第8章 半实物仿真	182
8.1 引言	182
8.1.1 半实物仿真的发展	182
8.1.2 半实物仿真系统	182
8.1.3 半实物仿真的关键技术	186
8.2 视景仿真	186
8.2.1 三维建模	187
8.2.2 真实感三维图形生成	188
8.2.3 动画生成	189
8.2.4 实时视景生成和显示	189
8.3 运动特性仿真	190
8.3.1 运动控制系统	191
8.3.2 运动仿真系统	191
8.4 力与力矩特性仿真	193
8.4.1 随动负载特性仿真	193
8.4.2 力反馈/触觉	193
8.4.3 压力仿真	194
8.5 目标与环境特性仿真	194
8.5.1 可见光图像目标仿真	195
8.5.2 激光目标特性仿真	197
8.5.3 红外成像目标半实物仿真	202
8.5.4 雷达目标半实物仿真	206
习题与思考题	207
参考文献	207
第9章 先进分布仿真	208
9.1 引言	208
9.1.1 先进分布仿真的产生和发展	208
9.1.2 先进分布仿真的分类	210
9.1.3 先进分布仿真的应用	211
9.2 体系结构	212
9.2.1 通信机制	212

9.2.2	DIS 体系结构	216
9.2.3	HLA 体系结构	218
9.2.4	两种体系结构的互连	219
9.3	信息交换标准	220
9.3.1	引言	220
9.3.2	DIS 协议	221
9.3.3	HLA 标准	223
9.4	时空一致性与时钟同步	225
9.4.1	时空一致性的概念	225
9.4.2	时空一致性影响因素	226
9.4.3	时钟同步的概念	227
9.4.4	时钟同步方法	227
9.5	计算机生成兵力	228
9.5.1	引言	228
9.5.2	CGF 组成与工作过程	229
9.5.3	CGF 自治行为仿真	230
9.5.4	CGF 动态性能仿真	233
9.6	仿真管理技术	235
9.6.1	引言	235
9.6.2	先进分布仿真管理的主要内容	236
9.7	先进分布仿真的新进展	237
9.7.1	基于网格的仿真	237
9.7.2	基于 Web 服务的仿真	240
	习题与思考题	243
	参考文献	243
第 10 章	定性仿真	244
10.1	引言	244
10.1.1	定性仿真的产生和发展	244
10.1.2	定性仿真的理论派别	245
10.1.3	定性仿真的应用与发展方向	245
10.2	定性仿真方法	246
10.2.1	Kuipers 定性仿真方法	246
10.2.2	SDG 定性仿真方法	253
10.3	定性仿真工具——SDG 集成软件平台	257
10.3.1	SDG 集成软件平台的结构	257
10.3.2	SDG 集成软件平台的功能	258
10.4	定性定量仿真相结合	259
10.4.1	问题的提出	259
10.4.2	定性仿真和定量仿真的关系	259

10.4.3	定性定量仿真的优势	259
10.4.4	定性定量仿真的研究方向	260
10.4.5	定性定量仿真的方法	260
	习题与思考题	261
	参考文献	261
第 11 章	仿真的可信度	262
11.1	引言	262
11.2	仿真可信度的概念	262
11.2.1	仿真可信度的定义	262
11.2.2	仿真可信度的性质	263
11.2.3	仿真可信度研究的历程	264
11.2.4	仿真可信度研究中的难题与方向	266
11.3	模型与仿真的 VV&A	267
11.3.1	VV&A 的概念	267
11.3.2	VV&A 的工作过程	268
11.3.3	VV&A 的基本原则	269
11.3.4	VV&A 相关人员及其职责	269
11.3.5	VV&A 的相关技术	270
11.3.6	仿真可信度与 VV&A 的关系	271
11.4	数据的 VV&C	272
11.4.1	VV&C 的基本概念	272
11.4.2	仿真中数据的分类	273
11.4.3	仿真数据校核与验证的关键过程	273
11.5	仿真可信度评估方法	275
11.5.1	基于相似理论的可信度分析	275
11.5.2	基于模糊综合评判法的可信度评估	276
11.5.3	基于层次分析法的可信度评估	277
11.5.4	基于粗糙集理论的仿真的可信度评估方法	277
11.5.5	基于粗糙—模糊综合评判的仿真可信度评估方法	279
11.5.6	基于模糊推理的仿真可信度评估方法	280
11.5.7	各种方法的分析对比	282
11.6	仿真可信度的控制	283
	习题与思考题	284
	参考文献	284
第 12 章	计算机仿真试验设计与数据分析	286
12.1	引言	286
12.2	仿真试验基础	286
12.2.1	基本术语	286
12.2.2	仿真试验步骤	287

12.2.3	仿真试验设计的条件	289
12.2.4	仿真试验设计的作用	289
12.3	仿真试验设计方法	289
12.3.1	全面试验法	289
12.3.2	坐标轮换法	290
12.3.3	正交试验设计法	290
12.3.4	均匀试验设计法	290
12.4	仿真试验数据分析	291
12.4.1	输入数据分析	291
12.4.2	输出数据分析	292
	习题与思考题	303
	参考文献	303
附录 1	拉普拉斯变换和 Z 变换	304
附录 2	常用仿真工具与仿真语言	310
附录 3	连续系统仿真实验	328
附录 4	离散事件系统仿真实验	330

第1章 绪 论

1.1 引 言

计算机仿真是建立需研究系统的模型,进而在计算机上对模型进行实验研究的活动。它以计算机作为实验的平台,其产生和发展与计算机的发明和计算机技术的发展紧密相关。计算机仿真技术经历了模拟计算机仿真、混合计算机仿真、专用数字计算机仿真、通用数字计算机仿真、基于网络的分布仿真等阶段,目前已进入高性能计算机仿真阶段。

计算机仿真技术是以计算机科学、系统科学、控制理论和应用领域有关的专业知识为基础,以计算机为工具,利用系统模型对实际的或设想的系统进行分析与研究的一门新兴技术。现代计算机仿真技术综合集成了计算机、网络、图形图像、多媒体、软件工程、信息处理、自动控制等多个高新技术领域的知识,是系统分析与研究的重要手段。计算机仿真技术具有良好的可控性、无破坏性、安全、可靠、不受外界条件(如气象条件和场地空域)的限制、可多次重复、高效和经济性等特点,近年来发展十分迅速,已经成为当今众多领域技术进步所依托的一种基本手段。计算机仿真方法的成功应用,大大提高了这一方法在科学研究和技术开发中的地位,引起科学界和工业界的广泛关注与重视。人们逐步认识到,仿真已成为继理论分析和实物实验(或演习)之后,认识客观世界规律性的强有力的手段。它可以把复杂系统的运行过程放在实验室中进行,在辅助决策、计划优化、管理调度、方案比较、规划制订、军事训练、投资风险分析、辅助设计以及谈判策略确定等方面均有巨大的应用潜力。

1.2 系 统

1.2.1 系统的定义

“系统”是一个内涵十分丰富的概念,是关于“系统”研究的各个学科所共同使用的一个基本概念,是系统科学和系统论研究的一个重要内容。

G. 戈登(G. Gordon)在《系统仿真》一书中写道:“系统这个术语在各个领域用得很广,很难给它下定义。一方面要使该定义足以概括它的各种作用,另一方面又要能简明地将定义应用于实际。”正因为很难用简明扼要的文字准确地对“系统”一词加以定义,故在国内外学术界出现了从不同角度对系统进行的种种不同定义。这里我们给出一种普遍能接受的定义:系统是由互相联系、互相制约、互相依存的若干组成部分(要素)结合在一起形成的具有特定功能和运动规律的有机整体。应当指出,这里的系统是广义的,大至无垠的宇宙世界,小至原子分子,我们都可以称之为系统。

图 1-1 所示的是一个电炉温度调节系统。在该系统中,给定温度值与温度计所测量到的实际温度进行比较,得到温度的偏差,该偏差信号被送到调节器中控制电炉的电压,从而实现控制电炉温度的目的。图 1-2 所示为商品销售系统。在这个系统中,各部门之间既互相独立,又互相联系,经理部负责各个部门之间的协调,并作出最终决策,以期使整个系统获得最大效益。

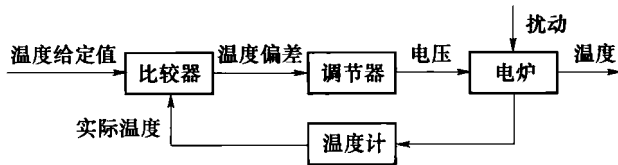


图 1-1 电炉温度调节系统

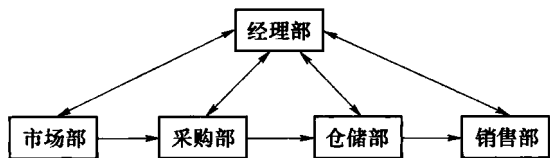


图 1-2 商品销售系统

1.2.2 系统的特性

上述两个系统的物理性质、功能和构成截然不同,然而它们却具有以下共性。

(1) 系统是实体的集合。所谓实体是指组成系统的具体对象。例如电炉调节系统中的比较器、调节器、电炉、温度计,商品销售系统中的经理、部门、商品、货币、仓库等都是实体。系统中的各个实体既具有一定的相对独立性,又相互联系构成一个整体,即系统。

(2) 组成系统的实体具有一定的属性。所谓属性是指实体所具有的全部有效特性(如状态、参数等)。在电炉温度调节系统中,温度、温度偏差、电压等都是属性,商品销售系统中部门的属性有人员的数量、职能范围,商品的属性有生产日期、进货价格、销售日期、售价等。

(3) 系统处在活动之中。所谓活动是指实体随时间推移而发生的属性变化。例如,电炉温度调节系统中的主要活动是控制电压的变化,而商品销售系统中的主要活动有库存商品数量的变化、零售商品价格的增长等。

各种系统,不论是简单的还是复杂的,总是由一些实体组成的,而每一实体又有其属性,整个系统有其主要活动。因此,实体、属性和活动构成了系统的三大要素。

系统是在不断地运动、发展、变化的。由于组成系统的实体之间的相互作用而引起的属性的变化,使得在不同时刻,系统中实体与属性都可能会发生变化,这种变化通常用状态的概念来描述。在任意时刻,系统中实体、属性以及活动的信息总和称为系统在该时刻的状态,用于表示系统状态的变量称为状态变量。

(4) 系统的开放性。系统并不是孤立存在的。自然界中的一切事物都存在着相互联系和相互影响。任何一个系统都将经常受到系统之外因素变化的影响,这种对系统的活动结果产生影响的外界因素称为系统的环境。对一个系统进行分析时,必须考虑系统所

处的环境,而首要的便是划分系统与其所处的环境之间的界线,即系统的边界。系统的边界包含系统中的所有实体。

系统边界的划分在很大程度上取决于系统研究的目的。例如,在商品销售系统中,如果仅考虑商品库存量的变化情况,那么系统只需包含采购部门、仓库和销售部门即可。但如果要研究商品进货与销售的关系时,系统中还应包括市场调查部门,因为商品销售状况及对进货的影响这部分职能是由该部门完成的。

(5) 系统的层次性。根据研究对象与目的的不同,系统可大可小,而且系统本身也可以由一系列相互作用的子系统构成,子系统又可以由更低一级的子系统构成,并且系统和它的部分环境又构成一个更大的系统,这就是所谓的系统等级结构。

1.2.3 系统的分类

系统的分类方法很多,按照不同的分类方法可以得到各种不同类型的系统。根据本课程的需要,这里只列出如下几种分类方法。

1. 按系统的特性分类

系统可分为工程系统和非工程系统。

工程系统是指人们为了满足某种需要或实现某个预定的功能,采用某种手段构造而成的系统,如机械系统、电气系统、化工系统、武器系统等。工程系统有时也称作物理系统。

非工程系统是指由自然和社会在发展过程中形成的、被人们在长期的生产劳动和社会实践中逐步认识的系统,如社会系统、经济系统、管理系统、交通系统、生物系统等。非工程系统有时也称作非物理系统。

2. 按照系统中起主要作用的状态随时间的变化分类

系统可分为连续系统和离散事件系统。

连续系统是指状态随时间连续变化的系统。

离散事件系统是指状态的变化在离散的时间点上发生,且往往又是随机变化的系统。

3. 按照对系统内部特性的了解程度分类

系统可分为白色系统、黑色系统和灰色系统。

白色系统是指内部特性全部已知的系统。

黑色系统是指内部特性全部未知的系统。

灰色系统是指内部特性部分已知、部分未知的系统。

4. 按照系统的物理结构和数学性质分类

系统可分为:线性系统和非线性系统、定常系统和时变系统、集中参数系统和分布参数系统、单输入单输出系统和多输入多输出系统等。

5. 按照系统内子系统的关联关系分类

根据系统的本质属性,按照系统内子系统的关联关系,系统分为简单系统和复杂系统。

简单系统是指组成系统的子系统数量较少,因而它们之间的关系也比较简单,或尽管子系统数量多或巨大,但它们之间的关联关系比较简单,则称为简单系统。按照子系统的数量级,简单系统还可分为小系统(子系统数量为几个、十几个)、大系统(子系统数量为

几十个、上百个)以及简单巨系统(子系统数量成千上万、上百亿、万亿)。对于某些非生命系统,例如,一台测量仪器可视为一个小系统,这类系统用传统的数学、物理学、化学可以很好地描述;一个仅考虑产品生产的普通工厂可视为一个大系统,这类系统可以用控制论、信息论和运筹学的部分内容加以研究。总之,研究这些简单系统可以将各子系统之间的相互作用直接综合为整体系统的功能。简单巨系统的子系统数量巨大,但子系统差别较少,因而反映出此类系统的子系统种类少,关联关系也比较简单。例如,激光系统就是简单巨系统,中国围棋也可视为简单巨系统。这类系统无法用研究简单小系统和大系统的方法解决,连巨型计算机也不够使用。对于这类系统,由于子系统往往具有共同特点,因此可把亿万万个分子组成的巨系统的功能略去细节,而用 19 世纪后半叶发展起来的统计力学进行概括处理。处理这种系统的理论近 20 年来发展很快,如耗散结构理论和协同学。

另一类系统称为复杂系统。它们最主要的特征是系统具有众多的状态变量,反馈结构复杂,输入与输出呈现非线性特征,或将上述特点简单称为高阶次、多回路及非线性。如果复杂系统中的子系统数量极大,种类又很多,它们之间的关联关系又很复杂,就称为复杂巨系统,尽管这类系统有客观的确定规律,但子系统的差别造成了规律的多样化。目前研究复杂巨系统还处于探索阶段,方法还很很不成熟。如人体系统、地理系统、星系系统都是复杂巨系统。这些系统在结构、功能、行为、演化等方面,十分复杂,至今仍有大量问题还不了解。

6. 按子系统的数量分类

系统可划分为小系统、大系统、巨系统。巨系统又可分为简单巨系统与复杂巨系统。自然界、人本身以及人类社会都广泛存在着复杂巨系统。

对于复杂巨系统,如果它与外界有能量、信息及物质的交换,则称为开放的复杂巨系统。

不包括人的意识及其活动在内的系统称为自然系统。包括人的因素的系统称为社会系统;社会系统显然是复杂系统。钱学森教授认为,社会系统(如经济、政治、军事、科学技术、人口系统等)可称为开放的复杂巨系统。这类系统的复杂性不仅是子系统种类多,各有其定性模型,而且子系统间及与外界存在着各种方式的信息交流和积累;子系统的结构也在随着系统的进展不断变化。社会系统的基本单元——人本身就是一个复杂巨系统,人是有意识,有主观能动性的。人的行为是决定社会系统行为的非常重要的基础。这就使得社会系统中不同行为的人或子系统间的关系异常复杂。因此社会系统的规律往往复杂、多变,难以把握。

1.3 模 型

1.3.1 模型的定义

从不同方面给出了模型的定义,常见的有以下几种:

- (1) 模型是“依照原物或计划中的事物的形式做成的物品”(《新华字典》)。
- (2) 模型是对系统某一方面本质属性的描述,它用某种精确定义的语言反映了系统