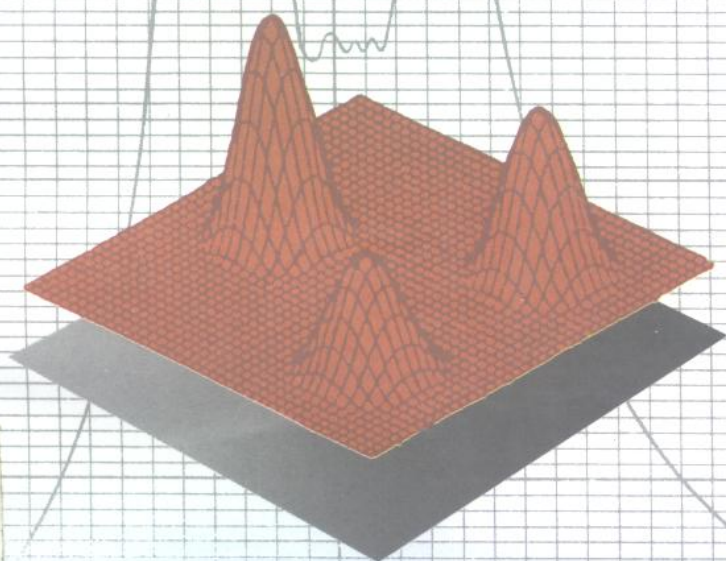


科学与工程计算丛书

离散事件动态系统的 监控方法

LISANSHIJIAN DONGTAIXITONG
DE JIANKONG FANGFA



徐国华 胡奇英 著
河南科学技术出版社

SECS

科学与工程计算丛书

离散事件动态系统的监控方法

徐国华 胡奇英 著

河南科学技术出版社

科学与工程计算丛书
离散事件动态系统的监控方法

徐国华 胡奇英 著

责任编辑 赵中胜

河南科学技术出版社出版发行

(郑州市农业路73号)

国防科技大学银河印刷厂印刷

850×1168毫米 32开本 8.125印张 189千字

1996年1月第1版 1996年1月第1次印刷

印数:1—1000册

ISBN 7—5349—1791—3/G·455

定价:8.10元

《科学与工程计算丛书》编辑委员会

名誉主编：冯康

名誉编委：(按姓氏笔划为序)

于敏	王仁	冯康	石钟慈	庄逢甘	曲钦岳
朱家骅	李德元	何祚庥	陈能宽	谷超豪	况蕙孙
郑哲敏	周毓麟	秦元勋	黄祖洽	曾庆存	符鸿源
程开甲	裴鹿成				

编委：(按姓氏笔划为序)

于万瑞	王宗皓	王政贤	王宝瑞	王肖钧	冯士管
孙文心	厉衡隆	石中岳	卢秀球	付德薰	付泽周
纪立人	纪楚群	刘林	刘儒勋	向新民	朱允伦
李荫藩	李作新	吴江航	吴乃龙	吴辉碇	吴其芬
杜书华	杨清建	宋国乡	邱希春	陈健华	何延才
何锦昌	汪翼云	金时懋	郑邦民	周树荃	范新亚
宓国柱	罗吉庭	张立存	张志杰	张若棋	张锁春
胡乃雄	姚凯伦	浣石	顾昌鑫	倪浩清	徐国华
常文蔚	常谦顺	赖定文	蒋伯诚	董绍静	鲍家駁

常务编委：(按姓氏笔划为序)

孙文心	刘儒勋	吴江航	何延才	金时懋	徐国华
蒋伯诚					

执行主编：蒋伯诚

编辑部成员：蒋伯诚 张锁春 张立存 张志杰 周春生
杜慧娟 陈吉斌

代 序

为促进我国科学与工程计算事业的发展,1988年7月,中国核学会计算物理学会在青岛举办了全国计算物理学术研讨会.会议期间,经有关专家商议,决定出版一套《科学与工程计算丛书》,得到了许多著名科学家的热情关心和支持.经过两年多的筹备,正式开始了这套丛书的编辑出版工作.

计算机是一种延伸、强化人的思维的工具.当世界上第一台计算机 ENIAC 诞生时,冯·诺伊曼就预言这一新工具所拥有的巨大潜力和对人类社会的深远影响.在过去的 40 多年里,计算机迅猛发展,其应用范围从国防尖端部门扩大到科学技术和国民经济建设的各个领域,计算机已经给人类社会带来了一场深刻的技术革命,计算机的发展和计算方法的进步极大地提高了人们的计算能力,从而引起了科学方法论上的巨大变革,使计算成为科学研究的第三手段,对研究的定量化起到了特殊重要的作用.“实验、理论、计算”三位一体是现代科学研究的基本模式,三者既相对独立,又互相补充,互相依赖.人们在计算机上可充分利用数值计算来模拟现实世界的各种过程,部分替代实验或作为实验的补充,检验理论模型的正确性,尤其是还能呈现现实生活中无法重复或无法进行实验的现象,或模拟耗资巨大的实验工程,探索新的奥秘.由于有了计算这一强有力的手段,大大增强了人们科学研究的能力,促进了不同学科之间的交叉渗透,缩短了基础研究到应用开发的过程,加速了把科学技术转化为生产力的进程.

在计算机的发展和数值计算的广泛应用的推动下，科学与工程计算（简称科学计算）作为一门工具性、方法性和边缘交叉性的新学科，已经开始了自己的发展。它既包含了在各种科学与工程领域中逐步发展起来的计算性学科分支，如计算数学、计算物理、计算力学、计算化学以及计算地震学等计算工程学，又包括经济科学、医学、生物学和系统科学等发展中所需要的计算理论。计算方法则是它们联系的纽带和共性的基础。科学计算就其本质而言，是要解决现代科学与工程中提出的大规模、非线性、非均匀和几何形状非规则的复杂问题，是数学理论和计算艺术的高度结合，是复杂系统的数值计算或模拟。计算机的性能与算法水平的乘积是衡量计算能力高低的指标。

我国在科学与工程计算领域已有了一支较高水平的、能打硬仗的队伍。这支队伍在我国计算机水平相对落后的条件下，以其智力优势和拼搏精神为我国的国防建设和经济建设作出了重大贡献，积累了丰富的实践经验，急需加以总结、提高、推广和交流。编写《科学与工程计算丛书》，正是为了适应这种形势的需要，它的出版将会填补我国这方面的空缺。

这套丛书是采用“众人拾柴火焰高”的集资方式创办的，由于丛书的涉及面极广，故不设主编，由常务编委轮流担任执行主编。丛书作者都是奋战在教学和科研第一线的专家学者，他们为发展我国的科技事业不辞劳苦，呕心沥血，无私奉献。谨向他们表示崇高的敬意。

可以期望，《科学与工程计算丛书》的出版发行，必将有力地推动我国科学计算事业的发展。

《科学与工程计算丛书》编委会

1990年8月

前 言

离散事件动态系统是在 20 世纪 70 年代末 80 年代初才被系统地提出和研究的, 尽管这种系统已经广泛存在于诸如自动化生产线、多级生产—存贮系统、计算机—通信网络、交通系统等众多领域之中。目前, 描述离散事件动态系统的模型及其分析、控制方法已有多种, 监控方法是其中的一种基于自动机和形式语言理论的逻辑层次上的控制方法。这种方法产生于 80 年代初, 可用于离散事件动态系统的逻辑控制。它一产生就引起了国内外众多学者的注目并成为离散事件动态系统中的一个热门研究领域, 现已形成了一个较为完整的理论体系, 为本书的完成提供了必要的条件。

本书比较全面、系统地阐述了监控方法中的基本概念、基本理论和基本方法。它首先介绍了离散事件动态系统理论的概貌, 其次介绍了离散事件动态系统的自动机表示; 在此基础上, 向读者详细阐述了监控方法中的事件反馈控制、状态反馈控制和受控 Petri 网等并发系统的控制, 将其中的控制综合问题表示成泛函极值问题, 力求向读者展示监控中最基本、最重要的理论和方法, 以及在制造系统、计算机通信等领域中的应用。本书每章均有文献注释, 其中按作者的观点指出了一些值得注意的研究方向, 并附有比较详细的参考文献。

本书适合于自动控制、系统工程、管理、机械制造、计算机

通信、应用数学等专业的教师、研究生和高年级本科生阅读，并可作为有关领域科技人员的参考书。

由于时间和水平有限，关于书中的错误和缺点，欢迎读者指正。

本书是电子科学预研基金资助项目的部分研究内容，谨此表示衷心感谢。

作 者

1994 年于西安电子科技大学

目 录

第一章 引论	(1)
1.1 离散事件动态系统的提出	(1)
1.2 离散事件动态系统中的模型和方法	(3)
1.3 离散事件动态系统的特点	(8)
1.4 本书内容简介	(10)
文献注释	(11)
参考文献	(11)
第二章 系统的自动机表示	(13)
2.1 未受控系统的自动机表示	(13)
2.2 受控系统的自动机表示	(19)
2.3 监控器	(21)
文献注释	(27)
参考文献	(27)
第三章 事件反馈控制的基本方法	(29)
3.1 可控语言	(29)
3.2 监控器综合问题	(36)
3.3 最大可控子语言的计算	(41)
3.3.1 一般算法	(41)
3.3.2 简化算法	(47)
3.4 监控器的缩减方法	(50)
3.4.1 监控器的投影	(50)
3.4.2 商结构定理	(56)

3.5	模监控综合	(67)
3.6	应用	(72)
	文献注释	(75)
	参考文献	(77)
第四章	复杂系统的事件反馈控制方法	(79)
4.1	部分可观察系统的监控	(79)
4.1.1	M-监控器	(79)
4.1.2	可控性和 M-可观察语言	(82)
4.1.3	M-监控综合问题	(90)
4.2	局部监控	(96)
4.3	分散监控	(102)
4.3.1	分散监控器	(103)
4.3.2	分散监控综合	(106)
4.3.3	协调器	(110)
4.4	序列行为约束的监控	(111)
4.4.1	ω -语言及其自动机表示	(112)
4.4.2	ω -语言监控综合问题	(116)
4.5	应用	(119)
	文献注释	(131)
	参考文献	(132)
第五章	状态反馈控制方法	(137)
5.1	控制器	(137)
5.2	谓词	(141)
5.2.1	谓词和谓词变换	(141)
5.2.2	控制不变谓词	(145)
5.2.3	可控谓词	(150)

5.3 系统的控制综合	(153)
5.3.1 控制综合问题	(153)
5.3.2 最大可控子谓词的计算	(157)
5.3.3 模控制综合	(160)
5.3.4 应用	(164)
5.4 系统稳定性	(167)
5.4.1 几个概念	(167)
5.4.2 强吸引	(170)
5.4.3 弱吸引	(173)
5.4.4 $\sup WA_G(P)$ 的计算	(176)
5.5 部分可观察系统的控制	(178)
5.5.1 部分可观察系统的定义	(178)
5.5.2 可观察谓词	(181)
5.5.3 应用	(187)
文献注释	(190)
参考文献	(191)
第六章 两类控制方法间的关系	(195)
6.1 谓词与语言的相互转换	(195)
6.2 最大可控的子谓词与子语言间的关系	(199)
6.3 监控综合问题与控制综合问题间的关系	(202)
文献注释	(208)
参考文献	(208)
第七章 并发系统的状态反馈控制方法	(210)
7.1 Petri 网简介	(210)
7.2 受控 Petri 网	(216)
7.3 受控并发系统的控制综合	(221)

7.3.1 受控并发系统的模型	(222)
7.3.2 两类特殊的受控并发系统	(225)
7.3.3 最大控制方案的唯一性	(227)
7.4 ULW 系统的控制综合	(232)
7.4.1 弱交互的简化计算	(233)
7.4.2 良好的并发结构	(237)
7.4.3 控制综合问题	(238)
7.5 模控制综合	(239)
7.6 应用	(243)
文献注释	(245)
参考文献	(246)

第一章 引论

1.1 离散事件动态系统的提出

几个世纪以来,动态系统一直是指随时间连续变化的、满足一些物理原理(如关于运动、守恒等定律)的系统(常称之为连续变量动态系统, Continuous variable dynamic system, 简称为 CVDS). 微分(差分)方程在其研究中已经取得了高度的成功. 但在另一方面,现代科学技术创造出了越来越复杂的(人造)系统,如自动化生产线、计算机通信网络、交通系统、军事 C'I 系统等等. 这些系统经常是难以用微分(差分)方程来描述的,它们是由一些互相之间有着复杂交互作用的事件驱动的,系统的状态仅在一些离散时刻点上由于事件的发生而变化. 事件的典型例子如顾客的到达、离去、一项任务的完成、信息包的发射等等. 这样的人造系统我们称之为离散事件动态系统 (Discrete event dynamic system, 简称为 DEDS).

比较一下 DEDS 和 CVDS 的状态规迹对我们理解 DEDS 会有所帮助. CVDS 的状态是连续变化的,状态取值于实 n 维空间 R^n 或 R^n 的一个连续子集,而且一般地它是由连续的输入驱动的. 图 1.1 是 CVDS 的一个规迹,它是一个微分方程的解. 另一方面, DEDS 的规迹是分段为常数的、是由事件驱动的. 图 1.2 中所示的是一个 DEDS 的典型规迹,图中是用一个简单的排队系统来说

明的. 系统可能的状态集是离散的, 每一次状态转移都是由事件 (α, β 等) 的发生引起, 事件 (如顾客的到达、离去) 的全体也组成一个离散集.

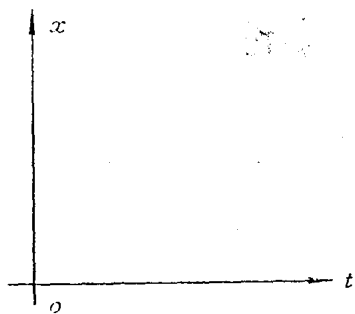


图 1.1 CVDS 规迹

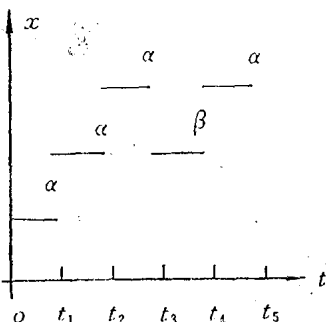


图 1.2 DEDS 规迹

系统的状态序列由规迹中分段为常数的部分组成, 每一常数部分的长度表示在这个状态处的逗留时间, 状态取值于一个离散集 (有限或可数), 而一般地, 逗留时间的取值是连续的. 我们可用关于状态和逗留时间的这两个序列来描述系统的规迹. 按先后次序排列, 状态规迹可用序列 $(q_0, q_1, q_2, \dots)$ 表示. 若以 t_i 表示到达状态 q_i 的时间, 则 $t_1 < t_2 < \dots$, 而状态和时间这两个序列可用二元序列 $((q_0, 0), (q_1, t_1), \dots)$ 统一表示. 由于系统的状态变化是由事件驱动的, 所以也可以用事件序列 $(e_1, e_2, \dots)$ (按发生的先后次序) 来描述系统, 加上时间后则是二元序列 $((e_1, t_1), (e_2, t_2), \dots)$, 这儿 t_i 表示事件 e_i 发生的时间. 当然, 选择何种方式来描述系统有赖于所研究系统的具体情况. 一种情况是局限于考虑一些与时间无关的“逻辑的”或“定性的”问题, 如状态可达性、无死锁等; 另一种情况是必须将时间纳入考虑范围的“定量的”问题, 如在 DEDS 的性能分析和优化中.

DEDS 的系统提出和研究是近十余年的事。从原理上说, DEDS 属于运筹学 (Operations Research) 的范畴, 尽管翻开任何一本运筹学的书都会发现运筹学仅仅是由一些方法组成的: 线性规划、非线性规划、动态规划、决策分析、排队论、马氏决策规划等。但运筹学的定义本身是说“运筹学是关于人造系统中事件和运行的一门科学”。而 DEDS 是由“运行规则”确定的人造系统。因此, 从这个意义上说, DEDS 只是运筹学的一个分支。然而, DEDS 发展至今已从控制论和系统论中吸取了许多有益的养分, 诸如时间响应、频率响应、能控性、能观性等等概念均已在 DEDS 的研究中起到了重要的作用。实际上, DEDS 是一门多学科的交叉领域。

1.2 离散事件动态系统中的模型和方法

在 DEDS 中已有的模型有:

1. Petri 网;
2. 自动机 (Automaton);
3. 通信顺序进程 (Communication sequential processes) 和有限递归过程 (Finitely recursive processes);
4. 极大代数 (Min-max algebra);
5. 马氏过程 (Markov processes)、随机点过程 (Stochastic point processes)、广义半马氏过程 (Generalized semi-Markov processes, 简记为 GSMP) 和模拟 (Simulation);
6. 排队网络 (Queueing network)。

这些模型可分为逻辑类和性能类两大类, 而逻辑类模型又可分为计时逻辑类模型和不计时逻辑类模型。在上述模型中, Petri

网中的计时 Petri 网和不计时 Petri 网以及自动机、通信顺序进程、有限递推过程、极大代数等都是逻辑类模型；而随机 Petri 网、马氏过程、随机点过程、广义半马氏过程、模拟、排队网络等则是性能类模型。性能类模型也称为随机模型。

不计时逻辑类模型是完全忽略时间因素而只考虑其中事件或状态出现的有序性的一类模型。在这类模型中，DEDS 的规迹用一个事件序列表示（如图 1.1 中的 DEDS 规迹为事件序列 $\alpha\alpha\alpha\beta\alpha$ ）或者用一个状态序列表示（图 1.1 中 DEDS 规迹的状态序列为 $s_1s_2s_3s_2s_3$ ）。逻辑模型中不考虑时间因素使得它们只能用于研究与时间无关的一些性质，如定性的或逻辑的一些问题，它们已成功地应用于诸如：并发程序语义学（Concurrent program semantics）、通信协议（Communication protocols）、运行系统的同步性（Synchronization of operating systems）、数字电路的逻辑分析、数据库管理以及 DEDS 的监控等。在这些应用中，模型的建立和分析大致以如下的方式进行。首先，求出容许的事件（或状态）规迹集，亦即系统物理上可能发生的行为集（记为 L ）。一般地， L 是所有可能的规迹集的一个子集，它可采用某种状态转移结构（如自动机、Petri 网、有限递推过程等）来求得。然后，判定各容许事件序列是否具有所要求的性质。经常需要考虑的性质有：稳定性、资源的合理使用、事件序列的正确性、所期望的动态性（如死锁/活性）以及为达到预定目的而进行的子系统间的协调等等。在受控制的 DEDS 中，则是判定通过控制能否使系统的容许事件规迹具有所要求的性质。

计时逻辑类模型在考虑逻辑问题的同时也考虑时间因素，这儿的时间是确定性的。计时逻辑模型与逻辑模型很相似。在建模时，首先用计时 Petri 网等建模方法求出 DEDS 的容许规迹集。此

时的规迹包括事件(或状态)和时间两部分,即形如 $((e_1, t_1), (e_2, t_2), \dots)$ 或 $((q_0, 0), (q_1, t_1), \dots)$ 的规迹. 计时逻辑类模型侧重于考虑计时因素下 DEDS 运行特性的研究,已应用于信号处理、制造系统、实时控制结构的规范说明等.

性能类模型本质上不同于逻辑类模型,也不同于计时逻辑类模型. 这类模型对容许的规迹集并没有多大兴趣,其主要研究对象是定义在状态规迹集上称之为性能(Performance)的一类测度,利用测度来确定所研究变量的分布和矩. 性能类模型已成功地应用于如下领域中的定量的和定性的问题:计算机/通信网络、一般排队网络、随机排序、制造系统、生产/库存系统等等. 从其本身含义上来说,性能类模型优于逻辑类模型,但其主要缺点是计算复杂性问题,在建立模型之后为求得解析解所需的计算量太大. 对于某些问题,即使知道了某些定性性质(如 Jackson 网络中已知解具有闭形式时),要求出其解也并非易事.

从考虑问题的详细程度来说,我们可将三类模型看成是分别描述系统的三个不同层次的,从低层到高层依次为不计时逻辑类、计时逻辑类、性能类.

如上对 DEDS 中的常见模型作了分类,但模型的分类并不是唯一的,也不是绝对的. 如也可以将 DEDS 分为计时类和不计时类. 也有人将极大代数和有限递推过程等统称为代数类模型. 另外,低层次上的模型也在逐步的推广到高层次上去,如 Petri 网在产生时是纯粹逻辑的,但由于需要研究包括时间因素在内的一些问题,现今也已产生了确定性计时 Petri 网(属于计时逻辑类)和随机 Petri 网(属于性能类). 自动机中也已产生了计时自动机和概率自动机.

DEDS 中的方法可分为建模、分析和控制等三类. 对于每一种