第 28 卷 第 5 期
2002 年 9 月

自 动 化 学 报
ACTA AUTOMATICA SINICA

Vol. 28, No. 5
Sept., 2002

短文

一类受控 Petri 网的反馈控制[1)]

宋爱波[1] 吴哲辉[2] 董逸生[1]

[1](东南大学计算机科学与工程系 南京 210096)

[2](山东科技大学信息科学与工程系 泰安 271019)

(E-mail: absong@seu.edu.cn)

摘 要 受控 Petri 网是离散事件动态系统(DEDS)的一种控制理论模型. 通过模型来研究实现禁止状态避免的最大允许反馈控制是 DEDS 控制理论中的一个重要课题. 文中对受控 Petri 网的一个子类(非受控变迁子集的外延子网为 TC 网)讨论控制综合问题,给出求这类受控网中实现禁止状态避免的最大允许反馈控制的一个算法.

关键词 DEDS,受控 Petri 网,禁止状态,反馈控制

中图分类号 TP301

FEEDBACK CONTROL FOR A CLASS OF CONTROLLED PETRI NETS

SONG Ai-Bo[1] WU Zhe-Hui[2] DONG Yi-Sheng[1]

[1](*Department of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing* 210096)

[2](*Department of Information Science and Engineering*

Science and Technology of Shandong University, Taian 271019)

(E-mail: absong@seu.edu.cn)

Abstract Controlled Petri nets are a kind of models of discrete event dynamic system (DEDS). To find the maximal allowed feedback control for realizing avoidances of forbidden states is an important topic in DEDS theory. An algorithm relating to this objective of a subclass of controlled Petri nets (the spanning subnets of uncontrolled transition subnet in a net of this subclass is a TC net) is given in this paper.

Key words DEDS, controlled Petri net, forbiddance state, feedback control

1 引言

离散事件动态系统(DEDS)理论是 20 世纪 80 年代初提出的,近 20 年来已取得了很大的发展. 通常从三个不同的层次对 DEDS 建模,即逻辑层次、代数层次和随机性能层次.

1) 国家自然科学基金(69873029)资助

收稿日期 2000-12-28 收修改稿日期 2001-08-26

在逻辑层次上，文献[1]提出了基于形式语言/自动机的 DEDS 模型，在此基础上建立起一套分析体系，被称为 R-W 理论. R-W 理论虽然在 DEDS 的逻辑层次研究发展过程中有着重要的地位和作用，但有一个缺陷：不能描述事件的并发性，而异步并发正是 DEDS 的主要特征之一. 由于在描述和分析并发性能方面的独特优势，Petri 网成为 DEDS 建模的极具诱惑力的工具. 文献[2]提出了一种基于 T-图的 DEDS 逻辑层次模型——受控 T-图，并对这种模型给出了避免实现禁止状态的有效算法. T-图本身的描述能力限制了这种模型应用的广泛性，一个明显的事实是，受控 T-图中容纳了并发，却排斥了冲突(选择).

本文讨论一种范围更广的受控 Petri 网子类. 在一个 Petri 网中，如果每个有向回路的位置子集构成网的一个陷阱，我们称这种网为 TC 网. 受控 Petri 网的变迁集可分为两个子集：受控变迁子集和非受控变迁子集. 本文对非受控变迁子集的外延子网为 TC 网的受控 Petri 网进行研究. 给出在这种网子类中实现禁止状态避免的一步最大允许反馈控制的有效算法. 此算法不必搜索 Petri 网的所有可达标识，可用计算机模拟实现.

2　受控 Petri 网及其控制问题

受控 Petri 网是由 Krogh B H[3]提出来的. 这种网模型是在普通的 Petri 网中引入控制位置集而得到. 一个控制位置对其后置变迁的发生起控制作用. 变迁的发生除了遵循普通 Petri 网的发生规则以外，还要受到它的各个控制位置的控制信号的影响.

Petri 网是一个四元组$\Sigma=(P,T;F,m)$，P,T,F,m 分别称为位置集、变迁集、流关系和初始标识，关于 Petri 网的发生规则这里从略. 不含标识的三元组 $N=(P,T;F)$称为一个网，对于 $x\in P\cup T$，记${}^{\cdot}x=\{y\in P\cup T\mid (y,x)\in F\}$，$x^{\cdot}=\{y\in P\cup T\mid (x,y)\in F\}$，${}^{\cdot}x$ 和 $x^{\cdot}$分别称为 x 的前集和后集，对于 $P_s\subseteq P$，标识 m 在 P_s 上的投影记为 m_{P_s}，即$\forall\ p\in P_s$：$m_{P_s}(p)=m(p)$，当 $p\notin P_s$ 时 m_{P_s}无意义.

受控 Petri 网是一个六元组$\Sigma=(P,T;F,Q,B,m)$，其中$(P,T;F,m)$为一个普通的 Petri 网，Q 为控制位置集，$B\subseteq Q\times T$. 本文中我们假定每个控制位置只对一个变迁发出控制信号，即$\forall\ c\in Q$：$|\{(c,t)\in B\mid t\in T\}|=1$.

对于 $t\in T$，记${}^{(c)}t=\{c\in Q\mid (c,t)\in B\}$，$T_c=\{t\in T\mid {}^{(c)}t\neq\varnothing\}$，$T_u=\{t\in T\mid {}^{(c)}t=\varnothing\}$，$T_c$ 和 T_u 分别称为受控变迁集和非受控变迁集. 显然 $T_c\cup T_u=T$，$T_c\cap T_u=\varnothing$.

受控 Petri 网的一个控制定义为一个映射 $u:Q\rightarrow\{0,1\}$，用 U 记全体这样的映射集合. 对于 $u_1,u_2\in U$，若$\forall\ c\in Q$，都有 $u_1(c)\leqslant u_2(c)$，则记为 $u_1\leqslant u_2$；若 $u_1\leqslant u_2$，且存在$c\in Q$，使 $u_1(c)<u_2(c)$，则记为 $u_1<u_2$；若 $u\in U$，使得$\forall\ c\in Q$，都有 $u(c)=1$ ($u(c)=0$)，则记 $u=u_{\text{one}}$ ($u=u_{\text{zero}}$). 显然，$\forall\ u\in U$，都有 $u_{\text{zero}}\leqslant u\leqslant u\leqslant_{\text{one}}$.

对受控 Petri 网，给定一个控制 $u:Q\rightarrow\{0,1\}$，设 $T_a\in 2^T$(2^T 表示变迁集 T 的幂集)，若$\forall\ p\in P:m(p)\geqslant|\{t\mid t\in T_a\wedge p\in {}^{\cdot}t\}|$，则称 T_a 中的变迁为状态使能的；若$\forall\ t\in T_a\cap T_c$，$c\in {}^{(c)}t$有 $u(c)=1$，则称 T_a 中的变迁为控制使能的. 如果 T_a 既是状态使能的又是控制使能的，则 T_a 中的变迁可以同时发生并导致出新的标识 m'(记为 $m[u,\ T_a>m']$，并说 m'是在 u 的作用下从 m 一步可达的，记为 $m'\in R_1(u,m)$. 当 $u=u_{\text{one}}$时，也记为 $m'\in R_1(m)$.

如果存在正整数 k 控制序列 $f=\{u_1,u_2,\cdots,u_{k-1}\}$和变迁序列 $T_{a1},T_{a2},\cdots,T_{ak-1}$，使得

$m=m_1[u_1,T_{a1}>m_2[u_2,T_{a2}>\cdots m_{k-1}[u_{k-1},t_{ak-1}>m_k$，则说 m_k 是在控制序列 f 的作用下从 m 可达的，记为 $m_k\in R(f,m)$. 特别地，当 $u_i=u_{\text{one}}(i=1,2,\cdots,k-1)$时，记为 $m_k\in R(m)$. 当 $u_i=u(i=1,2,\cdots,k-1)$时，记为 $m_k\in R(u,m)$.

在系统的运行过程中，可能会出现某些不良状态(如某些状态下可能导致死锁、阻塞或饥饿现象). 受控系统的控制策略的主要目的就是设法避免这种状态的出现，并把这些不希望出现的状态称为禁止状态. 对于受控 Petri 网，禁止状态集表现为可达标识集的某个子集.

对受控 Petri 网，假设 $\hat{M}_f\subseteq R(m_0)$为其禁止状态集($m_0$ 为初始标识). 称 $W_f(m_0)=\{m\in R(m_0)\mid R(u_{\text{zero}},m)\cap\hat{M}_f\neq\varnothing\}$和 $A(m_0)=\{m\in R(m_0)\mid R(u_{\text{zero}},m)\cap\hat{M}_f=\varnothing\}$分别为弱禁止状态集和允许状态集. 给定 $m\in A(m_0)$，如果控制 $u\in U$ 使得 $R_1(u,m)\cap W_f(m_0)=\varnothing$，则称 u 为在标识 m 的一步允许反馈控制. 如果 u 为在标识 m 的一步允许反馈控制，且$\forall\ u'>u$，都有 $R_1(u',m)\cap W_f(m_0)\neq\varnothing$，则称 u 为在标识 m 的一步最大允许反馈控制.

3 TC 网及其性质

定义 1. 设 $N=(P,T;F)$为一个网，$P_1,P_2\subseteq P$. 若 $P_1^{\bullet}\subseteq{}^{\bullet}P_1$，则称 P_1 为网 N 的一个陷阱；若 ${}^{\bullet}P_2\subseteq P_2^{\bullet}$ 则称 P_2 为网 N 的一个死锁.

定义 2. 设 $N=(P,T;F)$为一个网，若对于 N 中的每一个有向回路 $C:p_1t_1p_2t_2\cdots p_kt_kp_1$，回路中的位置集$\{p_1,p_2,\cdots,p_k\}$都是网 N 的一个陷阱，则称 N 为一个 TC 网.

定理 1. 设 $N=(P,T;F)$为一个网，若 N 中的每一个有向回路 C 和 C 中的每个位置 p 都满足$|p^{\bullet}|=1$，则 N 必为一个 TC 网.

证明. 设 C 为 N 中的一个有向回路，对于$\forall\ p\in C$，由$|p^{\bullet}|=1$，则设 $p^{\bullet}=\{t\}$，易知 t 也必在回路 C 上，从而回路 C 上必有一个位置 p_1 使得 $t\in{}^{\bullet}p_1$. 这表明$\forall\ p\in C$，存在 $p_1\in C$ 使得$p^{\bullet}\subseteq{}^{\bullet}p_1$，所以 N 是 TC 网. 证毕.

定义 3. 设 $N=(P,T;F)$为一个网，$T_1\subseteq T$. 令 $P_1={}^{\bullet}T_1\cup T_1^{\bullet}=\bigcup_{t\in T_1}({}^{\bullet}t\cup t^{\bullet})$，$F_1=F\cap(P_1\times T_1\cup T_1\times P_1)$，称 $N_1=(P_1,T_1;F_1)$为网 N 关于 T_1 的外延子网.

定义 4. 设 $N=(P,T;F)$为一个网，其中 $T=\{t_1,t_2,\cdots,t_n\}$，$\boldsymbol{x}$ 为一个非平凡的 n 维非负整数列向量，称变迁子集 $T_X=\{t_i\mid\boldsymbol{x}(i)>0,i\in\{1,2,\cdots,n\}\}$为向量 $\boldsymbol{x}$ 关于网 N 的支集；网 N 关于 T_X 的外延子网记为 N_X.

定义 5. 设 $N=(P,T;F)$为一个网，其中 $P=\{p_1,p_2,\cdots,p_m\}$，$T=\{t_1,t_2,\cdots,t_n\}$，网 N 的关联矩阵定义为 $A=[a_{ij}]_{m\times n}$，当 $p_i\in t_j^{\bullet}-{}^{\bullet}t_j$ 时 a_{ij}为 1，当 $p_i\in{}^{\bullet}t_j-t_j^{\bullet}$ 时 a_{ij}为负 1，否则 a_{ij}为 0.

定理 2[4]. 设$\Sigma=(N,m_0)$为一个 Petri 网，其中 $N=(P,T;F)$为一个 TC 网. 对于任 $m\in R(m_0)$，m'从 m 可达的充分必要条件是，存在一个非平凡的非负整数列向量 $\boldsymbol{x}$，满足

1) $m'=m+A\boldsymbol{x}$，

2)在Σ_X 上的每一个死锁 P'，都存在 $p\in P'$使得 $m(p)>0$，其中$\Sigma_X=(N_X,m_X)m_X$ 为标识 m 在 $P_X={}^{\bullet}T_X\cup T_X^{\bullet}$ 上的投影.

4 一步最大允许反馈控制综合

定义 6. 对受控 Petri 网，设 T_u 是非受控变迁集，则 T_u 的外延子网Σ_{T_u}称为它的非受控

子网. 设 $P_s \subseteq P$ 为系统中与禁止状态相关的位置集. 在本节中我们研究非受空子网为 TC 网,且禁止状态集具有形式 $\hat{M}_f=\{m\in R(m_0)\mid\forall\ p\in P_s: m(p)\geqslant 1\}$的一步最大允许反馈控制问题.

定义 7. 对受控 Petri 网,$m\in R(m_0)$,若存在 $m'\in R(m)$使得 $m'_{P_s}=M_{P_s}$,则称 m_{P_s}子集可达 M_{P_s},其中 M 是一个禁止状态.

定理 3. 对受控 Petri 网,$m\in R(m_0)$为弱禁止状态的充要条件是,在受控 Petri 网的非受控子网$\sum_{T_u}$上,m_{P_s}子集可达 M_{P_s},其中 M 是一个禁止状态.

证明. 必要性:若 $m\in R(m_0)$为弱禁止状态,即 $R(u_{\text{zero}},m)\cap\hat{M}_f\neq\varnothing$,不妨设为 m',则 $m'_{P_s}=M_{P_s}$,所以在非受控子网上,m_{P_s}子集可达 M_{P_s}.

充分性:$m\in R(m_0)$,若在非受控子网上,m_{P_s}子集可达 M_{P_s},即在所有受控变迁不发生的情况下,在 m 的可达集中,存在 m'使得 $m'_{P_s}=M_{P_s}$,即 $R(u_{\text{zero}},m)\cap\hat{M}_f\neq\varnothing$. 所以 m 为弱禁止状态.　证毕.

由上述定理可看出,判断 $m\in R(m_0)$是否为允许状态等价于在非受控子网上判断 m_{P_s}是否子集可达 M_{P_s},如果子集可达 M_{P_s},则 m 必为弱禁止状态;否则 m 定为允许状态.

定理 4. 对于受控 Petri 网,$m\in R(m_0)$,在非受控子网$\sum_{T_u}$上 m_{P_s}子集可达 M_{P_s}的充要条件是,存在一个非平凡的$|T_u|$维非负整数列向量 $\boldsymbol{x}$,满足

1) $M_{P_s}=m_{P_s}+A_{P_s}\boldsymbol{x}$,其中 A_{P_s}为关联矩阵 A 中 P_s 的各行形成的 A 的子矩阵;

2) 在非受控子网$\sum_{T_u}$关于 T_X 的外延子网$\sum_{T_uX}$上,对于每一个死锁 P',存在 $p\in P'$使得 $m(p)>0$,其中 T_X 为列向量 $\boldsymbol{x}$ 关于网$\sum_{T_u}$的支集;

3) $m_{\overline{P_s}}+A_{\overline{P_s}}\boldsymbol{x}\geqslant 0$,其中$\overline{P_s}$表示 P_s 的补,即$\overline{P_s}=P-P_s$.

证明. 由定理 2 很容易得证.

此定理给出了判断 m_{P_s}是否子集可达 M_{P_s}的方法. 方程 $M_{P_s}=m_{P_s}+A_{P_s}\boldsymbol{x}$ 的非负整数解通常是无限多的,但是若解向量关于网$\sum_{T_u}$的支集相同,则$\sum_{T_u}$关于支集的外延子网就完全一样,所以上述方法在有限步内可以完成. 根据定理 3 和 4,可以判断 $m\in R(m_0)$是否为允许状态. 对于受控 Petri 网,$m\in R(m_0)$,记 $T(m)=\{T_\alpha\in 2^T\mid T_\alpha$ 为 m 下状态使能的$\}$;$T(E)=T(m)\cap 2^{T_c}$(2^{T_c}为 T_c 的幂集).

定义 8. 对于受控 Petri 网,$m\in A(m_0)$,$T_\alpha\in T(E)$,若 $m[T_\alpha>m'$,并且 $m'\in W_f(m_0)$即 m'为弱禁止状态,则称 T_α 为 m 的关键变迁集.

m 的所有关键变迁集的集合记为 $KT(m)$,$\forall\ T_{\alpha 1}$,$T_{\alpha 2}\in KT(m)$且 $T_{\alpha 1}\neq T_{\alpha 2}$,若 $T_{\alpha 1}\subset T_{\alpha 2}$,则令 $KT(m)-\{T_{\alpha 2}\}\rightarrow KT(m)$. 记${}^{(c)}T_\alpha=\{c\in Q\mid\exists\ t\in T_\alpha: c\in{}^{(c)}t\}$.

引理 1. 对于受控 Petri 网,$m\in A(m_0)$,若控制 $u\in U$ 满足$\forall\ T_\alpha\in KT(m)$,都存在 $c\in{}^{(c)}T_\alpha$使得 $u(c)=0$,则控制 u 是 m 的一步允许反馈控制.

证明. 反证法:假设 u 不是 m 的一步允许反馈控制,则存在 $m'\in R_1(u,m)$且 $m'\in W_f(m_0)$. 设在 u 下,由 m 到 m'同时发生的变迁集为 T_α,则一定存在 $T_\beta\in KT(m)$并且 $T_\beta\subseteq T_\alpha$,又因为存在 $c\in{}^{(c)}T_\beta$,使得 $u(c)=0$,这与在 m 和控制 u,T_α 可一步同时发生矛盾.

证毕.

若 $KT(m)=\varnothing$,显然 u_{one}即为 m 的一步最大允许反馈控制.

定理 5. 对于受控 Petri 网,$m\in A(m_0)$,若 $KT(m)\neq\varnothing$,则控制 $u\in U$ 为 m 的一步最大

允许反馈控制的充要条件是

1) $\forall\ T_\alpha \in KT(m)$，$\exists\ c \in {}^{(c)}T_\alpha$ 使得 $u(c)=0$；

2) $\forall\ c \in Q$，若 $u(c)=0$，则必存在 $T_\alpha \in KT(m)$ 且 $c \in {}^{(c)}T_\alpha$，对于 $\forall\ c' \in {}^{(c)}T_\alpha - \{c\}$ 都有 $u(c')=1$.

证明. 由引理 1 知，条件 1)保证 u 是 m 的一步允许反馈控制，假设满足 1)和 2)的 u 不是一步最大允许反馈控制，则必存在 $u'>u$ 且 u' 也是一步允许反馈控制. 因为 $u'>u$ 所以存在 $c \in Q$ 使得 $u'(c)=1$ 且 $u(c)=0$. 由 2)知$\exists\ T_\alpha \in KT(m)$，对于$\forall\ c' \in {}^{(c)}T_\alpha - \{c\}$有 $u(c')=1$，又因为 $u'(c)=1$ 所以$\forall\ c \in {}^{(c)}T_\alpha$ 有 $u'(c)=1$，与 u' 为一步允许反馈控制矛盾. 证毕.

现在，我们给出综合一步最大允许反馈控制的算法.

输入：描述控制系统的受控 Petri 网$\sum=(P,T;F,Q,B,m_0)$，与禁止状态相关的位置集 $P_s=\{p_1,p_2,\cdots,p_k\}$，禁止状态 $M(p_i)=\alpha_i$，$i=1,2,\cdots,k$ 及允许状态 $m \in R(m_0)$.

输出：关于 m 的一步最大允许反馈控制 u

第 1 步. 判断$\sum$的非受控子网$\sum_{T_u}$是否为 TC 网，若不是则结束.

第 2 步. 求 m 的关键变迁集 $KT(m)$

1) 令 $KT(m) \leftarrow \varnothing$；求 $T(E)$；

2) 对每一个 $T_\alpha \in T(E)$ DO$\{m[T_\alpha > m'$；如果 m' 为弱禁止状态则 $KT(m) \leftarrow T_\alpha\}$.

第 3 步. 如 $KT(m)=\varnothing$，则 $u=u_{\mathrm{one}}$；否则由定理 5 求控制 u.

第 4 步. 输出一步最大允许反馈控制 u，结束.

例. 在受控 Petri 网$\sum=(P,T;F,Q,B,m_0)$描述的一个控制系统中，要求位置 p_1 的容量不能为 2，如图 1. 受控 Petri 网描述的系统中与禁止状态相关的位置集 $P_s=\{p_1\}$，禁止状态 $M(p_1)=2$. 下面求 $m=(0,0,1,0,1,1)$的一步最大允许反馈控制 u.

第 1 步. 显然，受控 Petri 网的非受控子网是 TC 网. 如图 2 所示.

第 2 步. $KT(m) \leftarrow \varnothing$；$T(E)=\{\{t_4\},\{t_5\},\{t_4,t_5\}\}m[t_4>m'=(0,0,1,1,1,1)$，方程 $M_{P_s}=M_{P_s}=m'_{P_s}+A_{P_s}\boldsymbol{x}$ 的通解为 $\boldsymbol{x}=(1,0,3)^{\mathrm{T}}+k_1(0,1,0)^{\mathrm{T}}+k_2(1,0,1)^{\mathrm{T}}=(1+k_2,k_1,4)^{\mathrm{T}}$. 无论 $\boldsymbol{x}$ 取何解，$m'_{\overline{P_s}}+A_{\overline{P_s}}\boldsymbol{x}=(1-k_1+k_2,1+k_1,-3)^{\mathrm{T}}$都不能大于等于 0，由定理 3 和 4 知 m' 为允许状态，因而$\{t_4\}$不能加入 $KT(m)$中，同样可以计算$\{t_5\}$也不能加入 $KT(m)$中.

$m[\{t_4,t_5\}>m'=(1,0,1,1,1,1)$方程 $M_{P_s}=m'_{P_s}+A_{P_s}\boldsymbol{x}$ 的通解为 $\boldsymbol{x}=(0,0,1)^{\mathrm{T}}+k_1(0,1,0)^{\mathrm{T}}+k_2(1,0,1)^{\mathrm{T}}$，取 $\boldsymbol{x}=(0,0,1)^{\mathrm{T}}$，$m'_{\overline{P_s}}+A_{\overline{P_s}}\boldsymbol{x}=(0,1,0)^{\mathrm{T}}>(0,0,0)^{\mathrm{T}}$ 非受控子网$\sum_{T_u}$关于 T_X 的外延子网$\sum_{T_uX}$如图 3 所示. 显然，在$\sum_{T_uX}$上对于每一个死锁 P'，存在 $P \in P'$使得 $m'(p)>0$，由定理 3 和 4 知 m' 为弱禁止状态，所以应把$\{t_4,t_5\}$加入 $KT(m)$中.

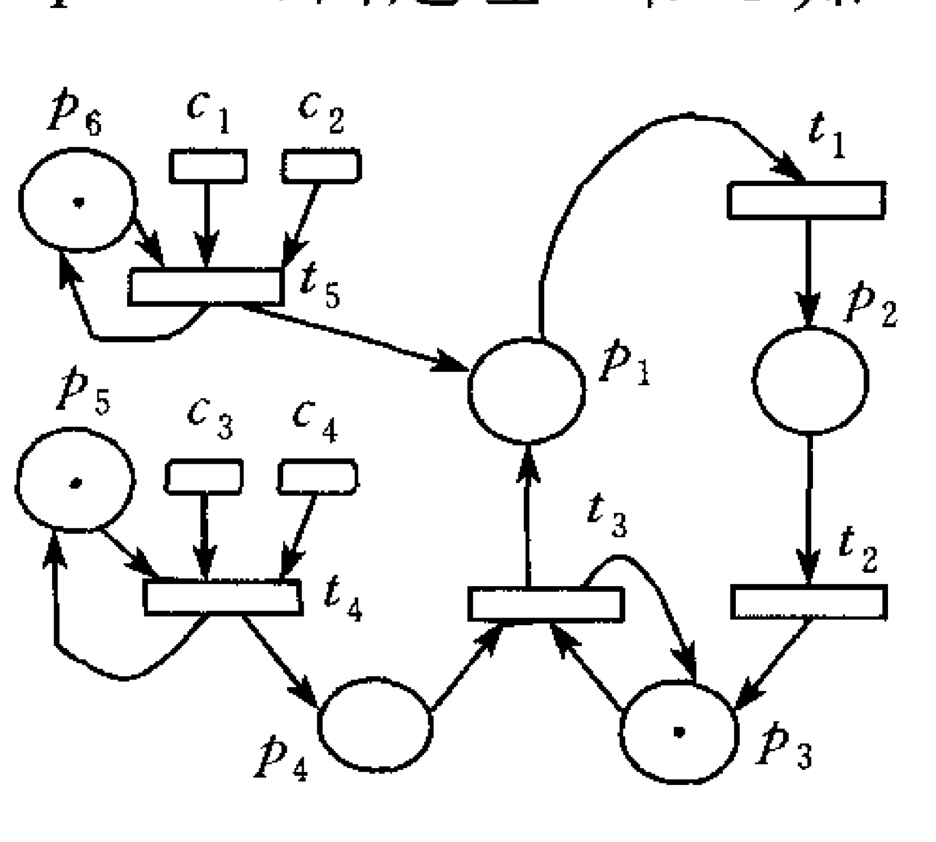

图 1 受控 Petri 网

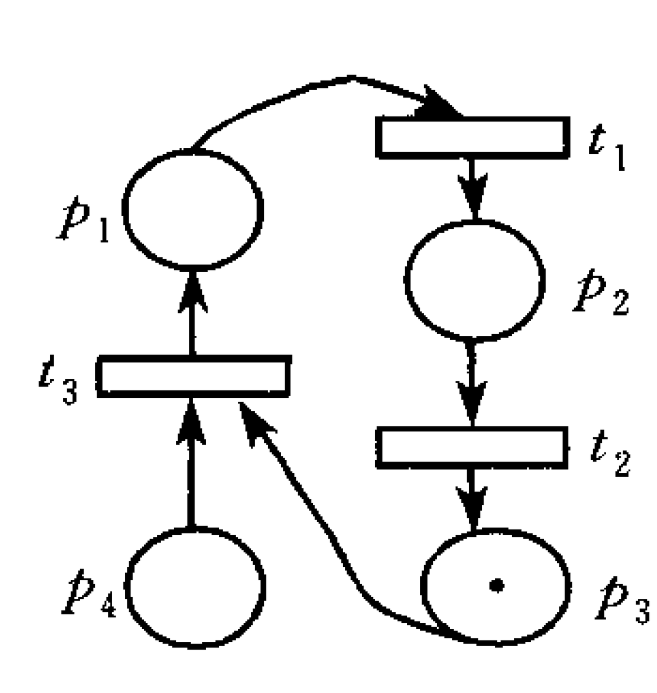

图 2 非受控子网

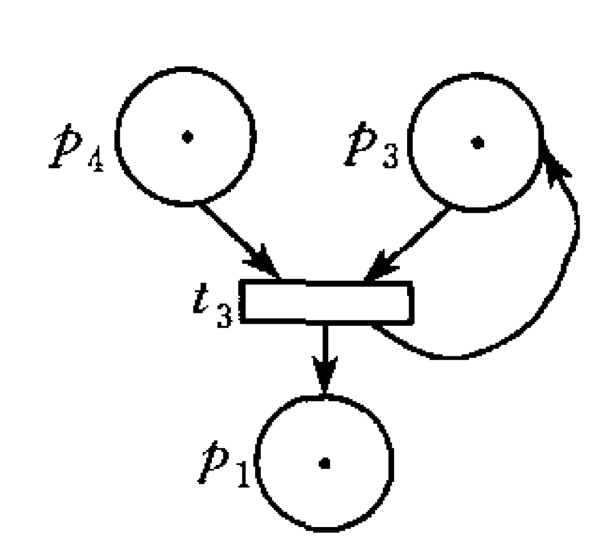

图 3 外延子网

第 3 步. 根据定理 5 求得一步最大允许反馈控制 u 为 $u(c_1)=0, u(c_2)=u(c_3)=u(c_4)=1$.

5 结束语

虽然描述 DEDS 系统的模型很多,如形式语言/自动机、Petri 网、极大代数、排队网络、摄动分析等等,但由于 DEDS 本身固有的复杂性,至今仍没有一个统一的方法. 本文对受控 Petri 网的一个子类(非受控变迁子集的外延子网为 TC 网的子类)讨论控制综合问题,给出了求这类受控网中避免实现禁止状态的最大允许反馈控制的一个算法,此算法不必搜索 Petri 网的所有可达标识,可用计算机模拟实现. 虽然本文把文献[2]研究的受控 T 图放宽了一步,但能用本文模型建模的 DEDS 问题仍不多. 主要原因是要求非受控子网中每一个有向回路是陷井,怎样把本文方法拓广到普通受控 Petri 网将是十分有意义的,因为以往基于 Petri 网研究 DEDS 问题都要进行可达空间搜索.

参 考 文 献

1 Ramadge P J, Wonbam W M. Supervisory control of a class of discrete event processes. *SIAMJ*, *Control and Optimization*, 1987, **25**(3):206～230

2 Holloway L E, Krogh B H. Synthesis of feedback controlled logic for a class of controlled Petri nets. *IEEE Trans Autom. Control*, 1990, **35**(5):386～397

3 Krogh B H. Controlled Petrı nets and maximally permissive feedbach logic. In: Proc of the 25th annual Allerton Conference, University of Illinois, Urbana, 1987. 102～112

4 Ichikawa A, Hivaishi K. Analysis and control of discrete event systems by Petri nets. Lecture Notes is Control and Information Science 103, New York: Spring Verlay, 1988. 115～134

5 吴哲辉. DEDS 控制理论模型-受控 Petri 网的网论语义. 山东矿业学院学报, 1995, **14**(4):418～423

6 原忠虎. 基于 Petri 网的离散事件动态系统控制问题研究[博士学位论文]. 沈阳:东北大学, 1994

7 袁崇义. Petri 网. 南京:东南大学出版社, 1984

宋爱波　1993 年毕业于山东科技大学计算机系,1996 年获得山东科技大学计算机应用硕士学位,现在东南大学计算机系读博士. 主要研究领域有数据库、Petri 网等.

吴哲辉　1965 年毕业于中山大学数学力学系,1981 年 12 月到 1983 年 12 月在美国芝加哥伊利诺大学作访问学者. 现为山东科技大学教授,博士生导师. 主要研究领域 Prtei 网、算法设计与分析.

董逸生　1965 年毕业于南京工学院计算机专业,现为东南大学计算机系主任,教授,博士生导师. 主要研究领域有数据库、软件技术等.