

# 柔性制造系统非阻塞监督控制器优化设计

赵咪 侯一凡

(西安电子科技大学机电工程学院 西安 710071)

**摘要** 针对一类含有并发执行装配过程的柔性制造系统 G-systems, 提出一种新的死锁预防策略保证该系统的非阻塞性, 即在控制下, 受控系统从任意可达状态都可以到达理想状态。首先对 Petri 网模型中基本信标实施控制, 保证了基本信标的最大可控, 然后通过线性规划算法求取所有从属信标满足可控性的条件, 即获得基本信标的控制深度变量。与现有方法相比, 该策略优点在于只需加入少量的控制库所, 就可避免不必要的迭代过程; 其次是提出控制器输出弧位置优化策略, 得到了结构更为简单、许可行为更多的非阻塞 Petri 网控制器。

**关键词** 柔性制造系统, Petri 网, 死锁预防, 基本信标, 非阻塞

**中图分类号** TP278 **文献标识码** A

## Non-blocking Supervisor Design for Flexible Manufacturing Systems

ZHAO Mi HOU Yi-fan

(School of Electro-mechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract** We developed a novel deadlock prevention policy for Petri nets that can model concurrent execution of manufacturing assembly processes in FMS (Flexible Manufacturing Systems) through a class of nets, called G-systems. A relevant property of the system behavior is to be non-blocking, i. e., from any reachable state, a desirable state can be always reached under supervision. Firstly, monitors were added to ensure the controllability of elementary siphons of Petri nets, then the controllability of dependent siphons was ensured by properly selecting the control depth variables of elementary siphons, which can be obtained by linear programming techniques. Compared with the existing policies, the advantages of ours are that a much smaller number of monitors are added and unnecessary iterative processes are avoided. Control policy referring to rearrangement of output arcs of the monitors can ensure more permissive behavior and simple structure based on the non-blockingness of the system.

**Keywords** FMS, Petri net, Deadlock prevention, Elementary siphon, Non-blocking

### 1 引言

离散事件系统中的资源分配相当普遍。这些系统中的进程并发执行, 且竞争有限的资源, 从而使系统进入不理想状态。目前主要有 3 种死锁处理方法, 一是死锁检测与校正<sup>[9]</sup>, 二是死锁避免<sup>[7,8]</sup>, 三是死锁预防<sup>[1-6,10-12]</sup>。文中主要针对 G-system<sup>[1]</sup>的死锁预防问题, 使用离线机制来建立控制策略。监督控制就是将控制施加在给定的未受控系统上, 使得 G-system 控制器确保系统的非阻塞性。现有方法是利用外部监控使所有的严格极小信标最大可控, 其缺点是需要加入过多的控制库所使得控制器在结构上非常复杂。本文方法只需给基本信标添加控制器和修改控制库所的初始标识来确保每个从属信标最大可控, 从而保证系统的非阻塞性。其次, 提出了控制器输出弧优化策略, 使得系统获得更多许可行为。

### 2 Petri 网基本信标

**定义 1** 设  $S \subseteq P$  是网  $N$  的一个信标, 称  $\lambda_S$  为信标  $S$  的

特征  $P$ -向量, 当且仅当  $\forall p \in S, \lambda_S(p) = 1$ ; 否则,  $\lambda_S(p) = 0$ 。  
 $\eta_S$  是信标  $S$  的特征  $T$ -向量, 当且仅当  $\eta_S^T = \lambda_S^T [N]$ 。

**定义 2** 设  $(N, M_0)$  有  $k$  个严格极小信标,  $S_1 - S_k, |P| = m, |T| = n$ , 其中  $m, n, k \in \mathbb{IN}, \mathbb{IN} = \{1, 2, \dots, n\}$ 。 $\lambda_{S_i}(\eta_{S_i})$  是严格极小信标  $S_i$  的特征  $P(T)$ -向量。令  $[\lambda]_{k \times m} = [\lambda_{S_1}^T | \lambda_{S_2}^T | \dots | \lambda_{S_k}^T], [\eta]_{k \times n} = [\eta_{S_1} | \eta_{S_2} | \dots | \eta_{S_k}]$ , 称  $[\lambda]$  ( $[\eta]$ ) 为严格极小信标的特征  $P(T)$ -向量矩阵。

**定义 3** 设  $(N, M_0)$  有  $k$  个严格极小信标,  $S_1, S_2, \dots, S_k$ 。令  $\eta_{S_\alpha}, \eta_{S_\beta}, \dots, \eta_{S_\gamma} (\{\alpha, \beta, \dots, \gamma\} \subseteq \{1, 2, \dots, k\})$  是矩阵  $[\eta]$  的最大线性无关组, 那么称  $\Pi_E = \{S_\alpha, S_\beta, \dots, S_\gamma\}$  为  $N$  的基本信标集合。

**定义 4**  $S \notin \Pi_E$  是  $(N, M_0)$  的严格极小信标。若  $\eta_S = \sum_{S \in \Pi_E} a_i \eta_{S_i}, a_i \geq 0$ , 则称  $S$  为强从属信标。

**定义 5** 对于信标  $S \notin \Pi_E$ , 若存在非空集合  $S^A, S^B \subset \Pi_E$ , 使  $S^A \cap S^B = \emptyset$ , 且  $\eta_S = \sum_{S \in S^A} a_i \eta_{S_i} - \sum_{S \in S^B} a_i \eta_{S_i}, a_i > 0$ , 则称  $S$  是弱从属信标。

**定理 1** 令  $N_{ES}$  为  $N$  中基本信标的个数, 则  $N_{ES} \leq R$

到稿日期: 2008-07-24 返修日期: 2008-10-16 本文受国家自然科学基金(60474018), 教育部归国留学人员实验室基金(030401)资助。

赵咪(1980-), 女, 博士研究生, 从事柔性制造系统监督控制理论研究, E-mail: zhaomi530@163.com; 侯一凡(1983-), 女, 博士研究生, 从事柔性制造系统监督控制理论研究。

$([N]) \leq \min\{|P|, |T|\}$ , 其中  $R([N])$  表示关联矩阵  $[N]$  的秩。令  $\Pi$  为网中信标的集合,  $\Pi_D$  为从属信标的集合, 显然有  $\Pi = \Pi_E \cup \Pi_D$ 。图 1 给出 G-system 模型。

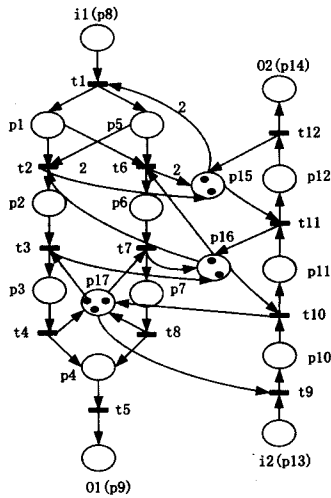


图 1 G-system 模型

令  $r$  是资源库所,  $S$  是一个严格极小信标, 且  $H(r) = I_r \setminus \{r\}$ , 定义信标  $S$  的补集  $Th(S) = \sum_{r \in SR} H(r) \setminus S$ , 该网含有 3 个严格极小信标:  $S_1 = \{p_3, p_7, p_{12}, p_{15}, p_{16}, p_{17}\}$ ,  $S_2 = \{p_2, p_6, p_{12}, p_{15}, p_{16}\}$ ,  $S_3 = \{p_3, p_7, p_{11}, p_{16}, p_{17}\}$ , 其中  $S_2$  和  $S_3$  是基本信标,  $S_1$  是从属信标。系统中有 3 个资源  $P$ -不变式,  $I_{p_{15}} = p_1 + p_5 + p_{12} + p_{15}$ ,  $M_0(p_{15}) = 2$ ;  $I_{p_{16}} = p_2 + p_6 + p_{11} + p_{16}$ ,  $M_0(p_{16}) = 2$ ;  $I_{p_{17}} = p_3 + p_7 + p_{10} + p_{17}$ ,  $M_0(p_{17}) = 3$ 。  $H(p_{16}) = p_2 + p_6 + p_{11}$ ,  $H(p_{17}) = p_3 + p_7 + p_{10}$ ,  $Th(S_3) = (H(p_{16}) + H(p_{17})) \setminus S_3 = p_2 + p_6 + p_{10}$ 。

### 3 死锁预防策略

**定理 2**<sup>[12]</sup> 令  $(N, M_0)$  是网系统,  $S$  是  $N$  的信标。若存在  $P$ -不变式  $I$  使得  $\forall p \in (||I||^- \cap S), \max_p \cdot = 1, ||I||^+ \subseteq S$  且  $\sum_{p \in P} [I(p)M_0(p)] > \sum_{p \in S} I(p)(\max_p \cdot - 1)$ , 则  $S$  最大可控。

**定理 3**<sup>[12]</sup> 令  $(N, M_0)$  网系统,  $S$  是强从属信标, 有  $\eta_S = \sum_{i=1}^n a_i \eta_i$ ,  $S_1, S_2, \dots, S_n$  是  $S$  的基本信标。则  $S$  最大可控, 若:

(1)  $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $I_i$  是  $N$  的  $P$ -不变式,  $||I_i||^+ = S_i$ , 且  $\forall p \in S_i, I_i(p) = 1$ ;

(2)  $M_0(S) > \sum_{i=1}^n \sum_{p \in ||I_i||^-} (a_i | I_i(p) | M_0(p)) + \sum_{p \in S} (\max_p \cdot - 1)$ 。

**定理 4**<sup>[12]</sup> 令  $(N, M_0)$  是网系统,  $S$  是弱从属信标, 有  $\eta_S = \sum_{i=1}^n a_i \eta_i - \sum_{i=n+1}^m a_i \eta_i$ ,  $S_1 - S_{(n+m)}$  是  $S$  的基本信标。  $S$  最大可控, 若:

(1)  $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $I_i$  是  $N$  的  $P$ -不变式,  $||I_i||^+ = S_i$ , 且  $\forall p \in S_i, I_i(p) = 1$ ;

(2)  $M_0(S) > \sum_{i=1}^n \sum_{p \in ||I_i||^-} (a_i | I_i(p) | M_0(p)) + \sum_{p \in S} (\max_p \cdot - 1)$ 。

**定义 6** 令  $S$  是网  $(N_0, M_0, M_F)$  中的严格极小信标,  $N_0 = (P_0 \cup P_S \cup P_R, T_0, F_0, W_0)$ 。对网  $(N_0, M_0)$  添加控制库所, 获得扩展网  $(N_1, M_1)$ ,  $N_1 = (P_0 \cup P_S \cup P_R \cup \{V_S\}, T_1, F_1, W_1)$ ; 令  $\{\alpha, \beta, \dots, \gamma\} \subseteq \{1, 2, \dots, k\}$  使得  $\forall i \in \{\alpha, \beta, \dots, \gamma\}, Th(S) \cap P_i \neq \emptyset, \forall j \in \{1, 2, \dots, k\} \setminus \{\alpha, \beta, \dots, \gamma\}, Th(S) \cap P_j$

$= \emptyset$ 。对信标  $S, \forall p \in P_0 \cup P_S$ , 非负整数  $k_s(p)$  定义如下:

步骤 1  $\forall p \in P_0 \cup P_S, k_s(p) := 0$ ;

步骤 2  $\forall p \in Th(S), k_s(p) := h_S(p)$ , 其中  $Th(S) = \sum_{p \in S} h_S(p) p$ ;

步骤 3  $\forall i \in \{\alpha, \beta, \dots, \gamma\}$ , 令  $p_i \in Th(S) \cap P_S$  使  $\forall p_i \in SP(p_u, p_{0i}), p_u \in P_i, p_i \notin Th(S)$ 。假设存在  $m$  个库所  $p_i^1, p_i^2, \dots, p_i^m$ 。有  $\{p_i^j | j=1, 2, \dots, m\} \subseteq Th(S) \cap P_S$ 。  $\forall p_i^j$ , 令  $p_v$  是  $SP(p_{0i}, p_i^j)$  中的库所, 且  $\forall p_w \in SP(p_{0i}, p_i^j), h_S(p_v) \geq h_S(p_w)$ 。  $\forall p_v, \forall p_x \in SP(p_{0i}, p_v), k_s(p_x) := h_S(p_v)$ ,  $\forall p_y \in \cap_{i=1}^m SP(p_{0i}, p_i^j)$ , 当  $p_x^i \in Th(S) \cap P_S$ , 不存在  $p \in Th(S) \cap P_i, h_S(p) > h_S(p_x^i)$ ; 有  $k_s(p_y) := h_S(p_x^i)$ 。

**推论 1** 令  $S$  是 G-system 网  $(N_0, M_0)$  中的严格极小信标,  $N_0 = (P_0 \cup P_S \cup P_R, T_0, F_0, W_0)$ 。根据定义 6 对  $S$  求  $k_s$ , 对网  $(N_0, M_0)$  添加控制库所  $V_S$ , 使得  $g_S = k_s + V_S$  是扩展网  $(N_1, M_1)$  的一个  $P$ -不变式, 且  $N_1 = (P_0 \cup P_S \cup P_R \cup \{V_S\}, T_1, F_1, W_1)$ ;  $\forall p \in P_0 \cup P_S \cup P_R, M_1(p) = M_0(p)$ 。令  $h_i = \sum_{r \in SR} I_r - g_S, M_1(V_S) = M_0(S) - \xi_S, \xi_S \in \mathbb{N}$ 。若  $\xi_S > \sum_{p \in S} h_S(p)(\max_p \cdot - 1)$ , 则  $S$  最大可控。

**推论 2** 令  $(N_0, M_0, M_F)$  是 G-system,  $S$  是强从属信标,  $\eta_S = a_1 \eta_{S1} + a_2 \eta_{S2} + \dots + a_n \eta_{Sn}$ ,  $S_1 - S_n$  是  $S$  的基本信标,  $S$  最大可控, 若:

(1)  $(N_0, M_0, M_F)$  添加  $n$  个控制库所  $V_{S1} - V_{Sn}$ , 扩展后使得  $S_1 - S_n$  最大可控;

(2)  $\sum_{i=1}^n a_i \xi_{Si} > \sum_{p \in S} (\max_p \cdot - 1) + \sum_{i=1}^n a_i M_0(S_i) - M_0(S), \sum_{p \in S} h_S(p)(\max_p \cdot - 1) < \xi_S < M_0(S_i)$ 。

**推论 3** 令  $(N_0, M_0, M_F)$  是 G-system,  $S$  是弱从属信标,  $\eta_S = \sum_{i=1}^n a_i \eta_i - \sum_{i=n+1}^m a_i \eta_i$ ,  $S_1 - S_{(n+m)}$  是  $S$  的基本信标,  $S$  最大可控, 若:

(1)  $(N_0, M_0, M_F)$  添加  $V_{S1} - V_{S(n+m)}$ , 扩展后使得  $S_1 - S_{(n+m)}$  是最大可控的。

(2)  $\sum_{i=1}^n a_i \xi_{Si} > \sum_{p \in S} (\max_p \cdot - 1) + \sum_{i=1}^n a_i M_0(S_i) - M_0(S), \sum_{p \in S} h_S(p)(\max_p \cdot - 1) < \xi_S < M_0(S_i)$ 。

**规则 1** G-systems 网非阻塞监督控制器设计

输入: 一个 G-system  $(N_0, M_0, M_F)$ ;

输出: 非阻塞监督控制器  $(N_1, M_1, M_F)$ 。

$\Pi_E := \{S_E | S_E \text{ 是 } N \text{ 的基本信标}\}, \Pi_D := \{S_D | S_D \text{ 是 } N \text{ 的从属信标}\}$ 。

步骤 1 对所有  $S_i \in \Pi_E$ , 按照推论 1, 对  $(N_0, M_0)$  添加控制库所  $V_{Si}$  从而使得  $S_i$  最大可控,  $M_1(V_{Si}) = M_0(S_i) - \xi_{Si}, \sum_{p \in S} h_S(p)(\max_p \cdot - 1) < \xi_S < M_0(S_i)$ 。

步骤 2 对所有  $S_j \in \Pi_D$ , 根据基本信标的控制深度变量  $\xi_{Sj}$  的最大可控性, 通过推论 2(推论 3) 给出  $S_j$  最大可控的  $\xi_{Sj}$  表达式, 若  $\sum_{i=1}^n a_i \xi_{Si} > \sum_{p \in S} (\max_p \cdot - 1) + \sum_{i=1}^n a_i M_0(S_i) - M_0(S), \sum_{p \in S} h_S(p)(\max_p \cdot - 1) < \xi_S < M_0(S_i)$ , 则  $S_j$  最大可控。

步骤 3 寻找目标函数  $\min(\sum \xi_{Si})$ , 确定优化的控制深度变量  $\xi_{Si}, i \in \{1, 2, \dots, |\Pi_E|\}$ 。

约束: (1)  $\sum_{i=1}^n a_i \xi_{Si} > \sum_{p \in S} (\max_p \cdot - 1) + \sum_{i=1}^n a_i M_0(S_i) - M_0(S), \forall S \in \Pi_D$ ; (2)  $\sum_{p \in S} h_S(p)(\max_p \cdot - 1) < \xi_S < M_0(S_i)$ ; (3)  $\xi_{Si} \in \mathbb{R}^+, \mathbb{R}^+$  是非负实数集合。

步骤 4 然后对每个  $S_i$  输出  $M_0(V_{Si})$ 。

为了保证非阻塞性不受这些输入库所标识的约束。本文

是基于结构分析基础上的一种参数优化的监督控制方法,能够保证非阻塞性不受输入库所标识的约束。

**定义 7** 令  $(N_0, M_0)$  为 G-system,  $N = \bigcap_{i=1}^k N_i = (P \cup P_0 \cup P_R, T, F)$ ,  $Th(S)$  为严格极小信标  $S$  的补集。  $\forall i \in \{1, 2, \dots, k\}$ , 若  $Th(S) \cap P_i = \emptyset$ , 则令  $B_S^i = \emptyset$ ; 否则令  $B_S^i = \{p \mid \forall SP(p_{i0}, p_a), p \in SP(p_{i0}, p_a) \cap P_i, SP(p_{i0}, p_a) \cap Th(S) = \emptyset, p_a \in \dots p_\beta, p_\beta \in Th(S) \cap P_i\}$ 。 令  $B_S = \bigcup_{i=1}^k B_S^i$ 。 对信标  $S_2, Th(S_2) = \{p_1, p_5, p_{11}\}, Th(S_2) \cap P_1 = \{p_1, p_5\}, Th(S_2) \cap P_2 = \{p_{11}\}, B_S^1 = \{p_1, p_5\}, B_S^2 = \{p_{10}\}, M_1(V_S) = M_0(S) - \xi_S$ 。

**规则 2 控制器输出弧位置优化策略**

输入: 非阻塞监督控制器  $(N_1, M_1)$ ;

输出: 更多许可行为的监督控制器  $(N_1', M_1')$ 。

- 步骤 1 应用规则 1 添加控制库所, 其集合记为  $\{V_{S_1}, V_{S_2}, \dots, V_{S_n}\}, a_i = n_i$ ;
- 步骤 2  $N_1' := N_1, M_1' := M_1, m := 1$ ;
- 步骤 3 若  $m \geq a + 1$ , 则  $m := m - 1$ , 转至(11); 否则转至(4);
- 步骤 4  $j := 1$ ;
- 步骤 5  $p := p_{0j}$ ;
- 步骤 6  $p_x := p$ ;
- 步骤 7 若  $j \geq k + 1$ ; 则转至(10); 若  $B_S^m = \emptyset$ , 则  $j := j + 1$ , 转至(5); 否则  $B_S^m := B_{S_m}, B_{S_m} := B_{S_m} \setminus p_x$ ;
- 步骤 8 根据  $Th(S_m) \cup B_{S_m} \cup \{V_{S_m}\}$  是网  $N_m'$  的 P-不变式, 将  $V_{S_m}$  的输出弧的位置回撤;
- 步骤 9 若所得的网是活网, 没有新的可被清空信标产生, 则根据  $Th(S_m) \cup B_{S_m} \cup \{V_{S_m}\}$  是网  $N_m'$  的 P-不变式, 将  $V_{S_m}$  的输出弧的位置回撤; 若  $\exists p \in B_{S_m}, p \in P_i$ , 则  $\forall p_y \in p_x, p_y := p_y$ , 转至(6); 否则  $j := j + 1$ , 转至(5); 若  $B_{S_m} := B_S^m, j := j + 1$ , 转至(5);
- 步骤 10  $m := m + 1$ , 转至(3);
- 步骤 11  $N_1' := N_m', M_1' := M_m'$ ;
- 步骤 12 结束。

根据规则 1, 可以得到非阻塞的监督控制器, 但控制器的所有输出弧指向源变迁, 是比较保守的, 运用规则 2 后不仅可以得到非阻塞的监督控制器, 且获得更多的可达状态, 即该控制器的许可行为更多。

**4 FMS 实例**

将前面的结论应用到图 1 所示的 FMS 中。 首先根据规则 1 对该网两个基本信标添加控制库所  $V_{S_2}$  和  $V_{S_3}$ 。 接下来计算  $k_S$ , 该网有两个进程:  $P_{S_1} = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_9\}, P_{S_2} = \{p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{14}\}$ 。 对于信标  $S_3 = \{p_3, p_7, p_{11}, p_{16}, p_{17}\}$ , 有  $Th(S_3) = p_2 + p_6 + p_{10}$ 。 对  $P_{S_1}$ , 有  $p_1^1 = p_2, p_2^1 = p_6, p_3^1 = p_2, p_4^1 = p_6$ 。 对  $P_{S_2}$ , 有  $p_3^2 = p_{10}, p_7^2 = p_{10}$ 。 运用定义 6 得到  $k_{S_3}(p_1) = k_{S_3}(p_2) = k_{S_3}(p_5) = k_{S_3}(p_6) = 1, k_{S_3}(p_{10}) = 1$ 。 因为  $\forall p \in P_S \setminus \{p_2, p_6, p_{10}\}, k_{S_3}(p) = 0$ , 所以  $k_{S_3}(p_8) = k_{S_3}(p_{13}) = k_{S_3}(p_{15}) = k_{S_3}(p_{16}) = k_{S_3}(p_{17}) = 0$ , 令  $K_S = \{p(k_S(p) \neq 0, p \notin Th(S))\}, K_{S_3} = \{p_1, p_5\}$ 。

根据推论 1, 基本信标的最大可控性如下:

(1)  $S_2: k_{S_2} = p_1 + p_5 + p_{10} + p_{11}, K_{S_2} = \{p_{10}\}, g_{S_2} = k_{S_2} + V_{S_2} = p_1 + p_5 + p_{10} + p_{11} + V_{S_2}, h_{S_2} = p_2 + p_6 + p_{12} + p_{15} + p_{16}$

$- p_{10} - V_{S_2}$ 。

(2)  $S_3: k_{S_3} = p_1 + p_2 + p_5 + p_6 + p_{10}, K_{S_3} = \{p_1, p_5\}, g_{S_3} = k_{S_3} + V_{S_3} = p_1 + p_2 + p_5 + p_6 + p_{10} + V_{S_3}, h_{S_3} = p_3 + p_7 + p_{11} + p_{15} + p_{16} - p_1 - p_5 - V_{S_3}$ 。

根据推论 2 检验从属信标  $S_1$  的最大可控性:  $\xi_{S_2} + \xi_{S_3} > M_0(S_2) + M_0(S_3) - M_0(S_1) - \sum_{p \in S_1} (\max_{p'} - 1) = 3$ , 即  $\xi_{S_2} + \xi_{S_3} > 3$ 。 考虑约束  $1 < \xi_{S_2} < M_0(S_2) = 4$  和  $0 < \xi_{S_3} < M_0(S_3) = 5$ , 得  $M_1(V_{S_2}) = 2, M_1(V_{S_3}) = 3$ 。 接下来以  $S_2$  为例说明如何添加控制库所  $V_{S_2}$ 。 由于  $p_1 \in k_{S_2}$  且  $k_{S_2}'(p_1) = 1$ , 则有一条从  $V_{S_2}$  到变迁  $t_1$  的权值为 1 的弧和一条从变迁  $t_2$  到  $V_{S_2}$  的权值为 1 的弧。 由于  $p_5 \in k_{S_2}$  且  $k_{S_2}'(p_5) = 1$ , 则有一条从  $V_{S_2}$  到变迁  $t_5$  的权值为 1 的弧和一条从变迁  $t_6$  到  $V_{S_2}$  的权值为 1 的弧。 由于  $p_{10} \in k_{S_2}$  且  $k_{S_2}'(p_{10}) = 1$ , 则有一条从  $V_{S_2}$  到变迁  $t_9$  的权值为 1 的弧和一条从变迁  $t_{10}$  到  $V_{S_2}$  的权值为 1 的弧, 由于  $p_{11} \in k_{S_2}$  且  $k_{S_2}'(p_{11}) = 1$ , 则有一条从  $V_{S_2}$  到变迁  $t_{11}$  的权值为 1 的弧和一条从变迁  $t_{11}$  到  $V_{S_2}$  的权值为 1 的弧。 经过有向弧的合并抵消后,  $V_{S_2}$  添加结果如图 2(a) 所示, 类似地, 控制库所  $V_{S_3}$  也能正确添加。 运用规则 2 对网系统进行优化, 可以得到有更多许可行为的非阻塞监督控制器, 如图 2(b) 所示。 两种控制规则控制性能比较如表 1 所列。

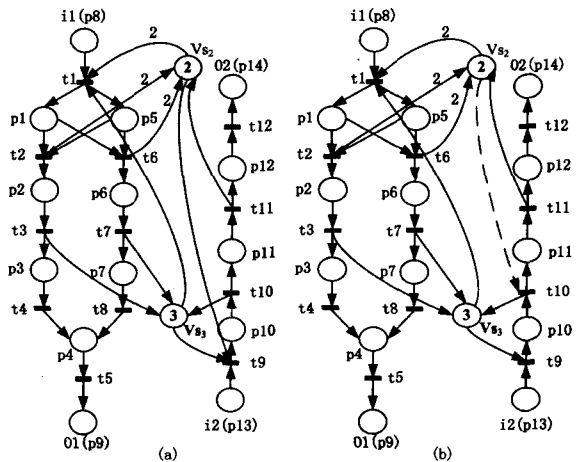


图 2 非阻塞的受控网(略去资源库所)

表 1 两种规则许可行为比较

闲置库所的托肯数( $i_1, i_2$ )	规则 1 的可达状态	规则 2 的可达状态
4, 4	6029	6830
5, 5	13761	16051
6, 6	26419	31303

**结束语** 文中针对一类资源共享系统 G-systems, 提出了一个有效的死锁控制策略。 本文方法的优点是只需要使每个基本信标最大可控就可以使所有未标识信标受控, 且运用输出弧优化方法较以前相比可以获得更多的许可行为, 但该策略仍不能获得最大许可行为, 将来的工作就是针对该网系统优化控制策略, 使得系统行为最大许可。

**参考文献**

[1] Zouari B, Barkaoui K. Parameterized supervisor synthesis for a modular class of discrete event system[C]// IEEE Int. Conf. Syst., Man, Cybern. Washington, DC, USA: IEEE, 2003: 1874-1879

(下转第 257 页)

的情况下,  $u_i = R(\alpha_i) - C_i$ , 其中:  $\alpha_i$  为参与人的市场占有率,  $C_i$  为企业需要付出的成本,  $u_i$  为参与人获得的利润, 即在博弈树终结点上特定路径下第  $i$  层决策点对应的值。

此时博弈树, 如图 6 所示。

首先, 由于在线支付行业需要很大的固定成本, 而生产的边际成本几乎接近零, 所以支付行业有很强的规模经济效应, 因此在线支付市场趋于相对集中化。其次, 支付行业有显著的网络外部性(消费者效用随着市场消费者或卖方人数的增加而增加)和双边市场特性[买方(或卖方)效用会受到卖方(或买方)数量的影响], 这些因素都会导致马太效应产生(即强者越来越强, 弱者越来越弱)。因此市场领导者和市场追随者、市场创新者并存的市场上, 领导者市场份额会越来越大, 追随者市场份额会日益萎缩, 创新者的发展取决于其产品创新能力。而现在由于市场参与主体众多, 竞争非常激烈, 故而在位者会选择竞争策略, 即会有  $u_{21} > u_{22}$ ,  $u_{23} > u_{24}$ 。根据逆向剪枝法算法, 将剪掉第二层决策节点的合作枝。二叉树变为如图 7 所示。

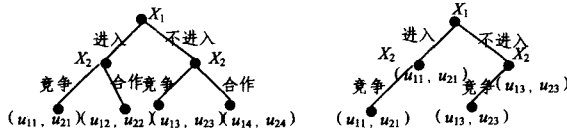


图 6 未到位第三方在线支付企业进退的博弈树 图 7 未到位企业进退的博弈树枝图 1

在这种情况下, 加之在线支付市场消费者所特有的粘性特点, 新进入的企业将很难打开市场, 如果潜在进入者是市场追随者, 则其如果选择进入, 取得的支付很大程度上将为负值, 故而将会有很大概率存在  $u_{11} < 0$ , 剪掉第一层决策节点的进入枝, 则二叉树变为如图 8 所示; 如果潜在进入者是市场创新者,  $u_{11}$  与  $u_{13}$  的大小取决于企业产品在技术、服务等方面与市场参与者产品的差异大小, 并且企业这种创新能力是否可以继续提高等, 因此对于市场创新者应该充分分析现在市场的竞争程度以及企业的竞争优势, 对  $u_{11}$  与  $u_{13}$  作出准确判断, 从而作出决策。

综上所述, 潜在进入者可以分为潜在市场追随者和潜在

市场创新者, 对于市场追随者, 子博弈精炼纳什均衡结果为{(不进入, 竞争)}; 对于潜在市场创新者, 对于不同创新程度的企业,  $u_{11}$  与  $u_{13}$  的大小关系不同, 企业应该采取不同的策略, 但总体可以有两种子博弈精炼纳什均衡结果{(不进入, 竞争)}, {(进入, 竞争)}, 如图 8、图 9 所示。



图 8 未到位企业进退的博弈树枝图 2 图 9 未到位企业进退的博弈树枝图 3

**结束语** 本文首先对第三方在线支付企业现状进行了介绍, 然后对第三方支付企业面对市场竞争时的策略选择作出具体分析。因为市场创新者较少, 所以本文主要分析在面对市场领导者不同竞争策略时, 市场追随者采取的最优策略。认为对于追随者, 当领导者采取竞争策略时, 最优策略是退出, 当领导者采取合作策略时, 最优策略是留在市场, 并且采取高性价比竞争策略, 以通过扩大市场份额来盈利。对于潜在进入者, 应该对潜在市场追随者和潜在市场创新者分开讨论, 对于潜在市场追随者, 最优策略是不进入; 对于潜在市场创新者, 应该认真分析企业的竞争优势, 即企业产品与在位企业产品差异化程度, 以及企业进一步创新的可能性, 从而作出进入或不进入决策。

## 参考文献

- [1] <http://www.iresearch.com.cn>
- [2] <http://www.analysis.com.cn>
- [3] 张维迎. 博弈论与信息经济学[M]. 上海: 上海三联书店上海人民出版社, 2002
- [4] 严蔚民, 等. 数据结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [5] 邓向阳, 等. 算法分析与设计[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006
- [6] 刘晓昱. C语言与算法分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006
- [7] Xing K Y, Hu B S, Chen H X. Deadlock avoidance policy for Petri-net modelling of flexible manufacturing systems with shared resources[J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1996, 41(2): 289-295
- [8] Park J, Reveliotis S A. Deadlock avoidance in sequential resource allocation systems with multiple resource acquisitions and flexible routings[J]. IEEE Trans. Robot. and Automat., 2001, 46(10): 1572-1583
- [9] Kumaran T, Chang W, Cho H. A structured approach to deadlock detection, avoidance, and resolution in flexible manufacturing systems[J]. Int. J. Prod. Res., 1994, 32(10): 2361-2379
- [10] 李志武, 丁伟, 朱荣明. 考虑 FMS 资源故障的一种死锁预防策略[J]. 西安电子科技大学学报, 2005, 32(6): 833-838
- [11] 李志武, 马雄. 一种利用基本信标的柔性制造系统死锁控制器设计方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(2): 262-267
- [12] 赵咪, 李志武. 一类离散事件系统的非阻塞监督控制器设计[J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(5): 735-738

(上接第 253 页)

- [2] Huang Y S, Jeng M D, Xie X L, et al. Siphon-based deadlock prevention policy for flexible manufacturing systems[J]. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A, 2006, 36(6): 1248-1256
- [3] Li Z W, Zhou M C. Elementary siphons of Petri nets and their application to deadlock prevention in flexible manufacturing systems[J]. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. Part A: Systems and Humans, 2004, 34(1): 38-51
- [4] Tricas T, Garcia-Valles F, Colom J M, et al. A Petri net structure-based deadlock prevention solution for sequential resource allocation systems[C]// IEEE Int. Conf. Robot. Autom. Spain, 2005: 271-277
- [5] Ezpeleta J, Recalde L. A deadlock avoidance approach for non-sequential resource allocation systems[J]. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A, 2004, 34(1): 93-101
- [6] Li Z W, Zhou M C. Clarifications on the definitions of elementary siphons in Petri nets[J]. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., 2006, 36(6): 1227-1229