



全国普通高等院校物流管理与物流工程专业教学指导意见配套规划教材

物流 系统仿真

专业核心课

邱小平 主编

中国物资出版社

全国普通高等院校物流管理与物流工程专业教学指导

物流系统仿真

主 编 邱小平

副主编 阮宏梁

中国物资出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

物流系统仿真/邱小平主编. —北京: 中国物资出版社, 2012. 5

(全国普通高等院校物流管理与物流工程专业教学指导意见配套规划教材)

ISBN 978-7-5047-4107-3

I. ①物… II. ①邱… III. ①物流—系统仿真—高等学校—教材 IV. ①F252-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 264206 号

策划编辑 王宏琴
责任编辑 王宏琴

责任印制 何崇杭 王 洁
责任校对 孙会香 杨小静

出版发行 中国物资出版社

社 址 北京市丰台区南四环西路 188 号 5 区 20 楼

电 话 010-52227568 (发行部)

010-68589540 (读者服务部)

网 址 <http://www.clph.cn>

经 销 新华书店

印 刷 中国农业出版社印刷厂

书 号 ISBN 978-7-5047-4107-3/F·1716

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 13.5

字 数 329 千字

印 数 0001—3000 册

邮政编码 100070

010-52227588 转 307 (总编室)

010-52227588 转 305 (质检部)

版 次 2012 年 5 月第 1 版

印 次 2012 年 5 月第 1 次印刷

定 价 26.00 元

版权所有 · 侵权必究 · 印装差错 · 负责调换

前 言

仿真是利用模型研究系统的方法,已经有近50年的发展历史。在宇航、军事、自动化、电力等领域得到了广泛和有效的应用。随着计算机技术的发展和人们对各个领域研究的深入,系统仿真技术日臻成熟,应用领域不断扩大。

近年来,现代物流越来越得到人们广泛的关注。物流具有覆盖面宽、综合性强、涉及面广的特点。它覆盖了工业、农业和服务业,综合了管理与工程的多个领域,涉及交通运输、仓储、包装、服务、信息等多个领域。物流的发展不仅关系企业自身的发展,对整个国民经济的发展也起到了至关重要的作用。因此,推动传统物流向现代物流的转变成为人们追求的共同目标。

将系统仿真技术引入现代物流的研究,能够辅助人们科学地规划和设计物流系统、科学地控制物流运行过程、科学地调配物流资源,从而促进物流系统的整体优化。同时,物流产业的蓬勃发展也将促进系统仿真技术的发展,并为系统仿真的应用开拓一个全新的领域。

为了方便教学和读者自学,我们将系统仿真基本原理与Flexsim软件操作指导汇集在一起。第一章至第六章介绍基本原理。其中,第一章是概述,主要介绍系统仿真技术的发展历史、特点、应用以及相关技术;第二章介绍系统仿真的基本知识,包括基本概念、离散事件系统仿真、单服务台排队系统仿真以及单品种库存系统仿真;第三章介绍随机数与随机变量的基本概念、常用分布、随机数发生器、随机数性能测试以及随机变量的产生方法;第四章介绍仿真输入数据分析;第五章介绍几种主要的系统仿真算法,包括事件调度法、活动扫描法、三段扫描法和进程交互法;第六章介绍仿真输出数据分析及其评价的有关概念和方法;第七章至第九章介绍Flexsim软件的应用,其中,第七章是Flexsim仿真软件简介,第八章是Flexsim建模指导;第九章是Flexsim的物流仿真实验。

Flexsim软件应用的编写遵循从粗到细,由浅入深的基本原则。对于Flexsim的很多基本概念,在前面的章节里先进行必要的定义和概要的介绍,在后面的章节里再进行详细介绍和使用方法的辅导。读者在使用本书时可以前后呼应,对相关的内容反复学习。

通过本书的学习，读者不仅可以初步掌握物流系统仿真的基本原理，同时还可以掌握实际系统仿真的步骤与方法。

本书由西南交通大学交通运输与物流学院邱小平教授任主编，负责主持全书的编写工作；阮宏梁任副主编；参加编写的人员还有杨俊、杨丽、周凤耀、郑萍、曾菲圆、钟流。

本书可作为高等院校经济管理、物流工程、物流管理、工业工程、系统工程等相关专业本科生课程的教材，还可以作为物流企业管理技术人员的学习资料。

由于水平所限，书中难免有不足之处，欢迎广大读者提出批评和建议。

编 者

2012年2月于成都

目 录

第一章 概 论	(1)
第一节 系统与系统模型	(1)
第二节 系统仿真概述	(2)
第三节 系统仿真的特点	(3)
第四节 物流系统仿真和技术	(4)
第五节 系统仿真的发展趋势	(5)
第二章 系统仿真基本知识	(7)
第一节 连续系统和离散事件系统	(7)
第二节 离散事件系统仿真方法	(8)
第三节 排队系统	(13)
第四节 库存系统	(15)
第五节 单通道排队系统仿真	(16)
第六节 单品种库存系统仿真举例	(20)
第三章 随机数与随机变量	(25)
第一节 确定性系统与随机系统	(25)
第二节 随机变量与随机数相关概念	(26)
第三节 随机数发生器	(28)
第四节 随机数性能测试	(31)
第五节 随机变量的产生方法	(35)
第四章 仿真输入数据分析	(41)
第一节 仿真输入数据分析概述	(41)
第二节 数据的收集与处理	(42)
第三节 数据分布的分析与假设	(43)
第四节 参数的估计	(50)
第五节 拟合优度检验	(52)
第五章 离散事件系统仿真策略	(56)
第一节 事件调度法	(56)
第二节 活动扫描法	(58)

第三节	三段扫描法	(61)
第四节	进程交互法	(62)
第六章	仿真输出数据分析及评价	(65)
第一节	概 述	(65)
第二节	系统仿真的类型	(67)
第三节	仿真结果的瞬态与稳态特征	(68)
第四节	终态仿真的结果分析	(70)
第五节	稳态仿真的结果分析	(72)
第六节	随机变量的比较	(78)
第七节	敏感度分析	(79)
第八节	正交设计	(80)
第九节	参数的优化方法	(82)
第七章	Flexsim 仿真软件简介	(86)
第一节	Flexsim 软件概述	(86)
第二节	Flexsim 术语	(88)
第三节	实体库与实体	(94)
第四节	实体的参数	(105)
第五节	实体的属性	(130)
第八章	Flexsim 仿真建模指导	(134)
第一节	Flexsim 仿真基本建模步骤	(134)
第二节	基础教程 1	(138)
第三节	基础教程 2	(145)
第四节	基础教程 3	(154)
第五节	基础教程 4	(159)
第六节	进阶教程	(164)
第七节	补充教程	(192)
第九章	物流仿真实验	(196)
第一节	离散型流水作业线系统仿真	(196)
第二节	自动分拣系统仿真	(198)
第三节	小车导引系统仿真	(201)
第四节	生产—库存系统仿真	(203)
第五节	码头卸货系统仿真	(206)
参考文献		(210)

第一章 概 论

第一节 系统与系统模型

“系统”这个词来源于古希腊语“system”，有“共同”和“给以位置”的意思。目前关于系统的定义不是很统一，一般可以理解为“系统是由两个或两个以上的相互区别或相互作用的单元有机结合起来完成某一功能的综合体”。系统是一个非常广泛的概念，自然界、人类社会、一个企业，甚至一个人都可以看做一个系统。系统中的每一个单元也可以看做一个子系统。系统与系统的关系是相对的，一个系统可能是另一个更大系统的子系统，也可以继续分成更小的系统。从系统的定义可知，系统的形成须具备以下条件，即系统是由两个或两个以上的要素组成；各个要素都具有一定的目标；各要素之间相互联系，使系统保持相对稳定；系统具有一定的结构，保持系统的有序性，从而使系统具有特定的功能。

系统具有以下特征：

(1) 整体性。组成系统的各个要素不是简单地集合在一起，而是有机地组成一个整体，每个要素要服从整体，追求整体最优，而非每个元素最优。

(2) 相关性。组成系统的各个要素相互关联并相互作用。系统各个要素之间的相互关联、相互支援和相互制约，使之有机结合成为有特定功能的社会系统。

(3) 层次性。系统的层次性是指系统的每个元素本身又可看做一个系统，人们称为系统的“子系统”。以交通系统为例，它又可分为民航系统、公路系统、铁路系统、水运系统等。

(4) 目的性。任何系统都是有目的和目标的。例如，教育系统的目的是为了提高教学水平和人们的素质。系统的目的是通过系统的功能达到和实现的，因此任何系统都具备某种功能。

(5) 系统对环境的适应性。任何系统都处于一定的环境之中，系统要受到环境的影响和制约，也要对环境的变化产生某种反应。人们把环境对系统的影响称为刺激或冲击，而系统对环境的反应称为反响。系统对环境的适应性表现为环境对系统提出的限制和系统对环境的反馈控制作用。

系统分为工程系统和非工程系统两大类。工程系统如航空、航天、核能、工业过程控制的系统分析、系统设计、系统测试、系统功能实验和人员模拟操作训练等；非工程系统如社会、经济、企业管理、农业、生态环境等系统的预测、控制和决策。

系统模型是反映系统内部要素的关系、系统某些方面本质特征以及内部要素与外界环境关系的系统的抽象。模型主要分为两大类，一种是形象模型，另一种是抽象模型。

形象模型是将系统的物理或几何特征提取出来建立的模型，可以是比例的，也可以是实物的。如按比例缩小的建筑木模、风洞实验中的飞机模型等，大多数物理模型是形象模型等。抽象模型包括概念模型、模拟模型、图表模型、数学模型等。

数学模型又可以细化为：

- (1) 按变量分有确定模型或随机模型；
- (2) 按变量之间的关系分有线性模型或非线性模型；
- (3) 按变量取值分有连续模型或离散模型；
- (4) 按时间分有动态模型或静态模型；
- (5) 按功能用途分有结构模型、评价模型、工程设计模型和预测模型。

第二节 系统仿真概述

系统仿真方法是建立系统模型，在模型上对系统进行实验研究的方法。系统仿真的基础理论包括系统理论、控制理论、相似理论、数据统计理论、信息处理理论、计算机技术等。

系统仿真是建立在系统理论、控制理论、相似理论、数理统计、信息技术和计算技术等理论基础之上的，以计算机和其他专用物理效应设备为工具，利用系统模型对真实或假想的系统进行试验，并借助于专家经验知识、统计数据和系统资料对试验结果进行分析研究，做出决策的一门综合性和试验性的学科。

早在几千年前，我们的先人就懂得了系统仿真的基本原理。中国象棋是用于对古代战争进行仿真的游戏，军事沙盘用来仿真两军对阵的战略，建筑中用木模研究实际建筑物的结构与承载性能等。20世纪40年代，冯·诺依曼正式提出了系统仿真的概念。1952年美国成立了仿真学会，1963年出版了仿真领域最具权威性的学术刊物“SIMULATION”后，系统仿真逐渐成为一门独立的学科。

人们在研究一个较为复杂的系统时，通常可以采用两种方法：一种是直接在实际系统上进行研究；另一种就是在系统的模型上进行研究。在实际系统上研究固然有其真实可信的优点，但是很多情况下是不合适甚至不可行的。这主要有以下几方面的原因：

(1) 安全性。在研究重要的、有人身安全或设备安全问题的系统时，不允许在实际系统上进行实验，如宇航系统、核能系统、航空系统等。

(2) 系统的不可逆。有很多系统是不可逆的，如已经发生的灾害、生态系统等。

(3) 投资风险过大。一些重大的工程项目、重大设备系统很复杂，投资巨大，不允许在实际系统上进行破坏性的实验。

(4) 研究时间过长。多数情况下，在实际系统上研究问题往往需要历经较长的时间。例如，研究复杂的生态系统需要历经数十年，研究一个交通运输系统，至少也需要数天甚至数月的运行情况。

(5) 真实的系统尚未建成。在系统规划设计阶段需要评价方案的优劣，显然无法在真实系统上进行。

出于以上主要原因，利用模型来研究系统不仅是必要的，甚至在某些情况下是唯一

可行的方法。

系统仿真技术有多种分类方法。按模型的类型可分为连续系统仿真、离散事件系统仿真、连续/离散混合系统仿真和定性系统仿真。按仿真的实现方法和手段及模型的种类,可分为物理仿真与数学仿真。根据人和设备的真实程度,可分为实况仿真、虚拟仿真和构造仿真。

连续系统仿真是指系统状态随时间连续变化的系统的仿真。离散事件系统仿真则是指系统状态只在一些时间点上发生变化的系统的仿真。在系统仿真技术的发展历史中,连续系统仿真较早得到发展和成熟的应用,最为成熟的领域包括自动控制、电力系统、宇航、航空等。离散事件系统仿真是随着管理科学的不断发展和先进制造系统的发展,逐渐被重视和发展起来的。目前在交通运输管理、城市规划设计、库存控制、制造物流等领域都开展了离散事件系统仿真的理论和应用研究。

物理仿真是建立系统的物理模型。最早的仿真起源于物理仿真,如航空飞行用空洞实验研究气流对飞机飞行的影响。数学仿真则是通过建立系统的数学模型进行研究。数学仿真又分为模拟仿真和数字仿真。数字仿真就是建立系统的数字模型。由于数字仿真依赖计算机,并需要处理大量数据,要求能快速计算,因此数字仿真是随着计算机的发展而形成和不断成熟起来的。随着计算机的发展,数字仿真的研究和应用在系统仿真中占有越来越大的比重。

西方工业发达国家系统仿真技术的应用非常普遍。20世纪90年代初,美国提出了22项国家关键技术,系统仿真技术被列为第16项;美国国防部提出了21项国防关键技术,系统仿真技术被列为第6项。美国已严格规定所有重要的武器研究,必须进行仿真实验后才可投入正式生产和使用。

根据20世纪80年代末的统计,日本企业运用系统工程解决管理与决策问题时,采用系统仿真的已经超过80%。英国制造业也普遍采用系统仿真方法解决物料控制、人力配置、调度评估、投资策略及均衡生产等问题。据国外应用统计,运用系统仿真优化系统设计规划可减少投资约30%,在库存控制方面可减少库存约15%。

第三节 系统仿真的特点

系统仿真技术是模型(物理的、数学的或非数学的)的建立、验证和试验运行技术。

现代仿真技术的特点可归纳为以下几点:

(1) 系统仿真技术是一门通用的支撑性技术。在决策者们面对一些重大的、棘手的问题时,能以其他方法无法替代的特殊功能,为其提供关键性的见解和创新的观点。

(2) 系统仿真技术学科的发展具有相对的独立性,同时又与声、光、机、电,特别是信息等众多专业技术领域的发展互为促进。因此,系统仿真技术具有学科面广、综合性强、应用领域宽、无破坏性、可重复、安全、经济、可控以及不受气候条件和场地空间的限制等独特优点,这是其他技术无法比拟的。

(3) 系统仿真技术的发展与应用紧密相关。需求牵引应用、系统带技术、技术促系

统、系统服务于应用，这是一个辩证的关系，应用需求是推动系统仿真技术发展的原动力。系统仿真技术应用效益不但与其技术水平的高低有关，还与应用领域的发展密切相关。大量实例表明，系统仿真技术的有效应用必须依托于先进的仿真系统，只有服务于应用的仿真系统向前发展了，才能带动系统仿真技术的发展。

(4) 系统仿真技术应用正向“全系统”、“系统全生命周期”、“系统全方位管理”发展，这些都基于仿真技术的发展。

第四节 物流系统仿真和技术

仿真本质上是一种知识处理的过程，典型的系统仿真过程包括系统模型建立、仿真模型建立、仿真程序设计、仿真试验和数据分析处理等，它涉及多学科、多领域的知识与经验。随着现代信息技术的高速发展以及军用和民用领域对仿真技术的迫切需求，系统仿真技术也得到了飞速的发展。

系统仿真技术发展到今天，已经越来越多地集成到对重要运作的决策中。系统仿真技术在汽车、烟草、医药、化工、军事配送、机械、第三方物流、食品、电子、电器等各个行业取得了广泛的应用，其应用贯穿于产品设计、生产过程、销售配送，直至产品寿命结束废弃以及回收阶段，离散事件系统仿真在各行各业的物流管理技术和手段中已取得了不可替代的地位。

早期的物流系统仿真主要通过建立数学模型进行处理，即一般仿真技术中的数学仿真。因此，物流系统的数学仿真一般过程与物流系统模型的建立类似。

现代流通与生产过程则更加注重整体的效益。物流作为一个多因素、多目标的复杂系统，追求其整体的优化是一个复杂的系统分析问题。现代物流越来越多地强调物流的系统化和综合化，现代物流与传统物流的本质区别逐渐显现出来。正是由于现代物流的这一特点，尤其需要运用系统分析的方法对其进行分析研究。

传统的经验分析和人工调度已不能适应复杂系统和现代管理的要求。过去，一个企业有十几辆、几十辆车，负责产成品的运输。车辆的调度完全依靠管理人员、调度人员的已有经验。今后，企业物流逐步走向社会化，企业要降低成本，缩短供货期，对物流提出了更高的要求，不仅仅是满足车辆的调配，更需要合理选择运输路线、合理配载、返程货物搭载等。随着市场不断变化的生产和供货，需要管理人员动态调整计划，人工的、经验式的管理必须用科学的控制管理方式替代。系统仿真正是适应了物流系统的复杂化和物流目标的多样化的发展需要。

用系统仿真方法研究物流系统可以分为以下几类：

(1) 物流过程的仿真研究。物流过程是指运输、仓储、装卸、包装等物流的功能过程。研究目的归结为回答诸如：在时间的进程中，这些过程是如何进行推进的？推进过程中发生了哪些事件？这些事件引起系统状态发生了哪些状态变化？等等。用仿真工具研究这类物流的问题，我们归结为物流过程的仿真研究。例如，通过公路运输系统过程的仿真研究，可以分析运输过程中公共运输的规划与效率、交通事故的影响、迂回路线

的选择等问题。通过自动化物流过程仿真可以分析自动化物流系统设备布局的合理性、设备运行的效率、系统的生产率、系统中设备的利用率等。

(2) 物流管理的仿真研究。物流管理的仿真研究为物流管理的决策服务,如运输网络的布局规划、物流园区规划、供应链的控制策略等。

(3) 物流成本的仿真研究。物流成本的计算是一件极其细致、复杂的事情,传统的制造业中,往往将物流成本与供应或销售的成本混在一起计算,因此无法准确掌握物流的成本,也就无法根据物流成本的计算改进物流的流程和操作。

目前还很少有利用计算机仿真进行物流成本计算的案例。应该说在统计作业状态的同时,统计其成本的仿真是事半功倍的。

第五节 系统仿真的发展趋势

现代仿真技术的发展是与控制工程、系统工程和计算机技术的发展密切相关的。控制工程是仿真技术较早应用的领域之一,控制工程技术的发展为现代仿真技术的形成和发展奠定了良好的基础。系统工程的发展进一步完善了系统建模与仿真的理论体系,同时使系统仿真广泛应用于非工程系统的研究和预测。

目前,仿真技术正朝着一体化建模与仿真环境的方向稳步发展。

一、建模方法学 (Modeling Methodology)

在早期的仿真技术中,重点是如何利用数学模型求解问题,侧重于研究建模过程中数学模型的结构特征以及操作数学模型所利用的数学工具和手段。如今计算机功能越来越强大,仿真技术的领域有了很大的拓展。从建模方法学角度讲,除了继续研究人如何利用抽象的数学模型描述系统外,还要研究能够充分利用计算机功能的新的建模方法。例如,目前研究较多的面向对象的建模方法和图形建模技术都是利用计算机的软件技术方法提供一种直观可视化的建模环境,使复杂的建模过程简单化。

二、面向对象仿真 (Object-oriented Simulation)

面向对象的思想就是使所分析和研究系统的建模方式与对客观世界的认识过程尽可能一致。在面向对象的仿真中,系统被看成是由对象组成的,对象是一个独立的实体,对象的属性和属性的变化规律即对对象的操作完全封装在对象内部,外部的作用必须通过对象的操作接口来实现。面向对象的仿真系统的运行是通过对象之间相互发送消息来执行的。面向对象的仿真在理论上突破了传统仿真方法观念,使建模过程接近人的自然思维方式,所建立的模型具有内在的可扩充性和可重复性,有利于可视化建模仿真环境的建立,从而为大型复杂系统的仿真分析提供了方便的手段。

三、仿真软件

近40年来,仿真软件充分吸收了仿真方法学、计算机、网络或图像、多媒体、软件

工程、自动控制、人工智能等技术所取得的新成果，从而得到了很大的发展。

四、人工智能 (Artificial Intelligence) 与计算机仿真

近年来，人工智能在知识获取、知识表示、问题解答、定理证明、程序自动设计、自然语言理解、计算机视觉、机器人学、机器学习和专家系统等方面取得了令人鼓舞的成果和进展。人工智能技术与计算机仿真相结合的应用已经引起仿真领域的普遍关注。

五、虚拟现实技术 (Virtual Reality)

虚拟现实技术是在综合系统仿真技术、计算机图形技术、传感技术、现实技术等多种学科技术的基础上发展起来的。它以仿真的方式使人置身于一个虚拟世界中。3个“i”是虚拟现实的基本特征，即沉浸 (immersion)、交互 (interaction)、构思 (imagination)，我们可以沉浸在一个由计算机系统所创造的虚拟环境中，与虚拟环境发生交互作用，并得到与实际的物理参与联试所能获得的相同或相似的感受。进一步的研究包括分布式虚拟环境、虚拟环境建模、分布式可交互环境数据库、虚拟环境显示、虚拟测试、分布式多维人机交互及标准化等。

六、分布仿真技术

分布仿真技术是仿真技术的最新发展成果，它在最高体系结构 (High Level Architecture, HLA) 上，建立了一个广泛的应用领域内分布在不同地域上的各种仿真系统实现互操作和重用的框架及规范。分布仿真技术经历了 SIMULATION, DIS2. X 和 ALSP 各个阶段后，最近又提出了 HLA。HLA 的基本思想就是使用面向对象的方法，设计、开发及实现系统不同层次和粒度的对象模型，以获得仿真部件和仿真系统高层次上的互操作性与可重用性。进一步的研究包括仿真部件和仿真系统高层次上的互操作性与可重用性、系统总体结构和体系结构、标准和规范及协议、虚拟环境、支撑平台与工具、人的行为描述、实时决策与演练管理、仿真管理、安全管理、网络管理等。

七、Internet 网上仿真

1995 年以来，由于 Internet 的迅速崛起，利用面向对象的互联网程序语言 Java 已经开发了多种面向 WWW (World Wide Web) 的仿真系统，如美国海军研究院的 Simkit 可以在浏览器的支持下进行分布式仿真，用 Simkit 建立的仿真模型可以在世界任何地点的网络用户机上运行，使分布在各网点的用户仿真模型可在其他网点上运行或进行全球范围内总体仿真模型的分布式仿真运行。近年来，利用面向 WWW 的程序语言开发离散事件仿真系统、基于 WWW 的仿真建模以及互联网上的仿真运行已成为系统仿真中研究工作的热点。

随着仿真技术在物流领域应用的拓展，仿真技术的相关技术在物流领域也获得了进一步的发展。

第二章 系统仿真基本知识

系统仿真方法是指建立系统模型，在模型上对系统进行实验研究的方法。系统仿真的基础理论是系统理论、控制理论、相似理论、数据统计理论、信息处理理论、计算机技术等。

第一节 连续系统和离散事件系统

连续系统：服从于物理学定律（电学、力学、热学），其数学模型可表示为传统意义上的微分方程或差分方程。其系统的状态变量随时间而发生连续变化。多数工程系统属于连续系统，如电力系统、机电工程系统、航空发动机系统、液压系统等。

离散事件系统（DEDS/DES）：指系统的状态在一些离散时间点上由于某种时间的驱动而发生变化。其数学模型很难用数学方程来表示，其模型如下：

$$M = (T, U, X, Y, \Omega, \lambda) \quad (2-1)$$

其中， T 为时间基； U 为输入变量； X 为状态变量； Y 为输出变量； Ω 为状态转移函数； λ 为状态空间。

连续系统和离散事件系统的区别表现在以下几个方面：

（1）时间基：连续系统的时间基是一个确定的值。例如，研究一个液压系统，一般是在一个确定的时间间隔内对其液体压力、流量等进行实验研究。这个时间间隔的起始点是系统初始启动的时刻，而中止时刻可以选择系统达到稳态后的任何时刻。离散事件系统的时间基则是可变的，而且随着时间基的变化，仿真结果也各不相同，例如，仿真一个仓库时，时间基可以定为仓库开门的时刻至下班的时刻，也可以定为开门后一小时至下班的时刻。显然，这两种仿真，系统的初始状态不同，仿真的结果也不相同。这是因为离散事件系统仿真的结果是一个统计的结果，它与统计的区段有关。

（2）输入变量：连续系统的输入变量通常是一个确定性变量，而离散事件系统的变量往往带有随机性。因此，离散事件系统的模型也被称为随机类型。输出变量与输入变量情况相同。

（3）状态变量：连续系统的状态变量一般也是一个连续变量，而离散事件系统的状态变量则可能是非连续的，如仓库货位的状态是空或非空。

（4）状态转移函数：在连续系统中，存在一个状态转移函数，可通过其推出状态变量的变化过程。而离散事件系统则不存在状态转移函数，人们无法找到一个函数来表达状态变化的规律。

（5）状态空间：是状态变量的集合所表述的空间。对于一个研究的连续系统，引

进不同组合的状态变量，可以构造不同的状态空间模型。这一点离散事件系统是相同的。

连续系统仿真借助数字积分算法和离散相似算法等来求解表征系统变量之间关系的方程；离散事件系统仿真则是建立系统的概率模型，采用数值方法“执行”仿真模型。系统的变量是反映系统各部分相互作用的一些确定或者随机事件；系统模型则反映这些事件和状态的值集；仿真结果，也就是“执行”的结果是产生处理这些事件的时间历程。本书主要介绍离散事件系统仿真方法。

第二节 离散事件系统仿真方法

一、离散事件系统的基本要素

一个离散事件系统包括五个基本要素：实体、事件、属性、活动和进程。

1. 实体

在离散事件系统中的实体可分为两大类：临时实体和永久实体。在系统中只存在一段时间的实体称为临时实体，这类实体由系统外部到达系统，通过系统，最终离开系统。临时实体按一定规律不断地到达（产生），在永久实体的作用下通过系统，最后离开系统，整个系统呈现出动态过程。

2. 事件

描述离散事件系统的另一个重要概念是“事件”。事件就是引起系统状态发生变化的行为。从某种意义上说，这类系统是由事件来驱动的。在一个系统中，往往有许多类事件，而事件的发生一般与某一类实体相关联，某一类事件的发生还可能会引起其他的事件的发生，或者是另一类事件发生的条件等。为了实现对系统中的事件进行管理，仿真模型中必须建立事件表，表中记录每一个发生了的或将要发生的事件类型和发生时间，以及与该事件相连的实体的有关属性等。

3. 属性

实体所有的特性称为实体的属性。这里需要强调的是实体可能具有若干特征，但是并不是所有的特征都被称为仿真系统的实体属性。只有那些与系统仿真相关的特征，才称为属性。例如，存入仓库的物品具有大小、形状、颜色、重量等固有的几何和物理特征，同时它们在作为出入库存放对象时，又具有到达时间间隔、到达批量等动态特征。显然在对库存系统进行仿真时，我们所关心的是后面所列举的特征。因此，在库存系统仿真时，后者被称为物品实体的属性，图形属性和被创建属性。

4. 活动

离散事件系统中的活动，通常用于表示两个可以区分的时间之间的过程，它标志着系统状态的转移。

5. 进程

进程由若干个有序事件及若干有序活动组成，一个进程描述了它所包括的事件及活

动之间的相互逻辑关系及时序关系。

事件、活动、进程三个概念之间的关系如图 2-1 所示。事件是发生在某一时刻的行为，活动和进程则是发生在某个时间段的过程。

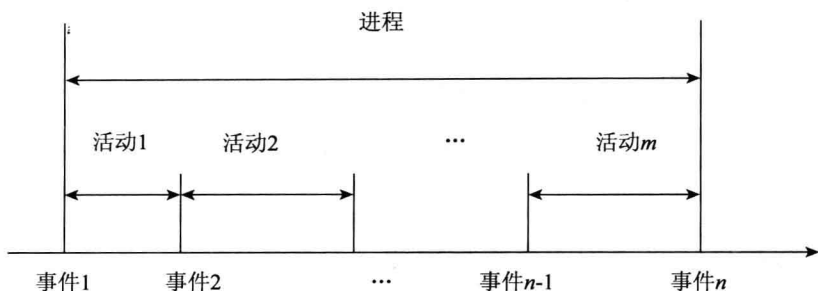


图 2-1 事件、活动与进程的关系

二、仿真钟

仿真钟用于表示仿真时间的变化，离散事件动态系统的状态是在离散时间点上发生变化的，并且由于引起状态变化的事件发生时间的随机性，所以仿真钟的推进步长也是随机的：如果两个相邻发生的事件之间系统状态不发生任何变化，则仿真钟可以跨过这些“不活动”周期。从一个事件发生时刻推进到下一个事件发生时刻，仿真钟的推进呈现跳跃性，推进速度也具有随机性。可见，仿真模型中时间控制部件是必不可少的，以便按照一定规律来控制仿真钟的推进。

仿真钟的推进有两种经典的方法：固定步长推进法和变步长推进法（或称为下一事件推进法），通常变步长推进法应用较多。

1. 固定步长推进法

确定一个固定的增量，以此增量逐步推进仿真钟。每推进一个增量，就在被推进的时刻观察有无事件发生。如没有事件发生，则继续以相同的增量推进仿真钟；如果有事件发生，则根据事件类型进入事件处理程序，对事件发生后的状态变化进行相应处理，然后再推进仿真钟。

如果恰好在推进的增量中间时刻有事件发生，一般采取简化的方法，把该事件假定为是在增量推进的时刻发生的。

2. 变步长推进法

变步长推进法即事先没有确定时钟推进步长，而是根据随机事件的发生而进行随机步长的推进，推进的步长为最后已发生事件与下一事件之间的时间间隔。图 2-2 解释了变步长推进机制的含义，由于离散事件系统的状态多数是随时间离散变化的，在仿真时不需要考虑那些没有发生状态变化的时段。因此，这种变步长的推进方法，其节奏性与系统状态变化更加吻合。

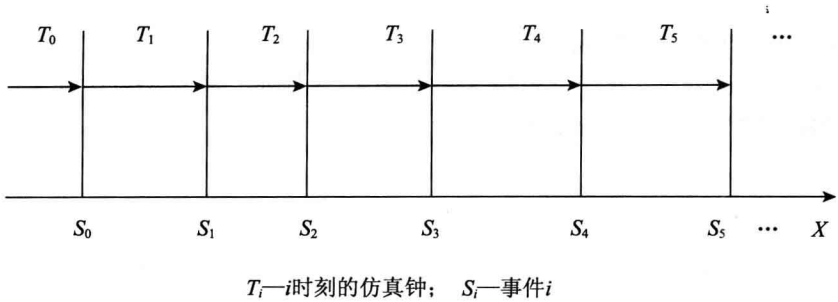


图 2-2 仿真钟的变步长推进法

三、离散事件仿真模型的组成与构造

对于大多数采用变步长时钟推进机制（见图 2-3）的离散事件系统仿真模型，通常都包含如下组成部分：

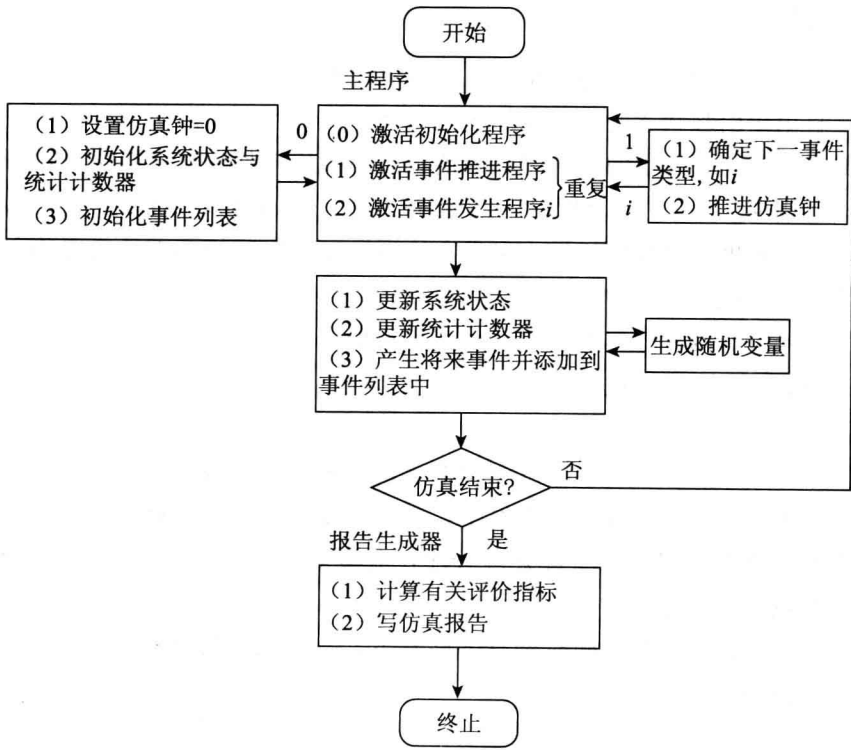


图 2-3 变步长时间推进法的控制流

- (1) 系统状态：某特定时刻，用来描述系统的一组必要的状态变量。
- (2) 仿真钟：提供当前仿真时刻的变量。
- (3) 事件列表：列出当前或下一时刻将要发生的各种类型事件。
- (4) 统计计数器：一组用来记录系统运行的统计信息变量。