

系 统 仿 真

G. 戈登 著

杨金标 译

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍连续系统及离散系统仿真的基本概念和仿真语言的应用等方面知识。

全书共分十四章。分别介绍与系统仿真有关的系统模型、系统研究、仿真方法、连续系统仿真、系统动力学、仿真中的概率概念、到达模式和服务时间、离散系统仿真、仿真程序设计技术、仿真结果分析等方面的基本概念与系统仿真语言，并讨论了在工程技术、商业、医学、生物学、社会经济学等领域中的系统仿真问题。

本书可供高等院校电子计算机科学与工程、自动控制等有关专业学生用作学习系统仿真课程时的参考教材，也可供从事电子计算技术应用的工程技术人员和科学工作者参考。

系 统 仿 真

G.戈登 著

杨金标 译

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 10 7/8 字数 283 千字

1982年7月第一版 1982年7月第一次印刷

印数 00,001~4,700 册

统一书号: 15062·3795 定价2.00元

译 者 的 话

电子计算机是二十世纪最辉煌的科学技术成就之一。电子计算机已经在国防、生产、科研和生活各个方面得到广泛应用。

系统仿真不仅是电子计算机应用的一个重要方面，而且也是近年来迅速发展的一门新兴学科。系统仿真是用系统模型结合实际的环境条件、或是用实际的系统结合模拟的环境条件进行研究、分析或实验的方法。其目的是力求在实际系统建成之前，取得近于实际的结果。通过系统仿真，可以估价系统某一部分的性能；可以估价系统各个部分或各个分系统之间的互相影响，以及它们对系统整体性能的影响；可以比较各种设计方案，以获得最佳设计；可以对一些新建系统的理论假设进行检验；可以训练系统的操作人员等。

为了进行系统仿真，需要多种仿真设备。电子计算机是其中最重要的设备之一。根据仿真所使用的计算机类型不同，可以把仿真分为模拟计算机仿真、数字计算机仿真和混合计算机仿真。随着现代大型、快速电子计算机的出现，数字仿真得到越来越广泛的应用。随着电子计算机应用领域的扩展，系统仿真也日益显露出它的重要性。

《系统仿真》一书根据美国1978年出版的G.戈登所著“SYSTEM SIMULATION”第二版译出。原书用作美国有关大学高年级学生及研究生学习系统仿真课程的教材。全书共分十四章，以数字仿真为主，分别介绍系统模型、系统研究、系统仿真方法、连续系统仿真、离散系统仿真等方面的基本概念和理论；详细描述连续系统用的CSMPⅢ仿真语言、离散系统用的GPSS和SIMSCRIPT仿真语言；讨论仿真程序设计的一般方法和仿真结果的分析等问题；介绍有关工程技术、商业、医学、生物学、社会经济学各个领域中的应用仿真技术的实例。本书叙述基本概念

简明扼要、题材广泛、内容比较新颖，对目前广泛使用的仿真语言亦有较详细的论述。原书各章大多附有习题，列出了详尽的文献书目。为了学习外国先进技术，特译出本书，供学习系统仿真课程的学生参考。本书也可供从事电子计算技术应用的工程技术人员和科学工作者阅读。顺便提及：SIMULATION（仿真）一词，亦可译作“模拟”。为了使它不致与 ANALOG（模拟）一词混淆，因此，在本书中前者一律译作“仿真”，而后者则译作“模拟”。此外，原书中有若干明显的错误和疏漏之处，译文中已予以改正。由于译者水平所限，译文不妥及错误之处，敬希读者指正。

借此机会对陈莎莉女士表示诚挚的谢意，感谢她热情地为译者提供了有关资料。此外，在翻译过程中得到了孙一康副教授的支持和帮助，在此一并表示感谢。

杨金标

一九七九、七、二十三

目 录

前 言

第一章 系统模型	1
第一节 一个系统的概念	1
第二节 系统环境	3
第三节 随机活动	4
第四节 连续系统和离散系统	5
第五节 建立系统模型的方法	6
第六节 模型的分类	9
第七节 静态实体模型	11
第八节 动态实体模型	12
第九节 静态数学模型	14
第十节 动态数学模型	17
第十一节 用于建立模型的原则	18
第二章 系统研究	21
第一节 分系统	21
第二节 整体模型	22
第三节 环境部分	23
第四节 生产部分	24
第五节 管理部分	24
第六节 完全的整体模型	25
第七节 系统研究的类型	26
第八节 系统分析	28
第九节 系统设计	31
第十节 系统假设	34
第三章 系统仿真	36
第一节 仿真技术	36
第二节 蒙特卡罗法	38
第三节 仿真方法和分析方法的比较	39
第四节 仿真的实验性质	41

第五节	系统仿真的类型	41
第六节	连续模型用的数值计算技术	42
第七节	离散模型用的数值计算技术	45
第八节	分布延迟模型	46
第九节	网状模型	49
第十节	一次仿真研究的进行	51
第四章	连续系统仿真	55
第一节	连续系统模型	55
第二节	微分方程	55
第三节	模拟计算机	58
第四节	模拟方法	60
第五节	混合计算机	62
第六节	数字——模拟仿真程序	63
第七节	连续系统仿真语言 (CSSL)	63
第八节	CSMP III	64
第九节	混合仿真	69
第十节	反馈系统	70
第十一节	自动驾驶仪的仿真	72
第十二节	交互型系统	76
第十三节	实时仿真	77
第五章	系统动力学	79
第一节	历史背景	79
第二节	指数增长模型	80
第三节	指数衰减模型	84
第四节	改进型指数增长模型	85
第五节	对数曲线	86
第六节	增长模型的推广	88
第七节	系统动力学图解	89
第八节	简单系统的动力学图解	91
第九节	多段模型	92
第十节	时间延迟的表示	94
第十一节	社会经济系统中的反馈	96
第十二节	一个生物学的例子	100

第十三节 世界模型.....	102
第十四节 DYNAMO语言.....	103
第六章 仿真中的概率概念.....	107
第一节 随机变量.....	107
第二节 离散概率函数.....	107
第三节 连续概率函数.....	110
第四节 概率函数的度量.....	112
第五节 连续概率函数的数字求值.....	117
第六节 连续均匀分布的随机数.....	120
第七节 用计算机产生随机数.....	123
第八节 均匀分布随机数发生器.....	126
第九节 离散分布的产生.....	127
第十节 不均匀连续分布的随机数.....	129
第十一节 舍选法.....	134
第七章 到达模式和服务时间.....	138
第一节 系统中的拥挤现象.....	138
第二节 到达模式.....	139
第三节 泊松到达模式.....	140
第四节 指数分布.....	144
第五节 变化系数.....	147
第六节 爱尔朗分布.....	148
第七节 超指数分布.....	149
第八节 服务时间.....	151
第九节 正态分布.....	152
第十节 排队规律.....	156
第十一节 排队的度量.....	157
第十二节 排队问题的数学解.....	159
第十三节 把利用率作为系统设计的指标.....	162
第十四节 服务的等级.....	162
第八章 离散系统仿真.....	166
第一节 离散事件.....	166
第二节 时间的表示.....	167
第三节 到达模式的产生.....	168

第四节	电话系统仿真	170
第五节	延迟呼叫	176
第六节	仿真程序的设计任务	179
第七节	收集统计	181
第八节	计数器和累加统计	182
第九节	测量利用率和占有率	183
第十节	记录分布和渡越时间	185
第十一节	离散仿真语言	187
第九章	通用仿真系统语言GPSS介绍	189
第一节	GPSS程序	189
第二节	综述	189
第三节	作用时间	193
第四节	事件的连续性	195
第五节	通路选择	196
第六节	机器制造车间的仿真	197
第七节	“设备”和“仓库”	203
第八节	收集统计	207
第九节	条件传送	212
第十节	程序控制语句	214
第十章	GPSS的实例	218
第一节	优先和参数	218
第二节	标准数字属性	219
第三节	函数	222
第四节	超级市场的仿真	224
第五节	传送方式	229
第六节	“逻辑开关”	231
第七节	检测条件	231
第八节	简单电话系统的GPSS模型	233
第九节	集的操作	237
第十一章	仿真语言SIMSCRIPT介绍	243
第一节	SIMSCRIPT程序	243
第二节	SIMSCRIPT系统概念	244
第三节	SIMSCRIPT程序的组织	245

第四节	名字和标号	247
第五节	SIMSCRIPT语句	247
第六节	定义系统	249
第七节	定义电话系统模型	251
第八节	下标变量	253
第九节	主程序	254
第十节	到达事件程序	257
第十一节	计时程序	260
第十二节	断开事件程序	261
第十三节	结束事件程序	261
第十二章	SIMSCRIPT语言中集的管理	263
第一节	SIMSCRIPT语言中集的定义	263
第二节	集的组织	264
第三节	集的控制	265
第四节	电话系统模型2	267
第五节	SIMSCRIPT中的收集统计	271
第六节	搜索数组	273
第七节	搜索集	275
第十三章	仿真程序设计技术	276
第一节	实体类型	276
第二节	表处理	277
第三节	在SIMSCRIPT中的数据结构	282
第四节	在GPSS中的数据结构	283
第五节	活动的执行	285
第六节	同时事件	285
第七节	条件事件	288
第八节	事件扫描	289
第九节	在SIMSCRIPT中仿真算法的执行	291
第十节	在GPSS中仿真算法的执行	295
第十四章	仿真结果的分析	299
第一节	问题的性质	299
第二节	估计方法	300
第三节	仿真运行统计	302

第四节	重复仿真运行.....	305
第五节	起始偏置的消除.....	308
第六节	分批平均法.....	309
第七节	再生方法.....	311
第八节	时间序列分析.....	315
第九节	频谱分析.....	317
第十节	自动回归处理.....	318
文献书目		321

第一章 系统模型

第一节 一个系统的概念

系统这个术语已经在各个方面用得这样广泛，以致很难给它下一个定义，使这个定义既足以概括它的各种应用，同时又能简明地把这个定义用于实用的目的〔6〕、〔12〕、〔20〕^①。因此，在开始时，我们只使用系统的简单定义，而在以后讨论系统时，再通过介绍一些常用的术语，对系统的定义加以扩充。现在先确定一个系统的定义为：按照某些规律结合起来，互相作用、互相依存的所有物体的集合或总和。虽然这个定义足以全面地概括静态系统的情况，但应集中注意它在那些相互作用随时间发生变化的动态系统中的情况。

对于一个概念性的简单系统，可以举图 1-1 中的系统作为例子。这个例子表示一架飞机在自动驾驶仪控制下飞行的情况。在

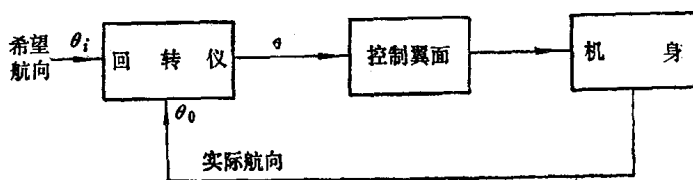


图 1-1 在自动驾驶仪控制下飞行的飞机

自动驾驶仪中有一个回转仪，用它检测飞机的实际航向与希望航向之间的差值，然后，送出一个信号去移动控制翼面。由于有了控制翼面的运动，机身就会转到希望的航向上来。

作为第二个例子，可以举制造零件并把零件装配成产品的工

① 括号内的数字系本书文献书目的序号。

厂系统为例，如图 1-2 所示。这个工厂系统的两个主要部分是：生产零件的制造车间和生产成品的装配车间。在工厂系统的次要

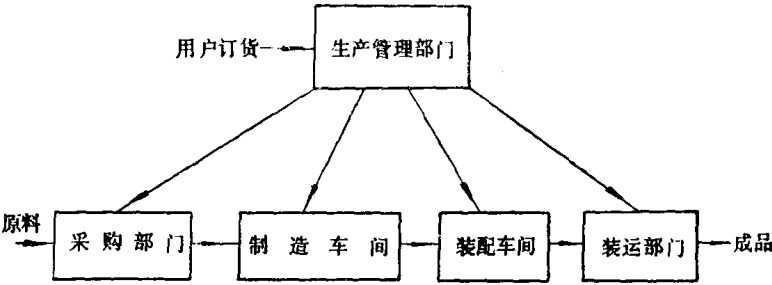


图 1-2 一个工厂系统

部分中，采购部门负责原材料的供应；装运部门负责发送成品；而生产管理部门则接受用户订货，而且负责对各个车间分配工作。

在上面列举的两个例子中，我们可以看到在系统内有某些确定的物体，每一个物体都包含着一些有效的特征。在系统中的各物体之间也会发生某些互相作用，从而引起系统内部过程发生变化。我们把存在于系统中的每一件确定的物体称为实体；把实体所具有的每一项有效的特征称为属性；把在系统内部发生的任何变化过程称为活动。我们把在某一指定时间内，由存在于系统内部的实体、属性、活动组成的整体称为系统状态。以后，我们就用系统状态的变化来研究系统的进展。

在上述的飞机系统中，机身、回转仪、控制翼面是系统的实体；它们的属性有：飞行速度、控制翼面的角度、回转仪的定位等；而活动则是控制翼面的驱动、机身对于控制翼面运动的响应等。在工厂系统中，车间（部门）、订货单、零件、成品是实体；属性就是这样一些特征，如：每份订货单要求生产的零件数量、零件的类型、车间中机器的数量等；而各个车间的生产过程就是活动。

图 1-3 列出了一些可被其它系统用作实体、属性和活动的例子。例如：若我们把卡车的运动看作一个交通系统，则每辆卡车可以认为是实体；而且每辆卡车都具有这样的属性，如：车速、行程距离等；而驾驶一辆卡车就是活动。在一个银行系统中，银行的储户是实体；储户的存款情况和帐目余额是属性；一项典型的活动则是储户的储蓄动作。其余的例子均已表示在图 1-3 上了。

系 统	实 体	属 性	活 动
交 通	卡 车	速度、距离	驾 驶
银 行	储 户	存款情况、余额	储 蓄
通 信	信 息	距离、次序	发 报
超 级 市 场	顾 客	购货清单	结 帐

图 1-3 系统的例子

在图 1-3 中，并没有列出每个系统中全部实体、属性、活动的清单。事实上，如果你不知道描述系统的目的，是不可能列出全部清单来的。只有根据描述系统的目的，我们才能够确定系统的哪些方面是有用的，也才可以确定必须鉴别实体的那些属性。

第二节 系统环境

系统经常会受到系统外界因素发生的变化的影响；而一些系统活动的结果，也可能会发生并不作用于系统本身的变化。这些发生于系统外部的变化，统称为在系统环境中发生的变化。在建立系统模型的时候，很重要的一个步骤就是要确定系统和系统环境之间的界限。这种界限的确定，要根据研究的目的来进行。

例如，在工厂系统中，生产管理部门接受用户订货这项因素，可以看作是来自工厂系统之外的影响。因此，它就属于环境部分。然而，如果要考虑订货的影响，工厂的产品和接受用户订货之间就会有一种互相依存的关系，那么，这种关系就必须认为是系统的一项活动。同样，在银行系统中，能够支付的最大利率，可能有一个极限，对研究单个银行来说，这个极限可以认为

是由系统环境引起的一种带强制性的影响。然而，在进行有关银行企业财政规律的影响的研究中，对这种极限的限制，则将成为系统的一项活动。

在系统内部发生的活动称为内生活活动。在系统外部，即在系统环境中发生、而且对系统有所影响的活动称为外生活活动。如果一个系统没有外生活活动，则称这个系统为封闭系统；反之，如果一个系统包含外生活活动，则称为开放系统。

第三节 随机活动

还有一点必须指出，描述系统活动方式时，不同的系统其输出对输入的依赖关系也是不同的。如果系统中有一项活动，执行该项活动的结果是使系统的输出完全可以按照系统的输入来描述，则把这项活动称之为确定型活动。如果系统有另一项活动，它受随机变化的影响，系统的输出可能得到各种各样的结果，则把这样的活动称之为随机型活动。

一项活动具有随机性，意味着这项活动是系统环境的一部分。如果发生的活动是随机活动，而执行这项活动的实际结果，在任何时候都是不能预知的，那么，就可以把这项活动看成为系统环境的一部分。随机活动的输出可以用概率分布的形式加以描述和度量。例如，在工厂系统中，操作一台机器所花费的时间，就有可能需要用概率分布来描述。在这里，一方面要把机械加工这项活动看作是内生活活动；而另一方面，因为在操作机器的这一随机活动之作用时间内，电源有可能断电，所以就要把断电看成是一项外生活活动所引起的结果。

如果一项活动是真正的随机活动，那么，它的随机性将无法表示。然而，当要全面地描述一项活动，觉得太琐碎或者太麻烦时，就可以干脆把这项活动表示为随机活动。例如，在一座大楼中要建立电梯服务模型时，人们乘电梯到了某一层楼，离开电梯之后，再重新进入电梯，这些活动可能与人们离开电梯后而留在该层楼内所花费的时间有关。人们离开电梯和重新进入电梯这样

一些活动，都可以看作是分散的随机活动。不过，在多数模型中，都假定这些活动只与电梯运行的平均速度有关，而且按平均速度运行时，电梯每次输送的人数是相等的。

为系统模型收集数据时，常常会遇到一些不确定的因素。它们来源于采样误差或实验误差。因为在系统模型中实体的一些属性值都应该是确定的，所以这些属性值必须从包含随机误差的数据中进行挑选并予以确定。通常情况下，可以采用算术平均值作为属性值，并且可以认为该值具有足够的精度。

第四节 连续系统和离散系统

在第一节中，所列举的飞机系统和工厂系统响应环境变化的方式是各不相同的。在飞机系统中，飞机机身航向的变化是平滑发生的。相反，在工厂系统中，所发生的变化是断续进行的，例如，原材料的订货和一件产品的完工，都是在特定的时间内发生的。

如飞机系统那样，在系统中发生的变化主要是平滑变化，那么，这种系统就称为连续系统。而像工厂系统那样，在系统中发生的变化主要是断续变化，那么，就称这种系统为离散系统。其实，并没有这样的系统：在其中发生的变化完全是连续的或者完全是离散的。例如，飞机在调节它的飞行高度时就是断续进行调节的。而在工厂系统中的机器，尽管每次启动和停止都是断续的，但是机器的运行却是连续进行的。对多数系统而言，如果系统中有一种形式的变化占优势，则可以以此为根据，把该系统划分为连续系统或者是离散系统。

即使一个完整的飞机系统，有时也可以把它看成是一个离散系统。例如，如果研究系统的目的是要研究飞机按照预先排定的航线飞行的进行情况，以研究航运问题，就没有必要仔细地研究它是怎样改变飞行的方向。那么，把按照预定航线、按各转折点改变飞机航向看作瞬时完成，就已是足够准确的了。这时，就可以把这个系统看成是离散系统。

此外，在工厂系统中，如果零件的数量足够多的话，也可能并不一定要强调把这些零件作为离散变量来看待。相反，它们可以用包括机器活动的控制速度在内的连续变量来表示。在这个控制速度下，这些零件将从一种状态变动到另一种状态。我们将在第五章，讨论和研究用系统动力学的方法去建立这类系统模型的问题。

还有些系统，虽然本身是连续的，但是仅在指定的离散时间内才发生与变量有关的信息，这样的系统称为数据采样系统^[15]。研究这样的系统，要包含确定断续采样的影响问题，特别是，当打算要在采样收集信息的基础上去控制系统的时候，更是如此。

一个系统可以这样表示也可以那样表示的二重性，说明了一个重要观点，即：描述一个系统时，并非按照系统本身的自然特征进行分类，而是要根据研究的目的来确定系统模型的类型。以后我们将要讨论：需要进行这种区别的原因，是因为按通用程序设计方法仿真连续系统或仿真离散系统是有差别的。然而，要说明一点，虽然对如何表示一个特定的系统并没有一个特殊的规则，但是一般可以规定，所确定的系统模型不应该比研究目的所需要的模型更复杂。与此相联系的是还必须研究所确定的模型的详细级数和精度。然而，对这些因素的衡量，全凭人们的知识和经验。根据这些知识和经验，人们就可以确定所需要的模型类型。

第五节 建立系统模型的方法

为了研究系统，有时可能要用系统本身来做实验。因此，对许多要研究的物体，在系统建立起来之前，就得预见它的性能如何。很明显，当系统还处于假设阶段时，要用系统本身来做实验是行不通的。有一种可以采用的方法，即：可以事先构造一些实物形象模型，然后在这些模型上进行试验。但是采用这种方法不但可能很费钱，而且还会花费很长的时间。此外，即使用这样的系统去做实验，要使它和实际的系统完全相同也是不可能或不现

实的。例如，想用任意改变货物供求关系的办法去研究经济系统，那是办不到的。因此，通常要用一个系统模型来指导对系统的研究。对于多数研究目的而言，建立系统的模型并不需要考虑系统的全部细节，所以，一个模型不仅是用来代替系统，而且应该是这个系统的简化^[14]。

我们定义一个系统模型为：为了进行系统研究，用来收集系统有关信息的物体^①。因为对一个系统进行研究的目的不同，这就决定了所要收集的与系统有关的信息也是不同的，所以，用来表示一个系统的模型并非是唯一的。由于不同的分析者所关心的是系统的不同方面，或者由于同一分析者要了解系统的各种变化关系，都可能从同一系统建立不同的模型。

由一个系统求得一个模型的任务，一般可以分为两项：第一是建立模型结构；第二是提供数据。建立模型结构时，要确定系统的边界，还要鉴别系统的实体、属性和活动。而提供数据的任务，则要求所提供的数据能够使包含在活动中的各个属性之间有确定的关系式。事实上，建立模型结构和提供数据这两项任务是一项工作的两个侧面，并不作为两项独立的任务看待。因为它们二者密切相关，所以通常一部分工作任务，能够在另一部分工作任务内完成。假如用有关的系统直接收集数据和分析数据，并用以证实或否定有关假设的话，那么，在通常情况下所收集到的数据，经过分析，往往可以用来求得一个能够改变模型结构的、可以信赖的关系式。

下面把对一个超级市场的描述，作为说明建立系统模型过程的例子。

一个“顾客”需要购买“商品”，就“到达”超级市场。如果有一个“篮子”可以“利用”，他就“取”一个“篮子”进行“采购”。然后，他到“几个柜台”中的任一个“柜台”前“排队”，进行“算帐”。“算帐”完了，他“放回”篮子后，“离开”

① 在一个实体模型中的信息包含在模型的特征内，而在数学模型中的信息则通常用符号表示。