第20卷 第5期 自动化学报 Vol. 20, No. 5
1994年9月 ACTA AUTOMATICA SINICA Sep., 1994

DEDS对象化高级Petri网模型研究——柔性生产线对象化高级Petri网模型[1)]

姜旭升
(宁波大学计算机系 宁波 315211)

摘 要

在加色网基础上，提出一种新的扩展 Petri 网模型. 该模型具以下特点：对进程演化的有序结构建立偏序集数据抽象，使网络的几何结构与代数运算脱离具体进程特征；使用谓词集对加入变迁的 token 进行覆盖，可以集中描述物理事件集的层次逻辑结构；能方便有效地描述非固定流程生产系统.

关键词： Petri 网络，加色网，对象化描述，DEDS，柔性生产线.

1 引言

Petri 网络[1,2]作为 FMS 建模分析的有力工具正日益受到重视. 但实际系统的 Petri 网络模型往往过于庞大. 其原因之一是 Petri 网络不支持进程个性抽象. 加色网[3,4]对各不同进程标以不同颜色，以多重集代数方式合并 P/T 网络的位置与变迁，缩小了网络的几何规模. 加色网模型依赖简单集合枚举各进程所有可能的演化方式，对 FMS 这类本质上任务多变，流程不固定的服务系统建模仍会导致规模庞大. 这表明加色网对进程个性的抽象既缺乏结构性，又过于简单化. 本文提出的"对象化高级 Petri 网"采用偏序集对各进程的个性作独立的、对象化描述，并利用在这种数据类型上定义的谓词集结构表示变迁所代表的物理事件集，使网上的各种运算脱离具体进程，从而能有效地描述非固定流程系统.

2 基本定义

定义 2.1. 设D是任意集，$\mathrm{N}=\{0,1,2,\cdots\}$.

1) 设 $n\in\mathrm{N}$, $M\subseteq D^n$, 称 $f:M\to D$ 是D上的一个部分运算 (partial-operation). 设Φ是D的某些部分运算之集合，则 $A=(D,\Phi)$ 称为一个"代数". 设 $d\in D$是D的

1) 国家自然科学基金资助项目.

本文于1992年6月9日收到

一个元素，则它可以看成是空集到D的一个映射.

2) 设X是D上的一个变量集，定义A上的项集合 $\mathscr{T}_A(X)$ 为以下表达式所构成的最小集合：

i) $X \subseteq \mathscr{T}_A(X)$;

ii) 如果 $t_1, t_2, \cdots, t_n \in \mathscr{T}_A(X)$，并且 $f: D^n \to D$, $f \in \Phi$，则 $f(t_1, t_2, \cdots, t_n) \in \mathscr{T}_A(X)$. 特别地，对 $d \in D; d \in \Phi$，则d是一个"项".

3) 定义 $\mathscr{T}_{A,S}(X)$ 为属于S集的项集合，即 $S \subseteq D$, X是D上的变量组，$\mathscr{T}_{A,S}(X) \subset Pow(D \times S)$. 用$X$表示变量组，$x$表示单个变量. $\mathscr{T}_{A,S}(X)$中的元素记为$term_{A,S}(X)$.

定义 2.2. 设D为任意集，$N = \{0, 1, 2, \cdots\}$, $\mathrm{BOOLEAN} = \{0, 1\}$.

1) $\pi(D) = \{pr \mid pr: D \to \mathrm{BOOLEAN}\}$; $\pi(D)$ 是D上的所有单元谓词之集合.

2) $\mu(D) = \{M \mid M: D \to N\}$; $\mu(D)$ 是D上所有多重集之集合. 对于 $M: D \to N$, 记 $Support(M) = \{d \mid d \in D, M(d) > 0\}$. 如果 $Support(M) = (d_1, d_2, \cdots, d_n)$，则记 $M = [(d_1, k_1)(d_2 k_2) \cdots (d_n k_n)]$, $M(d_i) = k_i \in N, i = 1, 2, \cdots, n$.

3) $A_D = \langle D, \Phi(D) \rangle$,

4) $A_\pi = \langle \pi(D), \Phi(\pi(D)) \rangle$,

5) $A_\mu = \langle \mu(D), \Phi(\mu(D)) \rangle$.

6) $A_{\pi\mu} = \langle \mu(D) \cup \mu(\pi(D)), \Phi(\mu(D) \cup \mu(\pi(D))) \rangle$，其中 $\mu(\pi(D))$ 表示D上所有谓词之多重集集合.

定义 2.3. 设D是任意集，

$M \succ M_p$ 系指：

i) $M \in \mu(D)$; $M_p \in \mu(\pi(D))$, $M_p = [(pr_1 k_1)(pr_2 k_2) \cdots (pr_n k_n)]$, $pr_i \in \pi(D)$, $i = 1, 2, \cdots, n$;

ii) $\exists m_1, m_2, \cdots, m_n, m' \in \mu(D)$，使得 $m_1 + m_2 + \cdots + m_n + m' = M$，并且$\forall i \in (1, 2, \cdots, n)$; $\forall d \in m_i$，有 $pr_i(d) = 1$, $pr_i \in M_p$; $|m_i| \geqslant M_p(pr_i)$. $|m_i|$ 指多重集 m_i 中元素总数.

实际上，$M \succ M_p$ 表示M中含有种类及数量都足够多的元素满足 M_p 中各项谓词在性质及数量上的要求.

定义 2.4. 设D是任意集，$M \prec M_p$ 是指

i) $M \in \mu(D), M_p \in \mu(\pi(D))$;

ii) $\forall d \in M, \exists pr \in M_p$，使得 $pr(d) = 1$，且有

$$\sum_{\forall d \in M, pr(d)=1} M(d) \leqslant M_p(pr). \tag{1}$$

定义 2.5. 设D是任意集，$M \cong M_p$ 系指

i) $M \in \mu(D), M_p \in \mu(\pi(D))$;

ii) 设 $M_p = [(pr_1 k_1)(pr_2 k_2) \cdots (pr_n k_n)]$, $pr_i \in \pi(D), k_i \in N, i = 1, 2, \cdots, n$，如果 $\exists m_1, m_2, \cdots, m_n \in \mu(D)$，使 $m_1 + m_2 + \cdots + m_n = M$，并且 $\forall i \in (1, 2, \cdots, n)$, $\forall d \in m_i$ 有 $pr_i(d) = 1$; $|m_i| = M_p(pr_i)$.

3 基本运算

根据定义 2.3 显然有以下命题:

命题 3.1. 设D是任意集，$M \in \mu(D)$，$M_p \in \mu(\pi(D))$，$S_p = Support(M_p)$，S_p 中的谓词互不相容，即 $\forall pr, pr' \in S_p$，如果 $pr \neq pr'$，则 $pr \wedge pr' = 0$，$n = |S_p|$. 按 S_p 中的谓词将M划分为以下 $n+1$ 个互不相交的等价类之和 $m_1, m_2, \cdots, m_n$，$m' \in \mu(D)$，对 $d, d' \in M$ $d \equiv d' \Longleftrightarrow (\exists pr \in S_p \Rightarrow pr(d) \wedge pr(d') = 1) \vee (\exists pr \in S_p \Rightarrow pr(d) \vee pr(d') = 1)$，$m_1, m_2, \cdots, m_n$ 分别是属于 S_p 中各谓词的等价类，则 $M \succ M_p$ 的充要条件为 $\forall i \in (1, 2, \cdots, n)$，$|m_i| \geqslant M_p(pr_i)$.

定义 3.1. 设 $M \in \mu(D), M_p \in \mu(\pi(D))$，$D$ 是任意集，$M - M_p \triangleq M - M'$. 其中 $M' \in \mu(D), M' \leqslant M$ 并且 $M' \cong M_p$.

4 对象化高级 Petri 网的定义

定义 4.1. 设Σ是有限集，其元素称为原子. 一个 *token* 定义为: $(nodes, \mathbf{r})$. 其中

i) $nodes$: 一个偏序集，$\max(nodes)$ 唯一;

ii) $\mathbf{r}: nodes \to \Sigma$.

偏序集 $nodes$ 确定了进程演化各阶段的有序结构. 关系 $\mathbf{r}$ 给 $nodes$ 确定的偏序图之每一个节点标上Σ中的原子. 每个原子可能是由 Petri 网上的位置与时间量所组成的二元对. 它表示某进程在此位置(资源)上所停留的时间.

定义 4.2. 一个对象化高级 Petri 网 (Object-Oriented High-Level Petri Nets) Ω 由以下诸元确定:

$$(P, T, F, \Sigma, D, D_0, PE, C, \lambda, \gamma, K, M_0). \tag{2}$$

P: 位置集; T: 变迁节集; $F \subset T \times P \cup P \times T$，有向弧集，并且 $\forall p \in P$，$\exists t \in T \Rightarrow ((p,t) \in F \vee (t,p) \in F)$; $\forall t \in T, \exists p \in P \Rightarrow ((p,t) \in F \vee (t,p) \in F)$.

Σ: 有限原子集合; $D = \{(nodes, \mathbf{r}) | nodes$: 偏序集，$\max(nodes)$ 唯一; $\mathbf{r}: nodes \to \Sigma\}$，$D$是$\Sigma$上所有 token 之集合; $D_0 \subset D$，初始 token 集; $PE \subset \pi(D)$，D上的某个单元谓词集; $C: T \to Pow(\mu(PE))$; $C(t): t \longmapsto \{M_p^{(1)}, M_p^{(2)}, \cdots, M_p^{(n)}\}$; $\lambda: P \times T \to \mathscr{T}_{A_{\pi\mu}, \mu(PE)}(x)$，$x \in \mu(PE)$; $\lambda(p, t)$: $(p, t) \longmapsto term_{A_{\pi\mu}, \mu(PE)}(x)$; $\gamma: T \times P \to \mathscr{T}_{A_{\pi\mu}, \mu(D)}(X), X \in \mu(PE) \times \mu^n(D)$，$n \in N$; $\gamma(t,p): (t,p) \longmapsto term_{A_{\pi\mu}, \mu(D)}(x_0, x_1, \cdots, x_n), n = |^{(p)}t|$，$x_0 \in \mu(PE)$，$x_1, x_2, \cdots, x_n \in \mu(D)$，其中 $^{(p)}t$ 表示变迁节 t 的输入位置集; $K: P \to \mu(PE)$; $K(p): p \longmapsto M_p \in \mu(PE)$，$K$是各位置上的标识容量; $M_0: P \to \mu(D_0)$; $M(p): p \longmapsto M \in \mu(D)$，$M_0$ 称为网络Ω的初始标识.

定义 4.3. 设 $\Omega = (P, T, F, \Sigma, D, D_0, PE, C, \lambda, \gamma, K, M_0)$ 为一对象化高级 Petri 网(简称 O-net); $t \in T$，其输入位置集 $^{(p)}t = \{p_1, p_2, \cdots, p_k\}$，输出位置集 $t^{(p)} = \{s_1, s_2, \cdots, s_q\}$; M是Ω的一个标识. 如果 $\exists c \in C(t)$ 使以下条件同时成立:

i) $\forall p \in {}^{(p)}t, M(p) \succ \lambda(p,t)(c)$, (3)

ii) $\exists\{M'(p_1), M'(p_2), \cdots, M'(p_k)\}$, $M'(p_i) \cong \lambda(p_i,t)(c), i = 1,2,\cdots,k$, (4)

iii) $\forall s \in t^{(p)}/{}^{(p)}t, \gamma(t,s)(c, M'(p_1), M'(p_2), \cdots, M'(p_k)) + M(p) \prec K(s)$, (5)

iv) $\forall p \in t^{(p)} \cap {}^{(p)}t$, $M(p) + \gamma(t,p)(c, M'(p_1), M'(p_2), \cdots, M'(p_k)) - M'(p) \prec K(p)$, (6)

则称 t 在M下可以引发 (enabled)．引发时的标识演化方程如下：$\forall p \in P$,

$$M_1(p) = \begin{cases} M(p) - M'(p), \forall p \in {}^{(p)}t/t^{(p)}; \\ M(p) + \gamma(t,p)(c, M'(p_1), M'(p_2), \cdots, M'(p_k)), \forall p \in t^{(p)}/{}^{(p)}t; \\ M(p) + \gamma(t,p)(c, M'(p_1), M'(p_2), \cdots, M'(p_k)) - M'(p), \forall p \in {}^{(p)}t/t^{(p)}; \\ M(p), \text{其它 } p. \end{cases} \tag{7}$$

记作 $M[t(c) > M_1$.

由定义 4.3 可以看出，O-net 的演化过程中含有 token 选择多重集 M'，它使得变迁引发具有多种可能的结果，因而一个有界的 O-net 等价于一个非确定性有限自动机．但它避免了在网络上限定各进程的特征，从而能有效地描述非固定流程系统．M' 的选择可以体现多种调度规则．

5 算例

例．如图 1 所示的柔性加工系统由两台加工中心 M_1, M_2，一个输入货仓 WH_1，一个输出货仓 WH_2，一辆 AGV，两个 I/O 缓冲区 B_1, B_2 组成．

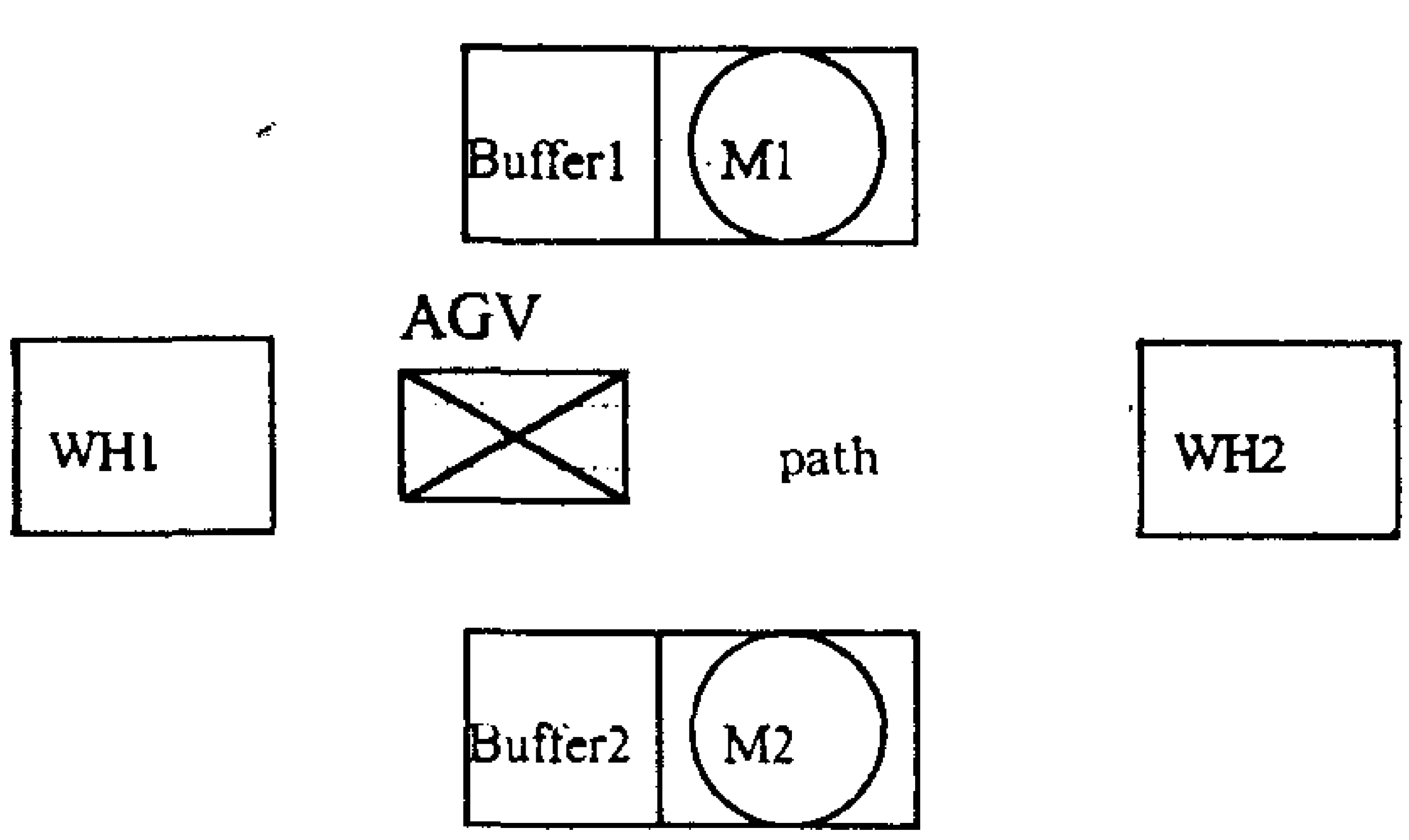

图 1 柔性制造系统

运行假定如下：

1) AGV 每次能将一个工件在任两个地点间传送．

2) M_1, M_2 每次各自只能加工一个工件．

3) 两个缓冲区容量均为 n.

4) WH_1, WH_2 之容量不限．

5) 有 J 类工件，加工路径不限．

根据该 FMS 的系统结构，可以画出其 O-net 的网络结构(见图2)．

代数结构如下：

1) token 的构造

i) $\Sigma = \{W_1, W_2, \cdots, W_J, p_1, p_2\}$; $W_1, W_2, \cdots, W_J$: 工件名．

ii) token 结构($nodes$, r)需要由工件的具体性质加以确定．例如工件名为 W_1 的工件可能具有以下的 token 结构(以 Lisp-list 形式表示)：$(W_1((p_1p_2)(p_2p_1))(p_2(p_1p_2)))$. p_1, p_2 表示位置名．

2) 按工件集合确定D与 D_0.

3) 谓词集 $PE = \{U, V, pr_1, pr_2, pr_3, pr_4, pr_5, pr_6\}$. 各谓词定义为：$U$，永真；$V$，

永假；pr_1, M_1 可加工；pr_2, M_2 可加工；$pr_3 = pr_1 \wedge pr_2$；$pr_4 = pr_1 \wedge (\neg pr_2)$；$pr_5 = (\neg pr_1) \wedge pr_2$；$pr_6 = (\neg pr_1) \wedge (\neg pr_2)$。根据以上定义及 token 的数据结构，不难写出这些谓词的具体函数形式.

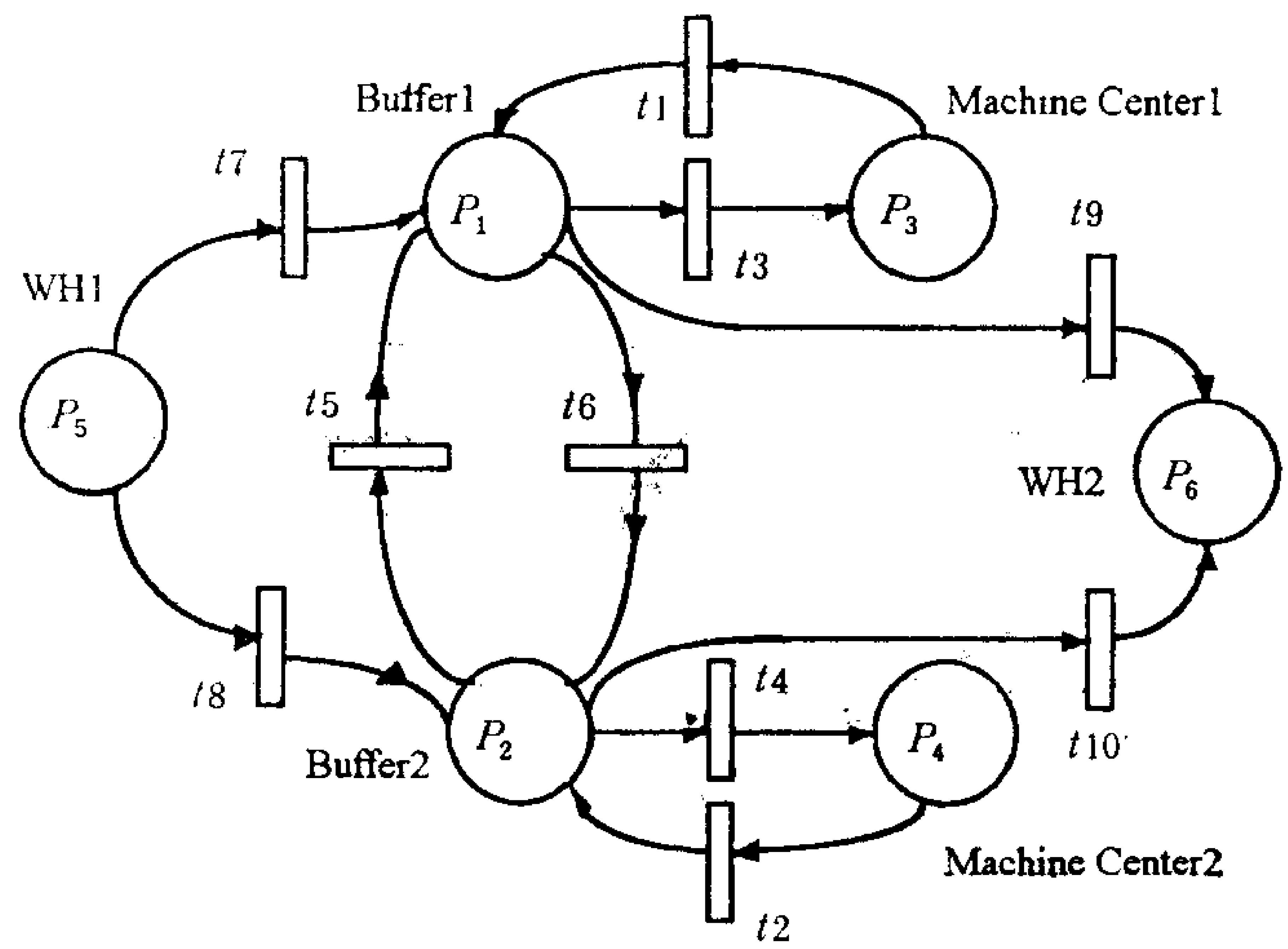

图 2 O-net 网络结构

4) 各变迁节上的谓词多重集 $C(t)$.

$C(t_1) = \{[(pr_1 1)]\}, t_1$:把一个工件由 M_1 卸到 B_1;$C(t_2) = \{[(pr_2 1)]\}, t_2$: 把一个工件由 M_2 卸到 B_2; $C(t_3) = \{[(pr_1 1)]\}$, t_3: 把一个工件由 B_1 装上 M_1; $C(t_4) = \{[(pr_2 1)]\}$, t_4: 把一个工件由 B_2 装上 M_2; $C(t_5) = \{[(pr_1 1)]\}, t_5$: 把一个工件由 B_2 运到 B_1，这个工件当然应具备性质 pr_1; $C(t_6) = \{[(pr_2 1)]\}$, t_6: 把一个工件由 B_1 运到 B_2; $C(t_7) = \{[(pr_1 1)]\}$, $C(t_8) = \{[(pr_2 1)]\}$, t_7, t_8: 分别把一个工件由 WH_1运到 B_1 或 B_2 上; $C(t_9) = C(t_{10}) = \{[(pr_6 1)]\}, t_9, t_{10}$: 分别把一个成品由 B_1 或 B_2 运送到 WH_2.

5) 弧上的运算 λ.

根据定义 4.2. 对本例有 $\forall (p, t) \in P \times T$, $\lambda(p, t) = id$, $id: id(x) = x$, $\forall x \in \mu(PE)$.

6) 运算 $\gamma(t, p)$.

参照图 3,4,规定 $\gamma(t,p)$ 对 token 的结构起变换作用，它可依据 token 的数据结构与变迁在系统中的物理意义来加以一般性的定义. 对本例的 (t_1, p_1)，采用 Lisp 语言规范，$\gamma(t_1, p_1)(c, d)$ 可表示为

```
(Append (List (car d))(cdr (filter '(p1)(cdr d))).
```

其中 d 表示由 M_1 卸到 B_1 上的某工件. 函数 filter 定义为

```
(defun filter(x y)
  (cond((equal(cdr y)nil)nil)
    (T(let*((stagel(car y))
  (temp(mapcan #'lambda(z)
```

```
            (if(member(car z)x)
              (list z)nil)stagel))
          (append temp(filter (cdar temp)(cadr y)))))))).
```

如一个个性为$(W_1((p1p2)(p2p1))((p2)(p1p2)))$ 的 token 经 $\gamma(t_1p_1)$ 变换后，其个性变为 $(W_1(p2))$。

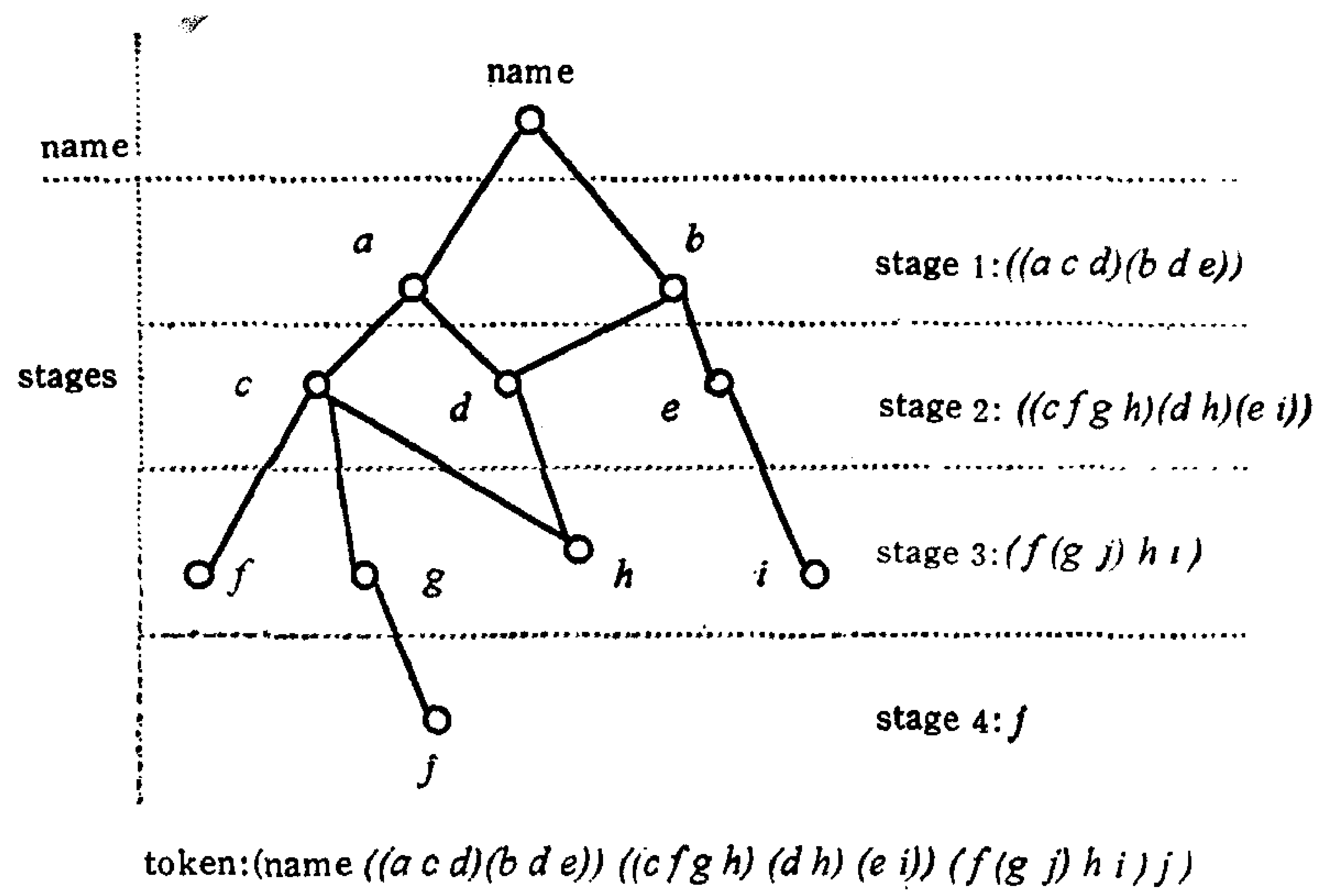

图 3 token 结构

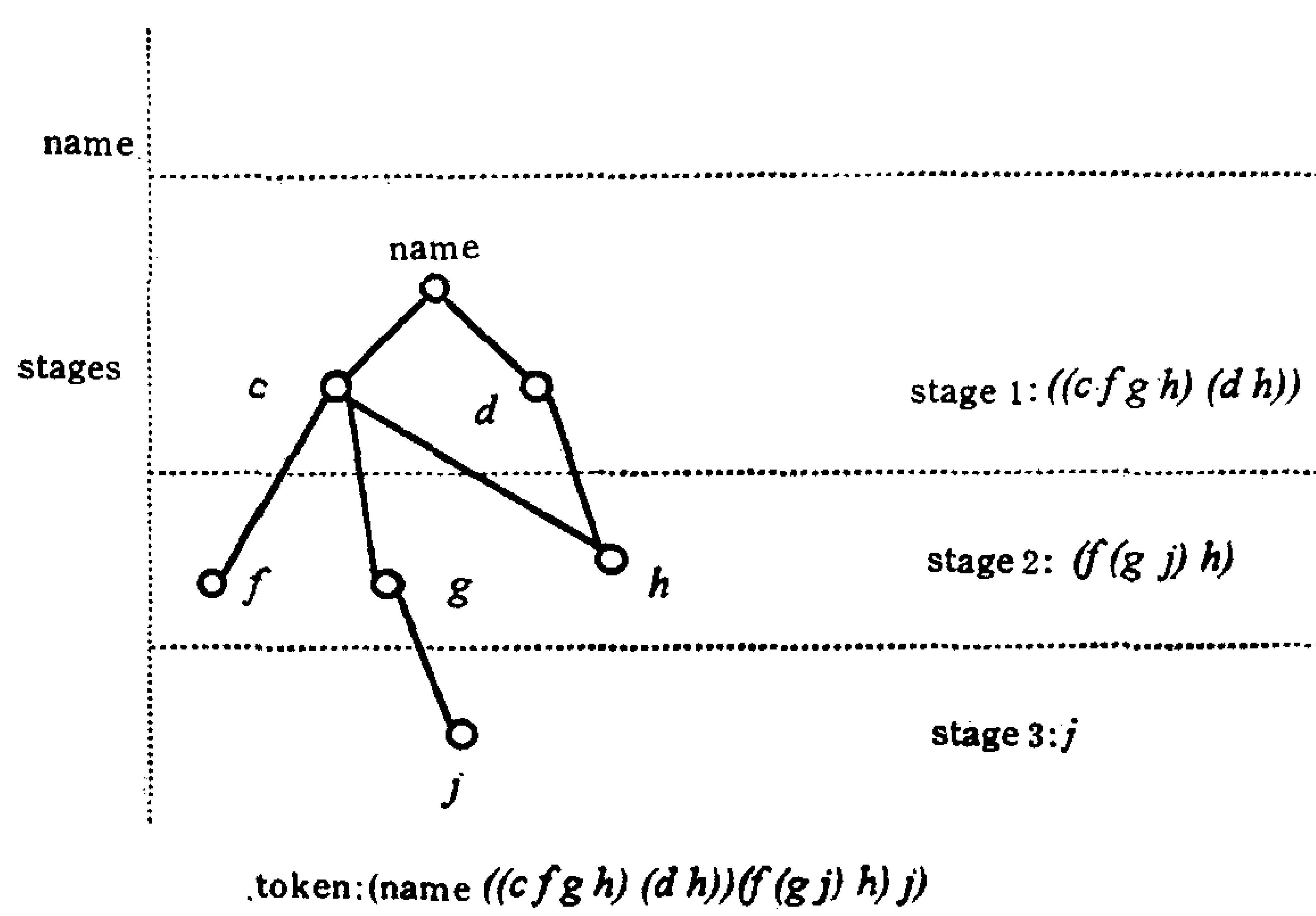

图 4 变换后的 token 结构

7）位置上的 token 容量 $K(p)$。

$K(p_1)=[(UN)]$，此式表示位置 p_1 上 token 的性质不受任何限制，但数目不超过 n; $K(p_2)=K(p_1)$; $K(p_3)=[(pr_1 1)]$，此式表明位置 $p_3(M_1)$ 上最多只能有一个具 pr_1 个性的 token; $K(p_4)=[(pr_2 1)]$; $K(p_5)=[(U\omega)]$，ω代表无限量;$K(p_6)=$

$[(pr_6\omega)]$.

以上就是图 1 所示 FMS 的 O-net 模型. 为清楚起见, 没有在网上表示 $t_5 \sim t_{10}$ 各变迁节之间的引发互斥性.

由本例看, O-nets 模型对 FMS 有良好的对象化描述特性. 网络的几何结构与代数运算函数的建立均独立于具体的进程个性. 当然在 O-nets 上, 标识不具有在状态空间中的可度量性,所以可达性,不变量等在 O-nets 上难以有简单的定义.

致谢: 本文工作在何善堉、郑应平研究员指导下完成,作者在此表示感谢.

参　考　文　献

[1] Peterson J L. Petri net Theory and the Modeling of Systems. Englewood Cliffs, N. J: Prentice-Hall, 1981.

[2] Reisig W. Petri Nets. Newyork: Springer-Verlag, 1985.

[3] Jesen K. Coloured Petri Nets. Advances in Petri Nets 1986. Lecture Notes on Computer Science, vol. 254, part I, W. Brauer et. al ed. Newyork: Springer-Verlag, 1987, 248—299.

[4] Jesen K, Coloured Petri Nets: A High Level Language for System Design and Analysis. Advances in Petri Nets 1990, Lecture Notes on Computer Science, Newyork: Springer-Verlag, 1991, **483**:342—416.

MODELING DEDS WITH OBJECT-ORIENTED HIGH-LEVEL PETRI NETS —OBJECT-ORIENTED HIGH-LEVEL PETRI NET MODELS OF FMS

JIANG XUSHENG

(*Department of Automation and Computer Science, University of Ningbo* 315211)

ABSTRACT

In this paper, a new extension to Colored Petri net models (object-oriented high-level Petri nets) is presented with the following features: describing the individualities of tokens (processes) with partially-ordered sets, making the geometric and algebraic structures and operations independent of the concrete individualities of processes; covering the tokens with predicates, capable of mode ling the logical hierarchies of the set of physical events in one predicate-multisets algebra; capable of modeling complex free-path workshop system in a compact form.

Key words: Petri nets; colored petri nets; object-oriented models; DEDS; FMS.

姜旭升 1983 年毕业于西安公路学院自动控制系，1988 年考入中科院自动化所攻读硕士，博士学位. 1993 年获工学博士学位. 现任宁波大学计算机系讲师. 研究方向为 DEDS 及复杂系统理论.

(上接第 640 页)

金以慧	金元郁	佟明安	肖德云	陆汝龄	陆维明	周思永	周其节
周鸿兴	周春晖	郑毓蕃	郑君里	郑　峰	郑应平	郑维敏	郑大钟
郑丕谔	欧阳楷	林建祥	林尧瑞	林行刚	林作铨	林元烈	岳超源
范玉顺	法京怀	庞国仲	易继锴	易允文	茅于杭	罗宗虔	罗乔林
罗曼丽	段广仁	钟秋海	钟宜生	钟延炯	项国波	施颂椒	赵希人
赵南元	赵克友	赵致琢	赵　怡	赵似兰	洪奕光	洪家荣	姚增起
姚　蓝	姚　郁	俞铁成	俞　斌	姜启源	胡保生	胡文瑾	胡恒章
胡寿松	胡庭姝	胡维礼	胡　军	胡建崑	胡道元	胡顺菊	贺星剑
贺　军	贺建勋	谈大龙	倪茂林	倪先锋	秦化淑	郭　雷	郭余庆
郭　波	顾启泰	顾基发	顾兴源	顾发及	徐树方	徐光佑	徐衍华
徐立鸿	徐道义	徐建闽	徐德民	贾培发	贾沛璋	贾英民	高为炳
高东杰	高　龙	高玉琦	祝明发	钱大群	柴天佑	席裕庚	袁震东
袁保宗	袁曾任	涂序彦	涂　健	涂菶生	夏绍伟	夏小华	夏国洪
黄　琳	黄秉宪	黄志同	黄心汉	黄俊钦	黄圣国	黄泰翼	阎醒民
阎平凡	曹晋华	曹曙光	曹　立	曹长修	崔保民	龚　伟	龚　俭
韩忠昭	韩志刚	韩曾晋	韩正之	韩京清	韩慧君	韩文秀	舒迪前
程　侃	程　一	程民德	程　鹏	程兆林	傅佩琛	蒋慰孙	蒋昌俊
疏松桂	葛成辉	彭群生	彭商贤	谢绪凯	谢惠民	谢新民	谢胜利
裘聿皇	解学书	雷渊超	雍炯敏	褚家晋	熊光楞	廖炯生	廖晓昕
谭维康	谭　民	瞿寿德	蔡自兴	蔡季冰	蔡鹤皋	蔡茂诚	缪尔康
滕云鹤	潘士先	潘　弘	薛劲松	薛景瑄	戴汝为	戴冠中	戴国忠
戴忠达	魏湘曙	霍　伟	常文森	董世海	焦秀成	楚天广	张钟俊
徐南英	徐文立	袁著祉					