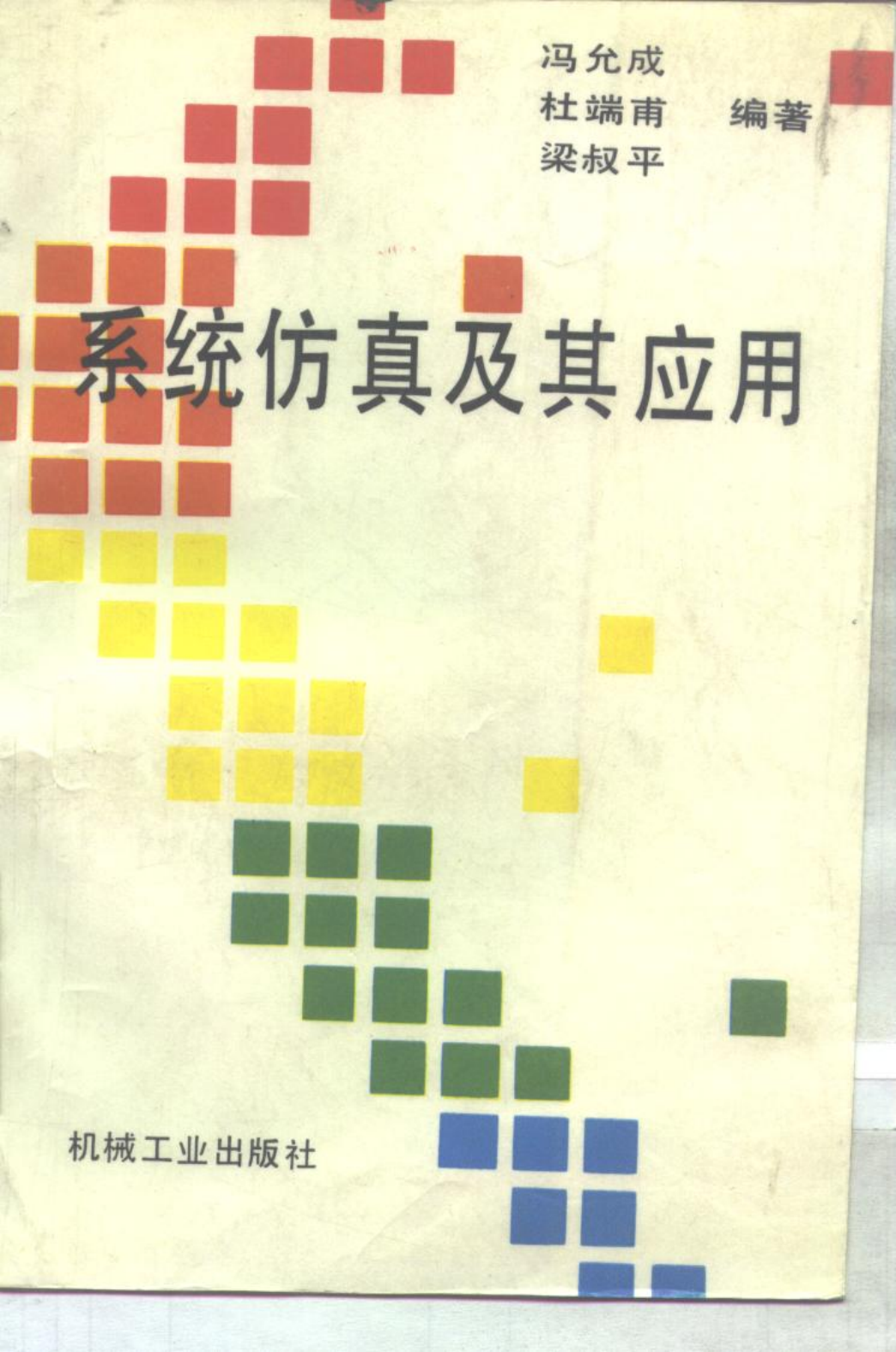


A decorative graphic on the left side of the book cover, consisting of a series of colored squares arranged in a descending staircase pattern from the top left towards the bottom right. The colors transition from red at the top, through yellow, to green, and finally to blue at the bottom.

冯允成
杜端甫
梁叔平

编著

系统仿真及其应用

机械工业出版社

系统仿真及其应用

冯允成 杜端甫 梁叔平 编著



机械工业出版社

(京)新登字054号

JSD60/08

本书系统地介绍了离散系统仿真的基本原理和方法,对离散事件系统仿真、随机数与随机变量发生器和仿真输出结果的统计分析作了重点论述,同时也阐明了连续系统仿真的原理和方法。全书以较大的篇幅介绍了GPSS、Q-GERT、VERT、DYNAMO和SLAM仿真语言的原理、内部逻辑、构模方法及仿真运行等内容,并结合各种语言的特点分析和介绍了大量仿真构模与实际应用的例子和案例,便于读者在了解基本原理的基础上,结合工作需要实际应用。

本书可供广大科研人员、技术人员、管理人员和各级领导人员阅读和参考,也可用作高等院校工科、管理学科和经济科学的本科生教材或教学参考用书。

系统仿真及其应用

冯允成 杜端甫 梁叔平 编著

*

责任编辑:王霄飞 版式设计:乔玲

张淑琴

封面设计:方芬 责任校对:熊天荣

责任印制:尹德伦

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $15 \frac{1}{8}$ · 字数 333 千字
1992年5月北京第1版·1992年5月北京第1次印刷

印数 0,001—2,000 · 定价:13.00元

*

ISBN 7-111-02899-6/F · 399

前 言

系统仿真是一门以系统科学、计算机科学和概率论与数理统计为基础，结合各应用领域的技术科学而形成的边缘学科，同时它又是一门综合性的试验学科。随着各门学科的发展，系统仿真也日新月异地发展着，已成为近十多年来十分活跃的新兴学科。

系统仿真与各门技术学科、管理学科、经济学科以至社会学科都有紧密的联系，这正是系统仿真得到日益广泛应用的原因。它在航空、航天、军事、科研、工业生产、环境保护、生态平衡、医学、交通管制、经济规划、商业经营、金融流通等各个方面都获得了成功的应用，取得了显著的经济效益。根据国外发展的统计资料表明，运筹学各个分支在管理中的应用，以系统仿真的应用项目居于最高频数，约占全部应用项目的三分之一。我国自80年代初以来，也在管理领域中开始推广系统仿真及其应用，在高技术项目的论证、大型工程项目的研制进度和预算、造船计划安排、机械制造企业计划和排序、城市交通管制、医院管理、商业服务、技术政策制订等方面都曾利用仿真技术进行预测、政策分析、计划安排、经济分析和调度配置等，为领导部门和管理部门提供了决策依据，并取得较好的经济效益。

系统仿真不仅是一门应用性很强的学科，同时也是一门试验性学科。对于一些正在规划中的系统或正在设计中的项目（工厂、高科技产品、研究项目等），都可以建立相应的

仿真模型，通过计算机仿真对系统进行多种方案和参数的实验，预测未来系统或项目的运行参数和经济效益等。对于现有系统作改进时，也可通过系统仿真，模拟经过改进以后的系统运行情况，以寻求满意的改进方案。特别是一些危险性极大或特别贵重的系统，通过构模和仿真实验可以得到最安全的运行参数或节省巨额投资。系统仿真的这种实验性，为它的应用和推广开辟了广阔的前景。

系统仿真的发展与仿真软件和仿真语言的研究开发紧密相联系。仿真软件和仿真语言的发展大体可分为以下四个阶段。第一阶段是通用程序设计语言阶段，如60年代初的仿真软件多用 FORTRAN 直接编程。第二阶段是初级仿真语言阶段，如60~70年代中开发的面向方程和框图的仿真语言 CSSL 和 MIDAS 等。第三阶段是高级仿真语言阶段。从70年代中期到80年代初，许多高级仿真语言问世，其功能比较完善，面向过程和方便用户的特点非常明显，对促进系统仿真的应用起到决定性的作用，这一阶段的代表性仿真语言有 GPSS、GASPN、Q-GERT、VERT、SLAM、SIMSCRIPT 以及 DYNAMO 等。1984年以来，美国 PRITSKER 公司开发的 TESS 仿真环境，将数据库与系统仿真结合起来，并具有数据分析、报告与图形产生、动画显示运行控制等功能，形成一体化仿真软件系统。第四阶段（80年代后期）是专家仿真系统阶段，它的特点是将专家系统与仿真结合起来，使系统仿真具有智能能力，以致可以通过面向过程的自然语言交互，由系统进行构模、确认，进行试验设计和仿真运行、仿真结果分析和修改模型等，从而可以取代仿真专家的工作。在此基础上，还将进一步发展为智能化仿真环境等。

编写本书的目的是结合我国国情，有选择地介绍国外先

进的、对我国有实用价值的仿真实理论和仿真语言，并侧重于介绍各种仿真系统的应用特点，以便在我国推广和应用系统仿真技术。本书以介绍离散系统仿真为主，同时也简要介绍连续系统仿真的原理和应用，以及离散和连续综合仿真系统的内部机制和应用特点。在理论和应用的关系方面，我们突出仿真构模与应用的要求，在应用实例中则以管理应用为主。读者在阅读本书以后，可以对系统仿真的基本理论有所认识，对仿真构模和运行具有较深入的了解，从而能够针对本人所承担的工作，选择相应的仿真语言，进行构模、上机运行、分析结果、提出改进建议或提供决策依据，并取得实效。此外，本书也可作为有兴趣的读者进一步研究仿真实理论和进行大型复杂系统构模与仿真的基础读物。希望本书对在我国推广系统仿真技术及其应用起到一定的促进作用。

本书中所介绍的五种仿真语言 GPSS、Q-GERT、VERT、DYNAMO 和 SLAM 均可在微机上正常运行，也可在任何小型或中型机上运行。北京航空航天大学管理学院可提供各类软件说明和咨询。本书第一章至第五章，第九章至第十一章由冯允成编写，第六、七两章由杜端甫编写，第八章由梁叔平编写。由冯允成担任主编。

本书编写过程中曾得到袁子仁教授的指导和帮助，提出许多宝贵意见，并且得到国家自然科学基金委员会的资助，特此表示衷心感谢。

由于我们水平有限，不妥或错误之处恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第一章 系统仿真概论	1
一、系统仿真的概念	1
二、系统仿真的模型和类别	4
三、系统仿真的基本步骤	7
第二章 离散事件系统仿真	13
一、随机离散事件	13
二、仿真时钟及其推进方式	15
三、未来事件表	20
四、实体流技术	24
五、随机数发生器在仿真中的地位	25
六、汇集和输出统计数据	26
七、事件安排/时间推进的仿真机制	26
八、手工仿真实例	29
第三章 随机数和随机变量发生器	33
一、伪随机数及其本质	33
二、伪随机数发生器	35
三、随机数发生器的检验	45
四、产生规定分布随机变量的方法	56
第四章 通用仿真系统GPSS语言的子集	79
一、GPSS的基本概念	80
二、GPSS控制程序和主要控制语句	93
三、模块定义语句和实体定义语句	98

四、GPSS仿真在管理中的应用举例	113
第五章 模块定义语句的扩展和案例分析	136
一、模块定义语句的扩展	136
二、生产线的GPSS仿真	147
三、库存问题的GPSS仿真	151
四、简单工厂的GPSS仿真	156
第六章 随机网络Q-GERT仿真基本概念	165
一、Q-GERT网络基本特点和分析过程	165
二、Q-GERT网络基本元素和功能	168
三、较复杂排队系统的Q-GERT网络模型	175
四、Q-GERT网络基本概念小结	183
五、初级Q-GERT网络构模和应用	186
六、Q-GERT网络的分析程序	198
第七章 Q-GERT网络的扩展功能	219
一、属性码及其在网络模型中应用	219
二、选择型节点(S节点)及其功能	230
三、匹配型节点(M节点)及其功能	235
四、节点更改	237
五、扩展功能Q-GERT网络元素符号小结	239
六、扩展功能Q-GERT网络构模示例	242
七、Q-GERT网络扩展功能数据的输入与输出	251
第八章 风险评审技术VERT及其应用	264
一、风险评审技术VERT概述	264
二、VERT网络的构模要素和逻辑功能	268
三、VERT仿真的输入/输出参数	274
四、汽车设计研制的VERT仿真	278
五、管理决策过程的VERT仿真	288
六、能源方案选择的VERT仿真	292
第九章 离散系统仿真输出结果的统计分析	303

一、仿真类型	303
二、系统的性能测度	306
三、终态仿真的置信区间	313
四、稳态仿真的置信区间	318
五、仿真模型的确认	327
第十章 连续系统仿真	332
一、系统动力学概述	332
二、DYNAMO语言简介	350
三、应用实例	367
第十一章 多种构模功能的仿真语言	
SLAM 及其应用	388
一、SLAM仿真的主要特点	389
二、SLAM的网络构模及应用实例	391
三、SLAM的离散事件仿真构模及应用实例	423
四、SLAM网络与离散事件的综合仿真及应用实例	440
五、SLAM网络与连续系统的综合仿真及应用实例	451
附录	470
参考文献	473

第一章 系统仿真概论

一、系统仿真的概念

仿真是一种模仿行为。系统仿真则是模仿现有系统或未来系统运行状态的一种技术手段。当人们需要预计某一个系统的运行效果或评估其成败得失时，对系统本身作完整的实际运行，当然可以得到系统的运行特性和主要参数，但是，这往往需要付出较高的代价。对于某些正在设计中的系统、未来系统、社会经济系统或具有灾害性后果的系统，甚至根本无法作系统的实际运行。于是，对系统进行模拟或仿真，在不需要真实系统参予的情况下，利用仿真模型来作模仿运行，并根据仿真结果来推断、估计或评价真实系统的性能或参数，已经引起人们广泛的关注，这无疑是一种经济可行的手段。人们自古以来就懂得利用军事演习来了解战争，在假设的军事环境下进行必要的军事演习，可以帮助军事指挥人员考察部队的作战能力，战斗或战役取得胜利的可能性，评价作战策略和作战方案的可行性与有效性等。因此，军事演习就是对实际作战过程的模仿或仿真。此外，象实验室环境下进行的科学实验、在地面训练飞行员的飞行模拟器、生产过程的试验运行、交通运输系统的模拟与规划等等。小至一个排队系统的试验，大至一项经济政策对国民经济的宏观影响的试点，都是对实际系统的实验或仿真。

因此，系统仿真并不是新的概念，而是人们早已广泛应用的研究方法。只是在电子计算机问世以后，耗费巨大的军

事演习、贵重系统的破坏性实验或未来复杂系统的性能预测等，都有可能在计算机上进行仿真实验，得到被仿真系统的动态特性，从而可以估计和评价真实系统的优劣和所采用策略或方案的正确性，将系统仿真的概念赋予了新的内容，因而成为辅助决策的重要手段之一。

系统仿真的概念可简要阐明如下，所谓系统仿真，是指利用计算机来运行仿真模型，模仿实际系统的运行状态及其随时间变化的过程，并通过对仿真运行过程的观察和统计，得到被仿真系统的仿真输出参数和基本特性，以此来估计和推断实际系统的真实参数和真实性能。这个过程称为系统仿真。

例如，某工厂考虑到市场需求的情况，正在打算对工厂进行扩建，并已提出扩建的方案和详细的设计资料。为了估计工厂扩建后提高生产率和产量的效益能否在近年内抵偿所花的扩建费用，可就扩建后的工厂条件，建立相应的仿真模型，通过计算机进行仿真运行后，就可以得到工厂实际运行的各项指标和经济效益，为有关部门提供是否进行工厂扩建的决策依据。

从以上概念和实际问题可以看到，首先，系统仿真是一种有效的“实验”手段，它为一些复杂系统创造了一种计算机实验环境，使系统的未来性能和长期动态特性，能在极短的时间内在计算机上得到实现。其次，为了有效地进行仿真实验，就需要在一定仿真语言的支持下，建立经过抽象和简化的仿真模型。通常，仿真模型具有面向实际过程或实际问题的特征，它可以包含系统中的逻辑关系和数学关系。第三，系统仿真的输出结果是在仿真运行过程（即仿真实验过程）中，不断对系统行为和系统状态进行观察和统计而得出。

的。并且这种观察和统计是由仿真软件自动完成的。第四，系统仿真往往要对具有多种随机因素的复杂系统作出综合评估，每次仿真运行只是对系统行为的一次随机抽样，因此，一次完整的仿真实验往往由多次独立的重复仿真运行所组成。所得到的仿真结果也只是对真实系统进行具有一定样本量的仿真实验的随机样本。因此还需要通过必要的统计推断，才能得出对真实系统的性能估计。

从学科领域来看，系统仿真是运筹学的一个重要分支并且得到广泛的应用，它与线性规划和网络技术一起被称为运筹学的三大支柱。在求解复杂系统中，系统仿真具有以下优点：

(1) 对于复杂的、带有多种随机成分的系统，要用数学模型来作精确的描述，往往是十分困难的，或者虽然能建立相应的数学模型，却无法求解。但系统仿真则可以根据系统内部的逻辑关系和数学关系，面向系统的实际过程和系统行为来构造模型，从而能方便地得到复杂随机系统的解。这是系统仿真得到广泛应用的最基本原因。

(2) 系统仿真直接面向问题的特点，使仿真模型与实际过程具有形式上和内容上的对应性与直观性，避免了建立抽象数学模型的困难，从而显著简化了建模过程，使建模分析人员有可能把主要精力用于深入了解所研究问题或过程本身，使非计算机专业的广大科技人员和管理人员都能成为系统仿真的直接使用者。

(3) 系统仿真为分析人员和决策人员提供了一种有效的实验环境，从而可以直接控制实验条件或输入参数，得到不同的结果，从中选择满意的方案。

然而，仿真技术也并非十全十美，还存在其固有的缺

点:

(1) 开发和运行仿真模型往往需要进行大量的独立、重复仿真运行, 需要占用较大的内存并耗费较多的机时费。

(2) 系统仿真本身不具有优化功能, 每次仿真实验只能给出实际问题的一个可行解, 如果要获得问题的最优解或满意解, 往往需要做多次仿真实验, 因此带有枚举法的弱点, 为取得最优解在经济上将付出较高的代价。

(3) 仿真构模是直接面向问题的建模过程, 对于同一个实际问题, 由于构模人员素质和风格上的差异或对问题了解的深度不同, 往往会构造出迥然不同的仿真模型, 其仿真运行结果自然也就不同。因此, 仿真构模常被称为非精确构模, 或认为仿真构模是一种“艺术”而不是技术。

以上缺点虽然是由仿真本身的性质所造成的, 但是随着计算机科学(包括硬件和软件)的发展和系统仿真实理论的研究深入, 这些问题将得到不同程度的改善。随着计算机内存的扩展和运算速度的加快, 仿真需用机时将会减少到可以接受的程度。另一方面, 由于近年来大量优秀的仿真软件相继开发, 把系统仿真与优化技术相结合的新型仿真——优化软件已经出现, 从而可以在仿真的环境下同时进行优化处理。此外, 由于仿真实理论的发展, 在仿真模型的代表性方面, 近年来已从统计学角度提出了仿真模型确认的理论, 从而使仿真构模从非精确性逐步向精确性过渡, 从“艺术”领域转向技术领域。

二、系统仿真的模型和类别

人们要研究一个真实系统的性能, 往往需要建立对应于该系统的模型, 通过对模型的详细研究, 从中抽取出系统的

基本性能。

所谓模型就是对实际系统的一种抽象的、本质的描述。首先，模型必须是现实系统的一种抽象，它是在一定假设条件下对系统的简化。其次，模型必须包含系统中的主要因素。模型不可能与实际系统一一对应，而只应当包含那些决定系统本质属性的重要因素。第三，为了进行定量分析，模型中必须反映出各主要因素之间的逻辑关系和数学关系。使模型对系统具有代表性。

仿真模型同样必须符合以上各项要求。其特点在于面向问题和过程的建模过程，并且适合于在仿真环境下，通过模仿系统的行为来求解决问题。

正如前述，运行仿真模型的费用往往十分高昂，在可以采用精确模型求解的情况下，如系统内部的逻辑关系和数学关系具有典型性和简单性，则首先应考虑建立数学模型或解析模型，如线性规划模型、非线性规划模型或网络模型、决策模型等，以便求得问题的精确解。如果系统内部的关系十分复杂，而且逻辑关系多于数学关系或包含大量随机因素时，构造数学模型往往十分困难，或即使建立了模型也无法求解，这时建立仿真模型才是合适的。因此，系统仿真有时被称为“最后的方法”，或“绝处逢生的方法”。

仿真模型基本上可分为离散仿真模型和连续仿真模型两大类，它们主要取决于所研究系统的性质。在离散性系统中，表示系统性能的状态变量只在随机的时间点上发生跃变，而在两个时间点之间，系统状态不发生任何变化。例如公共汽车的运行状态可以用行驶和停止，以及车上乘客人数来表示。公共汽车在行驶过程中受到交通拥挤程度和交通信号灯等随机因素的影响，其状态将在离散的随机时点上发生

变化，其乘客人数仅在到站停车的时点上发生，由于乘客所去目的地的随机性和不同车站上乘客到达的随机性，车上乘客人数将是一个离散的随机变量。而在连续性系统中，系统的状态变量将随某些参变量（如温度、压力、时间等）而发生连续变化。通常系统的各个状态变量都可表示为某一参变量的连续函数。例如飞机飞行高度与速度的关系，导弹飞行轨迹方程以及人口变化的动态方程等，都可构成连续性仿真模型。

按照仿真模型中是否包含随机因素和是否具有时变性质，可以分别建立确定型和随机型仿真模型，静态和动态仿真模型等。本书重点介绍与管理过程直接相关的离散性随机动态仿真系统，阐明其建模、运行和分析的基本原理。

应当看到，在仿真领域中，仿真模型的类别有时并不是绝对的。连续系统往往通过离散技术来进行构模，而确定型问题也可建立成随机性仿真模型。这种建模思想上的灵活性，为系统仿真的应用开辟了广阔的前景。下面简要介绍将连续、确定性问题转化为离散、随机性仿真模型的基本思路。

设 $f(x)$ 是区间 (a, b) 内的连续函数，且已知在该区间内 $f(x) \geq 0$ ，要求计算 $\int_a^b f(x)dx$ 的值。当 $f(x)$ 的形式比较复杂和非可积函数时，用解析法往往十分困难。但却可以构成一个十分简单的离散、随机性仿真模型。

因 $f(x) \geq 0$ ，令 c 为 $f(x)$ 之上限，则函数 $f(x)$ 所表示的曲线将包含在边长为 c 和 $(b - a)$ 的矩形之内，如图1-1所示。

若在 (a, b) 和 $(0, c)$ 区间中分别产生两个均匀

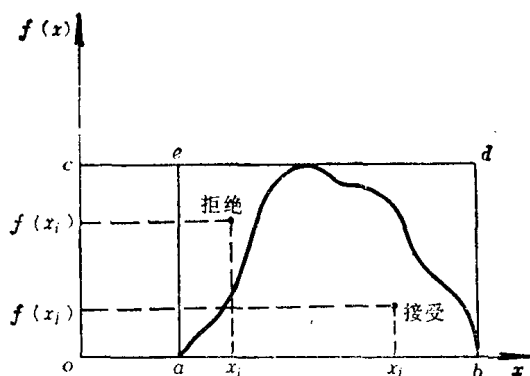


图1-1 求 $\int_a^b f(x)dx$ 的仿真模型

分布的随机数 x_i 和 y_i ，由此构成的坐标点 $P_i(x_i, y_i)$ 必定在矩形 $abde$ 内。为了计算该积分的值，可规定以下准则：

若 $y_i \leq f(x_i)$ ，则接受该点并作计数统计，

若 $y_i > f(x_i)$ ，则舍弃该点不作计数统计。

设共产生 N 个随机仿真点，如果共接受 n 个点，（即恰在 $f(x)$ 曲线上或在曲线以下的点），当 N 充分大时有

$$\frac{n}{N}(b-a)c \approx \int_a^b f(x)dx = \text{曲线下面积}$$

由上可见，通过产生随机数的方法来统计落在曲线上或曲线下的坐标点数目，即可计算出定积分的值，计算的精度将随 N 的增大而提高。这种方法就是最典型的蒙特卡罗（Monte-carlo）仿真。在系统仿真中将经常用到这种仿真方法。

三、系统仿真的基本步骤

由系统仿真的基本概念可以看到，对一个实际系统进行仿真，通常应经过以下步骤。

1. 问题阐述

在开展系统的仿真工作以前，必须对所研究的系统作详细的调查和了解，明确研究这个问题的目标，描述这些目标的主要参数（状态变量）和衡量标准。同时要清晰地定义所研究系统的范围和边界。凡是与该系统的目标和主要参数密切相关的环节都应包含在仿真模型之中，那些与仿真目标或主要参数无关或影响不大的环节则必须排除在外，或作为仿真的外部环境而加以考虑。此外，在确定系统边界的基础上，还应规定仿真的初始条件，并充分估计初始条件对系统主要参数的影响。

2. 构造仿真模型

模型是实际系统的一种抽象描述并能反映系统的本质属性。

构造仿真模型具有其本身的特点。首先它是面向问题和过程的构模方式。在离散系统仿真建模中，主要应根据随机发生的离散事件、系统中的实体流以及时间推进机制，按系统的运行进程来建立模型；而在连续系统仿真建模中，则主要根据系统内部各个环节之间的因果关系、系统运行的流程，按一定方式建立相应的状态方程或微分方程来实现仿真建模。其次，构造仿真模型与所选用的仿真语言密切相关。例如，选用通用仿真系统 GPSS (General Purpose Simulation System) 语言时，仿真模型将采取实体流和模块图的形式；当选用带排队功能的图示评审技术 Q-GERT (Queue-Graphical Evaluation Review Technique) 语言，或风险评审技术 VERT (Venture Evaluation Review Technique) 仿真语言时，仿真模型将为随机网络的形式；如果采用多功能仿真语言 SLAM (Simulation Language for