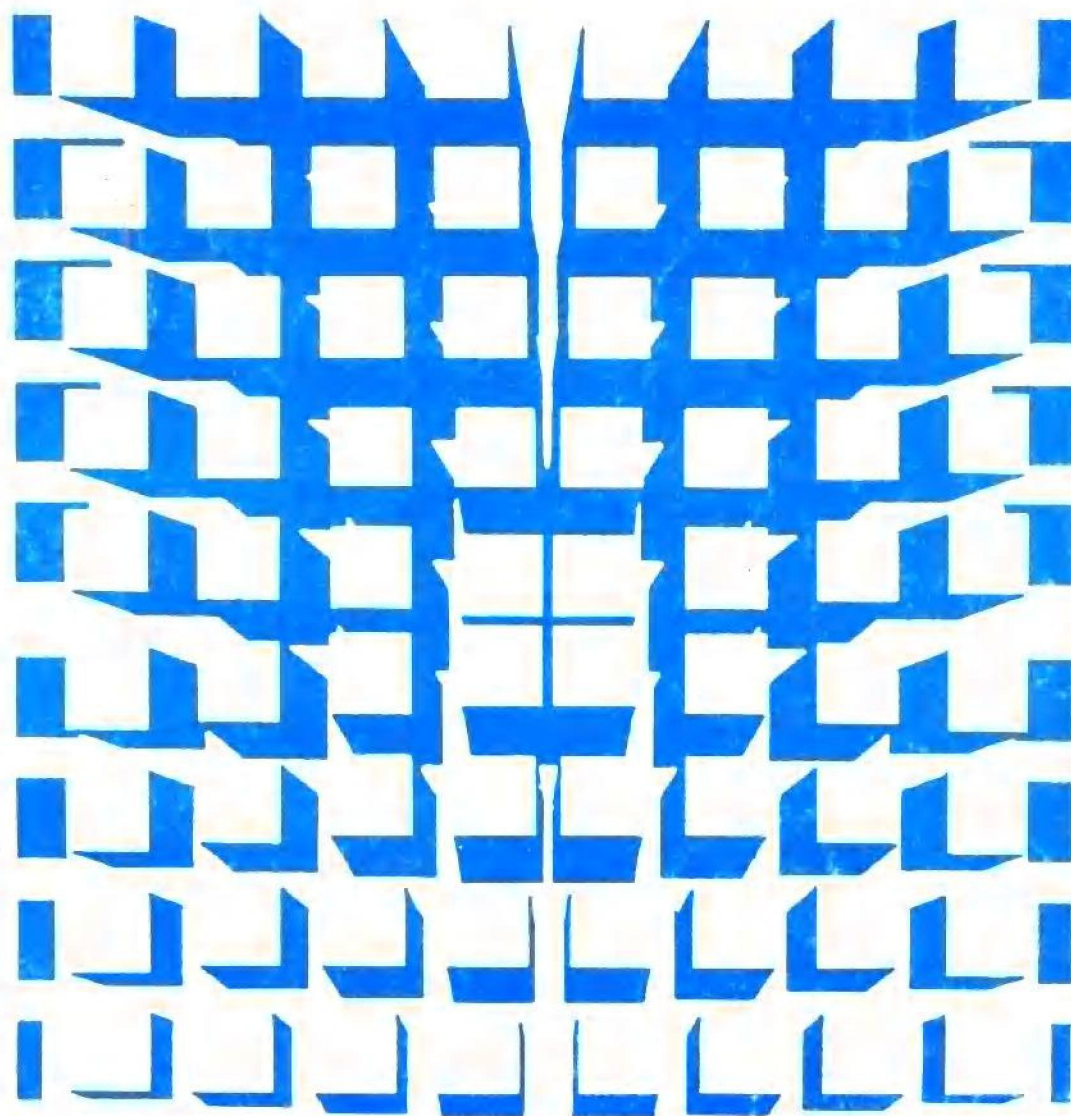
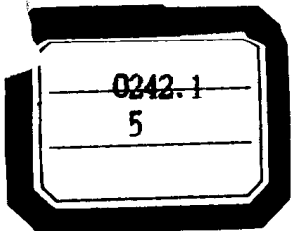


离散事件系统建模与仿真

王维平 朱一凡 编著
华雪倩 张汉江



国防科技大学出版社

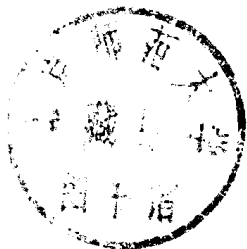


1751744

离散事件系统建模与仿真

王维平 朱一凡 编著
华雪倩 张汉江

11/1/40/24



国防科技大学出版社



北师大图书 B1370279

图书在版编目(CIP)数据

离散事件系统建模与仿真/王维平,朱一凡,华雪倩,张汉江;—长沙:国防科技大学出版社,1997.8

ISBN 7—81024—452—3

I 离散事件系统建模与仿真

II 王维平 朱一凡 华雪倩 张汉江

III ①离散事件 ②数学模型

IV O242.1

责任编辑:石少平

责任校对:张 静

封面设计:陆荣斌

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4555681 邮政编码:410073

新华书店总店北京发行所经销

湖南大学印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张:18.5 字数:427 千

1997 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1—3000 册

ISBN 7—81024—452—3

O·66 定价:22.00 元

前 言

离散事件系统是一类重要的系统。由于这类系统的状态变化仅在一些离散时刻点上由随机事件引发,而且其内部机制比较复杂,因此系统的模型一般无法表示成一组数学方程式。本世纪70年代开展了离散事件系统建模与仿真技术的研究,随后得到发展,并在系统工程及其相关领域得到广泛应用。但是,国内目前专门讲授离散事件系统仿真的教科书并不多见。

本书是为系统工程本科专业编写的教材,讲授离散事件系统仿真的基本原理、数学基础、建模方法、计算机模型设计与实现、仿真语言、决策应用,以及仿真结果分析和模型校验等方面的内容。在内容安排上,突出了建模方法及仿真模型设计与实现,弥补了其它有关书籍在这方面的不足。书中例题较多,每章附有练习题,适于教学使用;部分章节引入了作者最新科研成果,具有新颖独到之处。通过本书的学习,可以使学生较为系统、全面、深入地掌握离散事件系统建模与仿真方面的知识和技能。

全书由王维平组织编写和统稿。第一、二章由朱一凡编写,第三、四章由王维平编写,第五章由华雪倩、张汉江合作编写,第六章由王维平、朱一凡合作编写,第七章由华雪倩编写。编写过程中,参考了很多有关的著作,主要参考书名及作者已列于书后。这里,谨对全部作者表示诚挚的感谢,恕不一一列出作者的姓名。

在书稿的审定过程中,殷洪义教授提出了中肯的意见,在此表示衷心的感谢。

由于时间比较仓促,作者水平有限,书中的某些内容恐有不妥之处,望读者不吝赐教。欢迎相关专业的读者选用本书,并向未来的读者致意。

编者

1996年10月 于长沙

内容简介

离散事件仿真是系统仿真技术的一个重要研究领域,在系统管理与决策、网络通信、机械加工、交通运输以及导弹攻防对抗等方面得到了广泛的应用。本书较系统地介绍了离散事件系统建模与仿真的概念、原理、方法及应用,突出对离散事件建模方法和仿真策略的讲解,是关于离散事件仿真的一本内容比较全面的教材,可作为系统工程及相近专业本科生教材使用,也可供工程技术人员和管理人员作参考书使用。书中各章均附有习题,可以满足教学或个人自学的需要。

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 仿真技术的产生与发展	(1)
1.2 系统、模型与仿真	(5)
1.2.1 系统	(5)
1.2.2 模型	(7)
1.2.3 仿真	(9)
1.3 系统的数学模型	(11)
1.3.1 数学模型的分类	(11)
1.3.2 连续系统模型	(12)
1.3.3 离散事件系统模型	(16)
1.4 系统仿真的研究内容和方法	(18)
1.4.1 系统仿真的步骤	(18)
1.4.2 系统建模方法学	(21)
1.4.3 连续系统计算机仿真方法	(23)
1.4.4 离散事件系统仿真	(25)
1.5 系统仿真的应用与前景	(27)
1.5.1 系统仿真的意义与特点	(27)
1.5.2 计算机仿真的应用	(28)
1.5.3 计算机仿真技术的发展趋势	(30)
练习 1	(32)
第 2 章 概率统计基础	(33)
2.1 概率统计基本概念	(33)
2.2 离散事件系统仿真中常用的概率分布形式	(35)
2.2.1 离散分布	(35)
2.2.2 连续分布	(36)
2.2.3 系统概率分布模型	(41)
2.3 随机变量模型的确定	(43)
2.3.1 分布类型假设	(43)
2.3.2 分布参数估计	(46)
2.3.3 分布假设检验	(48)
2.4 随机数的产生	(57)
2.4.1 伪随机数	(57)

2.4.2	伪随机数产生方法	(59)
2.4.3	伪随机数序列的检验和确认	(62)
2.5	随机变量的产生	(68)
2.5.1	常用的随机变量产生方法	(68)
2.5.2	常用分布的随机变量产生	(74)
练习 2		(78)
第 3 章	离散事件系统建模方法	(80)
3.1	基本建模术语	(80)
3.2	实体流图法	(81)
3.2.1	实体流程图	(81)
3.2.2	模型的人工运行	(85)
3.3	活动周期图法	(88)
3.3.1	活动周期图	(88)
3.3.2	模型的人工运行	(95)
3.4	Petri 网方法	(99)
3.4.1	Petri 网的定义及其图示方法	(99)
3.4.2	网系统	(100)
3.4.3	Petri 网特性分析	(104)
3.4.4	小结	(107)
3.5	Euler 网方法	(108)
3.5.1	Euler 图与奇异 Euler 图	(108)
3.5.2	Euler 网	(109)
3.5.3	初级 Euler 网系统	(110)
3.5.4	高级 Euler 网系统	(114)
练习 3		(120)
第 4 章	仿真模型设计与实现	(123)
4.1	仿真策略	(123)
4.1.1	事件调度法	(123)
4.1.2	活动扫描法	(124)
4.1.3	三段扫描法	(125)
4.1.4	进程交互法	(126)
4.2	仿真模型设计	(128)
4.2.1	面向事件的仿真模型	(128)
4.2.2	面向活动的仿真模型	(130)
4.2.3	面向进程的仿真模型	(138)
4.3	仿真模型的计算机实现	(139)
4.3.1	面向事件仿真模型的实现	(139)
4.3.2	面向活动仿真模型的实现	(168)

练习 4	(178)
第 5 章 SLAM 仿真语言	(179)
5.1 SLAM 仿真建模概述	(179)
5.2 SLAM 网络建模	(180)
5.2.1 单队列单服务台的 SLAM 网络仿真模型	(180)
5.2.2 节点和分支	(184)
5.2.3 用户函数	(192)
5.2.4 SLAM 输入输出仿真控制说明语句	(192)
5.3 SLAM 离散事件仿真建模	(199)
5.3.1 排队系统的离散事件仿真模型	(200)
5.3.2 基本函数和子程序	(202)
5.3.3 网络与离散事件相结合的 SLAM 仿真	(209)
5.4 SLAM 连续系统仿真	(211)
5.4.1 SLAM 连续系统仿真的程序结构	(211)
5.4.2 SLAM 连续系统模型构造	(212)
5.4.3 SLAM 连续系统模型示例	(213)
练习 5	(218)
第 6 章 仿真结果分析与模型校验	(220)
6.1 终态仿真结果的分析	(220)
6.1.1 重复运行法	(220)
6.1.2 序贯程序法	(222)
6.2 稳态仿真结果的分析	(224)
6.2.1 批均值法	(224)
6.2.2 稳态序贯法	(226)
6.2.3 再生法	(227)
6.3 方差缩减技术	(229)
6.3.1 公用随机数法(CRN)	(229)
6.3.2 对偶变量法 AV	(230)
6.4 仿真模型确认、验证与认定	(231)
6.4.1 基本概念	(231)
6.4.2 模型校验管理方法	(231)
6.4.3 模型验证方法	(234)
6.4.4 模型确认方法	(240)
6.4.5 灵敏度分析方法	(244)
6.4.6 模型校验文本化方法	(246)
练习 6	(248)
第 7 章 离散事件仿真在决策中的应用	(250)
7.1 离散事件仿真的应用领域	(250)

7.2 排队系统仿真	(250)
7.2.1 排队系统基本知识	(250)
7.2.2 排队系统的建模	(253)
7.2.3 排队系统仿真实例	(256)
7.3 库存系统仿真	(263)
7.3.1 库存系统的基本知识	(263)
7.3.2 库存系统模型	(264)
7.3.3 库存系统仿真实例	(267)
7.4 随机网络系统仿真	(272)
7.4.1 网络计划基本概念	(272)
7.4.2 随机网络仿真实例	(273)
7.5 三类典型系统的仿真应用示例	(277)
7.5.1 柔性制造系统(FMS)的SLAM 仿真。	(277)
7.5.2 C ³ I 系统的 Petri 网模型	(279)
7.5.3 防空导弹攻防对抗系统的 Euler 网模型	(282)
练习 7	(285)
参考文献	(288)

第1章 概论

在现实世界中,事物并不是孤立存在的,它们之间存在着内在的和有机的联系。作为一个研究对象,我们将这种由相互联系、相互作用的事物或元素构成的统一整体称为系统。

随着人们认识自然和改造自然的能力和手段的不断增强,作为实践经验总结的科学和技术水平也有了迅猛的发展。从开普勒的行星运动三大定律,到牛顿的万有引力定律,再到爱因斯坦的相对论,利用数学手段对事物描述的理论越来越完善,而且研究的范围也越来越广,从身边发生的自然现象到广袤无垠的宇宙奇观。长期以来,人们已经充分认识到利用数学模型去描述所研究系统的优越性,并且逐渐地发展了系统研究和系统分析理论。但是,由于数学手段的限制,人们对复杂事物和复杂系统建立数学模型并进行求解的能力是非常有限的。电子计算机的出现,对科学技术的发展产生了无可估量的和深远的影响。许多复杂的数学模型可以通过计算机来进行计算求解。由此,利用数学模型描述系统的特征并进行求解的手段逐步发展成为现代的计算机仿真技术。计算机仿真技术有着巨大的优越性,利用它可以求解许多复杂而无法用数学手段解析求解的问题,利用它可以预演或再现系统的运动规律或运动过程,利用它可以对无法直接进行实验的系统进行仿真试验研究,从而节省大量的能源和费用。由于计算机仿真技术的优越性,它的应用领域已经非常广泛,而且也越来越受到普遍的重视。诚然,计算仿真技术中仍然存在着许多需要解决的问题,需要不断进行努力探索。

1.1 仿真技术的产生与发展

从一般意义上讲,系统仿真可以被理解为在对一个已经存在或尚不存在但正在开发的系统进行研究的过程中,为了了解系统的内在特性,必须进行一定的实验;而由于系统不存在或其它一些原因,无法在原系统上直接进行实验,只能设法构造既能反映系统特征又能符合系统实验要求的系统模型,并在该系统模型上进行实验,以达到了解或设计系统的目的。由此可以看出,系统仿真本质上是由三个要素构成的,即系统,系统模型和实验。系统是问题的本源,是系统分析的目的,实验是解决问题达到目的的手段,而系统模型则是连接系统和实验(目的和手段)之间的桥梁。

显然,系统仿真是一项社会实践活动。凡是包含系统、系统模型和系统实验三个要素的活动都可以广义地理解为系统仿真活动。

系统仿真方法的研究和应用已经有了很长的历史。在古代,人们已经从长期的生产劳动实践活动中总结出了朴素的仿真思想。例如,古代的房屋屋顶多数为桁梁式建筑,在建房过程中需要使用大量的木料。为了使屋顶稳定牢靠,除了要选择材质较好粗细适当的木料外,整个屋顶的桁架结构也必须满足一定的几何形状要求;也就是说,桁梁上的每一根木料都有确定的长度尺寸要求,不论木料长了还是短了都可能影响整个屋顶结构的稳定

性。那么如何来确定屋顶上每一根木料的具体长度呢,显然不能拿实际的木料到屋顶上去试,这样既花费工时又可能造成木料不必要的浪费。这个问题对现代人来说是非常简单的,利用几何和三角学的原理立刻可以解决。但在古代科学尚不发达的情况下,解决的办法只有一个,即在地面上按实际尺寸的一定比例模拟制作一个屋顶。经过若干次实验确定了稳定的结构之后,量出模拟屋顶上每一根相应木料的长度,再按比例放大,即可得到实际木料所需的长度。这是一个很典型的通过构造模型并进行实验从而获得系统特性的系统仿真实例。

仿真作为一门技术科学是在 19 世纪末 20 世纪初工业技术有了长足的发展之后而确定下来的。而且伴随着工业技术的进步,仿真技术也在不断地发展。例如,随着电子技术的发展,人们发现可以利用模拟电路去研究工业控制过程中的实际问题,由此而产生了现代控制理论。而这个模拟电路就是工业控制系统的一个模型,通过在这个模型上进行实验,就可以解决实际控制过程中产生的问题。又例如在飞机设计过程中,对飞机的外形要求是非常严格的,因为气动外形将最终影响整个飞机的飞行特性。由于飞机造价的昂贵,用真实的飞机去进行实验是不现实的。为了获得飞机外形的气动数据,尤其是飞机机翼的气动数据,必须制作各种不同形状的机翼模型放到风洞中进行实验。风洞实验的结果改进了飞机的设计理论,而利用这个理论又可以去设计新型的飞机。在这个时期,人们在利用仿真方法研究或求解问题时,都是利用实物去构造与实际系统成比例的物理模型,再在这个模型上进行实验。如果这种实验是破坏性的,那么每次实验都要重新构造实物模型,带来很大的麻烦和浪费。

1946 年,世界上第一台电子计算机在美国诞生。在随后的 50 年中,计算机技术的发展速度惊人,当今计算机的计算能力和信息处理能力已经比最初的那台笨重的以电子管为主体的机器提高了成千上万倍。如果说早期的仿真主要是利用实际物理模型的比例仿真,那么,现代仿真技术则是与计算机的发展密切相关的。目前通常所讲的仿真技术一般就是指计算机仿真技术。随着计算机硬件和软件水平的提高,计算机仿真技术也得到了很大的发展。

(1) 仿真计算机的发展

仿真计算机就是用于系统仿真的计算机。仿真计算机根据其结构可分成模拟计算机、数字计算机和混合计算机三种类型。

最初用于仿真目的的计算机是模拟计算机,它出现于 20 世纪 50 年代。模拟计算机是利用电子运算放大器组成各种动态部件(如积分器、惯性部件等)以及非线性函数部件,然后利用排题板将这些部件连接成系统,并在这个系统上进行实验,再通过输入输出部件将模拟结果输出的模拟计算装置。由加法器、乘除器、积分器和函数器等基本运算部件连接起来即构成系统的仿真模型。50 年代,由于技术上的因素,数字仿真机刚刚开始发展,在这个时期,模拟计算机占有压倒优势。

数字计算机是一种用 0 和 1 断续变化的电脉冲数码串表示所运算量的数字式计算装置。它主要由运算处理器、存储器、输入输出设备以及控制器组成。数字计算机内存中存放的是由一条条代码和指令组成的程序,该程序是按照某种算法从系统的数学模型转换而来。

混合计算机是把模拟技术和数字技术灵活结合的一种计算机。归结起来,它可以分为两类,混合模拟计算机和数字模拟混合计算机系统。混合模拟计算机是在模拟计算机的基础上加入大量的数字逻辑部件模拟开关及模拟/数字混合式部件的一种计算机。混合模拟机不仅能完成原有模拟机功能,而且还具有迭代运算和描述混合系统模型的能力。数字模拟混合计算机系统是由模拟机/混合模拟机、数字计算机及其接口设备组成的计算系统。混合计算机系统主要用于大型、高速、实时及超实时系统仿真,它的造价非常昂贵。

50年代末,由于导弹技术和卫星技术发展的需要,出现了混合模拟机和混合计算机系统。60年代到70年代中期是混合计算机发展的鼎盛期。与此同时,数字仿真机也蓬勃发展。特别是由于性能完善、价格低廉的小型通用数字机大量进入市场及数字仿真算法和高级仿真语言研制的进展,到了70年代中期,中型混合机的性能价格比已不能与配置完备仿真软件的小型数字计算机抗衡。自70年代末期起,数字仿真机已逐渐占领仿真计算机的主要市场;而混合计算系统在高速、自动化等方面也取得进展,具有了一定的地位。

进入80年代以后,个人计算机的出现,使计算机向高性能微型化发展。通用的16位和32位微型计算机,由于价格低廉和易于推广而受到广泛重视。近年来,科学与工程工作站由于具有良好的性能价格比、高运算速度、大容量存贮、高分辨率的图形显示、用户友好的人机交互环境,优良的图形处理功能和较强的网络功能,再配上高性能的建模与仿真软件,已经受到仿真界的极度重视。

(2) 仿真软件的发展

数字仿真软件泛指一类面向仿真用途的应用软件。它的特点是面向问题和面向用户。它的功能包括模型描述的规范及处理、仿真实验的执行与控制、仿真结果的分析与演示、模型和数据的存储与检索。根据功能仿真软件可以分为仿真程序包、仿真语言及仿真环境三大类。仿真软件的发展是离不开计算机软件尤其是计算机程序设计语言的发展的。随着计算机从电子管到晶体管再到大规模集成电路不断地发展和进步,计算机的运算速度和存储能力都有显著的提高,因此也就有了计算机程序设计语言从机器语言到汇编语言再到高级程序设计语言的发展历程。而这一切又为仿真软件的产生与发展提供了必要的条件。

历史上第一个仿真软件是由塞尔弗里奇(R. G. Selfridge)在1955年开发的,他完成了利用辛普森方法进行数值积分的仿真程序设计工作。从那之后,仿真软件的发展经历了四个阶段:

第一阶段是从50年代到60年代初期,以Fortran语言为代表的通用程序设计语言阶段。Fortran语言是达到成熟的第一个高级程序设计语言,当时几乎所有用于求解数学表达式的程序都是用Fortran语言编写成的。即使在目前,也有许多大型的通用仿真语言是基于Fortran语言编制的。

第二阶段是60年代到70年代,出现了多种仿真程序包及初级仿真语言。这个时期仿真软件主要解决的问题是利用数字仿真方法求解常微分方程组。例如1961年由贝尔实验室开发的用于实现数据采集系统仿真的面向框图的程序BLODI(BLOCK Diagram compiler),1962年为了工业动力学系统仿真专门开发的语言DYNAMO(DYNAMIC Models),1963发表的用于求解常微分方程组的仿真程序MIDAS(Modified Integration Digital

Analog Simulator)等等。直到1967年,为了促进已有的几十种数字仿真语言的标准化,美国计算机仿真学会SCS提出了CSSL(Continuous System Simulation Language)标准,后来开发的仿真语言大都遵循这个标准。在此阶段的仿真语言中,比较典型的还有1960年由IBM公司的G. 戈登(Gordon)开发的高度结构化的利用进程交互法进行排队问题仿真的专用仿真语言GPSS(General Purpose Simulation System)。

第三阶段在70年代到80年代初期,出现了高级完善的商品化仿真语言。这个阶段仿真语言的特点是在以下几个方面比早期的仿真语言更加成熟和全面。

- 模型的表达能力
- 数值性能和算法
- 语言的结构特征
- 模型验证
- 程序执行方式
- 数据管理和处理能力
- 输入输出特性

例如在70年代中期推出的算法全面,功能强大的求解常微分方程和差分方程问题的仿真语言CSSL-IV和ACSL(Advanced Continuous Simulation Language),以及1971年推出的用于离散事件仿真的可以用类似自然语言自由格式描述系统模型的仿真语言Simscrip II.5和应用广泛的随机网络建模的SLAM仿真语言。

第四阶段是80年代中期开始的一体化建模与仿真环境研究。其背景是

- 随着建模与仿真工作要求的提高,已开发的各种仿真软件经常不能协调地工作
- 对仿真语言的要求越来越复杂
- 存在大量的数据处理及文档化工作
- 不同的用户(建模者,仿真实验人员,决策者)对仿真工具有不同的要求
- 计算机网络技术和数据库技术有较大的发展

一体化建模与仿真环境的主要性能表现在

- 支持建模与仿真的全生命周期活动
- 集成化程度高
- 方便友好的用户接口
- 初步的知识处理能力
- 模型与仿真的质量保证措施
- 开放性

美国的Pritsker公司于1984年推出集成化建模仿真语言环境TESS,第一次通过数据库系统将建模、仿真和输出结果分析有机地组成了一个完整的系统。

(3) 仿真建模方法学的发展

仿真是在系统模型上进行实验的过程。利用计算机进行仿真就必须建立能够被计算机识别并在计算机上运行的系统模型。也就是说,通过对系统进行分析,首先建立描述系统行为规律的系统模型,再将其转换为计算机仿真程序。仿真运算过程就是对系统模型求解的过程。为了通过仿真分析能够准确地掌握系统的内在运动规律,在仿真中以下两个方

面是非常重要的。一是建立准确的系统模型,二是获得正确的仿真结果。

早期计算机仿真的对象是对工程技术领域中的实际物理过程进行仿真,该领域中的问题(例如系统的控制和优化)涉及机械、电子、制造、航空等诸多背景,这些问题的特点是可以建立起以时间为基准的数学模型,即连续时间模型和离散时间模型,包括常微分方程、偏微分方程和差分方程等。利用实际工程背景中的原理和定理可以推导出所研究问题的时间微分或差分方程模型,而根据系统自身的特征和试验数据可以确定模型中的参数。在 50 年代至 60 年代,人们在差分方程和微分方程模型的结构特征化和参数辨识方面花费了相当的精力并取得了很大的成果。与此同时,对求解这些方程的算法的研究也在不断发展,产生了能够满足快速和实时等多种不同要求的仿真算法和仿真软件。

进入 70 年代,仿真逐步向政治、经济、军事等社会科学领域渗透,出现了许多用于求解这些领域中问题的数学模型。而随着对这些问题的深入分析和了解,数学模型从早期的微分方程和差分方程模型逐渐向能够反映问题离散和随机特点的离散事件逻辑流图和网络图模型过渡。同时,从求解静态模型的蒙特卡罗(Monte Carlo)法到研究系统动态模型的以事件调度法、活动扫描法和进程交互法为代表的仿真策略,离散事件模型的仿真算法研究也取得了很大的发展。

由于离散事件模型的构造比微分方程和差分方程复杂,而且建立的模型多种多样,即使对同一个系统也可以建立许多不同的模型,因此人们一直在探索用统一的建模方法来指导和简化离散事件模型的建模过程。70 年代中期,B. P. 齐格勒(B. P. Zeigler)提出了模型的规范化和形式化描述理论,使得建模方法学前进了一大步。从那时起,结合计算机软件方法学的发展,系统建模理论中引入了层次化模块化方法和面向对象的思想,为建立集成化交互式建模环境提供了良好的基础。

1.2 系统、模型与仿真

1.2.1 系统

系统仿真的研究对象是具有独立行为规律的系统。所谓系统是指相互联系又相互作用着的对象的有机组合。从广义上讲,系统的概念是非常广阔的。大到无垠的宇宙世界,小到分子原子,我们都可以称之为系统。

根据系统的物理特征可以将系统划分为两大类,即工程系统和非工程系统。所谓非工程系统是指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渐认识的系统。例如社会、经济、管理、交通、生物系统等属于非工程系统。所谓工程系统是指人们为满足某种需要或实现某个预定的功能,利用某种手段构造而成的系统。工程系统的例子非常多,如机械、电气、动力、化工、武器系统等。

图 1.1 所示弹道导弹飞行控制系统是一个工程系统的例子。导弹飞行控制系统的根本任务是保证弹道导弹以足够的精度把其战斗部(即弹头)送到预定的目标区。弹道导弹的飞行控制包括两个方面,一是飞行弹道的控制,即控制导弹的质心运动;二是对飞行姿态进行控制,即控制导弹绕其质心的运动。制导系统能够根据打击目标的要求,形成控制导弹沿着预定弹道飞行所需的指令和控制信号。姿态稳定系统可以使导弹具有飞行的稳定性,是制导系统正常工作的基础。

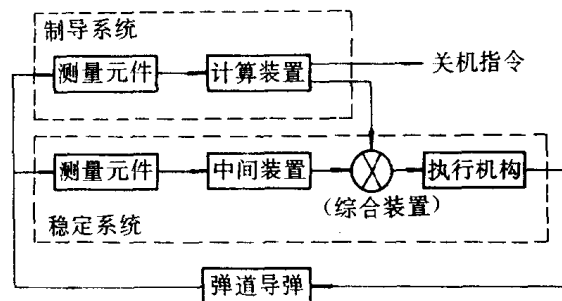


图 1.1 弹道导弹飞行控制系统

图 1.2 所示的商品销售系统即是一个非工程系统。

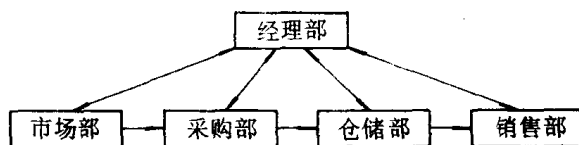


图 1.2 商品销售系统

在这个系统中,各部门之间既相对独立又相互联系,总经理负责各个部门之间的协调,并作出最终的决策,以期使整个系统获最大效益。

对于一个系统来说,不论它是大是小,都必然存在三个要素,即实体、属性和活动。

所谓实体是指组成系统的具体对象。例如,弹道导弹飞行控制系统中的实体有弹道导弹弹体、测量单元、计算装置、执行机构等;在商品销售系统中的实体有经理、部门、商品、货币、仓库等。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。

所谓属性是指实体所具有的每一项目有效特性。例如,在弹道导弹飞行控制系统中,导弹弹体的属性(与控制系统有关的属性)有导弹的飞行速度和飞行高度、导弹的飞行姿态角等,测量单元的属性有测量范围,测量误差等;在商品销售系统中,部门的属性有人员数量、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。

所谓活动是指随着时间的推移,在系统内部由于各种原因而发生的变化过程。例如弹道导弹飞行速度和飞行高度的增加,商品销售系统中库存商品数量的变化,零售商品价格的的增长等。

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相互作用而引起实体属性的变化,使得在不同的时刻,系统中的实体和实体属性都可能会有所不同。这种变化通常用状态的概念来描述。在任意给定时刻,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。

系统不是孤立存在的。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由于系统之外出现的变化而受到影响。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。在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环境之间的边界。系统边界包围系统中的所有实体。

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,如果仅考虑商品仓库库存量的变化情况,那么系统只需包括采购部门、仓库以及销售部门即可。但若研究商品进货与销售的关系时,系统中还要包括市场调查部门,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。

另一方面,系统在某些条件下是可以分解的。也就是说,构成系统的某个实体本身也可以看成为一个单独的系统来进行分析研究,这个系统称为原系统的一个子系统或分系统。例如在弹道导弹飞行控制系统中,制导系统和姿态稳定系统可分别看成是整个控制系统的一个子系统。

系统研究包括系统分析、系统综合和系统预测等方面。研究系统首先需要描述清楚所研究系统的实体、属性、活动及环境。因为系统的概念不仅与实体有关,而且与研究者的目的有关。只有在对实体、属性、活动、环境作了明确的描述之后,系统才是确定的。

1.2.2 模型

研究一个系统以便了解系统中各组成部分之间的关系或预测系统在新的策略下的运行规律是很有意义的。为了深入研究系统,有时可能需要对系统本身进行实验。但通常有许多原因使得不能采用直接在真实系统上做实验的方案:

①系统不存在。例如系统可能还处在方案论证或设计阶段,在样机生产出来之前无法在新的系统上直接进行实验。

②在系统上进行的实验会造成巨大的破坏和损失。例如火箭发动机和控制系统必须在地面经过多次模拟实验后才能用于真正的火箭发射,又如核电站中新的生产控制方案实施之前也必须经过模拟实验验证。直接在真实系统上进行实验可能会造成无法预料的严重后果。

③系统无法恢复。例如在经济活动中,一个新的经济政策出台后需要经过一段时间才能确定它的影响,而经过这段时间后,即使发现这个新的经济政策是错误的,它所造成的损失已是无法挽回的了。

④实验条件无法保证。例如实验的时间太长费用太高,或者是在多次实验中无法保证实验的环境完全一致而影响对实验结果的判断,尤其是当人是系统实验的一部分时,由于他知道自己是一部分,行动往往会和平时不一样,因此会影响实验的效果。

鉴于上述原因,构造一个真实系统的模型,在模型上进行实验成为对系统进行分析、研究十分有效的手段。

系统模型可以定义为:为了达到系统研究的目的,用于收集和描述系统有关信息的实体。

模型是对相应的真实对象和真实关系中那些有用的和令人感兴趣的特性的抽象,是对系统某些本质方面的描述,它以各种可用的形式提供被研究系统的信息。模型描述可视作是对真实世界中的物体或过程相关信息进行形式化的结果。模型在所研究系统的某一侧面具有与系统相似的数学描述或物理描述。从某种意义上说,模型是系统的代表,同时也是对系统的简化。另一方面,模型应足够详细,以便从模型的实验中取得关于实际系统

的有效结论。

由一个实际系统构造一个模型的任务一般包括两方面的内容：第一是建立模型结构，第二是提供数据。在建立模型结构时，要确定系统的边界，还要鉴别系统的实体、属性和活动。而提供数据则要求能够使包含在活动中的各个属性之间有确定的关系。在选择模型结构时，要满足两个前提条件。一是要细化模型研究的目的，二是要了解有关特定的建模目标与系统结构性质之间的关系。

一般来说，系统模型的结构具有以下一些性质。

①相似性

模型与所研究系统在属性上具有相似的特性和变化规律，这就是说，真实系统的“原型”与“替身”之间具有相似的物理属性或数学描述。

②简单性

从实用的观点来看，由于在模型的建立过程中，忽略了一些次要因素和某些非可测变量的影响，因此实际的模型已是一个被简化了的近似模型。一般而言，在实用的前提下，模型越简单越好。

③多面性

对于由许多实体组成的系统来说，由于其研究目的不同，就决定了所要收集的与系统有关的信息也是不同的，所以用来表示系统的模型并不是唯一的。由于不同的分析者所关心的是系统的不同方面，或者由于同一分析者要了解系统的各种变化关系，对同一个系统可以产生相应于不同层次的多种模型。

在模型建立中一般要遵循以下一些基本原则：

①清晰性

一个复杂的系统是由许多与系统组成的，因此对应的系统模型也是由许多子模型构成的。在子模型之间除为了研究目的所必需的信息联系外，相互耦合要尽可能少，结构要尽可能清晰。

②相关性

模型中应该只包括系统中与研究目的有关的那些信息。例如对一个空中调度系统的研究，只需要考虑飞行的方位航向，而无需涉及飞机的飞行姿态。虽然与研究目的无关的信息包含在系统模型中可能不会有很大害处，但是因为它会增加模型的复杂性，从而使得在求解模型时增加额外的工作，所以应该把与研究目的无关的信息排除在外。

③准确性

建立系统模型时，应该考虑所收集的、用以建立模型的信息的准确性，包括确认所应用的原理和理论的正确性和应用范围，以及检验建模过程中针对系统所做假设的正确性。例如在建立导弹飞行动力学模型时，应将导弹视为一个刚体而不是一个质点，同时要注意导弹在高超音速运动中的特殊性。如果仅考虑导弹的射程问题，导弹在大气中的运动可以做相应的简化，但如果是考虑导弹的命中精度问题，就不能做这样的简化。

④可辨识性

模型结构必须具有可辨识的形式。所谓可辨识性是指系统的模型必须有确定的描述或表示方式，而在这种描述方式下与系统性质有关的参数必须有唯一确定的解。若一个模