第13卷第3期
1996年6月
控制理论与应用
CONTROL THEORY AND APPLICATIONS
Vol. 13, No. 3
Jun., 1996

避免FMS死锁的控制策略*

邢科义　许祥秦　胡保生
(西安电子科技大学应用数学系·西安,710071)　(西安交通大学系统工程研究所·西安,710049)

摘要:本文利用FMS的Petri网模型讨论系统的死锁问题.给出了系统死锁的必要充分条件,提出了避免系统死锁的反馈控制策略.这种策略对系统的限制小,在许多情形下是最优的.

关键词:FMS;Petri网;死锁;控制策略

1 引　言

在柔性制造系统(FMS)中,各种工件在离散时间上进入系统,系统对它们进行并行加工处理.各加工过程共享有一定数量的资源,如机器,托盘,存贮器等,每种工件有自己的特殊加工路径,即资源需求序列.在加工过程中,各种工件的并行处理流竞争着有限的资源,这可能导致死锁情形的发生[1,2].文[1,2]都以Petri网(PN)作为模型,讨论FMS的死锁问题,分别提出了能避免系统死锁的控制策略.文[2]的策略比文[1]的策略对系统的限制要小,但都不是最小限制的.一个最小限制的避免系统死锁的策略应在防止系统死锁的同时允许资源利用极大化.

本文建立具有并发竞争处理流的FMS的PN模型,讨论系统死锁的条件,提出了一种避免系统死锁的反馈控制策略.这种策略在多数情况下是最小限制的.

2 系统及其PN模型

本文讨论的FMS具有m种资源$r_1,r_2,\cdots,r_m$和n种产品$q_1,q_2,\cdots,q_n$.加工路径$\sigma(q_i)$是加工q_i型产品所需的资源列.加工过程中产品既不结合,又不分枝;既不会由多种产品结合为一种新产品,也不会由一种分解为几种.每个加工过程就是资源的一次利用过程,每次只利用一个资源.设可利用的r_i种资源数量为C_{r_i}.我们用PN给系统建模.关于PN的定义、记号等请参考[1,3].

加工路径$\sigma(q_i)$可表为变迁(transition)和位置(place)组成的一条路:$t_0^ip_0^it_1^ip_1^i\cdots t_{L_i+1}^ip_{L_i+1}^i$.其中$p_0^i$和$p_{L_i+1}^i$中的托肯(token)分别表示未加工和完成加工的工件,p_j^i对应一个加工过程,$j=1,\cdots,L_i$.给每种资源r设置一个位置a_r.加工过程p_j^i利用资源,记作$R(p_j^i)=r$,用从a_r到t_j^i和t_{j+1}^i到a_r的弧表示.整个生产过程PN模型为$G=(P,T,I,O,m_0.)$,其中　$P=P_r\cup P_p, P_r\cap P_p=\varnothing$,

$P_p=\{p_j^i, i=1,\cdots,n, j=0,1,\cdots,L_i+1\}$是生产过程位置集,

$P_r=\{a_{r_i}, i=1,\cdots,m\}$是资源位置集,

$T=\{t_j^i, i=1,\cdots,n, j=0,1,\cdots,L_i+1\}$是变迁集,

* 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室科研基金和西安电子科技大学科研基金资助项目.
本文于1994年5月13日收到,1995年10月17日收到修改稿.

$$I = \{(p^i_j, t^i_{j+1}), i = 1,\cdots,n; j = 0,\cdots,L_i\} \cup \{(a_{R(p^i_j)}, t^i_j), i = 1,\cdots,n; j = 1,\cdots,L_i\},$$

$$O = \{(t^i_j, p^i_j), i = 1,\cdots,n; j = 0,\cdots,L_i + 1\} \cup \{(t^i_{j+1}, a_{R(p^i_j)}), i = 1,\cdots,n; j = 1,\cdots,L_i\},$$

$$m_o(p) = \begin{cases} C_r, & p = a_r \in \{a_{r_i}, i = 1,\cdots,m\}, \\ 0, & \text{其它}. \end{cases}$$

令 $$\overline{T} = \{t^i_j, i = 1,\cdots,n, j = 1,\cdots,L_i\}.$$

对每个变迁 $t \in T$，用 ${}^pt$ 和 ${}^rt$ 分别表示 P_p 中 t 的输入位置和 P_r 中的输入位置. 当 $A \subseteq T$ 时，令 ${}^pA = \bigcup_{t\in A} {}^pt$. 类似地可定义，$t^p, t^r, {}^rA, A^r, A^p$ 等.

变迁 t 称为过程使能(enabled)的，如果 $m({}^pt) \geqslant 1$. 称 t 是资源使能的，如果 $m({}^rt) \geqslant 1$. 过程和资源同时使能的变迁才能引发(fire). t 的引发使得系统从状态 m 转变为 m'，记作 $m[t > m'$，其中 m' 是在 m 下从 ${}^rt, p_t$ 中分别移去一个托肯，而给 t^r, t^p 分别增加一个托肯而得到. 用 $T_e(m)$ 表示在状态 m 下过程和资源同时使能的变迁集. 用 $RM(G, m_0)$ 表示从 m_0 可到达的 G 的所有状态之集.

3 死锁结构与死锁条件

在生产过程 PN 模型 G 中，一个变迁集 $D \subseteq T$ 称为处于状态 m 下的死锁中，如果 1) 所有 D 中的变迁在 m 下是过程使能的；2) D 中没有变迁能在从 m 可达的任何状态 m' 下资源使能.

对 PN, G 的每个可达状态 m，都存在唯一极大的变迁集 $D(m)$，它处在 m 的死锁之中.

定理 1 设 m 是生产过程 PN 模型 G 的可达状态，$D(m) \neq \Phi$，则 $D(m)$ 具有性质：

1) $m({}^pt) \geqslant 1, t \in D(m)$；

2) $D(m) \subseteq \overline{T}$；

3) $R({}^pD(m)) \supseteq R(D(m)^p)$，其中 $R({}^pD(m)) = \{R({}^pt) | t \in D(m)\}$, $R(D(m)^p) = \{R(t^p) | t \in D(m)\}$；

4) 对任何一种资源 $r \in R(D(m)^p)\}$ 都有 $\sum_{t\in D(m)} m({}^pt, r) = C_r$，其中当 $R({}^pt) = r$ 时，$m({}^pt, r) = m({}^pt)$，否则 $m({}^pt, r) = 0$.

证 1) 和 2) 是显然的. 设 $r \in R(D(m)^p)$，则存在 $t \in D(m)$ 使得 $r \in D(t^p)$, $m(a_r) = 0$，而且有 $t_1, t_2, \cdots, t_k \in T$ 使得 $m({}^pt_i) \geqslant 1, R({}^pt_i) = r, i = 1,\cdots,k, \sum_{i=1}^{k} m({}^pt_i) = C_r$. 若有 t_i 能在某状态 $m' \in RM(G, m)$ 下引发，使得 $m'[t_i > m''$，则 $m''(a_r) = 1$. 于是 t 在 m'' 下资源和过程使能. 这与 $t \in D(m)$ 矛盾. 故 $t_1, \cdots, t_k$ 都处在 m 的死锁之中，$r \in R({}^pD(m))$. 3), 4) 得证.

定理 2 在生产过程 PN 模型 $G = (P, T, I, O, m_o)$ 中，设 $m \in RM(G, m_o)$，如果非空变迁集 $T_1 \subseteq \overline{T}$ 满足：

1) 对任意的变迁 $t \in T_1$, $m({}^pt) \geqslant 1$；

2) $R({}^pT_1) = R(T_1^p)$；

3) 对任何一种资源，$r \in R({}^pT_1)$, $\sum_{t\in T_1} m({}^pt, r) = C_r$.

则 T_1 处于状态 m 的死锁之中.

证　由 1) 知，每个变迁 $t \in T_1$ 在状态 m 下是过程使能的. 设 $R(t^p) = r$，则由 2) 和 3) 知，$m(a_r) = 0$. 故 t 在 m 下不是资源使能的. 当 $t_1 \notin T_1$ 时，若 $R(t_1^p) \notin R(T_1^o)$，由 2) 知，t_1 的引发不改变 ${}^pT_1, {}^rT, T_1^p$ 和 T_1^r 中各位置的托肯数，但若 $R(t_1^p) \in R(T_1^p)$ 时，t_1 在任何状态 $m' \in RM(G,m)$ 下不是资源使能的. 故 T_1 处在标识 m 下的死锁之中.

定理 3　给定生产过程的PN模型 $G, m \in RM(G,m_0)$. 如果 $D(m) \neq \varnothing$，则存在一个变迁集 $D' \subseteq D(m) \backslash \{t_1^i, i = 1,2,\cdots,m\}$ 使得：

1) $m({}^pt) > 0, t \in D'$；

2) $R({}^pD') = R(D'^p)$；

3) 对任何一种资源 $r \in R({}^pD')$ 有 $\sum_{t \in D'} m({}^pt, r) = C_r$.

证　因 $D(m) \neq \varnothing$，则 $T_1 = D(m) \backslash \{t_1^i, i = 1,\cdots,m\} \neq \varnothing$. 若 $R({}^pT_1) = R(T_1^p)$，则令 $D' = T_1$ 即可. 现设 $R({}^pT_1) \neq R(T_1^p)$，任取一种资源 $r \in R({}^pT_1) \backslash R(T_1^p)$，令 $T_2 = T_1 \backslash \{t \in T_1 | R({}^pt) = r\}$，则 $T_2 \neq \varnothing$. 在 $R({}^pT_2) \neq R(T_2^p)$ 时，再重复以上过程. 因资源有限，故存在非空变迁集列 $T_k \subset T_{k-1} \subset \cdots \subset T_1 \subset D(m)$，使得 $R({}^pT_k) = R(T_k^p)$. $D(m)$ 是极大死锁集，故对 $r \in R(D(m)^p)$ 有 $\sum_{t \in D(m)} m({}^pt, r) = C_r$. 如果 $r \in R({}^pT_k) = R(T_k^p), t \in D(m), R({}^pt) = r$，则 $t \in T_k$. 从而 $\sum_{t \in T_k} m({}^pt, r) = C_r$ 且 $D' = T_k$ 满足定理条件.　　证毕.

称满足条件 $R({}^pD) = R(D^p)$ 的非空集 $D \subseteq T \backslash \{t_1^i, i = 1,\cdots,n\}$ 为死锁结构. 并令 $\mathscr{D} = \{D | D$ 是一个死锁结构$\}$.

因对每个 $D \in \mathscr{D}$ 都有 $R({}^pD) = R(D^p)$，故为简单，以后用 $R(D)$ 表示 $R({}^pD)$ 和 $R(D^p)$.

定理 4　给定生产过程的 PN 模型 G，则对任何死锁结构 $D_0 \in \mathscr{D}$，都存在 D_0 的非空子集 D' 和状态 $m' \in RM(G,m_0)$ 使得 D' 处在 m' 的死锁之中.

证　我们从 D_0 和 m_0 递归构造 D' 和 m'. 首先令 $D'_0 = \varnothing, k = 0$. 对 $k = 0,1,\cdots$，重复以下过程直到 $D_k = \varnothing$.

设 $t_j^i \in D_k$ 是这样的一个变迁，它使得当 $i_1 < i$ 或 $j_1 > j$ 时，$t_{j_1}^{i_1} \notin D_k, R({}^pt_j^i) = r$，令 $D_{k+1} = D_k \backslash \{t_j^i\}$，分别考虑以下两种情况：

情形 1　$r \notin R({}^pD_{k+1})$. 考虑变迁列 $\sigma = t_0^i t_1^i \cdots t_{j-1}^i$，由 $m_0(a_r) = C_r > 0$，则 σ^{C_r} (C_r 个 σ 的串) 是从 m_k 可以引发的变迁列，即 $m_k[\sigma^{C_r} >$ 有定义. 设 $m_k[\sigma^{C_r} > m_{k+1}$，则 $m_{k+1}({}^pt_j^i) = C_r$，$m_{k+1}(a_r) = 0$. 令 $D'_{k+1} = D'_k \cup \{t_j^i\}, k := k + 1$.

情形 2　$r \in R({}^pD_{k+1})$. 令 $D'_{k+1} = D'_k, m_{k+1} = m_k, k := k + 1$.

最后得到变迁集列：$D_0, D_1, \cdots, D_k = \varnothing$，和 $D'_0, D'_1, \cdots, D'_k$ 具有以下性质：

1) 对任意的变迁 $t \in D'_k, m_k({}^pt) > 0$；

2) $R({}^pD'_k) = R(D'^p_k) = R({}^pD_0)$；

3) 对任意的资源 $r \in R({}^pD'_k)$，$\sum_{t \in D'_k} m_k({}^pt, r) = C_r$.

由定理 2 知，$D' = D'_k$ 处在状态 $m_k \in RM(G,m_0)$ 的死锁中.

定理4表明，当PN模型具有死锁结构时，一定有可达状态 m 使得 $D(m) \neq \varnothing$. 故为避免死锁发生，需限制每个死锁结构中的托肯数，使得 $D \in \mathscr{D}$ 满足：

(DFC)
$$\sum_{r\in R(D)}\sum_{t\in D} m({}^{p}t,r) \leqslant \sum_{r\in R(D)} C_r - 1.$$

下面给出以后要用到的几个定义与记号.

给定死锁结构 D,称 $t_j' \in T$ 是 D 的前导变迁,如果 $t_j' \notin D$,而 $t_{j+1}' \in D$,用 $F(D)$ 表示 D 的所有前导变迁之集. 称一个死锁结构集 $V=\{D_1,D_2,\cdots,D_l\}\subseteq\mathscr{D}$ 是循环死锁结构链,如果对每个 $D_k\in V$,存在 $D_i,D_j\in V$ 以及变迁 t_i,t_j 使得 $t_i\in D_i\cap F(D_k),t_j\in F(D_j)\cap D_k$.

4　避免死锁的最小限制反馈策略

本文采用形式为 $\rho: RM(G,m_0)\to 2^T$ 的非确定的状态反馈控制策略. ρ 把一个状态 m 映射为 T 的子集的集合. 称策略 ρ_1 比策略 ρ_2 限制小,记作 $\rho_1>\rho_2$,如果对所有状态 m 都有 $\rho_2(m)\subseteq\rho_1(m)$ 而且有状态 m',使得 $\rho_1(m')\neq\rho_2(m')$.

称变迁集 $B\subseteq T$ 在状态 m 和策略 ρ 下控制使能,如果存在 $B'\in\rho(m)$,使得 $B\subseteq B'$. 当把 ρ 用作对 G 的控制时,只有控制、过程和资源三者同时使能的变迁才可引发. 这样形成的闭环系统记作 ρ/G,其可达集为 $RM(\rho/G,m_0)$.

本文的目的是寻找一个反馈策略,用它限制资源利用决策,保证闭环系统不产生死锁而又能极大利用资源. 为了避免 ρ/G 发生死锁,必须保证 $RM(\rho/G,m_0)$ 中不含有 $RM(G,m_0)$ 中使 $D(m)\neq\varnothing$ 的状态 m. 但这并不是充分的,因为在闭环系统中,过程和资源同时使能的变迁,由于策略 ρ 的限制也未必能引发. 在闭环系统 ρ/G 中,称变迁集 D 处在状态 $m\in RM(\rho/G,m_0)$ 的 ρ_- 死锁之中,如果 1) D 中的每个变迁都是状态 m 过程使能的;2) 对任意状态 $m'\in RM(\rho/G,m)$ 及 $B\in\rho(m')$, $D\cap T_e(m')\cap B=\varnothing$.

可以看出,对任意 $m\in RM(\rho/G,m_0)$,存在处于 m 的 ρ_- 死锁中的唯一极大变迁集,记作 $D_\rho(m)$.

分两种情形给出避免死锁的反馈控制策略.

情形 Ⅰ　设 1) $\mathscr{D}$ 中不含循环死锁结构链,或 2) 对任何循环死锁结构链 $V=\{D_1,D_2,\cdots,D_k\}$, $\Phi\triangleq R(F(D_1)^p)\cap\cdots\cap R(F(D_k)^p)=\varnothing$,而当 $\Phi\neq\varnothing$ 时, $C_r\geqslant 2, r\in\Phi$.

避免死锁的控制策略 ρ_1:给定生产过程的 PN 模型 G,对每个状态 m,变迁集 B 是状态 m 下 ρ_{1-} 控制使能的充分必要条件是对每个死锁结构 $D\in\mathscr{D}$:
$$|B\cap F(D)| + \sum_{r\in R(D)}\sum_{t\in D} m({}^{p}t,r) \leqslant \sum_{r\in R(D)} C_r - 1.$$
即要求在 ρ_1 的控制下,任意的 $m\in RM(\rho_1/G,m_0)$ 及 $D\in\mathscr{D}$ 都满足(DFC).

设 $D_1,D_2\in\mathscr{D}, R(D_1)\cap R(D_2)=\varnothing$,则在状态 m 下,当 D_1 和 D_2 分别满足(DFC)时, $D_3=D_1\cup D_2$ 也满足(DFC).

令
$$\mathscr{D}_1=\{D_1\cup D_2 \mid D_1,D_2\in\mathscr{D}, R(D_1)\cap R(D_2)=\varnothing\}.$$

设 $D_1,D_2\in\mathscr{D}, D_1\subset D_2, R(D_1)=R(D_2)$,则在状态 m 下,当 D_2 满足(DFC)时, D_1 也满足(DFC).

令 $\mathscr{D}_2=\{D_1\in\mathscr{D}\mid$ 存在 $D_2\in\mathscr{D}$ 使得 $D_1\subset D_2, R(D_1)=R(D_2)\}$ 及 $\mathscr{D}'=\mathscr{D}\backslash\{\mathscr{D}_1\cup\mathscr{D}_2\}$. 故在情形 Ⅰ 下,只需考虑 ρ_1 在 $D\in\mathscr{D}'$ 上的限制作用.

定理 5　设生产过程 PN 模型 G 满足情形 Ⅰ 的假设条件,则在受 ρ_1 控制的闭环系统 ρ_1/G 中,处于状态 $m\in RM(\rho_1/G,m_0)$ 下的 ρ_{1-} 死锁集为空,而且 ρ_1 是最小限制的避免死锁策略.

证　首先注意到，如果有死锁结构 D 及状态 m 满足条件：

(DC)　$$\sum_{r\in R(D)}\sum_{t\in D} m({}^{\rho}t,r)=\sum_{r\in R(D)} C_r.$$

则由定理 2，$D(m)\neq\varnothing$. 故对每个死锁结构 $D\in\mathscr{D}^1$ 及可达状态 $m\in RM(\rho_1/G,m_0)$，条件(DFC)是保证闭环系统不发生死锁的必要条件. 从而可知，如果 ρ_1 能够防止闭环系统死锁时，ρ_1 就是最小限制的避免死锁策略. 故我们只需证明 ρ_1/G 中不发生死锁.

如果对某个状态 $m\in RM(\rho_1/G,m_0)$，$D_{\rho_1}(m)\neq\varnothing$，则对每个 $t_1\in\overline{T}\cap D_{\rho_1}(m)$，$m({}^{\rho}t_1)>0$. 设 $R(t_1^{\rho})=r_1$，则以下的情形 a，b 之一必发生：

情形 a　$m(a_{r_1})=0$；

情形 b　$m(a_{r_1})\geqslant 1$；$\{t_1\}\notin\rho_1(m)$.

在此我们断定，必存在一个变迁 $t\in\overline{T}\cap D_{\rho_1}(m)$，使得情形 b 发生. 因为若只有情形 a 发生时，变迁集 $W(t_1)=\{t\in T\,|\,t\in\overline{T}\cap D_{\rho_1}(m),R({}^{\rho}t)=r_1,m({}^{\rho}t)>0\}$ 使得：$\sum_{t\in W(t_1)} m({}^{\rho}t)=C_{r_1}$. 对 $t_2\in W(t_1)$，重复上述分析，…… 最后得到变迁列 $t_1,t_2,\cdots$，使得 $t_{i+1}\in W(t_i)$，$i=1,2,\cdots$，$R(t_i^{\rho})=r_i$，而且 $\sum_{t\in W(t_1)} m({}^{\rho}t)=C_{r_i}$. 因资源集有限，故存在 j,k 使得 $R(t_j^{\rho})=R(t_{k+j}^{0})$，为简单设 $j=1$，则 $D_1=\{t_2,\cdots,t_{k+1}\}$ 是一个死锁结构. 再从任一变迁 $t_i\in D_1$，也能得到变迁列 $t_i=t_{i0},t_{i1},\cdots,t_{ih}$ 使得 $t_{i(j+1)}\in W(t_{ij})$ 而且有 $j<h$ 使得 $R(t_{ih}^{\rho})=R(t_{ij}^{\rho})$. 令 $D_2=D_l\cup\{t_{i0},t_{i1},\cdots,t_{ih}\}$，则 D_2 是一个死锁结构. 重复以上过程，直到从任一变迁 $t\in D_l$ 开始的上述变迁列都包含在 D_l 中. 则 D_l 是一个死锁结构，而且 m 和 D_l 使得(DC)成立. 这与 ρ_1 的限制作用矛盾. 故有 $t\in\overline{T}\cap D_{\rho_1}(m)$ 使得情形 b 发生.

设 $t_1\in\overline{T}\cap D_{\rho_1}(m)$ 使情形 b 成立，则存在死锁结构 D_1 使得 $t_1\in F(D_1)$ 而且 m 和 D_1 使得(DFC)中等式成立. 从而 $T_1(r_1)=\{t\in D_1\,|\,R({}^{\rho}t)=r_1\}\neq\varnothing$. 故必有 $t_2\in T_1(r_1)$，使得 $m({}^{\rho}t_2)>0$，即 t_2 是过程和资源同时使能的. 因 $t_2\in D_{\rho_1}(m)$，则必存在死锁结构 D_2，使得 $t_2\in F(D_2)$，而且 m 和 D_2 使得(DFC)中等式成立. 类似于从 t_1 和 D_1 导出 t_2 和 D_2 的过程，也能从 t_2 和 D_2 导出 t_3 和 D_3，使得 $t_3\in F(D_3)$ 而且 m 和 D_3 使得(DFC)中等式成立. 重复以上过程，我们得到死锁结构列 $D_1,D_2,\cdots$ 使得 $r_1\in R(F(D_i)^{\rho})$，$i=1,2,\cdots$. 因 $D_{\rho_1}(m)$ 有限，故在 $D_1,D_2,\cdots$ 中存在一个循环死锁结构链，为简单设它为 $V=\{D_1,\cdots,D_k\}$，则 $r_1\in R(F(D_1)^{\rho})\cap R(F(D_2)^{\rho})\cap\cdots\cap R(F(D_k)^{\rho})$. 由 $C_{r_1}\geqslant 2$ 知存在 $S_1\in D_1$ 使得 $R({}^{\rho}S_1)=r_1$，$m({}^{\rho}S_1)>0$. 从而 $S_1\in D_i$，$i=1,2,\cdots,k$. 在 m 下，$D_i\in V$ 都使(DFC)中等式成立，故 $R(S_1^{\rho})=r_2\in R(D_1)\cap\cdots\cap R(D_k)$ 而且 $\sum_{t\in D_i} m({}^{\rho}t,r_2)=C_{r_2}$，$i=1,\cdots,k$. 因此，对任意的 $S_2\in D_1$，若 $R({}^{\rho}S_2)=r_2$，$m({}^{\rho}S_2)>0$，则 $S_2\in D_i$，$i=1,\cdots,k$. 类似地，能证明 $r_3=R(S_2^{\rho})\in R(D_1)\cap\cdots\cap R(D_k)$. 因对任意的 $r\in R(D_1^{\rho})$，存在资源列 $r_1,r_2,\cdots,r_k=r$ 和变迁列 $t_1,t_2,\cdots,t_k$ 使得 $r_i=R({}^{\rho}t_i)$，$R(t_i^{\rho})=r_{i-1}$，$m({}^{\rho}t_i)>0$，故 $R(D_1)\subseteq R(D_2)\cap\cdots\cap R(D_k)$，$\{t\in D_1\,|\,m({}^{\rho}t)>0\}\subseteq D_2\cap\cdots\cap D_k$.

同理可证 $R(D_i)\subseteq R(D_1)\cap\cdots\cap R(D_{i-1})\cap R(D_{i+1})\cap\cdots\cap R(D_k)$ 以及 $\{t\in D_i\,|\,m({}^{\rho}t_i)>0\}\subseteq D_1\cap\cdots\cap D_{i-1}\cap D_{i+1}\cap\cdots\cap D_k$. 即 $\{t\in D_i\,|\,m({}^{\rho}t_i)>0\}$，$i=1,\cdots,k$，是同一变迁集. 但 $t_2\in D_1$，$t_2\in F(D_2)$，$m({}^{\rho}t_2)>0$，故 $t_2\notin D_2$. 矛盾说明 $D_{\rho_1}(m)=\varnothing$.

情形 Ⅱ　包括除情形 Ⅰ以外的所有情形.

避免死锁策略 ρ_2:给定生产过程 PN 模型 G,ρ_2 递归地定义在 $\mathscr{D}$ 上,其过程为:

开始,令 $\varepsilon=\varnothing$. 取死锁结构 $D_1\in\mathscr{D}\backslash\varepsilon$.

如果 D_1 不是 $\mathscr{D}$ 中任何两个死锁结构的并集,也不存在死锁结构 D_2,使得 $R(D_1)=R(D_2)$,则 ρ_2 限制 ${}^{p}D_1$ 中的托肯数使其不超过 $L(D_1)-1$,其中 $L(D_1)=\sum_{r\in R(D_1)}C_r$. 把 D_1 加到 ε 中.

如果 D_1 不是 $\mathscr{D}$ 中任何两个死锁结构的并集,但存在 $D_2,\cdots,D_k$ 使得 $R(D_1)=R(D_i)$, $i=2,\cdots,k$, 则 ρ_2 限定 ${}^{p}D\triangleq{}^{p}(D_1\cup\cdots\cup D_k)$ 中的托肯数使其不超过 $L(D)-1$,其中 $L(D)=\sum_{r\in R(D)}C_r$. 把 $D_1,\cdots,D_k$ 连同它们的各种并集一起加到 ε 中.

设 $D_1=\bigcup_{i=1}^{k}D_i',D_i'\in\mathscr{D},L(D'_i),i=1,\cdots,k$, 已有定义. 则 ρ_2 限制 ${}^{p}D_1$ 的所有位置中托肯总数不超过 $L(D_1)-1$,其中 $L(D_1)=\max\{\sum_{t\in D_i}m({}^{p}t)\}$,这里是对所有满足 $\sum_{t\in D_i}\overline{m}({}^{p}t)-1\leqslant L(D_i')-1,i=1,\cdots,k$, 的 G 的状态 m 取极大. 加 D_1 到 ε 中.

重复以上过程,直到 $\varepsilon=\mathscr{D}$.

由定义知,变迁集 B 在状态 m 下是 ρ_{2-} 控制使能的,如果对每个 $D\in\mathscr{D}$:

$$|B\cap F(D)|=\sum_{r\in R(D)}\sum_{t\in D}m({}^{p}t;r)\leqslant L(D)-1.$$

定 理 6　设生产过程 PN, G 受 ρ_2 的控制, 则对闭环系统的任何可达状态 $m\in RM(\rho_2/G,m_0)$, $D_{\rho_2}(m)=\varnothing$.

证　如果有 $m\in RM(\rho_2/G,m_0)$,使得 $D_{\rho_2}(m)\neq\varnothing$,则存在 $t_1\in T\cap D_{\rho_2}(m)$, $R(t_1^p)=r_1$, $m({}^{p}t_1)>0$,使得情形 a,b 之一发生:

情形 a　$m(a_{r_1})=0$;

情形 b　$m(a_{r_1})\geqslant 1$, $\{t_1\}\notin\rho_2(m)$.

类似定理 5,可以证明存在 $t_1\in T\cap D_{\rho_2}(m)$ 使情形 b 成立. 而此时 t_1 是过程和资源使能的. $\{t_1\}\notin\rho_2(m)$ 表明存在死锁结构 D_1,使得 $t_1\in F(D_1)$ 而且 $\sum_{r\in R(D_1)}\sum_{t\in D_1}m({}^{p}t,r)\leqslant L(D_1)-1$. $R(t_1^p)=r_1\in R(D_1^p)=R({}^{p}D_1)$,故 $T_1(r_1)=\{t\in D_1|R({}^{p}t)=r_1\}\neq\varnothing$. 在此也能证明存在 $t_2\in T_1(r_1)$ 使得 $m({}^{p}t_2)>0$. 因 $t_2\in D_{\rho_2}(m)$, 则存在 $D_2\in\mathscr{D}$ 使得 $t_2\in F(D_2)$, $\sum_{r\in R(D_2)}\sum_{t\in D_2}m({}^{p}t,r)\leqslant L(D_2)-1$. 同理也能从 D_2 和 t_2 导出 D_3 和 t_3 使得 $t_3\in F(D_3)$, $t_3\in D_2$, 而且 $\sum_{r\in R(D_3)}\sum_{t\in D_3}m({}^{p}t,r)\leqslant L(D_3)-1$. 重复以上分析,最后得到死锁结构序列 $D_1,D_2,D_3,\cdots$. 则其中必有循环死锁结构链,设为 $V=\{D_1,D_2,\cdots,D_k\}$,由以上分析有: $\sum_{r\in R(W)}\sum_{t\in W}m({}^{p}t,r)\leqslant L(W)$,其中 $W=\bigcup_{i=1}^{k}D_k$,但由 ρ_2 的定义, $m\notin RM(\rho_2/G.m_0)$. 故 $D_{\rho_2}(m)=\varnothing$.

由定理 6 的证明可以看出, ρ_2 具有很小的限制,但它不一定是最小限制的. 下文将讨论所提出的策略的 PN 实现问题.

参考文献

[1] Banaszak, Z. A. and Krogh, B.. Deadlock Avoidance in Flexible Manufacturing Systems with Concurrently Competing Process Flows. IEEE Trans. Robotics and Automation, 1990, 6(6):724--734

[2] Hsieh, F. S. and Chang, S. C.. Dispatching-Driven Deadlock Avoidance Controller Synthesis for Flexible Manufacturing Systems. IEEE Trans. Robotics and Automation 1994, 10(2):196—209

[3] Peterson, J. L.. Petri Net Theory and the Modelling of Systems. England Clifs, NJ:Prentice-Hall 1981

Deadlock Avoidance Policies for a Class of FMS's

XING Keyi and XU Xiangqin
(Department of Applied Mathematics, Xidian University · Xi'an, 710071, PRC)
HU Baosheng
(Systems Engineering Institute, Xi'an Jiontong University · Xi'an, 710049, PRC)

Abstract: This paper discusses the deadlock problems in FMS's by using its Petri net model. The necessary and sufficient conditions of system deadlock are characterized. We presented a deadlock avoidance feedback policy. This policy allows the maximal use of resources to optimize the through put of the FMS in many cases.

Key words: FMS; Petri net; deadlock; control policy

本文作者简介

邢科义 1957年生.1982年毕业于西北大学数学系获学士学位,1985年在西安电子科技大学获硕士学位,1994年在西安交通大学获博士学位.现为西安电子科技大学应用数学系副教授.主要研究方向Petri网理论与应用,离散事件动态系统理论与应用.

许祥秦 1958年生.1982年毕业于西北大学数学系获学士学位,1985年在西安电子科技大学获硕士学位.主要研究方向为大系统模型简化与递阶控制.Petri网理论与应用等.

胡保生 1930年生.1951年毕业于上海大同大学电气工程系.现为西安交通大学系统工程研究所教授、博士生导师.目前研究方向是离散事件动态系统理论与应用,多目标决策与优化,并行控制算法和人机系统等.