第11卷 第4期 自动化学报 Vol. 11, No. 4
1985年10月 ACTA AUTOMATICA SINICA Oct., 1985

# 离散事件动态系统

曹希仁
(中国科技大学)

**摘　　要**

离散事件动态系统理论的应用十分广泛。它在计算机网络、柔性生产系统等领域的研究中起着非常重要的作用。它必将成为控制理论的一个重要分支。本文重点叙述了离散事件动态系统的几种排队网络模型及其稳态状态分布，给出了用离散事件动态系统描述计算机网络、柔性生产系统的例子。

## 一、引　言

"离散事件动态系统"是近年发展起来的一门学科，其名称是由哈佛大学何毓琦教授等提出的[9]．这是一类特殊的动态系统，它的演化过程不能由连续变量来描述．

离散事件动态系统通常以排队网络为模型．每一系统包含若干个服务中心，每个服务中心拥有一个或多个服务台．整个系统的目的在于向服务对象提供一定种类和数量的服务．服务对象一般通称为"顾客"，"服务台"与"顾客"在不同的系统中有不同的含义．顾客按一定的统计规律进入系统的某一中心，等待并接受服务后，以一定的规律转移到另一服务中心去继续接受服务，直至所需的全部服务完成后离开系统．

目前研究离散事件动态系统的主要基础仍是随机过程理论（特别是可逆马尔可夫过程、生灭过程、马尔可夫更新过程等，参看文献[1—11]及[17—19]）．特别是排队网络理论本文将重点加以介绍．由于离散事件动态系统适用的范围越来越广，问题越来越复杂．现有的排队论的方法在很多情况下已不适用． 因此出现了不少新的方法，如操作分析(Operational Analysis)[12]，平均值分析[13]、扰动分析[14,15]等．最近有人对闭环形式的离散事件系统应用极小-极大代数的概念，将其周期性特性表征为求解这个代数的本征值和本征矢量[16]，从而为这方面的研究提出了新的方向．

研究离散事件动态系统的主要目的是在一定条件下优化该系统的性能指标，使系统能更有效地提供服务，为设计新系统或改进现有系统提供依据．目前主要的研究课题有系统的输出速率、系统状态的稳态概率分布、顾客在系统中或在某一服务中心的逗留时间以及系统中各服务中心的输入、输出过程的特性等．

## 二、排队网络模型的例子

本节将给出计算机网络和柔性生产系统的排队网络模型的一些例子．这些模型大多

---

本文于1983年10月27日收到.

采用闭环形式，也就是说系统中顾客的总数是不变的．这个假设符合客观实际情况．在计算机系统中，使用者由终端输入一道程序，计算机只有执行了这道程序后才能接受使用者输入的另一道程序．在多程序计算机中，计算机同时执行的程序的道数是固定的．在柔性生产系统中，假想在成品输出处有一个工件装卸站，每当系统加工完毕一个工件时，这个装卸站即卸下该成品并立即装上一个待加工的工件输入系统．这样整个系统就可以看成一个闭环系统．

图 1 所示是简化了的计算机流程图．图 2 为一个柔性生产系统的例子．另外，近年来由计算机相连接所组成的计算机网络也被广泛使用．如美国国防部的 ARPANET 网络[20,22]、IBM 公司的 SNA 系统、数字设备公司(DEC) 的 DECNET 等．

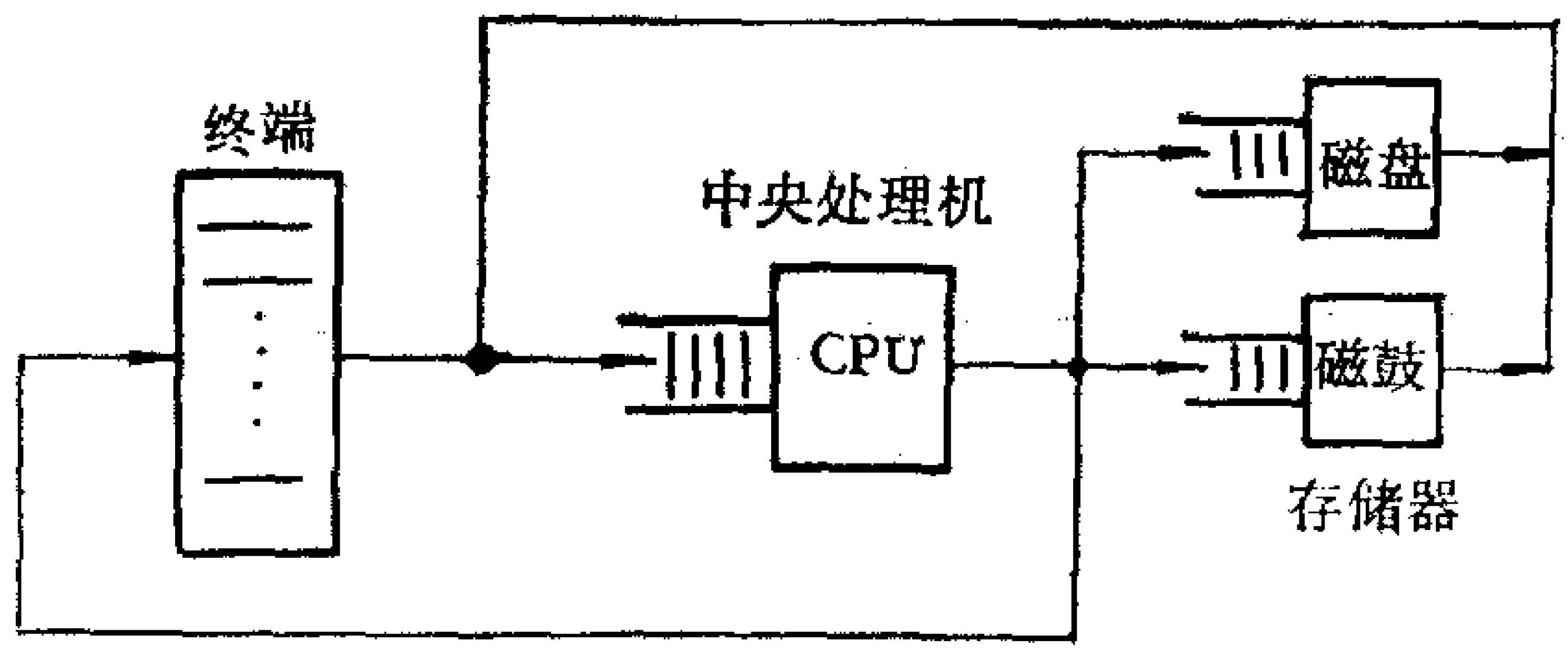


图 1　计算机简化流程图．

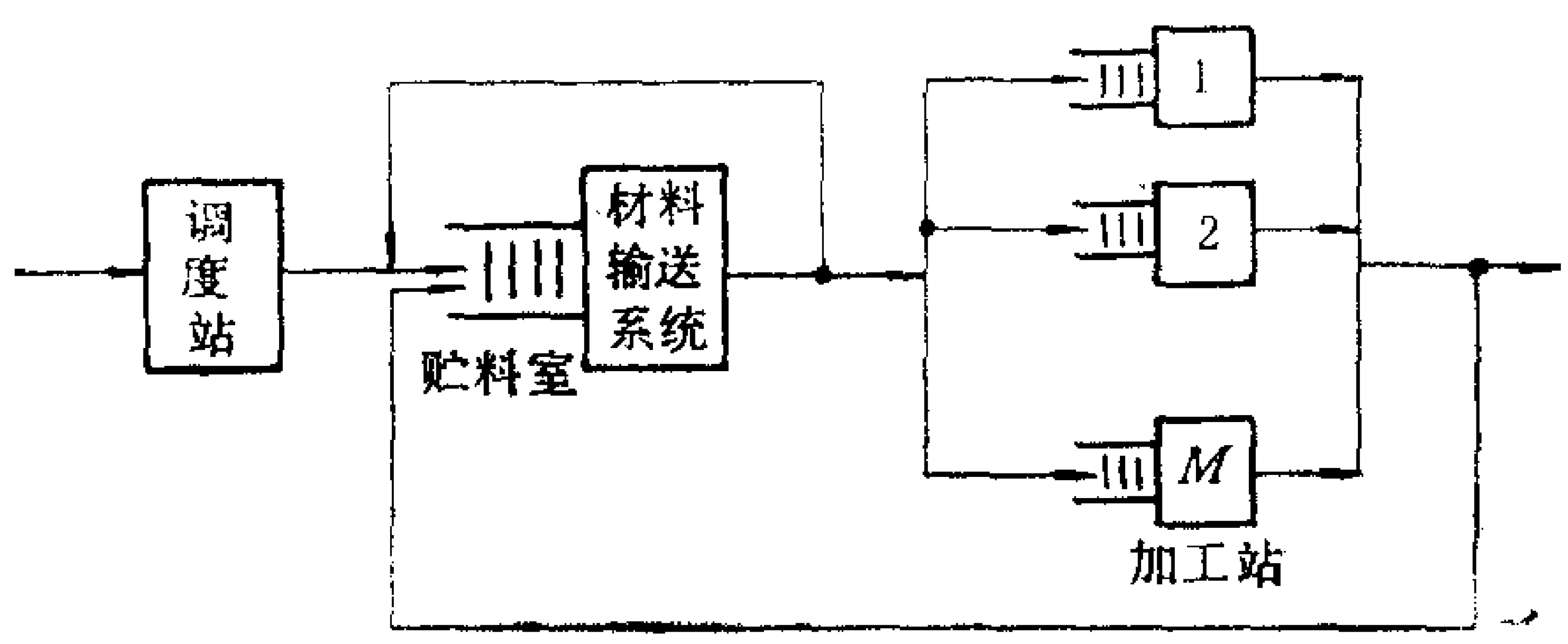


图 2　柔性生产系统示例

## 三、系统特性的描述

上节指出离散事件系统一般都可表示为排队网络的模型．图 3 示出了一个由三个服务台组成的网络的结构．排队网络的特性一般可用概率论的方法来描述．每个服务中心都可以有顾客输入．假设系统有 $M$ 个服务中心，每个服务中心有若干个服务台，顾客则可分成 $K$ 类．整个排队网络可以用下列诸项来表征：

1）输入过程．　每类顾客输入到各服务中心的过程可以用随机过程来表征．这些过程可以彼此相关．

2）服务时间的分布．　每个服务台对各类顾客所提供的服务具有一定的概率分布规律．

3）服务规则．它规定当每个服务台完成了对一个顾客的服务后，如何从正在等待服务的队列中选取下一个顾客继续进行服务，其服务的形式有先到先服务、后到先服务、具

有优先权的服务等.

4) 顾客的转移概率. 各类顾客在某一服务中心接受服务完毕就以一定的概率转移到另一服务中心，继续接受服务或离开系统. 这个概率可以依赖于各服务中心的顾客的数目或其它随机过程.

5) 缓冲器的容量. 若某服务台的缓冲器已满，则规定欲转移至该服务台接受服务的顾客就被"阻塞"在原来的服务台中，直至该服务台完成一个顾客的服务后，该缓冲器才有一台空位接收新来的顾客.

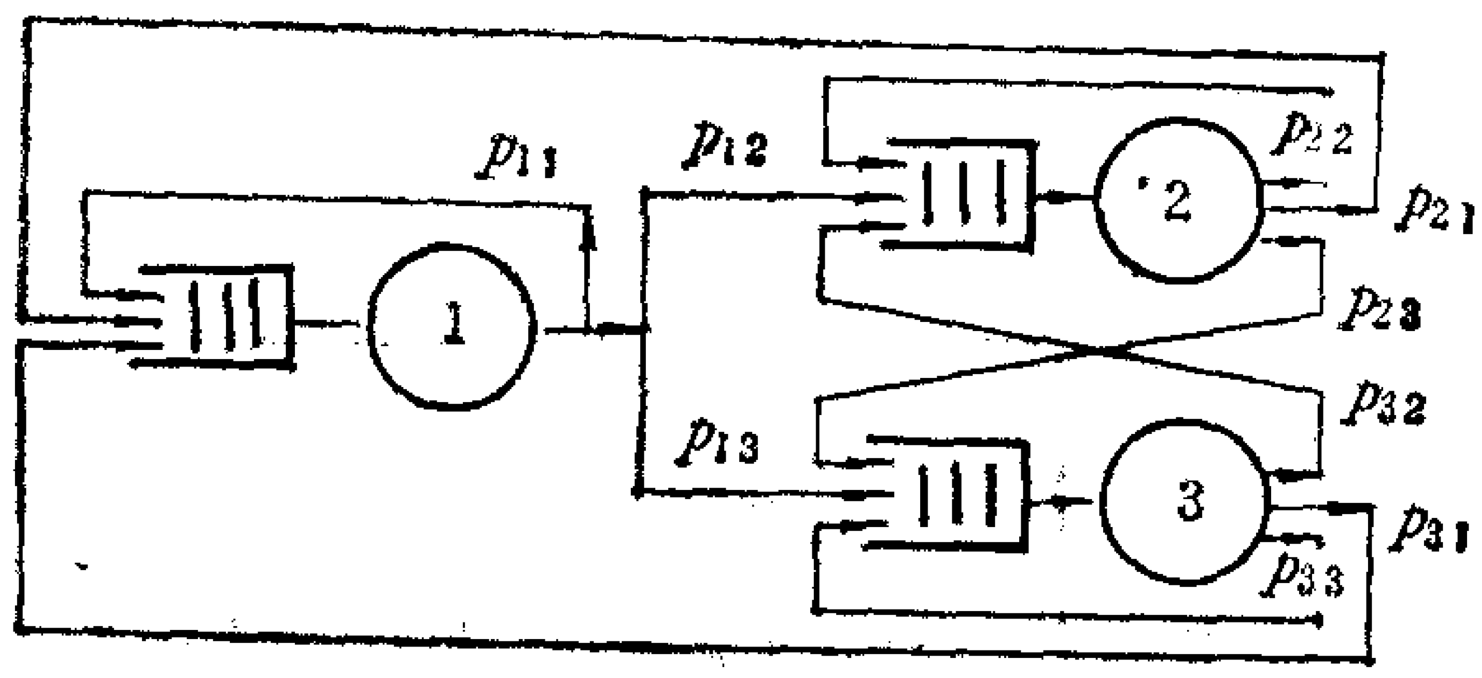


图 3 由 3 个服务台所组成的网络

## 四、各类网络模型及其稳态状态分布

本节将介绍几种在理论上和应用上都比较重要的网络模型. 这些模型的稳态队长分布都已获得了精确的分布表达式.一些更为复杂的系统可以用这些模型或其组合来近似. 这些模型的公式可应用于电话系统、计算机网络及柔性生产系统等实际问题中，并得到比较理想的结果. 因此可以将其视为排队网络理论的基础.

### 1. Jackson-Gordon-Newell 网络

Jackson[23]、Gordon-Newell[24] 分别讨论了开环和闭环形式的排队网络.Jackson 网络包含$M$个服务中心，第 $i$ 服务中心具有 $n_i$ 个服务台. 输入到第 $i$ 服务中心的顾客形成互相独立的输入率为 $\lambda_i$ 的 Poisson 过程.顾客在第 $i$ 服务中心的任一服务台接受服务，其服务时间具有平均值为 $1/\mu_i$ 的负指数分布. 服务规则是先到先服务. 每一顾客在第 $i$ 中心接受服务后，以概率 $p_{ij}$ 转移到第 $j$ 中心. 因此 $q_i = 1 - \sum_{j=1}^{M} p_{ij}$ 是顾客离开第 $i$ 中心的概率. 每一服务中心都有容量为无限大的缓冲器，因此"阻塞"现象并不发生.

Jackson 网络可以看成是多个 $M/M/n_i$ 组成的网络. 对单个的 $M/M/n$ 网络，如 $\lambda, \mu$ 分别是平均输入率与平均服务速率且 $\lambda < \mu n$，则排队论给出下列结果

$$p_k = \begin{cases} p_0(\lambda/\mu)^k/k!, & \text{如 } k \leqslant n, \\ p_0\{(\lambda/\mu)^k/n!\}n^{k-n}, & \text{如 } k \geqslant n. \end{cases} \tag{1}$$

其中 $p_k$ 是稳态时服务中心里有 $k$ 个顾客的概率，$p_0$ 可由等式 $\Sigma p_k = 1$ 得出.

根据 Poisson 过程及负指数分布的"非记忆"性，可选取队长的矢量 $(k_1, k_2, \cdots\cdots, k_M)$作为系统的状态变量，其中 $k_i$ 是第 $i$ 中心顾客的数目(包括正在接受服务和等待服务的). 系统的稳态状态分布具有下列十分吸引人的形式:

设 $\Gamma_i$ 是方程

$$\Gamma_i = \lambda_i + \sum_{j=1}^{M} p_{ji}\Gamma_j, \quad i = 1, 2, \cdots\cdots, M \tag{2}$$

的解，且 $\Gamma_i < \mu_i n_i$ 对所有 $1 \leqslant i \leqslant M$ 成立，则

$$p(k_1, k_2, \cdots\cdots, k_M) = p_1(k_1) \cdot p_2(k_2) \cdot \cdots\cdots p_M(k_M), \tag{3}$$

其中

$$p_i(k) = \begin{cases} p_i(0)(\Gamma_i/\mu_i)^k/k!, & \text{若 } k \leqslant n_i, \\ p_i(0)\{(\Gamma_i/\mu_i)^k/n_i!\} \cdot n_i^{k-n_i}, & \text{若 } k \geqslant n_i. \end{cases} \tag{4}$$

上述乘积形式的表达式表明稳态时各服务中心队长的分布是互相独立的，且第 $i$ 中心的稳态分布相当于这个服务中心独立地接收输入速率为 $\Gamma_i$ 的 Poisson 顾客流. 方程组(2)可以看成系统在稳态时顾客流的平衡方程. $\Gamma_i$ 是稳态时输入（由系统外或系统中别的服务中心）到第 $i$ 中心的总的顾客输入速率. 这个结论很容易被误认为系统在稳态时输入到第 $i$ 中心的顾客流是速率 $\Gamma_i$ 的 Poisson 流，但这个推测在存在反馈环路的系统中是不成立的[25].

Gordon-Newell[24] 研究了 Jackson 网络的闭环形式，即令 $\lambda_i = 0, \sum_{j=1}^{M} p_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \cdots\cdots, M$. 其它假设均与开网络时相同. 设此网络中顾客的总数为 $K$；每服务中心仅有一个服务台，该服务台的平均服务速率可以依赖于队长，即令第 $i$ 中心的服务速率为 $(a_i(k_i)\mu_i)$. 如包含多服务台中心则为这一形式的特殊情况. 系统的稳态状态的概率分布具有下列乘积形式：

$$p(k_1, k_2, \cdots\cdots, k_M) = \frac{1}{G(K)} \cdot \prod_{i=1}^{M} [y_i^{k_i}/A_i(k_i)], \tag{5}$$

其中 $y_i$ 是下列方程组的解：

$$\sum_{i=1}^{M} p_{im}(\mu_i y_i) = \mu_m y_m, \quad 1 \leqslant m \leqslant M. \tag{6}$$

$A_i(k)$ 和 $G(K)$ 由下式定义：

$$A_i(k) = \begin{cases} 1, & \text{若 } k = 0, \\ \prod_{j=1}^{k} a_i(j), & \text{若 } k > 0, \ i = 1, 2, \cdots\cdots, M, \end{cases} \tag{7}$$

$$G(K) = \sum_{k_1 + \cdots\cdots + k_M = K} \cdot \prod_{i=1}^{M} \{y_i^{k_i}/A_i(k_i)\}. \tag{8}$$

(5) 式虽是乘积形式，但并不说明各服务中心的稳态队长分布是互相独立的. 因网络中顾客总数是固定的. 第 $i$ 服务中心具有 $n_i$ 个相同的服务台的情况可以看成

$$a_i(j) = \begin{cases} n_i, & \text{若 } j \geqslant n_i, \\ j, & \text{若 } j \leqslant n_i. \end{cases}$$

如服务速率不随队长而变，则 $A_i(k_i) = 1$，方程(5)简化为

$$p(k_1, k_2, \cdots\cdots, k_M) = \frac{1}{G(K)} \cdot \prod_{i=1}^{M} y_i^{k_i}, \quad G(K) = \Sigma \prod_{i=1}^{M} y_i^{k_i}. \tag{9}$$

Buzen 于 1973 年又获得了一套更为简捷的算法，大大缩短了计算时间和存储空间．当速率不依赖于队长时，Buzen 的公式如下[27]:

定义 $g^{(k,m)}=g^{(k,m-1)}+y_m g^{(k-1,m)}$, $1\leqslant m\leqslant M$, $1\leqslant k\leqslant K$.其初始值为 $g(0,m)=1$, $g(k,1)=y_1^k$. Buzen 证明了

$$G(K)=g(K,M). \tag{10}$$

这个算法还给出了其它一些量的计算公式，如

$$p(k_i\geqslant k)=y_i^k\frac{G(K-k,M)}{G(K,M)}. \tag{11}$$

知道了边缘分布后很容易得到整个系统的输出率．如把第$M$中心的输出作为整个系统的输出(比如第$M$中心是装卸工件与成品件的机器)，则系统的输出率为

$$TP=\mu_M\cdot p({}_Mk\geqslant 1). \tag{12}$$

根据公式(11)，(12)可以选取适当的参数 $\mu_i$, $p_{ij}$ 等，以使整个系统的输出率达到最高．

Jackson-Gordon-Newell 网络在离散事件系统中起着重要的作用，类似于线性系统在连续动态系统中的地位．Moore 于 1971 年首次将它用来模拟计算机系统，随后各种文献迅速出现．Moore 用这种模型和测量到的系统参数值预测系统的平均响应时间，精确度在10% 以内．

**2. BCMP 网络**

Baskett 等人的文章[28] 讨论了一类更为广泛的系统，上述 Jackson 网络仅为其特殊情况．这类网络的模型及所用符号如下：

系统中共有$M$个服务中心，所有的顾客分为$R$类．顾客在第 $i$ 中心接受完服务后可以改换其类别．一个第 $r$ 类的顾客在第 $i$ 中心接受服务后以概率 $p_{i,r,j,s}$ 转换成第 $s$ 类顾客，并进入第 $j$ 中心．假设以 $(i, r)$ 为状态的马尔可夫链可以分解成$w$个遍历的子链，令 $E_1, E_2,\cdots,E_w$ 为这些子链的状态所组成的集合．设 $k_{ir}$ 是第 $i$ 中心里第 $r$ 类顾客的数目，$k_j=\Sigma_{(i,r)\in E_j}k_{ir}$ 是系统中属于第 $j$ 子链的顾客数目，$k=\sum_{j=1}^{w}k_j$ 则是系统中顾客的总数目．

该系统的输入过程可以有两种形式．第一种形式是一个输入到整个系统的 Poisson 过程，其平均速率依赖于系统中总的顾客数目，以 $\lambda(k)$ 表示之．每个顾客在进入系统后以概率 $q_{ir}$ 成为第 $r$ 类顾客并进入第 $i$ 个中心．第二种形式是$w$个独立的 Poisson 过程分别输入到$w$个子链，其速率分别为 $\lambda_j(k_j), j=1,2,\cdots,w$. 在第 $j$ 个 Poisson 过程中输入的顾客以概率 $q_{ir}$ 成为第 $r$ 类顾客并进入第 $i$ 中心．

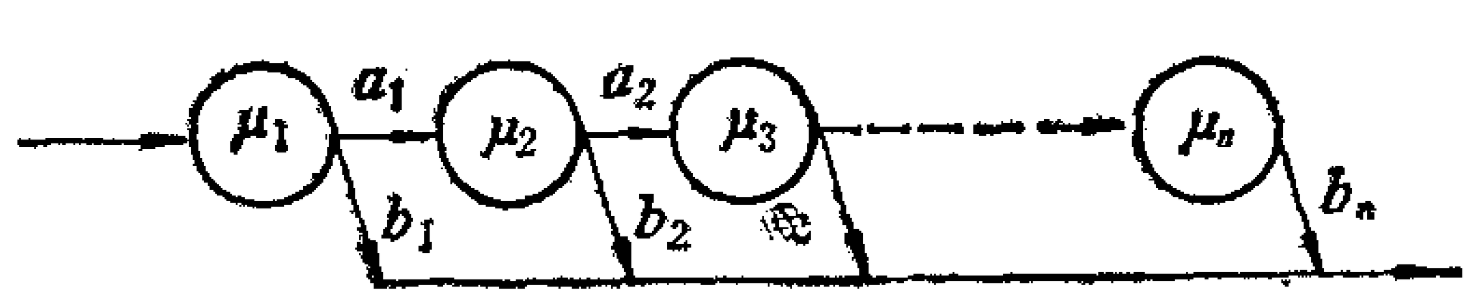


图 4 分布函数的 Cox 表示。

在进一步描述网络特征以前，先介绍一下服务时间分布的级表示法．Cox[29]证明了如果一个分布函数具有有理形式的 Laplace 变换式，则这个分布可以用图 4 所示的指数分布的各级所组成的网络形式表示．图中 $a_i$, $b_i$ 分别表示顾客在离开第 $i$ 级后进入下一级或

离开系统的概率.

BCMP 网络中的服务中心可属于下列四种形式之一：

1) 先到先服务的服务规律. 服务中心仅有一个服务台且对各类顾客提供相同的服务,其分布是平均速率为 $\mu_i$ 的负指数分布. 设 $n_i$ 为该中心中顾客的数目，则该中心的状态变量为 $x_i=(x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{in_i})$，其中 $x_{ij}$ 是第 $j$ 个顾客的类别，$1 \leqslant x_{ij} \leqslant R$.

2) 服务中心仅有一个服务台,且对所有顾客进行分时服务（即如 $n$ 个顾客在此服务台,则每秒钟该服务台对每个顾客提供 $1/n$ 秒的服务). 各类顾客的服务时间分布具有各不相同的有理形式的 Laplace 变换. 以 $\mu_{irl}$ 记第 $i$ 中心第 $r$ 类顾客第 $l$ 级指数分布的平均速率,$a_{irl}$为各级的转移概率,$1 \leqslant l \leqslant u_{ir}$, $u_{ir}$ 为第 $i$ 中心第 $r$ 类顾客所需服务的 Cox 表示法中的级数. 令$A_{irl}=\prod_{j=1}^{l} a_{irj}$, 则该中心的状态可表示为 $x_i=(v_{i1}, v_{i2}, \cdots, v_{iR})$，其中 $v_{ir}=(m_{ir1}, m_{ir2}, \cdots, m_{iru_{ir}})$，$m_{irl}$ 是第 $i$ 中心第 $r$ 类顾客在接受第 $l$ 级服务的个数. 以 $n_i$ 记第 $i$ 中心的顾客的总数目.

3) 服务中心拥有足够多的服务台,其数目不小于该中心所可能接收到的顾客的总数目(在开环系统中,必须有无穷多个服务台). 状态的表示法与 2)相同.

4) 后到先服务的服务规律. 服务中心仅有一个服务台. 各类顾客服务时间的分布各不相同,均具有有理形式的 Laplace 变换. 该中心的状态可表示为 $x_i=((r_1,m_1), (r_2, m_2), \cdots, (r_{n_i}, m_{n_i}))$，其中 $r_j, m_j$ 分别表示按后到先服务的次序第 $j$ 个顾客的类别和所处的级数. 后到先服务有不同的规则,这里假设是优先-继续型的后到先服务，即新到来的顾客立即替代正在接受服务的顾客开始接受服务，在其服务完成后被替代的顾客从其被中止服务的地方继续进行所需的剩余部分的服务.

整个系统的状态可表示为 $s=(x_1, x_2, \cdots, x_M)$. 缓冲器的变量均为无穷. 系统的稳态状态分布具有下列乘积形式：

$$p(s=x_1, x_2, \cdots, x_M)=c \cdot d(s) f_1(x_1) \cdot f_2(x_2), \cdots, f_M(x_M), \tag{13}$$

其中 $c$ 为使总概率保持为 1 的归一化因子，$d(s)$ 的形式决定于系统的输入. 如输入过程是第一种形式，则 $d(s)=\prod_{i=0}^{k-1} \lambda(i)$. 如为第二种形式，则 $d(s)=\prod_{j=1}^{w} \prod_{i=0}^{k_j-1} \lambda_j(i)$. 如系统是闭网络,则 $d(s)=1$. 而 $f_i(x_i)$ 则决定于第 $i$ 服务中心的种类：

$$\begin{aligned}
&\text{第一类：}\ f_i(x_i)=\left(\frac{1}{\mu_i}\right)^{n_i} \prod_{j=1}^{n_i} e_i x_{ij};\\
&\text{第二类：}\ f_i(x_i)=n_i! \prod_{r=1}^{R} \prod_{l=1}^{u_{ir}} \{[e_{ir} A_{irl}/\mu_{irl}]^{m_{irl}}(1/m_{irl}!)\};\\
&\text{第三类：}\ f_i(x_i)=\prod_{r=1}^{R} \prod_{l=1}^{u_{ir}} \{[e_{ir} A_{irl}/\mu_{irl}]^{m_{irl}}(1/m_{irl}!)\};\\
&\text{第四类：}\ f_i(x_i)=\prod_{j=1}^{n} [e_{ir_j} A_{ir_j m_j}(1/\mu_{ir_j m_j})].
\end{aligned} \tag{14}$$

$e_{ir}$ 是下列平衡方程组的解：

$$\sum_{(i,r)\in E_k} e_{ir}p_{ir,js} + q_{js} = e_{js},\ (j,s)\in E_k,\ k=1,2,\cdots\cdots,w. \tag{15}$$

由式(13),(14),(15)还可以得到各种边缘分布的表达式. 文献[28]证明了如一开系统的输入不依赖于队长,则其中第一、二、四类服务中心的边缘分布与一具有适当利用率 $\rho_i$ 的 $M/M/1$ 服务台相同,其第三类服务中心则相似于 $M/M/\infty$ 系统. 稳态分布的公式还能推广至服务中心的速率依赖于顾客数目的情况. 由于多服务台的服务中心，可以看成服务速率依赖于顾客数目的特殊情况,故第一类服务中心可以具有多个服务台.

这四类服务中心的模型都起源于计算机系统的研究. BCMP 的结果为计算机系统的分析提供了一种工具.

**3. Kelly 网络(随机模型)[30].**

该网络的特点是顾客到达一服务中心后以一定概率插入队列的任意位置，各服务中心可向各位置的顾客提供一定量的服务. 顾客的转移概率可以依赖于其类别. 具体描述如下:

第 $i$ 服务中心的状态表示为 $x_i=(x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{in_i})$,其中 $x_{ij}$ 是 $i$ 中第 $j$ 个顾客的类别;$n_i$ 是第 $i$ 中心顾客的数目. 如 $n_i=0$, 则令 $x_i=e$, 系统的状态 $S=(x_1,x_2,\cdots\cdots,x_M)$. 假设所有的状态均属于一个不可约的链，每个服务台的服务速率为 $a_i(n_i)\mu_i$，其中 $\gamma_i(l,n_i)$ 部分提供给第 $l$ 个顾客，$\sum_{l=1}^{n_i}\gamma_i(l,n_i)=1$.新到达第 $k$ 中心的顾客以概率 $\delta_k(m,n_{k+1})$ 被安插在第 $m$ 位置上(设第 $k$ 中心原有 $n_k$ 个顾客). $\sum_{m=1}^{n_{k+1}}\delta_k(m,n_{k+1})=1$. 第 $j$ 类顾客在第 $i$ 中心完成其服务后以概率 $p_{ik}(j)$ 转移到第 $k$ 中心继续接受服务. 令 $\mu_{ik}(j)=p_{ik}(j)\cdot\mu_i$,对闭网络 $\sum_k\mu_{ik}(j)=\mu_i$,对开网络 $\sum_k\mu_{ik}(j)+\mu_{i0}(j)=\mu_i$，其中 $p_{i0}(j)=\mu_{i0}(j)/\mu_i$ 是第 $j$ 类顾客于第 $i$ 中心完成其服务后离开系统的概率. 在开网络中还假设输入到第 $i$ 中心去的第 $j$ 类顾客组成平均速率为 $\lambda_i(j)$ 的 Poisson 流，这些 Poisson 流是互相独立的. 此外还假设当 $j>0$ 时，$a_i(j)>0$.

Kelly 闭网络的稳态状态分布有下列乘积形式:

$$p(s=x_1,x_2,\cdots,x_M)=C\prod_{i=1}^{M}f_i(x_i), \tag{16}$$

其中 $C$ 为归一化常数. 而

$$f_i(x_i)=\prod_{l=1}^{n_i}\frac{\alpha_i(x_{il})}{a_i(l)}. \tag{17}$$

$\alpha_i(x_{il})$ 是下列方程组的解:

对闭网络:
$$\alpha_i(j)\sum_k\mu_{ik}(j)=\sum_k\alpha_k(j)\cdot\mu_{kl}(j),\quad 1\leqslant i\leqslant M,\ 1\leqslant j\leqslant R; \tag{18}$$

对开网络:
$$\alpha_i(j)\left\{\mu_{i0}(j)+\sum_k\mu_{ik}(j)\right\}=\lambda_i(j)+\sum_k\alpha_k(j)\mu_{ki}(j),\quad 1\leqslant i\leqslant M,\ 1\leqslant j\leqslant R. \tag{19}$$

注意方程组(18)当状态过程不可约时，在相差一个常数因子的意义下有唯一解.

Kelly 开网络如满足下列关系，则其稳态分布存在且可由(16)式表示.

$$\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\left[\sum_{j=1}^{R}\alpha_i(j)\right]^n}{\prod_{l=1}^{n}a_i(l)}<\infty.\qquad 1\leqslant i\leqslant M.$$

(17)式表明 Kelly 网络的稳态分布与各类顾客在服务中心中的排列次序无关.

**4. Kelly 网络(固定路线模型)[31].**

随机型的路线模型（即顾客以概率 $p_{ij}$ 从第 $i$ 服务中心到第 $j$ 服务中心）要求顾客将来的路线完全独立于以前已经过的路线. 因此它不能用来描述顾客在系统中，以随机的方式经过各服务中心一次后即离开此系统等类的情况. Kelly[31] 研究的固定路线网络模型解决了这个问题. 这种模型也适用于随机型路线网络的研究. 在一些附加的限制条件下，该模型还允许顾客所需的服务速率具有任意的分布，且依赖于顾客从前所经过的路线及在其它中心的服务速率，有关细节请参阅文献[31].

## 五、其它方法及其比较

上节叙述了离散事件动态系统的排队网络理论分析方法. 这种方法的主要缺点在于它需要各类概率模型和随机过程论方面的假设，而实际上很难完全满足，这就限制了这种理论分析方法的应用. 针对这种缺点，Denning 和 Buzen 发展了所谓操作分析法 (Operational Analysis). 这种方法不需要有关的概率假设，而用一些可以通过实际观察系统的状态过程验证的假设，由此得到的结果扩大了应用的范围.

当仅须计算系统的平均输出率、顾客的平均等待时间、服务台的平均队长等值时，上述求概率分布的方法就颇嫌复杂. 这时可以采用近年来发展起来的“平均值分析法”(Mean Value Analysis). 这个方法用了 Servik 和 Mitrani 的一个结果[36]，即当顾客到达一个服务站时，系统状态分布恰好等于顾客数目比原来减少一个时系统的稳态状态分布. 这个结论对具有乘积形式的状态分布函数的系统是成立的. 而对其它形式的系统仍是一种近似方法，该方法的优点是计算十分简洁.

最近由哈佛大学何毓琦等人创立了一种将理论分析与仿真技术相结合的方法，称为“扰动分析法”. 这种方法的基本点类似于在连续系统分析中对非线性系统按某特定轨线进行摄动展开而实行线性化的做法. 根据系统扰动的演变，可以得到系统输出相对于系统参数的灵敏度，这对网络的优化无疑是十分重要的. 这种方法比纯粹仿真求梯度的方法可节省大量的计算机时间，避免可能出现的数值计算困难，又不受纯解析方法所碰到的各种假设引起的限制[14],[15]. 因此这种方法在理论上及应用上都很有意义，目前正处于发展阶段

## 六、结　束　语

本文重点介绍了几种主要的模型和这些模型的稳态状态分布在电话系统、通讯网络、

计算机系统和柔性生产系统中的应用。知道了系统的稳态状态分布后不难求得系统的稳态性能，如输出速率、顾客在各服务中心或整个系统的平均队长、逗留时间、等待时间等等。有关的综述性文章有 Lemoine[33]。但该文中关于逗留时间的结论是错误的[34-36]。最近几年关于稳态分布的新成果不多，较多的工作是致力于研究离散事件动态系统中随机过程的性质。

不少实际问题并不能用简单的理论模型来拟合。一个明显的例子是上述诸模型中均假定缓冲器的容器是无限的，而实际上需要研究由于缓冲器容量有限而造成的"阻塞"现象。目前解决这一类问题还要大量地借助于计算机仿真，目前一些专用的语言有 SIMCR-IPT, GPSS 等。根据作者的经验，上述理论公式给出的结果与仿真所得到的数值高度精确地符合，误差一般仅在 1—2% 之内。

计算机系统及各种柔性生产系统有着十分广阔的发展前途。而其优化理论还仅处于初级阶段。可以预见离散事件动态系统的研究将是今后一段时期内最优化研究的一个重要课题。无论是理论上还是实际上都有重大的意义。

## 参 考 文 献


[1] 中国科学院数学研究所运筹室，运筹学，科学出版社，1973.

[2] 王梓坤，随机过程论，科学出版社，1965.

[3] 王梓坤，生灭过程与马尔可夫链，科学出版社，1980.

[4] 徐光辉，随机服务系统，科学出版社，1980.

[5] 钱敏，侯振挺，可逆马尔可夫过程，湖南科学技术出版社，1979.

[6] 徐光辉，随机服务系统理论及其在计算机设计中的应用，计算机应用与应用数学，1975，第 1 期，33—43.

[7] 徐光辉，随机服务系统研究的现状与展望，数学进展，第 10 卷，第 1 期，3—11，1981.

[8] 越民义，Operations Research in China，第九次国际运筹学会议.

[9] Ho Y. C. and Cassandras. C., Computing Costate Variable for Discrete-Event Systems, Proc. IEEE Conf. on Decision and Conrol, 1980, 690—700.

[10] Buzacott, J. A., and Yao D. W., Flexible Manufacturing Systems: A Review of Models, Horking Paper 82-007, Dept. of Industrial Engineering. Univ. of Toronto, (1982).

[11] Buzacott, J. A., and Shanthikumar, J. G., Models for Understanding Flexible Manufacturing Sys-

[12] Denning, P. J. and Buzen, J. P., The Operational Analysis of Queueing Network Models, *ACM*
tems, *AIIE Trans.* **12** (1980), 339—350.
*Computing Surveys*, **10** (1978), 225—261.

[13] Buzen, J. P. and Denning, P. J., Operational Treatment of Queue Distributions and Mean Value Analysis, *Computer Performance*, **1**, (1980), 6—15.

[14] Ho Y. C. and Cao X. R., Perturbation Analysis and Optimization of Queueing Networks, *Journal of Optimization Theory and Application*, **40**(1983), No. 4, 559—582.

[15] Ho Y. C., Cao X. R., and Cassandras C., Infinitesimal and Finite Perturbation Analysis for Queueing Networks, *Automatica*, **19**(1983), 439—445.

[16] Cohen, G., Dubois, D., Quadrat, J. P., Uiot, M., and Chesnay I. L., A Linear-System-Theoretic View of Discrete-event Processes, and its Use for Performance Evaluation in Manufacturing, preprint.

[17] Kleinrock, L., Queueing Systems, **1**, John Willy and Sons, Inc. 1975.

[18] Special Issue on Computer Perfomance Modelling, *ACM Computing Surueys*, **10**(1978), No. 3.

[19] Special Issue on Analytical Queueing Models, *IEEE. Computer*, **13**(1980), No. 4.

[20] Kleinrock, L., Queueing Systems, Vol. 2, John Wiley Sons, Inc. 1978.

[21] Sauer, C. H., and Chandy, K. M., Computer Systems Performance Modeling, Prentice-Hall, Inc. 1981.

[22] Schwartz, M., Computer-communication Network Design and Analysis, Prentice-Hall, Inc. 1977.

[23] Jackson, J. R., Networks of Waiting Lines, *Oper. Res.* **5**(1957), 518—521.

[24] Gordon, W. J., and Newell, G. F., Closed Queueing Systems with Exponential Servers, *Oper. Res.* **15**(1967), 254—285.

[25] Beutler, F. J., and Melamed, B., Decomposition and Customer Streams of Feedback Networks of Queues in Equilibrium, *Oper. Res.* **25**(1978), No. 6, 1059—1072.
[26] Jackson, J. R., Jobshop-like Queueing Systems, *Management Sci.* **10**(1983), 131—142.
[27] Buzen, J. P., Comptational Algorithms for Closed Queueing Networks with Exponential Servers, *Commun. ACM* **16**(1973), 527—531.
[28] Baskett, F., Chandy, K. M., Muntz, R. R., and Palacios F. G., Open, Closed, and Mixed Networks of Queues with Different Classes of Customers, *JACM* **22**(1975), 248—260.
[29] Cox, D. R., A Use of Complex Probabilities in the Theory of Stochastic Processes, Proc. Cambridge Phil. Soc. **51**(1955), 313—319.
[30] Kelly, F. P., Networks of Queues with Customers of Different Types, *J. Appl. Prob.*, **12**(1975), 542—554.
[31] Kelly, F. P., Networks of Queues, *Adv. Appl. Prob.*, **8**(1976), 416—432.
[32] Barbour A. D., Networks of Queues and the Method of Stages, *Adv. Appl. Prob.*, **8**(1976), 584—591.
[33] Lemoine, A. J., Networks of Queues—— A Survey of Equilibrium Analysis, *Management Sci.* **24**(1977), 464—481.
[34] Mitrani, I., A Critical Note on a Result by Lemoine, *Management Sci.* **25**(1979), 1026—1027.
[35] Simon, B., and Foley, R. D., Some Results on Sojourn Times in Acyclic Jackson Networks *Management Sci.* **25**(1979), 1027—1034.
[36] Servik, K. C., and Mitrani, I., The Distribution of Queueing Network States at Input and Output Instants, *J. of ACM*, **28**(1981), 358—371.

# DISCRETE EVENT DYNAMIC SYSTEMS

CAO XIREN

*(China University of Sciences and Technology)*

## ABSTRACT

The theory of discrete-event dynamic systems (DEDS) abounds in applications. It plays a very important role in the study of many fields, such as computer networks and flexible manufacturing systems. It is sure to be an important branch of control theory. This paper mainly provides a survey of several queueing network models for DEDS and the equilibrium state distributions of these models. Examples are given to illustrate the modelling of computer networks and flexible manufacturing systems by DEDS.