第 12 卷第 5 期
1995 年 10 月

控制理论与应用
CONTROL THEORY AND APPLICATIONS

Vol. 12, No. 5
Oct., 1995

一类受控 Petri 网的基于管程的广义互斥控制

陈浩勋
(西安交通大学系统工程研究所·西安,710049)

摘要:本文讨论受控 Petri 网的广义互斥控制问题. 首先,我们给出了此问题存在管程最小约束控制解的充要条件. 然后,对一类其不可控子网为有限状态机的受控 Petri 网,证明了其广义互斥控制问题总存在管程最小约束控制解,并给出了综合这一管程控制的算法.

关键词:离散事件系统控制;受控 Petri 网;管程

1 引 言

离散事件系统控制的研究起源于 Ramadge 和 Wonham 的开创性工作[1]. 给定一个离散事件系统及其控制规范,控制综合问题的任务是要设计一个控制器,使受控后系统的行为满足这一控制规范. 尽管 Ramadge 和 Wonham 所提出的有限状态自动机模型对建立离散事件系统控制的基本框架起了很大的作用,但它对描述大规模复杂并发系统有很大的局限[2]. 因此,Krogh 等[2,3]又提出了离散事件系统的受控 Petri 网模型. 关于受控 Petri 网方面的研究进展可参见[4].

受控 Petri 网的控制规范可分成两类:状态规范和事件规范. 状态规范一般由一组广义互斥约束给定,而事件规范则较复杂,一般是系统可能事件轨迹的一个子集.

至于控制策略,一般采用的是状态反馈律. 本文作者[5]和 Giua 等[6]提出了管程控制. 管程(Monitor)最初是并发程序设计中的概念. 在 Petri 网控制中,管程可表示成一个库所及其相伴随的一组输入和输出变迁. 其中,这个库所中的初始 token 数表示系统中某种资源的可用数目. 组成系统的各个子进程对这种资源的占用和释放分别对应于输出和输入变迁的触发.

管程控制的优点是控制算法简单,几乎不需存储什么数据,实时性好,并且由于闭环系统仍是一个标准的 Petri 网,故一切 Petri 网的分析技术都可用于对闭环系统进行结构性质分析,美中不足的是,并非所有受控 Petri 网的广义互斥控制都能用管程来实现其最小约束控制.

本文讨论受控 Petri 网的广义互斥控制问题. 首先,我们给出了此问题存在管程最小约束控制解的充要条件. 然后,对一类其不可控子网为有限状态机的受控 Petri 网,证明了其广义互斥控制问题总存在管程最小约束控制解,并给出了综合这一管程控制的算法. 最后,我们用 Holloway 和 Krogh 一文中 AGV 协调控制的例子[3]验证了此算法.

2 基本概念

2.1 受控 Petri 网及广义互斥控制

本文为了便于表达,受控Petri网模型仍和一般Petri网一样,只是假定它的一部分

本文于 1994 年 2 月 14 日收到. 1995 年 1 月 16 日收到修改稿.

变迁是可控的，另一部分变迁是不可控的. 由于这一约定，本文中所使用的标准 Petri 网的术语和符号将不作一一说明.

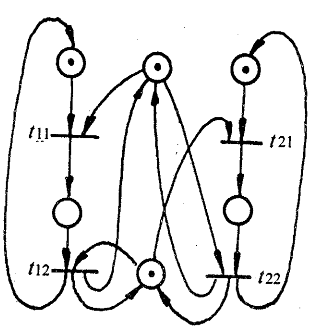
设 $N=(P,T,E,W)$ 为所要考虑的受控 Petri 网，其中 P 为库所集，T 为变迁集，$E\subseteq(P\times T)\cup(T\times P)$ 为连接库所和变迁的有向弧集，$W:E\rightarrow\mathbf{N}$($\mathbf{N}$ 为非负整数集) 为有向弧的加权函数. 若 $W(a)=1,\forall\ a\in E$，则 N 称为普通网，这时 N 表示中将略去 W. 本文我们讨论普通网的控制，但在讨论闭环系统时，则会碰到非普通网. 我们假定 $T=T_c\cup T_u,T_c\cap T_u=\varnothing$，其中 T_c 为可控变迁集，T_u 为不可控变迁集.

一个广义互斥约束可用二元对 $(\boldsymbol{w},\boldsymbol{k})$ 表示，其中 $\boldsymbol{w}:P\rightarrow\mathbf{N}$ 为非负加权向量，k 为一正整数. 给定一组广义互斥约束 $(\boldsymbol{w}_i,k_i)$，$i=1,2,\cdots l$，其相对应的允许标记集和禁止标记集分别定义为 $M(W,\boldsymbol{k})=\{m\in\mathbf{N}^P|W^{\mathrm{T}}m\leqslant\boldsymbol{k}\}$，和 $M_f(W,\boldsymbol{k})=\mathbf{N}^P\backslash M(W,\boldsymbol{k})=\{m\in\mathbf{N}^P|\exists\ i\in\{1,2,\cdots,l\},\boldsymbol{w}_i^{\mathrm{T}}\cdot m>k_i\}$，其中 $W=(\boldsymbol{w}_1,\boldsymbol{w}_2,\cdots,\boldsymbol{w}_l)$，$\boldsymbol{k}=(k_1,k_2,\cdots,k_l)$.

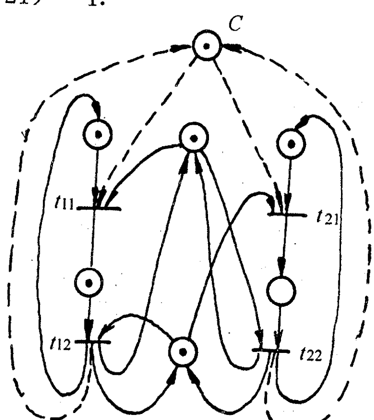
给定一个网系统 $\langle N,m_0\rangle$(m_0 为初始标记) 及由一组广义互斥约束指定的控制规范 $(W,\boldsymbol{k})$，控制综合的任务是设计一个最小约束控制律(器)，使受控后的系统的状态不会进入禁止状态集 $M_f(W,\boldsymbol{k})$. 最小约束(最大允许)控制律是某种意义下的最优控制律，其定义参见[1][3].

2.2 管 程

我们用一个例子来说明管程(Monitor). 请看图 1(a)和图 1(b)，其中图 1(a)表示一个未受控制的 Petri 网，它会发生死锁；图 1(b)表示图 1(a)中系统加一个管程控制后的闭环系统网，这个闭环系统不会发生死锁. 形式上，一个管程可表示成五元对 (k_0,T_I,T_O,W_I,W_O)，其中 k_0 为一正整数表示代表这一管程的库所的初始 token 数，T_I,T_O 分别为这一库所的输入和输出变迁集，$T_I,T_O\subseteq T$；$W_I:T_I\rightarrow N,W_O:T_O\rightarrow N$ 分别为这一库所的输入和输出弧的加权函数. 在图 1(b) 中，对应所加管程的库所为 C，其中 $k_0=1,T_I=\{t12,t22\},T_O=\{t11,t21\},W_I(t12)=W_I(t22)=W_O(t11)=W_O(t21)=1$.



(a)



(b)

图 1 管程控制

2.3 不可控子网及 S-减

给定受控 Petri 网 $N=(P,T,E)$，其不控子网定义为 $N_u=(P,T_u,E_u)$，其中 T_u 为 N 的不可控变迁集，$E_u=(E\cap(T_u\times P))\cup(E\cap(P\times T_u))$. 即 N_u 由 N 通过删除其所有可

控变迁及其相关联的弧得. N_u 可能有弧立的库所，还可能为一个不连通的网.

给定一个广义互斥约束 $(\boldsymbol{w},k)$，N 关于 $(\boldsymbol{w},k)$ 的有影响不可控子网(简称为IUS)定义为 $N_u^w=(P_w,T_w,E_w)$，其中 $P_w=\{p\in P\mid$ 在网 N_u 中，存在一条从库所 p 到 F_w 中某个库所的有向通路$\}$，$F_w=\{p\in P\mid \boldsymbol{w}(p)>0\}$，$T_w=\{t\in T_u\mid$ 在网 N_u 存在一条从变迁 t 到 F_w 中某个库所的有向通路$\}$，$E_w=E\cap\{T_w\times P_w)\cup(P_w\times T_w)\}$. 即 N_u^w 是 N_u 的一个子网，它通过对 N_u 删除其不存在有向通路达到 F_w 的所有库所和变迁及其相关联的弧得到. IUS 的例子请看本文第五节.

给定一个普通 Petri 网 $N=(P,T,E)$，$P=(p_1,\cdots,p_n)$，$T=\{t_1,\cdots,t_m\}$，及其邻接矩阵(incidence matrix) $A=(a_{ij})_{m\times n}$，其中 $a_{ij}=1$ 若 $(t_i,p_j)\in E$，$a_{ij}=-1$ 若 $(p_j,t_i)\in E$，$a_{ij}=0$ otherwise. 一个 n 维非负整数向量 x 称为是 N 的一个 S- 减，当且仅当 $Ax\leqslant 0$. 请注意到与 S- 减有关的概念是 S- 不变[7].

给定一个非负整数向量 $\boldsymbol{w}:P\to\mathbf{N}$，$N$ 的一个 S- 减 x 称为是由 $\boldsymbol{w}$ 所生成的一个最小 S- 减，当且仅当 1) $x(p)\geqslant w(p)\ \forall\ p\in P$；2) 不存在满足 1) 的 N 的其它 S- 减 $\tilde{x}$，使 $\tilde{x}(p)\leqslant x(p)$，$\forall\ p\in P$. 我们用 $SD_{\min}(N,\boldsymbol{w})$ 表示由 $\boldsymbol{w}$ 所生成的 N 的所有最小 S- 减所组成的集合.

3 用管程实现最小约束广义互斥控制的条件

设受控 Petri 网 N 如定义 S- 减时一样，其初始标记为 m_0.

定义 3.1 给定受控 Petri 网 N，N 的一个管程 $C=(k_0,T_I,T_O,W_I,W_O)$ 称为是(结构)可实现的，当且仅当 $T_o\cap T_u=\varnothing$.

上述定义是说结构可实现的管程在任何标记下不会阻止不可控变迁的触发.

给定一个广义互斥约束 $(\boldsymbol{w},k)$，记 $r(t_i,\boldsymbol{w})=\sum\limits_{j=1}^{n}a_{ij}\boldsymbol{w}(p_j)$，$i=1,\cdots,m$. 若 $\sum\limits_{p\in P}\boldsymbol{w}(p)m_0(p)\leqslant k$，定义管程 $C(N,\boldsymbol{w},k)=(k_0,T_I,T_0,W_I,W_0)$，其中 $k_0=k-\sum\limits_{p\in P}\boldsymbol{w}(p)m_0(p)$，$T_I=\{t\in T\mid r(t,\boldsymbol{w})<0\}$，$T_O=\{t\in T\mid r(t,\boldsymbol{w})>0\}$，$W_I(t)=-r(t,\boldsymbol{w})$，$\forall\ t\in T_I$，$W_O(t)=r(t,\boldsymbol{w})$，$\forall\ t\in T_O$.

推论 3.1 管程 $C(N,\boldsymbol{w},k)$ 可实现当且仅当 $r(t_i,\boldsymbol{w})\leqslant 0$ 对任何 $t_i\in T_u$.

给定一组广义互斥约束 $(W,\boldsymbol{k})$，我们定义

$\widetilde{M}_f(W,\boldsymbol{k})=\{m\in\mathbf{N}^P\mid m[\sigma>m'\in M_f(W,\boldsymbol{k})\ \wedge\ \sigma\in T_u^*\ \wedge\ m\notin M_f(W,\boldsymbol{k})\}$，

$M_a(W,\boldsymbol{k})=M(W,\boldsymbol{k})\backslash\widetilde{M}_f(W,\boldsymbol{k})$.

$M_a(W,\boldsymbol{k})$ 为控制规范 $(W,\boldsymbol{k})$ 所对应的“确切”的允许标记集.

定理 3.1 给定受控 Petri 网 N 及一组广义互斥约束 $(W,\boldsymbol{k})$ $(W=(\boldsymbol{w}_1,\cdots,\boldsymbol{w}_l)$，$\boldsymbol{k}=(k_1,\cdots,k_l)^{\mathrm{T}}$，对任何 $m_0\in M_a(W,\boldsymbol{k})$ 均存在一组可实现的管程实现最小约束广义互斥控制的充分必要条件是：存在 $W'=(\boldsymbol{w}_1',\cdots,\boldsymbol{w}_{l'}')$，$\boldsymbol{k}'=(k_1',\cdots,k_{l'}')^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{w}_i'\in\mathbf{N}^P$，$k_i'\in\mathbf{N}$，$i=1,\cdots,l'$，使 $M_a(W,\boldsymbol{k})=M(W',\boldsymbol{k}')$ 及 $r(t_i,\boldsymbol{w}_k')\leqslant 0$，$\forall\ t_i\in T_u$，$k=1,\cdots,l'$.

证 充分性：若定理中的条件满足，根据推论 3.1，$C(N,\boldsymbol{w}_i',k_i')$，$i=1,\cdots,l'$ 均可实现并且易证这 l' 个管程实现最小约束广义互斥控制.

必要性：假定存在一组可实现的管程 $\mathscr{C}=\{C(N,\boldsymbol{w}_i',k_i'),i=1,\cdots,l'\}$ 实现最小约束广义互斥控制，则根据推论 3.1 有 $r(t_i,\boldsymbol{w}_k')\leqslant 0\ \forall\ t_i\in T_u$，$k=1,\cdots,l'$，从而马上可推出 $M(W',$

$k')$ 是 $M(W,k)$ 的控制不变子集(控制不变子集的定义参见[4]. 所以 $M(W',k') \subseteq Ma(W,k)$.

假定 $M(W',k') \neq M_a(W,k)$，则存在 $m' \in M_a(W,k)$ 使 $m' \notin M(W',k')$ 从而 $\varnothing \notin U_{\mathscr{C}}(m')$，$\varnothing \in U_{(W,k)}(m')$，其中 $\varnothing$ 表示空集，$U_{\mathscr{C}}$，$U_{(W,k)}$ 分别表示管程组 $\mathscr{C}$ 所对应的 N 的状态反馈控制律及控制规范 (W,k) 所对应的 N 的最小约束(最大允许)状态反馈控制律(详见[8]). 所以 $U_{\mathscr{C}}(m') \subsetneq U_{(W,k)}(m')$. 这与 $\mathscr{C}$ 实现最小约束广义互斥控制的假设矛盾，故

$$M(W',k') = M_a(W,k).$$

4　一类受控 Petri 网的基于管程的最小约束控制

本节，我们讨论一类受控 Petri 的广义互斥控制，这类 Petri 网关于给定的每一个广义互斥约束的 IUS 均为状态机器.

4.1　状态机器的 token 加权和

一个普通 Petri 网称为是一个状态机器当且仅当它的每一个转移恰有一个输入库所和一个输出库所. 我们允许状态机器是一个不连通的网. 状态机器的邻接矩阵 A 的特征是每行恰有二个非零元素，一个是 $+1$，另一个是 -1. 以下我们假定 A 的列数为 n.

对状态机器 N 及邻接矩阵 A，首先我们有：

推论 4.1　$m \in R(N,m_0)$ 当且仅当存在非负整数向量 x 使

$$m = m_0 + A^{\mathrm{T}}x,\quad m \geqslant 0.$$

其中 m_0 为 N 的初始标记.

推论 4.2　$(I_n, -A^{\mathrm{T}})$ 为全么模矩阵(totally unimodular matrix)，其中 I_n 为与 A 同列数的单位矩阵. 即 $[I_n, -A^{\mathrm{T}}]$ 的任一方子矩阵的行列式值为 **0**,**1** 或 **−1**.

推论 **4.1** 和 **4.2** 的证明因篇幅所限，此处略去.

根据推论 **4.1** 和 **4.2**，我们有：

定理 4.1　对状态机器 N 及任一 n 维非负整数列向量 $\boldsymbol{w}$，，

$$\max\{m^{\mathrm{T}}\boldsymbol{w} \mid m \in R(N,m_0)\} = \min\{m_0^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} \mid \boldsymbol{x} \geqslant \boldsymbol{w}, A\boldsymbol{x} \leqslant 0\}. \tag{4.1}$$

证　根据推论 4.1，$m \in R(N,m_0)$ 当且仅当存在非负整数向量 x 使 $m = m_0 + A^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}$. 这样，(4.1)式左边可等价成如下的线性规划问题

$$\max J = c^{\mathrm{T}}z,\quad \mathrm{s.t.}\quad Dz = m_0,\quad z \geqslant 0. \tag{4.2}$$

其中

$$c = \begin{bmatrix} \boldsymbol{w} \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix},\quad z = \begin{bmatrix} m \\ x \end{bmatrix},\quad D = [I_n, A^{\mathrm{T}}].$$

(4.2)的对偶问题为

$$\min L = m_0^{\mathrm{T}}x,\quad \mathrm{s.t.}\quad D^{\mathrm{T}}x \geqslant c. \tag{4.3}$$

而约束 $D^{\mathrm{T}}x \geqslant c$ 展开即为 $x \geqslant w$，$Ax \leqslant 0$. 从而问题(4.3)和(4.1)的右边等价. 从线性规划理论知，问题(4.2)和(4.3)的最优目标值分别在它们的约束集的极点上达到. 而根据 D 的全么模性，这两个约束集的所有极点的坐标均取整数值. 于是，应用线性规划的对偶定理即得等式(4.1).

推论 4.3　对状态机器 N 及任一 n 维非负整数列向量 $\boldsymbol{w}$

$$\max\{m^{\mathrm{T}}\boldsymbol{w} \mid m \in R(N,m_0)\} = \min_{x \in SD_{\min}(N,\boldsymbol{w})} m_0^{\mathrm{T}}x. \tag{4.4}$$

4.2 基于管程的最小约束控制

首先我们有：

定理 4.2 给定受控 Petri 网 N 及一个广义互斥约束 (w,k)，

$$M_a(w,k)=\{m\in \mathbf{N}^P\mid R(N_u,m)\cap M_f(w,k)=\varnothing\}$$
$$=\{m\in \mathbf{N}^P\mid R(N_u^w,m')\cap (M_f(w,k)\mid P_w)=\varnothing, m'=m\mid P_w\}. \tag{4.5}$$

其中 P_w 是 N_u^w 的库所集，$m'=m\mid P_w$ 是 m 在 P_w 上的投影向量，即 $m':P_w\to\mathbf{N}, m'(p)=m(p)\ \forall\ p\in P_w, M_f(w,k)\mid P_w=\{m'\mid m'=m\mid P_w, m\in M_f(w,k)\}$

证 第一个等式参见[4]. 要证明第二个等式，我们只要证明 $R(N_u,m)\cap M_f(w,k)=\varnothing\Leftrightarrow R(N_u^w,m')\cap(M_f(w,k)\mid P_w)=\varnothing$，其中 $m'=m\mid P_w$.

$(\Rightarrow)$假定 $R(N_u,m)\cap M_f(w,k)=\varnothing$，则$(R(N_u,m)\mid P_w)\cap(M_f(w,k)\mid P_w)=\varnothing$. 既然对任何 $m'=m\mid P_w$，我们有 $R(N_u^w,m')\subseteq R(N_u,m)\mid P_w$，故 $R(N_u^w,m')\cap(M_f(w,k)\mid P_w)=\varnothing$.

$(\Leftarrow)$ 假定 $R(N_u^w,m')\cap(M_f(w,k)\mid P_w)=\varnothing$. 既然对 $\forall\ \tilde{m}\in R(N_u,m)$，$\sum_{p\in P}w(P)\tilde{m}(p)=\sum_{p\in P_w}w(p)\tilde{m}(p)$，并且在标记 $\tilde{m}$ 触发任一属于 $T-T_w$ 的变迁将导致新标记 $\tilde{m}'$ 满足 $\tilde{m}'(p)\leqslant\tilde{m}(p),\forall\ p\in P_w$，故极大值 $\max\{\sum_{p\in P}w(p)\tilde{m}(p)\mid\tilde{m}\in R(N_u,m)\}$ 在某个从 m 出发通过触发一系列属于 T_w 的变迁达到的标记 m^* 上达到，即 $m^*\mid P_w\in R(N_u^w,m')$，故这个极大值等于 $\max\{\sum_{p\in P_w}w(p)\hat{m}'(p)\mid\hat{m}'\in R(N_u^w,m')\}$.

从假设可推知 $\max\{\sum_{p\in P_w}w(p)\hat{m}'(p)\mid\hat{m}'\in R(N_u^w,m')\}\leqslant k\Rightarrow\max\{\sum_{p\in P}w(p)\tilde{m}(p)\mid\tilde{m}\in R(N_u,m)\}\leqslant k$，即 $R(N_u,m)\cap M_f(w,k)=\varnothing$.

推论 4.4 对状态机器 N 及任一非负整数向量 w，$SD_{\min}(N,w)$ 非空且只有一个元素.

证 设 $v=\max_{p\in P}w(p), x:x(p)=v,\forall\ p\in P$. 显然 $x\geqslant w, Ax\leqslant 0$(事实上 $Ax=0$)，故$\{x\mid x\geqslant w, Ax\leqslant 0\}\neq\varnothing$，从而 $SD_{\min}(N,w)\neq\varnothing$.

假定存在 $x_1,x_2\in SD_{\min}(N,w), x_1\ngeqq x_2, x_2\ngeqq x_1$. 令 $x=\min(x_1,x_2)$，即 $x(p)=\min(x_1(p),x_2(p)).\ \forall\ p\in P$. 显然 $x\lneqq x_1, x\lneqq x_2, x\geqslant w$.

设 $A=(a_{ij})$ 为 N 的邻接矩阵，j_i^+ 为唯一满足 $a_{ij}=1$ 的 j，j_i^- 为唯一满足 $a_{ij}=-1$ 的 j. 则从 $Ax_1\leqslant 0, Ax_2\leqslant 0$，可推出 $x_1(j_i^+)\leqslant x_1(j_i^-), x_2(j_i^+)\leqslant x_2(j_i^-), i=1,2,\cdots,n$，其中 $x_1(j)(x_2(j))$ 表示向量 $x_1(x_2)$ 的第 j 个分量. 从而 $x(j_i^+)=\min(x_1(j_i^+)x_2(j_i^+))\leqslant\min(x_1(j_i^-),x_2(j_i^-))=x(j_i^-), i=1,2,\cdots,n$，即 $Ax\leqslant 0$. 这与 $x_1,x_2\in SD_{\min}(N,w)$ 的假设矛盾. 故 $SD_{\min}(N,w)$ 只有一个元素.

定理 4.3 给定受控 Petri 网 N 及一广义互斥约束 (w,k)，若 N 关于 (w,k) 的 IUS, N_u^w，为状态机器，则 N 的最小约束广义互斥控制可用一个管程实现.

证 设 A_u^w, A_u 分别为 N_u^w 和 N_u 的邻接矩阵，$w'=w\mid P_w$，x' 为 $SD_{\min}(N_u^w,w')$ 中的唯一元素，x 为 x' 在 P 上的扩展，即 $x:P\to\mathbf{N}, x(p)=x'(p),\forall\ p\in P_w, x(p)=0,\forall\ p\notin P_w$，则根据定理 4.2 及推论 4.3，我们有：

$$
\begin{aligned}
M_a(w,k) &= \{m \in \mathbf{N}^P \mid R(N_u^w, m') \cap (M_f(w,k)\mid P_w) = \varnothing, m' = m\mid P_w\} \\
&= \{m \in \mathbf{N}^P \mid \widetilde{m}^{\mathrm{T}} w' \leqslant k, \forall\, \widetilde{m} \in R(N_u^w, m')\} \\
&= \{m \in \mathbf{N}^P \mid \max\{\widetilde{m}^{\mathrm{T}} w' \mid \widetilde{m} \in R(N_u^w, m')\} \leqslant k\} \\
&= \{m \in \mathbf{N}^P \mid m'^{\mathrm{T}} x' \leqslant k\} \\
&= \{m \in \mathbf{N}^P \mid m^{\mathrm{T}} x \leqslant k\} = M(\boldsymbol{x}, k)
\end{aligned}
$$

进一步，从 $A_u^w x' \leqslant 0$ 可推出 $A_u x \leqslant 0$，即 $\cdot(t_i, x) \leqslant 0, \forall\, t_i \in T_u$.

从而，根据定理 3.1，N 的最小约束广义互斥控制可用一个管程 $C(N,x,k)$ 来实现.

推论 4.5　给定受控petri网 N 及一组广义互斥约束 $(w_i,k_i), i = 1,2\cdots,l$，若 N 关于每个 (w_i,k_i) 的 IUS 均为状态机器，则 N 的最小约束广义互斥控制可用 l 个管程实现.

从以上分析我们知，要综合满足定理 .3(推论 4.5)中条件的受控 Petri 网的最小约束广义互斥控制，我们只要求出对应于每个广义互斥约束的最小 S-减即可. 这个最小 S-减可用一个简单的算法求得，详见[8].

5　应　　用

我们用文[3]中的例子来验证本文所提出的方法. 这个例子中系统的受控 Petri 网模型如图 2 所示，其中变迁 t 11，t 13，

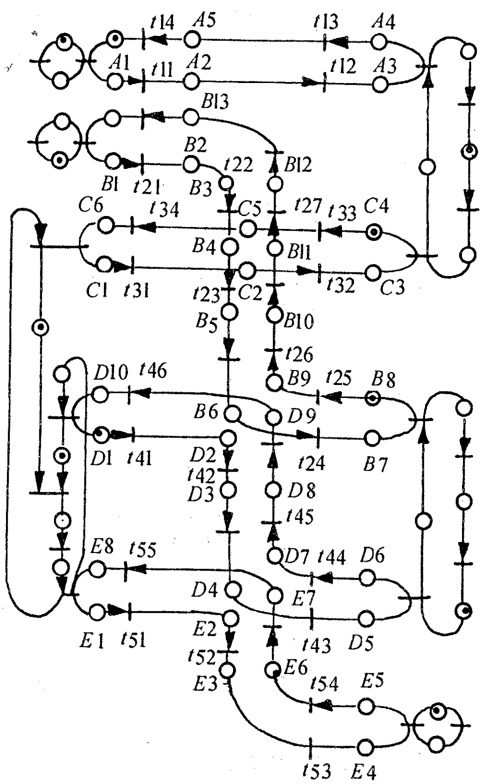


图 2　一个制造系统的受控 Petri 网模型

21，t 25，t 31，t 33，t 41，t 44，t 51，t 54 为可控变迁，其它的均为不可控变迁.

控制问题所对应的禁态集可由以下四个广义互斥约束描述：

(w_1,k_1)：其中 $w_1(p) = 1, \forall\, p \in \{A2, A5, B2, B13\}$，否则 $w_1(p) = 0; k_1 = 1$，

(w_2,k_2)：其中 $w_2(p) = 1, \forall\, p \in \{B4, B11, D2, D5\}$，否则 $w_2(p) = 0; k_2 = 1$，

(w_3,k_3)：其中 $w_3(p) = 1, \forall\, p \in \{B6, B9, E2, E9\}$，否则 $w_3(p) = 0; k_3 = 1$，

(w_4,k_4)：其中 $w_4(p) = 1, \forall\, p \in \{E4, E7, F2, F7\}$，否则 $w_4(p) = 0; k_4 = 1$.

对应于这四个广义互斥约束的 IUS 如图 3 所示.

很容易得到对应于 $(w_i,k_i), i = 1,2,3,4$ 的四个最小 S-减如下：

$\boldsymbol{x}_1$：$\boldsymbol{x}_1(p) = 1, \forall\, p \in \{A5, A2, B2, B13, B12, B11, B10, B9\}$，否则 $\boldsymbol{x}_1(p) = 0$；

$\boldsymbol{x}_2$：$\boldsymbol{x}_2(p) = 1, \forall\, p \in \{D5, D2, B4, B3, B2, B11, B10, B9\}$，否则 $\boldsymbol{x}_2(p) = 0$；

$\boldsymbol{x}_3$：$\boldsymbol{x}_3(p) = 1, \forall\, p \in \{B9, E2, E9, E8, E7, B6, B5, B4, B3, B2\}$，否则 $\boldsymbol{x}_3(p) = 0$；

$\boldsymbol{x}_4$：$\boldsymbol{x}_4(p) = 1, \forall\, p \in \{E7, F2, E4, E3, E2, F7, F6\}$，否则 $\boldsymbol{x}_4(p) = 0$.

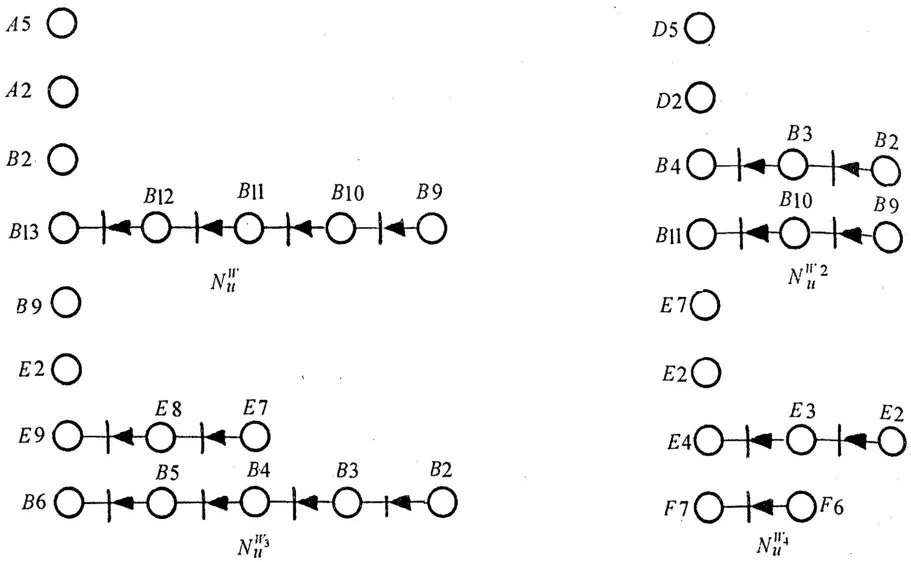


图 3 对应于四个广义互斥约束的 IUS

这样，由 4 个管程组成的实现最小约束广义互斥控制的 Petri 网控制器如图 4 所示. 为了清楚起见，图 4 中没有包括原受控 Petri 网模型.

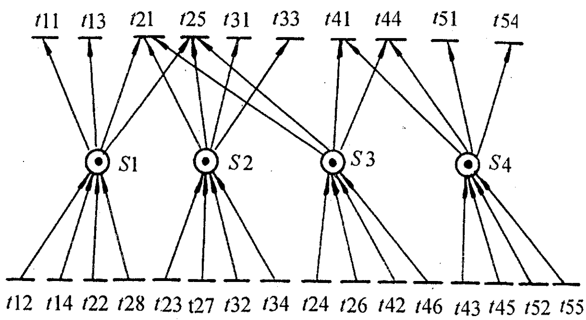


图 4 基于管程的 Petri 网控制器

6 结 论

本文给出了受控 Petri 网广义互斥控制存在管程最小约束控制解的充要条件，并证明了一类其不可控子网为有限状态机的受控 Petri 网的广义互斥控制总存在管程解. 这一结论使得 Holloway 和 Krogh 一文中所考虑的四辆自动运输小车的协调控制问题能进行更有效的控制综合.

参 考 文 献

[1] Ramadge, P. J. and Wonham, W. M.. Supervisory Control of a Class of Discrete Event Processes. SIAM J. Control and Optimization, 1987, 25(1):206—230

[2] Holloway, L. E. and Guan, X.. A Generation of State Avoidance Policies for Controlled Petri Nets. Proceedings of the 32nd IEEE Conf. on Decision and Control, San Antonio, Texas, 1993

[3] Holloway, L. E. and Krogh, B. H.. Synthesis of Feedback Control Logic for a Class of Controlled Petri Nets. IEEE Trans. Automat. Contr, 1990, AC-35(5):514—523

[4] Holloway, L. E. and Krogh, B. H.. Controlled Petri Nets: A Tutorial Survey. Proceedings of the 11th Int. Conf. on Analysis and Optimization of Systems, Sophia-Antipolis, France, 1994, 158—168

[5] 陈浩勋，胡保生. 一类并发离散事件系统基于管程的控制. 中国 1991 离散事件动态系统理论讨论会，兴城，1991

[6] Giua, A., Dicesare, F. and Silva, M.. Petri Net Supervisors for Generalized Mutual Exclusion Constraints. Proceed-

ings of 1993 IFAC Congress, Sydney, Australia, 1993, 1: 267—270.

[7] Murata, T.. Petri Nets: Properties Analysis and Applications. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(4): 540—580

[8] Chen Haoxin and Hu Baosheng. Monitor-Based Control of A Class of Controlled Petri Nets. Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Automation, Robotics and Computervision, Singapore, Nov. 1994

Monitor-Based Control of A Class of Controlled Petri Nets with Generalized Mutual Exclusion Constraints

CHEN Haoxun

(Systems Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University • Xi'an, 710049, PRC)

Abstract: This paper discusses a class of forbidden state avoidance problems, generalized mutual exclusion problems for controlled Petri nets. Some conditions for enforcing a set of generalized mutual exclusion constraints on a controlled Petri net by monitors are given, and for a class of controlled Petri nets whose uncontrolled subnet is a state machine, it is proved that the maximally permissive control of the controlled Petri nets for any given set of generalized mutual exclusion constraints can be enforced by monitors and a synthesis algorithm for the monitors is proposed.

Key words: discrete event system control; controlled Petri nets; monitors.

本文作者简介

陈浩勋 1964 年生. 1984 年, 1987 年, 1990 年分别在复旦大学, 上海交通大学, 西安交通大学获学士、硕士和博士学位. 现为西安交通大学系统工程研究所副教授, 中国自动化学会控制理论与应用专业委员会委员. 1994 年曾受法国国家信息与自动化研究所(INRIA)的邀请对该所进行为期十个月的访问研究. 主要研究方向有: 离散事件动态系统理论, Petri 网理论与应用, 生产计划与调度.