

华中科技大学管理系列教材
HUAZHONG KEJI DAXUE GUANLI XILIE JIAOCAI

计算机仿真原理及其应用

JISUANJI FANGZHEN YUANLI JIQI YINGYONG

◎周 明 胡 斌

华中科技大学出版社
<http://press.hust.edu.cn>

计算机仿真原理及其应用

Principle and Application of Computer Simulation

周 明 胡 斌

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

计算机仿真原理及其应用/周明 胡斌
武汉:华中科技大学出版社,2005年9月
ISBN 7-5609-3395-5

I. 计…

II. ①周… ②胡…

III. 计算机仿真

IV. TP273

计算机仿真原理及其应用

周 明 胡 斌

责任编辑:苏克超

封面设计:潘 群

责任校对:陈 骏

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社 武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:湖北恒泰印务有限公司

开本:787×960 1/16

印张:12.5

字数:217 000

版次:2005年9月第1版

印次:2005年9月第1次印刷

定价:18.80元

ISBN 7-5609-3395-5/TP·570

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

作者简介

周明博士，目前任美国印第安纳州立大学工学院副教授、机械与工业工程技术专业协调人、系统建模与仿真研究中心负责人，于1995年从美国亚利桑那大学系统与工业工程系获得博士学位。除教授本科与硕士课程外，周明博士还是印第安纳州立大学技术管理博士专业的指导教授之一。2000年至2001年间，周明博士被兼聘为罗斯赫尔曼理工学院工程管理(硕士)专业客座教授，主要讲授计算机仿真课程。周明博士已经在《IIE Transactions》、《Journal of Computer and Industrial Engineering》、《International Journal of Industrial Engineering》和《International Journal of Production Research》等学术刊物上发表了数十篇论文。周明博士是美国工业工程师学会(IIE)和美国制造工程师学会(SME)的会员，自1997年至今，周明博士成为国际工业工程季刊编辑理事会的理事。

胡斌博士，华中科技大学管理学院副教授，华中科技大学现代管理所副所长，中国计算机模拟学会常务理事、副秘书长。

序 言

计算机仿真是用于分析复杂系统,解决科研、管理和工程技术难题的有效工具。在现实生活中,大多数系统(如一条生产线、一个工厂、一家商场、一个物料储运中心,或者一所医院,等等)的动态行为都十分复杂,涉及许多不确定的变化因素,所以很难运用甚至根本无法运用一般的解析方法(比如采用基于理论原则而设定的数学模型)来对其进行分析。在这些情况下,计算机仿真就显得格外重要。计算机仿真的基本思想就是建立一个能够模仿某个真实系统(设计方案)动态行为的计算机模型,利用该模型来对真实系统的行为变化进行数值模拟实验,通过重复运行的模拟实验以及对模拟输出数据的分析来达到对该系统在给定条件下的动态行为的了解评估;进而改进或者优化系统的目的。由于计算机仿真日益发展成为模拟、分析、改进和优化各种系统的有效工具,它已经被有关的发达国家和具有权威性的国际科技组织确定为 21 世纪的“目标技术”之一。尽管计算机仿真在西方发达国家已经是成熟应用的技术,但在中国国内目前尚属比较陌生的技术领域,尤其是在工程和管理实践中的应用仍然处于萌发时期。不仅缺乏计算机仿真方面的人才,而且急需计算机仿真方面的教科书与参考书,尤其是将相关理论与实践结合讲解的专业书籍。笔者写作本书的根本目的就是为了满足广大读者的需要,为他们提供一本将理论与实际应用相结合、既领先又实用的仿真书籍;帮助读者系统地了解计算机仿真的基本概念,掌握通过仿真来改进和优化系统设计、经营与管理的基本方法,并了解当今先进的商业计算机仿真软件(如 ARENA 等)。

作为一本关于计算机仿真建模、分析及应用的书籍,本书预设的读者对象有两类:一是高校中工科和管理学科类的本科生与研究生(如管理科学、管理工程、工业工程、系统工程、技术管理、管理信息系统和工商管理等专业的大学生);二是广大从事工业工程、系统工程、生产计划和管理等方面工作的专业人士,比如那些主持、参与或涉及工业、运输业、服务业和商业系统的设计、规划、运营、管理及分析改进方面工作的工程师和管理人员。尽管本书的写作是基于教科书的创意,但作者在写作中兼顾了自学的需求与特点(如加入了相关的参考文献等),使本书也不

失为一本有价值的、便于自学的专业参考书。

在内容上,本书力求理论与应用实践相结合,使学生在了解仿真基本理论的基础上,掌握一定的应用实践技能,比如使用通行的商业计算机仿真软件对一般的系统进行建模与分析等。

本书的第1、2、3章主要是向读者进行计算机仿真的基本介绍,包括系统与模型,分析系统的基本方法与概念,计算机仿真基本原理,仿真模型的基本构成和逻辑,以及计算机仿真软件 ARENA 的基本介绍。本书其余章节的讨论主要集中在与计算机仿真有关的理论和实际应用两个方面。第4章和第6章着重阐述非连续仿真输入和输出分析的理论,其中第4章介绍仿真输入变量的类型及其数值特征,以及如何估计输入变量的概率分布和分布假设的检验等等;而第6章重点讨论计算机仿真输出分析的有关理论和方法,包括随机输出过程和相关的统计分析方法,比如统计量的置信度分析、有限持续系统和无限持续系统(平稳系统)的输出分析,重点介绍了截止法和分段法的应用。第3章的部分和第5章侧重于非连续仿真的基本应用建模,例如资源能力的确定性和随机性变化;工艺路线不同的个体在制造系统中的流动,以及非稳定泊桑到达过程,等等。第7章讲述如何模拟生产系统中物料的转运,重点讨论采用移动式运输工具和固定式运输工具的转运系统。第8章介绍常见的仿真分析应用问题,内容包括不同方案(系统)的比较,多个方案的排列和选择,等等。第9章介绍随机数和随机变量的产生以及相关的理论。第10章和第11章比较深入地介绍仿真在生产制造系统中的应用,内容包括个体在流动过程中的分批、组合、匹配,以及个体在系统中流动的逻辑控制等等,涉及的系统类型包括流水线制造系统和生产库存系统。第12章简要介绍连续仿真的基本概念、原理和应用。第13章介绍仿真模型的功能性检验,有效性核实评估,以及利用相关性来减少模拟样本方差、提高输出分析精度的方法。第14章对本书做了一个简单的总结,介绍了如何成功地应用计算机仿真模拟分析来解决实际问题,并且对计算机仿真技术的研究和未来的发展作了简要的展望。在每章之后,都附有相应的练习题,以帮助读者巩固、消化所学习的内容。

周 明

胡 斌

2003年12月

目 录

第 1 章 计算机仿真的简介	(1)
1.1 什么是计算机仿真	(1)
1.2 系统与系统的模型	(1)
1.3 研究系统的两种方法: 采用理论分析(解析)模型和仿真模型	(2)
1.4 为什么要采用计算机仿真模型	(3)
1.5 计算机仿真的分类	(4)
1.6 计算机仿真的应用领域	(4)
1.7 计算机仿真的具体实施	(5)
1.8 一个简单的手工仿真实例	(6)
1.9 仿真模型的随机性与蒙特卡罗仿真	(10)
1.10 用计算机仿真对系统进行研究分析的主要步骤	(11)
练习题	(11)
第 2 章 非连续计算机仿真的基本建模原理	(13)
2.1 非连续计算机仿真的基本原理和运行逻辑	(13)
2.2 工艺流程型仿真: 基本的功能模块与数据结构模块	(20)
2.3 ARENA: 一个功能齐全、性能优越、使用方便灵活的仿真软件包	(22)
练习题	(28)
第 3 章 简单决策过程与资源工作能力的变化	(29)
3.1 模拟系统中的决策行为	(29)
3.2 资源工作能力的确定性变化	(35)
3.3 资源能力的随机性变化	(36)
3.4 非稳定泊桑到达过程	(38)
第 4 章 仿真模型输入变量的特征、概率模型、设定与分析方法	(44)
4.1 什么是计算机仿真的输入分析	(44)
4.2 输入变量建模分析的基本问题	(45)
4.3 概率分布的参数估算	(45)
4.4 非连续仿真中分析随机变量的基本方法	(46)
4.5 检验有关统计假设的方法	(52)

第 5 章 初级仿真建模	(58)
5.1 工艺路线不同的个体群在生产制造系统中的流动.....	(58)
5.2 个体的回避过程(Entity Balking).....	(65)
练习题.....	(69)
第 6 章 仿真过程的输出分析	(71)
6.1 有限持续和无限持续仿真模型.....	(71)
6.2 有限持续模型的分析: 基本步骤.....	(73)
6.3 有限持续模型的分析: 统计估算值的置信度分析.....	(74)
6.4 无限持续系统的输出分析.....	(78)
第 7 章 模拟生产系统中的物料转运	(85)
7.1 基本概念: 实际系统中的物料转运与仿真模型里的个体转运.....	(85)
7.2 不同类型的个体转运.....	(85)
7.3 使用移动式运输工具的个体转运.....	(86)
7.4 使用传送带的个体转运.....	(91)
练习题.....	(96)
第 8 章 通过仿真对不同方案进行比较、排列和选择	(97)
8.1 比较两个不同的方案.....	(97)
8.2 多个不同方案的比较和选择其中最佳的方案.....	(98)
8.3 应用 ARENA 的过程分析程序(Process Analyzer)进行比较分析.....	(101)
练习题.....	(103)
第 9 章 随机数与随机变量的产生以及与之相关的问题	(104)
9.1 随机数的概念以及随机数的产生.....	(104)
9.2 随机数的转化与随机数值的产生.....	(109)
9.3 产生服从泊桑分布的随机到达过程.....	(111)
练习题.....	(111)
第 10 章 计算机仿真在非连续生产制造系统中的应用(之一)	(113)
10.1 仿真在设计和模拟生产制造系统布局中的应用.....	(113)
10.2 制造系统中个体流动的控制.....	(118)
第 11 章 计算机仿真在非连续生产制造系统中的应用(之二)	(125)
11.1 仿真用于设计和模拟生产制造环境下的库存系统.....	(125)

11.2 库存系统运作的逻辑模型	(127)
11.3 模拟允许订单积压的库存系统之操作	(131)
练习题	(135)
第 12 章 连续型模拟	(136)
12.1 概述	(136)
12.2 连续模型	(137)
12.3 以龙格·库塔法模拟以微分方程组描述的连续型模拟模型	(139)
12.4 用欧拉法模拟以差分方程组描述的连续型模拟模型	(148)
第 13 章 功能性、有效性核实以及减少误差变化的方法	(163)
13.1 仿真模型的功能性验证	(163)
13.2 仿真模型的有效性核实	(164)
13.3 减少仿真输出结果的随机误差	(168)
练习题	(171)
第 14 章 本书总结和仿真的未来	(172)
14.1 什么是成功的仿真应用	(172)
14.2 如何成功地应用计算机仿真	(172)
14.3 计算机仿真方面的研究与未来	(176)
附录 仿真分析中常用的统计与概率理论	(178)
参考文献	(188)

第1章 计算机仿真的简介

如同任何一门成熟的技术一样,计算机仿真也经历了概念形成与技术发展这两个阶段。在这一章里,将向读者介绍计算机仿真的基本概念及其发展简况,并由此引出非连续计算机仿真的定义,为读者向后面的章节过渡奠定初步的基础。

1.1 什么是计算机仿真

计算机仿真的概念是从仿真的概念延伸而来的。简单地说,仿真就是对某个真实系统进行模拟分析的过程,亦即“模仿真实系统的行为变化”,通过这种模拟来达到对系统的了解和分析。仿真可以采用不同的方法进行。比如在工程实践中,人们采用按照缩小比例制作的汽车模型或飞机模型来模拟真实汽车的机械传动系统或确定飞机形状的空气动力特性。而计算机仿真不过是使用计算机作为模拟的手段,模型则是一个由计算机程序和相关数据组成的抽象代表。比较准确地说,计算机仿真就是设计和建立一个计算机模型来代表某个真实系统,并利用该模型对真实系统的行为变化进行数值模拟实验,通过这样的模拟实验达到对该系统在某些给定条件下的动态行为进行分析和了解的目的。由于计算机仿真所具备的各种优点(详见后述),它已经成为模拟、分析和优化各种系统的有效工具,并且被有关国家的政府与民间具有权威性的科技或学术组织(例如美国的 NRC, NIST, NSF, IIE, SME, ASME, 等等)确定为 21 世纪的“目标技术”之一。

1.2 系统与系统的模型

如前所述,仿真模型是用来分析研究真实系统的行为特征的。这里所指的系统是什么呢?需要对系统的概念有比较清楚的认识。从工程和管理的角度来说,一个系统包括以下要素:系统输入、输出,“加工”转化过程,资源,行为变化(动态地随时间而变化的行为),以及衡量系统表现的尺度,其中,加工或转化过程也就是把对系统的投入(包括系统输入和资源等)转变成为系统之输出的过程。比如一个制造系统,系统的输入包括原材料和设计工艺文件等,转化过程包括所有的加工工序,而系统的输出则包括制造出的产品,等等。从抽象的角度来讲,系统的输入和输出不一定是具体的实物,而可以是相互关联的逻辑变量(比如烤箱的温度与食物被烤熟的时间)。可以用计算机仿真来模拟分析的系统非常广泛,它包括各种各样的生产制造系统、交通运输系统、电信或者通信网络系统、商业服务系统、医疗卫生系统、行政管理系统、军事系统和其他的社会系统。尽管各种系统表面

看起来千差万别，但它们都具有前面提到的那些共同的基本要素。

(1) 在科研与生产活动中，常常会有研究系统的需要。比如在各种设计、规划(计划)、控制、改进，以及优化等过程中。在设计一条生产线时，设计者需要确定机器设备的最佳布局，这就需要研究系统，具体地说，需要研究系统输入(一个假定的布局，以及相关的距离、成本等其他因素)和系统输出(实际的生产率、物料运输成本等)之间的关系。在对一个系统进行分析研究时，可以直接利用系统本身来做试验从而获得数据，也可以通过对该系统的一个模型进行实验和分析来达到研究系统的目的。在实践中，往往后一种方法(利用模型)更为方便和经济。模型的最大特点就是它既代表了真实系统某些方面的特征，又大大地简化了原来的系统，为分析原系统提供了很多的方便。

(2) 模拟系统的模型可以是具体的实物，也可以是某种抽象的代表。由此将模型分为实体模型和抽象模型两大类。实体模型的例子包括按一定比例用某种材料做成的汽车与飞机模型，等等。而抽象模型指的是数学模型或者逻辑模型。可以用某种数量的或逻辑的关系式来代表和反映某些真实系统的特征及其行为的动态变化，比如用一组微分方程来表达热量在某种物质中的传导，或者用一组“如果……则会……”的因果关系式来表达某个复杂过程的输入与输出之间的关系。本书中所讲的仿真模型就属于抽象模型一类。

1.3 研究系统的两种方法：采用理论分析(解析)模型和仿真模型

从图 1-1 中看到，用于分析系统的抽象模型可以被分为两类：一类是解析模型，而另一类是(计算机)仿真模型。那么如何决定采用哪一种方法呢？这主要是基于两种方法的基本特点来决定的。

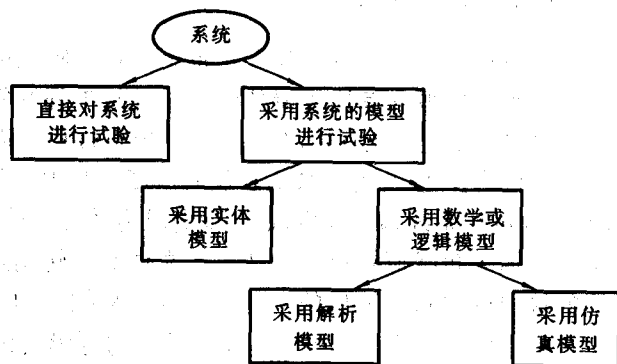


图 1-1 研究和分析系统的方法以及模型种类

(1) 解析模型。亦即确定的数学模型。在解析模型中，系统的行为表现为输出

变量是输入变量(包括模型参数)的确定函数,其结果是通过数学计算完全确定的解。比如像下面的一元二次方程:

$$Y = aX^2 + bX + c$$

就是一个简单的数学模型。由于变量 X 与 Y 之间的数量(函数)关系已经确定,对于任何设定的参数组合 (a, b, c) 来说,只要给出自变量 X 的数值变化,就可以完全确定因变量 Y 的数值变化。对于简单的系统来说,采用解析模型可以求出精确的结果。然而对于现实中的大多数系统来说,由于其复杂性,确定变量之间的函数关系是非常困难甚至是不可能的事情,除非用大量的假设来简化问题,然而增加的假设越多,模型的可信度和有效性也就越差。所以,完全采用解析模型的方法一般仅局限于简单系统的分析研究。

(2) 仿真模型。也就是借以对真实系统进行数值模拟的逻辑模型,通常是一个由相关的程序和数据组成的计算机模型。它通过对模拟过程中收集的数据进行统计分析,来实现对系统行为表现的评估。由于仿真模型是通过对系统的结构与功能进行模拟表述,并运用统计的方法来分析其行为变化,并不直接依赖于系统中各变量之间的确定关系(或者说函数关系),所以仿真模拟的方法适用于任何较复杂的系统。事实上,计算机仿真之所以成为一种在实际应用中流行的系统分析手段,一个主要的原因就是因为它具有分析复杂系统的能力,或者说,在相对经济的条件下,计算机仿真能够有效地分析复杂的系统,为解决复杂问题提供有力的决策支持。

1.4 为什么要采用计算机仿真模型

一般来说,人们采用计算机仿真模型而不直接利用真实系统进行分析试验的主要理由有以下三条。

(1) 直接用真实系统进行实验通常会破坏或扰乱系统的正常操作和运转(比如,对一条生产负荷饱满的制造装配线进行试验分析,需要多次停车调整有关参数,必定会扰乱该生产线的正常运转从而造成重大经济损失)。

(2) 直接用真实系统进行实验的效益-成本比例一般都较低。比如,直接对一个大型的物流系统进行实验以确定其最佳系统参数,通常成本代价昂贵。相反,利用计算机模型进行模拟试验通常是经济合算的。在实际中,人们往往只是对分析系统某一方面的问题感兴趣,采用仿真模型可以把问题抽象地集中在感兴趣的方面,从而大大节省建模时间,提高效率。

(3) 直接用真实系统进行实验的做法有时根本不可能。比如,研究确定宇宙飞船的发射操作程序。又比如,为一个规划中的制造工厂设计和确定其生产设施、设备的布局,当真实的系统还没有建立时,利用计算机仿真模型进行模拟是分析系统的惟一选择。

1.5 计算机仿真的分类

首先, 计算机仿真可以按照系统状态变量的性质分为连续仿真和非连续仿真两种。在连续仿真过程中, 系统的状态变化是时间的连续函数。比如, 模拟一个机械传动系统中某个构件的受力, 其应力分布的状态是时间的连续函数。而在非连续仿真模型里, 系统的状态变化仅仅在非连续分布的不同时刻(间断的时间点处)发生。比如, 零件到达某加工中心的时间, 一家商店里顾客总数的变化等。连续仿真已经在许多连续系统的模拟计算中得到了成熟应用。而非连续仿真则被广泛应用于生产制造业、服务业乃至其他社会行业的系统分析、设计、评估、优化及改进。本书的讲解范围将主要集中于非连续仿真及其应用, 但是在第 12 章里, 我们将对连续仿真做一个简明而系统的概述。就非连续仿真而言, 又有以下类别的区分。

(1) 静态仿真模型相对于动态仿真模型。区分此两类模型的关键因素是时间的作用。如果时间因素对仿真模型的运行实施和结果分析无足轻重, 则属于静态仿真模型。反之, 如果时间因素起着举足轻重的作用, 则属于动态仿真模型。例如模拟一个十字路口每天通过的交通(车辆)流量, 就需要采用动态仿真模型, 因为系统的状态与行为随时间的变化而变化(如车辆的到达率随时间而变化, 上下班高峰时间车辆的到达率远大于其他时间)。因此, 时间对模拟实验的运行和结果分析都产生着重要的影响。

(2) 确定性的仿真模型相对于随机性的仿真模型。在确定性仿真模型中, 系统的输入变量与输出变量都被假设成确定性的, 或者说, 在给定的时刻, 系统状态变化的定量描述是完全确定的。在现实应用中, 很多系统的特征变量及行为变化都是不确定的或者说的不完全确定的, 而且是时间的随机变量(比如在一个通信系统中, 于某一时刻到达系统信号的时间、数量和类型等)。对于此类仿真模型, 我们需要利用概率分布和统计实验的方法来模拟和分析系统的行为。

1.6 计算机仿真的应用领域

计算机仿真已经被广泛应用在现代社会科研与生产活动的很多领域之中。Bank(1998)曾经概括性地指出了一些广泛运用仿真技术来帮助分析系统、提供决策支持的行业, 其中包括: ①制造业; ②物资供应及运输业; ③服务业; ④医疗卫生业; ⑤军事系统; ⑥电信与通信业; ⑦娱乐业; ⑧机器人仿真应用。

一般说来, 计算机仿真实常常被用来分析系统的行为变化, 比如根据系统的输入变量来预测其输出变量的变化。非连续计算机仿真经常用于为下列的系统分析问题提供决策支持:

(1) 新系统的设计、规划、比较及选择(例如设计新的制造系统或物料运输系

统);

(2) 现有系统(包括工艺过程)的分析、改进、评估或者优化(例如,分析一条现有的生产线以改进其生产效率、降低生产成本,等等);

(3) 对有关系统的决策进行预测与评估(比如,对一个物料系统的多种管理控制策略进行预测评估)。

由于计算机仿真的广泛应用,许多人也对它产生了认识上的误区,比如以为计算机仿真是解决任何系统分析问题的万能药等。这里必须指出计算机仿真的如下几点局限性。

(1) 计算机仿真不能求出确定的解或者确定形式的最佳解。这一点是由仿真的性质所决定的。如前所述,仿真模型是通过与原系统的结构与功能进行表述和模拟,并通过统计分析的方法对系统的行为表现做出近似的估计,而不依赖于系统的变量之间是否存在确定的数量关系。这就决定了它不可能像解析模型那样能够求出确定的解。当然,由于实际问题的复杂性,用解析法求出确定的最佳解通常只是一种奢望。因此,人们更多关注的是仿真提供的近似解能否达到满意的精确程度。

(2) 计算机仿真不能够补偿由于数据不准确和管理水平低劣所造成的后果。这一点是非常明确的。仿真只是一种根据给定的要求和采集来的数据进行模拟的手段,如果提供的数据不准确或者系统本身就存在问题,仿真是不可能提供准确的估算结果或者消除存在的问题的。

(3) 对复杂系统来说,计算机仿真不可能轻而易举地提出解答。这就需要对计算机仿真有一定的了解。一般来说,系统越复杂,建立一个有效的仿真模型就越困难,所需要的时间和资源投入也就越多。

1.7 计算机仿真的具体实施

最原始的仿真方法是通过“手动”来实施的,亦即由人工自行设计、计算,并且实施整个仿真的过程。很明显,这种方法虽然简单,但效率极其低下,仅仅适用于很小规模的仿真问题。一个有趣的手工仿真实例是“Buffon Needle Problem”。在本章及第2章里,将详细描述手工的非连续仿真实例。研究现代产业中各种系统的仿真模型,都是采用计算机及相关的应用软件来进行建模、运行与分析的。按照建模思想和所用语言工具的不同,计算机仿真方法可分三个层次。

(1) 直接运用某种通用的高级语言编写和运行仿真程序(如用 C/C++, Pascal, Fortran 等)。这种方法的主要优点是建模的灵活性和自主性,但要求建模者必须精通所选语言的编程,其“学习曲线”上升缓慢,不易掌握,因而可能严重影响到建模效率。

(2) 采用专门的计算机仿真语言(如 SIMAN, GPSS, SLAM 等)来进行建模与分析。由于这些专门的计算机仿真语言具有集成性和功能模块化的特点,采用专门的仿真语言可以有效地提高建模效率。但是这些语言仍然有一定的语言规范要求,需要通过一定时间的专门训练才能掌握。

(3) 采用更高层次的图形组合式的仿真软件包。这一类仿真软件除了功能的高度集成化和模块化以外,还具有高度的用户友善性(比如,图文并茂的窗口界面、菜单化、采用图形指令等),使仿真的建模、运行与分析过程变得简单且易于实施操作,从而进一步提高仿真建模的效率与效力。在本书中,将为读者介绍一种较为先进而且流行的仿真软件包——ARENA。

在考虑使用何种语言工具时,一个重要的因素是找到建模效率与灵活性之间的平衡点,其他需考虑的因素还包括时间、建模成本,等等。

1.8 一个简单的手工仿真实例

为了帮助读者理解仿真的基本概念和应用,现在来考虑一个非连续仿真的简单例子。假设需要被分析的系统是一个单一的排队售票服务系统(见图 1-2),假定顾客随机地进入系统(亦即其到达系统的时间是个随机变量),加入排队等候买票,假定售票服务的时间也是随机分布的变量。将模拟这个售票服务系统的操作运转,直到该系统完成第 10 位顾客的服务(如何决定模拟时间的长短是一个很重要的问题,将在后面的章节里做详细的讨论)。尽管这是一个很简单的例子,而且将采用手工计算,而不是计算机建模的方式进行模拟,但仍然可以通过这个例子来重点说明以下几点:

- (1) 构成系统的逻辑元件及其相互关系;
- (2) 系统的状态变量和约束条件;
- (3) 研究系统的目的,选择用以衡量系统表现的方法,确定仿真模型的输出变量(亦即衡量系统表现的指标);
- (4) 仿真模拟的基本原理和方法。



图 1-2 一个单一的排队服务系统

从图 1-2 可以看出,这个单一排队服务系统是由下列逻辑元件构成的:其中,“顾客”是在系统中流动的个体,“售票员”是为个体提供服务的资源;此外,还需要一个“排队”来容纳进入系统并等候服务的个体。为了模拟这个过程,需要产生两组符合要求之分布的随机变量数值:一组代表顾客的到达时间,而另

一组代表相应的售票服务时间。假定已经通过某种方法(比如转动一个随机轮盘)产生了这些数值,并陈列在表 1-1 中。给定了输入变量(到达时间和服务时间)的数值,便可以计算出其他有关的数据,比如像开始服务和结束服务的时间,等等。其中,每一位顾客的“排队等候时间”是将其服务开始时间减去到达时间,而售票员的闲置时间则是将对应顾客的到达时间减去前一顾客的服务结束时间。列出这些数据的目的是为了便于计算输出变量的数值。注意,把累计的排队等候时间与闲置时间也列在表中的最后一行。

表 1-1 单一排队服务系统的仿真数据

顾客	到达时间	服务时间	服务开始 时间	服务结束 时间	排队等候时间	闲置时间
1	2	3	2	5	0	2
2	6	5	6	11	0	1
3	7	6	11	17	4	0
4	9	3	17	20	8	0
5	13	2	20	22	7	0
6	18	2	22	24	4	0
7	23	3	24	27	1	0
8	27	2	27	29	0	0
9	31	4	31	35	0	2
10	33	2	35	37	2	0
总计	—	—	—	—	26	5

假定希望通过仿真来确定或评估下列反映系统表现的指标(输出变量):

- (1) 顾客在系统中的平均停留时间(平均周转时间);
- (2) 顾客平均排队等候时间;
- (3) 售票员(资源)的闲置率(售票员处于空闲状态的百分比);
- (4) 需要等候顾客的百分比。

一般说来,仿真模拟的输出结果大致可分为两类数据。

(1) 一般的计数变量。主要包括算术平均值,最大、最小值,累计数值,等等。比如,个体的平均排队等候时间,平均滞留时间,平均生产周期,系统中的个体数量等。这一类平均值的计算很简单:假设有 N 个数值参与平均,把它们的数值相加,然后将相加之和除以 N 。

(2) 时间加权的统计量。主要包括时间加权的平均值, 平均值的获得除了考虑有关的每个数值以外, 还必须考虑每个数值在仿真运行中的时间持续长短的影响。在仿真中, 时间加权平均值用途很广, 比如资源利用率、平均排队长度、系统中个体的平均滞留数量等。这里, 来看看如何计算平均排队长度。假定模拟一个单一排队服务系统 T 分钟, 用 $Q(t)$ 表示任一时刻 t 时系统中排队的“长度”(也即排队中等候的人数), 则平均排队长度为

$$\bar{Q} = \frac{\int_0^T Q(t) dt}{T}$$

如果把模拟时间 T 分成 k 段, 并假设每段时间内的排队长度是一个常数 q_j , 则上式也可以表述成为

$$\bar{Q} = \sum_{j=1}^k \frac{q_j \Delta_j}{T}$$

现在来计算有关的结果。

平均排队等候时间: $26/10 \text{ min} = 2.6 \text{ min}$ 。

资源的闲置率: $5/37 = 0.135$ 或 13.5% (13.5%的时间售票员闲置)。

等候顾客的百分比: $6/10 = 0.6$ 或 60% (60%的顾客需要排队等候)。

顾客在系统中的平均停留时间: 先计算每一位顾客的停留时间(服务结束时间-到达时间), 然后把它们加起来, 再除以 10, 这里仅给出结果是 5.8 min 。

平均排队长度: 这是一个时间加权变量, 需要知道每一时间段的持续长度以及该时段内的排队数量。图 1-3 显示出各时段内排队长度的变化, 由此可以计算出平均排队长度:

$$[(9-7)(1)+(11-9)(2)+(13-11)(1)+(17-13)(2)+(18-17)(1)+(20-18)(2)+(22-20)(1)+(24-23)(1)+(35-33)(1)]/37 = 26/37 = 0.7027$$

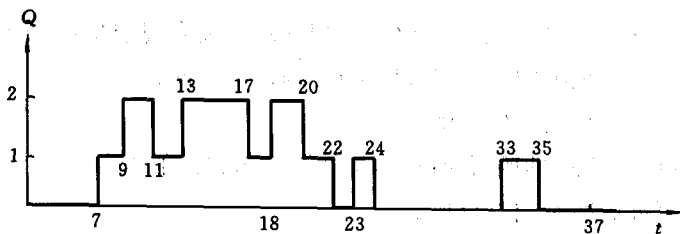


图 1-3 排队长度随时间变化的图形

对一般的生产制造系统来说, 还可以通过仿真来估算其他常用的指标, 比如:

- (1) 平均工序间半成品存量(WIP);
- (2) 平均排队长度, 即“平均队长”(waiting queue size);
- (3) 其他指标, 如平均废品率、物料运输时间等。