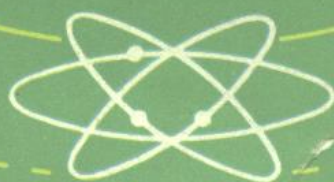


系
统
仿
真

—高等学校教材—

系统仿真

上海交通大学 韩慧君 编



國防工業

7
TP13

系 统 仿 真

上海交通大学 韩慧君 编

国防工业出版社

内 容 简 介

“系统仿真”是自动控制专业一门综合性很强的技术学科，它是分析、研究和设计系统的重要工具。

本书是高等院校工科电子类自动控制专业1982~1985年统编教材之一。全书共分六章，以连续系统仿真为重点。第一章是概论；第二章主要讨论应用数值积分方法进行仿真的两种仿真程序：面向微分方程和面向结构图的仿真；第三章和第四章介绍以差分方程为仿真模型来仿真连续系统和采样系统，并讨论计算机控制系统的优化方法及程序；第五章和第六章主要介绍几种典型的离散事件系统仿真方法和仿真语言 GPSS-F。正文及附录中相应地提供了上述各种仿真程序的全部清单和应用实例。

2092/38

系 统 仿 真
上海交通大学 韩慧君 编

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 1/16 印张22¹/₄ 516千字

1985年6月第一版 1988年6月第一次印刷 印数：7,501—9,500册

ISBN 7-118-00096-5/TP·10 定价：3.70元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二～一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系由电子工业部《计算机与自动控制》教材编审委员会自动控制编审小组评选审定，并推荐出版。

该教材由上海交通大学韩慧君担任主编，清华大学熊光楞担任主审。编审者均是依据自动控制编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

本课程的参考教学时数为40~50学时。在学这门课之前，学生必须学习过“自动控制原理”、“计算方法”和高级程序设计语言（BASJC，FORTRAN）等课程，此外，最好具有概率论及数理统计方面的基础知识。

本书旨在介绍数字仿真的一般方法和常用的仿真程序。其内容包括连续系统仿真和离散事件系统仿真两大部分，其中目前应用较广的连续系统仿真是本书的基本内容。为了适应国内外仿真技术的发展，本书以一定篇幅介绍了正在日益受到重视的离散事件系统仿真，使学生能更全面地掌握本学科的知识。

本书第一章概要地介绍了仿真的基本概念以及方法。第二、三、四章介绍了连续系统仿真，其中第二章所介绍的是应用数值积分法进行仿真的原理和仿真程序；第三章所介绍的是以差分方程为仿真模型进行仿真的方法和仿真程序；第四章专门讨论了采样系统的仿真和优化问题。由于采样系统的数学模型也是差分方程，所以把它归并在连续系统仿真一类中了。第五章主要介绍几种典型的离散事件系统仿真方法和用FORTRAN语言编写的仿真程序。第六章详细介绍了国际上较为广泛应用的通用仿真语言GPSS-F，并附有典型仿真实例。由于《系统仿真》是一门实践性很强的技术学科，所以本教材中除介绍各种仿真方法外，还配备了大量的仿真程序，各章后附有上机习题。

本书是以美国宾州大学K. A. 费格利（Kennith. A. Fegley）教授1981年来上海交通大学讲学所介绍的内容为基础的。在编写过程中，还参阅了国内外有关文献，总结了我们近年来的教学、科研实践中的一些体会。参加审阅工作的还有自动控制编审小组的全体同志，他们为本书提了许多宝贵意见，这里表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

目 录

第一章 概论	1
1.1 系统的定义和分类	1
1.1.1 系统的定义和特性	1
1.1.2 系统的分类	2
1.2 系统模型和仿真	2
1.2.1 模拟计算机仿真	3
1.2.2 数字计算机仿真	5
1.3 数字仿真软件的功能与主要类型	10
1.4 数字仿真的应用及发展方向	12
第二章 应用数值积分法仿真连续系统	14
2.1 连续系统数学模型	14
2.2 常用的数值积分方法	19
2.2.1 单步法	19
2.2.2 多步法	25
2.2.3 预估-校正法	27
2.2.4 数值解稳定性问题	28
2.2.5 数值积分方法的选择	31
2.3 面向微分方程的仿真程序包	32
2.4 面向结构图的CSS仿真程序包	52
2.4.1 扩展CSS型ZFX仿真程序包的使用方法	53
2.4.2 ZFX仿真程序分析	63
2.4.3 非线性环节仿真程序	69
2.4.4 微型仿真程序MICRO-CSS简介	71
2.5 连续系统仿真语言 DARE-P 简介	77
2.5.1 DARE-P的主要功能	78
2.5.2 DARE-P语言的基本结构	78
2.5.3 DARE-P的使用方法	79
2.5.4 应用例子	81
小结	82
习题	83
第三章 应用离散化模型仿真连续系统	85
3.1 连续系统离散化模型	85
3.2 离散化模型的精度和稳定性问题	87
3.2.1 离散化模型的精度问题	87
3.2.2 离散化模型的稳定性问题	88
3.3 采用补偿器提高模型精度和稳定性	89
3.4 用根匹配法建立离散化模型	93
3.5 用差分方程模型仿真连续系统	95
3.5.1 仿真方法	95
3.5.2 连续离散系统仿真程序CDSS	96
小结	104

习题	104
CDSS 仿真程序清单	106
第四章 采样系统仿真与优化	115
4.1 计算机控制系统的仿真	115
4.1.1 计算机控制系统仿真的基本方法	115
4.1.2 数字控制器的仿真	116
4.1.3 延迟环节的仿真	118
4.2 计算机控制系统仿真实例	119
4.3 数字控制器的设计	124
4.4 仿真与优化	127
4.4.1 最速下降法	128
4.4.2 共轭梯度法	131
4.4.3 单纯形法	134
小结	138
习题	139
第五章 离散事件系统仿真	141
5.1 离散事件系统仿真的基本方法	141
5.2 随机数和随机变量的产生	144
5.2.1 随机数的产生	144
5.2.2 连续随机变量的产生	147
5.2.3 离散随机变量的产生	153
5.3 排队系统仿真	155
5.3.1 排队论基础	155
5.3.2 单服务台排队系统仿真	159
5.3.3 两服务台排队系统仿真	162
5.4 随机库存系统的仿真	167
5.4.1 库存系统简介	167
5.4.2 库存系统的仿真	170
5.5 随机网络仿真	184
5.5.1 一个工程的网络模型	184
5.5.2 网络分析及仿真	185
5.5.3 PERT 网络仿真	189
5.6 仿真结果分析	193
小结	197
习题	197
第六章 GPSS-F 仿真语言	199
6.1 GPSS-F 仿真语言基本组成	199
6.2 主要模块的功能及其使用方法	200
6.2.1 流程管理模块	200
6.2.2 几种主要模块功能说明	203
6.2.3 仿真主程序	208
6.3 应用GPSS-F建立仿真模型	210
6.3.1 单队单服务台排队系统仿真	210
6.3.2 多服务台排队系统仿真	216
6.3.3 库存系统仿真	222
6.3.4 计算机信息处理系统仿真	223

6.3.5 PERT网络仿真	231
小结	234
习题	234
结束语	235
附录一 应用模拟机仿真时幅度和时间比例变换法	237
附录二 ZFX 仿真程序清单	240
附录三 一、连续系统状态方程离散化推导	273
二、离散化状态方程中转移矩阵 $\phi(T_s)$ 、 $\phi_m(T_s)$ 的数值计算方法和程序	278
附录四 单纯形法寻优程序 SIMPLX	282
附录五 离散事件系统仿真语言 GPSS-F全部程序清单	285
参考文献	347

第一章 概 论

系统仿真是近二十年发展起来的一门新兴技术学科。仿真就是利用模型对实际系统进行实验研究的过程。当在实际系统上进行实验比较危险或者难以实现时,仿真技术就成了十分重要、甚至必不可少的工具。近年来,由于数字计算机的引入,应用数字计算机对实际系统进行仿真的技术更是日益受到人们的重视,其应用的领域也愈来愈广泛。在我国,仿真技术起初只是用于航空、航天、原子反应堆等少数领域,后来,逐步发展到电力、冶金、机械等一些主要工业部门。现在,正进一步扩大应用于社会经济、交通运输、生态系统等各个方面,成为分析、研究和设计各种系统的重要手段。

本章主要说明系统、模型和仿真的基本概念,并用两个简单例子说明系统仿真的步骤。最后,介绍一下仿真技术的应用范围和发展方向。

1.1 系统的定义和分类

我们已经学习过“自动控制系统”这门课程,所以,对什么是自动控制系统、它是如何组成的、有些什么特性等问题都比较熟悉。但是实际上,一般所说的“系统”含义要远比“自动控制系统”广泛得多,因而“系统仿真”这门课程所包含的内容也应该是广义“系统”的仿真,而不仅是“自动控制系统”这一种类型的系统仿真。下面具体说明一下系统的确切含义以及它们一般有哪些类型。

1.1.1 系统的定义和特性

什么是系统呢?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总体。

首先,必须明确系统的整体性。也就是说,它是一个整体,它的各部分是不可分割的。正如人体一样,它由头、身躯、四肢等各部分组成,如果把这些部分各自拆开,那也就不成为人了。再如,一个工厂系统,它由管理部门、原材料仓库、生产车间及销售部门所组成,同样,如缺少其中之一,也就无法构成一个工厂系统了。至于大家熟悉的自动控制系统,其基本组成(如控制对象、测量元件、控制器等)部分同样不可缺一。因此,系统的整体性是一个很重要的特性。

其次,要明确系统的相关性。也就是说,系统内部各物体之间相互以一定规律联系着,它们的特定关系形成了具有特定性能的系统。如常见的电动机调速系统,它由电动机、测速元件、比较元件以及控制器等组成,它们相互间形成一个特定关系,因而形成了调速系统能够调速的特定性能,这也就是系统的第二个特性,即相关性。

在自然界和人类社会中存在着各种系统,有的完全是由自然界的自然物构成,如海洋系统、气象系统、生态系统等等。有的则是由人工制成的各种物体所组成,如各种工程系统、社会经济系统等。那么,在研究某一系统时,究竟如何来确定系统的界限呢?因为有许多系统并不象自动控制系统那么清楚地分为系统的内部和外部。它们常常需要

根据所研究的目标才能确定哪些属于系统的内部因素、哪些属于系统的外界环境。例如, 上述工厂系统, 如果所研究的目标是用户订货量、原材料供应量和工厂输出产品之间的关系, 那么该系统只要包含以上的一些组成部分也就可以了。但如果要进一步扩大研究和商店销售这一产品的关系, 那么系统就需要相应地扩大到包括商店的仓库、销售等部门。因此, 系统的界限并不是固定不变的, 它要根据所研究的目标来确定。

1.1.2 系统的分类

系统的分类方法很多, 按照不同分类方法可以得到各种类型的系统, 但其中最重要的一种分类方法是按其状态变化是否连续分为连续和离散两种。

若一个系统的状态是随时间连续变化的, 就称为连续系统, 这类系统的动态特性可以用微分方程或一组状态方程来描述, 也可以用差分方程或一组离散状态方程来描述。究竟采用哪一种, 这取决于研究者是对系统状态随时间连续变化的整个过程都感兴趣, 还是仅对某些时间点感兴趣, 或者是所能得到的数据资料仅仅限于某些时间点。例如, 在有些生产过程中常常采用巡回检测仪表, 这些仪表有各种检测频率 (如每秒 100 次、1000 次等等), 这时, 被控制量即使是连续变化的, 但是被测到的数据却是间断的。还有, 在一些社会经济系统中, 往往所能得到的统计数据也只是按月、季度, 甚至按年的, 尽管这类系统实际的状态变化是连续的, 但是也只能用差分方程来描述。

不论它们是用微分方程还是用差分方程来描述, 只要实际状态变化是连续的, 都应归为连续系统一类。但为了区别用差分方程描述的这一种系统。一般人们都称之为采样系统。

另外还有一种系统, 其状态变化只在离散时刻发生, 而且往往又是随机的, 通常用“事件”来表征这种变化, 所以又叫离散事件系统。在工程系统和计划管理系统中就有许多这类系统, 例如, 通信系统、交通管理、计算机网络、库存系统等等, 这些系统一般规模庞大、结构复杂, 一般很难用解析法求得结果, 因此, 更有必要用计算机仿真技术进行系统分析或设计。

对于连续系统 (包括采样系统) 和离散事件系统这两类, 其仿真方法完全不同。第二、三、四这三章所讲述的是连续系统的仿真问题, 第五、六两章所讲述的是离散事件系统的仿真问题。目前从系统仿真方法的类型来看, 基本上都可以归属于这两大类。虽然, 国内现在应用离散事件仿真方法的还不多, 但是随着现代化工业的发展、系统规模的扩大, 实际系统将会既有连续又有离散事件系统, 因此仅仅掌握一种仿真方法肯定是不够的。当然, 由于目前连续系统仿真用得还较多, 所以, 本书中这方面的内容仍然占了较多篇幅。

1.2 系统模型和仿真

仿真 (Simulation) 就是模仿真实事物, 也就是用一个模型来模仿真实系统[●]。既

● 根据“国际标准化组织 (ISO) 标准”中《数据处理词汇》部分的名词解释, “模拟” (Simulation) 与 “仿真” (Emulation) 两词含义分别为:

“模拟”即选取一个物理的或抽象的系统的某些行为特征, 用另一系统来表示它们的过程。

“仿真”即用另一数据处理系统, 主要是用硬件来全部或部分地模仿某一数据处理系统, 以致于模仿的系统能象被模仿的系统一样接受同样的数据, 执行同样的程序, 获得同样的结果。

鉴于目前实际上已将上述“模拟”和“仿真”两者所含的内容都统归于“仿真”的范畴, 而且都用英文 Simulation 一词来代表, 因此, 本书所讨论的仿真概念也就这样泛指。而所涉及的“模拟” (Analog) 一词仅指应用模拟计算机的仿真。

是模仿,当然两者不可能完全等同,但是最基本的内容应该相同,即模型至少必须反映系统的主要特性。至于以什么形式来表示,则可根据需要和条件来确定。一般有两类模型,即物理模型和数学模型。物理模型就是根据相似原理,把真实系统按比例放大或缩小制成的模型,其状态变量与原系统完全相同。这种模型多用于土木建筑、水利工程、船舶、飞机等制造方面,例如,造船工程师需在设计过程中用比实船小得多的模型在水池中进行各种试验,以取得必要的数据和了解所要设计船的各种性能。我们所用的并不是这种物理模型,而是另外一种,即数学模型。这是一种用数学方程(或信号流程图、结构图)来描述系统性能的模型,如果其变量中不含时间因素,则为静态模型;如与时间有关,则为动态模型。数学模型是系统仿真的基础,也是系统仿真中首先要解决的问题。但是对连续系统的建模问题,在其他课程中已经解决,所以本书就不再介绍。至于离散事件系统的建模问题,将结合仿真方法一起讲述。

由于应用数学模型进行仿真,所以就叫数学仿真。数学仿真的确切定义可以表述如下:

数学仿真是指建立一个系统(或过程)的可以计算的模型、并把它放到数字计算机(或模拟计算机)上进行试验的全过程。通过模型试验以了解原系统(或过程)在各种内、外因素变化下,其性能的变化规律。

以上所说的“可以计算的模型”是指在数字机(或模拟机)上能够运行的模型。因为在许多情况下,不能直接将数学模型进行仿真运行,而是需要应用一些数值计算方法把它变换成可以运算的模型。例如,以常微分方程描述的模型必须用数值积分方法化成迭代算式后才可以在数字机上运行。为了区别原来的数学模型,常把这种“可以计算的模型”称为仿真模型。对于同样的数学模型,其仿真模型随仿真设备不同而不同。

下面分别介绍应用模拟计算机和数字计算机两种仿真设备进行仿真的过程、特点,并比较它们的优、缺点。

1.2.1 模拟计算机仿真

模拟计算机仿真最早出现于五十年代。由于它采用并行运算的原则,因此速度比较高。

模拟计算机是一种以运算放大器为基本部件、可以进行积分、求和和反号等运算的计算装置,它适用于以微分方程描述的系统仿真。下面以一简单例子说明应用模拟机进行仿真的基本方法。

〔例子〕 设一质量、阻尼和弹簧系统如图 1-1 所示,其中质量 M 、阻尼系数 B 和弹簧弹性系数 K 都已知。若输入外力 $F(t)$,现要求用模拟机对该系统进行仿真,求出位移 $x(t)$ 。

首先,要建立这一系统的数学模型。大家知道,它可以用一常微分方程来描述,其方程如下:

$$M\ddot{x}(t) + B\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (1-1)$$

初始条件: $\dot{x}(t)|_{t=0} = \dot{x}(0) = a$

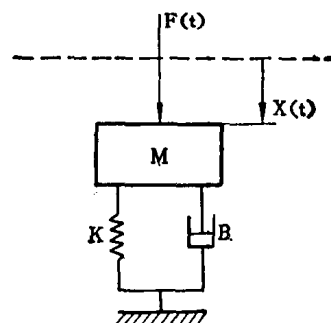


图1-1 质量阻尼弹簧系统

$$x(t)|_{t=0} = x(0) = b$$

由于在模拟机上仿真求解微分方程是采取逐项积分的方法, 所以还需把式 (1-1) 改写为如下形式:

$$\ddot{x}(t) = -\frac{B}{M} \ddot{x}(t) - \frac{K}{M} x(t) + \frac{1}{M} F(t) \quad (1-2)$$

根据方程式 (1-2) 可以得出图 1-2 所示的仿真结构图。

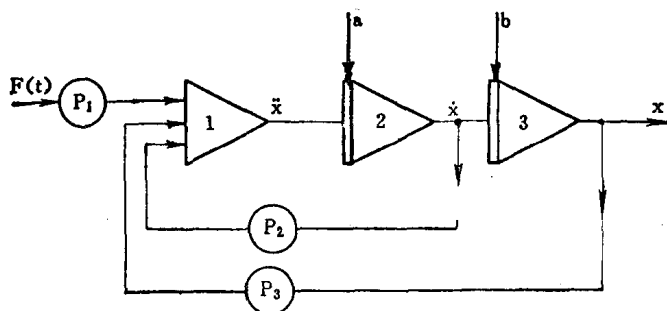


图1-2 仿真结构图

1—加法器; 2,3—积分器。

图中, $P_1 = 1/M$; $P_2 = -B/M$; $P_3 = -K/M$ 。a 和 b 为已知的初始条件。积分器 3 的输出即为 $x(t)$ 。由图可知, 为了仿真求解这一微分方程, 模拟机必须具备以下部件和设备: (1) 加法器; (2) 积分器; (3) 常系数器; (4) 反相器; (5) 模拟输入量的时间函数发生器 (如 $F(t)$); (6) 设置初始条件的装置; (7) 显示或记录输出量的设备。但是, 以上这些部件还只能用于仿真求解常系数微分方程, 如果所仿真的系统是以变系数微分方程描述时, 则还需增加另外一些部件。例如, 上述系统中的阻尼系数为 t 的函数, 即 $B(t)$; 弹性系数 K 又是位移 x 的函数, 即 $K(x)$, 则方程变成如下形式:

$$M\ddot{x}(t) + B(t)\dot{x}(t) + K(x)x(t) = F(t) \quad (1-3)$$

若初始条件仍和上述系统相同, 则 (1-3) 方程的仿真方法基本上和式 (1-1) 相同, 但是为了模拟变系数 $K(x)$ 和实现 $K(x) \cdot x(t)$ 的运算, 还需增加非线性函数发生器和乘法器。其仿真结构图见图 1-3。

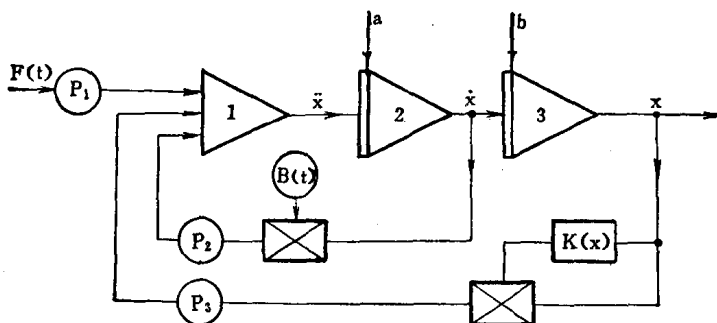


图1-3 仿真结构图

图中, $P_1 = 1/M$; $P_2 = P_3 = -1/M$ 。

从以上例子可以初步了解在模拟机上进行系统进行仿真的基本原理和方法。由于它

具有积分运算的部件，所以可以直接把数学模型微分方程作为仿真模型，只是需要先画一仿真结构图。图 1-2 和 1-3 这两种仿真结构图还只是原理性的，实际运行时还需进一步考虑幅度和时间比例尺问题。关于这方面内容本书附录一中有简单介绍。

应用模拟机仿真的主要优点是：

(1) 由于所有运算（包括加、减、乘、除等等）都是同时进行的，所以运算速度快；

(2) 其输出为连续量，易于与实物连接。

它的主要缺点是：

(1) 解题精度较低，一般仅为百分之几；

(2) 存储和逻辑功能差；

(3) 产生多变量函数困难。

以上所介绍的只是一般模拟机仿真，实际上，近二十年来，已相继出现了第二代和第三代的模拟机，它们的性能已有了很大提高。第二代模拟机增加了采样保持、逻辑判断以及自动设置参数等功能，也即吸收了数字机的一些优点，所以也叫做混合模拟机，它可以对微分方程进行高速迭代运算，从而使模拟机的应用范围大为扩展。第三代模拟机即由模拟机和数字机通过接口组成的混合计算系统，其中模拟机部分完成高速低精度的运算，数字机部分实现对模拟机的自动管理、监督和控制，有时也完成一些高精度的运算。这样，就充分发挥了它们各自的优点，其性能得到更大的提高。但是，由于这种系统价格昂贵，故一般部门较难采用。特别是由于近年来数字计算机硬件及软件的迅速发展，更导致数字仿真技术的进一步发展，在许多部门几乎已完全取代了采用模拟机的仿真。

1.2.2 数字计算机仿真

数字计算机仿真的过程一般有如下五步：

(1) 描述问题，建立数学模型，它可以用方程式或结构图等表示。

(2) 准备仿真模型。

(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) 验证 (Validation) 或认可模型。这一步的目的是验证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允许范围内，则可确认仿真模型可用。同样，还需进一步验证仿真结果与实际系统是否一致，以确认数学模型的正确性。

(5) 运行仿真模型，试验不同初始条件和参数下系统的响应或预测各种决策变量的响应。

从以上仿真过程，我们可以看出，它并不是一次性的计算或求解过程，而是一种反复多次运行的过程。另外，验证和确认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，因而仿真实质上也是建模过程的继续。

下面我们用两个具体例子来说明仿真过程：一个是简单的飞机跟踪问题，其数学模型是简单的代数方程；另一个是简单的库存问题，它是一个离散事件系统，这类系统的仿真模型建立方法不同于第一种，在第五、六章将会详细讲述，此处只是用来说明一下

仿真过程。

〔例一〕 飞机跟踪问题

(一) 问题描述

设有一架飞机追踪一敌机，为了保证进入射击范围时能够进行攻击，所以飞机在跟踪时必须不断改变方向以保持机头始终指向目标。

假设两机相距达到 10 公里以下时，飞机即可进行攻击。但是限定必须在 12 分钟之内完成追踪任务，否则就认为追踪失败。

已知两机的初始位置如图 1-4 所示。

为简化模型，假设：

(1) 两机始终航行在同一水平面；

(2) 敌机航线已知，其具体数值见表 1-1；

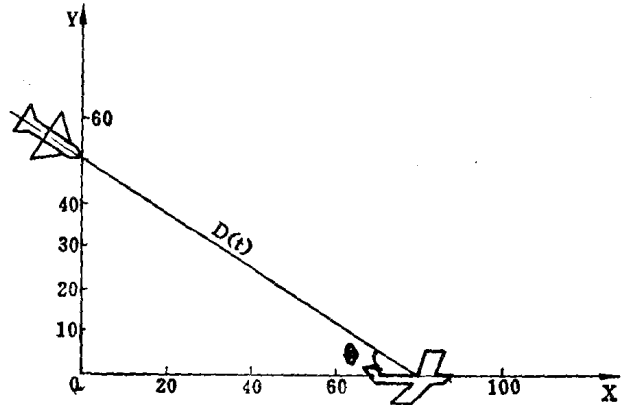


图1-4 两机初始位置

表1-1 敌机航线

t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$XB(t)$	80	90	99	108	116	125	133	141	151	160	169	179	180
$YB(t)$	0	-2	-5	-9	-15	-18	-23	-29	-28	-25	-21	-20	-17

(3) 飞机等速飞行，即 $VF=20$ 公里/分，每分钟改变一次航向，在 1 分钟内保持不变；

(4) 飞机初始位置为： $YF(0)=50$ 公里， $XF(0)=0$ 公里

现在问：飞机应按什么航线飞行？何时能完成追踪任务？

(二) 建立模型

设任一 t 时刻两机连线与水平线倾角为 θ ，则过 1 分钟后飞机的位置应为：

$$XF(t+1) = XF(t) + VF \cos \theta \quad (1-2-1)$$

$$YF(t+1) = YF(t) + VF \sin \theta \quad (1-2-2)$$

式 (1-2-1) 和 (1-2-2) 中：

$$\sin \theta = \frac{YB(t) - YF(t)}{D(t)} \quad (1-2-3)$$

$$\cos \theta = \frac{XB(t) - XF(t)}{D(t)} \quad (1-2-4)$$

式 (1-2-3) 和 (1-2-4) 中：

$$D(t) = \sqrt{(YB(t) - YF(t))^2 + (XB(t) - XF(t))^2} \quad (1-2-5)$$

(三) 仿真框图及程序

由于飞机是 1 分钟改变一次方向，所以需要 1 分钟计算一次飞机的位置和两机之间

的距离, 并判断是否已在 12 分钟内达到追踪距离以内。图 1-5 是这个问题的仿真流程图。

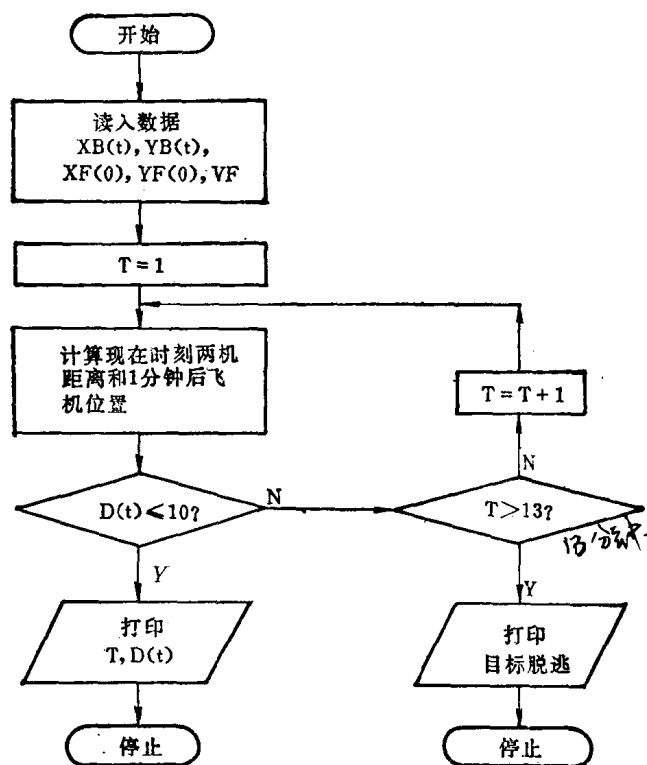


图1-5 追踪问题流程图

下面是用 FORTRAN 语言编写的仿真程序●：

```

      DIMENSION XB(25), YB(25), XF(25), YF(25)
      INTEGER T, J
      READ (*, *) (XB(T), YB(T), T = 1, 13)
      READ (*, *) XF(1), YF(1), VF
      T = 1
100   D = SQRT((YB(T) - YF(T))**2 + (XB(T) - XF(T))**2)
      IF(D.LE.10.0) GOTO 110
      IF(T.GT.12) GOTO 120
      XF(T+1) = XF(T) + VF*(XB(T) - XF(T))/D
      YF(T+1) = YF(T) + VF*(YB(T) - YF(T))/D
      T = T + 1
      GOTO 100
110   WRITE (*, 990) T, D
990   FORMAT (5X, "CAUGHT AT", I3, "MTS AND", F10.3, "KMS")
      END
120   WRITE (*, 1000)
1000  FORMAT (5X, "TARGET ESCAPED")
      END
  
```

(四) 仿真结果

● 程序中 READ (*, *) 表示以自由格式读入。

$$T=10\text{分}, D=2.969\text{公里}$$

〔例二〕 库存问题

库存问题有多种类型，一般比较复杂。此例也只是讨论最简单的一种情况。

(一) 问题描述

设有一自行车仓库，专供某商店销售。仓库保管人员采取一种简单的库存政策，即当库存量降低到 P 辆自行车时（称为重新订货点），就向生产厂订货，订货量为 Q 辆（称为重新订货量）。如果任一天的需求量超过库存量，则商店遭受损失（包括销售损失和信誉损失）。但如果库存量过多，将会使保管费用以及资金积压等造成的损失增加。所以如何选择一合适的库存策略使其所花费的资金最少，常常是库存问题中要解决的主要问题。

现在若已有以下五种库存策略，要求选择一种方案满足花费资金最少的要求。

	P	Q
①	125	150
②	125	250
③	150	250
④	175	250
⑤	175	300

已知条件为：

(1) 从发出订货到收到货物需隔 3 天，即设第 i 天发出订货，则收到货物时为第 $i + 3$ 天。

(2) 每辆车保管费为 0.75 元/辆；缺货损失为 1.80 元/辆；每次重新订货费（手续费、采购费等）为 75.0 元。

(3) 需求量为在 0~99 之间均匀分布的随机数。

(4) 原始库存为 115 辆，并假设第一天没有发出订货。

(二) 仿真模型和仿真流程

这一问题如用解析法求解则比较复杂，但用仿真法日复一日地仿真实际仓库货物的变动情况却很方便。若规定仿真 150 天，求其统计规律，那么只要仿真 150 天后打印出总费用即可。为选择一种花费最少的库存策略，可依次对五种方案进行仿真运行，最后比较其结果，作出抉择。仿真流程见图 1-6；

仿真开始，先检查这一天是否预定到货日期，如果是，则原有库存量增加 Q ，并把预定到货量清零。如果不是，则库存量不变。接着是仿真随机需求量，若需求量小于库存量，则新库存量是原库存量减去需求量；反之，则库存量变成零，并且要在总费用上加一项短缺损失。然后检查预期库存量（实际库存加预定到货量）是否小于重新订货点 P 。如果是，则需重新订货，这时要增加一项重新订货费用，而预定到货日期为当天日期加 3 天。如此重复运行 150 天，即可得所需费用总值。

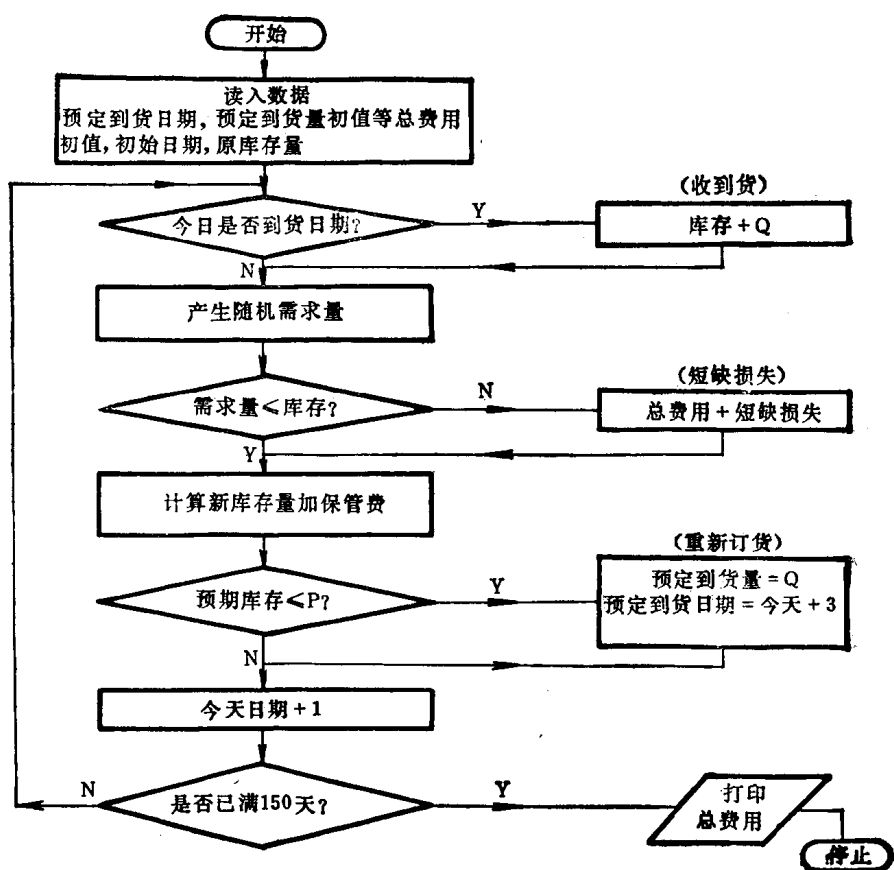


图1-6 库存问题仿真流程图

(三) 仿真程序

下面是用 FORTRAN 语言编写的仿真程序,

```

INTEGER P, Q, S, ES, UD, DD, DEM
READ (*, *) P, Q
C = 0.0
S = 115
I = 1
UD = 0
DD = 0
100 IF (DD.NE.I) GOTO 110
S = S + Q
UD = 0
110 DEM = RND (NUM) * 100.0
IF (DEM.LE.S) GOTO 120
C = C + (FLOAT(DEM) - FLOAT(S)) * 18.0
S = 0
GOTO 130
120 S = S - DEM
C = C + FLOAT(S) * 0.75
130 ES = S + UD
IF (ES.GT.P) GOTO 140
UD = Q
  
```