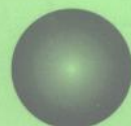




高等学校电子信息类规划教材

信息技术丛书



肖田元 张燕云 陈加栋 编著

系统仿真 导论



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



高等学校电子信息类规划教材
信息技术丛书

系统仿真导论

肖田元 张燕云 陈加栋 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

系统仿真技术是研究、设计、分析各种复杂系统的重要工具。全书除概论外,共分为三篇,即连续系统仿真篇(第1~9章)、离散事件系统仿真篇(第10~14章)和现代仿真技术篇(第15章)。几乎每章后面均附有习题,书后还附有实验大纲及相应的仿真源程序清单。

本书可作为自动控制理论与应用、机械工程、经济管理、系统工程等专业仿真课程的教材,使用对象是大学高年级学生。其中带“*”的章节是选修内容,也可作为研究生参考教材。对于工程技术人员,本书可作为应用仿真技术的参考书。

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。

书 名: 系统仿真导论

作 者: 肖田元 张燕云 陈加栋 编著

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研楼,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者: 北京市人民文学印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 20.5 字数: 488 千字

版 次: 2000 年 7 月第 1 版 2000 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-03821-X/TP·2241

印 数: 0001~5000

定 价: 23.50 元

《信息技术丛书》

出版说明

人们称当今的时代为信息时代。信息科学技术的快速发展和广泛渗透已经成为现今社会的一个重要的时代特征。人类社会的生产活动和生活质量,比以往任何时代,都更加得益于和依赖于信息技术的成就和发展。自动化是信息技术领域的主要组成部分之一,包括信号和信息处理、模式识别、知识工程、控制理论、自动化技术、传感技术、自动化仪表、系统工程、机器人控制、计算机控制与应用、网络技术等在內,都和信息科学与技术有着直接和密切的关系,几乎涉及到了信息的检测、分析、处理、控制和应用等所有的方面。正是基于当今时代特点和科技发展态势这个大视野,结合自动化类专业人才培养模式及教学内容体系的改革,我们规划和组织了这套丛书的编写和出版。这套丛书的读者,定位为自动控制、过程自动化、计算机、电子工程、电气工程、动力工程和机械自动化等系科的高年级大学生和研究生,以及工作于这些领域和部门的科学工作者和工程技术人员。

十年前,我们曾经组编和出版过一套《信息、控制与系统》系列教材,产生了比较大的社会影响,其中的许多著作至今仍然为国内很多高等学校用作教材,并为广大相关的科技人员作为进修和自学读物。现在组编和出版的这套《信息技术丛书》,从一定意义上可以说,就是先前的那套系列教材的发展和延伸,以反映新的进展和适应新的需求,匹配于变化了的时代和发展了的科技。列入这套丛书中的著作,大都是清华大学自动化系等开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有在多年教学经验基础上新编而成的教材,也有原系列教材中的部分教材的修订版本。总体上,这套丛书仍将保持原系列教材的求新与求实的风格,力求反映所属学科的基本理论和新近进展,力求做到科学性和教学性的统一,力求体现清华大学近年来在相应学科和领域中科学研究与教学改革成果。

我们希望这套丛书,既能为在校大学生和研究生的学习提供内容较新和论述较为系统的教材,也能为广大科技人员的继续学习与知识更新提供适合的和有价值的参考书。我们同时热忱欢迎,选用这套丛书的老师、学生和科技工作者提出批评和建议。

《信息技术丛书》编委会

1999年10月

《信息技术丛书》编委会

主 编 李衍达 郑大钟

编 委 金以慧 边肇祺
陈禹六 杨家本
周东华 蔡鸿程

责任编辑 蔡鸿程 王一玲

前 言

本教材系由全国高等学校自动控制专业教学指导委员会评审,原电子工业部教材办公室批准的“九五”规划教材。该教材由清华大学自动化系肖田元担任主编,张燕云、陈加栋参加编写,熊光楞担任主审。

本书的参考教学学时为 48~60 学时。学习本课程之前,学生必须已修过“自动控制原理”、“概率论与数理统计”、“计算机程序设计语言”等课程。

系统仿真是研究、设计、分析各种复杂系统的重要工具。本书可供自动控制理论与应用、机械工程、经济管理、系统工程等专业的仿真课程作为教材使用。使用对象主要是大学高年级学生,其中带“*”的章节是选修内容;也可作为研究生参考教材。

本书的目的是力图向读者比较全面地、系统地介绍系统仿真学科。全书分为三篇,即连续系统仿真篇、离散事件系统仿真篇和现代仿真技术篇。此外,书中开始安排了概论,使初次接触仿真的读者对系统仿真有一个概念性了解。

连续系统仿真篇分为 9 章。首先对连续系统的模型形式化描述进行讨论(第 1 章);接着介绍经典的连续系统建模方法学,主要讨论龙格-库塔法和线性多步法(第 2 章);然后分别按时域和频域讨论连续系统仿真建模技术(第 3,4 章)。第 5 章对采样控制系统的仿真进行专门介绍。第 6 章及第 7 章对两类特殊问题——病态系统及含有间断特性的系统仿真技术进行了讨论。到此,对有关集中参数的连续系统仿真技术作了比较全面的介绍。第 8 章提供有关分布参数系统的仿真建模技术。近些年来,并行处理技术得到长足的发展,因此,在第 9 章,介绍了连续系统并行仿真的基本原理和技术。

离散事件系统仿真篇分为 5 章。首先介绍离散事件系统仿真的基本概念,通过两类常见的离散事件系统——排队系统和库存系统的仿真使读者对该类仿真有一个总体认识(第 10 章)。第 11 章讨论离散事件系统仿真建模方法学。随机性是这类系统的重要特征。然后用两章的篇幅,讨论如何从观测数据确定随机变量模型以及随机变量的产生等(第 12,13 章)。最后,在第 14 章,对离散事件系统仿真结果分析进行了比较详细的讨论,这是因为,该问题以往未能引起人们的足够重视,而且至今仍未得到彻底解决。

本书的第 3 篇介绍现代仿真技术。如前所述,仿真技术发展如此迅速,以至于来不及在教科书中加以介绍。在众多的现代仿真技术中,本书选择了“虚拟现实技术”(第 15 章)加以介绍。作者认为,这方面技术的发展,在很大程度上代表了现代仿真技术的最新技术成果。

本书作为理工类高等学校学生仿真课程的教材,几乎每章后面均附有习题。考虑到系统仿真是一门实验性很强的学科,书的最后附有实验指示书及相应的实验程序。程序是用 C 语言编写的。

本书的概论和第 6,7,8,9 章以及第 15 章由肖田元编写,第 1,2,3,4,5 章由张燕云、肖田元共同编写,离散事件系统仿真篇即第 10~14 章由陈加栋编写。全书由肖田元审阅,熊光楞审定。由于作者的水平有限,恳请读者对书中的缺点和错误给予批评指正。

作 者

2000 年 1 月

目 录

概述	1
0.1 系统、模型与仿真	1
0.1.1 系统	1
0.1.2 模型	1
0.1.3 仿真	3
0.2 系统仿真的类型	4
0.3 系统仿真的一般步骤	6
0.4 仿真技术的应用	7
0.4.1 仿真技术在系统设计中的应用	7
0.4.2 仿真技术在系统分析中的应用	8
0.4.3 仿真在教育与训练中的应用	8
0.4.4 仿真在产品开发及制造过程中的应用	9
0.4.5 仿真技术在 CIMS 中的应用	11

第一篇 连续系统仿真篇

第 1 章 连续系统仿真概论	15
1.1 连续系统模型描述	15
1.1.1 连续时间模型	15
1.1.2 离散时间模型	16
1.1.3 连续-离散混合模型	18
1.2 模型结构变换	20
1.2.1 外部模型到内部模型的变换	20
1.2.2 面向结构图的模型变换	23
1.2.3 系统状态初始值变换	28
习题	30
参考文献	31
第 2 章 经典的连续系统仿真建模方法学	32
2.1 离散化原理及要求	32
2.2 龙格-库塔法	34
2.2.1 龙格-库塔法基本原理	34
2.2.2 龙格-库塔法的误差估计及步长控制	38
2.2.3 实时龙格-库塔法	41

2.2.4 面向方程的龙格-库塔法仿真举例	43
2.3 线性多步法	47
2.3.1 线性多步法基本原理	47
2.3.2 线性多步法误差分析	51
2.4 稳定性分析	53
习题	55
参考文献	55
第3章 时域离散相似法	56
3.1 时域离散相似法基本原理	56
3.1.1 基本方法	56
3.1.2 状态转移矩阵的计算	59
3.2 增广矩阵法	63
3.3 面向结构图的非线性系统仿真	65
习题	71
参考文献	72
第4章 频域仿真建模方法学	73
4.1 替换法	73
4.2 根匹配法	78
4.3 频域离散相似法	80
4.3.1 频域离散相似法基本原理	80
4.3.2 信号重构器的频谱特性分析	81
4.3.3 可调整积分法	85
习题	87
参考文献	88
第5章 采样控制系统仿真	89
5.1 采样控制系统的基本结构	89
5.2 采样周期与仿真步距	90
5.3 不同采样周期差分模型的转换	93
5.4 纯延迟环节的仿真模型	94
5.5 采样控制系统仿真举例	95
习题	97
参考文献	98
* 第6章 病态系统仿真	99
6.1 病态系统的定义	99
6.2 线性病态系统仿真	100
6.3 非线性病态系统仿真	102
6.3.1 吉尔法	102
6.3.2 半隐式龙格-库塔法	114

6.3.3 多帧速算法	115
习题	118
参考文献	118
* 第7章 间断特性的仿真建模	119
7.1 间断特性仿真的特点	119
7.2 条件函数零点搜索法	120
7.3 平均值法	122
7.4 间断点估计法	125
习题	127
参考文献	127
* 第8章 偏微分方程仿真建模方法学	128
8.1 概述	128
8.2 差分法原理	129
8.3 差分格式的相容性、稳定性及收敛性	131
8.4 扩散方程的菱形法及跳点法	135
8.5 对流方程的耗散中心差公式	137
8.6 椭圆方程的差分法	138
8.7 线上求解法	140
习题	142
参考文献	143
第9章 并行仿真技术	144
9.1 概述	144
9.2 并行处理原理及并行仿真算法	147
9.3 面向微分方程的并行仿真	150
9.4 分布交互式仿真	154
习题	158
参考文献	158

第二篇 离散事件系统仿真篇

第10章 离散实践系统仿真基础	161
10.1 基本概念	161
10.2 仿真钟的推进	163
10.3 单服务台排队系统仿真	165
10.3.1 排队系统的基本概念	165
10.3.2 单服务台排队系统仿真举例	167
10.4 库存系统的仿真	170
10.4.1 库存系统的基本概念	171
10.4.2 确定性库存系统	171

10.4.3 随机库存系统·····	173
10.4.4 随机库存系统仿真举例·····	174
10.5 离散事件系统仿真研究的一般步骤·····	177
习题·····	178
参考文献·····	178
第 11 章 随机变量模型的确定 ·····	179
11.1 引言·····	179
11.2 随机变量模型的确定·····	179
11.2.1 分布参数的确定·····	179
11.2.2 分布类型的假设·····	183
11.2.3 实验分布·····	190
11.3 拟合优良度检验·····	191
11.3.1 χ^2 检验 ·····	191
11.3.2 柯尔莫哥洛夫-斯米尔洛夫检验(K-S 检验) ·····	193
习题·····	195
参考文献·····	195
第 12 章 随机变量的产生 ·····	196
12.1 概述·····	196
12.2 随机数发生器·····	196
12.3 随机数发生器的测试·····	199
12.4 随机变量产生的原理·····	202
12.4.1 反变换法·····	202
12.4.2 组合法·····	204
12.4.3 卷积法·····	205
12.4.4 舍选法·····	206
12.5 典型随机变量的产生·····	208
12.5.1 连续随机变量的产生·····	208
12.5.2 离散随机变量的产生·····	212
习题·····	215
参考文献·····	215
第 13 章 离散事件系统仿真建模方法及仿真策略 ·····	216
13.1 概述·····	216
13.2 Petri 网建模方法 ·····	216
13.3 离散事件系统的仿真策略·····	219
13.3.1 事件调度法·····	220
13.3.2 活动扫描法·····	221
13.3.3 进程交互法·····	223
13.3.4 三阶段法·····	224

13.3.5	四种仿真策略的比较	227
13.4	离散事件系统仿真语言	229
13.4.1	概述	229
13.4.2	GPSS	229
13.4.3	SLAM/SIMAN 仿真语言	231
13.4.4	SIMSCRIPT II.5	232
	习题	232
	参考文献	233
第 14 章	离散事件系统仿真输出数据分析	234
14.1	概述	234
14.2	终止型仿真及稳态型仿真	234
14.3	终止型仿真输出数据的分析	235
14.3.1	固定样本长度法	235
14.3.2	序贯程序法	237
14.4	稳态型仿真输出数据的分析	238
14.4.1	批均值法	238
14.4.2	稳态型序贯法	239
14.4.3	重新产生法	242
14.4.4	重复删除法	244
14.5	系统性能比较	248
14.5.1	两系统性能比较	248
14.5.2	多系统性能比较	249
14.6	仿真结果分析应用举例	251
	习题	254
	参考文献	255

第三篇 现代仿真技术篇

第 15 章	虚拟现实技术	259
15.1	虚拟现实技术的特征及系统的基本构成	259
15.2	虚拟现实技术的发展概况	262
15.3	位置跟踪通道	264
15.4	视觉通道	267
15.5	听觉通道	271
15.6	触觉/力反馈	274
15.6.1	人体触觉系统	274
15.6.2	触觉/力反馈技术	276
15.7	虚拟场景的生成	279
15.7.1	虚拟场景静态模型的建立	279
15.7.2	虚拟场景动态模型的建立	281

15.8 本章小结	282
参考文献	283
附录 1 实验指示书	285
实验 1 面向方程的数值积分法仿真	285
实验 2 面向结构图的离散相似法仿真	287
实验 3 随机数产生及均匀性与独立性测试	288
实验 4 仿真输出数据分析	289
附录 2 仿真实验源程序	290
程序 1 面向方程的数值积分法仿真程序(CSS01.C)	290
程序 2 面向结构图的离散相似法仿真程序(CSS02.C)	296
程序 3 伪随机发生器测试程序(DEDS01.C)	305
程序 4 批均值法仿真程序(DEDS02.C)	308

概 述

仿真技术已经成为分析、研究各种系统,尤其是复杂系统的重要工具,它不仅用于工程领域,如机械、航空、航天、电力、冶金、化工、电子等方面,还广泛用于非工程领域,如交通管理、生产调度、库存控制、生态环境以及社会经济等方面。如果说,20年前,在我国,“仿真”这个词还仅为学术界和技术界的人们所了解的话,那么,在今天,已经成为社会所熟悉的词汇了,这反映了仿真技术在我国长足进步。

0.1 系统、模型与仿真

0.1.1 系统

正如 G. 戈登在其所著的《系统仿真》一书中所说:“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。”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—公元前 370 年)的著作《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。”戈登在总结前人思想的基础上,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”。

根据这个定义,我们可以将一个理发馆定义为一个系统。该系统中的实体有服务员和顾客。顾客按某种规律到达,服务员根据顾客的要求,按一定的程序为其服务,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。我们也可以把实现电动机调速的各个实体定义为一个系统,称之为电动机调速系统。该系统包括电动机、测速元件、比较元件以及控制器等,它们相互作用以实现按给定要求调节电动机的速度。

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 we 研究某一对象时,总是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。

尽管世界上的系统千差万别,但人们总结出描述系统“三要素”,即实体、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。

0.1.2 模型

为了研究、分析、设计和实现一个系统,需要进行试验。试验的方法基本上可分为两大

类:一种是直接在真实系统上进行,另一种是先构造模型,通过对模型的试验来代替或部分代替对真实系统的试验。传统上大多采用第一种方法,随着科学技术的发展,尽管第一种方法在某些情况下仍然是必不可少的,但第二种方法日益成为人们更为常用的方法,主要原因在于:

(1) 系统还处于设计阶段,真实的系统尚未建立,人们需要更准确地了解未来系统的性能,这只能通过对模型的试验来了解;

(2) 在真实系统上进行试验可能会引起系统破坏或发生故障,例如,对一个处于运行状态的化工系统或电力系统进行没有把握的试验将会冒巨大的风险;

(3) 需要进行多次试验时,难以保证每次试验的条件相同,因而无法准确判断试验结果的优劣;

(4) 试验时间太长或费用昂贵。

因此,在模型上进行试验日益为人们所青睐,建模技术也就随之发展起来。模型可分为两大类,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。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。

一个系统可以定义为如下集合结构:

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

其中:

T : 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 : 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 : 输入段集,描述某个时间间隔内输入模式,是 (X, T) 的一个子集。

Q : 内部状态集,是系统内部结构建模的核心。

δ : 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 时刻处于状态 q ,并施加一个输入段 $w: \langle t_0, t_1 \rangle \rightarrow X$,则 $\delta(q, w)$ 表示系统处于 t_1 状态。

Y : 输出集,系统通过它作用于环境。

λ : 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。

上面给出了系统模型的一般描述。在实际建模时,要求不同,模型描述的详细程度也不尽相同,亦称为表示的水平不同,具体地有:

(1) 行为水平 亦称为输入输出水平。该水平的模型将系统视为一个“黑盒”,在输入信号的作用下,只对系统的输出进行测量。

(2) 分解结构水平 将系统看成若干个“黑盒”连接起来,定义每个“黑盒”的输入与输出,以及它们相互之间的连接关系。

(3) 状态结构水平 不仅定义了系统的输入与输出,而且还定义了系统内部的状态集及状态转移函数。

上面我们从系统的定义出发给出了集合结构的模型描述形式,显然,这种描述太一般化了,难以在实际中加以采用。人们在长期的研究与应用中,创造出了适用于不同对象研究分析要求的模型描述形式,Oren 进行了总结,将模型形式加以分类如表 0.1。

表 0.1 模型分类

模型描述变量的轨迹	模型的时间集合	模型形式	变量范围	
			连续	离散
空间连续变化模型 空间不连续变化模型	连续时间模型	偏微分方程	✓	
		常微分方程	✓	
离散(变化)模型	离散时间模型	差分方程	✓	✓
		有限状态机		✓
		马尔可夫链		✓
	连续时间模型	活动扫描	✓	✓
		事件调度	✓	✓
		进程交互	✓	✓

0.1.3 仿真

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。

综上所述, “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, 仿真则是通过对模型的实验以达到研究系统的目的。

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)。它们的关系可用图 0.1 描述。

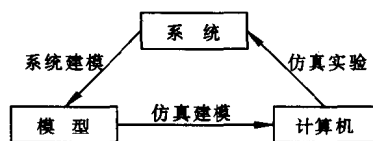


图 0.1 计算机仿真三要素
及三个基本活动

传统上, “系统建模”这一活动属于系统辨识技术范畴, 仿真技术则侧重在“仿真建模”, 即针对不同形式的系统模型研究其求解算法, 使其在计算机上得以实现。至于“仿真实验”这一活动, 也往往只注重“仿真程序”的检验 (verification), 至于如何将仿真实验的结果与实际系统的行为进行比较这一根本性的问题 (validation) 缺乏从方法学的高度进行研究。

现代仿真技术的一个重要进展是将仿真活动扩展到上述三个方面,并将其统一到同一环境中。在系统建模方面,除了传统的基于物理学、化学、生物学、社会学等基本定律及系统辨识等方法外,现代仿真技术提出了用仿真方法确定实际系统的模型。例如,根据某一系统在试验中所获得的输入输出数据,在计算机上进行仿真试验,确定模型的结构和参数;基于模型库的结构化建模,采用面向对象建模(object-oriented modelling)方法,在类库的基础上实现模型拼合与重用。

在仿真建模方面,除了适应计算机软硬件环境的发展而不断研究和开发出许多新算法和新软件外,现代仿真技术采用模型与实验分离技术,即模型的数据驱动(data driven)。任何一个仿真问题可分为两部分:模型与实验,这一点,现代仿真技术与传统的仿真定义是一致的。其区别在于:现代仿真技术将模型又分为参数模型和参数值两部分,参数值属于实验框架的内容之一。这样,模型参数与其对应的参数模型分离开来。仿真实验时,只需对参数模型赋予具体参数值,就形成了一个特定的模型,从而大大提高了仿真的灵活性和运行效率。

在仿真实验方面,现代仿真技术将实验框架与仿真运行控制区分开来。一个实验框架定义一组条件,包括:模型参数、输入变量、观测变量、初始条件、终止条件、输出说明。前面已对模型参数进行了说明,除此之外,与传统仿真区别在于,将输出函数的定义也与仿真模型分离开来。这样,当需要不同形式的输出时,不必重新修改仿真模型,甚至不必重新仿真运行。

Oren 将上述思想加以总结,提出了现代仿真技术的概念框架(参见图 0.2)。在这个框架中,“仿真问题描述”对应于图 0.1 中的“仿真建模”,其建模思想如前所述;“行为产生”对应于图 0.1 中的“仿真实验”,只是将仿真输出独立于行为产生;而“模型行为及其处理”相应于输出处理。

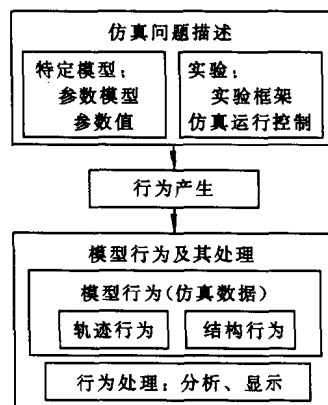


图 0.2 现代仿真的概念框架

0.2 系统仿真的类型

可以从不同的角度对系统仿真加以分类。比较典型的分类方法是:根据模型的种类分类;根据仿真所采用的计算机类型分类;根据仿真时钟与实时时钟的比例关系分类;根据系统模型的特性分类。

1. 根据模型的种类分类

根据模型的种类不同,系统仿真可分为三种:物理仿真、数学仿真和半实物仿真。

按照真实系统的物理性质构造系统的物理模型,并在物理模型上进行实验的过程称为物理仿真。物理仿真的优点是直观、形象。在计算机问世以前,基本上是物理仿真,也称为“模拟”。物理仿真的缺点是:模型改变困难,实验限制多,投资较大。