

文章编号: 1001-0920(2006)06-0671-04

Petri 网上的禁止状态监控器综合

罗继亮, 袁剑蓉, 吴维敏, 苏宏业, 王肖, 褚健

(浙江大学 a 工业控制技术国家重点实验室, b 先进控制研究所, 杭州 310027)

摘要: 给出了 Petri 网上广义互斥约束的最大允许监控器综合方法, 其中该监控问题满足两个条件: 正权值禁止库所的影响子网是状态机; 负权值禁止库所的输入和输出变迁均只有一个输入库所。首先得到了监控器存在的充分和必要条件; 其次构造了约束等价转换的方法, 该方法可将存在不可控变迁的监控问题简化为相当于变迁全部可控的监控问题。最后通过一个例子说明了该方法的可行性。

关键词: 监控; 离散事件系统; Petri 网; 禁止状态

中图分类号: TP271.8; TP18 **文献标识码:** A

Forbidden State Avoidance Controller Synthesis for Petri Nets

LUO Ji-liang, YUAN Jian-rong, WU Wei-min, SU Hong-ye, WANG Xiao, CHU Jian

(a National Laboratory of Industrial Control Technology, b Institute of Advanced Process Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China Correspondent: WU Wei-min, Email: wmwu@ipc.zju.edu.cn)

Abstract: A method is proposed to construct the maximally permissive supervisor to enforce the generalized mutual exclusion constraint (GMEC) on Petri nets, which has the property that for a forbidden place with positive weight, its influencing subnet is a state machine, and for a forbidden place with negative weight, its input and output transitions have at most one input place. A necessary and sufficient condition for the existence of supervisor is obtained. A constraint equivalent transformation method is then constructed to reduce the supervisory control problem of a net with uncontrollable transitions to what is as easy as the control problem without any uncontrollable transitions. An example is provided to illustrate the results.

Key words: Supervisory control; Discrete event systems; Petri nets; Forbidden state

1 引言

禁止状态避免问题是 Petri 网监控理论的重要问题。广义互斥约束是在文献[1]中首次提出的一类控制规范, 近年来得到了广泛的研究。文献[1, 2]给出了变迁全部可控的 Petri 网上最大允许监控器的设计方法。文献[3, 4]利用库所不变量法给出了具有不可控变迁的 Petri 网上监控器的设计方法。但是文献[5]指出在一些情况下无法利用库所不变量法设计最大允许的监控器。不可控变迁极大地增加了 Petri 网上禁止状态监控器综合的复杂性^[2], 使得最大允许监控器综合变得非常困难。目前的研究仍局

限在一些 Petri 网子类, 例如状态机^[6-8]、前后向无冲突网^[9]、无环网^[10]和事件图^[11]等。

本文利用约束转换的方法研究了 Petri 网上的一类监控问题, 它要求正权值禁止库所的影响子网是状态机, 负权值禁止库所的输入和输出变迁均只有一个输入库所。本文给出了这类监控问题的监控器存在的充要条件, 并且得到了最大允许监控器的综合方法。相对于同样针对类似状态机结构的文献[7, 8, 10], 本文取得了下列进展: 首先考虑了包含负权值的广义互斥约束, 文献[11]指出负权值的约束可以描述柔性制造系统中不同生产单元的负荷平衡

收稿日期: 2005-05-06; 修回日期: 2005-07-14

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20020335103); 浙江省自然科学基金项目(Y104081); 国家创新研究群体科学基金(60421002)。

作者简介: 罗继亮(1977—), 男, 河南安阳人, 博士生, 从事离散事件系统、Petri 网理论与应用研究; 苏宏业(1969—), 男, 江苏武进人, 教授, 博士生导师, 从事时滞系统、非线性系统、鲁棒控制理论等研究。

和不同产品的生产率,因而具有重要理论意义和应用价值;其次,本文只要求模型的部分结构是状态机,因此本文的方法比文献[7,8]的使用范围更广,另外本文的Petri网是基于完全并发假设的,而文献[10]是基于非并发假设的;最重要的是从监控器设计效率角度来讲,本文利用约束转换方法将存在不可控变迁的问题简化为一个相当于变迁全部可控的问题,从根本上避免了不可控变迁导致的计算复杂性

2 基本根据

受控Petri网是一个五元组,记为 $CtIPN = (P, T, F, C, B)$, P 是状态库所集; T 是变迁集; 关联矩阵 $F: (P \times T) \rightarrow (T \times P) \rightarrow \{0, 1\}$ 表示从库所到变迁和从变迁到库所的有向弧的集合; C 是控制库所集; $B \subseteq (C \times T)$ 表示从控制库所到变迁的有向弧的集合, 可控变迁的集合表示为 $T_c = \{t \in T \mid \exists c, (c, t) \in B\}$, 不可控变迁的集合表示为 $T_u = T - T_c$. 一个状态库所 p 的输入变迁集和输出变迁集分别表示为 ${}^{(i)}p$ 和 $p^{(o)}$, 一个变迁 t 的输入和输出库所集分别表示为 ${}^{(p)}t$ 和 $t^{(p)}$. 一个变迁 t 的输入控制库所表示为 ${}^{(c)}t$. 标识表示托肯在Petri网内各状态库所的一个分布, 记做 m . 控制表示托肯在控制库所的一个分布, 记做 u . u_{one} 表示每个控制库所中都含有一个托肯; u_{zero} 表示每个控制库所都不含有托肯. 关于受控Petri网的图形化描述、完全并发的演变规则等概念请参阅文献[6, 11]. $R_k(m, u)$ 称为在一个控制 u 下从标识 m 开始 k (非负整数) 步可达的标识的集合.

$R(m, u) = \bigcup_k R_k(m, u)$. $R_k(m, U)$ 表示在一个控制策略 U 下从标识 m 开始 k 步可达的标识的集合. 广义互斥约束是一个二元组 (w, k) , 其中 $w: P \rightarrow Z$ 是状态库所的权值函数(向量), 非负整数 k 是标识的加权和的上界. 禁止库所集表示为 $P_F = \{p \in P \mid w(p) > 0\}$, $M_F = \{m \mid w \cdot m > k\}$ 表示禁止标识集, $A(w, k) = \{m \mid R(m, u_{zero}) \cap M_F = \emptyset\}$ 表示允许标识集. 如果 $R_1(m, u) \subseteq A(w, k)$, 那么 u 是 m 的一个允许控制. 如果 $R_1(m, U) \subseteq A(w, k)$, 那么 U 是 m 的一个允许的状态反馈控制策略. 如果 U 是 m 的一个允许状态反馈控制策略, 并且 $\forall U' > U: R(m, U') \not\subseteq A(w, k)$, 那么 U 是 m 的一个最大允许的状态反馈控制策略.

给定一个库所序列, 如果每相邻的两个库所之间都有一个不可控变迁从前一个库所连向后一个库所, 那么该库所序列叫做不可控路径. 库所 p 的影响域 $I_p \subseteq P$ 是全部末尾节点为 p 的不可控路径组成的集合. 由库所 p 的影响域 $I_p \subseteq P$ 和 I_p 内各库所的输

入和输出变迁组成的受控Petri网称为 p 的不可控影响子网. 由 p 的不可控影响子网和 p 的不可控影响子网内的全部可控变迁的输入库所组成的受控Petri网称为 p 的影响子网.

3 一类Petri网上的禁止状态问题

本文研究的监控问题满足下列条件: 1) 正权值禁止库所的影响子网是状态机; 2) 负权值禁止库所的输入和输出变迁只能有一个输入库所. 为了叙述的方便, 默认下面提到的监控问题都满足上述条件.

定义1 给定一个Petri网系统 (N, m_0) 和广义互斥约束 (w, k) , 设 m 是系统状态空间内的一个标识, 如果标识 m_D 满足下列条件:

- 1) $m_D \in R(m, u_{zero})$,
- 2) $\forall m \in R(m, u_{zero}), w \cdot m > w \cdot m_D$,

那么它就是 m 的危险标识.

引理1 当且仅当一个标识的危险标识是合法标识, 则该标识是允许标识.

证明略.

3.1 危险标识的可达性计算

在本小节将给出任意标识的危险标识的计算方法, 并根据它给出允许标识的判别.

定义2 给定一个禁止库所 p , 它的关联域 Γ_p 定义如下: 如果 $w(p) > 0$, 它的关联域就是它的影响域; 如果 $w(p) < 0$, 那么 p 的关联域 Γ_p 是满足下列条件库所的集合: 1) 它的权值小于 0; 2) 它在 p 的一条不可控路径内; 3) 它不在任意非禁止库所的不可控路径内; 4) 它的输出变迁中没有不可控的阱变迁.

注1 阱变迁是没有输出库所的变迁. 文献[6]不考虑权值为负的互斥约束, 那么对于正权值禁止库所, 文献[6]中提到的影响域即指本文定义的关联域.

引理2^[6] 正权值库所能够不可控地得到最多的托肯是在其关联域中的托肯.

引理3 给定一个负权值库所 p , 它可以不可控地得到其关联域 Γ_p 中的托肯.

证明略.

定义3 将禁止库所集中的库所按照权值增大的顺序排成一个序列 $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 那么 p_i 的有效影响域 X_{p_i} 定义如下:

$$X_{p_i} = \Gamma_{p_i} - \bigcup_{k=i+1}^n \Gamma_k, X_{p_n} = \Gamma_{p_n}, \quad (1)$$

其中 Γ_{p_i} 是 p_i 的关联域.

定理1 当且仅当每一个禁止库所得到的有效影响域内的全部托肯时, Petri网到达给定标识的危险标识, 即 $\forall p \in P_F, m_D(p) = m(X_p)$, 其中: m_D 是



m 的危险标识, P_F 是禁止库所集, X_p 是 p 的有效影响域

证明 根据定义 3, 任意两个禁止库所的有效影响域不相交, 并且每个禁止库所的有效影响域都包含在它的关联域内 根据引理 2 和引理 3, 所有禁止库所可以同时不可控地得到各自有效影响域内的全部托肯

根据引理 2, 正权值禁止库所可以不可控地得到最多的托肯是其关联域中的托肯 根据关联域的定义, 任意负权值禁止库所关联域内的托肯只有通过可控变迁的激发才能够离开负权值禁止库所, 但是根据引理 3, 负权值禁止库所可以不可控地得到其关联域内的全部托肯 当两个禁止库所的关联域相交时, 它们公共区域内的托肯只能不可控地进入其中的一个禁止库所 根据有效影响域的定义, 关联域的公共区域只包含在权值较大的禁止库所的有效影响域内, 因此下式成立:

$$\begin{aligned} & \exists m_d \quad R(m, u_{zero}) \quad m_d(p) = m(X_p), \\ & \forall p \in P_F \Rightarrow \forall m \quad R(m, u_{zero}), \\ & w \cdot m \leq w \cdot m_d. \end{aligned} \quad (2)$$

根据式 (2) 和定义 1, 如果 $\forall p \in P_F, m_D(p) = m(X_p)$.

3.2 约束转换

在本节中将利用危险标识构建约束的等价转换方法

定义 4 危险权值函数 $\eta: P \rightarrow N$ 是从状态库所集合到非负整数集的函数(向量), 定义如下:

$$\eta(p) = \begin{cases} w(p_f), & p \in X_{p_f}, \exists p_f \in P_F; \\ 0, & p \notin X_{p_f}, \forall p_f \in P_F. \end{cases} \quad (3)$$

其中: P_F 是禁止库所集, X_{p_f} 是禁止库所 p_f 的有效影响域

定理 2 给定 Petri 网 (N, m_0) 和广义互斥约束 (w, k) , 下列结论成立:

$$1) \forall m \quad R(m_0, u_{one}), \eta \cdot m = w \cdot m_D. \quad (4)$$

其中 η 为危险权值函数, m_D 是 m 的危险标识

2) 当且仅当 $\eta \cdot m \leq k, m$ 是关于约束 (η, k) 的允许标识

3) 约束 (η, k) 和给定约束 (w, k) 是等价的

4) 当且仅当 $\eta \cdot m_0 \leq k$, 监控器存在

证明 1) 该定理可根据定理 1 和危险权值函数的定义直接推导出来

2) 根据危险标识的定义可知

$$\forall m \quad R(m, u_{zero}), w \cdot m \leq w \cdot m_D. \quad (5)$$

根据式 (4)、式 (5) 和危险标识的定义可知

$$\forall m \quad R(m, u_{zero}), \eta \cdot m \leq \eta \cdot m_D. \quad (6)$$

根据式 (6) 可知, 当且仅当 $\eta \cdot m \leq k, m$ 是关于

约束 (η, k) 的允许标识

3) 根据危险标识的定义和式 (4) 可知, 当且仅当 $\eta \cdot m \leq k, m$ 是关于约束 (w, k) 的允许标识 根据本定理的第 2 项可知约束 (w, k) 和约束 (η, k) 的允许标识的判据相同, 即两个约束的允许标识集相等, 因此它们是等价的

4) 根据本定理的第 2 项和第 3 项, 当且仅当 $\eta \cdot m_0 \leq k$, 初始标识 m_0 是允许标识 控制器存在的充要条件即为初始标识是关于约束 (η, k) 的允许标识

注 2 第 2 项说明关于约束 (η, k) 的合法标识集与允许标识集相等, 因此在综合它的监控器时, 不必考虑不可控变迁的影响; 第 3 项说明约束 (η, k) 和约束 (w, k) 的最大允许状态反馈控制策略是相等的; 第 4 项给出了监控器存在的充要条件

3.3 最大允许状态反馈控制策略

定义 5 增益权值函数 $\chi: T \rightarrow N$ 是变迁集到整数集的映射, 定义如下:

$$\chi(t) = \eta(p) - \eta(p'). \quad (7)$$

定理 3 给定 Petri 网 (N, m_0) 和广义互斥约束 (w, k) , 最大允许状态反馈控制策略由下式计算:

$$\begin{aligned} U(m) = & \{u \mid \eta \cdot m + \max_{p \in P_a} (\chi(p^{(u)} - T_a - T_e)) \cdot m(p) \leq k\}. \end{aligned} \quad (8)$$

其中: η 是危险权值函数, χ 是增益权值函数, $T_a = \{t \in T \mid \chi(t) > 0\}$, $P_a = \{p \in P \mid t \in T_a, p \in {}^{(u)}t\}$, $T_e = \{t \in T_e \mid (u^{(t)}) = 1\}$.

证明 根据定义 5, $\chi(t)$ 表示变迁 t 激发一次导致标识关于 η 加权值的增量 显然在综合约束 (η, k) 的监控器时, 只需考虑那些增益权值为正的变迁, 即变迁集 T_a 根据定理 2, 如果 t 是一个不可控变迁, 那么 $\chi(t) \leq 0$, 因此 T_a 内的变迁都是可控变迁 那么给定任意标识 m 和任意控制 u , 下式成立:

$$\begin{aligned} \max_{m \in R_1(m, u)} (\eta \cdot m - \eta \cdot m) = & \max_{p \in P_a} (\chi(p^{(u)} - T_a - T_e)) \cdot m(p). \end{aligned} \quad (9)$$

给定任意标识 m 和任意控制 u , 根据式 (9), 当且仅当下式:

$$\eta \cdot m + \max_{p \in P_a} (\chi(p^{(u)} - T_a - T_e)) \cdot m(p) \leq k \quad (10)$$

成立时, u 是 m 的一个允许控制

根据定理 2, (w, k) 和 (η, k) 是等价的, 因此最大允许状态反馈控制策略可由式 (8) 来计算

4 应用举例

图1是柔性制造系统内的某工作站的示意图,其中 $L_i (1 \leq i \leq 7)$ 是输送带的不同区域, M_1 和 M_2 是两台完成相同工序的机床.当工件到达 L_1 时,观测器执行读操作,如果加工任务需要 M_1 和 M_2 ,则通过切换装置 W_1 和 W_2 将该工件送入 L_2 或 L_6 ,否则直接送入 L_4 . L_2 和 L_6 内的工件分别被送到机床 M_1 和 M_2 进行加工;然后分别通过 L_3 和 L_4 送往 L_5 ;最后被输送带送往下一个工作站.需要注意的是两台机床的生产率不同, M_1 和 M_2 加工一个工件分别需要15 min和20 min,可能产生一台负荷过高而另一台闲置导致的资源浪费情况,因此需要协调两台机床的负荷.

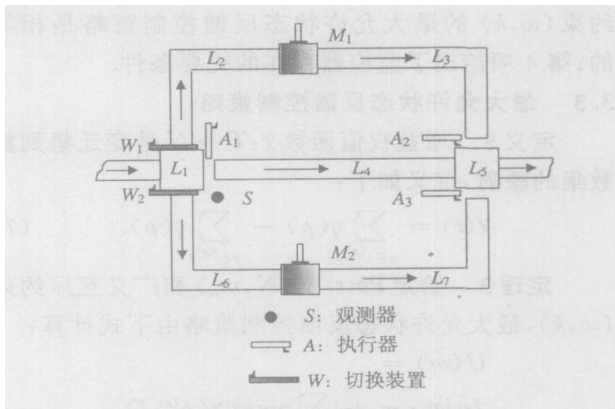


图1 一个制造系统工作站示意图

图2是工作站的Petri网模型,库所 p_i 和 p_o 分别表示另外两个工作站,库所 $p_j (1 \leq j \leq 7)$ 分别表示输送带的 $L_j (1 \leq j \leq 7)$ 区, p_{m1} 和 p_{m2} 分别表示机床 M_1 和 M_2 , p_{n1} 和 p_{n2} 的托肯分别表示由机床 M_1 和 M_2 完成的工件.其中负荷协调问题的控制规范可以表述为广义互斥约束,即

$$|15m(p_{n1}) - 20m(p_{n2})| \leq 15$$

下面利用本文给出的方法来综合最大允许监控器.首先计算相应的危险权值,从而得到等价的广

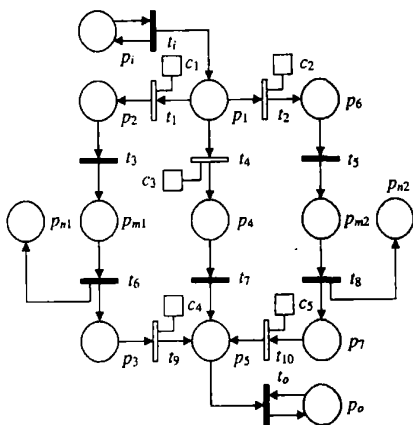


图2 柔性工作站的Petri网模型

义互斥约束

$$\left\{ \begin{aligned} (\eta_1, 15): \eta_1 \cdot m &= 15(m(p_2) + m(p_{m1}) + \\ &\quad m(p_{n1})) - 20(m(p_6) + \\ &\quad m(p_{m2}) + m(p_{n2})) \leq 15; \\ (\eta_2, 15): \eta_2 \cdot m &= 20(m(p_6) + m(p_{m2}) + \\ &\quad m(p_{n2})) - 15(m(p_2) + \\ &\quad m(p_{m1}) + m(p_{n1})) \leq 15 \end{aligned} \right. \quad (11)$$

根据定理3,最大允许控制策略为

$$U = \{u \mid \eta_1 \cdot m + u(c_1) \cdot m(p_1) \leq 15 \\ \eta_2 \cdot m + u(c_2) \cdot m(p_1) \leq 15\}$$

值得注意的是:1)此例中的控制规范是一个包含负权值的广义互斥约束;2)因为部分变迁具有多个输出库所,Petri网不是一个状态机,而只有影响子网是状态机;3)本文利用约束转换的方法,将给定的约束等价转化为新的约束(式(11)),可以看到网内任何不可控变迁的激发都不会增加式(11)中不等式左边的值,因此在设计监控器时无需考虑不可控变迁,从而使问题得到了简化.

5 结 语

本文研究了一类Petri网上具有负权值广义互斥约束的禁止状态监控问题,给出了监控器存在的充要条件,并采用约束转换的方法将具有不可控变迁的监控问题简化为相当于变迁全部可控的问题.

参考文献 (References)

[1] Giua A, D'Esare F, Silva M. Generalized Mutual Exclusion Constraints on Nets with Uncontrollable Transitions[A]. Proc 1992 IEEE Int Conf on System, Man and Cybernetics [C]. Chicago, 1992: 974-979.

[2] Yamalidou K, Moody J O, Lemmon M, et al. Feedback Control of Petri Nets Based on Place Invariants[J]. Automatica, 1996, 32(1): 15-28.

[3] Moody J O, Antsaklis P J. Petri Net Supervisors for DES with Uncontrollable and Unobservable Transitions [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(3): 462-476.

[4] 刑科义, 席裕庚, 胡保生. 具有不可控变迁离散事件系统的Petri网监控器[J]. 自动化学报, 2001, 27(3): 180-185. (Xing K Y, Xi Y G, Hu B S. Petri Net Controller for Discrete Event Systems with Uncontrollable Transitions[J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(3): 180-185.)

[5] Basile F, Chiacchio F, Giua A. Supervisory Control of Petri Nets Based on Suboptimal Monitor Places [A]. Proc of WODES'98 [C]. Cagliari, 1998: 85-87.

(下转第696页)

说明

以流通为主的供应链的信道容量和聚合度比较容易计算;而以制造为主的供应链(如流程制造供应链),由于加工前后物质、能量的转变不易定量,信息熵、信道容量和聚合度的计算相对较困难,这是本文方法的局限所在。当企业间物质传递间断时,本文方法并不能直接应用,怎样解决这个问题将是下一步研究工作的主要方向。

参考文献(References)

- [1] 聂茂林. 供应链系统管理研究[J]. *经济师*, 2004, 19(1): 151-152
(Nie M L. System Management Study on Supply Chain [J]. *China Economist*, 2004, 19(1): 151-152.)
- [2] Tomas G, Hult M. Global Supply Chain Management: An Integration of Scholarly Thoughts [J]. *Industrial Marketing Management*, 2004, 33 (1): 3-5
- [3] Gunasekaran A. Supply Chain Management: Theory and Applications [J]. *European J of Operational Research*, 2004, 159(2): 265-268
- [4] Vijay R Kannan, Keah Choon Tan. Just in Time, Total Quality Management, and Supply Chain Management: Understanding Their Linkages and Impact on Business Performance [J]. *Omega*, 2005, 33 (2): 153-162
- [5] Brian Fynes, Sean de Burca, Donna Marshall. Environmental Uncertainty, Supply Chain Relationship Quality and Performance [J]. *J of Purchasing & Supply Management*, 2004, 10(4/5): 179-190
- [6] Keneth H Wathe, Jan B Heide. Relationship Governance in a Supply Chain Network [J]. *J of Marketing*, 2004, 68(1): 733-789
- [7] 云虹. 供应链中的组织间关系治理研究[J]. *求索*, 2004, 24(12): 45-46
(Yun H. Study on Relation Governance in a Supply Chain [J]. *Seeker*, 2004, 24(12): 45-46.)
- [8] 韩博平. 生态网络中物质、能量流动的信息指标及其灵敏度分析[J]. *系统工程理论方法应用*, 1995, 4(1): 21-29
(Han B P. Information Indexes of Energy and Material Flow in Econetworks and Their Sensitivity Analysis [J]. *System Engineering-theory Methodology Applications*, 1995, 4(1): 21-29.)
- [9] Rultedge R W. Ecology Stability: An Information Theory Viewpoint [J]. *J of Theoretical Biology*, 1976, 57(2): 355-371
- [10] Ulanowicz R E. Complexity, Stability and Self-organization in Natural Communities [J]. *Oecologia*, 1979, 43(3): 295-298
- [11] Ichiro Aoki, Takahisa Mizushima. Biomass Diversity and Stability of Food Webs in Aquatic Ecosystems [J]. *Ecological Research*, 2001, 16(1): 65-71
- [12] Geoffrey J L F Hagelaar, Jack G A J. Van der Vorst. Environmental Supply Chain Management: Using Life Cycle Assessment to Construct Supply Chains [J]. *International Food and Agribusiness Management Review*, 2001, 4(4): 399-412
- [6] Boel R K, Ben-Naoum L, Breusegem V V. On Forbidden-state Problems for a Class of Controlled Petri Nets [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1995, 40(11): 1717-1731
- [7] Stremersch G, Boel R K. Enforcing K-safeness in Controlled State Machines [A]. *Proc of the 38th Conf on Decision and Control* [C]. 1999: 1737-1742
- [8] 董利达, 吴维敏, 徐巍华, 等. 一类受控Petri网的控制器设计[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(5): 678-684
(Dong L D, Wu W M, Xu W H, et al. Controller Design for a Class of Controlled Petri Nets [J]. *Control Theory and Applications*, 2003, 20(5): 678-684.)
- [9] Chen H X. Net Structure and Control Logic Synthesis of Controlled Petri Nets [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(10): 1446-1450.
- [10] Stremersch G, Boel R K. Structuring Acyclic Petri Nets for Reachability Analysis and Control [J]. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Application*, 2002, 12(1): 7-41
- [11] Ghaffari A, Rezg N, Xie X L. Feedback Control Logic for Forbidden-state Problems of Marked Graphs: Application to a Real Manufacturing System [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(1): 18-29

(上接第674页)