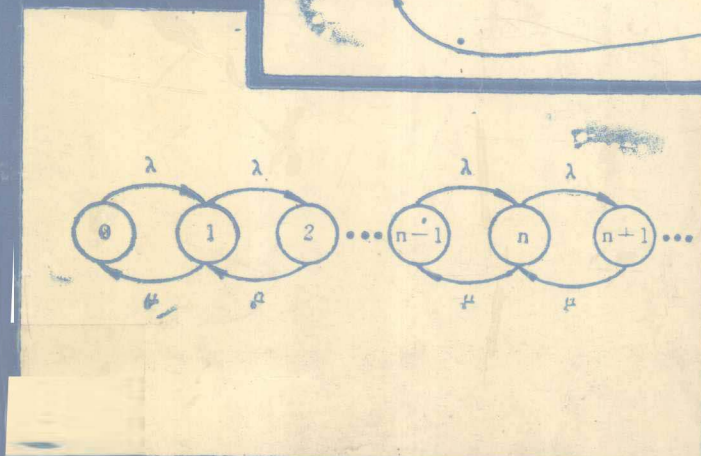
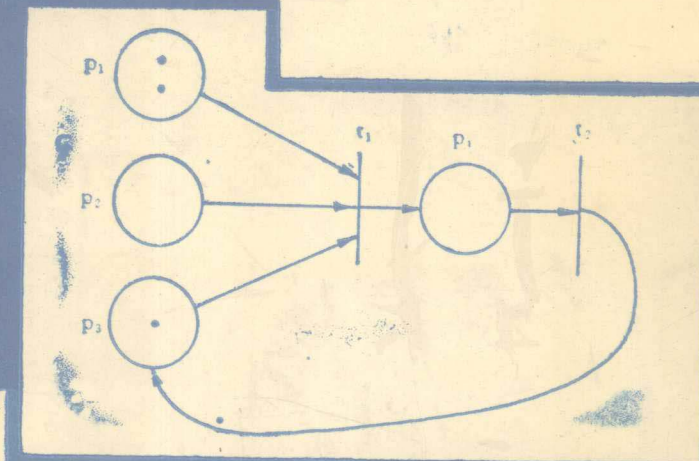
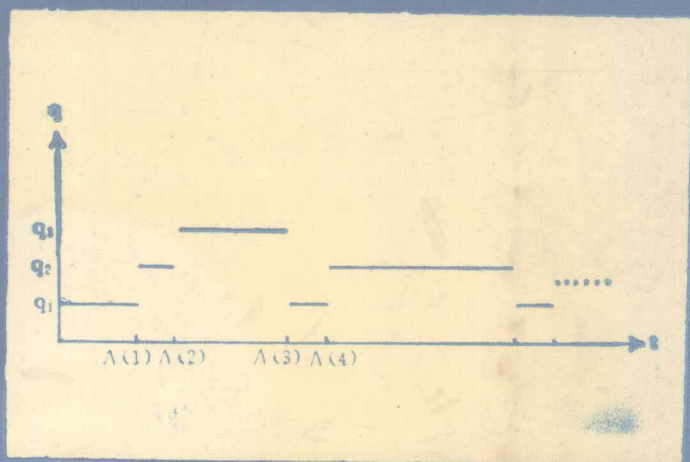


DISCRETE EVENT DYNAMIC SYSTEM

离散事件动态系统

彭永进 肖雁鸿 彭崇 冯月亮 著 ●



湖南科学技术出版社 ●

离散事件动态系统

彭永进 肖雁鸿 彭崇 冯月亮 著



湖南科学技术出版社

湘新登字 004 号

离散事件动态系统

彭永进 肖雁鸿 彭崇 冯月亮著

责任编辑:龚绍石

*

湖南科学技术出版社出版发行

(长沙市展览馆路3号)

湖南农业大学印刷厂印刷

*

1994年9月第1版第1次印刷

开本:787×1092毫米 1/16 印张:15.5 字数:369,000

印数:1-1135

ISBN 7-5357-1220-7

TP·42 定价:18.00元

内 容 简 介

本书是作者在多年教学与研究工作的基础上编写的,全书内容共分为五部分:其中绪论介绍有关 DEDS 的基本概念;第一章介绍 DEDS 的逻辑层次模型;第二章介绍 DEDS 的时间层次模型;第三章介绍 DEDS 的统计性能层次模型;第四章简要介绍 DEDS 理论在制造系统中的应用。

本书系统性强,避免了繁琐的数学推导,内容深入浅出。可供从事与 DEDS 理论相关的各个领域的科技人员阅读;也可以作为高等院校工业自动化专业、机械制造专业、或是其它相关专业研究生、高年级本科生的教材和参考书。

序

离散事件动态系统(DEDS)是系统科学与控制理论中的一个新兴分支和研究的前沿方向。近十年来,随着信息处理、计算机、机器人等技术的发展完善和广泛应用,通讯、制造、交通管理、军事指挥等领域内相继出现了一批具有离散事件特点的人造系统。基于对这类系统的行为和性能研究的需要,逐渐形成并发展了一门新兴的学科领域——离散事件动态系统理论。

我国对DEDS的研究约起步于1987年。“863”高新技术CIMS主题计划的实施,促进了DEDS研究工作的进行,取得了大量的成果,但至今尚没有专著问世。由彭永进教授等完成的《离散事件动态系统》一书,系统地论述了DEDS的逻辑层次、时间层次和统计性能层次的建模方法,并将DEDS理论用于FMS的建模与分析。该书是目前国内有关DEDS这一新学科理论的第一本专著,其特点是系统性强,理论体系清晰,避免了繁琐的数学推导,内容深入浅出,理论与实际有机联系。

本书的四位作者曾在“七五”期间出色地完成了湖南大学承担的国家“七五”攻关项目——准柔性制造系统(P-FMS),该项目于1991年荣获国家“七五”科技攻关重大成果奖,在国内有较大的影响;多年来,作者又在DEDS理论研究方面进行了深入的探讨。本书是作者长期从事FMS及DEDS理论与应用研究工作的结晶,相信它的问世,将会吸引更多的人从事DEDS的研究工作,为发展DEDS的理论与应用作出贡献。

查调生

1993年10月

前 言

离散事件动态系统(EDS; Discrete Event Dynamic System)是美国哈佛大学何毓琦(Y. C. HO)教授于1980年前后提出来的一个新的学科分支,它是当前系统理论和控制理论的一个前沿方向。

EDS主要用于描述和解决一系列人造系统的问题,例如:通讯系统、交通系统、制造系统、计算机系统、服务系统以及军事指挥系统等。这类系统的演化不能用物理和其他自然科学的定律来描述,而是服从于人为的一些复杂规则,由离散事件间的错综复杂的相互作用决定其动态过程,所以,它的理论和研究方法都有别于通常的动力学系统。近十年来,这些人造系统越来越大,投资越来越多,在国民经济建设和国防建设中的作用也日益重要。这些因素促使EDS迅速发展成为一门独立的学科。

离散事件动态系统涉及的范围很广,以致初学者深感难以涉足,往往为了熟悉有关基础知识和收集有关材料而花费了大量时间。本书将较全面和系统地介绍这一新兴学科,以吸引更多的人参加EDS的研究工作,从而推动EDS理论不断完善和发展。

本书是在作者为湖南大学工业自动化专业研究生讲授选修课“离散事件动态系统”和从事EDS与FMS方向课题研究时收集、阅读大量文献的基础上编写而成的。全书共分四章:第一章为逻辑层次分析法,主要介绍EDS的有限自动机/形式语言模型和位置/转换Petri网;第二章介绍线性EDS理论,即EDS的双子模型及其分析方法;第三章是统计性能层次模型,介绍排队网络模型方法(随机分析法)、仿真分析法和扰动分析法;第四章介绍EDS在制造系统中的应用和实例。

作者感谢湖南大学博士生导师童调生教授和研究生周松对本书提出的宝贵意见和给予的帮助。同时,作者还要感谢为本书的编排工作付出了辛勤劳动的方伟红小姐和罗健小姐。

在我国,对EDS的研究尚处于起步阶段,加上作者水平所限,本书中如有缺点和错误之处,恳请读者指正。

作 者

1993年6月于长沙

本书符号及缩写表

一、符 号

$\mathcal{D}$	双子(第二章)	$\mathcal{S}$	监控器(第一章)
$\mathcal{G}$	自动机(第一章)	$\mathcal{T}$	观测器(第一章)
$\mathcal{M}$	双子 $\mathcal{M}$ (第二章)	$\mathcal{Z}_{\max}$	Z 极大代数(第二章)
$\mathcal{N}_{\max}$	N 极大代数(第二章)	$\mathcal{Z}_{\min}$	Z 极小代数(第二章)
$\mathcal{N}_{\min}$	N 极小代数(第二章)		
A	一般集合	M	多元集
B	一般集合	N	自然数集
C	一般集合; 条件/事件网中条件集(第一章)	N₀	0 和自然数组成的集合(第二、三章)
E	图的边或有向弧集; 条件/事件网的事件集(第一章)	P	判段/事件网的判断集(第一章); 位置/转换网的位置集(第一章)
F	Petri 网的弧集(第一章)	Q	状态集
G	图	R	实数集
I	下标集	V	图的顶点集
J	下标集	X	状态集(第一章)
K	下标集; 语言(第一章)	Y	输出信号集(第二章)
L	下标集; 语言(第一章)	Z	整数集
A	到达时间间隔(绪论)	E	忙期结束时间(绪论)
B	忙期开始时间(绪论)	E(·)	随机变量“·”的数学期望
C	忙期持续时间(绪论)	F	随机变量的分布函数(附录)

$G(\cdot)$	网“ $\cdot$ ”对应的图(第一章); 规范化系数(第三章)	M	服务中心(第三章); Petri.网的标识(第一章)
I	无输入持续时间(第三章)	N	顾客数(第三章)
$I(\cdot)$	逻辑条件“ $\cdot$ ”的值	P	转移概率矩阵
$K(\cdot)$	Petri 网位置“ $\cdot$ ”的容量(第一章)	$P(\cdot)$	条件“ $\cdot$ ”成立的概率
L	队列、排队长度(第三章); 仿真次数(第三章)	Q	转移概率密度矩阵
$L(\cdot)$	有限自动机“ $\cdot$ ”产生的语言(第一章)	R	顾客种类(第三章)
$L_m(\cdot)$	有限自动机“ $\cdot$ ”标记的语言(第一章)	S	服务台(第三章)
		T	物理时间
		U	利用率(第三章)
		W	图的权矩阵; 等待时间(第三章)
Θ	转移概率矩阵(第三章); 下界集(第二章)	$\neg$	否定
Σ	字符表; 事件表; 求和记号	$\wedge$	并且
$\Sigma(q)$	在状态 q 下的活动事件集(第一章)	$\vee$	或者
Π	求积记号	$\Rightarrow$	蕴含
δ	自动机的转移映射(第一章)	$\Leftrightarrow$	等价
ξ	自动机的转移映射(第一章)	$\exists$	存在
ρ	一般关系	$\forall$	任一个
σ	一般关系	U	并
λ	顾客到达率(第三章)	$\cap$	交
μ	服务率(第三章)	$\in$	属于
		$\subset$	被包含
		$\oplus$	双子代数的加法
		$\otimes$	双子代数的乘法

二、缩 写

AI	人工智能	D	确定性过程
AS	活动扫描法	DEDS	离散事件动态系统
BP	忙期	EG	事件图
CEL	当前事件表	E_i	i 阶爱尔朗分布

ES	事件扫描法; 专家系统	PA	扰动分析
ESPN	扩展随机 Petri 网	PI	过程交互法
FCFS	先到先服务	PFO	潜在满输出
FEL	未来事件表	PNI	潜在无输入
FO	满输出	PN	Petri 网
GI	一般独立分布	RTTL	实时时序逻辑
GSPN	一般随机 Petri 网	SC	服务中心
Inf	下确界	SPN	随机 Petri 网
LCFS	后到先服务	ST	状态机
MC	马尔科夫链	Sup	上确界
MG	标记图	TEG	计时事件图
NI	无输入	TPN	计时 Petri 网
		TTM	计时转换模型

目 录

本书符号及缩写表

绪论	(1)
§ 0-1 DEDS 的定义与实例	(1)
§ 0-2 DEDS 的特点	(8)
§ 0-3 DEDS 的数学模型	(11)
§ 0-4 DEDS 的分析方法	(16)
第一章 逻辑层次模型	(18)
§ 1-1 概述	(18)
§ 1-2 有限自动机/形式语言分析法	(19)
一、闭环系统的结构	(20)
二、监控器的存在性	(23)
三、监控器的综合	(26)
四、其它类型监控器	(32)
§ 1-3 位置/转换 Petri 网	(40)
一、位置/转换网及复盖图	(40)
二、P/T 网的分类	(49)
三、P/T 网的主要性能	(51)
四、P/T 网的分析方法	(55)
§ 1-4 其它逻辑层次模型	(60)
一、高层网	(60)
二、计时 Petri 网	(62)
三、随机 Petri 网	(65)
四、计时转换模型	(67)
第二章 线性离散事件动态系统	(71)
§ 2-1 概述	(71)
§ 2-2 双子理论基础	(71)
一、双子和双子 $\mathcal{M}$	(71)
二、矩阵双子	(79)
三、线性方程的解	(83)
§ 2-3 计时事件图的双子模型	(85)
一、双子 $\mathcal{M}$ 方程组	(85)
二、事件域的方程组	(91)
三、时间域的方程组	(94)
§ 2-4 周期性和稳定性	(95)

一、矩阵的周期性.....	(95)
二、稳定性	(104)
§ 2-5 线性 DEDS 分析与补偿	(108)
一、可实现性	(108)
二、特征值和特征向量	(109)
第三章 统计性能层次模型	(116)
§ 3-1 概述.....	(116)
§ 3-2 单级随机服务系统.....	(117)
一、排队模型及分类	(117)
二、M/M/s 系统	(120)
三、M/G/1 系统.....	(124)
四、GI/M/s 系统	(126)
§ 3-3 多级随机服务系统.....	(131)
一、Jackson 排队网络	(131)
二、其它排队网络	(141)
三、其它分析方法	(144)
§ 3-4 仿真分析法.....	(149)
一、仿真的基本概念与一般步骤	(149)
二、仿真策略	(151)
三、仿真语言与仿真程序	(153)
四、仿真程序的运行	(155)
五、仿真结果分析	(156)
六、人工智能与仿真	(160)
§ 3-5 扰动分析法.....	(163)
一、标称路径	(163)
二、扰动的产生规则	(169)
三、扰动的传播规则	(170)
四、系统性能指标的灵敏度分析	(175)
五、算子“E”与“ $\frac{\partial}{\partial \theta}$ ”可交换的条件	(177)
六、PA 的分类与发展	(180)
第四章 DEDS 在柔性制造系统中的应用	(185)
§ 4-1 柔性制造系统(FMS)	(185)
§ 4-2 FMS 的 Petri 网模型.....	(187)
§ 4-3 FMS 的线性 DEDS 模型	(191)
一、FMS 的线性 DEDS 模型的建立.....	(191)
二、用线性 DEDS 分析制造系统的性能指标	(194)
§ 4-4 FMS 的排队网络模型	(197)
一、FMS 的排队网络模型	(197)

二、仿真评估与实例分析	(201)
附录 数学基础知识	(204)
A.1 预备知识	(204)
A.2 图论	(208)
A.3 有限自动机和形式语言	(212)
A.4 Markov 过程	(215)
专业术语索引	(226)

绪 论

§ 0-1 DEDS 的定义与实例

对于 DEDS, 至今还没有一个被广泛承认的、简明的定义。粗略地说, DEDS 由离散状态和事件组成, 在事件的驱动下产生状态转移, 并同时产生离散输出。下面先从几个实例来阐明 DEDS 的概念。

1° 例 1(串行加法器) 图 0-1-1(a) 是串行二进制加法器。在数字电路中, 已对它的工作原理进行了充分研究。 R_a 和 R_b 是移位寄存器, S 是全加器, CP 是移位(同步)脉冲。全加器 S 的输出 s 和输入 a, b 都是代表二进制数的脉冲列, 而且 $s = a + b$; S 按其真值表(表 0-1-1)计算每一位的和 s_i 及进位 c_i , 并将 c_i 存入其中的某个寄存器中, 作为计算下一位(高位)的输入之一。

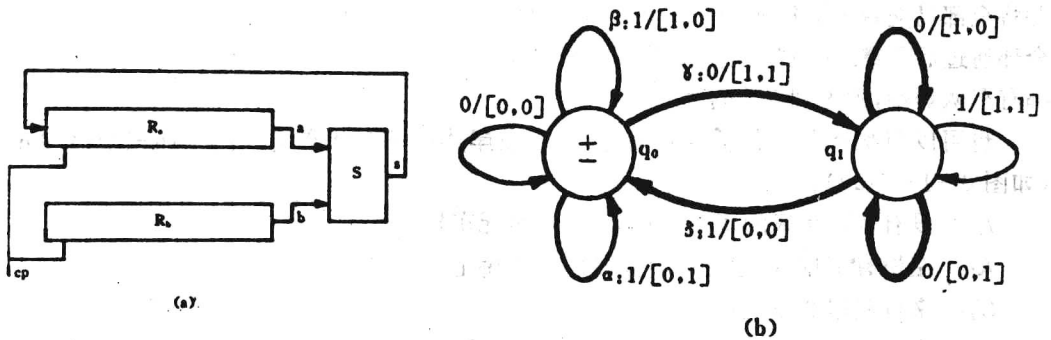


图 0-1-1

可以从不同的角度来研究这一装置, 而按 DEDS 的观点, 可用图 0-1-1(b) 的状态图来描述全加器 S 的行为。图中圆圈 q_0 和 q_1 是两个状态, 它们分别表示前一位(低位)有或无进位; 联结 q_0 和 q_1 的有向弧及其旁注分别表示输入、输出和状态转移。例如, 弧 $\gamma: 0/[1,1]$ 表示在状态 q_0 出现 $[a_i, b_i] = [1,1]$, 则产生 $s_i = 0$, 与此同时, 状态转移到 q_1 (有进位)。

表 0-1-1 全加器真值表

a_i	b_i	c_i	c_{i+1}	s_i
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

二元组合 $[a_i, b_i]$ 称为全加器 S 的事件。对于每一个特定的计算任务, 由输入 a_i 和 b_i 确定

了一个事件序列 e , 在 e 的驱动下, S 沿状态图中某一路径演化, 并产生状态序列 q 和输出序列 s 。例如, 若 $a=0110, b=0101$, 则路径如图 0-1-1(b) 中粗线所示, 而序列 e, q 和 s (低位在前) 如下:

$$e=[0,1],[1,0],[1,1],[0,0]$$

$$q=q_0q_0q_0q_1q_0 \quad s=1101$$

不同的输入会产生不同的序列和路径, 但只有起点和终点都为 q_0 的序列才产生正确的结果, 所以在状态图中要用符号“-”和“+”分别标明合法的起点和终点。

状态图是描述有限自动机的一种主要方法, 现已将它纳入 *DEDS* 的范畴。可以证明, 所有由有限个“与”、“或”、“非”和“记忆”元件组成的数字逻辑电路都可以用状态图来描述, 它比具体的逻辑电路更简洁明了地表达了系统内部的逻辑关系, 将逻辑设计从具体的硬件设计中分离出来, 已成为分析和设计这种电路的重要工具。

2° 例 2(交通管理) 有一座桥 B , 只能单向通行, 为此在两岸设置了信号灯 C_l 和 C_r , 并在信号灯和交费处 T 之间设置排队等候停车场 P (如图 0-1-2)。通行规则为: 欲过桥的汽车先在交费处 T_l (或 T_r) 交费后进入停车场 P_l (或 P_r), 再在信号灯 C_l (或 C_r) 指挥下过桥; 停车场停满车或第一辆车上桥后就停止收费, 并将全部已交费车辆组成一个车队, 待该车队全部通过后再继续收费和组成新车队。若两岸都有车队等待, 则先到者先过桥。

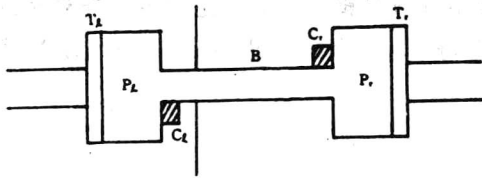


图 0-1-2

也可以用状态图来分析这一问题, 对于左岸共有三个状态 I_l, R_l, U_l 和三个事件 $\alpha_l, \beta_l, \gamma_l$ (如图 0-1-3(a)):

- I_l : 没有从左岸来的车队在桥上, 左岸也无车排队;
- R_l : 左岸有车排队, 但无来自左岸的车在桥上;
- U_l : 来自左岸的车正在过桥;
- α_l : 来自左岸的第一辆车交费排队, 形成等待的车队;
- β_l : 左岸车队的最后一辆上桥, 桥被占用;
- γ_l : 左岸车队的最后一辆车下桥, 桥被释放。

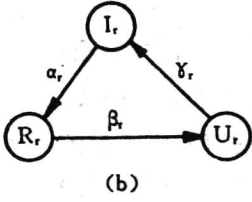
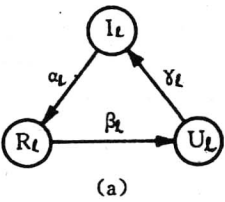


图 0-1-3

显然, 在图 0-1-3(a) 中, 状态和事件只能按 $I_l \alpha_l R_l \beta_l U_l \gamma_l \dots$ 的顺序出现。类似地, 右岸也有三个状态和三个事件, 它们之间也只能顺序发生。但两岸的状态可以任意组合, 事件也没

有先后顺序的约束,若不加控制,则整个系统的状态图如图 0-1-4 所示,它共有 9 个状态:
 $I_l I_r, I_l R_r, I_l U_r, R_l I_r, R_l R_r, R_l U_r, U_l I_r, U_l R_r$ 和 $U_l U_r$, 其中最后一个状态 $U_l U_r$ 会出现交通堵塞,
 应该设法防止。

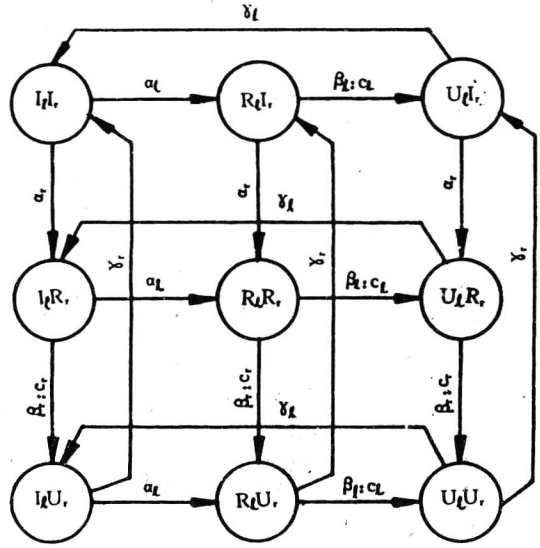


图 0-1-4

图 0-1-4 中每条弧的旁注是导致该弧所示状态转移的事件,而 $\beta_l: c_l$ 和 $\beta_r: c_r$ 表示事件 β_l 和 β_r 分别受 c_l 和 c_r 的控制。可将控制变量 c (包括 c_l 和 c_r) 看成一个逻辑量,当 $c=0$ 时禁止相应的事件发生,而 $c=1$ 允许其发生。

显然,为防止出现状态 $U_l U_r$ (堵车),需要进行如下控制:在状态 $R_l R_r$ 不同时使 c_l 和 c_r 为 1;在状态 $R_l U_r$ 使 $c_l=0$;在状态 $U_l R_r$ 使 $c_r=0$ 。对 DEDS 的这种控制称为监控 (Supervision),它是靠禁止某些事件的发生来防止出现坏状态,这与连续时间系统中的控制 (Control) 有很大的差别。

根据两岸来车的情况,将产生一个事件序列。在它的驱动下,系统将沿着状态图上的某一条路径演化,并产生一个相应的状态序列。例如:若事件序列为 $\alpha_l, \alpha_r, \beta_l, \gamma_l, \beta_r, \gamma_r$, 则对应的状态序列为 $(I_l I_r) (R_l I_r) (R_l R_r) (U_l R_r) (I_l R_r) (I_l U_r) (I_l I_r)$ 。

因此,状态图 0-1-3 全面描述了这一系统,并为它的监控提出了要求。更复杂的交通管理问题也可用状态图来描述,所以它是研究各种交通管理系统的重要方法。本例还可以推广到任何两项活动分享同一资源的监控问题,赋予活动与资源不同的含义,这一方法可研究不同的系统。例如,如果认为资源是一台机床,活动为加工两种不同的产品,则这一调度问题也可用图 0-1-4 来描述。在第一章还要对这类系统进行详细研究。

3° 例 3 (随机服务系统) 设有一服务台 S , 每个顾客的平均服务时间为 X , 顾客以时间间隔 A 到达服务台, 此时若服务台空闲, 则它立即接受服务, 否则在服务台前排队 L 等待接受服务 (如图 0-1-5)。赋予“顾客”

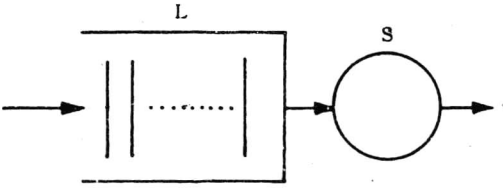


图 0-1-5

和“服务台”不同的含义,这一系统可描述不同的实际问题(表 0-1-2)。需要研究的是这一系统的工作情况和计算其主要性能指标,例如:每个顾客的等待时间 W 、排队长度 L 和服务台的利用率 U 等。

表 0-1-2 各种随机服务系统

系统名称	商店	机床修理	机场	电话系统	制造系统	计算机	交通系统
顾客	购物者	待修机床	飞机	电话呼叫	被加工工件	用户或进程	汽车等
服务台	营业员	修理工人	跑道	通讯线路	机床	CPU 等资源	公路或桥梁等

可定义该系统中顾客数为它的状态 q ,其取值为零或正整数,并约定:若 $q \geq 1$,则有一个顾客在接受服务,其余 $q-1$ 个顾客在排队。因此,这个系统可能有无穷多个状态, $q \in \mathbf{N}$,有二个事件: α —一个顾客到达, β —一个顾客离开,其状态图如图 0-1-6 所示。

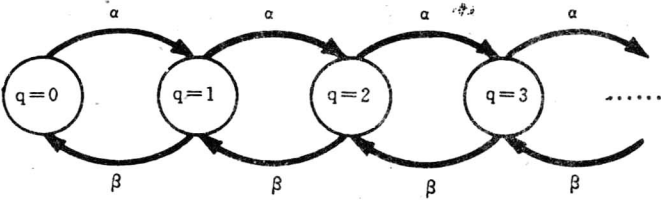


图 0-1-6

只用状态图还不足以说明本例的全部运行过程,因为它没有考虑时间因素。状态演化图是描述时间因素作用的一种最直观的图示方法,它的纵坐标为状态(顾客数),横坐标为时间。对于确定性的过程, A 和 X 为常数,图 0-1-7(a)和 7(b)分别表示 $X > A$ 和 $X < A$ 两种情况的状态演化图。图中 $q_0 = 3$ 为初始状态, M_i 表示第 i 个顾客(按到达先后排序),上方和下方的箭头分别表示顾客到达和离去的时刻,排队规则为先到先服务。显然,若 $X > A$,系统中的顾客数无限地增加(图 0-1-7(a)),这种情况称为系统不稳定,它说明需要提高服务速度或增加服务台的数量;而图 0-1-7(b)是 $X < A$ 的情况 ($A = 1.5X$),当第 7 个顾客离开系统后,系统即进入稳定状态。进入稳态后,每个顾客的等待时间 $W = 0$,队长 $L = 0$,服务台的利用率为 $U = X/A$ 。

显然,对于表 0-1-2 所示的系统,时间间隔 A 和服务时间 X 都不可能是确定的变量,而是随机变量。因此,相应的系统称为随机服务系统。更直观地说,需要研究 A 和 X 在其平均值 $\bar{A}$ 和 $\bar{X}$ 附近变化时系统的工作情况,此时,若 $\bar{X} > \bar{A}$ 仍不稳定,但即使 $\bar{X} < \bar{A}$,也可能出现排队现象,后者是需要研究的主要情况。

仍可用状态演化图来描述随机情况下的一次试验结果(如图 0-1-8)。在第一个顾客到达之前,服务台没有顾客,称为一个“无输入”(NI: No Input),其持续时间为 I_1 ;从第一个顾客进入系统到第四个顾客离开系统,服务台连续工作,称为一个“忙期”(BP: Busy Period);然后,直到第五个顾客进入系统之前,又是一个 NI,持续时间为 I_2 ;从第五个顾客进入系统开

始,又是另一个 BP。状态就是 BP 与 NI 相间地演化下去。

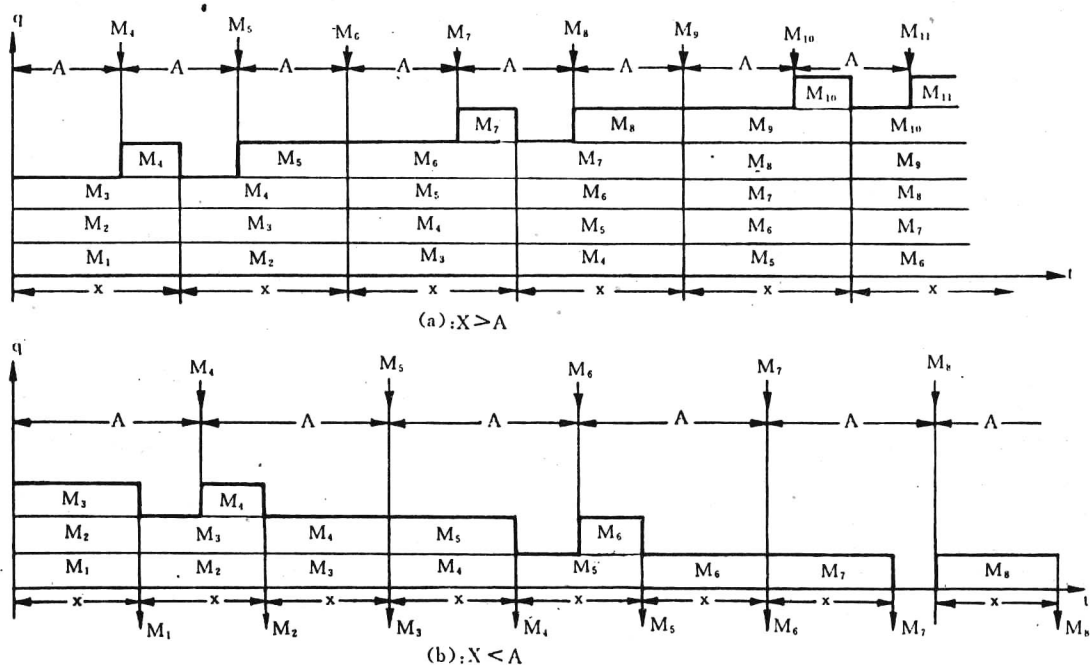


图 0-1-7

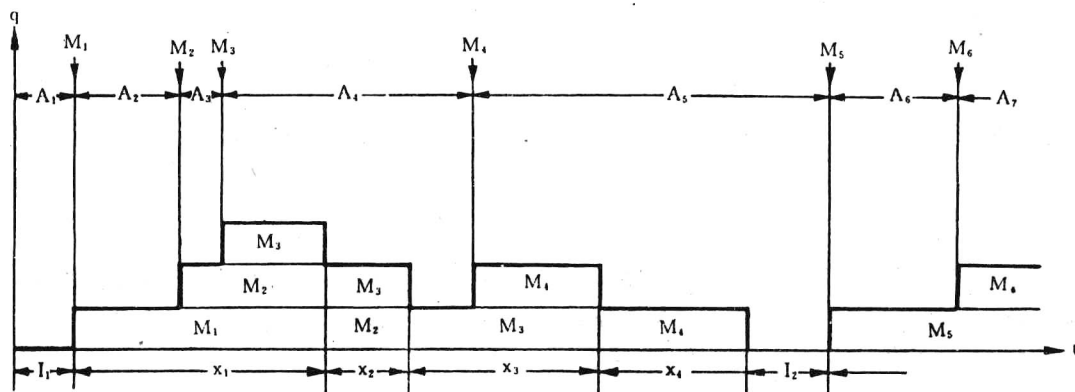


图 0-1-8

从状态演化图可以计算主要性能指标的统计值。设 T_m 是第 m 个 BP 结束的时间, $n_i (i=1, 2, \dots, m)$ 是第 i 个 BP 中服务台服务的顾客数, 则在时间 T_m 内服务的顾客总数为

$$n = \sum_{i=1}^m n_i \quad (0-1-1)$$

现在计算有关这 n 个顾客的性能统计值。由于 NI 的隔离作用, 各个 BP 之间不存在相互影响, 因为 BP 开始时服务台是空闲的, 所以它的第一个顾客不需排队等待, 而 BP 结束时, 最后一个顾客也离开了系统, 它对下一个 BP 不留下任何影响。因此, 先着手针对每一个 BP 进