

离散事件动态系统 性能评估与仿真

周江华 苗育红 著



科学出版社

离散事件动态系统性能评估与仿真

周江华 苗育红 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从随机变量的生成、样本路径的抽样和估计器的构造三个层面着手探讨了离散事件动态系统(DEDS)性能评估与灵敏度估计中的高效率仿真问题。在第一个层面,对随机数发生器的构造、随机变量的计算机生成技术进行了系统的归纳和整理,重点讨论了取中分布和剩余分布等非传统随机变量的高效率抽样问题。在后两个层面,建立了离散事件动态系统广义半 Markov 过程(GSMP)的一般描述,并在 GSMP 描述的框架内研究并给出了 DEDS 仿真的三种不同实现:“经典事件调度法”“极小分布抽样法”和“嵌入泊松流法”。

图书在版编目(CIP)数据

离散事件动态系统性能评估与仿真 / 周江华, 苗育红著. —北京: 科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-049836-6

I. ①离… II. ①周… ②苗… III. ①离散-动态系统 IV. ①O158

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 212388 号

责任编辑: 胡庆家 赵彦超 / 责任校对: 钟 洋

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 10 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2016 年 10 月第一次印刷 印张: 10 1/4

字数: 210 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

离散事件动态系统(Discrete Event Dynamics Systmes, DEDS)的性能评估和仿真研究是一个具有挑战性的课题。从定量分析和评估的角度看,离散事件动态系统研究中的一个根本困难在于目前还没有简单且易于求解的数学模型。到目前为止,计算机仿真仍是 DEDS 性能分析、评估和优化的主要手段,很多时候甚至是唯一可行的手段。然而 DEDS 仿真从根本上说是一种随机试验的方法,为了获得系统性能测度的准确估计,通常需要进行大量次数的仿真。提高仿真算法的效率,是应用中需要解决的一个重要问题。近年来,随着科技的进步以及仿真技术在 DEDS 性能评估中的广泛应用,一些新问题的出现了,如灵敏度估计问题、基于仿真的优化问题、小概率事件系统仿真等,对传统的仿真方法构成了严重的挑战,解决这些问题需要在高效率仿真算法上取得突破。

基于对随机 DEDS 仿真过程的分析,本书主要从三个层面着手研究提高仿真效率的方法:其一,提高随机变量的生成效率;其二,设计高效率的样本路径的抽样机制,以加快获取样本性能测度;其三,引入减小方差技术,构造方差小的高效率估计器。其中,第二、三个层面是研究的重点。

在随机数发生器层面,本书对近年来陆续出现的随机变量生成算法进行了系统的筛选,介绍了这方面的一些最新成果。此外,针对近年来出现的可靠性应用中的剩余寿命估计问题,设计了高效率的剩余分布抽样算法,解决了可靠性评估中的剩余分布抽样的难题。

在提高样本路径的高效率抽样层面,本书在广义半 Markov 框架下,导出了样本路径抽样的三种通用实现方法,并在此基础上创造性地提出了 Markov-DEDS 高效率仿真的 NON-CLOCK(NC)方法。NC 方法打破了 DEDS 仿真中以仿真钟的推进机制为核心的传统思路,完全舍弃了仿真钟。该方法极大地简化了仿真程序,且数据处理方便,适用于任意稳态或暂态性能测度的估计,并通过结合条件期望减小方差的技巧提高了仿真精度。和目前公认最优秀的标准钟(SC)方法相比,NC 方法的仿真效率和精度均要优于 SC 方法。

在高效率估计器构造层面,本书系统研究了 NC 仿真框架下的重要抽样方法,设计了重要抽样下的三种估计器。通过引入变概率测度的动态变参数方案,较好地解决了将一些已证明有效的启发式方法纳入 NC-重要抽样框架的问题,并根据 NC-重要抽样仿真的特点对原有方法进行了改进,提出了一些新的公式,从而比

较完整地提供了面向实际评估问题的 NC-重要抽样仿真框架。

本书在估计器构造层面的另一个贡献是设计了 Markov-DEDS 参数灵敏度估计的一致、通用、高效估计器。由于参数灵敏度估计问题的复杂性，一致、通用、高效率的仿真算法是迄今为止仍未解决的难题。书中给出的 SPA-LR 方法及三种实用的减小灵敏度估计方差技术，在广泛应用的 Markov 模型上，较好地解决了这一问题。

本书在高效率仿真方法上实现了两个主要突破：其一，提出了 Markov-DEDS 高效率仿真的 NC 方法，并给出了 NC 方法和重要抽样方法相结合的技术解决方案，在很大程度上提高了这类系统的评估效率；其二，给出了基于 NC 方法的 Markov-DEDS 参数灵敏度估计的一致、高效、通用估计算法，解决了目前方法应用面窄、收敛效率低的问题。这两个突破对解决应用中的实际问题具有重要的理论意义和实用价值。

本书的内容组织基本上围绕提高仿真效率的三个层面来展开。第 1 章对 DEDS 的研究现状和研究手段作了简要介绍。在第 2 章，对近年来陆续出现的随机数发生器进行了系统的筛选，介绍了若干性能优异、计算效率高的长周期发生器，还介绍了随机变量生成技术的一些新成果，并给出了可靠性评估中的剩余寿命抽样难题的解决方案。

第 3 章和第 4 章重点讨论样本路径的高效率抽样问题。第 3 章在广义半 Markov 框架下，导出了样本路径抽样的三种实现方法，在此基础上进一步给出了 Markov-DEDS 样本路径的高效率抽样算法。第 4 章详细阐述 Markov-DEDS 仿真的 NON-CLOCK(NC)方法。给出了不同仿真终止条件下 Z 序列的抽样以及估计器的构造，并给出了 NC 方法的应用及其与标准钟方法的比较。

第 5 章和第 6 章属于估计器构造层面的问题。其中，第 5 章重点讨论了 NC 仿真框架下的重要抽样方法的实现、估计器的构造及其在小概率事件系统仿真中的应用。第 6 章讨论了 Markov-DEDS 的参数灵敏度估计问题，设计了参数灵敏度的一致、通用 SPA-LR 估计器，并给出了提高估计效率的减小方差技巧。

第 7 章主要研究了仿真精度分析和评定问题，建立了若干种基于不同思路的仿真精度评定框架，如针对独立样本的经典置信区间精度分析框架、Jackknife 精度分析框架和 Bootstrap 精度分析框架，针对相关子样的批均值和重叠批均值法精度分析框架。

在每一章的具体论述上，书中大致按照“模型和算法”→“仿真算例和算法检验”→“应用举例”的模式展开。其中“仿真算例和算法检验”主要利用一些存在解析解的评估问题，如 $M/M/1$ ， $M/M/1/K$ 系统的评估问题对书中的仿真算法的适用性进行检验；“应用举例”中的评估问题主要以作者在科研中遇到的具体问题为研究对象。

本书可供相关专业大学研究生作为教材使用，也可供工程技术人员参考。

作者在编写此书时花费了大量精力，然限于水平，疏漏与不足之处难免，殷切希望读者批评指正。

作 者

2016年7月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 离散事件动态系统的研究对象	1
1.2 计算机仿真在 DEDS 研究中的地位和作用	2
1.3 高效率仿真在 DEDS 性能评估中的价值	4
1.4 DEDS 的研究现状和研究手段	7
1.4.1 提高仿真效率的主要手段	7
1.4.2 灵敏度估计的高效率仿真	9
第 2 章 随机变量的高效率抽样技术	12
2.1 $U(0,1)$ 均匀分布随机数发生器	13
2.1.1 基本构造形式	13
2.1.2 组合式随机数发生器	15
2.1.3 随机数发生器的检验	17
2.2 随机变量的精确抽样技术	18
2.2.1 反变换法	18
2.2.2 取舍法	19
2.2.3 函数变换法	20
2.2.4 组合法	20
2.2.5 比值法	21
2.2.6 概率密度函数凹变换法	22
2.3 取中分布随机变量抽样算法	24
2.3.1 反变换法	24
2.3.2 简单取舍法	24
2.3.3 继承取舍抽样法	24
2.4 剩余分布抽样的高效率算法	25
2.4.1 剩余分布的数学描述	25
2.4.2 当前常用的剩余分布抽样方法	26
2.4.3 继承取舍抽样法	27
2.4.4 极限分布抽样法	28

2.4.5	函数变换法	30
2.4.6	应用举例	31
2.5	本章小结	32
第 3 章	随机 DEDS 仿真的三种实现	34
3.1	DEDS 的五元组描述	35
3.2	经典事件调度法	36
3.3	极小分布抽样法	37
3.3.1	方法的数学描述	37
3.3.2	Markov 系统的高效率仿真	40
3.3.3	并发构造样本路径的归一时钟序列法	41
3.4	嵌入泊松流法	42
3.4.1	方法的数学描述	42
3.4.2	Markov 型 DEDS 仿真的标准钟方法	43
3.5	应用举例	44
3.6	本章小结	47
第 4 章	Markov 型 DEDS 性能评估的 NON-CLOCK 方法	48
4.1	DEDS 性能评估问题的一般描述	49
4.2	DEDS 仿真时样本路径的终止方式	50
4.3	NON-CLOCK 方法	51
4.3.1	构造 Z 序列的基本仿真流程	51
4.3.2	不同仿真类型下 Z 序列的构造	53
4.3.3	性能测度的估计	54
4.3.4	稳态性能测度的估计	56
4.4	算法适用性检验	58
4.4.1	$M/M/1/K$ 系统平均首次溢出时间的估计	59
4.4.2	$M/M/1/K$ 瞬时溢出概率的估计	59
4.4.3	$M/M/1/K$ 系统 $[0, T]$ 时间内平均队长的估计	60
4.4.4	$M/M/1/K$ 系统稳态平均队长	61
4.5	NC 方法的扩展	62
4.5.1	并发构造多参数集下的样本路径	62
4.5.2	系统可靠度估计的 I 型仿真方案	62
4.5.3	II 型仿真的另一种估计器	64
4.5.4	提高 Z 序列“均匀化实现”效率的技巧	65
4.6	应用举例	66
4.6.1	最优贮备问题	66

4.6.2	k -out-of- n (F)C 系统的可靠性评估	67
4.6.3	电力系统安全性评估	68
4.7	本章小结	73
第 5 章	小概率事件系统仿真的 NC-重要抽样方法	74
5.1	小概率事件仿真难题	75
5.2	重要抽样方法原理	76
5.3	NC-重要抽样仿真框架	77
5.3.1	Z 序列似然函数计算	78
5.3.2	改变 Z 序列概率测度的动态变参数法	79
5.3.3	NC-重要抽样方法的仿真流程	81
5.4	NC-重要抽样的三种估计器	82
5.4.1	经典估计器	82
5.4.2	比值估计器	82
5.4.3	控制变量估计器	83
5.5	稳态性能测度估计的重要抽样方法	84
5.6	NC-重要抽样方法在高可靠性仿真中的应用	85
5.6.1	加速失效重要抽样方案	85
5.6.2	系统平均首次失效时间(MTTF)的估计	87
5.6.3	系统稳态可用度估计	88
5.6.4	平均开工时间的估计(MTBF)	88
5.6.5	系统可靠度估计	88
5.7	仿真实验	95
5.7.1	$M/M/1/K$ 队列溢出概率评估	96
5.7.2	$M/M/1/K$ 队列平均首次失效时间评估	97
5.7.3	$M/M/1/K$ 队列瞬时可靠度估计	97
5.8	应用举例	99
5.9	本章小结	101
第 6 章	Markov-DEDS 参数灵敏度估计	102
6.1	DEDS 参数灵敏度估计的一般描述	102
6.2	NC 框架下性能评估问题简要回顾	103
6.3	参数灵敏度的 SPA-LR 估计器	104
6.4	稳态性能测度的灵敏度估计	107
6.5	高阶导数的估计	108
6.6	灵敏度估计算法检验	110
6.6.1	$M/M/1/K$ 队列平均崩溃时间的参数灵敏度估计	110

6.6.2	$M/M/1/K$ 队列瞬时溢出概率的参数灵敏度估计	112
6.6.3	$M/M/1/K$ 系统 $[0, T]$ 时间内平均队长的灵敏度估计	113
6.6.4	$M/M/1/K$ 队列稳态平均队长的参数灵敏度估计	113
6.6.5	$M/M/1$ 队列稳态平均队长的高阶参数灵敏度估计	114
6.7	提高灵敏度估计效率的方法	116
6.7.1	SPA-LR 估计器的收敛特征分析	116
6.7.2	通过缩短 Z 序列的长度提高估计效率	117
6.7.3	减小灵敏度估计方差的控制变量法	120
6.7.4	减小灵敏度估计方差的重要抽样方法	123
6.8	应用举例	125
6.9	本章小结	126
第 7 章	仿真精度分析	128
7.1	子样独立时的仿真精度分析	129
7.1.1	经典统计学方法	129
7.1.2	经典方法的贯序实现方案	133
7.1.3	Jackknife 方法	134
7.1.4	Bootstrap 方法	135
7.2	子样相关时的仿真精度分析	136
7.2.1	批平均值法	137
7.2.2	一致批均值法	140
7.2.3	一致批均值法的动态实现	141
7.2.4	重叠批平均值法	142
7.3	本章小结	143
参考文献		145
索引		153

第 1 章 绪 论

1.1 离散事件动态系统的研究对象

离散事件系统是指系统中的状态只在离散时间点上发生变化,而且这些离散时间点一般是不确定的.离散事件系统的系统状态是离散变化的,而引发状态变化的事件是随机发生的,因此这类系统的模型很难用数学方程来描述.

离散事件动态系统(Discrete Event Dynamics Systmes, DEDS)指系统的动态行为为受离散事件驱动,并由离散事件按照一定的运行规则相互作用,来导致系统状态演化的一类动态系统.这类系统的状态一般不随时间做连续变化,而是受离散时间点发生的事件(通常是随机发生的)驱动,呈现跳跃性的变化^[1-6].离散事件动态系统的称谓首先由著名的控制论专家、哈佛大学何毓琦教授在 1980 年前后引入,但对这类系统的研究最早可以追溯到对排队论的研究和人造系统可靠性的研究.以今天的观点来看,排队论、系统可靠性分析、网络分析、运筹学和调度排序等方法所研究的对象,许多都可以归入 DEDS 的范畴.

“状态”和“事件”是 DEDS 中两个基本的概念^[1-7].DEDS 中的“事件”,通俗的说就是引起系统状态发生改变的外部行为.DEDS 中“状态”为反映系统内部实体分布状况的离散数字量,如排队系统中各队列排队等候的顾客数目.由于 DEDS 早期源于对人造系统(如制造系统)的管理、控制、资源的调度及分配的研究,因而以下名词在 DEDS 研究中经常出现:作业(Job)、资源(Resource)、调度(Scheduling).此外,根据 DEDS 应用领域的不同,会相应引入一些新的概念.

离散事件动态系统研究的热潮始于 20 世纪 80 年代,由于计算机技术、信息处理技术和机器人技术的快速发展和广泛应用,在通讯、制造、交通管理、军事指挥等领域相继出现了一批反映技术发展方向的人造系统,典型的例子如柔性制造系统、计算机网络、通讯网络、机场交通管理系统、军事指挥中的 C³I 系统等.在这类系统中,对系统的行为起决定作用的是一些发生在离散时间点的事件,而不是连续变量,所遵循的通常是一些复杂的人为制定的规则,而不是物理学定律.正是基于对这类系统逻辑行为和性能评估的需要,推动着离散事件动态系统理论的形成和发展.总之,近年来 DEDS 之所以受到人们的充分重视,并被认

为是系统与控制论领域的一个前沿方向, 一个重要的原因是一大批高技术发展的需要和推动的结果. 根据所关心的问题的不同, 目前关于 DEDS 的研究, 大致可分为三类^[1,7-13]:

(1) 逻辑层次的研究, 主要分析方法有形式语言、有限状态自动机模型和 Petri 网方法;

(2) 代数层次的研究, 主要分析方法包括极大极小代数法和有限递推过程;

(3) 随机性能层次的研究, 主要分析方法包括排队网络模型、扰动分析法、广义半 Markov(GSMP)模型和计算机仿真方法. 从面向应用的角度看, 随机性能层次的研究是生产实践中需要解决的关键问题.

其中, 随机性能层次的研究, 也即性能评估问题是书中研究的重点.

1.2 计算机仿真在 DEDS 研究中的地位和作用

与连续变量动态系统相比, DEDS 研究中的一个根本性的难题在于目前还没有简单且易于求解的数学模型. 从定量分析、计算的角度看, 正如 DEDS 创始人何毓琦教授在论文 *Dynamics of discrete event systems*^[8]中指出的: 用纯数学模型和方法研究 DEDS 存在以下几个方面的困难:

(1) 离散事件的不连续本质. DEDS 的状态有着固有的离散性. 采用连续近似的手段, 在某些特定的情况下, 虽然有可能对系统作出成功的分析, 但无论如何也不可能避开问题的离散实质.

(2) 大多数性能测度的连续本质. 尽管 DEDS 的本质是离散的, 但反映系统性能测度的绝大多数参数, 都是根据连续变量来定义的, 如排队系统中的平均队长、等待时间, 库存系统中的收益、存货, 系统可靠性研究中的可靠度函数、平均首次失效时间等. 另外, 系统演化中的“时间”也是一个连续变量.

(3) 概率化的基本性. 在 DEDS 的不少背景系统中, 均存在一些不确定因素, 因此在性能评估中必须考虑随机因素的影响.

(4) 动力学特性的不可避免性. 在对系统进行性能评估时, 除了稳态性能测度, 很多时候需要关心系统的瞬态性能测度, 这一点在系统可靠性评估中表现的尤为明显. 目前在 DEDS 的性能分析中, 一些分析工具如排队网络, 在稳态假设下, 有时能得到一些易于计算的结果, 但对暂态性能测度往往无能为力.

(5) 计算的可行性. 对大多数的 DEDS, 系统的状态变量的数目, 都存在一个组合爆炸问题. 按照目前的建模分析方法, 哪怕是对一些中小规模的系统, 状态

变量的数目也可能达到天文数字,即便理论上能罗列出所有的状态组合,用解析方法计算也需要求解一个方程数目庞大的常微分方程组,内存占用和计算时间即使是现今最快的计算机也无能为力。

由于上述原因,到目前为止,计算机仿真仍是 DEDS 定量分析、评估和优化的主要手段,很多时候甚至是唯一可行的手段。仿真是一种面向过程并建立在随机试验基础上的研究方法。该方法以计算机和仿真程序为工具,通过模拟系统的演化过程,在此基础上得到系统的样本性能测度的多个观察值,并最终由统计推断获得系统性能测度的估计。和纯数学方法相比,仿真方法具有一些固有的优点。首先,所研究系统(模型)内部的逻辑关系、约束和规则可以任意的复杂;其次,仿真方法仅需对系统(模型)作少量的抽象和假设;再次,仿真模型是一种面向过程的描述模型,这种描述可以是数学描述、图形描述甚至语言描述,它与所研究系统的动态演化过程具有形式上和逻辑上的对应性,避免了建立抽象数学模型的困难,显著简化了建模过程,易于被研究人员掌握;最后一点,也是至关重要的一点是,仿真方法从根本上避免了离散状态组合爆炸的问题,原则上可以适用于任意规模的系统。

图 1-1 给出了随机 DEDS 仿真的一般过程。主要包括三个部分:首先是对系统进行一定的抽象,建立面向过程的描述模型并抽象出反映系统动态性的基本概率模型,如排队系统中顾客到达时间和服务时间的分布、可靠性仿真中各单元的寿命分布;其次是将描述模型转化为易于用计算机描述的数据结构,并根据所评估的问题构建相应的估计器;最后是编写仿真程序,获取系统的样本性能测度,由统计学方法求出系统性能测度的估计及其置信区间,并对仿真精度进行分析。

随着 DEDS 仿真应用面的扩展以及和其他学科的交叉,DEDS 仿真实理论与方法本身也逐渐形成了一些专门的研究热点问题。例如,DEDS 仿真机制的研究、仿真输入/输出数据的统计分析、面向对象和智能仿真系统的研究、高效率仿真算法研究、仿真优化理论、并行和分布式仿真系统的研究、可视化和虚拟现实仿真研究等。本书主要着眼于 DEDS 性能评估和灵敏度估计中的高效率仿真算法研究。

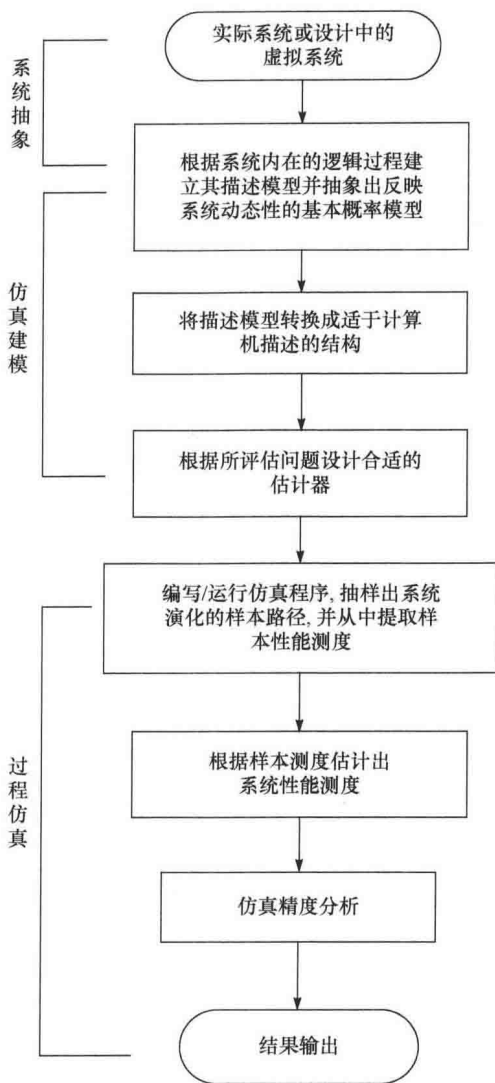


图 1-1 随机离散事件动态系统仿真的一般过程

1.3 高效率仿真在 DEDS 性能评估中的价值

对实际或设计系统进行性能评估和分析是 DEDS 应用中需要解决的关键问题。由于 DEDS 系统的复杂性, 仿真是解决这类问题的主要手段, 然而 DEDS 仿真从根本上说是一种随机试验的方法, 为了获得系统性能测度的准确估计, 通常需要进行大量次数的仿真以获取足够多的样本性能测度观察值。以均值估计器为例,

记所估计的系统性能测度为 μ ，样本性能测度为 x ，满足 $E[x] = \mu$ ，并假定 $Var[x] = \sigma^2$ ，设 N 次仿真得到的样本性能测度为 $x_1, x_2, \dots, x_N$ 。以样本均值 $\bar{x}_N = \sum_{i=1}^N x_i / N$ 作为 μ 的估计，由大数定理知，当 $N \rightarrow \infty$ 时， $\bar{x}_N$ 依概率收敛于 μ 。对给定的 N ，估计量的相对误差(变异系数)为

$$R_e = \frac{\sqrt{Var(\bar{x}_N)}}{E[\bar{x}_N]} = \frac{\sigma}{\mu\sqrt{N}} \approx \frac{S_N}{\bar{x}_N\sqrt{N}} \quad (1-1)$$

其中 S_N 为样本标准差。

从(1-1)式可看出，Monte Carlo 方法的估计精度按仿真次数 N 的平方根收敛，即 $o(1/\sqrt{N})$ 。对给定的估计器，要使估计精度的有效数字提高 1 位，仿真工作量必须增加 100 倍。对一些复杂的评估问题，如果估计器构造得不合适， σ/μ 比较大，那么按这样的收敛速度达到可信的评估精度，即使是性能卓越的计算机也可能无法承受。而且即便是计算时间能够忍受，也还存在其他方面的约束，例如，目前仿真所采用的随机数发生器都存在一个周期限制，通常当仿真所用的随机数的个数接近发生器的周期时，会对评估结果产生严重的歪曲^[2-5]。

由于上述原因，高效率仿真算法长期以来一直是研究人员关注的一个热点问题，在每年的 *Winter Simulation Conference*, *Operation Research*, *Management Science*, *ACM Trans. On Modeling & Computer Simulation*, *IEEE Trans. on Auto. Control*, *IEEE Trans. on Communication System*, *IEEE Trans. on Reliability* 等著名期刊上均有大量的文献讨论与此相关的问题。近年来，随着仿真技术在 DEDS 性能评估中的广泛应用，一些新问题的出现引起了研究人员对高效率仿真的极大兴趣。这些问题对传统的仿真方法构成了严重的挑战，并且随着社会的发展和科技的进步，它们逐步成为相关研究人员今后不得不大量面对的问题，解决这些问题需要在高效率仿真算法上取得突破。这些问题包括：

- 系统性能测度参数灵敏度估计

系统性能测度参数灵敏度估计在系统的设计、优化和反映系统结构特征方面具有极为重要的价值。随着 DEDS 理论和仿真技术的形成和不断发展，自 20 世纪 80 年代后期以来，系统性能测度参数灵敏度估计成为性能评估问题中的一个新的研究热点，但参数灵敏度的一致、通用、高效估计算法至今仍未得到彻底解决。

用仿真方法进行参数灵敏度估计的一个根本困难，在于传统的差分法估计灵敏度的效率非常低。所谓差分法是指对系统参数进行扰动，分别求出系统在名义样本路径和扰动样本路径下的性能测度，然后通过差分估计系统测度对该参数的偏导数。华裔学者曹希仁^[121]已证明：如果扰动样本路径和名义样本路径采用公共随机数流，当且仅当 $N \cdot \Delta\theta \rightarrow \infty$ 时，差分方法才可能得到灵敏度的精确估计，如

果不采用公共随机数流则需要 $N \cdot (\Delta\theta)^2 \rightarrow \infty$. 此外, 当 θ 为向量时, 对每个分量都要重复上述差分步骤, 工作量十分巨大.

正由于上述原因, 高效率的参数灵敏度估计算法受到了极大的关注, 自 20 世纪 80 年代以来先后提出了以扰动分析(PA)和似然比(LR)方法为代表的一系列方法, 这些方法的共同特征是根据对系统的先验知识直接从样本路径中提取有用的信息用于参数灵敏度估计而不实际构造扰动样本路径, 从而避免了差分法仿真效率低下的问题. 到目前为止, 参数灵敏度估计虽然已取得了一些重要的进展^[108-120], 但与一致、通用、高效的标准相比还有相当的距离.

• 基于仿真的优化问题

基于仿真的优化问题是 DEDS 性能评估问题的自然扩展, 也是 DEDS 仿真的一个重要的应用层面. 由于缺乏连续变量系统那种优雅的数学结构, 求解 DEDS 优化问题非常困难. 其中根本性的困难在于, 用仿真方法评估给定参数节点上的性能测度和灵敏度信息工作量已经不小, 要在此基础上求解优化问题, 仿真工作量往往非常巨大. 目前仿真优化方法主要有直接搜索法、有限方案选优法、响应曲面法和随机逼近法^[2,5]. 对于某些特殊的优化问题, 已提出了一些有效的方法可显著降低仿真工作量. 例如, 对于从若干个设计方案中挑选最优或足够优的方案, 利用序优化方法可以从很大程度上降低仿真工作量^[14,15]. 但是所有这些方法, 仍然是建立在给定参数节点上的性能测度或灵敏度估计的基础上. 因此要想提高仿真优化的效率, 除了在仿真优化思想和方法上寻找新突破外, 提高单个节点的评估效率依然是解决问题的关键.

• 小概率事件系统仿真

小概率事件系统仿真是 20 世纪 90 年代中后期兴起的一个新的研究热点^[77-106]. 所谓小概率事件系统仿真是指所评估的系统测度与某个发生概率很小的目标事件有关. 小概率事件系统仿真的研究, 与航天技术、核工程、通讯以及电力系统等技术领域中对设备极高的技术要求有直接的关系. 例如, 航天工程和核工程中的许多部件或分系统的不可靠度要求小于 10^{-6} , 新一代 ATM 交换机的信元丢失概率约为 $10^{-9} - 10^{-6}$. 这一类设备(系统)具有小概率、高风险并存的特点, 虽然可靠性很高, 然而一旦失效就可能造成严重的后果, 因此对这类的准确评估具有十分重要的价值. 然而对于这一类的评估问题, 理论上已经证明当目标事件出现的概率趋于 0 时, 为了获得可靠的评估结果, 常规仿真的次数将趋于无穷, 即使是最快的计算机也难以承受^[77,83,86,93]. 此外, 常规仿真方法评估小概率事件系统还存在一个随机数发生器的周期约束问题, 当仿真所需要的随机数目超出或接近发生器的周期时, 会对评估结果造成严重的歪曲.

1.4 DEDS 的研究现状和研究手段

1.4.1 提高仿真效率的主要手段

如图 1-2 所示,对随机 DEDS 仿真,提高仿真效率目前主要从三个层次着手.其一,提高随机变量的生成效率.随机变量的计算机生成技术是随机系统仿真的基础.随机数产生的效率提高了,仿真的效率自然也就相应提高.这种做法的适用性强,但仿真效率的提高极为有限.其二,提高样本路径的抽样效率,以加快样本性能测度的产生速度,从而提高整个仿真的效率,这种做法的仿真效率优于第一种方法,适用性也较强,但实现起来难度较大.其三,构造方差小的估计器.(1-1)式表明,当 σ 较小时,同样的仿真次数下可以得到更高的估计精度.构造小方差估计器常用的手段是引入方差衰减技术.围绕上述三个层面,图 1-3 给出了当前提高仿真效率的主要手段.



图 1-2 提高仿真效率的主要层面

(1) 采用高性能的随机数发生器和随机变量生成技术^[19-46]. 近年来陆续出现了若干种优秀的 $U(0,1)$ 均匀分布随机数发生器,例如, L'Ecuyer 提出的组合式 MRG 发生器^[22,23]、组合式 Tausworthe 发生器^[24], Marsaglia 等^[26]提出的 MWC 随机数发生器, Matsumoto 等^[31,32]提出的 Twisted GFSR 发生器都可轻易达到 10^{50} 以上的周期,并具有很好的统计性能和较高的生成效率.在随机变量生成技术上近年来也提出了一些新的思路,如 Devroye, Gilks, Hormann 等提出的概率密度函数凹变换法^[37-45].

(2) 采用并行和分布式仿真技术^[16-18]. 由于随机系统的性能评估就建立在大量、重复仿真的基础上,很适合采用并行和分布式仿真技术.然而,这种手段本质上属于硬(蛮力)仿真的范畴,在仿真方法上和单机仿真方法并无根本上的不同.