第30卷第4期 控制理论与应用 Vol. 30 No. 4
2013年4月 Control Theory & Applications Apr. 2013

DOI: 10.7641/CTA.2013.20843

基于变迁覆盖的制造系统死锁控制策略

刘慧霞[1,2†], 邢科义[2], 康苗苗[2]

(1. 鲁东大学 信息与电气工程学院, 山东 烟台 264025;

2. 西安交通大学 系统工程研究所 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 基于系统Petri网模型, 研究柔性制造系统的死锁控制问题. 论文利用变迁覆盖为系统设计活性控制器. 变迁覆盖是由一组极大完备资源变迁回路组成的集合, 其变迁集覆盖了Petri网中所有极大完备资源变迁回路的变迁集. 验证变迁覆盖的有效性, 然后仅对有效变迁覆盖中的极大完备资源变迁回路添加控制位置, 就得到系统的活性受控Petri网. 这种受控Petri网包含的控制位置个数少, 从而结构相对简单. 最后通过一个例子说明了所提出的死锁控制策略的构成与特点.

关键词: 柔性制造系统; Petri网; 死锁控制

中图分类号: TP278 **文献标识码**: A

Transition cover-based deadlock control policies for manufacturing systems

LIU Hui-xia[1,2†], XING Ke-yi[2], KANG Miao-miao[2]

(1. School of Information and Electrical Engineering, Ludong University, Yantai Shandong 264025, China;

2. The State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Systems Engineering Institute, Xi’an Jiaotong University, Xi’an Shaanxi 710049, China)

Abstract: Based on Petri net models of flexible manufacturing systems, the deadlock control problem is addressed. The concept of transition-cover is employed to design a live controller for flexible manufacturing systems. A transition cover is a subset of maximal perfect resource transition circuits whose transition set covers transitions of all maximal perfect resource transition circuits in Petri nets. After validating the effectiveness of a transition cover, we can build a live controlled Petri net by only adding a control place to each maximal perfect resource transition circuit in the effective transition cover. The number of control places in such a controlled Petri net is small and the structure of the controlled Petri net is simple. The proposed deadlock control policy is illustrated by an example.

Key words: flexible manufacturing systems; Petri nets; deadlock control

1 引言(Introduction)

在柔性制造系统中, 各种工件按照预先设定的加工顺序进入系统进行加工, 竞争有限的系统资源. 工件的并行加工与资源的有限很容易导致死锁的产生. 如何最大限度地优化配置系统资源, 为柔性制造系统建立合理的死锁控制机制, 是近年来一直讨论的问题[1], 也是运行、调度这类系统所必需的[2–3].

Petri网是模拟柔性制造系统强有力的数学工具之一[4–5]. 基于系统Petri网模型, 已提出了多种死锁处理方法. 这些方法大致分为3类: 死锁检测与恢复[6]、死锁避免[6–9]、死锁预防[8–17].

通过分析系统Petri网模型的结构, 给出了表征系统死锁或活性的各种结构特征. 基于这些特征, 已建立起了多种死锁控制策略. 对线性加工系统, 文献[8]用死锁结构表征系统的活性. 在资源容量均大于1时, 得到了一个最大容许的死锁避免策略. 对柔性制造系统Petri网模型S^3PR, 文献[9]提出了极大完备资源变迁回路的概念, 用以表征S^3PR的死锁, 而文献[10]则通过严格极小信标来表征S^3PR的活性. 尽管已证明极大完备资源变迁回路与严格极小信标之间存在一一对应关系, 且在表征死锁时是等价的[14], 但基于极大完备资源变迁回路所设计的死锁控制策略在性能上可以达到最优. 文献[11]利用迭代方法对S^3PR给出了另一种死锁预防策略. 该策略分为两步: 第1步称为信标控制, 第2步称为增广信标控制. 鉴于严格极小信标数量较多, 为减少受控信标的个数, 文献[12]提出了基本信标的概念, 通过仅控制基本信标为S^3PR设计了一个新的死锁预防策略.

收稿日期: 2012−07−31; 收修改稿日期: 2012−11−05.

†通信作者. Tel.: +86 15153579969.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60774083, 50975224).

通过分析可达图的性能, 文献[15–17]为柔性制造系统设计出了一个最大容许的活性监控器.

本文将通过分析并利用Petri网的结构特征来建立死锁控制策略. 基于极大完备资源变迁回路的概念, 提出了变迁覆盖的定义. 变迁覆盖是由一组极大完备资源变迁回路组成的子集, 这些极大完备资源变迁回路的变迁集能覆盖Petri网中所有极大完备资源变迁回路的变迁集, 且个数较少. 验证了变迁覆盖的有效性. 当一个变迁覆盖不是有效变迁覆盖时, 需将其转化成有效变迁覆盖. 证明了通过仅控制有效变迁覆盖中的极大完备资源变迁回路, 能为系统设计一个活性控制器. 最后给出了基于有效变迁覆盖的死锁预防策略.

2 预备知识(Preliminaries)

2.1 Petri网基本定义(Basic definitions of Petri nets)

定义 1[4] 令P与T是两个不相交的非空有限集, 则三元组$N=(P,T,F)$为一个Petri网. 其中: P是位置集, T是变迁集, $F\subseteq(P\times T)\cup(T\times P)$是有向弧集. 给定一个Petri网$N=(P,T,F)$以及一个顶点$x\in P\cup T$, x的前置集定义为${}^\bullet x=\{y\in P\cup T|(y,x)\in F\}$, 后置集定义为$x^\bullet=\{y\in P\cup T|(x,y)\in F\}$.

定义 2[4] 如果Petri网中的每一个变迁都只有一个输入和输出位置, 即$\forall t\in T, |t^\bullet|=|{}^\bullet t|=1$, 则称该Petri网为状态机.

定义 3[4] N的一个标识是指一个映射$M: P\rightarrow\mathbb{N}$, 其中$\mathbb{N}=\{0,1,2,\cdots\}$. 给定位置$p\in P$与标识$M$, $M(p)$是指在M下, p所包含的token的个数. 令$S\subseteq P$是一个位置集, 用$M(S)$表示在M下, S中所有位置包含的token个数的总和, 即$M(S)=\sum\limits_{p\in S}M(p)$.

定义 4[4] 称有初始标识M_0的Petri网N为标识Petri网或者简称为网, 记为(N,M_0).

定义 5[4] 称变迁$t\in T$在M下是使能的, 如果$\forall p\in{}^\bullet t, M(p)>0$, 记为$M[t>$. 使能变迁$t$在$M$下是可以引发的, 得到一个新标识$M'$, 记为$M[t>M'$, 其中$M'(p)=M(p)-1, \forall p\in{}^\bullet t\setminus t^\bullet$; $M'(p)=M(p)+1, \forall p\in t^\bullet\setminus{}^\bullet t$; $M'(p)=M(p), \forall p\in P-\{{}^\bullet t\setminus t^\bullet, t^\bullet\setminus{}^\bullet t\}$. 称变迁序列$\alpha=t_1t_2\cdots t_k$在$M$下是可行的如果存在$M_i[t_i>M_{i+1}$, 这里$t_i\in T, i=1,2,\cdots,k, M_1=M$. 称$M_i$是由$M$出发得到的一个可达标识.

定义 6[4] 如果$\forall M\in R(N,M_0)$, $\exists M'\in R(N,M)$使得$M'[t>$成立, 则称变迁t是活的. 如果从M出发没有可达标识使t使能的, 则称变迁t在M下是死的. 如果所有的变迁都是活的, 则称网是活的.

定义 7[4] 称Petri网$N[P_1,T_1]=(P_1,T_1,F_1)$是由P_1与T_1生成的子网, 记作$N[P_1,T_1]$, 其中$F_1=F\cap((P_1\times T_1)\cup(T_1\times P_1))$.

定义 8[4] 两个标识Petri网$(N_i,M_{0i})=(P_i,T_i,F_i,M_{0i})$是相容的如果$\forall p\in P_1\cap P_2, M_{01}(p)=M_{02}(p), i=1,2$. 两个相容标识Petri网$(N_1,M_{01})$与$(N_2,M_{02})$的合成是由两个网的元素的并形成的一个标识Petri网$(N_1,M_{01})\otimes(N_2,M_{02})=(P,T,F,M_0)$, 其中: $P=P_1\cup P_2$, $T=T_1\cup T_2$, $F=F_1\cup F_2$, $M_0(p)=M_{0i}(p)$, $\forall p\in P_i$, $i=1,2$.

Petri网$N=(P,T,F)$是一个有向图, 它的顶点是由位置集和变迁集组成的.

定义 9[9] N中的路径是指由顶点组成的一个串$c=x_0x_1x_2\cdots x_{q-1}x_q$, 其中$x_i\in P\cup T$, $(x_{k-1},x_k)\in F$, q称为路径c的长度, x_0与x_q称为c的端点. 回路是指端点重合的路径. 除了端点外, 如果回路中其他顶点都不重合, 则这样的回路称为基本回路.

2.2 制造系统Petri网模型—S^3PR(Petri net models of flexible manufacturing systems–S^3PR)

本文考虑的柔性制造系统包括m种不同类型的资源, 能加工n种不同类型的工件. 资源集记为$R=\{r_i\}$, $i=1,2,\cdots,m$, 设资源r_i可同时处理$C(r_i)$个工件($C(r_i)$称为资源容量), 工件集记为$Q=\{q_j\}$, $j=1,2,\cdots,n$. 工件的加工路径由预先确定的一系列操作组成, 设q_j型工件的加工路径即操作序列可表示为$q_j=O_{j1}O_{j2},\cdots,O_{js}$, 操作$O_{jk}$所需的资源为$R(O_{jk}), k=1,2,\cdots,s$. 通常用位置表示操作$O_{jk}$(称为操作位置), 用变迁表示事件即操作的转换. 对应路径$q_j=O_{j1}O_{j2}\cdots O_{js}$的Petri网模型为$P_j=t_{j0}p_{j1}t_{j1}p_{j2}t_{j2}\cdots p_{js}t_{js}$, 其中$p_{jk}$为第$k$个操作位置. 为建模方便, 一般在每个加工序列前都增加一个闲置位置p_{j0}, 表示工件在等待加工或者已完成所有的加工操作. p_{j0}不需要任何资源. 将q_j型工件的加工路径表示成回路的形式, 即$P_j=p_{j0}t_{j0}p_{j1}t_{j1}p_{j2}t_{j2}\cdots p_{js}t_{js}p_{j0}$. 变迁$t_{jk}$的引发表示操作$p_{jk}$的结束和$p_{j(k+1)}$的开始. 对资源$r_i$设置一个位置, 称为资源位置, 仍记为$r_i$. r_i中token数表示可利用的r_i类资源数, 其初始token数记为$C(r_i)$. 资源的需求和释放关系通过弧来模拟. 如果$R(O_{jk})=r_i$, 从r_i到$t_{j(k-1)}$引一条弧, 表示O_{jk}需求资源r_i; 从t_{jk}到r_i引一条弧, 表示O_{jk}释放资源r_i. 以上柔性制造系统可用拥有资源的简单序列加工进程系统网(简记为S^3PR)来建模.

定义 10[10] S^3PR是指满足如下条件的普通Petri网$N=(P\cup P_0\cup P_R,T,F)$:

1) $P\cup P_0\cup P_R$满足如下条件: a) $P=\bigcup\limits_{i=1}^{k}P_i$是一类操作位置集, 其中$P_i\cap P_j=\varnothing$, $i\neq j$; b) $P_0=\{p_{01},p_{02},\cdots,p_{0k}\}$是闲置位置集; c) $P_R=\{r_1,r_2,\cdots,r_n\}$是资源位置集, 其中$n>0$.

2) $T=\bigcup\limits_{i=1}^{k}T_i$是变迁集, 其中$T_i\cap T_j=\varnothing, i\neq j$.

3) $\forall i\in\mathbb{Z}_k=\{1,2,\cdots,k\}$, 由$P_i\cup\{p_{0i}\}$与$T_i$生成的子网$N_i$是一个强连通的状态机, 且每一个$N_i$都包含$p_{0i}$.

4) $\forall p\in P,\forall t_1\in{}^\bullet p,\forall t_2\in p^\bullet$, ${}^\bullet t_1\cap P_R=t_2{}^\bullet\cap P_R=\{r\}$. 这里, 称$p$需求资源$r$, 记为$\Re(p)=r$.

5) $\forall r\in P_R$, ${}^{\bullet\bullet}r\cap P=r^{\bullet\bullet}\cap P\neq\varnothing$; $\forall r\in P_R$, ${}^\bullet r\cap r^\bullet=\varnothing$; ${}^{\bullet\bullet}(P^0)\cap P_R=(P^0)^{\bullet\bullet}\cap P_R=\varnothing$.

令$N=(P\cup P_0\cup P_R,T,F)$是一个S^{3}PR. 它的合理初始标识$M_0$满足: $\forall p_0\in P_0, M_0(p_0)\geqslant 1$; $\forall p\in P, M_0(p)=0$; $\forall r\in P_R, M_0(r)\geqslant 1$, 其中$M_0(r)$等于资源$r$的容量$C(r)$. (N,M_0)称为一个(合理的)标识S^{3}PR. 令$t\in T$, ${}^{(p)}t$与$t^{(p)}$分别表示t的输入和和输出操作(或者闲置)位置, ${}^{(r)}t$与$t^{(r)}$分别表示t的输入与输出资源位置. 这个概念可以扩展到集合上. 例如, 令$X\subset T$, 则

$$ {}^{(p)}X=\bigcup_{t\in X}{}^{(p)}t,\ X^{(p)}=\bigcup_{t\in X}t^{(p)}, $$
$$ {}^{(r)}X=\bigcup_{t\in X}{}^{(r)}t,\ X^{(r)}=\bigcup_{t\in X}t^{(r)}, $$

对给定的标识$M\in R(N,M_0)$, 如果$M({}^{(p)}t)>0$, 称t在M下是过程使能的; 如果$M({}^{(r)}t)>0$, 称t在M下是资源使能的. 只有过程与资源同时使能的变迁在M下才是可以引发的. 所有对资源r有需求的操作位置组成的集合记为$H(r)$, 即$H(r)=\{p\in P|\Re(p)=r\}$, 称$H(r)$为r的持有集.

令$N=(P\cup P_0\cup P_R,T,F)$是一个S^{3}PR, $x,y\in(P\cup P_0\cup T)$是N中两个顶点. 如果在N中存在从x到y的长度大于1但不包含$P_0\cup P_R$中位置的路径, 则称在N中x在y的前面, 记作$x<y$. 令$W\subseteq(P\cup P_0\cup T)$是$N$中的顶点集, 如果存在$y\in W$使得$x<y$, 则称在$N$ 中x在W的前面, 记作$x<W$; 反之, $x\nless W$.

2.3 极大完备资源变迁回路(Maximal perfect resource transition circuits)

资源变迁回路是表征S^{3}PR中死锁的一个重要结构特征. 文献[9]指出, 一个标识S^{3}PR是活的, 当且仅当S^{3}PR中所有的极大完备资源变迁回路在任何可达标识下都是不饱和的. 当S^{3}PR不存在中心资源时, 基于极大完备资源变迁回路, 文献[9]得到了具有多项式时间复杂性的最优死锁避免策略.

定义 11[9] 称S^{3}PR N中一条回路θ是N中一条资源变迁回路, 如果它只包含资源位置和变迁. 令$\Re[\theta]$, $\Im[\theta]$分别表示θ的资源位置集和变迁集, 记$\theta=<\Re[\theta],\Im[\theta]>$.

定义 12[9] 设θ是S^{3}PRN中的一条资源变迁回路, 称θ是完备的如果θ满足$({}^{(p)}\Im[\theta])^\bullet=\Im[\theta]$. 令$X(R)$表示所有以$R$为资源集的完备资源变迁回路组成的集合, 如果$\theta_1$, $\theta_2\in X(R)$, 则$\theta_1\cup\theta_2\in X(R)$. 因此, $X(R)$包含唯一一个以R为资源集的极大完备资源变迁回路(简记MPC), 记为$\sigma(R)$. 如果$X(R)=\varnothing$, 则$\sigma(R)=\varnothing$.

定义 13[9] 设θ是标识S^{3}PR(N,M_0)中的一条MPC, $M\in R(N,M_0)$. 如果$M({}^{(p)}\Im[\theta])=M_0(\Re[\theta])$, 则称$\theta$在标识$M$下是饱和的.

定义 14[9] 设θ是标识S^{3}PR(N,M_0)中的一条MPC, t是一个变迁. 如果t的引发能使${}^{(p)}\Im[\theta]$中token个数减少, 则称t 是θ的一个输出变迁. θ的所有输出变迁记为$O(\theta)$.

3 基于有效变迁覆盖的控制器的设计(Design of controllers based on effective transition covers)

3.1 有效变迁覆盖(Effective transition covers)

令$W_1(\theta)=\{t|t\in P_0{}^\bullet$且$t<^{(p)}\Im[\theta]\}$, $W_2(\theta)=\{t|t\in O(\theta)$, 但$t\nless^{(p)}\Im[\theta]\}$, $W_3(\theta)=\{t|t\nless^{(p)}\Im[\theta]$, 但$\exists t_1\in({}^{(p)}t)^\bullet$, 使得$t_1<^{(p)}\Im[\theta]\}$, 令$(N,M_0)$是一个标识S^{3}PR, $\varTheta$是N中所有MPC组成的集合, $\varGamma\subseteq\varTheta,\theta\in\varTheta$.

定义 15 标识S^{3}PR(N,M_0)关于θ的Petri网控制器定义如下:

$$ (C_\theta,M_{\theta0})=(\{p_\theta\},T_\theta,F_\theta,M_{\theta0}), $$

其中p_θ是θ的控制位置, 它的初始标识为$M_{\theta0}(p_\theta)=M_0(\Re[\theta])-\xi_\theta$, 这里$\xi_\theta\in[1,M_0(\Re[\theta])-1]$是整数变量, 称为控制变量; $T_\theta=W_1(\theta)\cup W_2(\theta)\cup W_3(\theta)$, $F_\theta=\{(p_\theta,t)|t\in W_1(\theta)\}\cup\{(t,p_\theta)|t\in W_2(\theta)\cup W_3(\theta)\}$.

定义 16 标识S^{3}PR(N,M_0)关于$\varGamma$的Petri网控制器定义如下:

$$ (C_\varGamma,M_{\varGamma0})=\otimes_{\theta\in\varGamma}(C_\theta,M_{\theta0})=(P_\varGamma,T_\varGamma,F_\varGamma,M_{\varGamma0}), $$

其中: $P=\{p_\theta|\theta\in\varGamma\}$是控制位置集,

$$ T_\varGamma=\bigcup_{\theta\in\varGamma}T_\theta,\ F_\varGamma=\bigcup_{\theta\in\varGamma}F_\theta,\ M_{\varGamma0}(p_\theta)=M_{\theta0}(p_\theta), $$
$$ (C_\theta,\ M_{\theta0})=(\{p_\theta\},T_\theta,F_\theta,M_{\theta0}) $$

是定义15定义的(N,M_0)关于θ的控制器.

令$(CN_\varGamma,M_{C0})$表示(N,M_0)在$(C_\varGamma,\ M_{\varGamma0})$的控制下得到的受控系统, 即$(CN_\varGamma,M_{C0})=(N,M_0)\otimes(C_\varGamma,M_{\varGamma0})$. 在$(CN_\varGamma,\ M_{C0})$中, 令${}^{(c)}t$与$t^{(c)}$分别表示$t$的输入和输出控制位置, 则${}^\bullet t={}^{(p)}t\cup{}^{(r)}t\cup{}^{(c)}t$,

$t^{\bullet} = t^{(p)} \cup t^{(r)} \cup t^{(c)}$. 令 $M \in R(CN_{\Gamma},\ M_{C0})$, 如果$p \in^{(c)} t, M(p) \geqslant 1$, 则称$t$在$M$下是控制使能的. 只有过程、资源、控制同时使能的变迁在M下才能引发.

定义 17 如果Γ的所有变迁覆盖了θ的变迁集, 即$\Im[\theta] \subseteq \bigcup\limits_{\alpha\in\Gamma} \Im[\alpha]$, 则称$\Gamma$是$\theta$的一个变迁覆盖, 或称$\Gamma$覆盖$\theta$. 如果$\Gamma$的任一真子集都不能覆盖$\theta$, 称$\Gamma$为$\theta$的极小覆盖. 如果$\Gamma$能覆盖$\Theta$中每个MPC, 称$\Gamma$是$N$的一个变迁覆盖.

定义 18 设Γ是(N, M_0)的一个变迁覆盖, 称Γ是(N, M_0)的一个有效变迁覆盖, 如果对任意$\theta \in \Theta \setminus \Gamma$, 在$\Gamma$中都存在$\theta$的一个极小覆盖$\Gamma(\theta)$使得$M_0(\Re[\theta]) > |\Gamma(\theta)|$. 这里$|\Gamma(\theta)|$表示$\Gamma(\theta)$中MPC的个数. 进一步, 称$\Gamma(\theta)$为$\theta$在$\Gamma$中的一个有效覆盖.

令$\Gamma(\theta) \subseteq \Theta$是$\theta$的一个极小覆盖, $\forall\alpha \in \Gamma(\theta)$, 记$\Delta_\alpha = \{p \in P \mid p < \Im[\theta]\}$, $A_\alpha = \Delta_\alpha \backslash {}^{(p)}\Im[\theta]$, $A_{\Gamma(\theta)} = \bigcup\limits_{\alpha\in\Gamma(\theta)} A_\alpha$. 令$B_\theta = \{p \in A_{\Gamma(\theta)} \cap {}^{(p)}\Im[\theta] \mid \Re(p) = r$, 且不存在$q \in H(r)$使得$q \in {}^{(p)}\Im[\theta] \backslash A_{\Gamma(\theta)}\}$, $k_\theta = M_0(\Re(B_\theta))$, 这里$k_\theta$表示$B_\theta$中所有操作位置所需的资源位置的初始标识总和.

定理 1 令$\Gamma(\theta)$是$\theta \in \Theta$的一个极小覆盖, $M \in R(CN_\Gamma, M_{C0})$. 如果下列两个公式同时成立, 则$\theta$在$M$下是不饱和的:

$$1 \leqslant \xi_\alpha \leqslant M_0(\Re[\alpha]) - 1,\ \forall\alpha \in \Gamma(\theta), \tag{1}$$

$$\sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)} \xi_\alpha \geqslant \sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)} M_0(\Re[\alpha]) - M_0(\Re[\theta]) - k_\theta + 1. \tag{2}$$

证 令$\wp_1 = \{M_1 \in R(CN_\Gamma, M_{C0}) | M_1(A_{\Gamma(\theta)}) < k_\theta\}$, $\wp_2 = R(CN_\Gamma, M_{C0}) \backslash \wp_1$.

令$M \in R(CN_\Gamma,\ M_{C0})$. 若$M \in \wp_1$, 则$M(A_{\Gamma(\theta)}) < k_\theta$. 因为$B_\theta \subseteq A_{\Gamma(\theta)}$, $M(B_\theta) \leqslant M(A_{\Gamma(\theta)}) < k_\theta = M_0(\Re(B_\theta))$, 从而$\theta$在$M$下是不饱和的. 否则, 假设$\theta$在$M$下是饱和的, 则$M({}^{(p)}\Im[\theta]) = M_0(\Re[\theta])$, $M(B_\theta) = M_0(\Re(B_\theta))$. 这与$M(B_\theta) < M_0(\Re(B_\theta))$相互矛盾.

如果$M \in \wp_2$, 则$M(A_{\Gamma(\theta)}) \geqslant k_\theta$, 因此

$$\sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)} M_0(\Re[\alpha]) - M_0(\Re[\theta]) - k_\theta \geqslant \sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)} M_0(\Re[\alpha]) - M_0(\Re[\theta]) - M(A_{\Gamma(\theta)}) \geqslant \sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)} M_0(\Re[\alpha]) - M_0(\Re[\theta]) - \sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)} M(A_\alpha).$$

由上述不等式与式(2)得到

$$\sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)} \xi_\alpha > \sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)} M_0(\Re[\alpha]) - M_0(\Re[\theta]) - \sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)} M(A_\alpha),$$

从而得到

$$\sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)} [M_0(\Re[\alpha]) - \xi_\alpha - M(A_\alpha)] < M_0(\Re[\theta]).$$

根据定义15, 对每一个$\alpha \in \Gamma(\theta)$,

$$M(\Delta_\alpha) = M({}^{(p)}\Im[\alpha]) + M(A_\alpha) \leqslant M_0(\Re[\alpha]) - \xi_\alpha.$$

因此对每一个$\alpha \in \Gamma(\theta)$, $M({}^{(p)}\Im[\alpha]) \leqslant M_0(\Re[\alpha]) - \xi_\alpha - M(A_\alpha)$. 因为$\Gamma(\theta)$是$\theta$的一个极小覆盖, 故

$${}^{(p)}\Im[\theta] \subseteq \bigcup_{\alpha\in\Gamma(\theta)} {}^{(p)}\Im[\alpha].$$

因此,

$$M({}^{(p)}\Im[\theta]) \leqslant \sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)} M({}^{(p)}\Im[\alpha]) \leqslant \sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)} [M_0(\Re[\alpha]) - \xi_\alpha - M(A_\alpha)].$$

结合在前面得到的$\sum\limits_{\alpha\in\Gamma(\theta)} [M_0(\Re[\alpha]) - \xi_\alpha - M(A_\alpha)] < M_0(\Re[\theta])$, 得出$M({}^{(p)}\Im[\theta]) < M_0(\Re[\theta])$. 这就说明$\theta$在$M$下是不饱和的. 证毕.

定理 2 令Γ是(N, M_0)的一个有效变迁覆盖, 则如下线性整数规划问题(LIP)是有解的:

$$\begin{aligned} &\min \sum_{\alpha\in\Gamma} \xi_\alpha, \\ &\text{s.t. 式(1)与式(2)}, \\ &\qquad \xi_\alpha \in \mathbb{Z}^+ = \{1, 2, 3, \cdots\}. \end{aligned} \tag{3}$$

证 首先证明对任意$\theta \in \Theta \backslash \Gamma$, 存在控制变量的一组值$\xi_\alpha(\theta)$, $\alpha \in \Gamma$, 满足式(1)–(3). 具体证明如下: 因为Γ是(N, M_0)的一个有效变迁覆盖, 则对于$\theta \in \Theta \backslash \Gamma$, 存在$\Gamma(\theta) \subseteq \Gamma$是$\theta$的一个有效覆盖. 根据定义18, $M_0(\Re(\theta)) > |\Gamma(\theta)|$. $\forall\alpha \in \Gamma(\theta)$, 令$\alpha$对应的控制变量$\xi_\alpha(\theta) = M_0(\Re[\alpha]) - 1$. 根据$S^3PR$的性质, α至少包含两个资源位置, 故$M_0(\Re[\alpha]) \geqslant 2$, 从而$\xi_\alpha(\theta) \geqslant 1$, 故式(1)成立. 因为$M_0(\Re(\theta)) > |\Gamma(\theta)|$且$k_\theta \geqslant 0$, 故

$$\sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)} \xi_\alpha(\theta) = \sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)} (\Re[\alpha]) - |\Gamma(\theta)| > \sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)} M_0(\Re[\alpha]) - M_0(\Re[\theta])) > \sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)} M_0(\Re[\alpha]) - M_0(\Re[\theta]) - k_\theta,$$

故式(2)成立. 因为$M_0(\Re[\alpha])$是正整数, 从而式(3)成立. 这就说明$\forall\theta \in \Theta \setminus \Gamma$. 存在控制变量的一组值$\xi_\alpha(\theta)$, $\alpha \in \Gamma$, 满足式(1)–(3).

令$\xi_\alpha = \max\{\xi_\alpha(\theta) | \alpha \in \Gamma(\theta),\ \theta \in \Theta \backslash \Gamma\}$, 则$\{\xi_\alpha | \alpha \in \Gamma\}$是上述LIP的一组解. 证毕.

定理 3 令Γ是$(N,\ M_0)$的一个有效变迁覆盖, $(C_\Gamma, M_{\Gamma 0})$是根据定义16设计的(N, M_0)的关于Γ的控制器, 其中它的控制变量通过求解定理2中线性整数规划问题得到. 则受控系统(CN_Γ, M_{C0})是活的.

证 假设(CN_Γ, M_{C0})不是活的, 则存在$M \in R(CN_\Gamma, M_{C0})$, 使得在$CN_\Gamma$中存在变迁在$M$下是过程使能的, 但不是资源使能的, 或不是控制使能的. 令这些变迁组成的集合为ς. 如果ς中所有变迁都是过程使能但不是资源使能的, 则一定存在(N, M_0)中一条MPC θ在M下是饱和的. 因为Γ是(N, M_0)的一个有效变迁覆盖, 则存在$\Gamma(\theta) \subseteq \Gamma$是$\theta$的一个有效覆盖. 由定理1与定理2知, 存在$\xi_\alpha(\theta), \forall\alpha \in \Gamma(\theta)$, 使得式(1)–(2)成立, 从而可保证$\theta$在$M$下是不饱和的, 这与上述假设得出的结论是矛盾的. 故假设不成立, 即至少存在一个变迁t是过程, 资源都使能但不是控制使能的. 因为t不是控制使能的, 故存在$p_c \in^{(c)} t$使得$M(p_c) = 0$, 且每一个$t_1 \in {}^\bullet p_c$在M下是死的. 根据定义15, ${}^{(c)}t_1 = \varnothing$. 因此, t_1在M下是过程使能但不是资源使能的. 从而一定存在包含t_1的一条MPCθ_1使得θ_1在M下是饱和的, 由定理1与2知, 这是不可能的. 因此, (CN_Γ, M_{C0})是活的. 证毕.

3.2 有效变迁覆盖的计算(Computation of effective transition covers)

首先给出通过一条资源变迁回路θ寻找以$\Re[\theta]$为资源集的MPC(记为$\delta(\Re[\theta])$)的方法. 易知, $< \Re[\theta], \Re[\theta]^\bullet \cap {}^\bullet\Re[\theta] >$是强连通的, 且是以$\Re[\theta]$为资源集的极大资源变迁回路. 令$\gamma(\theta)$表示$< \Re[\theta], \Re[\theta]^\bullet \cap {}^\bullet\Re[\theta] >$. 如果$\gamma(\theta)$是完备的, 则$\gamma(\theta)$是以$\Re[\theta]$为资源集的MPC, 即$\delta(\Re[\theta]) = \gamma(\theta)$; 如果$\gamma(\theta)$不是完备的, 令$V = \{t \in \Im[\gamma(\theta)] | ({}^{(p)}t)^\bullet \not\subseteq \Im[\gamma(\theta)]\}$; 从$\gamma(\theta)$中删除$V$中所有变迁及其相关弧, 得到$\theta'$. 如果$\theta'$是强连通的, 则$\theta'$是以$\Re[\theta]$为资源集的MPC, 即$\delta(\Re[\theta]) = \theta'$; 否则, 不存在以$\Re[\theta]$为资源集的MPC, 即$\delta(\Re[\theta]) = \varnothing$.

根据文献[14]中算法A(MPC Enumeration), 本文可以计算出N中所有的MPC, 记这些MPC组成的集合为Θ. 令$\Gamma_0 = \varnothing$, 对每一个$t \in T$, 从Θ中寻找一条包含t的θ, 将θ放入Γ_0. 这里, θ可能不存在. 如果θ不存在, 记$\theta = \varnothing$. 这样, $\forall\theta' \in \Theta$与$t \in \Im[\theta']$, 总存在$\alpha \in \Gamma_0$使得$t \in \Im[\alpha]$, 从而$\Im[\theta'] \subseteq \bigcup_{\alpha\in\Gamma_0} \Im[\alpha]$. 故$\Gamma_0$覆盖了$\Theta$中任意一个MPC, 是$N$的一个变迁覆盖, 且该覆盖中MPC的个数不超过$N$的变迁个数.

算法 1 有效变迁覆盖的计算.

输入: S^3PR N的一个变迁覆盖Γ_0.

输出: N的一个有效变迁覆盖, 以及集合$\Omega = \{\Gamma(\theta) | \Gamma(\theta)$是$\theta$在$\Gamma$中的一个有效覆盖, $\theta \in \Theta \setminus \Gamma\}$.

Set $\Gamma = \Gamma_0$; $\Phi = \Gamma_0$; $\Omega = \varnothing$;
While ($\Theta \setminus \Phi \neq \varnothing$) do {
  Choose $\theta \in \Theta \setminus \Phi$;
  $\Gamma(\theta) = \{\alpha \in \Gamma | \Im[\alpha] \cap \Im[\theta] \neq \varnothing\}$;
  Let $s = |\Gamma(\theta)|$;
  Sort $\Gamma(\theta) = \{\alpha_0, \alpha_1, \cdots, \alpha_{s-1}\}$ by size $|\Im[\alpha_i \cap \Im[\theta]]|$ in a descending order;
  For (int $i = 0; i++; i < s$){
   If ($\Im[\theta] \subseteq \bigcup_{\alpha\in\Gamma(\theta)\setminus\{\alpha_i\}} \Im[\alpha]$){
    Let $\Gamma(\theta) := \Gamma(\theta) \setminus \{\alpha_i\}$;
   }
  }
  If ($M_0(\Re[\theta]) > |\Gamma(\theta)|$){
   $\Phi := \Phi \cup \{\theta\}$;
   $\Omega := \Omega \cup \{\Gamma(\theta)\}$;
   }
  Else {
   Choose $\varpi \in \Gamma(\theta)$, and $\beta = \delta(\Re[\varpi \cup \theta])$;
   $\Gamma := (\Gamma \setminus \{\varpi\}) \cup \{\beta\}$;
   For each $\Gamma(\varepsilon) \in \Omega${
    If ($\varpi \in \Gamma(\varepsilon)$){
   $\Gamma(\varepsilon) := (\Gamma(\varepsilon) \setminus \{\varpi\}) \cup \{\beta\}$;
     For each $\chi \in \Gamma(\varepsilon)${
     If $\bigcup_{\rho\in\Gamma(\varepsilon)} \Im[\rho] \subseteq \bigcup_{\rho\in\Gamma(\varepsilon)\setminus\{\chi\}} \Im[\rho]$, then
     {$\Gamma(\varepsilon) := \Gamma(\varepsilon) \setminus \{\chi\}$;
    }
   }
  }
  $\Phi := \Phi \cup \{\varpi, \theta, \beta\}$; $\Gamma(\varpi) := \{\beta\}$; $\Gamma(\theta) := \{\beta\}$; $\Omega := \Omega \cup \{\Gamma(\varpi), \Gamma(\theta)\}$;
 }
}

在算法1的每一个循环中, 得到的$\Gamma(\theta)$与$\Gamma(\varpi)$分别是θ, ϖ的有效覆盖. 对已经存在的$\Gamma(\varepsilon) \in \Omega$, 如果$\varpi \in \Gamma(\varepsilon)$, 则$\Gamma(\varepsilon)$变成$\Gamma'(\varepsilon) = (\Gamma(\varepsilon) \setminus \{\varpi\}) \cup \{\beta\}$; 如果$\varpi \notin \Gamma(\varepsilon)$, 则$\Gamma'(\varepsilon) = \Gamma(\varepsilon)$. 这里, $\Gamma'(\varepsilon)$依旧是ε在Γ中的有效覆盖. 从而, 根据算法1可以得到(N, M_0)的一个有效变迁覆盖Γ, 且对每一个$\varepsilon \in \Theta \setminus \Gamma$, 能得到$\varepsilon$在$\Gamma$中的一个有效覆盖$\Gamma(\varepsilon)$. 在算法1中, 因为$\varpi$与$\theta$都是极大完备资源变迁回路, 故$\beta \neq \varnothing$. 因为在算法1的替换中既没有增加也没有减少回路的个数, 故算法1得到的(N, M_0)的有效变迁覆盖中回路的个数不超过N的变迁个数.

3.3 基于变迁覆盖的死锁预防策略(Deadlock prevention policies based on transition covers)

根据第3.2部分的讨论, 本节给出基于变迁覆盖的死锁预防策略.

算法 2 基于变迁覆盖的死锁预防策略.

输入: 给定标识S^{3}PR$(N, M_0) = (P \cup P_0 \cup P_R,$

T, F, M_0)与它的一个变迁覆盖Γ_0.

输出: 活的受控系统(CN_Γ, M_{C0}).

第1步 利用算法1计算N的一个有效变迁覆盖Γ.

第2步 根据定义16, 对(N, M_0)设计关于Γ的控制器$(C_\Gamma,\ M_{\Gamma 0})$. 控制变量$\xi_\alpha$的值通过求解第4步中LIP得到, $\alpha\in\Gamma$.

第3步 对每一个$\theta\in\Theta\backslash\Gamma$, 根据算法1输出$\theta$的有效覆盖$\Gamma(\theta)$, 得到如下公式:

$$\sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)}\xi_\alpha(\theta)\geqslant\sum_{\alpha\in\Gamma(\theta)}M_0(\Re[\alpha])-M_0(\Re[\alpha])-k_\theta+1.$$

第4步 建立如定理2所示的LIP并求解.

第5步 输出$(CN_\Gamma, M_{C0})=(N, M_0)\otimes(C_\Gamma,$ $M_{\Gamma 0})$.

在算法2中, 根据第3步, $\Theta\backslash\Gamma$中每一个MPCθ都对应一个约束不等式. 故最坏的情形下, 第4步得到的LIP的约束条件的个数与S^3PR的极大完备资源变迁回路的个数相同.

4 例子(Example)

考虑由4个资源r_1, r_2, r_3, r_4组成的柔性制造系统. 该系统能加工两种类型的工件J_1与J_2. J_1型工件的加工路径为$O_{11}O_{12}O_{13}O_{14}$, 所需要的资源序列为$r_1r_2r_3r_1$. J_2型工件的加工路径为$O_{21}O_{22}O_{23}$, 所需要的资源序列为$r_1r_4r_3$. 这里, J_1与J_2型工件所需加工的工件数均为9, 资源r_1, r_2, r_4的容量均为2, 资源r_3的容量为1. 则该系统对应的S^3PR模型(N, M_0)如图1所示.

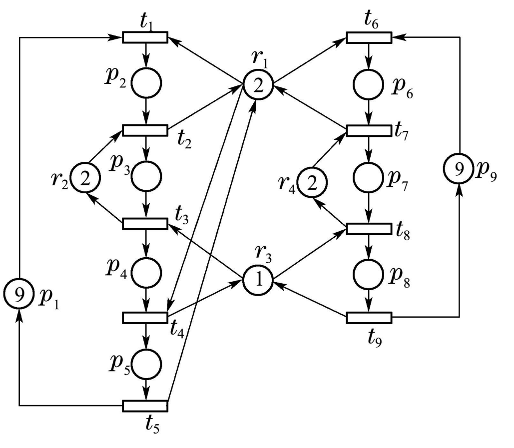

图 1 一个标识S^3PR(N, M_0)

Fig. 1 A marked S^3PR(N, M_0)

在图1中共有3条极大完备资源变迁回路:

$$\theta_1=r_1t_4r_3t_3r_2t_2r_1,\ \theta_2=r_1t_4r_3t_8r_4t_7r_1,$$

$$\theta_3=r_1t_4r_3t_3r_2t_2r_1t_4r_3t_8r_4t_7r_1,$$

即$\Theta=\{\theta_1,\theta_2,\theta_3\}$. 根据算法1, 得到$N$的一个有效变迁覆盖$\Gamma=\{\theta_1,\theta_2\}$, 同时$\Gamma$是$\theta_3$的一个有效覆盖.

根据定义15, 对θ_1与θ_2分别添加控制位置$p_{\theta 1}$, $p_{\theta 2}$, 对应的控制变量满足$1\leqslant\xi_1\leqslant 4, 1\leqslant\xi_2\leqslant 4$.

由图1知, ${}^{(p)}\Im[\theta_1]=\{p_2,\ p_3, p_4\}$, $\Delta_{\theta 1}=\{p\in P|$ $p<\Im[\theta_1]\}=\{p_2, p_3, p_4\}$, ${}^{(p)}\Im[\theta_2]=\{p_4, p_6, p_7\}$, $\Delta_{\theta 2}=\{p\in P|p<\Im[\theta_2]\}=\{p_2, p_3, p_4, p_6, p_7\}$. 因此, $A_{\theta 1}=\Delta_{\theta 1}\backslash{}^{(p)}\Im[\theta_1]=\varnothing$, $A_{\theta 2}=\Delta_{\theta 2}\backslash{}^{(p)}\Im[\theta_2]$ $=\{p_2, p_3\}$,${}^{(p)}\Im[\theta_3]=\{p_2, p_3, p_4, p_6, p_7\}$, $(A_{\theta 1}\cup A_{\theta 2})$ $\cap{}^{(p)}\Im[\theta_3]=\{p_2, p_3\}$. 因为$H(r_1)=\{p_2, p_5, p_6\}$且$p_6\in{}^{(p)}\Im[\theta_3]\backslash(A_{\theta 1}\cup A_{\theta 2})$, 从而根据$B_\theta$符号的含义, $p_2\notin B_{\theta 3}$. 另一方面, $H(r_2)=\{p_3\}$, 则$p_3\in B_{\theta 3}$. 这样, $B_{\theta 3}=\{p_3\}$. 又因为$M_0(r_2)=2$, 故$k_{\theta 3}=2$.

从而要想保证θ_3是不饱和的, 则如下不等式必须成立: $\xi_1+\xi_2\geqslant M_0(\Re[\theta_1])+M_0(\Re[\theta_2])-M_0(\Re[\theta_3])$ $-k_{\theta 3}+1=5+5-7-2+1=2$.

进一步, 得到如下的线性整数规划问题:

LIP1: $\min\xi_1+\xi_2$

s.t. $1\leqslant\xi_1\leqslant 4$; $1\leqslant\xi_2\leqslant 4$;

$\xi_1+\xi_2\geqslant 2$; $\xi_i\in\mathbb{Z}^+$; $i=1,2$.

LIP1有唯一的解$\xi_1=\xi_2=1$, 从而得到如表1所示的控制器$(C_\Gamma, M_{\Gamma 0})$. 其中对应的受控系统Petri网(CN_Γ, M_{C0})如图2所示.

表 1 图1所示S^3PR的基于变迁覆盖的控制器$(C_\Gamma, M_{\Gamma 0})$

Table 1 A controller $(C_\Gamma, M_{\Gamma 0})$ of S^3PR shown in Fig. 1 based on an transition cover

p_θ	${}^\bullet p_\theta$	$p_\theta{}^\bullet$	$M_{\Gamma 0}(p_\theta)$
$p_{\theta 1}$	t_4	t_1	4
$p_{\theta 2}$	t_4, t_8	t_1, t_6	4

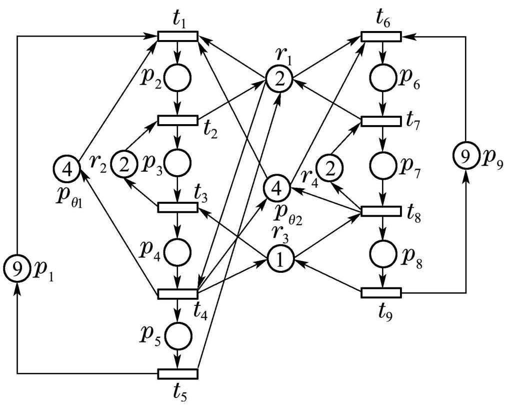

图 2 基于变迁覆盖的受控系统Petri网(CN_Γ, M_{C0})

Fig. 2 A controlled Petri net (CN_Γ, M_{C0}) based on transition cover

图2所示的S^3PR共有3个严格的极小信标: $S_1=$ $\{p_5, p_6, p_8, r_1, r_2, r_3\}$, $S_2=\{p_2, p_5, p_8, r_1, r_3, r_4\}$, $S_3=\{p_5, p_8, r_1, r_2, r_3, r_4\}$. 又根据基本信标的定义[12], $\Pi=\{S_1, S_2, S_3\}$是一组基本信标. 根据文献[12]基于基本信标添加控制器的方法, 得到图1所示

S^3PR的另一个活性控制器$(C_{\Pi},\ M_{\Pi 0})$, 如表2所示. 这里, 对应的受控系统Petri网$(CN_{\Pi},\ M_{\Pi C0})$如图3所示. 在$(C_{\Gamma},\ M_{\Gamma 0})$和$(C_{\Pi},\ M_{\Pi 0})$的分别控制下, 受控系统的可达标识数是相同的. 这就是说, 对图1所示S^3PR, 基于有效变迁覆盖得到的控制器比基于基本信标得到的控制器在规模上要小, 但性能是相同的.

表 2　图1所示S^3PR的基于基本信标的控制器$(C_{\Pi}, M_{\Pi 0})$

Table 2　A controller $(C_{\Pi}, M_{\Pi 0})$ of S^3PR shown in Fig. 1 based on elementary siphons

p_s	${}^\bullet p_s$	$p_s{}^\bullet$	$M_{\Pi 0}(p_s)$
p_{s1}	t_4	t_1	4
p_{s2}	t_4, t_8	t_1, t_6	4
p_{s3}	t_4, t_8	t_1, t_6	6

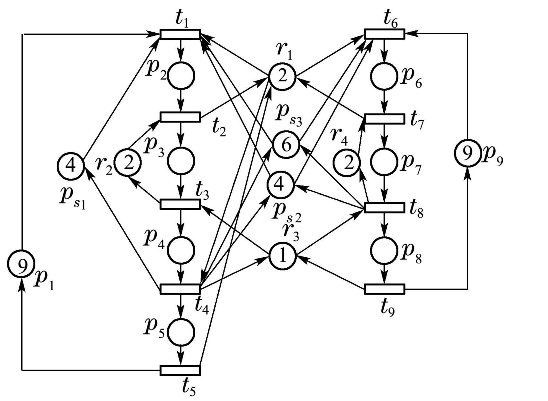

图 3　基于基本信标的受控系统Petri网$(CN_{\Pi}, M_{\Pi C0})$

Fig. 3　A controlled Petri net $(CN_{\Pi}, M_{\Pi C0})$ based on elementary siphons

5　结论(Conclusions)

本文研究了柔性制造系统的死锁问题. 通过分析表征Petri网活性的重要结构特征—极大完备资源变迁回路来建立死锁控制策略. 基于极大完备资源变迁回路, 本文提出了变迁覆盖的定义. 通过仅对有效变迁覆盖中每个极大完备资源变迁回路添加具有合适控制变量的控制器, 得到了系统的一个活性控制器. 控制变量的值通过求解一个线性整数规划问题得到. 所得到的有效变迁覆盖中回路的个数不超过Petri网变迁的个数, 故控制器的规模在很大程度上得到降低.

参考文献(References):

[1] FANTI M P, ZHOU M C. Deadlock control methods in automated manufacturing systems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2004, 34 (1): 5 – 22.

[2] 任磊, 王峰, 邢科义. 基于Petri网的柔性制造系统无死锁遗传调度算法 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(1): 13 – 18.
(REN Lei, WANG Feng, XING Keyi. A Petri-net-based deadlock-free genetic scheduling for flexible manufacturing systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27 (1): 13 – 18.)

[3] XING K Y, HAN L B, ZHOU M C, et al. Deadlock-free genetic scheduling algorithm for automated manufacturing systems based on deadlock control policy [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2012, 42(3) : 603 – 615.

[4] MURATA T. Petri nets — properties, analysis and applications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1989, 77 (4): 541 – 580.

[5] JENG M D. A Petri net synthesis theory for modeling flexible manufacturing systems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 1997, 27(2): 169 – 183.

[6] KUMARAN T K, CHANG W, CHO H, et al. A structured approach to deadlock detection, avoidance and resolution in flexible manufacturing systems [J]. *International Journal of Production Research*, 1994, 32(10): 2361 – 2379.

[7] REVELIOTIS S A, LAWLEY M A, FERREIRA P M. Polynomial-complexity deadlock avoidance policies for sequential resource allocation systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, 42(10): 1344 – 1357.

[8] XING K Y, HU B S, CHEN H X. Deadlock avoidance policy for Petri-net modeling of flexible manufacturing systems with shared resources [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, 41(2): 289 – 295.

[9] XING K Y, ZHOU M C, LIU H X, et al. Optimal petri-net-based polynomial-complexity deadlock-avoidance policies for automated manufacturing systems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2009, 39(1): 188 – 199.

[10] EZPELETA J, COLOM J M, MARTINEZ J. A Petri net based deadlock prevention policy for flexible manufacturing systems [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1995, 11 (2): 173 – 184.

[11] HUANG Y S, JENG M D, XIE X L, et al. Deadlock prevention policy based on Petri nets and siphons [J]. *International Journal of Production Research*, 2001, 39(2): 283 – 305.

[12] LI Z W, ZHOU M C. Elementary siphons of Petri nets and their application to deadlock prevention in flexible manufacturing systems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2004, 34(1): 38 – 51.

[13] 李绍勇, 王安荣. 应用必需信标的Petri网死锁预防策略 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(6): 771 – 780.
(LI Shaoyong, WANG Anrong. A deadlock prevention policy in Petri nets using necessary siphons [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28 (6): 771 – 780.)

[14] XING K Y, ZHOU M C, WANG F, et al. Resource transition circuits and siphons for deadlock control of automated manufacturing systems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2011, 41(1): 74 – 84.

[15] CHEN Y F, LI Z W. Design of a maximally permissive liveness-enforcing supervisor with a compressed supervisory structure for flexible manufacturing systems [J]. *Automatica*, 2011, 47(5): 1028 – 1034.

[16] CHEN Y F, LI Z W, KHALGUI M. Design of a maximally permissive liveness-enforcing Petri net supervisor for flexible manufacturing systems [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2011, 8(2): 374 – 393.

[17] CHEN Y F, LI Z W. On structural minimality of optimal supervisors for flexible manufacturing systems [J]. *Automatica*, 2012, 48(10): 2647 – 2656.

作者简介:

刘慧霞　(1979–), 女, 讲师, 目前研究方向为离散事件动态系统的控制和优化, E-mail: liu.hui.xia@stu.xjtu.edu.cn;

邢科义　(1957–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为混合系统建模、控制和优化调度, E-mail: kyxing@sei.xjtu.edu.cn;

康苗苗　(1987–), 女, 博士研究生, 目前研究方向为离散事件动态系统的控制和优化调度, E-mail: kangmiaomiao87@gmail.com.