

高等学校规划教材

采矿系统计算机模拟

唐祖章 宜茂生 主编

煤炭工业出版社

高等学校规划教材

采矿系统计算机模拟

唐祖章 宜茂生 主 编

煤炭工业出版社

(京)新登字 042 号

内 容 提 要

采矿系统计算机模拟是采矿工程寻求系统最佳决策方案的一门新兴学科。本书是西安、阜新矿业学院及中国矿业大学等煤炭高等院校,根据从事计算机模拟教学和科研的经验总结写成的,主要包括计算机模拟的基本原理和方法、采矿系统模拟和计算机模拟语言及其在采矿系统中的应用三个部份,并附有可供借鉴的局部子程序。

本书遵循由浅入深、循序渐进的教学规律,并兼顾了普及和提高,除可作为煤炭院校采矿工程等专业本科生、研究生教材和参考书外,也可供采矿工程技术人员参考。

高等学校规划教材

采矿系统计算机模拟

唐祖章 宣茂生 主编

责任编辑:刘 洋 春

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平门北街 21 号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 787×1092mm^{1/16} 印张 13 1/4

字数 324 千字 印数 1—1, 225

1996 年 4 月第 1 版 1996 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 7-5020-1260-5/IP34

书号 4028 A0339 定价 10.70 元

前 言

《采矿系统计算机模拟》一书是为煤炭院校本科生、研究生提供的教材和参考书，也可以说是我们几个煤炭院校从事计算机模拟教学和科研工作的经验总结。本书由浅入深，循序渐进，既照顾到普及，也考虑到提高，因此也可作为采矿工程技术人员学习计算机模拟及在矿井中应用的入门教材。阅读本书应对煤矿生产知识有初步的了解，并应学习过一门计算机语言（如 BASIC 或 FORTRAN 等语言）。对没学过概率论有关知识的读者，可以不学第二章和第九章（本科生教学课时数少也可不学这两章）。

本书是煤炭工业部教材编审室组织编写的统编教材，由唐祖章教授和宜茂生教授任主编。其中总论、第十章、第五章第四节由唐祖章编写；第一、二、八章和第五章第三节，第九章第一节由林在康编写；第三、四、十一章和第五章第一节、第二节由宜茂生编写；第六、七章和第九章第二节由张金锁编写。张先生教授、王玉浚教授、徐永圻教授、蒋国安教授参加了本书的总审校工作，并提出许多宝贵意见，在此表示感谢。

由于编者水平有限，难免有错误和缺点，希望读者批评指正，以便再版时改正。

编 者

1995 年 2 月

ABE100/08

目 录

总论	1
计算机模拟的基本原理和方法	
第一章 模拟过程的控制方式	15
第一节 概述	15
第二节 时间步长法	15
第三节 事件步长法	19
第二章 均匀随机数和随机变量的产生方法	22
第一节 均匀随机数的产生及其检验方法	22
第二节 随机变量的产生方法	31
采矿系统模拟	
第三章 采掘工作面生产系统模拟	45
第一节 长壁式采煤工作面生产系统模拟	45
第二节 掘进工作面生产系统模拟	54
第四章 矿井运输提升系统模拟	58
第一节 矿井轨道运输系统模拟	58
第二节 煤仓贮运系统模拟	80
第三节 连续式输送机运输系统模拟	82
第四节 矿井提升系统模拟	92
第五章 矿井采运系统模拟模型简介	100
第一节 M102 模型	100
第二节 INFRAS 模型	103
第三节 SP86 及 SSP01 程序集	108
第四节 模块组合式模拟模型	113
第六章 矿井辅助生产系统模拟	118
第一节 矿井排水系统模拟	118
第二节 矿井通风系统模拟	120
第七章 矿井采掘接替系统模拟	123
第一节 采煤工作面接替系统模拟	123
第二节 采煤及掘进工作面接替系统模拟	129
第八章 露天矿采运系统模拟	139
第一节 露天矿汽车—铲斗装运系统模拟	139
第二节 露天矿轨道运输系统模拟	143
第九章 模拟数据采集和模拟结果分析	151
第一节 采矿系统模拟数据的采集与检验	151

第二节 计算机模拟结果分析 162

计算机模拟语言及其在采矿系统中的应用

第十章 计算机模拟语言 175

 第一节 概述 175

 第二节 GPSS 模拟语言 176

 第三节 SLAM 模拟语言 189

第十一章 系统动态学及其在采矿中的应用 202

 第一节 系统动态学基本原理 202

 第二节 系统动态学在矿区发展规划中的应用 207

参考文献 212

总 论

一、计算机模拟方法及其实质

(一) 计算机模拟发展概况

模拟 (Simulation) 有的文献又译为仿真。计算机模拟是 20 世纪 40 年代, 随着应用数学的发展和电子计算机的日益完善而形成的一门新兴技术学科。

电子计算机模拟就是建立计算机能够运算的模型, 并对实际系统进行模拟实验, 以便掌握实际系统运动变化的规律, 找到最优的或满意的解决实际问题的办法。

电子计算机模拟是一门边缘学科, 各个学科都可利用它来解决本学科内的问题。采矿系统计算机模拟就是把采矿过程中遇到的技术经济和企业管理等问题作为一个系统, 并对其进行模拟研究, 以求找到一个妥善的或最优的解决方案。

在第二次世界大战中, 冯·诺依曼 (Von Neuman) 和乌拉姆 (Ulam) 在研究原子弹有关裂变物质的中子随机扩散问题时, 他们所用的统计实验方法, 当时称为蒙特卡洛法 (Monte-Carlo methods), 可以说是模拟最早的应用。第二次世界大战结束, 很多从事军事系统科学研究的专家转移到民用部门, 使得计算机模拟得以发展和普及。1952 年美国成立了计算机模拟协会 (SCS), 60 年代美国出版了 "SIMULATION" 月刊, 研制出了 GPSS 等模拟语言。80~90 年代, 由于有关模拟的国际性学术组织的成立, 如德国模拟协会 (ASIM)、荷兰模拟协会 (DBSS), 意大利计算机模拟协会 (ISCS) 和日本模拟技术协会 (JSST) 等, 中国在 1986 年成立了全国计算机模拟专业委员会, 1990 年成立了计算机模拟学会, 出版了各自的学术刊物和书籍, 全世界每年组织几十次国际和地方性的模拟学术会议, 使得计算机模拟在航空航天、国防工业、工农业和交通运输业等得到发展, 并从工程领域扩展到非工程领域, 如经济、社会、生物系统、环境系统等。近几年来, 计算机模拟与管理信息系统、多媒体技术、专家系统、人工智能、计算机图形学等相结合, 出现了一些日益为广大用户所欢迎的计算机软件。

我们知道, 在系统科学中应用最广泛的三个分支是计算机模拟、线性规划和网络技术。据日本 70 年代运筹学年鉴记载, 计算机模拟应用占 27%, 居运筹学各分支应用的首位; 美国 70 年代初 1000 家最大公司的计划系统应用定量分析方法的情况调查: 计算机模拟应用频率为 29%, 也是居运筹学各分支的首位。如线性规划占 21%, 网络分析占 14%, 其它如库存理论、非线性规划、动态规划、整数规划、排队论等, 其应用频率都在 10% 以下。

计算机模拟之所以为广大用户所欢迎, 其主要原因是比较简单易学, 易于掌握。在现实生活中很多实验费工费时, 或有危险 (如训练飞行员、宇航员等), 有的甚至不可能进行实验时 (如模拟战争、生物进化过程等), 用计算机模拟就可以方便的解决; 在一般很复杂的随机系统中, 往往很难用解析式去建立数学模型时, 也可用模拟去解决, 因此有人把计算机模拟叫做 "最后的方法"。当然, 计算机模拟也有它的缺点, 如大型软件费时多, 其模拟结果的精度也与模拟次数或模拟时间有关, 并与输入数据的准确性有关等。而要获得准确的模拟原始数据, 其实测统计工作量是很大的。

计算机模拟在采矿系统的应用,国外在60年代就开始了。美国、西德、澳大利亚、南非等国开始应用计算机模拟方法,解决地下和露天矿的局部生产技术问题,70~80年代,计算机模拟在采矿系统中的应用日益广泛,并编写了模拟整个矿井生产过程的大型软件和各种管理软件,为提高采矿企业的经济效益和管理现代化作出了贡献。

1976年美国弗吉尼亚工学院研制了一个胶带输送机系统的模拟程序——“Beltsim”,但未考虑缓冲煤仓对运输系统的影响问题。70年代,澳大利亚K·泰尔鲍特改进了这个程序,加入了缓冲煤仓,更能全面正确地模拟胶带输送机运输系统。

1972年西德Essen煤炭工业研究所,在西德、美国、英国、比利时和瑞典等国原有电机车运输模拟模型的基础上,研制出了各国通用的轨道运输系统模拟模型,这个模型不但成了用以检验新设施和改进现有设施的常用标准软件,而且也成为矿井生产系统总的模拟模型的一个组成部分。关于矿井轨道运输系统模拟,1976年,南非矿山研究会采矿室在原有TRANSIN I程序(1973年)的基础上,改进为TRANSIN II型模拟程序,这也是一个矿井轨道运输的通用模拟程序,用FORTRAN W语言编写,用于IBM 370/150型大型计算机。

70年代南非一个大型金矿(矿井有一万多人工作,工作面长度约有10km,运输巷道总长达500km)用计算机模拟方法模拟整个矿山生产系统,用一个主程序和三个子程序,即崩矿子程序、支护子程序和运搬子程序,这个运搬子程序就应用了前述的TRANSIN II矿山轨道运输的模拟程序。整个程序考虑了开掘、采准和回采,不但计算了矿石产量、巷道进尺,还计算了材料消耗和成本,指出了在保证产量前提下,各项工程的施工时间和进度,为编制矿山生产计划和矿山设计提供了可靠的依据。

同样在70年代,美国内政部矿山局资助一个题为“井下煤矿开采总的环境控制和开采系统设计模型”的研究项目。这是一个用计算机模拟矿井生产系统的大型软件,它包括9个主要的子程序,即地质和储量、瓦斯发生器、顶板支护、顶板下沉、产量、轨道运输、生产成本、水发生器及通风等。这个模型主要用于解决3个应用领域的问题,即矿井开采系统特性、矿井深部开采过程中各环节之间的关系,以及新的开采技术的探讨。

美国科技信息情报所和科罗拉多克利迈铂金公司,在80年代,用GPSS模拟语言,吸取了以前井下轨道运输和地铁、地面铁路运输系统模拟软件的经验教训,研制出了井下矿车轨道运输的通用模拟软件。

德国煤矿企业的一切技术决策,如果没有计算机支持的分析资料作为依据,是很难行得通的。他们用得比较多、比较成熟的大型软件,如用于矿井开拓设计和采掘工程计划安排的ZUPL软件,其主要建模理论就是计算机模拟和网络计划法。他们用的模型SIGUT就是采用计算机模拟方法,分析井下煤的采、运、提系统和辅助运输系统,并可以和ZUPL软件联合使用,对新井设计和生产矿井开拓系统内的运输系统部分进行检验分析。

同样,在美国、德国、澳大利亚以及前苏联等国,他们研制的露天矿大型计算机软件,其中的轨道运输、汽车运输和胶带输送机运输系统大多采用计算机模拟方法。

上述事例说明,计算机模拟在国外采矿系统中得到广泛的应用。我国用计算机模拟解决采矿系统的问题是在70年代才开始。如1974年中国科学院数学研究所,用计算机模拟方法模拟露天矿的电铲装矿、卡车运矿、卸矿的整个生产过程,并最终求出平均班产量、卡车在装矿和卸矿时的排队等待时间、电铲利用率和卡车利用率、单位成本等参数。80年代

初计算机模拟在采矿系统模拟中逐渐开展起来,如用计算机模拟井下煤仓的最优容量、采煤工作面生产过程、井下胶带输送机系统、电机车轨道运输系统等。80年代后期,中国矿业大学、阜新矿业学院、西安矿业学院先后完成矿井采运系统模拟(又叫主生产系统模拟)的大型软件,并通过鉴定和在现场得到应用;同时出现的较有影响的模拟软件如西安矿业学院、山西矿业学院分别研制的编制生产矿井采掘计划软件,都在部分矿井中得到应用。同时,煤炭和冶金系统矿业院校在露天矿模拟上也作了许多工作,研制了大量模拟软件。90年代以来,采矿系统计算机模拟已深入到各个领域,如生产系统、管理系统、通风安全系统、机械制造系统、自动化和自动控制系统、矿山压力系统、露天采矿系统、“三上一下”采煤系统、矿区发展规划等。

(二) 系统的概念

1. 系统

系统科学把需要研究的事物看成是一个系统(Systems)。如宇航系统、国民经济系统、人口增长系统、煤炭系统、铁路运输系统、生物进化系统、生产管理系统、信息系统、决策系统、环境保护系统等等。

系统作为系统科学经常遇到的术语,被很多学者和文献下过定义,但都大同小异,文献[1]是这样定义的:“系统是由相互联系,相互依赖,相互制约,相互作用的事物和过程组织成的具有整体功能和综合行为的统一体”。

为了加深对系统的理解,可把系统列出以下4个基本特性。

(1) 集合性 系统是由两个或两个以上的元素、部件或子系统构成的集合,而由这个系统与另外的系统又可组成更大的系统,或将这个系统又分成更小的子系统、孙系统,即表现出系统有层次结构。如煤矿井下的运输系统,它是由刮板输送机、胶带输送机、煤仓、电机车等组成,是这些运输设备及其组成运输方式的集合。而煤矿运输系统又可分为采区运输系统和大巷运输系统;煤矿运输系统和通风系统、排水系统、供电系统等可构成煤矿生产系统,若与煤矿经营管理系统等相结合,就可构成更复杂的系统——煤矿企业。

(2) 相关性 系统内的元素、部件或子系统都是互相联系而又互相制约的。如煤矿运输系统中,通过胶带输送机把煤装入煤仓,再由电机车拉走。这些设备和装置间是相互联系又相互制约的,如果其中一个设备发生故障,则整个运输系统受到影响;同样,一个设备的生产能力,也制约着整个系统的生产能力。

(3) 目的性 系统应具有一定的功能,并为一定的目的服务。如电机车和胶带输送机放在地面仓库里,不能构成运输系统,只有安装在井下,为煤炭运输服务时,才能构成运输系统。

(4) 环境适应性 任何一个系统都是在一定的环境中,因此必然要与外部环境发生物质的、能量的和信息的交换,必与环境处于矛盾而又适应的状态。比如同样设备的井下运输系统,在管理水平高的矿井,生产能力和经济效益很好;相反,在一个管理水平低的矿井,则事故频繁,生产能力低下,而且经济效益很差。

2. 系统的分类

世界上存在的系统大致可以分为三类:(1) 自然系统:如太阳系的行星系统,人的血管系统、神经系统等,这是自然界本身存在的系统;(2) 人工系统:为了各种目的人工建设的系统,如铁路运输系统、供电系统、各种企业和公司等;(3) 复合系统:即人工系统

与自然相结合的系统，如宇航系统、天气预报系统等。系统科学主要研究的是后面两类系统。

从计算机模拟来看，可按不同的因素把系统分成多种类别。

1) 按与时间的关系划分

如果研究的系统与时间因素无关叫静态系统，相反则叫动态系统。在 18 世纪，有不少人作了人工模拟实验，如用投掷硬币来求得出出现正面和反面的频率；用投针方法来求得 π 值等，这些都属于静态系统。前面提到的蒙特卡洛法也属于静态系统，它们的模拟方法就叫静态系统模拟。

在动态系统中，若系统的状态变量是随时间按平滑曲线连续变化的就叫连续系统；若系统的状态变量是在某些时间点跳跃式变化则叫离散系统，这些曲线在某时间的跳跃点，叫离散事件。如果系统同时具有离散和连续两种特征，就叫离散—连续复合系统。图 0—1 所示煤矿地面设备备件仓库存储系统中库存量变化就是一种离散—连续复合系统。

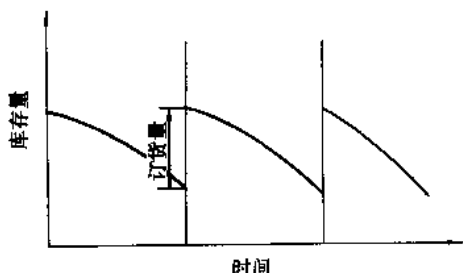


图 0—1 存储系统库存量变化曲线图

应该指出：很少有一种实际系统是完全连续或完全离散的，我们往往以其主要特征来划分类型。有时又可将连续系统离散化，按离散系统处理。为了区别连续系统离散化的离散系统，常把具有离散事件的系统叫离散事件系统，而采矿系统计算机模拟中常遇到的大都属这样一类系统。

2) 按系统中是否有随机因素划分

可把系统分成确定性系统和随机性系统。

当一个系统转移到新的状态时，其状态变量完全可由原状态所决定时，就是确定性系统；如果有一系统转移到新的状态，由于有随机因素影响，其状态变量不能由原状态所决定，而可能是一个概率值，这就是随机性系统。

例如，煤矿井下电机车从井底车场到采区煤仓，已知中间距离为 s ，电机车速度为 v ，则电机车从井底车场到达采区煤仓的时间 $t=s/v$ 是一个定值，即输入 s 、 v 后， t 只有一种结果，这就是一个确定性系统；假如电机车在井下的速度受井下轨道情况和电机车司机操作水平影响，不是一个定值，而是一个随机变量，经多次统计结果， v 服从正态分布，其均值为 μ ，方差为 σ^2 ，这时，电机车从井底车场到采区煤仓的时间也将不是一个定值，而是一个随机变量，这种系统就是随机性系统，这种系统的特点是输入一定数据后，可能有不同的输出结果。

3) 从系统复杂程度划分

可分为简单系统和复杂系统，一般复杂系统较庞大，因此又叫大系统。所谓简单和复杂只是一个相对概念，一般所指的复杂系统（大系统），可能是多目标的，其控制因素很多，过程是多阶段的，规模是庞大的，并含有许多随机因素。如煤矿企业作为一个系统来看，就是一个复杂系统。

3. 系统的组成

系统是多种多样的，特别是离散事件系统比较复杂，为了对系统进行模拟，常把系统抽象化、规范化，可使编制模拟语言、各种模拟软件比较方便。

1) 实体和设备

它们是组成系统的基本部分，也可以说是组成系统的主体。凡是在系统中活动的部分叫活动实体，简称实体。如生产线上待加工的机器零件，航运系统中的飞机、轮船、电话交换系统中的电话呼叫，排队系统中的顾客，煤矿采掘关系系统中的采煤队和掘进队等。系统中另一部分是固定的，叫做设备，有的文献又叫固定实体或永久实体，在排队论中叫服务员，这些设备（固定实体）对实体（活动实体）进行加工、处理或服务。这些设备可能是机床、机电设备、码头、机场，也可能是营业员、医生、调度员等。

2) 属性

一般指实体或设备所具有的特性、状态或参数。如待加工的机器零件是实体，则零件的种类、规格等就是它的属性，不同规格的车床、刨床、铣床等就是设备的属性；在露天矿采运系统中，汽车是实体，汽车的规格、车速、载重量等就是它的属性，电铲、卸矿场等是它的设备，电铲的规格、装载速度，卸矿场的卸载速度等都是这些设备的属性。

3) 活动

表示系统内同一类运动的一段时间。如银行系统中的存款、取款；机电设备运行系统中的正常运行和故障时间等都是活动。

4) 事件

这是离散事件系统的一个重要概念。它是与系统活动有关的，一般指某一时间点，系统正处于某种活动的开始或结束。如机电设备运行系统中的某一时刻发生故障，这个时间点就叫事故发生事件，也可叫正常运行结束事件。

5) 过程

如果系统经过各种活动，又回到原来开始时类似的状态叫做一个过程。如机电设备运行系统中，从正常运行到发生故障，经过修理后又开始正常运行，这就是一个过程；又如露天矿采运系统中，汽车经过装矿、重载运行、卸矿、空载运行又回到电铲处装车就是一个过程。

图 0-2 就说明了事件、活动和过程的关系。

6) 模拟时钟 在动态系统中都设有一个模拟时钟（有的又叫仿真钟），以推进系统的模拟时间。时间的推进一次叫一个步长，一般每一个步长对系统要全面考查一次，以推进系统状态的变化和发展。时间步长是相等的叫等步长法，这个步长可以是一秒、一分、一天、一年，甚至更长或更短，由模拟系统的要求而定；时间步长也可以是不相等的，在离散事件系统模拟中，有时以某一事件点作为一个步长，叫事件步长法。通常以各类事件中活动最短的事件作为时间步长，因此这

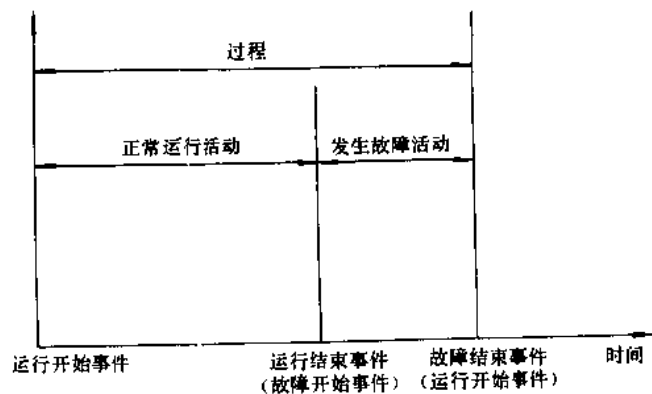


图 0-2 机电设备运行系统中，事件、活动、过程的关系示意图

种模拟方法又叫最短时间事件步长法。在某一时间步长，考查系统中某一实体或设备时，就叫某一实体或设备的当前时间。

(三) 采矿系统的特点

在采矿过程中所遇到的工程技术、设计规划、工艺过程、指标预测、经济分析、企业管理等问题，系统科学都把它们作为一个系统对待。这些与采矿有关的系统可总称为采矿系统。

采矿系统不但具有系统的一般特征，同时因与采矿有关，它也具有采矿的特征。从计算机模拟来看，采矿系统具有下列特点。

1) 大多属离散事件系统

如模拟生产过程或工艺过程，其中上班与下班、设备发生故障与正常运行、某个工序的结束与开始……等，都是一些离散事件；又如模拟采掘关系，某采、掘工作面采完或掘完，新的采、掘工作面进行接替等，这也是一些离散事件。可以说大多数采矿系统都属于离散事件系统，这是它的第一个特点。

2) 包含有大量的随机因素，一般为概率性模型

矿山生产管理，大多与人、设备、地质条件等易变因素有关，因此产量的大小、设备的故障发生与修理、各种车辆的到达时间、仓库备件的消耗量、采煤和掘进工作面推进速度、某个井巷工程的完工时间等都是一些随机变量。为了要找到这些随机变量的统计规律，必须进行现场实际测定和进行数理统计后才能确定。采矿系统计算机模拟，一般属概率性系统模型模拟，但有时为简便起见，也可将一些变量用其平均值代替，按确定性系统处理，这是一种近似的处理方法。如编写年度采掘计划计算机模拟，就是用确定性系统模型来处理。可以说，确定性系统模型只是随机性系统模型的一个特例。

3) 工作地点的移动性和环境的不断变化

这是采矿企业不同于一般企业的最大特点。采矿的生产第一线——采、掘工作面每天都在推进，周围地质条件也在不断变化。一个矿井开采时间越长，采矿工作地点就越远、越深，矿产资源运输距离越长，提升高度越深，矿井通风、排水线路越长、越复杂，工人工作环境，如地温、瓦斯、地下水、矿山压力等也随着增加，给采矿工作带来很大的困难，这也是模拟采矿系统时应考虑的最大特点。

4) 受环境影响很大

采矿的环境是指两个方面，一是自然环境，即矿产资源的埋藏地质情况、地面地形和气候因素等；另一个是人为环境，即当地经济情况、管理水平、设备先进程度、职工素质等。这两种环境影响着矿井开采的各项技术经济指标。人为环境是可以改变的，但自然环境改变是困难的。特别是矿产资源埋藏的地质情况，往往对矿井开采的各项技术经济指标有很大影响。如矿产资源的质量、品位、厚度、埋藏深度、地质破坏情况、水文地质和工程地质条件等，对矿产资源的开采价值，往往具有决定性的影响。这些情况，在计算机模拟时，一定要加以注意。如对矿井进行评价时，若不考虑矿产资源埋藏的地质情况，这种评价是毫无意义的。

二、采矿系统模拟模型的构造

(一) 模型及其分类

将现实生活中的实际系统模型化，是系统科学重要的步骤，也可以说是它的关键和核

心。模型不可能是实际系统的全部模仿，它只能是实际系统抽象的、本质的反映，它应包括实际系统中的主要因素及其相互关系，但为了便于定量分析，特别是相互之间的逻辑关系和数学关系，对次要的、与解题无关的因素和关系都可以忽略不计。

一般模型可分为三类，即物理模型、数学模型和模拟模型。严格说来模拟模型也是一种特殊的数学模型，因此应归入数学模型一类。但从计算机模拟来看，特别是离散事件系统模拟模型与数学模型仍有许多特点，故仍按三类模型来考虑。

1. 物理模型

这是从形状或逻辑关系对实际系统进行模仿。如建筑物、飞机、火车模型等，这是从形状方面按比例缩小或放大，各种工程图、方框图、电路图也是一种模型，这是从形状到相互逻辑关系对实际系统进行模仿；工程上常用的工程排队横道图，则是比较典型的逻辑关系模型。

2. 数学模型

即把系统内主要因素及其相互逻辑关系用抽象的数学方程表达出来的模型。它也因内部是否含有随机因素而分为确定性模型和随机性模型。属于确定性模型的有代数式、微分或差分方程、积分方程、函数方程等；属于随机性模型的如概率分布、相关函数、排队论、博弈论、马尔可夫链和可靠性理论等。

3. 模拟模型

这里所指的模拟模型是与计算机有关的。它是用计算机程序来描述实际系统而构成的模型。它的分类方法也与系统分类方法类似，这里不再赘述。

模拟模型按用途又可分为存储模型、排队和排序模型、预测模型、更新模型和训练模型等。

现将模型分类总结如图 0-3 所示。

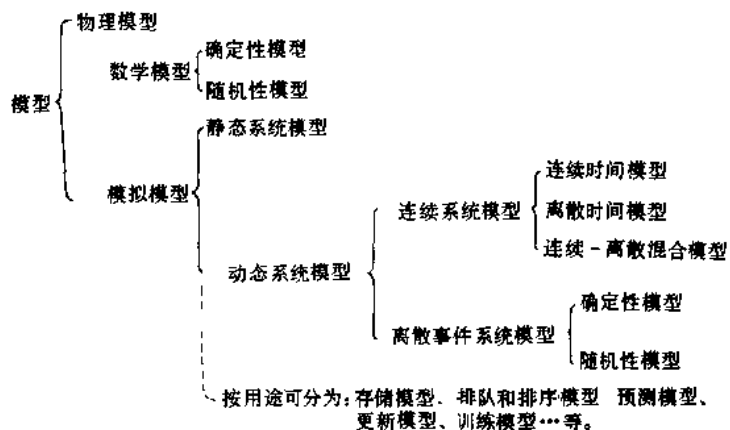


图 0-3 模型分类图

(二) 建立模拟模型的方法

在建立模型前，首先要明确建立模型的目的。如果目的不同，虽然是同一系统但模型的区别可能是很大的。如要建立一个煤矿洗选厂的模型，其目的是想知道如何生产才能使

其获得最大的经济效益，那就要从影响企业经济效益的因素着手，找出它们内在的规律和相互关系，来编制模拟模型（这种模型又称为内部模型）；若同样是煤矿洗选厂的模型，目的是从环保角度，了解洗选厂对周围环境的影响，这就要了解该厂“三废”排放量的大小和规律，及其对厂区附近的河流、农田等的污染程度，以及对当地经济和生态平衡等带来的影响，依此来编制模拟模型（这种模型又称外部模型）。这两种模型有很大区别。

制作模型常用三种方法，即演绎法、归纳法和上述二者混合的方法。

1. 演绎法

它是利用已知的原理、定理和数学公式，按实际系统内在的逻辑关系建立数学模型或模拟模型的方法。这种方法多用于电路系统、自动控制系统、动力学系统等，也是连续系统模型常用的建模方法。对采矿系统模拟来说，如用有限元、边界元理论来模拟矿山压力的变化，用金属矿放矿理论来模拟放顶煤采煤法中顶煤的放煤规律等，多采用这种方法。

2. 归纳法

这是利用实验数据来建立数学模型或模拟模型的方法。离散事件系统，往往有很多随机因素，这些因素都要实际观测、统计得来，或用实验的方法统计各种实验数据，最终归纳整理出系统内在或外在的规律，构成数学模型或模拟模型。

3. 混合方法

即把演绎法和归纳法结合进行的方法，这也是建立数学模型或模拟模型最常用的方法。因为在建立模型时，过去的理论公式和实际数据的统计归纳都是非常必要的。

（三）采矿系统模拟模型建模举例

采区输送机串联系统有效度（有用度）的数学模型和模拟模型的建立。

如某矿井一采区运输系统，由一台刮板输送机和两台胶带输送机串联组成，由于经常发生事故影响生产，要求得出这串联运输系统的有效度（或叫有用度，即在平衡状态下系统正常运行的概率）是多少？

为了建立模型，首先要进行实测统计，要求测定每台输送机每次正常运行时间（或叫故障间隔时间） Rt_{1i} ， Rt_{2i} ， Rt_{3i} 和故障时间（或叫修理时间） Ft_{1i} ， Ft_{2i} ， Ft_{3i} ，如果实测 10 个班，抛去交接班时间、班中餐影响的时间，若测得各台输送机发生故障 n_1 ， n_2 和 n_3 次，则可求得各台输送机平均正常运行时间：

$$PRt_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} Rt_{1i}$$

$$PRt_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} Rt_{2i}$$

$$PRt_3 = \frac{1}{n_3} \sum_{i=1}^{n_3} Rt_{3i}$$

平均故障时间：

$$PFt_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} Ft_{1i}$$

$$PFt_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} Ft_{2i}$$

$$PFt_3 = \frac{1}{n_3} \sum_{i=1}^{n_3} Ft_{3i}$$

进而可求得各台输送机的故障率 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 和维修率 μ_1, μ_2, μ_3 。

$$\lambda_1 = \frac{1}{PRt_1}, \mu_1 = \frac{1}{PFt_1}$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{PRt_2}, \mu_2 = \frac{1}{PFt_2}$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{PRt_3}, \mu_3 = \frac{1}{PFt_3}$$

根据可靠性理论，串联系统的有效度

$$K = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_3}{\mu_3}} \quad (0-1)$$

上述公式 (0-1) 即为采区三台输送机串联系统求有效度 K 的数学模型。这是用归纳法和演绎法混合使用而构造的数学模型。若要以计算机模拟方法建立模拟模型，则是有区别的。但不管建立数学模型或是模拟模型，收集和实测输送机发生故障间隔时间（正常运行时间）和故障时间是一样的，计算故障率和维修率也相同，同时也要验证输送机发生故障和处理完故障的时间服从什么随机分布，这里假设已验证它们服从指数分布（验证方法在第九章还将详细论述）。建立模拟模型的步骤如下：

(1) 用计算机模拟各台输送机，按指数分布规律，进行正常运行；

(2) 用三台输送机中正常运行时间最短的事件，作为第一个时间步长，这就是考查系统的当前时间；

(3) 在当前时间，第 M 台输送机发生故障，这时系统也发生故障，全部停止工作，并对第 M 台输送机进行修理，修理时间也是一个随机变量，服从指数分布规律，用计算机进行模拟，同时统计该串联系统正常运行时间 RT 和故障时间 FT ，第 M 台输送机修好后，全部输送机又开始正常运行，即转入第 1 步；

(4) 总时间如果到达 10 个班时间（即预先给定的模拟结束时间），则模拟结束，并最后计算该系统的有效度

$$K' = \frac{RT}{RT + FT} \quad (0-2)$$

当模拟时间足够长时， K' 值逐渐接近 K 的理论

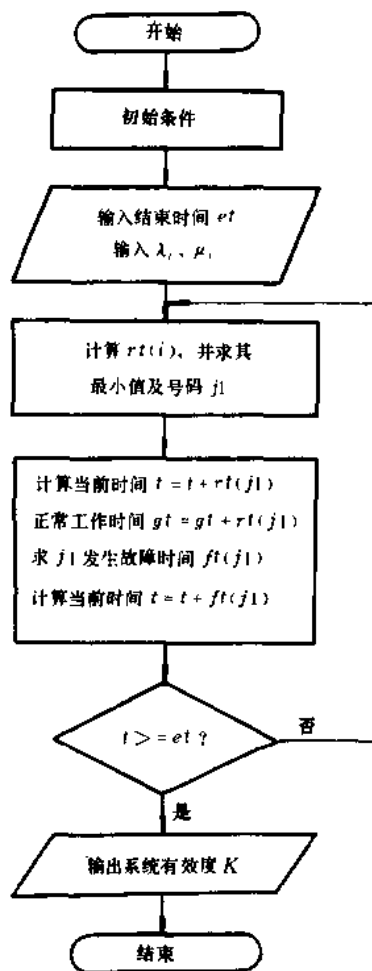


图 0-4 采区运输系统可靠性的模拟模型框图

值。

此处的关键问题是计算机如何去模拟服从指数分布规律的正常运行时间和故障时间，这将在第二章了解到。现在可用一个函数或子程序，用公式计算获得：

$$Rt_m = \frac{-\ln R_1}{\lambda_i} \quad (0-3)$$

$$Ft_m = \frac{-\ln R_2}{\mu_i} \quad (0-4)$$

式中 R_1 和 R_2 为 $[0, 1]$ 区间的随机数（见第二章），这种数有两个特点，即它的均匀性和随机性（独立性）。所谓均匀性，如果将 0 与 1 之间分成 n 等分，则随机数在每一等分中出现的频率都是相等的；所谓随机性（独立性），即随机数在 0 和 1 的 n 等分中出现不是按次序的或某种规律性的出现，而是随机的或相互独立的出现。

BASIC 和 Quick BASIC 语言用一个函数 $RND(x)$ 可以求得随机数，其中 x 为随机数种子（或叫初始随机数）。则求输送机正常运行和故障修理时间的公式可改写如下：

$$Rt_m = (-\ln(RND(x))) / \lambda_i \quad (0-5)$$

$$Ft_m = (-\ln(RND(x))) / \mu_i \quad (0-6)$$

根据建立模拟模型的步骤，可绘出计算机框图（如图 0-4）。并用 Quick BASIC 语言编写出源程序 Prog 0-1。

Prog 0-1 采区运输系统可靠性模拟程序

```

'prog 0-1 availa _1
DIM lambda (1 TO 3), mu (1 TO 3), rt (1 TO 3), ft (1 TO 3)
INPUT "please input end off time et=", et
t=0: gt=0
FOR i=1 TO 3
  READ lambda (i), mu (i): NEXT i
DATA 0.85, 1.7, 0.45, 1.2, 0.55, 1.3
DO
  min=10000
  FOR i=1 TO 3
    rt (i) = -LOG (RND (5)) / lambda (i)
    IF rt (i) <= min THEN
      min=rt (i)
      j1=i
    END IF
  NEXT i
  t=t+rt (j1)
  gt=gt+rt (j1)
  ft (j1) = -LOG (RND (6)) / mu (j1)
  t=t+ft (j1)
LOOP UNTIL t >= et
PRINT "k'=", gt/t
END

```

框图和源程序中所用的变量、数组其意义如下：

数组：

λ (1 TO 3)——各台输送机故障率 λ_i ；

μ (1 TO 3)——各台输送机修理率 μ_i ；

rt (1 TO 3)——各台输送机正常运行时间，或叫各台输送机故障间隔时间；

ft (1 TO 3)——各台输送机故障修理时间。

变量：

et ——由键盘输入的模拟结束时间；

t ——模拟当前时间（模拟时钟）；

$\min$ ——求最短时间事件步长用的初始最短时间，开始取一较大数值， $\min=1E+4$ ；

$j1$ ——存放最短时间事件的输送机号码；

gt ——采区运输系统正常运时间之和，或叫采区运输系统总的正常运行时间；

K' ——采区运输系统有效度的模拟值；

K ——采区运输系统有效度的理论值。

如实测得到三台输送机的平均正常时间为1.176h、2.222h、1.818h，平均修理时间为0.588h、0.833h、0.769h，并可算出三台输送机的故障率和修理率为： $\lambda_1=0.85$ ， $\mu_1=1.70$ ， $\lambda_2=0.45$ ， $\mu_2=1.20$ ， $\lambda_3=0.55$ ， $\mu_3=1.30$ ，单位为1/h。将上述数据输入源程序，模拟结果如表0-1。

表 0-1 采区运输系统有效度模拟结果对比表

模拟时间(h) 有效度	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
模拟值 (K')	0.4435582	0.4453391	0.4359982	0.4386574	0.4376035	0.4373658	0.435475
理论值 (K)	0.4351465	0.4351465	0.4351465	0.4351465	0.4351465	0.4351465	0.4351465

由表0-1可看出，模拟时间达3000h时，模拟值与理论值相差很小，若模拟时间越长，则模拟值与理论值有越来越接近的趋势。

(四) 计算机模拟的一般步骤

从采矿系统模拟模型建立实例可看出，建立模拟模型，特别是正确的建立一个大型的模拟模型是要作很多工作的，而模型建立并不等于计算机模拟任务完成，在一般情况下，计算机模拟应遵循下列步骤：即明确任务，收集资料，编制程序，验证模型，实际应用和结果分析。

1. 模拟任务的确定

根据决策部门的要求或科学研究的需要，在下达模拟任务时，首先要明确模拟什么样的实际系统？应达到的目的和要求？其环境和初始条件等。如以模拟井下翻车机排队系统为例，如果感到翻车机前，排队时间太长，想并联一台翻车机以解决此问题，但增加翻车机后，而又不要使他们太空闲，这就是要解决的问题。我们希望决策部门最好在确定模拟任务时，把目标量化，即要求应具体。如可要求排队时，一般一列车，最多三列车（也可用排队时间定任务），翻车机最好在8h内70%处于工作状态等。必要时也应提出环境条件。