

一类离散事件系统的监控器综合

罗继亮^{1,2}, 吴维敏², 董利达², 苏宏业², 褚健²

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362011;

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

摘要: 前向无同步前向无冲突网是每个变迁有且只有一个输入库所并且每个库所最多有一个输入变迁的受限Petri网. 针对不可控影响子网为前向无同步前向无冲突网的广义互斥约束, 显式地给出了最大允许控制策略的计算方法. 并用一个例子给予了说明.

关键词: 离散事件系统; 监控; Petri网

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Supervisor synthesis for a class of discrete event systems

LUO Ji-liang^{1,2}, WU Wei-min², DONG Li-da², SU Hong-ye², CHU Jian²

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou Fujian 362011, China;

2. National Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Advanced Process Control, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: The forward-synchronization and forward-conflict free(FSFCF) net is a class of Petri nets in which each transition has exactly one input place and each place has at most one input transition. For a class of control problems where the control specification is a general mutual exclusion constraint and the uncontrollable influencing subnet is an FSFCF net, an expression is given to calculate the maximally permissible control policy. An example illustrates the theoretical results.

Key words: discrete event systems; supervisory control; Petri nets

1 引言(Introduction)

在离散事件系统监控理论中, 广义互斥约束是要求Petri网的标识的加权和不超过某一上限的禁止状态控制规范:

$$w \cdot m \leq k. \quad (1)$$

其中: w 是库所集的权值函数, m 是网的标识, k (上界)是一个非负整数. 为了叙述方便, 本文提到的禁止状态问题默认为控制规范为广义互斥约束的禁止状态问题.

不可控变迁的存在极大地增加了在Petri网上禁止状态控制器综合的复杂性^[1]. Moody等^[2]和陈浩勋^[3]都利用关联矩阵给出了禁止状态监控器综合方法, 但是他们的方法设计的监控器无法保证总是最优的. Holloway等^[4]提出了称为路径代数法的监控器综合方法, 该方法能够利用Petri网图形化的优点, 往往能给出最优的监控器算法. 目前利用路

径代数法设计禁止状态监控器的研究已经在一些受限Petri网上取得了进展, 如环状事件图^[4]、事件图^[5]、状态机^[6]、无环网^[7]和序状Petri网^[8]等.

前向无同步前向无冲突网是本文引入的一种新的受限Petri网, 它不包含在事件图、状态机、无环网和事件图内, 具有较强的建模能力. 针对不可控影响子网为前向无同步前向无冲突网的广义互斥约束, 本文以显式的形式给出了最大允许控制策略的计算方法, 具有较高的计算效率.

2 前向无同步前向无冲突网(Forward synchronization and forward conflict free nets)

限于篇幅, 本文不再介绍Petri网及其监控理论的基本概念, 详细信息请参考文献[3].

定义1 前向无同步前向无冲突(forward synchronization and forward conflict free(FSFCF))网是每个变迁有且只有一个输入库所并且每个库所最多有

一个输入变迁的受限Petri网。

定理 1 π 是FSFCF网内的一条路径, 并且该路径的输入变迁和末尾节点分别是 t 和 p . 设当前标识为 m , 如果 t 始终不激发, 那么 p 能够获得的最大托肯数是 $m(\pi)$.

证 在FSFCF网内每个变迁有且只有一个输入库所, 因此 π 内的托肯可以流入库所 p , 即 p 可以获得 $m(\pi)$ 个托肯。

根据定义1可知, 路径 π 外的库所内的托肯必须通过 π 才能到达 p , 因此如果 t 不激发, 那么 p 最多可以获得 $m(\pi)$ 个托肯。

证毕。

定义 2 在一个Petri网内, 设路径 π_1 和 π_2 的全部共有节点组成了一条路径, 记做 π . 如果 π 的末尾节点是一个库所, 那么 π_1 和 π_2 按照方式1相交; 否则, π_1 和 π_2 按照方式2相交。

定义 3 给定一个FSFCF网内的两个库所 p_1 和 p_2 , 如果 1) 在网内存在一个环 c ; 2) $p_1 \in c$; 并且 3) $\exists t \in c, \pi : * \pi \in t^*, * \pi \not\subseteq c, \pi^* = p_2$, 那么 p_1 是 p_2 的源。

定理 2 在一个FSFCF网内, p_1 不是 p_2 和 p_3 的源, 设 π_1 和 π_2 分别是 p_1 到 p_2 和从 p_1 到 p_3 的路径, 当前标识下只有 p_1 被标识, 且 p_1 仅含有一个托肯. 那么 1) p_2 和 p_3 最多能够得到1个托肯; 2) 如果 π_1 和 π_2 按照方式1相交, 那么 p_2 和 p_3 无法同时被标识. 如果 π_1 和 π_2 按照方式2相交, 那么 p_2 和 p_3 可以同时被标识。

证 1) 根据FSFCF网的定义, 存在路径 $\pi(p_2)$ ($\pi(p_3)$), 它包含 $p_2(p_3)$ 的任意路径. p_1 不是 p_2 和 p_3 的源, 且网内只有 p_1 被标识, 因此根据定理1可知 p_2 和 p_3 最多能够得到1个托肯。

2) 根据FSFCF网的定义可知, p_1 内的托肯要到达 p_2 或 p_3 , 它必须流经路径 π_1 或 π_2 . p_1 不是 p_2 和 p_3 的源, 根据定义2可知, 如果 π_1 和 π_2 按照方式1相交, 那么 p_1 内的托肯在流经 π_1 和 π_2 时存在冲突, 因此 p_2 和 p_3 无法同时被标识; 如果 π_1 和 π_2 按照方式2相交, 那么 p_1 内的托肯同时流 π_1 和 π_2 , 因此 p_2 和 p_3 可以同时被标识。

证毕。

定义 4 给定一个Petri网 $\mathcal{N}$ 和它的库所集上的权值函数 $w : \mathcal{P} \rightarrow \mathbb{Z}$, 无源禁止库所集 H_w 是满足下列两个条件的库所 $p \in \mathcal{P}$ 的集合: 1) $w(p) > 0$; 2) 网内不存在 p 的源。

定义 5 给定一个FSFCF网 $(\mathcal{N}, m_0)$ 和它的库所集上的权值函数 $w : \mathcal{P} \rightarrow \mathbb{Z}$, H_w 是无源禁止库所集, 有效影响路径集 Π_w 是满足下列条件的集合:

- 1) $\forall \pi \in \Pi_w, \pi^* \in H_w$;

- 2) $\forall \pi_1, \pi_2 \in \Pi_w, \pi_1^* \neq \pi_2^*$;

- 3) $\forall m \in \mathcal{M}, \max_{m' \in R(m)} \sum_{p \in H_w} w(p) \cdot m'(p) = \sum_{\pi \in \Pi_w} m(\pi) \cdot w(\pi^*)$.

定义 6 给定一个FSFCF网 $\mathcal{N}$ 和一个库所集 H , 如果 $\pi := (t_1, p_1, \dots, t_n, p_n)$ 满足下列条件, 那么它是对应于 $\mathcal{N}$ 和 H 的一条计算路径:

- 1) $\exists p \in \bullet t_1 : |p^\bullet| > 1 \vee p \in H$;
- 2) $1 \leq i \leq n-1, p_i \notin H$, 并且如果 p_i 是分叉库所, 那么它包含在一个不可控环内;
- 3) $p_n \in H$.

定义 7 给定一个FSFCF网 $\mathcal{N}$ 和一个库所集 H , 设 p 满足下列条件, 那么它是对应于 $\mathcal{N}$ 和 H 的计算库所:

- 1) p 是分叉库所, 或者 $p \in H$;
- 2) 对于 p 的任意输出变迁 t , 以 t 为开始节点到 H 中任意库所的路径是关于 $\mathcal{N}$ 和 H 的计算路径;
- 3) 至少存在 p 的两个不同的输出变迁, 以它们为开始节点到 H 中库所的路径是关于 $\mathcal{N}$ 和 H 的计算路径。

给定 $\mathcal{N}$ 和任意库所集 H , 定义 Π_c^t 为开始节点为 t 的全部计算路径的集合, 定义 Π_c^p 为 p 的输出变迁为开始节点的全部计算路径的集合。

算法 1 有效影响路径集算法。

输入 一个Petri网 $\mathcal{N}$ 和一个库所集 H

- 1) 如果 $\mathcal{N}$ 不是FSFCF网, 那么算法退出;
- 2) 令 $\mathcal{N}' = \mathcal{N}, H' = H, \Pi = \phi$;
- 3) $\Delta \Pi = \phi$;
- 4) 任意选择一个对应于 $\mathcal{N}' := (\mathcal{P}', T', D^+, D^-)$ 和 H' 的一个计算库所 x ;

- 5) 设 $\mathcal{T}_x := \{t \in \mathcal{P}' | t \in x^\bullet\}$;

- 6) 设 $t_{\max}$ 是满足下列条件的一个变迁:

$$t_{\max} \in \mathcal{T}_x \wedge \sum_{\pi \in \Pi_c^{t_{\max}}} w(\pi^*) = \max_{t \in \mathcal{T}_x} \sum_{\pi \in \Pi_c^t} w(\pi^*);$$

- 7) 根据下式求解库所集 $\mathcal{P}_x$:

$$\mathcal{P}_x = \{p \in H' | \pi \in \bigcup_{t \in (\mathcal{T}_x - \{t_{\max}\})} \Pi_c^t, p = \pi^*\};$$

- 8) 对于 $\mathcal{P}_x$ 内的每一个库所, 将以该库所为末尾节点的对应于 $\mathcal{N}'$ 和 H' 的一条计算路径 π 添加到 $\Delta \Pi$ 内;

- 9) $\Pi = \Pi + \Delta \Pi$; 将 $\Delta \Pi$ 内的路径从 $\mathcal{N}'$ 上删掉, 从而得到一个新的Petri网 $\mathcal{N}''$;

- 10) $\mathcal{N}' = \mathcal{N}'', H' = H' - \mathcal{P}_x$;

- 11) 对应于 $\mathcal{N}'$ 和 H' , 如果不存在计算库所, 那么将以 H' 的库所为末尾节点的并且包含节点最多的路径添加到路径集 Π 内; 否则, 执行第3)步。

输出 库所集 Π 。

定理 3 给定Petri网 $\mathcal{N}$ 和一个广义互斥约束 (w, k) , 设无源禁止库所集是 H_w . 如果不可控影响子网 $\mathcal{N}_w$ 是一个FSFCF网, 那么将 $\mathcal{N}_w$ 和 H_w 代入算法1, 求得的库所集 Π 是有效影响路径集 Π_w .

证 在算法1中 $\mathcal{N}'$ 和 H' 是循环变量, 并且 $\mathcal{N}'$ 是 $\mathcal{N}_w$ 的子网, H' 是 H_w 的子集.

首先, 添加到 Π 内的路径的末尾节点都是 $\mathcal{N}_w$ 内的库所. 因此 Π 满足定义5的第1)个条件.

其次, 在算法1中, 每当一条路径添加到 Π 后, 该路径的末尾节点就会从 H' 内剔除掉. 因此 Π 满足定义5的第2)个条件.

最后, 设 p 是 H_w 内的任意一个库所, 根据定义1可知, 在 $\mathcal{N}_w$ 内包含在末尾节点为任意库所 p 任意路径内的节点都包含在一条路径内, 设该路径为 π_p . 因为 $\mathcal{N}_w$ 内不存在 p 的源, 根据定义1和定理1可知, 在 $\mathcal{N}_w$ 的演变中, p 能得到的最大托肯数是 π_p 中全部库所包含的托肯数之和. 而根据算法1, 添加到 Π 内的任意两条路径都不按照方式2相交. 进一步地根据定理2可知, Π 满足定义5的第3)个条件.

综上所述, 将 $\mathcal{N}_w$ 和 H_w 代入算法1, 求得的库所集 Π 是有效影响路径集 Π_w .

证毕.

定义 8 给定Petri网 $\mathcal{N}$ 和一个广义互斥约束 (w, k) , 如果不可控影响子网是FSFCF网, 那么有效权值函数 $\bar{w} : \mathcal{P} \rightarrow Z$ 定义如下:

$$\bar{w}(p) = \begin{cases} 0, & p \in \mathcal{P} - \mathcal{P}_w, \\ \infty, & p \in \mathcal{P}_s, \\ w(p'), & p \in \pi, \pi^* = p', \pi \in \Pi_w. \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\mathcal{P}_s$ 是禁止库所的源的集合, H_w 是无源禁止库所集, Π_w 有效影响路径集.

定理 4 给定Petri网 $(\mathcal{N}, m_0)$ 和一个广义互斥约束 (w, k) , 其中不可控影响子网为FSFCF网, 如果任意标识 $m \in R(m_0)$ 下 $u = U(m)$ 满足下列条件, 那么控制策略 U 是最大允许的:

$$\forall t \in \mathcal{T}_c : m[t] m' \wedge \bar{w} \cdot m' > k \Leftrightarrow u(c_t) = 0. \quad (3)$$

证 根据定义1和定义4可知, 一旦一个库所的源被标识, 那么该库所将可以得到无数个托肯. 因此, 根据定义5可知, 对于任意标识 m 下式成立:

$$\begin{aligned} & \max_{m' \in R(u_{\text{zero}}, m)} w \cdot m' = \\ & \sum_{p \in \mathcal{P}_s} \infty \cdot m(p) + \sum_{\pi \in \Pi_w} w(\pi^*) \cdot m(\pi). \end{aligned}$$

根据上式和定义8可知

$$\forall m \in R(m_0), \max_{m' \in R(u_{\text{zero}}, m)} w \cdot m' = \bar{w} \cdot m. \quad (4)$$

根据式(4)可知, $\bar{m} \cdot m \leq 0$ 是标识 m 为允许标识的

充要条件. 因此如果任意标识 $m \in R(m_0)$ 下 $u = U(m)$ 满足式(3)时, 控制策略 U 是最大允许的.

证毕.

3 示例(Example)

图1是文献[2]中一个制造系统中的基本单元的Petri网模型, 它由3部分组成: 输入缓存、车床和输出缓存. 其中 p_1 表示输入缓存区, 它的托肯表示待加工的工件; t_1 表示车床开始加工; 如果 p_2 被标识, 那么加工单元正在对一个工件进行加工操作; t_2 表示车床完成了一次加工, 库所 p_3 内的托肯表示输出缓存内的一个成品; t_3 表示车床发生故障; p_4 内的托肯表示输出缓存内的一个次品; p_5 被标识表示车床发生故障, 正在检修; p_6 和 p_7 分别代表成品的库房和次品的库房. 变迁 t_3 的激发代表加工单元发生故障, 因此它也是一个不可控变迁; 变迁 t_2 表示加工单元完成对工件的操作, 它也不是可控的.

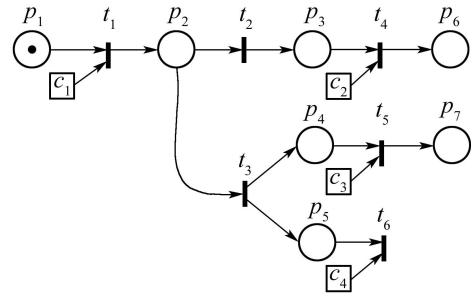


图1 一个不稳定的制造系统

Fig. 1 An unreliable manufacturing system

等待被搬运到库房的工件(成品或次)占用相同的缓存, 为了避免混淆, 需要保证 p_3 和 p_4 内的托肯数之和不大于1, 即要使得系统的行为满足下列广义互斥约束:

$$(w, k) : m(p_3) + m(p_4) \leq 1. \quad (5)$$

其中: $w = (0, 0, 1, 1, 0, 0, 0)$, $k = 1$. 下面根据本文的方法给出最大允许的监控器:

无源禁止库所集是 $H_w := \{p_3, p_4\}$. 将不可控影响子网 $\mathcal{N}_w$ 和 H_w 带入算法1求得有效影响路径集 $\Pi_w := \{(p_2, t_2, p_3), (t_3, p_4)\}$. 根据定义8, 得到有效权值函数 $\bar{w} := (0, 1, 1, 1, 0, 0, 0)$.

根据定理4可以求得最大允许的控制策略 U : 对于任意标识 m , $u := U(m)$ 满足下列条件:

$$\forall t \in \mathcal{T}_c :$$

$$m[t] m' \wedge m'(p_2) + m'(p_3) + m'(p_4) > 1$$

$$\Leftrightarrow u(c_t) = 0.$$

需要指出的是, 虽然文献[2]利用库所不变量法解决了该监控问题, 但是库所不变量法并不能保证在一般情况下给出的监控器是最优的, 而且没有给出库所不变量法能够给出最优监控器的应用范围.

而本文的方法保证对于不可控影响子网为FSFCF网的一类监控问题得到的监控器最优.

4 结论(Conclusion)

本文研究了不可控影响子网为前向无冲突前向无同步网上的广义互斥约束的实现问题. 前向无冲突前向无同步网可以描述冲突和后向同步, 因此它可以为一类广泛的离散事件系统建模. 本文在研究网性质的基础上, 以显式的形式给出了最大允许状态反馈控制策略的计算表达式. 需要指出的是, 该方法将存在不可控变迁的问题简化为变迁全部可控的问题, 从而彻底地解决了不可控变迁带来的计算复杂性问题.

参考文献(References):

- [1] RAMADGE R J, WONHAM W M. The control of discrete event systems[C]//*Proc of the IEEE*, 1989, 77(1): 81 – 97.
- [2] MOODY J O, ANTSAKLIS P J, LEMMON M. Feedback petri net control design in the presence of uncontrollable transitions[C]// *Proc of the 34th IEEE Conf on Decision and Control*. New Orleans, LA: [s.n.], 1995: 3104 – 3109.
- [3] CHEN Haoxun. Control synthesis of Petri nets based on S-decrease[J]. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Application*, 2000, 10(3): 233 – 249.
- [4] HOLLOWAY L E, KROGH B H. On closed-loop liveness of discrete-event systems under maximally permissive control[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(5): 692 – 697.
- [5] GHAFARI A, REZG N, XIE X. 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.
- [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(10): 1717 – 1731.
- [7] STREMERCH G, BOEL R K. Enforcing k-safeness in controlled state machine[C]//*Proc of the 38th IEEE Conf on Decision and Control*. Phoenix, Arizona: [s.n.], 1999: 1737 – 1741.
- [8] STREMERCH 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.
- [9] DONG Lida, WU Weimin, SU Hongye, et al. Normalized cascade structures and state feedback control logic synthesis[C]//*Proc of the 42nd IEEE Conf on Decision and Control*. Maui, Hawaii: [s.n.], 2003: 3203 – 3208.

作者简介:

罗继亮 (1977—), 男, 博士, 讲师, 从事离散事件系统监控理论和Petri网理论与应用等研究, E-mail: ljlg77@yahoo.com.cn;

吴维敏 (1970—), 男, 博士, 副教授, 从事离散事件系统、Petri网理论与应用、混杂系统等研究, E-mail: wmwu@iipc.zju.edu.cn;

董利达 (1970—), 男, 副教授, 从事离散事件系统研究, E-mail: lddong@iipc.zju.edu.cn;

苏宏业 (1969—), 男, 教授, 博士生导师, 从事时滞系统与非线性控制理论、鲁棒控制理论、离散事件系统建模、分析与综合等研究, E-mail: hysu@iipc.zju.edu.cn;

褚健 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事鲁棒控制理论、离散事件系统监控理论等研究, E-mail: chuj@iipc.zju.edu.cn.