

高等学校规划教材

计算机仿真技术

吴旭光 杨惠珍 王新民 编著



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校规划教材

计算机仿真技术

吴旭光 杨惠珍 王新民 编著



化学工业出版社
教材出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

计算机仿真技术 / 吴旭光, 杨惠珍, 王新民编著.
—北京: 化学工业出版社, 2005.6
高等学校规划教材
ISBN 7-5025-7249-X

I. 计… II. ①吴… ②杨… ③王… III. 计算机仿
真—高等学校—教材 IV. TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 074651 号

**高等学校规划教材
计算机仿真技术**

吴旭光 杨惠珍 王新民 编著

责任编辑: 唐旭华

文字编辑: 朱 磊

责任校对: 周梦华

封面设计: 关 飞

*

化学工业出版社
教材出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

[http: // www.cip.com.cn](http://www.cip.com.cn)

*

新华书店北京发行所经销
化学工业出版社印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 17¼ 字数 422 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7249-X

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

系统仿真技术是建立在系统科学、系统辨识、控制理论、计算方法和计算机技术等学科上的一门综合性很强的技术科学。它以计算机和专用实验设备为工具,以物理系统的数学模型为基础,通过数值计算方法,对已经存在的或尚不存在的系统进行分析、研究和设计。目前,计算机仿真技术不但是科学研究的有力工具,也是分析、综合各类工程系统或非工程系统的一种研究方法和有力的手段。

本书的前身是作者在 1990 年为西北工业大学工业自动化和控制理论等专业编写的《控制系统计算机仿真》讲义,并在 1993 年进行修改。为了使计算机仿真技术能更好地为系统分析、研究、设计服务,作者在 1998 年对讲义又作了全面修改,并补充许多新内容后正式出版。该讲义和书不但一直作为西北工业大学自动化专业的教材,也得到国内其他院校的选用。作者还将其用作航空集团公司和船舶集团公司所属的部分研究所和工厂的工程师教材。

这次我们在西北工业大学教务处的大力支持下,对原书作了较大的修改。考虑到 Matlab 和 Simulink 在目前科学计算和仿真中的应用日益普及,我们在本书的许多部分都增加了相应的篇幅,并特别增加了第 7 章 Simulink 建模和仿真。近 20 年来,由于计算机技术、网络技术和其他相关技术的发展,大大推动了计算机技术的发展。在这次出版过程中,我们将原教材的 7-6 节面向对象仿真技术、7-8 节灵境仿真技术、8-3 节模型的确认与验证三部分重新编写,并形成第 8 章现代仿真技术。因此这本教材更加适合目前的教学大纲要求。

全书共分 9 章。第 1 章绪论,概括地从横向和纵向两个方面介绍了系统仿真的基本概念、内容、应用和发展。第 2 章系统数学模型及其相互转换,介绍了系统仿真所使用的各类数学模型的表示以及相互间的转换。第 3 章数值积分法在系统仿真中的应用,介绍了在计算机仿真技术主要使用的微分方程数值解法,包括在系统仿真中常用的数值积分法、刚性系统的特点及算法、实时仿真算法、分布参数系统的数字仿真和面向微分方程的仿真程序设计。第 4 章面向结构图的数字仿真法是本书的重点,讲解了结构图离散相似法仿真、非线性环节的数字仿真和连续系统的结构图仿真及程序。第 5 章快速数字仿真法,介绍了几种在满足工程精度条件下提高线性连续系统仿真速度的方法,并讲解了计算机控制系统的仿真技术。仿真技术和优化理论是紧密联系的,它们的结合是计算机辅助分析和计算机辅助设计的基础。在第 6 章控制系统参数优化及仿真,向读者介绍了参数优化与函数优化、单变量寻优技术、多变量寻优技术、寻优过程对限制条件的处理、函数寻优和 Matlab 优化工具箱。Matlab 和 Simulink 是目前科学研究学者和工程技术人员使用最多的软件,因此在第 7 章我们向读者简单介绍了 Simulink 建模和仿真,包括 Simulink 的概述和基本操作、Simulink 的基本模块、建模方法、子系统和子系统的封装、回调和 S 函数等内容。第 8 章现代仿真技术力图反映现代仿真技术的最新进展,其内容包括:面向对象仿真技术、分布交互仿真技术、虚拟现实技术、建模与仿真的 VV&A 技术等。第 9 章讨论了仿真应用技术,涉及仿真语言及其发展、一体化仿真技术、人工智能与仿真技术、数学模型和建模方法学。在本章最后还向读者介绍了仿真实验的计划指定和实施。

计算机仿真是一门涉及面较广的学科,就仿真所使用的设备来看,可分为全数字计算机

仿真、物理仿真和半物理仿真等。本书仅介绍数字计算机仿真技术。就仿真使用的对象模型而言,又有连续系统仿真、离散事件系统仿真和复合系统仿真。本书主要讲述连续系统的计算机仿真理论和技术。但考虑到离散事件系统仿真的发展和重要性,本书在第1章向读者简单介绍了离散事件系统仿真方法。

本书的第1章、2章、3章、4章、6章、7章、9章由吴旭光编写,第2章、4章、5章和习题由王新民编写,第8章由杨惠珍编写。全书由吴旭光审阅和统稿。

在本书的编写和使用过程中,西北工业大学自动化教研室和自动控制理论教研室的许多老师都曾给予了极大的帮助,许多使用过此书前身的研究所的工程师也提出过许多具体的意见。尤其是作者所带的研究生赵勋峰、苏娟、陈兴隆、张竞凯等都参与了本书的编写,在此一并表示感谢。

本教材的编写参考了大量的文献,在此向这些文献的作者表示感谢。

最后,第一作者还要感谢他的夫人和女儿对他的教学和科研工作给予的支持和鼓励。

由于编者水平有限,经验不足,不到之处在所难免,敬请读者给予批评指正。

本书有电子教案、实验指导书、实验程序等。使用本书作为教材的教师可以通过电子邮件 txh@cip.com.cn 索取。

编者

2005年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 系统仿真的基本概念	1
1.2 连续系统仿真技术	3
1.3 离散事件系统仿真技术	6
1.3.1 离散事件系统的数学模型	7
1.3.2 离散事件系统的仿真方法	9
1.3.3 离散事件系统仿真语言	10
1.4 仿真技术的应用	12
1.4.1 系统仿真技术在系统分析、综合方面的应用	12
1.4.2 系统仿真技术在仿真器方面的应用	13
1.4.3 系统仿真技术在技术咨询和预测方面的应用	13
1.5 仿真技术的现状与发展	14
1.5.1 仿真计算机的现状与发展	14
1.5.2 计算机软件的现状与发展	14
1.5.3 仿真器的现状与开发	15
本章小结	15
习题	15
第 2 章 系统数学模型及其相互转换	16
2.1 系统的数学模型	16
2.1.1 连续系统的数学模型	16
2.1.2 离散时间模型	20
2.1.3 Matlab 语言中的模型表示	22
2.1.4 不确定模型	23
2.2 实现问题	26
2.3 从系统结构图向状态方程的转换	30
2.3.1 系统模拟结构图转换为状态方程	30
2.3.2 系统动态结构图转换为状态方程	32
2.3.3 利用 Matlab 语言对控制系统的结构图进行描述和转换	36
2.4 连续系统的离散化方程	38
2.4.1 状态方程的离散化	38
2.4.2 传递函数的离散化	40
2.4.3 利用 Matlab 语言进行离散化处理	42
本章小结	43
习题	43
第 3 章 数值积分法在系统仿真中的应用	45

3.1 在系统仿真中常用的数值积分法	45
3.1.1 欧拉法和改进的欧拉法	45
3.1.2 龙格-库塔法	47
3.1.3 线性多步法	50
3.1.4 Matlab 语言中的常微分方程求解指令和使用方法	54
3.2 刚性系统的特点及算法	56
3.3 实时仿真算法	58
3.4 分布参数系统的数字仿真	60
3.4.1 模型形式和性质	60
3.4.2 差分解法	61
3.4.3 线上求解法	64
3.4.4 Matlab 语言在偏微分方程解法中的应用	65
3.5 面向微分方程的仿真程序设计	71
本章小结	73
习题	73
第4章 面向结构图的数字仿真法	75
4.1 典型环节仿真模型的确定	75
4.2 结构图离散相似法仿真	77
4.3 非线性系统的数字仿真	81
4.4 连续系统的结构图仿真及程序	85
4.4.1 CSSF 程序包简单介绍	85
4.4.2 Micro-CSS 仿真程序	86
4.4.3 MCSS 仿真程序的使用方法	86
4.4.4 MCSS 仿真程序分析	90
4.4.5 代数环问题	94
本章小结	95
习题	96
第5章 快速数字仿真法	101
5.1 增广矩阵法	101
5.2 替换法	103
5.2.1 简单替换法	103
5.2.2 双线性变换	106
5.2.3 状态方程的双线性变换	108
5.3 零极点匹配法	110
5.4 计算机控制系统仿真	112
本章小结	119
习题	119
第6章 控制系统参数优化及仿真	121
6.1 参数优化与函数优化	121
6.2 单变量寻优技术	123

6.2.1 黄金分割法 (0.618 法)	123
6.2.2 二次插值法	126
6.3 多变量寻优技术	130
6.3.1 最速下降法	130
6.3.2 共轭梯度法	135
6.3.3 单纯形法	143
6.4 随机寻优法	145
6.5 寻优过程对限制条件的处理	150
6.6 函数寻优	151
6.7 Matlab 优化工具箱	154
6.7.1 Matlab 优化工具箱概述	154
6.7.2 Matlab 优化工具箱使用例子	155
本章小结	159
习题	159
第 7 章 Simulink 建模和仿真	160
7.1 Simulink 的概述和基本操作	160
7.1.1 Simulink 的概述	160
7.1.2 基本操作	161
7.2 基本模块	162
7.3 建模方法	168
7.3.1 模块的操作	169
7.3.2 模块的连接	172
7.4 系统仿真举例	174
7.4.1 非线性系统的模拟	175
7.4.2 混合系统 PID 控制器仿真	177
7.5 子系统和子系统的封装	179
7.5.1 Simulink 子系统	179
7.5.2 子系统的封装	184
7.6 回调	186
7.6.1 回调函数的介绍	187
7.6.2 基于回调的图形用户界面	187
7.7 S 函数	189
7.7.1 S 函数模块	189
7.7.2 S 函数的工作原理	190
7.7.3 S 函数中的几个概念	190
7.7.4 S 函数动画	192
本章小结	197
习题	197
第 8 章 现代仿真技术	199
8.1 面向对象仿真技术	199

8.1.1 面向对象的概念和特点	199
8.1.2 UML 统一建模语言	200
8.1.3 面向对象的建模与仿真	203
8.1.4 面向对象仿真举例	206
8.2 分布交互仿真技术	210
8.2.1 分布交互仿真的发展历程	210
8.2.2 分布交互仿真技术的特点和关键技术	212
8.2.3 DIS 系统的体系结构和标准	214
8.2.4 高层体系结构 (HLA)	216
8.3 虚拟现实技术	218
8.3.1 虚拟现实技术的基本概念	218
8.3.2 分布式虚拟现实系统	220
8.3.3 虚拟现实技术的应用	221
8.4 建模与仿真的 VV&A 技术	223
8.4.1 概述	223
8.4.2 VV&A 技术与方法	224
8.4.3 VV&A 的过程及基本原则	230
本章小结	233
习题	233
第 9 章 仿真应用技术	234
9.1 仿真语言及其发展	234
9.1.1 连续系统的数字仿真	234
9.1.2 仿真语言的功能	235
9.1.3 仿真语言的分类	235
9.1.4 数字仿真语言的发展概况和性能评价	236
9.2 仿真语言的基本结构和组织	236
9.2.1 对仿真语言的主要要求	236
9.2.2 仿真语言的一般结构和组织	237
9.3 一种典型的连续系统仿真语言	239
9.3.1 DARE-P 的主要功能	239
9.3.2 DARE-P 语言的基本结构	239
9.3.3 DARE-P 的使用方法	240
9.3.4 应用例子	242
9.4 一体化仿真技术	242
9.5 人工智能与仿真技术	245
9.5.1 概述	245
9.5.2 人工智能在仿真技术中的主要应用	245
9.5.3 仿真专家系统	247
9.5.4 智能化仿真的研究与探索	248
9.6 数学模型和建模方法学	248

9.6.1 数学模型的作用和目标	249
9.6.2 数学模型的性质和假设	250
9.6.3 建模方法学	252
9.6.4 结论	255
9.7 仿真实验的计划指定和实施	255
9.7.1 问题的阐述和计划的制定	256
9.7.2 仿真实验准备阶段	256
9.7.3 仿真实验与结果处理	257
附录	259
实验一 面向微分方程的数字仿真	259
实验二 连续系统的离散化仿真	260
实验三 面向结构图仿真	261
实验四 单纯型法参数寻优	261
实验五 PID 调节器参数最优化仿真	262
参考文献	264

第1章 绪 论

本章将介绍系统仿真的基本概念。它将从横向和纵向来阐述系统仿真的内涵，所有内容将为学习和以后更进一步地研究计算机仿真技术建立一个基础。

1.1 系统仿真的基本概念

(1) 系统与模型

系统就是一些具有特定功能的、相互间以一定规律联系着的物体所组成的一个总体。显然，系统是一个广泛的概念，毫无疑问它在现代科学研究和工程实践中扮演着重要的角色。不同领域的问题均可以用系统的框架来解决。但究竟一个系统是由什么构成的，这取决于观测者的观点。例如，这个系统可以是一个由一些电子部件组成的放大器；或者是一个可能包括该放大器在内的控制回路；或者是一个有许多这样回路的化学处理装置；或者是一些装置组成的一个工厂；或者是一些工厂的联合作业形成的系统，而世界经济就是这个系统的环境。

一个系统可能非常复杂，也可能很简单，因此很难给“系统”下一个确切的定义。因为这个定义不但能够足以概括系统的各种应用，而且又能够简明地把这个定义应用于实际。但无论什么系统一般均具有4个重要的性质，即整体性、相关性、有序性和动态性。

首先，必须明确系统的整体性。也就是说，它作为一个整体，各部分是不可分割的。就好像人体，它由头、身躯、四肢等多个部分组成，如果把这些部分拆开，就不能构成完整的人体。至于人们熟悉的自动控制系统，其基本组成部分（控制对象、测量元件、控制器等）同样缺一不可。整体性是系统的第一特性。

其次，要明确系统的相关性。相关性是指系统内部各部分之间相互以一定的规律联系着，它们之间的特定关系形成了具有特定性能的系统。有时系统各要素之间的关系并不是简单的线性关系，而是呈现出复杂的非线性关系。也正是由于这种非线性，才构成了这个多彩的世界。对于复杂的非线性关系，必须研究其复杂性与整体性。再以人体为例，人的双眼视敏度是单眼视敏度的6~10倍。此外，双眼有立体感，而单眼却无此特点。这就是一种典型的非线性特征，因此相关性是系统的第二特性，也是目前系统研究的主要问题。

除整体性和相关性外，系统还具有有序性和动态性。比如，生命是一种高度有序的结构，它所具有的复杂功能组织与现代化大工业生产的“装配线”非常相似，这是一种结构上的有序性，对任何系统都是适用的。又如图1.1所示，一个非平衡系统如果经过分支点A、B到达C，那么对C态的解释就必须暗含着对A态和B态的了解。这就是系统的动态性。

建立系统概念的目的在于深入认识并掌握系统的运动规律。因此不仅要定性地了解系统，还要定量地分析、综合系统，以便能更准确地解决工程、自然界和现代社会中的种种复杂问题。定量地分析、综合系统最有效的方法是建立系统的模型，并使用高效的数值计算工具和算法对系统的模型进行解算。

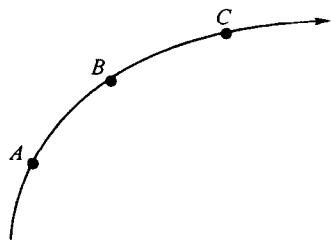


图 1.1 系统的动态性

采用模型法分析系统的第一步是建立系统的数学模型,所谓数学模型就是把关于系统的本质部分信息,抽象成有用的描述形式,因此抽象是数学建模的基础。数学在建模中扮演着十分重要的角色,马克思说过:“一种科学只有在成功地运用数学时,才算达到完善的地步。”例如集合的概念是建立在抽象的基础上的,共同的基础使集合论对于建模过程非常有用。这样,数学模型可以看成是由一个集合构造的。

数学模型的应用无论是在纯科学领域还是在实际工程领域中都有着广泛的应用,但通常认为一个数学模型有两个主要的用途:首先,数学模型可以帮助人们不断地加深对实际物理系统的认识,并且启发人们去进行可以获得满意结果的实验;其次,数学模型有助于提高人们对实际系统的决策和干预能力。

数学模型按建立方法的不同可分为机理模型、统计模型和混合模型。机理模型采用演绎方法,运用已知定律,用推理方法建立数学模型;统计模型采用归纳法,它根据大量实测或观察的数据,用统计的规律估计系统的模型;混合模型是理论上的逻辑推理和实验观测数据的统计分析相结合的模式。按所描述的系统运动特性和运用的数学工具特征,数学模型可分为线性、非线性、时变、定常、连续、离散、集中参数、分布参数、确定、随机等系统模型。

有关系统建模的具体理论和方法是自动化学科的一门专门课程。

(2) 仿真

随着科学技术的进步,尤其是信息技术和计算机技术的发展,“仿真”的概念不断得以发展和完善,因此给予仿真一个清晰和明了的定义是非常困难的。但一个通俗的系统仿真基本含义是指:设计一个实际系统的模型,对它进行实验,以便理解和评价系统的各种运行策略。而这里的模型是一个广义的模型,包含数学模型、非数学模型、物理模型等。可见,根据模型的不同,有不同方式的仿真。从仿真实现的角度来看,模型特性可以分为连续系统和离散事件系统两大类。由于这两类系统的运动规律差异很大,描述其运动规律的模型也有很大的不同,因此相应的仿真方法不同,分别对应为连续系统仿真和离散事件系统仿真。

① 连续系统仿真 连续系统仿真是指物理系统状态随时间连续变化的系统,一般可以使用常微分方程或偏微分方程组描述。需要特别指出的是这类系统也包括用差分方程描述的离散时间系统。对于工科院校,因为主要研究的对象是工业自动化和工业过程控制,因此本教材主要介绍连续系统仿真。

② 离散事件系统仿真 离散事件系统是指物理系统的状态在某些随机时间点上发生离散变化的系统。它与连续时间系统的主要区别在于:物理状态变化发生在随机时间点上,这种引起状态变化的行为称为“事件”,因而这类系统是由事件驱动的。离散时间系统的事件(状态)往往发生在随机时间点上,并且事件(状态)是时间的离散变量。系统的动态特性无法使用微分方程这类数学方程来描述,而只能使用事件的活动图或流程图。因此对离散事件系统的仿真的主要目的是对系统事件的行为作统计特性分析,而不像连续系统仿真的目的是对物理系统的状态轨迹作出分析。

仿真技术的分类方法很多,不同的分类仿真方法也有所不同,下一小节还要针对连续时间系统仿真的分类进行详细研究。

本书讲授的是连续时间系统的计算机仿真,因此仿真的基础是建立在系统的数学模型基础上,并以计算机为工具对系统进行实验研究的一种方法。仿真,就是模仿真实的事物,也就是用一个模型来模仿真实系统。既然是模仿,两者就不可能完全等同,但是最基本的内容

应该相同,即模型必须至少反映系统的主要特征。

随着现代工业的发展,科学研究的深入与计算机软件、硬件的发展,仿真技术已成为分析、综合各类系统,特别是大系统的一种有效研究方法和有力的研究工具。

1.2 连续系统仿真技术

(1) 基本原理分类

除了可按模型的特性分为连续系统仿真和离散事件系统仿真类型外,还可以从不同的角度对系统仿真进行分类。比较典型的分类方法如下。

- ① 根据模型的种类系统仿真可以分为三种:物理仿真、数学仿真和半实物仿真。
- ② 根据使用的仿真计算机也可将系统仿真分为三种:模拟计算机仿真、数字计算机仿真和数字模拟混合仿真。
- ③ 根据仿真时间钟和实际物理系统时间钟的比例关系,常将仿真分为实时仿真和非实时仿真。

现根据仿真的主要理论依据——相似论来研究仿真的分类。所谓相似,是指各类事物间某些共性的客观存在。相似性是客观世界的一种普遍现象,它反映了客观世界中不同物理系统和物理现象具备某些共同的特性和规律。采用相似理论建立物理系统的相似模型,这是相似理论在系统仿真中最基本的体现。仿真就是模仿一个真实系统,所遵循的基本原则就是相似原理。根据相似论的研究方法和仿真技术的研究方法,在建立物理系统的模型时,通常认为物理系统和模型应该满足几何相似、环境相似和性能相似中的一种或几种。

① 几何相似就是把真实系统按比例放大或缩小,其模型的状态向量与原物理系统的状态完全相同。土木建筑、水利工程、船舶、飞机制造多采用几何相似原理进行各种仿真实验。

② 环境相似,就是人工在实验室里产生与所研究对象在自然界中所处环境类似的条件,比如飞机设计中的风扇,鱼雷设计中的水洞、水池等。

③ 性能相似,则是用数学方程来表征系统的性能,或者利用数据处理系统,来模仿该数学方程所表征的系统。性能相似原理也是仿真技术遵循的基本原理。

根据仿真所遵循的相似原则基本含义,大致可将仿真分为三大类。

① 物理仿真 主要是运用几何相似、环境相似条件,构成物理模型进行仿真。其主要原因可能是由于原物理系统是昂贵的、或是无法实现的物理场、或是原物理系统的复杂性难以用数学模型描述的。

② 数字仿真 运用性能相似,即将物理系统全部用数学模型来描述,并把数学模型变换为仿真模型,在计算机上进行实验研究。

③ 半物理仿真 综合运用以上三个相似原则,把数学模型、实体模型、相似物理场组合在一起的仿真系统。这类仿真技术又称为硬件在回路中的仿真(Hardware in the loop simulation)。由于现代工业和科学技术的发展,单一的物理仿真和数字仿真往往不能满足其研究目的的要求,而这类物理仿真和数字仿真的结合称为半物理仿真,则可满足其要求。

本教材的重点是向读者介绍数字仿真。

(2) 半实物仿真

半实物仿真是一种通俗而习惯的叫法。按前述的定义应该是:在全部仿真系统中,一部分是实际物理系统或以实际等价的物理场,另一部分是安装在计算机里的数学模型。半实物仿真在科学研究和工程应用中扮演着非常重要的角色,从某种意义上半实物仿真技术的难度

和实际应用性均超过全数字仿真。这主要是因为如下几点。

① 对于一个大型的仿真系统，有时系统中的某一部分很难建立其数学模型，或者建立这部分的数学模型的代价昂贵，精度也难以保证。例如，在红外制导系统仿真时，其红外制导头以及各种物理场的模型建立是相当困难的。为了能准确地仿真系统，这部分将以实物的形式直接参与仿真系统，从而避免建模的困难和过高的建模费用。

② 利用半实物仿真系统，可以检验系统中的某些部件的性能。例如，为了检验航行器的性能，可以将设计的控制部件以实物的形式进入仿真系统。

③ 利用半实物仿真，可以进一步校正系统的数学模型。一个复杂的系统在完成初步设计以及分部件逐个研制出来后，为了验证和鉴定系统性能或检验定型产品，利用系统的半实物仿真可以从总体上更准确地检测外界因素的变化对系统的影响，更深入地暴露系统的内在矛盾。从而，在实验室内能较全面地检验和评定系统设计的合理性和各部件工作的协调性，进而修改和完善设计。

④ 在 1.5 节介绍的仿真器中，半实物仿真是必需的。因为在这类仿真器中为了逼近物理系统的实际效应，许多部件必须以实物方式介入仿真系统中。例如，飞行驾驶员训练器，为了使飞行器有真实感，座舱往往是以实物的方式介入系统的。

由以上原因可以看出，半实物仿真是一种更有实际意义的仿真实验，其技术难度和投资也往往大于全数字仿真。图 1.2 是某航行器指令制导半实物仿真系统的原理框图。

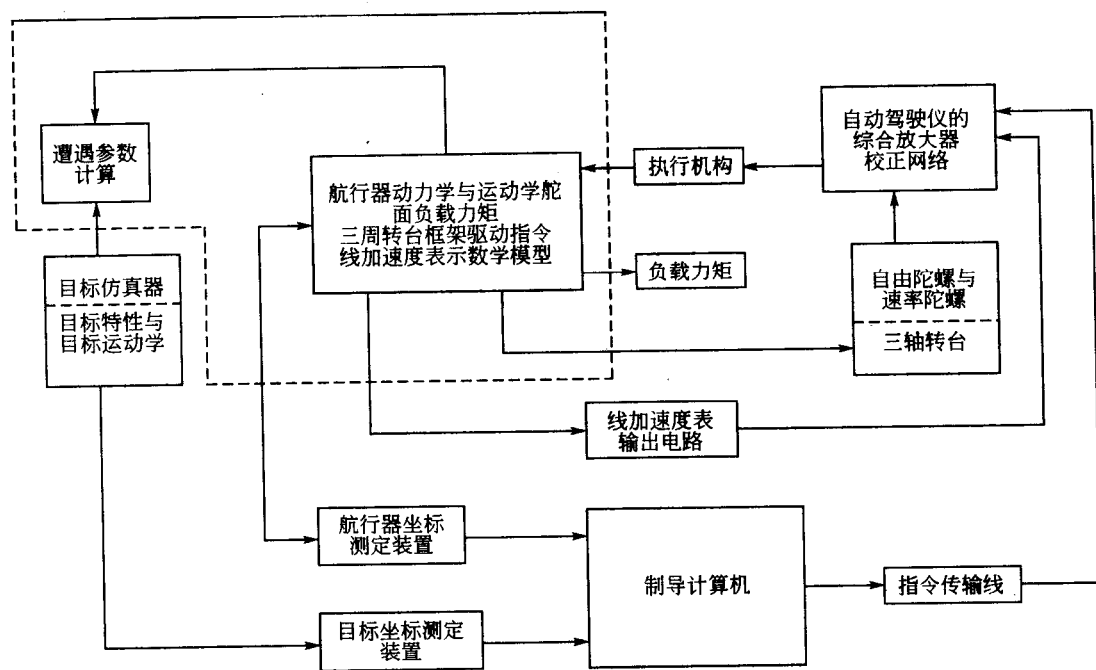


图 1.2 指令制导半实物仿真系统原理图

(3) 数字仿真

数字仿真的前提是系统的数学模型，数字仿真的工具是数字计算机，而其主要内容是数值计算方法、仿真程序、仿真语言以及上机操作。通常将计算机称为仿真的硬件工具，而将仿真计算方法和仿真程序称为仿真软件。数字仿真的工作流程如图 1.3 所示，数字仿真的过

程一般有如下五步。

① 描述问题，建立数学模型。对待研究的真实系统进行调查研究，建立能够描述问题的数学模型。如有可能，还应给出评估系统有关性能的准则。

② 准备仿真模型。其主要任务是根据物理系统的特点、仿真的要求和仿真计算机的性能对系统的数学模型进行修改、简化，选择合适的算法等。当采用所选择的算法时，必须保证计算的稳定性、计算精度和计算速度等要求。

③ 画出实现仿真模型的流程图，并用通用语言或仿真语言编成计算机程序。

④ 校核和验证模型。这一步的目的是确定仿真和数学模型是否符合要求。若仿真结果与数学模型所得到的结果基本一致或误差在容许范围内，则仿真模型可用。

⑤ 运行仿真模型。在不同初始条件和参数下实验系统的响应或预测系统对各种决策变量的响应。

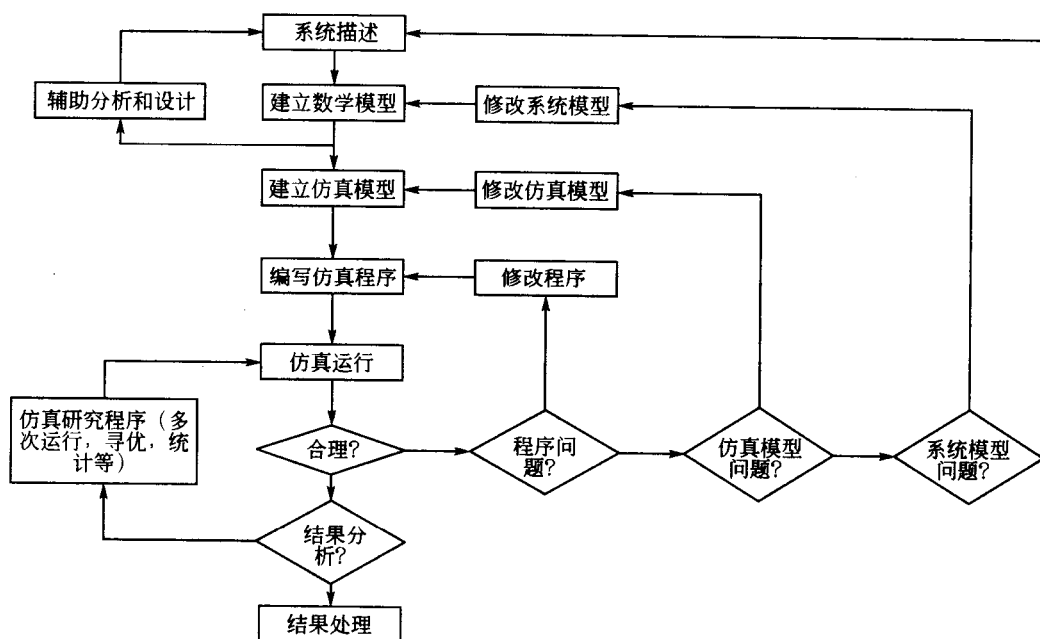


图 1.3 仿真实验的一般过程

从以上仿真过程可以看到，这里涉及三个具体的部分和三个具体的活动：一是物理系统，二是数学模型，三是计算机，如图 1.4 所示。并且有两次模型化和一次计算活动。第一次模型化是将实际系统变成数学模型，第二次是将数学模型变成仿真模型。通常将一次模型化的技术称为系统辨识技术；而将第二次模型化、仿真模型编程、校核和验证统称为仿真技术。二者所采用的研究方法虽有较大的差别，但又有十分密切的联系。校核和验证模型的过程实际上也就是不断修改模型使之更符合实际的过程，因而从某种意义上讲，仿真也是建模过程的继续。

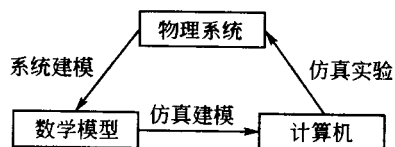


图 1.4 计算机仿真三要素和三个基本活动

(4) 数字仿真程序

数字仿真程序是一种适用于一类仿真问题的通用程序。一般采用通用语言编写。根据仿

真过程的要求，一个完整的仿真程序应具有以下三个基本阶段。

① 初始化阶段 这是仿真的准备阶段，主要完成下列工作。

- 数组定维、各状态变量置初值。
- 可调参数、决策变量以及控制策略等的建立。
- 仿真总时间、计算步距、打印间隔、输出方式等的建立。

② 模型运行阶段 这是仿真的主要阶段。规定调用某种算法，计算各状态变量和系统输出变量。当到达打印间隔时输出一次计算结果，并以数字或图形的方式表示出来。

③ 仿真结果处理和输出阶段 当仿真达到规定的总仿真时间时，对动力学来说，常常希望把整个仿真结果以曲线形式再显示或打印出来，或将整个计算数据存起来。针对不同的计算机和计算机外设的配置，该段的差别也较大。

仿真程序一般只是一种用通用语言编写的专门用于“仿真”这类问题的程序，所以不受机型的限制，便于移植，而且可以减少工程技术人员大量的编写程序时间。属于这类仿真的程序编写、算法设计将是本书介绍的主要内容。

1.3 离散事件系统仿真技术

计算机仿真涉及的面很广，就仿真对象而言，有连续系统、离散事件动态系统和复合系统。离散事件系统是指状态变化只在离散时刻产生的系统，“事件”就是指系统状态发生变化的一种行为。离散事件动态系统也是系统仿真运用的一个重要领域，而且近年来愈来愈受到人们的关注和重视。本节将以最简单的方式向读者介绍这一领域的基本知识。

离散事件系统和连续系统不同，它包含的事件的发生过程在时间和空间上都是离散的。例如交通管理、生产自动线、计算机系统和社会经济系统都是离散事件系统。在这类系统中，各事件以某种顺序或在某种条件下发生，并且大都属于随机性的。

【例 1.1】 某个理发馆，设上午 9:00 开门，下午 7:00 关门。显然，在这个理发馆系统中，存在理发师和顾客两个实体。也存在顾客到达理发馆的事件和理发师为顾客服务事件。因此描述该系统的状态是理发师（服务台）的状态（忙或闲）、顾客排队等待的队长、理发师的服务方式（如对某些特殊顾客的优先服务）。显然，这些状态变量的变化只能在离散的随机时间点上发生。

类似的例子很多，如订票系统、库存系统、加工制造系统、交通控制系统、计算机系统等等。

在连续系统的数字仿真中，时间通常被分割为均匀的间隔，并以一个基本时间间隔计时。而离散系统的数字仿真则经常是面向事件的，时间并不需要按相同的增量增加。

在连续系统仿真中，系统动力学模型是由系统变量之间关系的方程来描写的。仿真的结果是系统变量随时间变化的时间历程。在离散系统仿真中，系统变量是反映系统各部分之间相互作用一些事件，系统模型则是反映这些事件状态的数的集合，仿真结果是产生处理这些事件的时间历程。

由于离散时间系统固有的随机性，对这类系统的研究往往十分困难。经典的概率论、数理统计和随机过程理论虽然为这类系统的研究提供了理论基础，并能对一些简单系统提供解析解，但对工程实际中的大量系统，惟有依靠计算机仿真技术才能提供较为完整的和可靠的结果。

1.3.1 离散事件系统的数学模型

(1) 基本概念

① 实体或设备 离散事件系统有多种类型，但它们的主要组成部分基本相同。首先，它有一部分是活动的，叫“实体”。例如，生产自动线上待加工的零件，计算机系统待处理的信息，以及商店或医院中排队等待的顾客等。系统的工作过程实质上就是这种“实体”流动和接受加工、处理和服务的过程。其次，系统中还有一部分是固定的，叫“设备”。这些设备用于对实体进行加工、处理或服务，它们相当于连续系统中的各类对信息进行交换处理的元件。这些“设备”可能是机床、电话交换系统、营业员或者医生等。所以此处“设备”的含义是广泛的。实体按一定规律不断地到达（产生），在设备作用下通过系统，接受服务，最后离开系统。整个系统呈现出动态过程。

在目前通用方法是将实体和设备通称为“实体”，但前者称为“临时实体”，后者设备称为“永久实体”。

② 事件 描述离散事件系统的第二个重要概念是“事件”，事件是引起系统状态发生变化的行为。例如，在例 1.1 中，可以定义“顾客到达”为一类事件，而这个事件的发生引起系统的状态——理发师的状态从“闲”变成“忙”，或者引起系统的另外一个状态——顾客的排队人数发生变化。同样，一个顾客接受服务完毕后离开系统也可以定义为一类事件。

在离散事件仿真模型中，由于是依靠事件来驱动，除了系统中固有事件外，还有所谓“程序事件”，它用于控制仿真进程。例如要对例 1.1 的系统进行从上午 9:00 开门到下午 7:00 关门这一段时间内的动态过程仿真，则可以定义“仿真时间达到 10h 后停止仿真”作为一个程序事件，当该事件发生时即结束仿真模型的执行。

③ 活动 离散事件系统中的活动，通常用于表示两个可以区分的事件之间的过程，它标志着系统状态的转移。在例 1.1 中，顾客的到达事件与该顾客开始接受服务事件之间可称为一个活动，该活动使系统的状态（队长）发生变化，顾客开始接受服务到该顾客服务完毕后离开也可以视为一个活动，它使队长减 1。

④ 进程 进程由若干个有序事件及若干个有序活动组成，一个进程描述了它所包括的事件及活动间的相互逻辑关系及时序关系。如例 1.1 中，一个顾客到达系统、经过排队、接受服务、到服务完毕后离去可以称为一个进程。

事件、活动、进程三者之间的关系可用图 1.5 来描述。

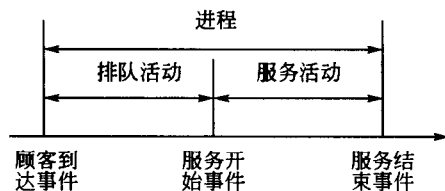


图 1.5 事件、活动、进程之间的关系

⑤ 仿真钟 仿真钟用于表示仿真时间的变化。在离散事件仿真中，由于引起状态变化的事件发生的时间是随机的，因此仿真钟的推进步长也完全是随机的。而且，两个相邻发生的事件之间系统状态不会发生任何变化，因而仿真钟可以跨过这些“不活动”周期。从一个事件发生时刻推进到下一事件发生时刻，仿真钟的推进呈现跳跃性，推进速度具有随机性。可见，在离散事件仿真模型中事件控制部件是必不可少的，以便按一定规律来控制仿真钟的推进。

⑥ 统计计数器 离散事件系统的状态随事件的不断发生也呈现出动态变化过程，但仿真的目的主要不是要得到这些状态是如何变化的。由于这种变化是随机的，某一次仿真运行得到的状态变化过程只不过是随机过程的一次取样。如果进行另一次独立的仿真运行所得到的状态变化过程可能完全是另一种情况。他们只有在统计意义下才有参考价值。