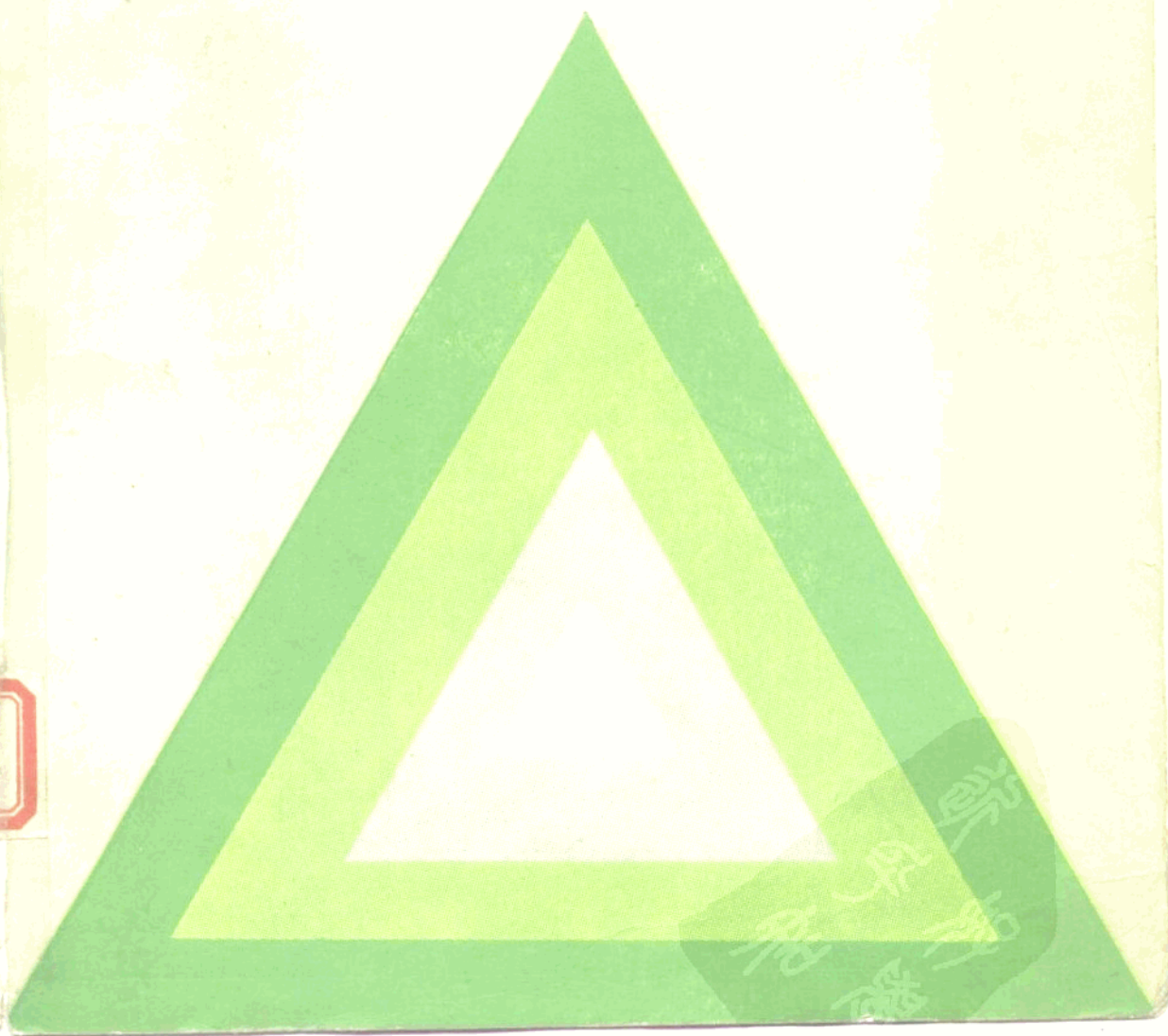


现代计算机仿真技术 及其应用

王正中 屠仁寿 等编著



前 言

模型研究方法是人类最古老的研究自然界的科学工程方法之一。由于电子计算机的出现,现代模型研究方法——仿真方法成了最近 30 年来发展最快的一种现代科学工程方法。近 10 年来,计算机仿真技术的发展有两个突出的方面,即仿真工具的改进和仿真应用领域扩大。

当今,仿真工作者可以利用一台基于微处理机的仿真工作站进行离线(某些情况下甚至是在线)的系统仿真研究。这种仿真工作站所能提供的仿真环境包括:32 位字长、2~4Mips 的处理能力;一体化的图形功能;交互能力很强甚至具有智能的仿真应用软件。在 10 年前,这对于仿真工作者来说是难以想象的。此外,基于并行处理原理发展起来的外围阵列处理机 PAP 以及小型超级计算机,给时间要求严格的实时系统仿真带来了革命性的进展。它们的性能价格比超过了巨型机和混合计算机。

仿真技术发展的另一个方面是应用领域的扩大。仿真技术不仅在传统的工程技术领域(如航天、航空、核动力、化工、电力等方面)继续发展,同时还扩大到其他非工程领域。近 10 年来,人们对于社会、经济、环境、生态以及人类未来的关心,促使仿真工作者把更多的注意力转移到上述这些非工程系统的研究中去。而对于非工程系统的研究则导致了计算机辅助建模方法学的新发展。在传统的工程系统的研究中,其对象一般具有白盒的性质;建模过程往往是在结构一级而不是在行为一级上进行的;信息源主要来自人类的先验知识;数据仅用于结果的检验;演绎法是主要的建模方法。在非工程系统的研究中,其对象往往具有黑盒的性质;信息源主要来自观测的数据;非结构化的特征使得建模过程必须在行为一级并采用归纳法进行。因此,计算机辅助建模的方法学现已成为仿真方法学的一个主要组成部分。

本书主要是为应用计算机仿真技术的专业工作者编写的,其材料一部分来自作者们的工作实践,另一部分来自近 10 年来公开发表的各种文献。主要内容分为四个部分:第一部分包括导论和第一章,主要介绍计算机辅助建模的方法学。第二部分包括第二、三、四章,主要介绍仿真计算机系统、仿真方法及人工智能在仿真中的应用。第三部分包括五、六、七章,主要介绍仿真语言,其中包括连续系统仿真软件、系统动力学仿真语言、离散事件系统仿真语言。第四部分(第八章)介绍应用实例。

本书是集体工作的产物。全书由王正中、屠仁寿同志主编。参加本书编写的还有郭宝柱(5.2 节中的部分内容),郭树玲(5.1 节),罗圣仪(5.3 节),吴连伟(2.4 节),周净、梁青(第六章的部分内容),马骏、侯小军、陈方(第七章的部分内容)。此外,还有许多朋友为本书的顺利编写和出版给予了大力支持和热情帮助,在此谨致衷心的感谢。

由于仿真技术涉及的知识面很广,加之作者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

目 录

系统仿真导论	1
0.1 仿真模型	2
0.2 仿真实验	3
0.3 仿真工具	4
0.4 仿真方法	6
0.5 结语	7
第一章 数学模型与建模方法学	8
1.1 概述	8
1.2 系统、模型、仿真	10
1.3 数学模型	12
1.4 数学建模方法学	24
1.5 “软”系统建模方法学的探讨	33
1.6 全局建模的计算机环境	38
第二章 仿真计算机系统	47
2.1 现代仿真计算机的发展与评价	47
2.2 全并行数字仿真计算机系统 System 10	58
2.3 多微机并行仿真系统——DPP	67
2.4 仿真工作站	76
第三章 数字仿真方法	89
3.1 连续系统数字仿真算法	90
3.2 连续系统仿真语言	109
3.3 离散事件系统仿真方法	115
3.4 现代仿真语言的性能	135
第四章 人工智能与仿真	140
4.1 人工智能及专家系统发展历史	140
4.2 人工智能技术在仿真中的应用	142
4.3 SASEST 系统简介	145
第五章 连续系统仿真软件	151
5.1 模型转换和辨识软件 TRIP	151
5.2 连续系统仿真语言 CSSL	177
5.3 图形交互式连续系统仿真软件 GISP	199
第六章 系统动力学仿真语言 M-DYNAMO/C	214
6.1 系统动力学概述	214
6.2 系统动力学的基本概念	220
6.3 系统动力学仿真语言 M-DYNAMO/C	240
6.4 系统动力学仿真应用举例	258

第七章 离散事件系统仿真语言	274
7.1 离散事件系统仿真策略与结构模型	274
7.2 GPSS 语言简介	275
7.3 MGPSS/F 仿真语言	282
7.4 Autop MGPSS/C 仿真语言	308
第八章 应用实例	316
8.1 直升飞机的实时仿真	316
8.2 增压水反应堆核电站的动力学仿真	324
8.3 电力供求系统的仿真	331
8.4 生育控制政策对人口系统影响的计算机仿真	337
8.5 城市交通系统的仿真	356
8.6 计算机系统的性能评价模型与仿真	373
参考文献	381

系统仿真导论

“仿真”一词对应的英文通常是 Simulation, 它的另一个曾用译名是“模拟”。1961 年, G. W. 摩根赫特 (G. W. Morgenthater) 首次对“仿真”一词作了技术性的解释, 他认为, “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复现。近 20 年来, 仿真技术的发展使人的认识与概念得以深化。这种演变过程在 A. 艾伦 (A. Alan), B. 普里斯基 (B. Pritsker) 撰写的“仿真定义的汇编”一文中得到了集中反映。今天, 一个比较流行于工程技术界的技术定义是: 仿真是通过对系统模型的实验去研究一个存在的或设计中的系统。这里所指的系统是广义的, 所谓系统是指由相互制约的各个部分组成的具有一定功能的整体。这种定义概括了所有工程的 (技术的) 或非工程的 (非技术) 系统。电气、机械、机电、水力、声学、和热学系统等都属于工程系统, 而社会、经济、生态、生物和管理系统等则都属于非工程系统。这里, 没有限定模型的类型, 它广泛地概括了静态与动态、数学与物理、连续与离散等模型。此外, 还强调了仿真技术本身的性质, 以区别于数值计算的求解方法。

现代仿真技术的发展是与控制工程、系统工程及计算技术的发展密切相联系的。控制工程和系统工程的发展促进了仿真技术的广泛应用, 而计算机的出现以及计算技术的发展, 则为仿真技术提供了强有力的手段和工具。建立一个系统的数学模型并使其能在计算机上进行运转和实验, 既经济又灵便, 因此, 计算机仿真越来越在仿真中占有重要的地位。

二次世界大战末期, 对于飞行控制动力学系统的研究, 促进了模拟仿真技术的发展。1947 年研制出了第一台通用电子模拟计算机, 50 年代末期至 60 年代, 对于洲际导弹和宇宙飞船的姿态及轨道控制动力学研究, 促进了混合仿真技术的发展。1958 年第一台混合计算机系统, 用于洲际导弹的仿真; 1961 年生产出第一台商用混合计算机系统。60 年代, 阿波罗登月计划的成功, 使得系统工程学科受到了重视和发展。70 年代以来, 系统工程被广泛应用于社会、经济、生态和管理等非工程系统的研究和预测, 促进了系统动力学和离散事件系统仿真技术的发展。微电子技术和计算技术的飞速进步, 特别是数字计算机速度的提高和价格的下降, 使得连续系统数字仿真技术得到了推广。事实上, 已经研制出了大量的仿真程序包和仿真语言, 基于并行处理原理的专用全数字仿真计算机系统的研制也取得了相当的进展。其中, 最重要的一类是外围阵列处理机 (PAP), 它具有较高的性能-价格比。

仿真技术得以发展的主要原因是它带来了重大的社会和经济效益。仿真技术可以降低系统的研制成本; 对于类似航天、航空、反应堆和潜艇等系统, 更重要的是仿真技术可以提高系统实验、调试和训练过程中的安全性; 对于社会和经济等非工程领域, 仿真技术作为研究系统的必要手段而可以尽可能避免直接实验。

仿真可以按下述不同原则分类:

①按所用模型的类型 (物理模型、数学模型、物理-数学模型) 可分为全物理仿真、计算机仿真和半物理仿真。

②按所用计算机类型 (模拟计算机、数字计算机和混合计算机) 可分为模拟仿真、数字

仿真和混合仿真。

- ③按仿真对象中的信号流(连续的和离散的)可分为连续系统仿真和离散系统仿真。
- ④按仿真时间与实际时间的比例关系可分为实时仿真、超实时仿真和亚实时仿真。
- ⑤按对象的性质可分为宇宙飞船、化工系统、社会和经济系统仿真等。

0.1 仿真模型

建立模型是仿真的第一步,也是十分重要的一步。仿真模型既可以是一个物理模型,也可以是一个数学模型。实际上,只有在工程系统(技术系统)中才可能使用物理模型,例如:风洞实验中的比例模型属于静态物理模型,而飞行仿真中的三自由度飞行运动仿真器则属于动态物理模型。如前所述,计算机仿真在仿真中占有重要的地位。因此建立数学模型也就意味着在计算机上建立起对象的可以计算的模型。一般来说,系统的数学模型都必须改写成适合于计算机处理的形式才能使用,后者被称为仿真数学模型。系统模型是系统的一次近似模型,而仿真模型则是系统的二次近似模型。只有在建立了仿真模型以后,才能书写出相应的计算机程序。图 0-1 说明了系统、系统模型、仿真模型和仿真程序的关系。

建立计算机模型很重要的一点是要具有实验的性质,即模型同对象的功能和参数之间所具有的相似性和对应性。这种相似关系和对应关系不应被数学演算过程所掩盖,否则就仅仅是一次数值求解而已。

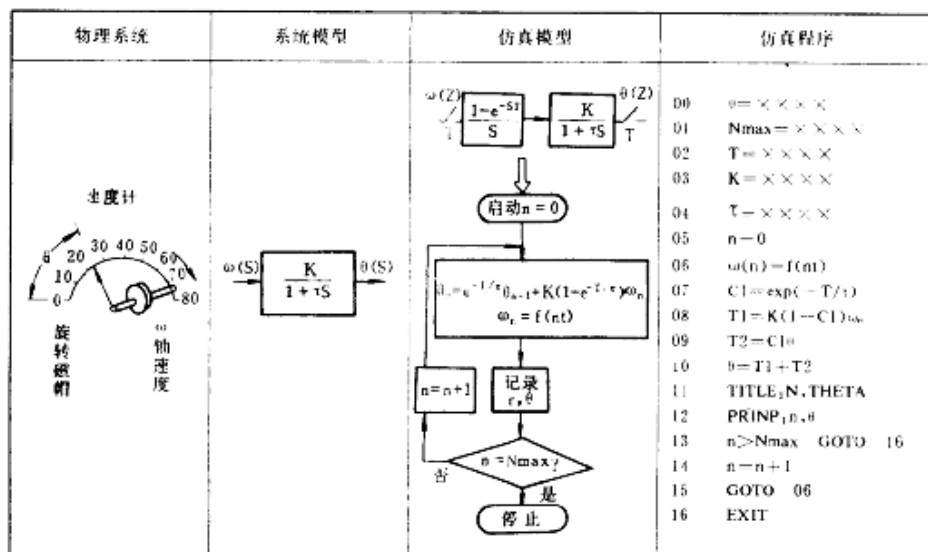


图 0-1 系统、模型和程序的关系

仿真模型可按图 0-2 所示进行分类。

同物理、数学和物理-数学模型相应的仿真,分别是全物理仿真(实物仿真)、计算机仿真和半物理仿真(半实物仿真)。



图 0-2 仿真模型分类

0.2 仿真实验

可以说,仿真基本上是一种通过实验来求解问题的技术。通过仿真实验,要了解包含在系统中变量之间的关系,要观察系统模型变量变化的全过程。此外,为了对仿真模型进行深入研究和结果优化,还必须进行多次运行、参数优化等工作。因此,良好的人机交互性是系统仿真的一个重要特性。

图 0-3 给出了仿真实验的一般过程。

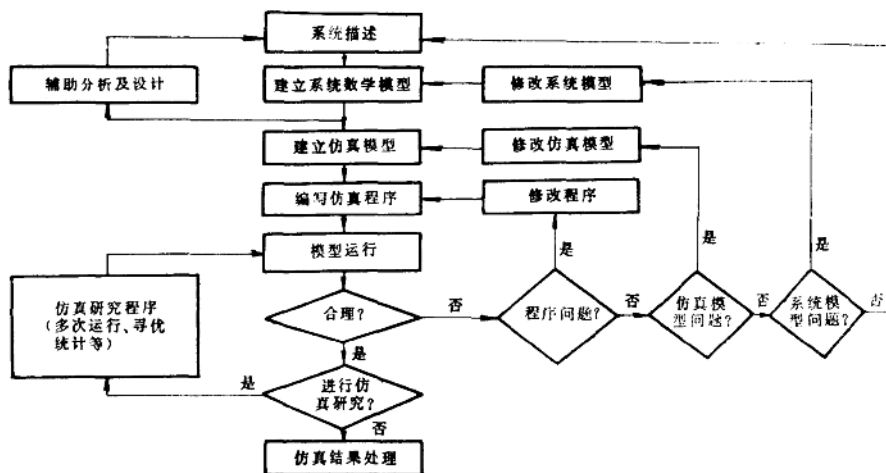


图 0-3 仿真实验的一般过程

对于工程系统(技术系统)的仿真,在其系统设计或分析阶段,计算机仿真可提供修改或更换模型的灵活性和经济性。在其系统研制阶段,往往用已研制出来的实际部件或子系统去代替部分计算机模型(以提高仿真实验的可信度),并对实际部件或子系统进行功能测试。也就是说,要进行半物理仿真实验。在少数情况下,为了进行全系统的功能性研究,还可能要做全物理仿真实验,这时,原有的计算机模型将全部被实物和物理模型所代替。一般说来,全物理仿真具有较高的可信度,但价格昂贵。图 0-4 给出了数学仿真、半物理仿真和全物理仿真在工程系统研究各阶段上的分级关系。半物理仿真和全物理仿真,由于有实物接入仿真回路而具有实时操作的性质,因而又有实时仿真之称。

在另一种情况下,仿真实验可以用来建立和完善系统模型。对于某些系统(如社会、经济系统)来说,往往只知道该类系统的“输入”和“输出”,而不知道该类系统的内部结构和

参数(即所谓“黑盒子”)。实际上,由于有某些经验知识,可以给出一个假定的概念模型,然后利用这个概念模型进行仿真实验,并在实验中按照一定的方法修正模型的参数和结构,使之最后满足“输入”和“输出”的关系,从而建立起与系统特性相似的数学模型。

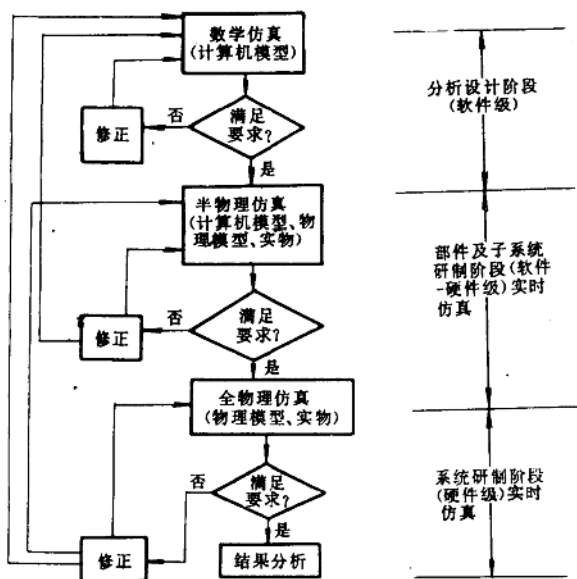


图 0-4 工程系统仿真实验各阶段上的分级关系

0.3 仿真工具

计算机是系统仿真最重要的工具。

用于仿真的计算机基本上可分为模拟计算机、数字计算机和混合计算机等三类。其中数字计算机还可分为通用数字计算机和专用数字计算机。

主要用于连续系统仿真的模拟计算机出现在 40 年代末期。模拟计算机的电路基础主要是运算放大器,它可以实现加法或积分这样一些数学运算。其变量则是以电压的形式出现的。当利用模拟计算机仿真时,只要列出系统的数学模型,按照模型的要求把运算放大器联结起来,就可以进行仿真。模拟计算机仿真实例如图 0-5 所示。如果要修改模型,则只要改变运算放大器的联结就可以了。因此,人机交互性好。在仿真过程中,模拟计算机的各运算放大器并行工作,其输出的结果是连续变化的。由于模拟计算机有很高的处理速度,因此它适用于连续系统实时仿真。模拟计算机由于适用于求解微分方程而有模拟微分分析器之称。

早期的数字计算机,因其速度低和交互性差而使它在仿真应用中受到限制。由于发展至今的数字计算机已具有很高的速度(特别是某些专用数字计算机的速度更高,已能满足大部分系统的实时仿真的要求),同时,由于软件、接口和终端技术的发展而使人机交互能力也有很大提高,因此,数字计算机有了成为现代仿真主要工具的物质条件。

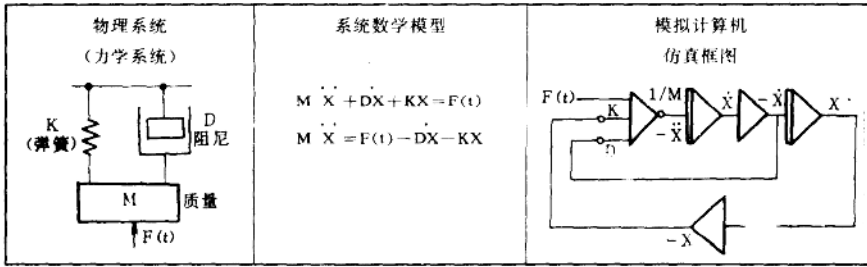


图 0-5 模拟计算机仿真实例

为通用数字计算机发展的仿真软件(包括仿真程序包、仿真语言、仿真系统软件)已有许多种。其中主要的有:连续系统仿真语言 MIMIC、CSMP、CSSL、DSL/VS 和 ACSL,非工程系统动力学仿真语言 DYNAMO;离散系统仿真语言 GPSS 和 SIMSCRIPT;连续/离散系统仿真语言 GASP 和 SLAM;仿真系统软件 TESS。这些软件都是面向用户的,与对象之间有直接关系,易于学习和应用。

为了提高数字计算机处理速度,以满足实时仿真的要求,研制了许多种基于并行处理原理的专用数字计算机。其中主要有:以数字积分为基础的数字微分分析器 DDA;以并行流水线处理机为基础的外围阵列处理机 PAP。1980 年,已经有几种 PAP 系统配置了专门的仿真软件而被推广使用。由于价格低廉的微处理机的大规模生产,近几年来,对于多微处理机全并行仿真计算机的研究也引起了广泛的重视和兴趣。此外,以超大规模集成电路技术为基础研制的微型外围阵列处理机 PAP 是值得注意的动向。

混合计算机是在 60 年代发展起来的一种仿真工具。顾名思义,混合计算机是把模拟计算机和数字计算机联合在一起工作,以充分发挥模拟计算机所具有的高速度和数字计算机所具有的高精度、逻辑运算及存储能力的优点。过去的混合计算系统,多数是通过数/模、模/数转换接口和一个接口控制器,将一台通用数字计算机和一台或几台通用模拟计算机联结在一起工作的(见图 0-6)。现代混合计算机已发展成为一种混合多处理机系统,它包含一台超小型计算机、一至多台外围阵列处理机 PAP、几台具有自动排题能力的模拟处理机。在各类处理机之间,通过一个混合分时接口完成数据和控制信号的通信。这种系统的处理能力很强,但价格昂贵,因此只有在一些模型复杂并且速度要求严格的系统仿真中使用。

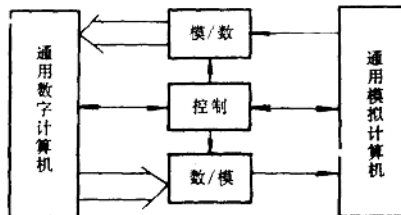


图 0-6 混合计算机系统

由于计算技术的发展,现代仿真计算机系统的可选类型分布在相当宽的型谱上。

除了计算机以外,仿真工具还包括两类仿真器。一类是专用的物理仿真器,例如用于飞行仿真实验的三自由度运动仿真器、目标仿真器、负载仿真器和环境仿真器等。另一类是用于训练操纵人员的所谓操纵训练仿真器,常见的有飞机驾驶训练仿真器、船舶操纵训练仿真器和电站操纵训练仿真器等。训练仿真器实际上是一种包括物理仿真器、实物和计算机在内的复杂仿真系统。

0.4 仿真方法

仿真方法主要是指在计算机上建立仿真模型及进行仿真研究的方法。可以分为如下两大类:连续动态系统的仿真方法和离散(事件)系统的仿真方法。

由于连续动态系统的系统数学模型一般是以微分方程描述的,因此连续系统仿真方法的基础是数值积分方法。实际上,已经出现了各种类型的积分方法,常见的如欧拉法、预测校正法、龙格-库塔法、阿达姆斯法、塔斯汀法、状态转移法等。其基本原理都是把微分方程离散化,而转换成为计算机可以接受的差分方程。例如:微分方程模型

$$\frac{dX}{dT} = G(X, T)$$

可以用差分方程

$$\frac{X(T + \Delta T) - X(T)}{\Delta T} = G(X, T)$$

或

$$X(T + \Delta T) = X(T) + G(X, T) \cdot \Delta T$$

来近似。这就是著名的欧拉公式。塔斯汀法和状态转移法由于是直接传递函数及状态方程导出离散化方程,因此也称为离散相似法。在实时仿真的情况下,由于涉及对输入实时时间变量采样值的计算,不是所有的积分公式都能适用,因此出现了各种类型的实时积分方法,如实时预测校正法和实时龙格-库塔法等。在许多系统(如电力网、核反应堆和血液循环系统等)仿真问题中,常常会遇到病态系统的问题,因此出现了用于病态系统的积分方法(其多数属于隐式方法)。

离散(事件)系统一般是一种排队系统,仿真所研究的是关于拥挤现象和如何提供服务的问题。对于离散(事件)系统的描述包括到达模型、服务模型和排队规划等三个部分。一般说来,到达模型和服务模型是用一组不同概率分布的随机数来描述的,而包括排队规划在内的系统的活动则由一个运行程序来描述。因此,离散(事件)系统仿真方法的目的是要产生不同概率分布的随机数和建立描述系统活动的程序系统。因为具有均匀分布的随机数可以用来产生其他概率分布的随机数,因而是十分重要的。事实上,已经提出了许多产生均匀分布随机数的方法,其中应用最广的是同余法。描述系统活动的方法有两种:一种是面向过程的;另一种是面向事件的。对应这两种不同的方法,其程序系统也不一样。

还有一些用于仿真的特殊方法。例如蒙特卡罗法,就是一种具有随机数的实验采样方法,它常用于多变量的积分。

仿真活动不仅在于建立仿真模型,而且还需要进行仿真实验,因此,这种实验的方法又称为仿真研究方法。它包括求解的多次运行、交互寻优和统计实验等。

0.5 结 语

仿真技术近 10 年来的发展趋势主要表现在两个方面:应用领域的扩大和仿真计算机的智能化。当今,不仅在传统的工程领域,而且在社会经济、生物、生态、医疗和管理等许多非工程领域方面,仿真技术越来越受到重视并得到广泛应用。此外,第五代计算机、并行处理、人工智能、知识库和专家系统等技术的发展正影响着仿真计算机的发展。事实上,具有高速度实时仿真能力的计算机系统、一体化仿真软件系统、智能仿真工作站和仿真专家系统,现正处于研究和实验的阶段。可以预期,今后的 10 年内,仿真技术将会出现新的突破和飞跃。

第一章 数学模型与建模方法学

人类为了满足自身的需要,一直在同外界环境相互联系,相互作用。人所依赖的这种联系和作用的方式,随着时间的流逝变得日趋复杂和多样。现实的科学工程方法赋予人类以巨大的力量去征服自然界。尤其是计算机的出现和发展不断使人类从繁琐沉闷的工作中解放出来,而且越来越显示出强大的生命力。本章讨论人们在从事自然现象研究中所采用的方法学,重点放在讨论模型设计者和计算机的有效结合方法。

1.1 概述

研究客观世界的关键,是针对人与外部世界的相互作用,在科学工程基础上建立“形式”模型,这是一种抽象的表示方法。科学研究的绝大部分工作就是实现形式化和建立模型。科学家试图通过观察和实验,建立抽象的表示方法和定律。这些方法和定律是对现实世界中有关已被证明的假设的形式化。这些“形式化”模型,只有在概括了实际系统的基本性质时才有可能用来进行推论、分析、设计,从而在某种意义上给人们提供控制能力。

人与外部世界的相互作用,基本上是由认识世界和利用、改造世界两个不同的步骤组成的,这就是:

① 认识-建立“形式化”模型。人类通过建立一种抽象的表示方法,来获得对自然现象的充分理解,产生一个现实世界的模型。这个阶段是面向科学的。

② 分析和利用“形式化”模型。科学研究的目的是按照人类的意志,对现实世界进行控制。这一步骤显然具有工程的特点。

图 1-1 表示了人与真实系统的相互作用。

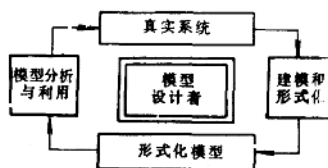


图 1-1 人与真实系统的相互作用

建立模型和分析模型这两个步骤都是必不可少的,但是由于人自身存在的局限性,实现起来会遇到很多障碍。

对于建模活动,人的能力是有限的。人在抽象思维上的功能,使它能够进行模式识别,进行综合、计算和记忆等。人所用的建模方法是各种能力特殊结合的结果。但是,人的局限性对建模研究的发展会产生影响。这就促使人们必然要去探求一些有益于弥补这些局限性的方法和工具。例如,测量仪器可以扩展人的传感能力。特别是电子计算机,它可在模型建立和模型利用方面发挥越来越重要的作用。

多数人对“仿真”一词含义的理解是:仿真就是程序的运行,该程序表示一个抽象的模型,用以研究真实系统中的一些特征。按照这种理解,仿真在面对现实的科学工程方法中

的模型建立和模型分析两个阶段具有同等重要的价值。

计算机在人与真实系统相互作用的关系中,是模型设计者的一个合作伙伴。图 1-2 示出了人、计算机和真实系统的相互作用关系。计算机的运行需要合适的管理,它基本上是在程序支持下工作的;模型设计者借助适宜的软件,选择并实现这些程序。计算机实现的“仿真”活动,将直接影响和支持着模型建立和模型分析这两个基本步骤。虽然人们选择计算机作为实现科学工程方法的合作者具有普遍意义,但是,在某些特殊场合下,也可以采用其他设备(如物理模型)来帮助进行模型研究。

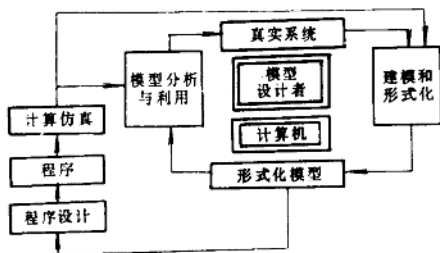


图 1-2 人、计算机和真实系统的相互作用

本书重点讨论的仿真活动,是计算机辅助下的仿真活动。这里指的仿真是“广义仿真”,即认为所有支持模型建立与模型分析的计算都是仿真活动。

过去,人们主要是从数学思想和数学理论的角度来研究人与真实世界相互作用的。现在看来,其研究工作必须重新考虑。这是由于计算机的出现,增强了过程的整体性能,从而产生了更复杂的情况。由图 1-2 可见,模型设计者和机器之间,既有明确的分工,又有充分的“协作”。计算机虽是人脑的产物,但它的活动方式根本不同于人脑。图 1-3 表示了模型设计者与基于计算机的仿真器之间的联系。

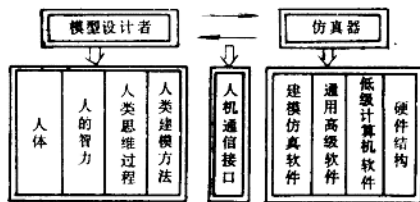


图 1-3 模型设计者与仿真器之间的关系

图 1-3 的左边表示的是人,即模型设计者。它反映人体支持人的智力活动,即控制思维过程;接着是人类的思想过程,它是所有科学工作的基础,它通过人类建模的方法学,进行建模的研究。

图 1-3 的右边表示的是计算机(或仿真器)。最右端表示的是计算机硬件,接着是提供使用硬件的工具,即低级计算机软件(包括操作系统、驱动器和机器指令);然后有可能通过通用的高级计算机软件(它包括高级语言、编辑程序等),简单地实现程序设计,以及在一般条件下利用系统。这样,才有可能产生建模和模型分析的仿真软件。这一级与人类建模方法紧密相连,用以辅助模型设计者有效地建模。

人与仿真器之间通过人机通信接口来保证有效的信息传递。这种统一而高效的方法,

可以解决任何类型的问题。

1.2 系统、模型、仿真

仿真技术是一门新兴的边缘技术学科。从工程角度来看,通常认为:仿真就是通过系统模型的实验去研究一个已经存在的或正在设计中的系统。

从某种意义上讲,要实现仿真,首先就要寻找一个实际系统的“替身”,这个“替身”称为模型。它不是原型的复现,而是按研究的侧重面或实际需要进行简化提炼,以利于研究者抓住问题的本质或主要矛盾。这种研究特别对于解决预测问题,以及因种种原因不可能在原型上进行实验的问题尤为重要。

1.2.1 系统

这里所指的系统是广义的,它泛指自然界的一切现象与过程。

任何系统都存在三个方面需要研究的内容,即实体、属性和活动:

实体——组成系统的具体对象;

属性——实体所具有的每一项有效特性(状态和参数);

活动——系统内对象随时间推移而发生的状态变化。

系统的研究要注意整体性、相关性及系统的边界,要用动态的观点去观察系统中产生的各种现象。

由于组成系统的实体之间相互作用而引起的实体属性的变化,通常用“状态”的概念来描述。研究系统主要就是要研究系统状态的改变,即系统的进展。

系统研究除了研究系统的实体、属性和活动外,还应研究系统的环境。环境是指对系统的活动结果产生影响的外界因素。自然界的一切事物都存在着相互联系和相互影响,而系统是在外界因素不断变化的环境中产生活动的,因此,环境因素是必须考虑的。

从边界的因素来看,系统的活动可分为:

①内生活动——系统内部实体相互作用产生的活动;

②外生活动——系统外部环境的影响产生的活动。仅考虑内生活的系统称为封闭系统;既考虑内生活动又考虑外生活的系统称为开放系统。

应该注意到:系统与环境的边界是不确定的,它们随研究目的不同而异。例如,对于工厂系统的订货问题,既可将其视为环境对生产产生的影响,也可将销售纳入系统作为系统内的活动来研究。

系统研究包括系统分析、系统综合及系统预测等三个方面。

关于系统的描述在“数学模型”一节中还要进一步讨论。

1.2.2 模型

模型是集中反映系统有关信息的实体。它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化。因此,模型描述可视为是对真实世界中的物体或过程相关的信息进行形式化的结果。

模型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。

应该着重强调的是,模型建立不是“原型的复现”,而是按研究目的之实际需要和侧面,寻找一个便于进行系统研究的“替身”。因此,在较复杂的情况下,对于由许多实体组成的系统来说,由于其研究目的不同,对同一个系统可以产生相应于不同层次的多种模型,这就是多面性。例如:

某些模型反映了整个实际系统的部分属性;而另一些模型则提供了系统更全面的描述;

某些模型反映了实际系统的全部组成实体;另一些模型则仅强调了系统的某些侧面,而忽略了另外一些方面。

这些现象表明,根据系统研究的实际需要,可对模型进行粗化(简化),或精化(详细化);也可以对模型描述进行分解或组合。

在选择模型结构时,要以最能便于达到模型研究的目的为前提。虽然对有关特定的建模目标同结构性质之间的关系知道得很少,但结构特性的描述经常采用下述一些原则:

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,“原型”与“替身”之间具有相似的物理属性或数学描述。

②切题性。模型只应该针对与研究目的有关的方面,而不是一切方面。这是因为对于同一个系统,其模型不是唯一的,模型的选择应针对研究目的。例如,为了研究一个飞机航线调度系统,就只需考虑航向上的飞行方位,而无须涉及飞机的飞行姿态。

③吻合性。模型结构的选择,应尽可能对可利用的数据作合理的描述。通常,其实验数据应尽可能由模型来解释。

④可辨识性。模型结构必须选择可辨识的形式。若一个结构具有无法估计的参数,则此结构就无实用价值。

⑤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,因此实际上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。

⑥综合精度。它是模型框架、结构和参数集合等项精度的一种综合指标。若有限的信息限制了模型的精度,最有效的模型就应是各方面精度的平衡和折衷。

若上述原则间出现冲突,则要寻找合理的折衷,但特定的折衷方案却依赖于模型的对象,因而没有固定的程式。

对于“模型”的定义,有着不同的看法。有人认为,模型是一种对真实系统的表述,至少是在状态结构水平上的真实表述;而另一些人则认为,模型只是一种对输入-输出行为的描述。他们认为,由于其状态概念隐含于输入-输出关系中,因而总可以找到一组对应的结构。遗憾的是,不同的结构可以对应一种相同的输入-输出行为。

1.2.3 仿真

系统仿真技术实质上就是建立仿真模型和进行仿真实验的技术。系统仿真是一种用能代表所研究系统的模型,结合环境(实际的或模拟的)条件进行研究、分析和实验的方法。它作为一种研究方法和实验技术直接应用于系统研究。它是一种利用相似与类比的关系来间接研究事物的方法。

系统仿真的过程,可通过图 1-4 所示的三要素间的三个基本活动来描述。

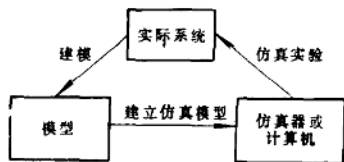


图 1-4 仿真过程三要素间的关系

建模活动是通过对实际系统的观测或检测,在忽略次要因素及不可检测变量的基础上,用物理或数学的方法进行描述,从而获得实际系统的简化近似模型。这里应该注意模型的实验性质,即模型同实际系统的功能与参数之间应具有某些相似性和对应性,这一点应尽可能不被数学演算过程所掩盖。否则,仿真研究就变为仅仅是一次数值求解。

仿真模型反映了系统模型(简化模型)同仿真器或计算机之间的关系,它应能为仿真器或计算机所接受,并能进行运行。例如,计算机仿真模型,就是对系统的数学模型进行一定的算法处理,使其在变成合适的形式(如将数值积分变为迭代运算模型)之后,能在计算机上进行数字仿真的“可计算模型”。显然,由于算法引起了误差,所以仿真模型对实际系统来讲是一个二次简化模型。

仿真实验是指对模型的运转。例如,计算机仿真,就是将系统的仿真模型置于计算机上运转的过程。仿真通过实验来研究实际系统的一种技术,通过仿真活动可以弄清系统内在结构变量和环境条件的影响。因此,为了使模型能够运转,需要设计一个合理而方便的服务于系统研究的实验步骤和软件。例如:

- ①为了深入研究和优化结果,需要进行多次运行;
- ②为了搜索最佳状态,需要具有良好的人-机交互能力,以保证灵活而方便地实现仿真模型的修改;
- ③为了增加可信度,应能在条件允许的情况下,便于在仿真模型中引入实际部件从而实现部分的替代,等等。

1.3 数学模型

数学模型本质上是一种基于“系统”概念的关于现实世界一小部分和几个方面抽象的“映象”。这个系统观允许在不同的详尽程度上对现实世界中的过程进行数学描述。这样,便可将各种不同的模型彼此联系起来,并可将相互间的关系隐含于数学之中。例如,可以用同构和同态的概念,反映两个等价的模型描述之间的最基本的关系。

实际上,有各种不同的模型用于描述现实世界,它们都是一般模型形式的特殊情况。然而,太一般化的模型,不能直接应用于特殊的环境中。因此,对于一般模型或者它的简化形式之一,若要正确地用作对一个真实系统的“映象”,则需要依赖于一些假设,如“部分可分解性”和“状态的存在性”等。

1.3.1 数学模型的作用和目标

数学模型,无论在纯科学领域还是在工程上都有其广泛应用。图 1-5 示出了数学模型具有的两个方面的作用:

- ①深化认识。数学模型可帮助人们不断加深对现象的认识,并启发人们去进行有可能

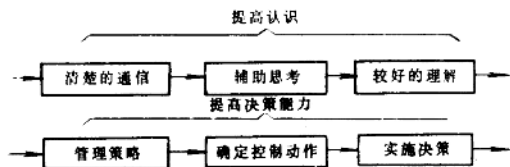


图 1-5 数学模型的作用

获得满意结果的试验。这种作用具有较多的“被动”性质。

②提高决策能力。数学模型的研究,能提高人们的决策和干预能力。这种作用具有“积极”性质。

从提高认识能力这方面考虑,为了加强这种影响的作用,提高通信、思考和理解三个层次的水平,应满足以下几方面的要求。首先,一个数学描述要提供一个准确的、易于理解的通信模式。也就是说,当信息传递给别人时,这种模式可减少引起误解的几率。除了具有清楚的通信模式外,在研究系统的各种问题或选择假设时,还需要一个相当规模的辅助思考过程。最后,一旦某模型被综合成为一组公理和定律,这样的模型就能更好地帮助人们较好地理解现实世界。

同样,为了提高决策能力,也可将其划分为三个不同水平的层次:管理、控制和设计。管理是一种很有限的干预方式,通过它可确定目标和决定行动的大致过程。但由于这种策略无法制定得十分详细,因此它的具体实施必须委托给下一层次,并在下一层次被翻译理解。因此,在意图和实施之间的联系就变得模糊不清。在控制这一级,动作和策略之间的关系是确定的。但由于控制级中动作仅限于在某个固定范围内加以选择,所以仍然限制了干预的范围。与此相反,在实施决策的设计级,设计者能在较大程度上进行选择,扩大或替换部分真实系统,以满足设计者的要求。相对其他两级而言,实现一种设计所花费的代价更高,而且也不常进行。但是,控制和管理这两级却是一种连续的“在线”活动。

根据这种目标观点,对于第一种情况,可把现实世界的真实系统看成是由能观测和不能观测两部分组成;而对于第二种情况,则可看成是由能控制和不能控制两部分组成。能观测部分对应于系统中所有能被辨识、理解、观察和测定的部分;而能控制部分则对应于系统中所有那些可用某种方法加以修改、转换、把握和影响的部分。余下的部分对应着不能观测和不能控制的部分,它们在系统中所占的比例往往要大得多。而真实系统及其分解并不是一成不变的,它依据于主观因素(人们的理解力和看法)以及客观条件。当然,观测及干预二者必须相应地限制在系统的能观测部分和能控制部分。

由于不能观测及不能控制部分的存在,因此,推测或控制的结果将是不确定的。对这些部分的认识越深入,对于估计的理解和干预的成功把握程度也就越大。

数学模型具有目标上的二元性这一事实具有特殊的意义。虽然在一个给定的环境中,建模可能是为了加深对事物的认识程度,但同时也将同一水平上提供干预的可能。同样,为了控制而建立的模型,也将有助于人们对系统的认识。模型对知识进行编码,其主要条件是将互不关联的关系结合成一个整体的能力;否则,这些关系之间的隐含点将难以刻画。这一点,对于推测现已掌握的数据之外的数据有着特殊的用途。

虽然数学模型的建立可为许多目标服务,但一个特殊的描述程序却无法适用所有目标。