

JISUANJI FANGZHEN

计算机仿真

邱百光 编著

上海交通大学出版社

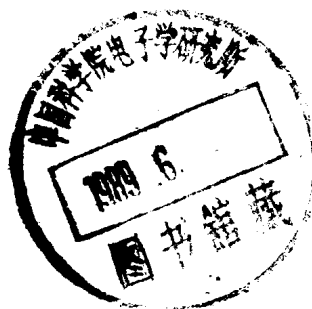
计算机软件与应用丛书



计算机仿真

计算机软件应用丛书

邱百光 编著



上海交通大学出版社

8910021

JS 124/17

内 容 简 介

本书共分八章,先从一个简单的银行系统着手,由浅入深地介绍了计算机仿真的概念和原理;然后详细地介绍和分析了CSIMAN混合仿真语言的各种功能;对离散仿真语言的主要过程的实现作了介绍;对连续仿真问题着重介绍了数学模型、常微分方程的数值解法、传递函数和状态空间表达式;最后介绍如何从计算机仿真获得统计估值、置信区间;介绍它们和终止仿真及稳态仿真的关系,以及由CSIMAN语言提供的分析处理仿真所得数据的功能。附录中给出仿真用的概率概念。

本书的主要内容曾作为南京航空学院计算机应用学科研究生课“系统仿真”的主要参考资料。在本书正式出版时,考虑到计算机仿真技术的应用已深入到各种领域,因此对书中的文字说明、举例和习题都以尽可能涉及更多的应用领域或易为广大读者理解的原则进行了改写。所以本书可作为研究生或高年级大学生的教材或作为工程技术人员的自学参考书。

计算机仿真

上海交通大学出版社出版

(淮海中路1384弄19号)

新华书店上海发行所发行

常熟文化印刷厂印装

开本 787×1092 1/32 印张 10 字数 221,000

1988年4月第1版 1988年7月第1次印刷

印数: 1—4,300

ISBN 7-313-00077-4/TP39

科技新书目: 169-253

定价: 1.65 元

前 言

“仿真”一词译自英文 Simulation，有关它的定义有各种说法，一种目前比较流行的定义是：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。计算机仿真则是借助计算机，用系统的模型对真实系统或设想的系统进行实验的一门综合性技术。1964年，美国 Bell 实验室研制成功电子微分分析器，开创了计算机仿真的新纪元，它的发展是与系统工程技术、自动控制技术、电子技术，特别是计算技术的发展密切相关的。近 10 年以来，由于微处理器的出现，使得研制具有商品性的，高速、高精度、高可靠、低价的，能满足高速实时仿真处理的外围数组处理机成为可能，在仿真语言的发展方面，也和其他应用软件一样，经历了手编程序、高级语言、面向用户语言的阶段，目前正在各个仿真应用领域中，和相应的 CAD、CAM 软件综合成一种对某类具体产品有方案论证、初步设计、工程设计、测试检验、专家咨询等功能的综合软件包。总之，目前仿真技术已经广泛地应用于航天、航空系统和国民经济的各个领域。系统仿真是指用仿真技术来研究各种系统，它粗略地可分成计算机仿真、半物理系统和全物理系统仿真。计算机仿真也可称为纯数学仿真，它是一种通过建立和实际系统相符合的数学模型，再运用计算机进行仿真运行，以达到研究系统的目的。由于计算机仿真这种技术不需要除计算机系统以外的任何物理装置，因此经济效益十分显著，例如，过去设计一架新的飞机型号，要在风洞中做吹风实

验多达千次以上,所需的制作各种飞机模型的费用、风洞实验费用非常大。目前,已经能把大多数的吹风实验放在计算机上进行全数字仿真,从而把物理仿真的次数降低到只要做几次就行,据估计其经济效益可提高百倍以上。不仅如此,在非工程仿真领域中,计算机仿真往往还是唯一可行的手段,例如,当要研究世界范围的人口发展问题时,是无法进行物理仿真的,然而,利用计算机仿真进行研究却是可行的。

从数学的角度来看,全数字仿真的工作量大,难度高,其关键是在建立能反映系统内在规律的数学模型以及实现的算法方面。当然一牵涉到物理仿真,就有工程实现方面的难点,但无论如何,数字仿真技术毕竟是仿真技术的重要基础,这就是本书着重介绍计算机仿真的理由。

本书编写的指导思想是理论和应用相结合。为了便于大多数读者有上机学习的机会,选用了能在 IBMPC 微机系列上运行的 CSIMAN 语言,该语言是对美国 Modeling 软件公司的 SIMAN 语言进行汉化后的语言,它和 SIMAN 语言完全兼容,该语言具有最新一代仿真语言的主要特征,如模型程序和实验程序的分离;能进行离散的、连续的和混合的仿真,内部程序具有面向框型、面向事件和面向时间的结构,方便了各种用户的使用等等。为了向部分读者,特别是计算机专业的技术人员介绍离散仿真程序设计的一般方法,文中列举了能在 IBM PC 上运行的、用 PASCAL 实现的一些主要过程。

本书的第一章介绍了系统和计算机仿真的最基本概念。第二章介绍离散仿真的基本概念:排队系统、到达模式、服务和排队等。第三章以一个简单的银行系统为例,引入 CSIMAN 的最常用的框型语句、模型和实验架源程序的上机步骤及运

行结果。第四章引进 PT 图的概念,在此基础上介绍如何运用 CSIMAN 语言的一些主要框型实现“到达”、“延迟”、“条件延迟”、“离去”和统计。第五章介绍面向事件仿真程序的主要过程的实现。第六章讨论连续系统仿真的基本概念、方法以及常见的 CSMP 和 DYNAMO 语言。第七章介绍 CSIMAN 的连续和混合仿真功能,并通过实例描述如何运用有关功能语句。第八章探讨了仿真输出结果的分析,举出一个队列统计结果输出的 PASCAL 实现的过程,介绍了置信区间、终止仿真和稳态仿真的概念以及由 CSIMAN 提供的有关功能语句的运用。最后在附录中概述了仿真用的概率论基本概念。

本书所需要的预备知识包括线性代数、概率与随机过程以及计算机算法语言。对离散仿真语言的内部实现感兴趣的读者需要了解 PASCAL 语言的程序设计。本书可作为研究生或高年级大学生的教材,也可作为工程技术人员参考书。

本书由邱百光主编。第二章及附录由柯敏编写,第六、七两章由奚抗生编写,第八章的三、四两节由王琪编写,其他各章节均由邱百光编写。

在本书的编写过程中,南京航空学院的多机系统实验室的阮牧同志都给予了各种帮助,其中 SIMAN 语言的汉化工作李建康教授的关心和协助,在此致谢。南京通讯工程学院徐越彦教授对全文进行仔细的审阅,并提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢。由于编写时间仓促,本人水平有限,错误之处希望读者批评指正。

编 者

1987年6月

计算机软件与应用丛书

(第一辑)

计算机数据安全原理	周锡龄	著
情报检索	王和珍	编著
数据库设计	施伯乐等	编著
程序设计方法学	朱三元	编著
微型计算机应用例解	白英彩等	编著

(第二辑)

计算机仿真

邱百光编著

《计算机软件与应用丛书》编委会名单

顾问：刘振元 陈祥禄 朱雅轩

名誉主编：徐家福 杨芙清

主编：朱三元

编委：(按姓氏笔划排列)

白英彩 李玉茜 刘建明 何守才

陈涵生 陈娜芬 周锡龄 施伯乐

徐民祥 曹东启

目 录

第一章 导论	1
§ 1-1 系统、连续系统和离散系统	1
§ 1-2 系统制模与计算机仿真的关系	10
§ 1-3 仿真语言及其发展	23
习题	30
第二章 离散仿真的基本概念	33
§ 2-1 排队系统	33
§ 2-2 到达模式	36
§ 2-3 其他到达模式	39
§ 2-4 服务时间与正态分布	43
§ 2-5 排队规则和队列的度量	45
§ 2-6 设备利用率和服务质量	48
§ 2-7 排队系统制模	52
习题	58
第三章 CSIMAN 通用混合仿真语言	61
§ 3-1 CSIMAN 的组成	61
§ 3-2 模型程序设计	63
§ 3-3 实验架设计	75
§ 3-4 编译、链接和运行	78
§ 3-5 输出处理	87
习题	92

第四章 离散系统仿真	96
§ 4-1 到达模式的产生	96
§ 4-2 延迟	107
§ 4-3 条件延迟	114
§ 4-4 离去和统计	124
§ 4-5 子模型和宏模型	131
§ 4-6 框型程序设计	144
§ 4-7 GPSS 的框型语句	155
习题	158
第五章 离散仿真程序的设计	163
§ 5-1 动态实体的实现	163
§ 5-2 排队线的实现	167
§ 5-3 设备的实现	174
§ 5-4 面向事件仿真程序结构的实现	182
习题	186
第六章 连续系统仿真	189
§ 6-1 连续系统数学模型	189
§ 6-2 常微分方程的数值解法	192
§ 6-3 传递函数和状态空间表达式	198
§ 6-4 连续系统的仿真技术	207
§ 6-5 连续系统的仿真语言	214
习题	226
第七章 CSIMAN 的连续仿真功能	228
§ 7-1 STATE 子程序	228
§ 7-2 连续仿真语句	232
§ 7-3 离散/连续混合模型的语句	237
§ 7-4 连续仿真应用举例	242

§7-5 混合仿真应用举例	246
习题	252
第八章 输出结果与分析	255
§8-1 统计估值的获得	255
§8-2 置信区间与置信度	264
§8-3 终止仿真与稳态仿真	271
§8-4 CSIMAN 分析处理功能	278
习题	281
附录 仿真用的概率概念	284
§1 随机变量、概率函数、随机数	284
§2 均匀连续分布随机数及其生成	290
§3 各种离散分布随机数的产生	299
§4 非均匀连续分布随机数及其产生	301

第一章 导 论

§ 1-1 系统、连续系统和离散系统

系统是本书要介绍的第一个基本的概念，因为它是仿真技术所作用的对象。一个实际系统的简单定义^[1]是：按照某些规律结合起来的，互相作用、互相依存的所有元素的集合。注意，定义中采用“元素”而不使用“物体”术语，是为了强调所述及的系统不仅是有形的物理系统，也可以是属于抽象的、概念的系统，例如对计算机而言，仿真的对象既可以是它的硬件系统，也可以是它的软件系统。定义中使用了“按照某些规律结合起来”的描述语，是为了把仿真的研究对象最大限度地加以扩展。用通俗的话来说，系统可以是“白盒”，也可以是“灰盒”或“黑盒”；换言之，对系统内部各元素的互相作用的规律可以是已知的、略知的或者是模糊的，甚至是未知的。按照定义，一个实际系统的元素往往是非常多的，例如一个大规模集成电路所构成的系统，其元素可

以是运算器、存贮器、总线、控制器、门电路、三极管、电阻，等等，这样的系统概念可以和图论的连通图对应起来，如图 1-1 所示。系统对应一个图，元素对应图中的点，而规律作用、关系和点与点之间的边对应。

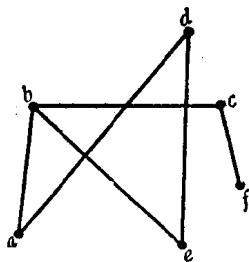


图 1-1 系统图

8910021

, 1 .

实际上,为了能把各元素的主要特征在图中表示出来,常见的方法是把每一个点用加有说明的方框表示,这就是所谓系统框图。

图 1-2 是一个航空炮塔控制系统的示意图,图中炮塔轴的方向是系统的输出量,瞄准具轴的方向为输入量,电位器 R_1 和 R_2 用来测量两轴之间的误差角,当误差角不为零时,差动放大器将产生误差信号,它经过功率放大后,驱动伺服电动机转动,以减小误差角,达到随时瞄准的状态。

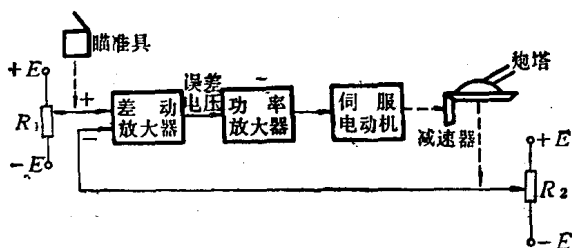


图 1-2 航空炮塔控制系统示意图

图 1-3 是一个电压-数字的转换系统。当计数器所表示的数值经 D/A 电路变成电压后,和输入电压比较,比较器的输出将反映出相等、大于和小于三种可能情况。门控电路将根据相应的情况开放或关闭脉冲源送来的脉冲信号,使具有可逆计数功能的计数器作增量、减量或保持的操作,其结果是系统的数字输出将随时和输入电压的大小一致。

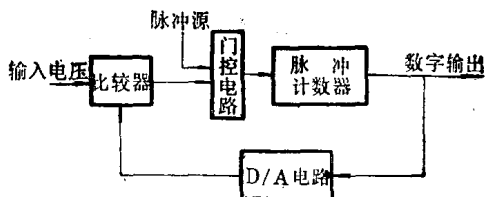


图 1-3 电压-数字的转换系统

图 1-4 是一个计算机辅助工艺路线制订 (CAR) 的系统总框图^[3]。系统通过人机对话方式输入有关信息后, 把单元图形拼装在原材料图形规定的位置上, 进行工艺可行性检查, 得到零件的最终形式并以文件方式存入磁盘。接着便自动地确定出最优的加工顺序, 同时也确定了要使用的机床。下一步是根据标准时间数据, 按照具体的机床、夹具、刀具等切削条件及附加信息计算出生产时间和打印输出。整个过程中, 系统在数据库软件的支持下不断地以各种不同的数据文件和磁盘进行信息交换。

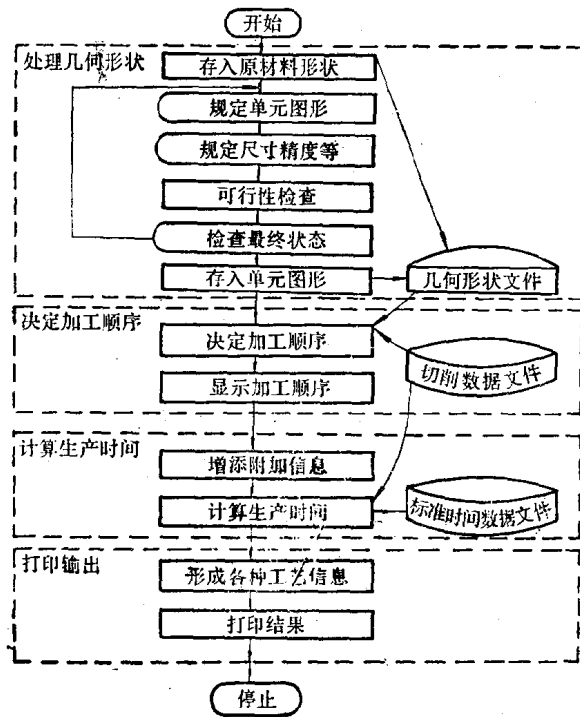


图 1-4 CAR 系统总框图

图 1-5 表示一个简化的急诊室系统,它表示一个由护士、病房及医生构成的排队系统,病人按病情分为五类,按一定的到达规律随机地来到急诊室就医,对于 1 类紧急病人,将直接送入急诊病房等待获得病床后就诊, 2~5 类病人在通过护士的检查, 办理挂号及作必要的记录后, 除第 5 类病人外都进入病房。五类病人在护士和医生处所得到的医疗服务是不同的, 这反映在所花费的时间有所不同, 在护士、病床及医生的圆框外加有符号 Π , 表示病人在得到服务前需要进行排队等待。显然, 排队的情况将取决于病人到达的频繁程度, 护士、病床及医生的数量以及所花费的服务时间。

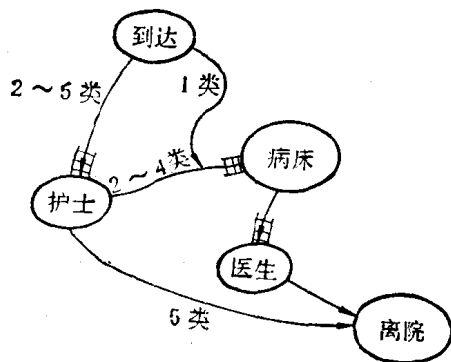


图 1-5 急诊室系统

以上列举的系统都符合定义, 因而都是可以运用仿真技术加以研究的系统。但是, 所举的四个系统各自有其特殊性, 图 1-2 表示的系统, 所要研究的物理量是连续量, 因而称为连续系统。图 1-5 的急诊室系统, 所涉及的病人、护士、医生的活动是不连续的, 称为离散系统。同样图 1-4 的 CAR 系统中的程序流、数据流或文件在磁盘中的写入或读出的情况, 也属一个离散系统, 它与急诊室系统的不同仅在于后者由一些抽象的元素构成, 而前者由有物体实体的元素构成。图 1-3 涉

及的则是一个既有离散量（脉冲电路及计数器）也有连续量（电压比较器）的系统，显然对于连续的和离散的两种不同的系统，所采用的仿真法将有很大的不同。有关连续系统的仿真方法及其原理，在国内已有较多的教材论及^[4,5]，本书的重点是介绍离散系统及混合系统的仿真技术。为了能方便地理解关于混合系统的仿真方法，才对连续系统的仿真问题作一简要的介绍。虽然如此，对上述的四种不同的系统，从仿真的角度来看，研究一下它们之间的共性还是很有意义的，因为这是能对混合系统进行仿真的根据。由系统的定义可知，从集合的观点看，在图 1-2 到图 1-5 中的大多数方框和圆框都是元素，在仿真中的术语是“实体”。不是实体的情况是在图 1-4 或图 1-5 中表示开始、结束、到达、离去这几种表示事件或活动的框。“实体”是对实际系统为构成仿真模型所必需的、不可略去的各种系统的抽象。事实上，在图 1-2 的炮塔系统中，用了电位器 R_1 和 R_2 表示瞄准具及炮塔的运动，略去了全部机械成分及它们给系统带来的误差。同样在电路中也略去了导线、线间干扰等各种系统分量，按照“实体”的这一定义，例如，对于急诊室系统，当考虑到急诊室中各病床有可能公用数量较少的抢救设备（例如供氧气设备）时，系统中将增加一个设备的“实体”。从数学观点来看，这些系统中各种“实体”的“属性”，即定义为能描述该实体状态的一些量，可以是时间的函数，也可以不随时间变化。我们把系统全部实体的属性在某时刻 t 所取量值的集合 $S(t)$ 定义为“系统状态”，则 $S(t)$ 是一个向量，它的维数等于系统全部实体的属性总数，其中 $t \in \mathcal{T}$ ，即 t 取自某一时间域 $\mathcal{T}$ 。一般说来， $S(t)$ 也可以是一些随机变量的向量。当根据所建立的仿真模型写出仿真程序，则每运行一次仿真程序，就对应于所研究的系统在某个

观察时间域 $\mathcal{T}$ 上,系统状态的一组取样值的集合。当 t 在观察时间域 $\mathcal{T}$ 上按某种序列 $\{t_1, t_2, \dots\}$ 取值的过程中,系统状态发生了变化,就定义系统发生某一“事件”,并把此时的 t_i 值定义为“事件时刻”。任何引起系统状态改变的过程称为“活动”。因此,“活动”的结果使系统发生“事件”,而两个相邻的“事件时刻”可以看成是某一“活动”的过程。

所谓“连续”系统是指其状态随时间连续变化的系统,也就是说,不论是“事件”所引起的效应大小,还是“事件时刻”之间的区间,即“活动”过程的大小,从数学观点来看都是无穷小量,对这种系统通常可以用一组微分方程加以描述。对应于这种系统的取样值,实际上常常是由初始条件和边界条件所唯一确定的、满足该微分方程组的函数解在时间域上的函数值。

对于离散系统,可按照时间和事件的关系分为两大类:

(1) 时间离散 系统只在一些特定的时刻,即 $= \{t_1, t_2, \dots\}$ 上被考察。通常,为了便于研究,各时间间隔选定为正常数。例如,考察教学系统的活动,可以用一个学年为时间间隔。工厂的生产活动可以日、月、季或年为时间间隔等。显然上述的连续系统可以看成是时间离散系统的特例,即要把时间间隔 Δt 取得足够小,以得到所要求的近似精确度。

(2) 时间连续而有离散事件 系统状态的变化,即事件时刻是不连续的、跳跃式的。例如,当我们考察十字路口处的红绿灯,如果它是由交警根据车流以及路口车队的情况进行控制的话,则红灯亮的事件时刻是跳跃式的。如果用 $S(t)$ 表示红灯处于亮、暗这一系统状态的话,并定义红灯亮时, $S(t) = 1$;反之 $S(t) = 0$,则图 1-6 是 $S(t)$ 可能变化的一种情况。通常,为了统一起见,把开始考察的时刻,取值为 0,结果

考察时刻取为 T ，图中 $t_1 < t_2 < \dots < t_7 < T$ ，它们分别标记着红灯的七次变化的时刻，一般说来，这类系统可用下式加以描述：

$$\{S(t), t \in \mathcal{T}\}, \mathcal{T} = \{t \in (0, T)\}.$$

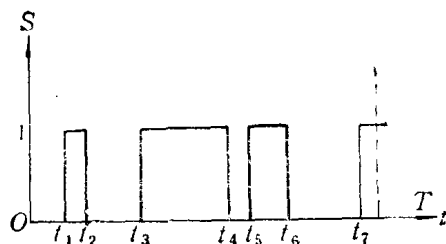


图 1-6 红灯状态变化

从图 1-6 可以看出， $S(t)$ 在两个相邻的事件时刻之间是连续变化的(本例是保持常值)，而在每一个事件时刻上作离散变化，当 $S(t)$ 为多维向量时，其部分分量可能仍作连续变化。

以上，从两个方面指出连续系统和离散系统的某些共性，这些共性是计算机能对混合系统进行仿真的基础，也是能建立混合仿真语言的基础（关于这一点，在介绍混合仿真语言时，将会有进一步的说明）。为了对前面引入的几个概念有更深入的理解和掌握，表 1-1 列举了在一些系统的简化模型中，有关实体、属性、事件的具体说明。其中某些系统将在以后各章中加以引用，或作进一步的说明。表 1-1 中所列举的系统，虽然是简化的，但其中提出的某些“事件”或“属性”，在具体研究的问题不同时使用。当然，当系统要求研究得更透彻，还可能增加一些“事件”、“属性”和“实体”。表 1-1 所举例的系统，显