



面向21世纪课程教材

信息技术丛书



郑大钟 赵千川

离散事件 动态系统



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

面向 21 世纪课程教材
高等学校电子信息类规划教材
信息技术丛书

离散事件动态系统

郑大钟 赵千川

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

离散事件动态系统(DEDS)是以高技术为背景的一类人造系统,典型例子如柔性生产或装配线、计算机通信网络、空中或机场交通管理系统、军事上的C³I系统等。本书以基础性和实用性为原则,对DEDS的性能层次、代数层次、逻辑层次的主要建模和分析方法,作了系统的和重点的介绍。这些方法包括排队网络方法、摄动分析方法、极大代数方法、佩特里网方法以及自动机/形式语言方法等。论述的内容涉及系统模型、系统特性和性能分析、系统控制以及系统性能优化等。此外,还专门开辟章节,对作为应用专题的制造系统的调度问题,以及DEDS的新生长点的混合动态系统(HDS),作了系统性的介绍。

本书内容丰富,论述简明,重点突出,编写力求符合理工科学生的认识规律。本书可作为理工科高年级大学生和研究生的教材,也可供科技工作者和工程技术人员作为继续学习和更新知识的参考书。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

离散事件动态系统/郑大钟,赵千川. —北京:清华大学出版社,2000

(信息技术丛书/李衍达,郑大钟主编)

高等学校电子信息类规划教材

ISBN 7-302-03965-8

I. 离… II. ①郑… ②赵… III. 动态系统-高等学校-教材 IV. N94

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第35146号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者:北京昌平环球印刷厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:31.75 字数:728千字

版 次:2001年1月第1版 2001年1月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-03965-8/TP·2321

印 数:0001~4000

定 价:39.00元

《信息技术丛书》

出版说明

人们称当今的时代为信息时代。信息科学技术的快速发展和广泛渗透已经成为现今社会的一个重要的时代特征。人类社会的生产活动和生活质量,比以往任何时代,都更加得益和依赖于信息技术的成就和发展。自动化是信息技术领域的主要组成部分之一,包括信号和信息处理、模式识别、知识工程、控制理论、自动化技术、传感技术、自动化仪表、系统工程、机器人控制、计算机控制与应用、网络技术等在內,都和信息科学与技术有着直接和密切的关系,几乎涉及到了信息的检测、分析、处理、控制和应用等所有的方面。正是基于当今时代特点和科技发展态势这个大视野,结合自动化类专业人才培养模式及教学内容体系的改革,我们规划和组织了这套丛书的编写和出版。这套丛书的读者,定位于自动控制、过程自动化、计算机、电子工程、电气工程、动力工程和机械自动化等系科的高年级大学生和研究生,以及工作在这些领域和部门的科学工作者和工程技术人员。

十年前,我们曾经组编和出版过一套《信息、控制与系统》系列教材,产生了比较大的社会影响,其中的许多著作至今仍然为国内很多高等学校用作教材,并被广大相关的科技人员作为进修和自学读物。现在组编和出版的这套《信息技术丛书》,从一定意义上可以说,就是先前的那套系列教材的发展和延伸,以反映新的进展和适应新的需求,匹配于变化了的时代和发展了的科技。列入这套丛书中的著作,大多是清华大学自动化系等开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有在多年教学经验基础上新编的教材,也有原系列教材中的部分教材的修订版本。总体上,这套丛书仍将保持原系列教材的求新与求实的风格,力求反映所属学科的基本理论和新近进展,力求做到科学性和教学性的统一,力求体现清华大学近年来在相应学科和领域中科学研究与教学改革的成果。

我们希望这套丛书,既能为在校大学生和研究生学习提供内容较新和论述较为系统的教材,也能为广大科技人员的继续学习与知识更新提供适合的和有价值的参考书。我们同时热忱欢迎,选用这套丛书的老师、学生和科技工作者指出批评和建议。

《信息技术丛书》编委会

1999年10月

《信息技术丛书》编委会

主 编 李衍达 郑大钟

编 委 金以慧 边肇祺
 陈禹六 杨家本
 周东华 蔡鸿程

责任编辑 蔡鸿程 王一玲

前 言

传统的系统与控制理论,主要限于研究属于物理世界或广义物理世界范畴的连续变量动态系统,简称为 CVDS(continuous variable dynamic systems)。本书所要研究的离散事件动态系统,是在当今世界一大批高新技术发展的推动下形成和发展起来的,本质上属于人造系统的范畴,简称为 DEDS(discrete event dynamic systems)。人造系统是指以高技术为背景的一类按人为机制和人为规则所构成的“非物理型”系统,其典型例子如柔性生产或装配线、计算机通信网络、空中或机场交通管理系统、军事上的 C³I 系统等。DEDS 和 CVDS,不管是在运行机制和系统模型上,还是在分析方法和控制手段上,都有着明显和重要的区别。现今,对离散事件动态系统的研究,已经成为系统与控制理论领域中极富理论性和应用性的一个活跃和热门的分支。面对控制理论与技术发展的现实,作为培养既掌握先进控制理论与技术又能创造性地解决实际控制工程问题的高层次人才的控制教育,也正在适时地作出相应的反应和调整,扩展和充实其教学内容。现在,在美欧等发达国家的不少大学,离散事件动态系统也开始列入并作为重要的控制类课程之一。

本书以大学理工科为背景,系统而有重点地阐述离散事件动态系统的建模、分析、控制和综合的理论与方法。本书的安排采取了“模块式”和“层次化”的体系结构。全书的内容分为“建模和分析方法”与“专题”两个模块。前一模块覆盖 DEDS 理论和方法的三个基本层次,即“性能层次方法”、“代数层次方法”和“逻辑层次方法”;后一个模块涉及“离散制造系统的调度问题”和“混合动态系统”两个专题。本书的内容着重于 DEDS 中具有较大普适性和较强应用性的理论和方法,对排队网络方法、摄动分析方法、极大代数方法、佩特里网方法、自动机/形式语言方法、调度理论和算法、混合动态系统的控制和优化等作了各有侧重的介绍。在方法和内容的选择上,力求以基础性和应用性为原则,或者在理论上比较成熟和体系上比较系统,或者在工程上比较实用和学科上比较前沿,期望对离散事件动态系统领域研究的主流和结果提供一个较为清晰的全貌和框架。本书在论述上采取已为技术科学著作所接受的“问题—概念—分析—结论—注释”的方式,力求按照理工科学生的认识规律,以问题为出发点,把数学分析的严格性和结果阐述的直观性相结合,用尽可能少的篇幅按照少而精的原则来介绍离散事件动态系统的基本概念、基本方法和基本结论。本书所涉及的数学基础比较广泛,不同的建模与分析方法基于不同的数学工具,概括地说分别涉及到概率论、排队论、代数、图论、自动机/形式语言等方面的基本知识。针对理工科大学生的数学基础,本书在编写中尽可能结合问题的分析与求解,对相关的必要数学基础知识做了一些简要的补充。

本书的内容,既系统地总结了这一学科领域中已提出和建立的基本理论与方法,也有相当部分吸纳了作者所领导的课题组十多年来在离散事件动态系统和混合动态系统研究中所取得的不少结果。这些研究属于基础性研究的范畴,研究工作受到多项科研基金的支持,包括国家自然科学基金项目,国家自然科学基金重大项目子课题,863 计划 CIMS 主题课题项目,国家教育部博士点基金项目,以及攀登计划预研项目子课题等。因此,从这个意义上来

说,本书实质上也可以看作为一本学术性专著。

本书可作为理工科高年级本科生和研究生的教材,也可作为广大科技工作者和工程技术人员继续教育和扩展新知识领域的参考书。本书的编写,充分注意和照顾了不同层次教学和不同兴趣读者的需要。各章内容既有着内在的联系和相互的衔接,由此构成一个比较完整的整体;同时,大部分章节又是相对独立和自成体系的,可组成各自独立的知识体系。按照不同的学时和不同的授课对象,既可以采取顺序地学习全书的方式,也可以采取有选择地学习其中部分章节的方式。而且,也允许从实际情况和实际需要出发来改变某些章节的授课顺序,这样并不会影响教学上的连贯性。

本书被列入原电子工业部的1996—2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划,并被立项为清华大学985重点教材项目。由郑大钟负责制定全书的框架、体系和大纲,并由郑大钟和赵千川合作编写。其中,第1,4,5章和第2,3,6章的部分节的初稿由郑大钟执笔,第7,8,9章和第2,3,6章的部分节的初稿由赵千川执笔。全书由郑大钟修改、统稿和最后定稿,由赵千川绘图和校核。在本书的编写中,还直接得到了曾在作者指导下攻读博士学位的徐志斌博士和王凌博士的很多帮助。

最后,作者希望借此机会,向对我们的研究工作多次提供资助的国家自然科学基金委员会信息科学部、国家教育部和国家科技部的有关部门、863计划CIMS主题等,向对我们的研究工作长期给予过支持和帮助的学术界同行们,向原电子工业部的自动控制专业教学指导委员会,向曾经在我们科研组研究工作中作出过贡献的王龙教授、徐学雷博士、徐志斌博士、王凌博士等,向本书中所引用的众多结果的作者们,表达我们衷心的感谢。此外,我们还特别要对清华大学出版社总编辑蔡鸿程表示诚挚的感谢,感谢他长期以来包括在本书出版中所提供的重要帮助。

书中难免会有不妥和错误之处,殷切希望广大读者批评指正。

郑大钟 赵千川

2000年1月于清华大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 离散事件动态系统	1
离散事件动态系统的研究背景	1
离散事件	2
离散事件动态系统	2
离散事件动态系统示例	3
1.2 离散事件动态系统的建模和分析方法	5
DEDS 建模问题的基本性	5
DEDS 的建模和分析方法	6
DEDS 建模与分析中的困难因素	7
1.3 本书的论述范围	8
本书的体系结构	8
本书的基本内容	9
第 2 章 性能层次的建模与分析方法之一:排队网络方法	11
2.1 排队网络模型及其特性	11
排队网络	11
排队网络的特性	12
2.2 单一服务中心模型	12
单一服务中心模型的特性	12
M/M/1 系统的稳态性能分析	12
对 Little 公式的注记	15
M/M/c 系统的稳态性能分析	17
2.3 生灭过程模型	19
生灭过程	19
生灭过程稳态解的表达式	19
损失制 M/M/c/K 排队网络模型	21
服务速率依赖状态的 M/M/1 模型	22
2.4 Jackson 排队网络模型	23
Jackson 开环排队网络的特性	24
Jackson 开环排队网络的稳态分析	24
Jackson 闭环排队网络	31
Buzen 算法	32

2.5	排队网络的推广模型	33
	BCMP 排队网络	33
	Kelly 排队网络	34
2.6	基于排队网络模型的实用分析方法	40
	操作分析法的变量和假设	40
	操作分析法分析系统的性能	42
	平均值分析法	44
2.7	Fork-Join 排队网络	45
	Fork-Join 排队网络的背景和描述	46
	两个并联服务台 Fork-Join 系统	47
	M 个并联服务台 Fork-Join 系统	52
	具有集中缓冲器的批输入 Fork-Join 系统	55
2.8	排队网络方法在柔性制造系统研究中的应用	59
2.9	小结和评述	60
第 3 章	性能层次的建模与分析方法之二:摄动分析方法(PA)	62
3.1	PA 方法的基本模型和研究思路	62
	基本模型	62
	研究思路	63
	三个核心步骤	63
3.2	PA 方法的基本分析步骤之一:样本轨道的描述	64
	服务中心的三种工况状态	64
	事件和变量	64
	系统状态方程	65
3.3	PA 方法的基本分析步骤之二:摄动的产生	66
	由随机变量均值的摄动导出随机变量样本值的摄动	66
	摄动样本轨道的构造	67
	寻找 NP 和 PP 上的相应事件	68
3.4	PA 方法的基本分析步骤之三:摄动的传播	69
	无穷小摄动下摄动的传播	69
	有限摄动下摄动的传播	71
3.5	PA 方法的基本分析步骤之四:估计系统性能对参数的灵敏度	72
	排队网络输出率对平均服务时间的灵敏度	72
	服务中心输出率对系统内顾客数的灵敏度	74
	服务中心输出率对路径概率的灵敏度	74
	顾客在服务中心的平均逗留时间对平均服务时间的灵敏度	75
	服务中心平均队长对服务中心平均服务时间的灵敏度	76
3.6	PA 方法估计的无偏性和强一致性问题	76
	PA 基本方法存在的问题	77
	PA 方法用于灵敏度估计的无偏性条件	78

PA 方法用于灵敏度估计的强一致性条件	80
3.7 PA 方法的推广形式	81
推广摄动分析	82
平滑摄动分析	84
3.8 一类 Fork-Join 排队网络的摄动分析	85
一类无限缓冲 Fork-Join 排队系统的摄动分析	85
一类有限缓冲树型 Fork-Join 排队系统的摄动分析	90
3.9 PA 方法分析制造系统优化问题的应用举例	91
3.10 小结和评述	95
第 4 章 代数层次的建模与分析方法:极大代数方法	96
4.1 离散事件动态系统的代数层次模型	96
缓冲区容量无限的串行生产线	96
状态、输入和输出	97
系统的代数层次模型	98
4.2 离散事件动态系统在极大代数下的线性模型	99
极大代数及其基本运算	100
串行生产线的开环线性模型	101
串行生产线的闭环线性模型	103
4.3 离散事件动态系统在极大代数上的特征结构	105
有向图分析法	105
系统矩阵的不可简约性	108
不可简约矩阵在极大代数上的特征值	109
可简约矩阵在极大代数上的特征值	112
不可简约矩阵在极大代数上的特征向量	114
可简约矩阵在极大代数上的特征向量	115
矩阵的周期性	115
4.4 离散事件动态系统的稳定性和周期性稳态	116
系统输出的演化过程	117
系统输出演化过程的稳定性	119
不可简约系统的周期性稳态	119
可简约系统的周期性稳态	122
4.5 离散事件动态系统周期性稳态特征参量的配置	124
不可简约系统的周期性稳态特征参量配置	124
4.6 离散事件动态系统直接进入均匀周期性稳态的途径	125
均匀周期性稳态	125
直接进入均匀周期性稳态的途径:不可简约系统情况	126
直接进入均匀周期性稳态的途径:可简约系统情况	129
4.7 小结和评述	132

第 5 章 代数层次的建模与分析方法:对极大代数方法的进一步讨论	134
5.1 离散事件动态系统周期性稳态性能的摄动分析	134
问题提法和基本约定	134
基本极大代数运算下矩阵摄动量的估计	135
系统参数摄动下稳态参量 λ 改变值的估计	138
5.2 离散事件动态系统周期性稳态性能的鲁棒性	140
基本概念	140
单个参数摄动情形的鲁棒性分析	141
多个参数同时增性摄动情形的鲁棒性分析	144
5.3 离散事件动态系统特征结构参数的辨识	146
问题的提法	146
对系统特征值的估计	147
利用稳态数据辨识系统的特征值和特征向量	151
5.4 离散事件动态系统的能控性及其判据	153
系统模型	153
系统状态的能控性	154
系统状态能控性的判据	155
系统能控性在状态反馈作用下的不变性	158
不完全能控系统的结构分解	159
5.5 离散事件动态系统的集结与输入-输出等价	161
集结与输入-输出等价	162
极大代数上线性系统状态空间模型的集结与等价	162
几点讨论	167
5.6 有限缓冲容量串行生产线的建模和周期性稳态	168
有限缓冲容量的串行生产线	168
有限缓冲容量串行生产线的状态空间模型	168
有限缓冲容量串行生产线的闭环动态模型和稳态周期过程	174
5.7 有限缓冲容量串行生产线的阻塞问题	175
阻塞现象和无阻塞性定义	175
单批次加工过程的无阻塞条件	176
多批次加工过程的无阻塞条件	180
系统结构无阻塞性及其判别准则	184
缓冲区容量的最小配置	187
加工参数区间摄动下的系统无阻塞性	188
5.8 离散事件动态系统事件序列性的鲁棒性	189
基本概念	190
事件序列性鲁棒性的判据:仿射线性函数情形	191
事件序列性鲁棒性的判据:多项式函数情形	194
5.9 离散事件动态系统的传递函数	199

极大代数上的 Z 变换	199
极大代数上的传递函数	200
图方法确定系统传递函数矩阵	202
广义分式及其约简	205
5.10 基于传递函数的离散事件动态系统的稳态分析和控制	210
有理式的周期性	210
系统在周期输入下的稳态分析	213
稳态反馈控制	216
5.11 装配生产线的建模	221
装配生产线	221
装配生产线的变量和参量	221
装配生产线的状态空间模型	223
5.12 小结和评述	228
第 6 章 逻辑层次的建模与分析方法之一：佩特里网方法	230
6.1 佩特里网及其规则	230
佩特里网	230
佩特里网图	231
变迁的发射规则	232
6.2 佩特里网的动态运行过程	233
分析动态运行过程的算法	233
运行过程分析举例	234
6.3 佩特里网的基本性质	235
可达性	235
有界性和安全性	236
活性	236
死锁	237
冲突	237
6.4 佩特里网可达性的分析方法	237
可达树分析法	238
矩阵方程分析法	241
6.5 佩特里网可达性分析的计算复杂性问题	244
算法与问题复杂性	244
佩特里网可达性分析的计算复杂性问题	247
6.6 佩特里网的活性分析	247
状态机和子网	247
子网间的连接	248
模块	249
环	250
网的锁定性质	251

6.7	佩特里网的控制问题	252
	受控佩特里网和受控标识图	252
	受控标识图的禁止/允许状态规范控制:谓词方法	253
	受控标识图的控制策略的活性	257
	受控标识图的禁止/允许状态规范控制:代数方法	258
6.8	佩特里网的综合	268
	制造系统的佩特里网模型	269
	并联互斥连接	271
	串联互斥连接	273
6.9	扩展佩特里网	277
	赋时佩特里网	277
	随机佩特里网	277
	加色佩特里网	278
	高级佩特里网	278
6.10	佩特里网方法在离散制造系统研究中的应用	279
6.11	小结和评述	281
第7章	逻辑层次的建模与分析方法之二:自动机/形式语言方法	282
7.1	自动机和形式语言	282
	形式语言	282
	语言的运算	284
	正规集	287
	自动机	289
7.2	事件反馈监控	292
	受控自动机	292
	监控器	293
	闭环离散事件过程	294
	闭环离散事件过程 F/G_c 产生的语言	294
7.3	系统能控性和监控器的存在性	296
	能控性	296
	系统能控性和监控器	299
7.4	基本监控综合问题和最大能控子语言	301
	基本监控综合问题	302
	目标语言和最大能控子语言的一些属性	302
	语言集合上的右不变等价关系和正规语言判据	303
	最大能控语言的生成	305
	Ω 算子的算法	306
	最大能控语言的另一种算法	309
7.5	能观测性和观测约束下的监控器	309
	语言的能观测性	310

观测约束下的监控器	310
观测约束下的基本监控问题	312
可识别性	313
7.6 分散监控和分散化监控	314
分散监控	315
分散化监控	319
7.7 状态反馈监控	321
谓词及其运算	321
状态反馈	323
对状态反馈的闭环系统的分析	324
两类反馈监控问题的关系	330
7.8 其他形式的监控问题	331
允许阻塞的监控问题	331
赋时自动机的监控问题	333
7.9 事件反馈监控问题基于可达树的分析	335
符号串空间中自动机的可达树	335
监控作用的实现	338
7.10 小结与评述	339
第 8 章 离散制造系统的调度问题	341
8.1 生产调度问题的分类和描述	341
开环车间型和闭环车间型调度问题	341
Job-Shop 调度问题和 Flow-Shop 调度问题	342
调度问题的基本假定	342
调度问题的描述:图论形式	343
调度问题的描述:代数形式	344
调度问题的可行解	345
调度问题性能指标的典型形式	345
调度问题类型的简明表示法	348
调度问题的求解方法	348
8.2 正规性能指标的活动调度和等价关系	348
基于正规性能指标的活动调度	348
性能指标的等价性	351
8.3 单机调度	352
问题和基本假定	352
$n/1/\bar{F}$ 最优调度问题	353
$n/1/L_{\max}$ 最优调度问题	353
$n/1/n_T$ 最优调度问题	354
8.4 双机调度	357
双机调度问题的 Johnson 算法	357

多机 Flow-Shop 最优调度的属性	358
Johnson 算法调度解的最优性	359
Johnson 算法对一类三机 Flow-Shop 调度问题的应用	360
8.5 分支定界法	361
分支定界法的基本思路	362
分支定界法求解置换 Flow-Shop 调度问题	363
分支定界法求解 Job-Shop 调度问题	364
8.6 求解 Flow-Shop 排序问题的搜索型启发式算法	366
属于 NP 完全问题的调度问题示例	366
启发式算法之一:Palmer 方法	367
启发式算法之二:Gupta 方法	367
启发式算法之三:BG(Bonney-Gundry)方法	367
启发式算法之四:CDS(Campleu - Dudek - Smith)方法	368
启发式算法之五:Dannenbring 方法	368
8.7 规则型调度方法和典型调度规则	368
规则型调度方法的基本思路	368
静态调度问题和动态调度问题	369
调度规则及分类	369
典型的调度规则	370
8.8 邻域搜索方法	374
邻域搜索的基本思路	375
邻域结构	375
8.9 模拟退火优化方法	376
SA 算法的寻优机制	376
SA 算法的描述	377
基于非齐次马氏链模型的 SA 算法的收敛性分析	378
一个典型的 Job-Shop 调度问题	379
8.10 遗传算法的基本原理和基本框架	380
遗传算法的基本机理	380
遗传算法的基本框架	381
Job-Shop 调度问题的基因链编码方式	383
GA 的特点	384
对 GA 的改进	385
8.11 GA/SA 混合算法	386
GA/SA 混合算法的提出	386
一类 GA/SA 混合算法	386
GA/SA 混合算法的收敛性	388
8.12 图灵机和语言的 NP 完全问题	392
图灵机	393

	语言的 NP 完全性	394
8.13	调度问题的计算复杂性	394
	3-划分问题	395
	调度问题计算复杂性的一些基本结论	395
8.14	制造系统的非传统调度问题	396
	问题的背景	397
	E/T 调度问题	397
	批处理机调度问题	402
	多处理机任务调度问题	405
	考虑机器不可用情况的调度问题	406
8.15	小结和评述	407
第 9 章	混合动态系统	409
9.1	概述	409
	HDS 的工程背景	409
	HDS 的特点和分类	410
	HDS 的建模和分析方法	412
	HDS 的一个工程实例	413
9.2	“切换型”混合动态系统	414
	问题和模型	414
	稳定性	415
	能控性	417
	镇定问题	419
	几点注记	420
9.3	“水箱型”混合动态系统	421
	问题和模型	421
	稳定性	423
	稳定调度策略	424
	性能分析和估计	430
	几点注记	433
9.4	“集中控制型”混合动态系统	433
	问题和模型	434
	稳定性	435
	稳定调度策略	435
	EFS 策略的鲁棒性	442
	几点注记	444
9.5	“旅行商型”混合动态系统	444
	问题和模型	445
	旅行商型 HDS 的时间最短调度问题	446
	一个例子	451

9.6	递阶型和交互型混合动态系统	453
	递阶型 HDS	453
	时间划分产生的递阶型 HDS	454
	空间划分产生的递阶型 HDS	456
	一个例子	461
	对递阶型 HDS 的注记	462
	交互型 HDS	462
9.7	混合佩特里网	464
	混合佩特里网的形式化定义	464
	混合佩特里网的运行规则	465
	混合佩特里网的关联矩阵	467
	混合佩特里网的不变量	468
	混合佩特里网的状态	469
	混合佩特里网的结构性质	471
	几点注记	471
9.8	SIGNAL 语言	471
	SIGNAL 语言模型	472
	信号与时钟	472
	SIGNAL 语言的基本语句	473
	SIGNAL 语言中语句的编码	475
	SIGNAL 语言对 HDS 的建模举例	477
	几点注记	479
9.9	小结和评述	479
	参考文献	481