

文章编号: 1001-0920(2006)12-1343-06

## 基于信标的柔性制造系统的优化死锁预防策略

胡核算, 李志武, 王安荣

(西安电子科技大学 机电工程学院, 西安 710071)

**摘要:** 针对柔性制造系统(FMS)中的死锁问题, 根据矩阵理论给出了Petri网中基本信标的概念, 进而提出一种基于基本信标和混合整数规划法(MIP)的死锁预防策略。该策略将最优基本信标作为控制对象, 以混合整数规划法给出的系统无死锁条件为目标函数, 不考虑从属信标受控条件便可在多项式时间内使系统受控。该控制策略的显著特点是以较低的计算复杂度实现整个系统受控, 并使需要添加的控制库所和连接弧大大减少。控制实例证明了其有效性。

**关键词:** Petri网; 基本信标; 死锁预防; 混合整数规划法

**中图分类号:** TP278

**文献标识码:** A

## Optimal Deadlock Prevention Policy in FMS Using Siphons

HU He-suan, LI Zhi-wu, WANG An-rong

(School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China. Correspondent: HU He-suan, Email: hshu@mail.xidian.edu.cn)

**Abstract:** To solve deadlock problem arising in flexible manufacturing system (FMS), the concept of elementary siphons in Petri nets is proposed. Furthermore, a novel deadlock prevention policy based on elementary siphons and the mixed integer programming (MIP) algorithm is presented. In this policy, the optimal elementary siphons serve for the control objects, while the deadlock-free conditions derived from MIP perform as the objective function. The whole net system can be controlled efficiently without considering the dependent siphons. The main feature of this policy is that the net system can be controlled with minimal controlling places, arcs and low computational complexity. Simulation results demonstrate the effectiveness and efficiency of the proposed policy.

**Key words:** Petri nets; Elementary siphons; Deadlock prevention; Mixed integer programming (MIP)

### 1 引言

在柔性制造系统(FMS)中, 不同的待加工工件在离散时间点进入系统并被并发处理<sup>[1~4]</sup>。这些工件共享系统中有限的资源, 比如数控机床、自动导引车、机器人、缓冲区等。对于一个给定的柔性制造系统, 每个工件都有预定的加工进程, 这些进程的并发执行使得系统中的资源竞争不可避免。多个进程对有限资源尤其是共享资源的竞争必将导致死锁<sup>[5~7]</sup>。在包括柔性制造系统在内的并发系统中, 死锁应予竭力避免。死锁出现在系统的末端状态, 因而难以预测<sup>[8,9]</sup>。研究有效的死锁控制策略并确保系统

中无死锁是十分必要的。

关于死锁控制的研究, 主要集中在以下3个方面: 死锁检测与恢复, 死锁避免以及死锁预防。死锁检测与恢复允许产生死锁, 但要进行死锁的在线检测。一旦发现死锁, 则重新分配系统中的资源, 并将系统强制恢复到无死锁状态。死锁避免也是采用在线控制方式, 通过特定的前向预测算法, 在多个可行路径中选择一条无死锁路径。该方法可有效避免死锁并最大限度地保留系统的许可行为。不同于前者, 死锁预防离线地生成有效的控制策略, 并通过编译的方法将其加给受控系统, 从而确保受控系统无

收稿日期: 2005-08-31; 修回日期: 2006-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474018); 教育部归国留学人员基金项目(2004-527)。

作者简介: 胡核算(1977-), 男, 西安人, 博士生, 从事离散事件系统、Petri网的研究; 李志武(1967-), 男, 河北乐亭人, 教授, 博士生导师, 从事Petri网理论及应用等研究。

死锁

在算法实现方面,死锁检测与恢复、死锁避免和死锁预防都采用如下数学工具:图论、自动机和 Petri 网<sup>[9]</sup>。其中 Petri 网由于具有并发性和随机性,适于描述离散事件系统,被广泛应用于柔性制造系统的死锁分析与控制。Petri 网在死锁预防方面主要采用两种方法:可达图分析和网结构分析<sup>[7]</sup>。可达图分析采用暴力破解方法,生成系统的全部可达状态,诊断出死锁状态和必然导致死锁的坏状态,最后确定相应的预防策略。该方法虽可确保目标系统的最大许可,但由于 Petri 网固有的状态爆炸性而不具备普适性。网结构分析方法源于制造系统的死锁与 Petri 网中信标的强相关性<sup>[2]</sup>。信标一旦被清空将永远保持清空,从而导致系统出现死锁。然而,网模型中信标的个数与网的规模在理论上呈指数增长关系,这便使控制时所要添加的控制库所和连接弧非常多<sup>[8,9]</sup>。在网模型上添加过多的控制库所,不仅会使网的静态结构复杂化,而且限制了实际系统的动态行为。

本文从矩阵理论的角度出发,定义了基本信标,指出基本信标具有不唯一性,控制任意一组基本信标既可使整个系统受控,又使基本信标的个数不会超过网系统的规模。控制时可以根据具体要求,适当选择一部分信标作为基本信标,其余的作为从属信标。从使受控网系统的可达状态数最大化的角度出发,提出了最优基本信标的概念及其计算方法。根据该思想,一组基本信标如果与之相对应的从属信标都是强从属信标,则该组信标是最优基本信标,对其加以控制可使系统在受控的同时具有最多的可达状态数。这意味着实际系统具有更好的并发性能和更高的运行效率。

综合上述理论研究成果,本文提出了基于基本信标和混合整数规划法(MIP)的柔性制造系统(FMS)死锁预防策略,应用该算法可在多项式时间内计算出控制库所需要的初始托肯数。最后以一个柔性制造系统控制实例验证了该控制策略的有效性。

2 Petri 网的基本概念

Petri 网可表示为三元组  $N = (P, T, F)$ , 并满足条件  $P \cap T = \Phi, P \cup T = \Phi, F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 。其中:  $P$  和  $T$  分别表示库所和变迁的集合,  $F$  表示连接弧,  $|P| (|T|), |F|$  表示库所(变迁, 连接弧)的个数。

在 Petri 网中,  $\cdot x = \{y \in P \mid (y, x) \in F\}$  和  $x \cdot = \{y \in P \mid (x, y) \in F\}$  分别表示库所或变迁的前置集和后置集, 库所或变迁的集合的前置

集或后置集则表示集合中各元素的前置集或后置集的集合。库所的标识可表示为以  $P$  为序的映射  $M : P \rightarrow I_N$ , 其中  $I_N = \{0, 1, \dots\}$ 。  $(N, M_0)$  称为  $M_0$  状态时的网系统或有标识的网。  $M_0$  表示初始标识,  $M[t >]$  表示  $t$  在  $M$  状态时是使能的,  $M_0$  状态下的任意可达标识的全集记为  $R(N, M_0)$ 。

假设  $(N, M_0)$  是一个网系统, 变迁  $t$  是活的, 当且仅当  $\forall M \in R(N, M_0), \exists M' \in R(N, M), M[t > ; N$  是死的, 当且仅当  $\exists t \in T, M_0[t > ; (N, M_0)$  是无死锁的, 当且仅当  $\forall M \in R(N, M_0), \exists t \in T, M[t > ; (N, M_0)$  是活的, 当且仅当  $\forall t \in T, t$  是活的。  $P(T)$  向量可表示为以  $P(T)$  为序的映射  $I : P \rightarrow Z (J : P \rightarrow Z)$ , 其中  $Z$  表示整数。  $(N, M_0)$  是有界的, 当且仅当  $\exists k \in I_N \setminus \{0\}, \forall M \in R(N, M_0), \forall p \in P, M(p) \leq k$  成立。

关联矩阵  $N$  定义为二维映射  $[N] : P \times T \rightarrow Z, [N](p, t) = -1$ , 当  $p \in \cdot t$  时;  $[N](p, t) = 1$ , 当  $p \in t \cdot$  时;  $[N](p, t) = 0$ , 其他元素全为 0(1) 的列向量记为  $\mathbf{0}(1)$ 。  $I^T$  和  $N^T$  分别表示向量  $I$  和矩阵  $[N]$  的转置。  $I(J)$  是一个  $P(T)$  不变式, 当且仅当  $I \cdot \mathbf{0}(J) = \mathbf{0}$  且  $I^T [N] = \mathbf{0}^T ([N] J = \mathbf{0})$ 。  $I = \{p \in P \mid I(p) = 0\} (J = \{p \in P \mid J(p) = 0\})$  称为  $I(J)$  的支撑。

一个非空的库所集合  $S$  是信标, 当且仅当  $S \subseteq S'$ 。信标的全集记为  $\Pi$ 。当且仅当一个信标不包含其他信标时称为极小信标, 当且仅当一个极小信标不包含  $P$  不变式时称为严格极小信标。  $p$  是被  $M$  所标识的, 当且仅当  $M(p) > 0$ , 其中  $M(p)$  表示  $p$  在  $M$  下的托肯数。  $M(S) = \sum_{p \in S} M(p)$  表示  $S$  中的托肯数。

假设  $I$  为  $P$  不变式,  $S \subseteq P$  为信标,  $S$  是被  $I$  不变式控制的, 当且仅当  $I^T M_0 > 0$  且  $\forall p \in P \setminus S, I(p) = 0$ 。如无特殊说明, 文中向量均指列向量。

3 基本信标与从属信标

定义 1 假设  $S \subseteq P$  是网  $N$  中的一个信标,  $\lambda_S$  是  $S$  的特征  $P$  向量, 当且仅当满足  $\forall p \in S, \lambda_S(p) = 1$ ; 否则,  $\lambda_S(p) = 0$ 。全部特征  $P$  向量形成特征  $P$  向量组, 记为  $[\lambda]$ 。

定义 2 假设  $S \subseteq P$  是网  $N$  的一个信标,  $\eta_S$  是  $S$  的特征  $T$  向量, 当且仅当  $\eta_S = \lambda_S^T [N]$ 。

定义 3 假设  $S_1, S_2, \dots, S_n$  是网  $N$  中的信标, 它所对应的特征  $T$  向量组  $[\eta] = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n]$  构成向量空间, 该向量空间的最大线性无关向量组为  $\eta_k = [\eta_k, \eta_k, \dots, \eta_k]$ 。则  $S_i, S_j, \dots, S_k$  是  $N$  中的基本信标, 记为  $\Pi_E$ 。

定义 4 假设  $S \in \Pi \setminus \Pi_E$  是网  $N$  中的一个信

标,  $S_1, S_2, \dots, S_k$  是其中的基本信标, 则  $S$  是关于  $S_1, S_2, \dots, S_k$  的强从属信标, 当且仅当  $\eta_k = \prod_{i=1}^k a_i \eta_i$ ,  $a_1, a_2, \dots, a_k \in I_N \setminus \{0\}, i = 1, 2, \dots, k$

**定义 5** 假设  $S \in \Pi \setminus \Pi_E$  是  $N$  中的一个信标,  $S_1, S_2, \dots, S_n, \dots, S_{n+m} \in \Pi_E$  是其中的基本信标, 则  $S$  是关于  $S_1, S_2, \dots, S_n, \dots, S_{n+m}$  的弱从属信标, 当且仅当  $\eta_k = \prod_{i=1}^n a_i \eta_i - \prod_{j=n+1}^{n+m} a_j \eta_j, \forall k \in \{1, 2, \dots, n+m\}, a_k \in I_N \setminus \{0\}$ . 强从属信标和弱从属信标统称从属信标

**定理 1** 假设  $(N_0, M_0)$  是一个有标识的网系统,  $S = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}\}$  为其中的一个信标. 给  $N_0$  添加控制库所  $V_S$ , 产生新的网系统记为  $(N_1, M_1)$ , 且有: 1)  $I_1 = (\dots, 1_{p_{i1}}, 1_{p_{i2}}, \dots, 1_{p_{in}}, \dots, -1_{V_S}, \dots)^T$  是  $N_1$  的  $P$  不变式; 2)  $M_1(V_S) = M_0(S) - \xi_S, \xi_S \in I_N$ ; 3)  $\forall p \in P, M_1(p) = M_0(p)$ , 其中  $P$  是网  $N_0$  中库所的集合. 则称  $S$  是不变式控制的

由不变式可控的定义, 该定理显然成立

**定理 2** 假设  $(N_0, M_0)$  是一个网系统,  $S_1, S_2, \dots, S_n$  是其中的基本信标,  $S_0$  是关于  $S_1, S_2, \dots, S_n$  的强从属信标. 如果  $S_1, S_2, \dots, S_n$  被新的控制库所  $V_{S_1}, V_{S_2}, \dots, V_{S_n}$  不变式控制, 且有  $M_0(S_0) > \prod_{i=1}^n a_i M_0(S_i) - \prod_{i=1}^n a_i \xi_{S_i}$  成立, 则  $S_0$  是不变式控制的

**证明** 设  $\lambda_i(\eta_i)$  是  $S_i$  的特征  $P(T)$  向量,  $i \in \{0, 1, \dots, n\}$ ,  $(N_1, M_1)$  是添加了控制库所  $V_{S_1}, V_{S_2}, \dots, V_{S_n}$  的新网. 不难看出  $[N_1] = [N_0^T \mid \eta_{k_1} \mid \eta_{k_2} \mid \dots \mid \eta_{k_n}]^T, \eta^T = \lambda^T [N_0], i \in \{1, 2, \dots, n\}, \eta_0 = \prod_{i=1}^n a_i \eta_i$ . 显然

$$\begin{aligned} & (\lambda_0^T, -a_1, -a_2, \dots, -a_n) [N_1] = \\ & (\lambda_0^T, -a_1, \dots, -a_n) [N_0^T \mid \eta_{k_1} \mid \dots \mid \eta_{k_n}]^T = \\ & \lambda_0^T [N_0] - a_1 \eta_{k_1} - \dots - a_n \eta_{k_n} = \\ & \eta_0 - \prod_{i=1}^n a_i \eta_i = \mathbf{0}^T. \end{aligned}$$

可以看出,  $I_1 = (\lambda_0^T, -a_1, -a_2, \dots, -a_n)^T$  是一个  $P$  不变式

下面证明  $S_0$  不可被清空

$$\begin{aligned} I_1^T M_1 &= \\ & (\lambda_0^T, -a_1, \dots, -a_n) \times \\ & [M_0 \mid M_1(V_{S_1}) \mid \dots \mid M_1(V_{S_n})] = \\ & \lambda_0^T M_0 - a_1 M_1(V_{S_1}) - \dots - a_n M_1(V_{S_n}) = \\ & M_0(S_0) - a_1 (M_1(S_1) - \xi_{S_1}) - \dots - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & a_n (M_1(S_n) - \xi_{S_n}) = \\ & M_0(S_0) - \left( \prod_{i=1}^n a_i M_0(S_i) - \prod_{i=1}^n a_i \xi_{S_i} \right) > 0 \end{aligned}$$

由定理 1 可知,  $S_0$  不变式可控

**定理 3** 假设  $(N_0, M_0)$  是一个网系统,  $S_1, S_2, \dots, S_n, \dots, S_{n+m}$  是其中的基本信标,  $S_0$  是关于  $S_1, S_2, \dots, S_n, \dots, S_{n+m}$  的弱从属信标, 即有  $\eta_0 = \prod_{i=1}^n a_i \eta_i - \prod_{j=n+1}^{n+m} a_j \eta_j$ . 如果  $S_1, S_2, \dots, S_n, \dots, S_{n+m}$  被  $V_{S_1}, V_{S_2}, \dots, V_{S_{n+m}}$  不变式控制, 且满足条件  $M_0(S_0) > \prod_{i=1}^n a_i M_0(S_i) - \prod_{i=1}^n a_i \xi_{S_i}$ , 则  $S_0$  是不变式控制的

**证明** 类似于定理 2 的证明

**定理 4** 假设  $N = (P, T, F)$  是一个网系统, 其中库所的个数为  $|P|$ , 变迁的个数为  $|T|$ , 网中信标的个数为  $n$ . 则  $\sup(n) = 2^{|P|}$ , 式中  $\sup$  表示上确界

**证明** 考虑极限的情况. 在给定的一个网系统中, 任意一个或多个库所都有可能组成信标, 因此

$$\sup(n) = C^{|P|} + C^{|P|-1} + \dots + C^{|P|}$$

其中  $C$  表示组合运算. 根据二项式定理, 显然有  $\sup(n) = 2^{|P|}$  成立

**定理 5** 假设  $N = (P, T, F)$  是一个网系统, 其中库所的个数为  $|P|$ , 变迁的个数为  $|T|$ , 网中信标的个数为  $n$ , 基本信标的个数为  $m$ , 则  $m \in (|P|, |T|)$ .

**证明**  $m = \text{Rank}([\eta]^T) = \text{Rank}([\lambda^T][N])$ , 其中  $\text{Rank}$  表示求秩运算. 根据向量组的性质, 显然有  $m \in (\text{Rank}([\lambda]^T), \text{Rank}([N]))$ .  $m \in (|P|, |T|)$  成立

由定理 4 和定理 5 可以看出, 一般网系统中信标的个数随着网规模的扩大, 按以 2 为底的指数方式增长, 而基本信标的个数则严格小于网中库所数和变迁数. 在传统的控制算法中, 包括基本信标和从属信标的全部信标都要分别添加控制库所. 从属信标的不变式可控定理证明, 如果基本信标受控, 则从属信标可以间接受控. 因此, 基本信标从理论上大大

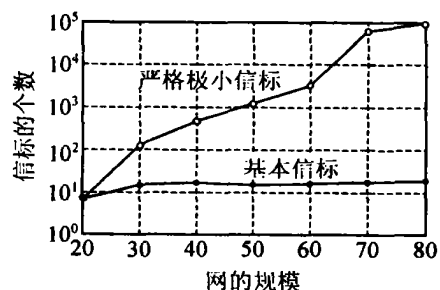


图 1 严格极小信标和基本信标的个数

减少了控制库所的数量

图 1 中的半对数曲线是严格极小信标和基本信标的个数随着系统规模扩大而增长的实验结果 不难看出, 该实验验证了定理 4 和定理 5 的正确性, 显示了基于基本信标的控制策略相对于传统的控制策略的优越性

### 4 最优基本信标及其计算方法

从属信标的可控性证明表明, 定理 2 和定理 3 是充分而非必要条件. 许多网系统的控制实践显示, 网系统中的强从属信标越多, 则受控网系统的可达状态数越多. 因此, 一组基本信标当相对于它的从属信标都是强从属信标时, 该组信标是最优基本信标

**定理 6** 设  $(N, M_0)$  是一个网系统,  $[\eta] = \{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n\}$  是其特征  $T$  向量 ( $\eta_i (i = 1, 2, \dots, n)$  为列向量),  $m = \text{Rank}([\eta])$ ,  $k$  是  $\eta_i (i = 1, 2, \dots, n)$  不能被除自身外所有的特征  $T$  向量线性表示的个数,  $r$  是这  $k$  个向量所组成的向量组  $\eta$  的秩. 如果存在一组基本信标, 相对于它的从属信标均为强从属信标, 则在该网系统中必有  $k = m = r$ .

该问题需分  $k < m$ ,  $k > m$  和  $k = m$  3 种情况讨论. 这里不再赘述.

根据定理 6, 不难得出在任意网系统中求取最优基本信标的计算方法:

- 1) 设  $k = 0, i = 1, m = \text{Rank}([\eta]), \eta_{ks} = \Phi, \eta_{ks} = \Phi$
- 2) 应用规划算法验证  $\eta$  能否被除自身外的所有向量  $(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{i-1}, \eta_{i+1}, \dots, \eta_n)$  线性表示;
- 3) 如果不能表示, 则  $k = k + 1$ , 并将  $\eta_i$  放入  $\eta_{ks}$ , 否则放入  $\eta_{ks}$ ;
- 4)  $i = i + 1$ ;
- 5) 如果  $i = n$ , 则转 2);
- 6) 计算  $r$ ;
- 7) 结束

**定理 7** 设  $(N, M_0)$  是一个网系统, 其中有  $|P|$  个库所,  $|T|$  个变迁. 设  $T(n)$  为验证  $\eta_i (i = 1, 2, \dots, n)$  能否被其他所有特征  $T$  向量  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{i-1}, \eta_{i+1}, \dots, \eta_n$  以全正系数线性表示需要的计算时间, 则验证所有  $\eta_i (i = 1, 2, \dots, n)$  能否被其他特征  $T$  向量  $\eta_j (j = 1, 2, \dots, n)$  以非负系数表示的计算, 必然可在多项式时间  $T$  内完成

由于  $T = nT(n)$ , 该定理显然成立

### 5 基于信标和规划算法的控制策略

由最优基本信标的计算方法不难看出, 应用基本信标最终添加的控制库所的个数很少, 这表明实际生成的控制器结构是简单的. 值得注意的是, 计算新添加的控制库所中包含的初始托肯数时, 仍需考

虑从属信标是否满足可控性条件. 这意味着在整个控制过程中仍需考虑所有的信标, 而这在 Petri 网中是难以实现的. 最大可被清空信标可以有效地解决该问题<sup>[10]</sup>.

网系统中最大可被清空的信标可在多项式时间求得. 假设  $S$  是标识  $M$  下最大可被清空的信标, 首先删除所有被  $M$  标识的库所, 然后删除没有输入库所和输出库所的变迁, 剩下的库所便组成标识  $M$  下最大可被清空的信标, 即  $S$ . 该算法可用混合整数规划方法来实现, 但需引入两个特殊变量: 1)  $v_p = 1$ , 当且仅当  $p \in S$ ; 2)  $z_t = 1$ , 当且仅当  $t \in S^*$ . 此时, 以下两个命题自然成立: 1)  $\forall t \in P^*, v_p = 0 \Rightarrow z_t = 0$ ; 2)  $\forall p \in T^*, z_t = 1 \Rightarrow v_p = 1$ . 这意味着任何信标必然满足如下条件: 1)  $z_t \leq v_p - |t| + 1, \forall t \in T$ ; 2)  $v_p \leq z_t, \forall (t, p) \in F$ ; 3)  $v_p, z_t \in \{0, 1\}$ .

混合整数规划法指出, 当一个网系统的  $\min v_p$  与该网中库所的个数相等时, 则该网是无死锁的. 所以如果以添加控制库所后所生成的新网为目标网系统, 建立一个目标函数为  $\min v_p = |P|$  的优化方程, 便可在不考虑从属信标的情况下, 求得使目标网系统无死锁的控制库所中的初始标识

**定理 8** 假设  $(N_0, M_0)$  是一个网系统,  $v_p = 1 \{p \in S\}, z_t = 1 \{t \in S^*\}, S = \{p_i | i = 1, 2, \dots, n\}$  是网系统中最大的可被清空的信标, 当且仅当  $G(M_0) < |P|$ , 其中  $G(M) = \min v_p$ . 其约束条件为: 1)  $z_t \leq v_p - |t| + 1, \forall t \in T$ ; 2)  $v_p \leq z_t, \forall (t, p) \in F$ ; 3)  $v_p \leq M(p)/S_B(p), \forall p \in P$ ; 4)  $v_p, z_t \in \{0, 1\}$ ; 5)  $M = M_0 + [N_0]Y, M \geq 0, Y \geq 0$ ; 6)  $S_B(p) = \max \{M(p) | M = M_0 + [N_0]Y, M \geq 0, Y \geq 0\}$ . 式中  $Y$  表示发射序列

证明参见文献[10]

**定理 9** 假设  $(N_0, M_0)$  是一个网系统, 则该网是无死锁的, 当且仅当  $G(M) = |P|$

根据定理 8, 该定理显然成立

由定理 8 知, 要使添加  $m$  个控制库所后系统无死锁, 则要求目标函数  $G(M_1) = \min v_p = n + m$ . 在实际控制中, 可记为  $G(M_1) = 0$ . 此时, 优化问题转化为目标规划问题, 求解时有必要引入中间变量  $d$ , 则原问题的目标函数可转化为约束条件  $v_p + d = m + n$ . 求  $G(M_1) = \min v_p$  问题便转化为求  $G(M_1) = \min(d)$  问题. 根据已知定理, 控制库所中的托肯数  $M(V_{s_i})$  越大, 则受控系统的可达状态数越多, 即  $\max M(V_{s_i})$  也应作为系统控制的一个

目标函数 因此, 整个算法可表示为一个多目标规划模型  $G(M_1) = \min(d) \quad \max M(V_{S_i})$ , 约束条件需添加如下几项: 1)  $M = M_0 + N_0 Y, M \geq 0, Y \geq 0$ ; 2)  $S_B(p) = \max\{M(p) \mid M = M_0 + N_0 Y, M \geq 0, Y \geq 0\}$ ; 3)  $d \geq 0$

至此, 整个基于基本信标理论和规划算法的死锁预防控制策略可以总结如下:

- 1) 建立系统网模型  $(N_0, M_0)$ , 假设该网具有  $|P|$  个库所,  $|T|$  个变迁;
- 2) 计算最优基本信标  $\Pi_E = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ ;
- 3) 添加  $m$  个控制库所  $\{V_{S_1}, V_{S_2}, \dots, V_{S_m}\}$ ;
- 4) 对  $(N_1, M_1)$  建立规划模型  $G(M_1)$ ;
- 5) 求解该模型, 最优解中的  $M(V_{S_i})$  表示  $V_{S_i}$  所对应的最优初始托肯数;
- 6) 算法结束, 此时系统无死锁

### 6 柔性制造系统控制实例

图 2 表示一个实际的柔性制造系统 系统中有 2 台自动导引车(A1, A2), 3 个机器人(R1, R2, R3); 数控设备有数控车床(L), 数控铣床(M), 数控磨床(G)和数控钻床(D); 还有 1 个半成品缓冲器(B). 其中每个机器人一次能夹持 2 个工件, 每台设备可同时加工 2 个工件 系统有 2 套输入输出传送装置(C1, C2). 工件的加工流程如下:

- 1) 工件 1 从传送带 C1 进入系统, 经车床 L 加工后进入缓冲器 B. 然后或者经过铣床 M 加工, 或者经过钻床 D 加工, 从传送带 C2 输出
- 2) 工件 2 从 C2 进入系统, 经钻床 D 加工后进入缓冲器 B. 然后或者经过磨床 G 加工, 或者经过车床 L 加工, 从传送带 C1 输出

在加工过程中, 自动导引车 A1 主要工作在传送带 C1 的入口和出口; A2 主要工作在传送带 C2 的出口和入口 机器人 R1 主要用于传送带 C1 到车床 L, 铣床 M 到传送带 C2, 缓冲器 B 到磨床 G, 车床 L 到传送带 C1 之间的工件传递; 机器人 R2 主要用于

车床 L 到缓冲器 B, 缓冲器 B 到钻床 D, 钻床 D 到缓冲器 B, 缓冲器 B 到车床 L, 磨床 G 到传送带 C1 之间的工件传递; 机器人 R3 主要用于钻床 D 到传送带 C2, 缓冲器 B 到铣床 M, 传送带 C2 到钻床 D 之间的工件传递

图 3 是根据图 2 所示的制造系统建立的 Petri 网模型 系统中共有 255 个信标, 其中基本信标 18 个. 根据最优基本信标计算方法, 求得基本信标并记为集合  $\{S_a, S_b, \dots, S_r\}$ .

对其添加控制库所如图 4 所示 将其中的初始托肯数记为  $m_i, i \in \{a, b, \dots, r\}$ . 应用混合整数规划法计算出各个控制库所的初始托肯数分别为

$$\begin{aligned}
 m_a &= 5, m_b = 5, m_c = 5, m_d = 5, m_e = 5, \\
 m_f &= 5, m_g = 5, m_h = 5, m_i = 5, m_j = 5, \\
 m_k &= 5, m_l = 5, m_m = 5, m_n = 5, m_o = 5, \\
 m_p &= 3, m_q = 5, m_r = 5
 \end{aligned}$$

分析结果表明, 添加如上 18 个控制库所和 88 条连接弧后, 系统是活性的且可达状态数为 4 739. 如果按文献[2]的方法控制, 要达到同样的控制效果, 则需添加 255 个控制库所和至少 1 020 条连接弧, 使得目标系统的静态结构复杂化, 动态行为也受到很大的限制

根据定理 4 和定理 5, 大规模制造系统中信标的个数是难以想象的, 但其中基本信标的个数仍严格受限制于网系统的规模 因此, 传统的基于控制全部信标的控制策略往往难以处理大规模的系统, 而基于最优基本信标和混合整数规划法的控制策略则适合于此类系统

表 1 给出了传统策略与基于信标和规划算法的策略控制不同规模网系统的实验结果 其中字母 C, F, T 和 S 分别表示控制库所个数, 连接弧个数, 控制策略生成时间和受控系统可达状态数; 下标 EM 表示基于信标和规划算法的控制策略, 下标 T 表示基于传统算法的控制策略; 符号—表示不可计算 实

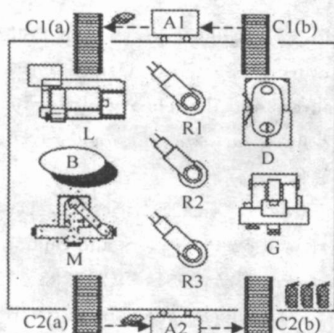


图 2 柔性制造系统实例

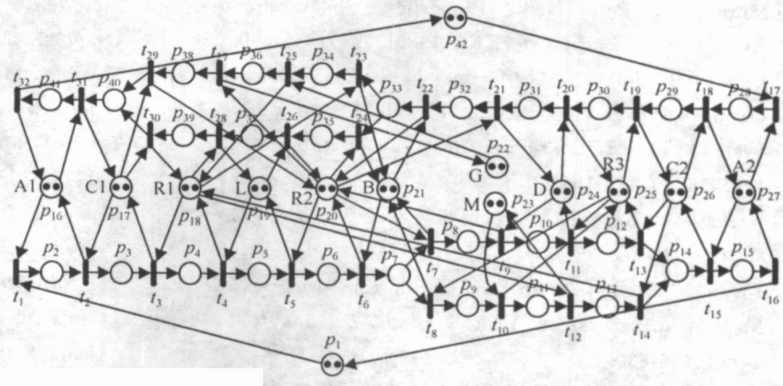


图 3 柔性制造系统对应的 Petri 网模型

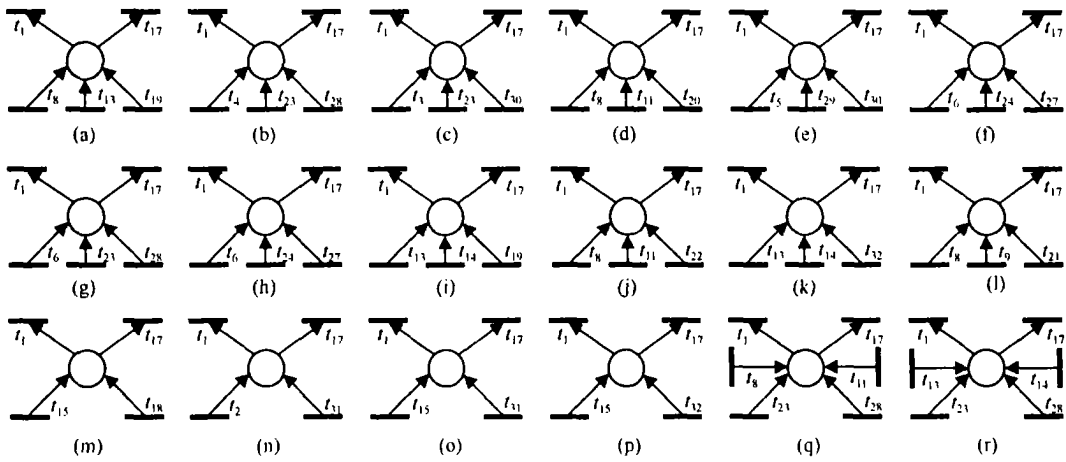


图4 柔性制造系统对应的控制库所和连接弧

表1 传统策略与基于信标和规划算法的策略对不同规模系统的控制效果

$ P $	$ T $	$ F $	$C_{EM}$	$F_{EM}$	$T_{EM}/s$	$S_{EM}$	$C_T$	$F_T$	$T_T/s$	$S_T$
15	11	38	2	10	1	155	3	15	1.5	74
26	20	75	6	32	20	4 029	18	106	100	2 590
72	64	260	10	37	100	266 802	—	—	—	—

验中,计算机的基本配置为 2.8 GHz 的 Pentium 处理器,512MB 的内存,Windows XP 操作系统;仿真使用的代码采用 C 语言编写。可见,随着系统规模的增大,传统的控制策略不再适用,而本文提出的策略仍然有效。

### 7 结 论

本文提出了控制任意基本信标使整个制造系统受控的思想,论证了基本信标的个数不超过系统对应的库所或变迁的个数,从而减少了死锁预防所要添加的控制库所的个数。提出了基于基本信标及混合整数规划法的优化死锁预防策略。柔性制造系统实例表明,这种控制策略可用比其他策略更少的控制库所和连接弧实现对系统的控制,并能保证受控系统生成更多的可达状态数,保持良好的动态性能。

### 参考文献(References)

[1] Murata T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications[J]. *Proc of IEEE*, 1989, 77(4): 541-580

[2] Ezpeleta J, Colom JM, Martinez J. A Petri Net Based Deadlock Prevention Policy for Flexible Manufacturing Systems[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1995, 11(2): 173-184

[3] 王成恩. 制造系统控制结构现状与发展[J]. *控制与决策*, 1999, 14(6): 625-630  
(Wang C E. State of the Art of Control Structures of Manufacturing Systems[J]. *Control and Decision*, 1999, 14(6): 625-630)

[4] 田国会. 自动化仓库输送调度问题的建模与控制研究[J]. *控制与决策*, 2001, 16(4): 447-451.

(Tian G H. Research on Modeling and Control for Transporting Scheduling Problem of an Automated Warehouse[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(4): 447-451.)

[5] Li ZW, Zhou M C. Elementary Siphons of Petri Nets and Their Application to Deadlock Prevention for Flexible Manufacturing Systems[J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 2004, 34(1): 38-51.

[6] 李志武, 王安荣, 贾建援. Petri 网不变式和状态方程求解[J]. *西安电子科技大学学报*, 2003, 30(2): 259-263  
(Li ZW, Wang AR, Jia JY. Method for Solving Invariants and State Equations for Petri Nets[J]. *J of Xidian University*, 2003, 30(2): 259-263)

[7] Viswanadham N, Narahari Y, Johnson T L. Deadlock Prevention and Deadlock Avoidance in Flexible Manufacturing Systems Using Petri Net Models[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1990, 6(6): 713-723

[8] Uzam M. An Optimal Deadlock Prevention Policy for Flexible Manufacturing Systems Using Petri Net Models with Resources and the Theory of Regions[J]. *Int J of Advanced Manufacturing Technology*, 2002, 19(3): 192-208

[9] Huang Y S, Jeng M D, Xie X L, et al. Deadlock Prevention Policy Based on Petri Nets and Siphons[J]. *Int J of Production Research*, 2001, 39(2): 283-305

[10] Chu F, Xie X L. Deadlock Analysis of Petri Nets Using Siphons and Mathematical Programming [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1997, 13(6): 793-804