

事件图的混合控制器设计

罗继亮^{1,2} 吴维敏² 苏宏业² 褚健²

摘要 指数级计算复杂性的可达性分析导致较大规模 Petri 网上的监控器设计非常困难. 为了解决这一问题, 本文给出了事件图上的混合型控制器设计方法: 首先得到了观测器的设计方法; 其次给出了根据观测器计算最大允许控制策略的算法. 结果表明, 该方法降低了需要观测的状态空间的维数, 从而提高了计算效率, 并且该方法不要求对象网是活的或有界的.

关键词 离散事件系统, 监控, Petri 网
中图分类号 TP271.8; TP18

Combined Controller Synthesis for Marked Graphs

LUO Ji-Liang^{1,2} WU Wei-Min² SU Hong-Ye² CHU Jian²

Abstract The exponential computation complexity of the state reachability analysis makes it difficult to apply forbidden state controller synthesis method to large plant nets. To solve this problem, a combined controller synthesis method is proposed for marked graphs. Firstly, the methods of designing observers are obtained. Secondly, the algorithm of calculating the maximally permissive control policy is proposed using the markings of the observers. The results show that the online computational efficiency of the controller is increased, because the state spaces to be observed is decreased in dimension number. Furthermore, the plant nets are not necessarily alive or bounded.

Key words Discrete event systems, supervisory control, Petri nets

1 引言

研究离散事件系统主要建模工具有: 自动机 (Automata)、形式语言 (Formalism) 和 Petri 网 (Petri nets). 由于图形化和并行的优点, Petri 网已经成为离散事件系统监控理论的主流工具, 禁止状态避免问题是离散事件系统上一类非常重要的控制目标, 它要求对象不能进入任意禁止状态.

文献 [1,2] 给出了安全且活的环状事件图上控制目标为禁止条件 (特殊的广义互斥约束) 的最大允许的监控器设计方法.

文献 [3] 将文献 [1,2] 的方法推广到包括事件图和状态机的一类 Petri 网, 但是将控制规范限制为满足前向路径条件和前向路径输入条件的禁止条件. 文献 [4] 指出文献 [3] 给出

的控制器过于复杂, 难于实时控制. 文献 [4] 给出了活的事件图上控制规范为广义互斥约束的控制器综合方法. 文献 [5] 采用线性整数规划方法给出了活的事件图的禁止状态控制器, 该控制器要求在线求解线性整数规划, 计算复杂性较高. 文献 [6] 提出了混合型的监控器设计方法, 在状态信息的提取上采用了结构型控制器的方法, 在计算控制策略时利用了逻辑型控制器的方法, 因而兼具逻辑型监控器和结构型监控器的优点. 但是由于对象网中既包含冲突又包含同步, 文献 [6] 设计的观测器子网仍然非常复杂, 很难应用于实时控制. 针对事件图上一类广义互斥约束问题, 本文给出了最大允许的混合型控制器算法. 由于得到的观测器子网仍然为事件图, 因此本文得到的观测器子网和控制器比文献 [6] 要简单得多. 并且该算法仅利用观测器的标识, 不必再提取对象网的状态信息, 可以在多项式时间内完成在线计算.

在求解任意标识的最大允许控制时, 需要完成下面三部分计算: 1) 求解每个禁止库所的最大不可控可达的标识; 2) 求解可控变迁能够激发的最大次数; 3) 根据前两部分的结果和事件图的性质求解最大允许控制. 利用文献 [4] 设计的控制器监控对象时, 上述三部分计算都是在线完成的, 即每当系统的状态改变时, 就要重复上述三部分计算. 本文利用观测器完成了前两部分计算: 库所观测器的标识等于其对应的禁止库所不可控可达的最大标识; 状态使能观测器的标识等于其对应的可控变迁的最大激发次数, 因此本文给出的控制器的在线计算只包括第三部分.

限于篇幅, 本文不再介绍 Petri 网禁止状态监控的基本概念, 详细信息请参阅文献 [3,4].

2 事件图的性质

本节将介绍事件图内托肯沿着路径流动的规律, 并根据这些规律给出计算一个库所最大标识的方法.

本文默认路径均起始于变迁终结于库所. 给定路径 π , 其始节点是它的输入变迁, 记做 ${}^t\pi$; 其终节点的输出变迁称为它的输出变迁, 记做 π^t ; 如果其终节点是库所 p , 则称 π 是 p 的一条路径, 记做 π_p . 一条路径的标识等于该路径内的库所包含的托肯数之和. 事件图中库所有且只有一个输入 (输出) 变迁, 因此我们用 ${}^t p (p^t)$ 表示库所 p 的输入 (输出) 变迁.

引理 1^[7]. 在事件图中, 环的标识始终不变.

引理 2. 给定事件图内的两条路径, 如果它们的输入变迁相同, 并且它们的输出变迁相同, 那么两条路径的标识之差始终不变.

证明. 给定事件图内的任意一条路径 π . 根据事件图的定义可知, 只有 π 内的变迁、 ${}^t\pi$ 及 π^t 和 π 内的库所相连, 因此只有 π 内的变迁、 ${}^t\pi$ 和 π^t 的激发才可能改变 π 内库所的标识. 而除了 ${}^t\pi$, π 内任意变迁的输入和输出库所都属于 π , 因此只有 ${}^t\pi$ 和 π^t 的激发才可能改变 π 的标识. 因此, 给定事件图内的两条路径, 如果它们的输入变迁相同, 并且它们的输出变迁相同, 那么它们的标识之差始终不变. \square

定义 1. 给定一个事件图 (\mathcal{N}, m_0) ,

1) 如果存在不可控环 c 和库所 p 的一条不可控路径 π , $m_0(c) = 0$, $c \cap \pi = \{{}^t\pi\}$, $p^t \notin \pi$, 那么 π 是 p 的一条限制路径.

2) 如果 c 是包含 p 的不可控环, 且它不包含 p 的任何限制路径, 那么 c 称为 p 的一条影响环.

3) 给定 p 的一条路径 π , 如果在 π 内只有 ${}^t\pi$ 是可控变迁, 并且 π 不包含 p 的任何限制路径或影响环, 那么 π 称为 p 的一条可控路径.

收稿日期 2004-6-23 收修改稿日期 2006-3-8
Received June 23, 2004; in revised form March 8, 2006
国家创新研究群体科学基金 (60421002), 浙江省自然科学基金 (Y104081), 福建省青年人才项目 (2006F3087), 华侨大学科研基金 (06BS212) 资助
Supported by National Creative Research Groups Science Foundation of China (60421002), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (Y104081), Fujian Provincial Youth Project (2006F3087), and Science Foundation of Huaqiao University (06BS212)
1. 华侨大学信息科学与工程学院, 泉州 362021 2. 工业控制技术国家重点实验室, 浙江大学, 先进控制研究所, 杭州 310027
1. Information Science and Engineering College of Huaqiao University, Quanzhou 362021 2. National Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Advanced Process Control, Zhejiang University, Yuquan Campus, Hangzhou 310027
DOI: 10.1360/aas-007-0218

定理 2. 给定事件图内的变迁 t , 任意标识下其使能因子等于其状态使能观测器的标识.

证明. 如果 $|\bullet t| = 1$, 那么 $\{p_t\} = \bullet t$. 根据 Petri 网变迁激发规则可知, 上述定理成立.

如果 $|\bullet t| > 1$, 设 $\bullet t = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$. 根据定义 4 可知变迁 t 的状态使能观测器的影响路径集为 $\Pi_i(p_t) := \{(f(p_1), t_e, p_t), (f(p_2), t_e, p_t), \dots, (f(p_n), t_e, p_t)\}$. 根据定理 1 和元变迁的定义可知, $m(p_t) = \min_{\pi \in \Pi_i(p_t)} m(\pi)$. 根据引理 2 可知, $\min_{p \in \bullet t} m(p) = \min_{\pi \in \Pi_i(p_t)} m(\pi)$. 因此 $m(p_t) = \min_{p \in \bullet t} m(p)$. \square

定义 6. 给定一个事件图 (\mathcal{N}, m_0) 和一个库所 p_x , 在网内按照下列规则添加库所集 \mathcal{P}' 内的库所、元变迁 t_e 和库所 p_{p_x} :

1) $\mathcal{P}' = g(\mathcal{T}_r(p_x))$, 其中 $\mathcal{T}_r(p_x)$ 是 p_x 的相关变迁集, g 是一个从 $\mathcal{T}_r(p_x)$ 到 \mathcal{P}' 的双射函数;

2) $\forall t \in \mathcal{T}_r(p_x), p = g(t) \in \mathcal{P}', {}^t p = t, p^t = t_e, m_0(p) = \min_{\pi \in \Pi_{p_x}^t} m_0(\pi)$, 其中 $\Pi_{p_x}^t$ 是以 t 和 p_x 为始节点和终节点的路径的集合, 那么 $p = g(t) \in \mathcal{P}'$ 是 $\Pi_{p_x}^t$ 的路径观测器;

3) $t_e^{\bullet} = \{p_{p_x}\}, p_{p_x}^t = p_x^t, m_0(p_{p_x}) = 0$, 那么 p_{p_x} 称为 p_x 的库所观测器;

4) 设 t 是 $\mathcal{T}_r(p_x)$ 内的任意一个变迁, $(t, g(t), t_e, p_x)$ 是 p_x 的一条观测路径, p_x 的所有观测路径组成的集合记做 $\Pi_o(p_x)$.

根据定义 6 在图 1 所示的事件图中设计和库所 p 相关的路径观测器和库所观测器, 如虚线部分所示, 即在网内添加库所集 \mathcal{P}' 、元变迁 t_e 和库所 p_{p_x} , 其中 g 是从 p 的相关变迁集 $\mathcal{T}_r(p)$ 到 \mathcal{P}' 的双射函数: $g(t_c) = p_{t_{c,p}}, g(t_o) = p_{t_{o,p}}, g(t_i) = p_{t_{i,p}}, g^{-1}(p_{t_{c,p}}) = t_c, g^{-1}(p_{t_{o,p}}) = t_o, g^{-1}(p_{t_{i,p}}) = t_i; {}^t p_{t_{c,p}} = t_c, {}^t p_{t_{o,p}} = t_o, {}^t p_{t_{i,p}} = t_i; p_{t_{c,p}}^t = p_{t_{o,p}}^t = p_{t_{i,p}}^t = t_e, t_e^{(p)} = p_p, {}^t p_p = t_e, p_p^t = p^t; m_0(p_{t_{c,p}}) = m_0(\pi_1), m_0(p_{t_{o,p}}) = m_0(\pi_2), m_0(p_{t_{i,p}}) = m_0(\pi_3)$. 那么 p_p 是 p 的库所观测器, $p_{t_{c,p}}$ 是路径 π_1 的路径观测器, $p_{t_{o,p}}$ 是路径 π_2 的路径观测器, $p_{t_{i,p}}$ 是路径 π_3 的路径观测器.

定理 3. 设 p_x 是受控事件图 $(\mathcal{N}, \mathcal{C}, \mathcal{B}, m_0)$ 内的库所, p_{p_x} 是 p_x 的库所观测器, 那么下列结论成立.

$$\forall m \in R(m_0), \max_{m' \in R(u_{\text{zero}}, m)} m'(p_x) = m(p_{p_x}) \quad (7)$$

证明. 根据定义 6 可知

$$\forall x \in \Pi_i(p_x), \exists y \in \Pi_o(p_x), {}^t \hat{x} = {}^t \hat{y}, x^t = y^t \quad (8)$$

同理可知

$$\forall x \in \Pi_o(p_x), \exists y \in \Pi_i(p_x), {}^t \hat{x} = {}^t \hat{y}, x^t = y^t \quad (9)$$

根据 (8)、(9) 和引理 2 可知

$$\forall m \in R(m_0), \min_{\pi \in \Pi_i(p_x)} m(\pi) = \min_{\pi \in \Pi_o(p_x)} m(\pi) \quad (10)$$

根据定理 1 和元变迁的定义可知:

$$\forall m \in R(m_0), m(p_{p_x}) = \min_{\pi \in \Pi_o(p_x)} m(\pi) \quad (11)$$

根据 (10) 和 (11) 可知

$$\forall m \in R(m_0), m(p_{p_x}) = \min_{\pi \in \Pi_i(p_x)} m(\pi) \quad (12)$$

根据定理 1 和 (12) 可推出 (7). \square

4 混合型监控器

利用观测器, 本节给出了在非并发假设下的受控事件图上实现广义互斥约束的方法, 广义互斥约束 (w, k) 要求系统的标识加权和不超过某一给定的上界, 即 $w \cdot m \leq k$, 其中 w 是库所集上的权值函数, k 是给定上界. 需要指出的是, 本文考虑的广义互斥约束满足前向路径条件^[3]: 任意禁止库所都不在其它禁止库所的影响路径内.

定理 4. 给定受控事件图系统 (\mathcal{N}, m_0) 和满足前向路径条件的广义互斥约束 (w, k) , 下列结论成立.

1) 一个标识 m 是允许标识的充要条件是

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} w(p) \cdot m(p_p) \leq k \quad (13)$$

其中, p_p 是库所 p 的库所观测器.

2) 最大允许的监控器存在的充要条件是

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} w(p) \cdot m_0(p_p) \leq k \quad (14)$$

其中, p_p 是库所 p 的库所观测器.

证明. 1) 广义互斥约束满足前向路径条件, 因此各禁止库所能够互不影响地得到它们的影响路径内的托肯. 根据定理 3 可知

$$\max_{m' \in R(u_{\text{zero}}, m)} w \cdot m' = \sum_{p \in \mathcal{P}} w(p) \cdot m(p_p) \quad (15)$$

根据式 (15) 可知, 当且仅当不等式 (13) 成立时, 系统无法由标识 m 不可控地演变到禁止标识, 即 m 是允许标识.

2) 因为当且仅当初始标识为允许标识时, 存在最大允许的监控器. 因此根据本定理的第一项可知, 最大允许监控器存在的充要条件为 (14) 成立. \square

算法 1. 事件图上的最大允许混合型监控器.

输入: 受控事件图 (\mathcal{N}, m_0) 和满足前向路径条件的广义互斥约束 (w, k) .

输出: 最大允许的控制策略 U .

1) 设禁止库所集为 $F := \{p \in \mathcal{P} | w(p) > 0\}$, 设计禁止库所对应的路径观测器和库所观测器;

2) 如果不等式 (14) 成立, 监控器存在, 执行下一步; 否则, 监控器不存在, 算法退出;

3) 令 $\mathcal{T}_r = \bigcup_{p \in F} \mathcal{T}_{cp}(p)$, $F(t) = \{p \in F | \exists \pi \in \Pi_i(p), {}^t \pi = t\}$; 令 $O_p(p)$ 标识库所对应的全部路径观测器的集合; $O_p(t, p)$ 是满足下列条件的路径观测器 o 的集合: $\exists \pi \in \Pi_o(p), {}^t \pi = t, o \in \pi$;

4) 为 \mathcal{T}_r 的每个变迁设计状态使能观测器;

5) 一旦系统状态演变到新的状态 m , 相应的控制 $u := U(m)$ 计算如下:

6) $\forall t \in \mathcal{T}_c - \mathcal{T}_r, u(c^t) = 1$

7) $\forall t \in \{t \in \mathcal{T}_r | m(p_t) \leq 0\}, u(c^t) = 1$;

8) 对于 $\mathcal{T}_r - \{t \in \mathcal{T}_r | m(p_t) \leq 0\}$ 的每个变迁 t , 计算如下:

8a) 定义从 $F(t)$ 到 $\{0, 1\}$ 的函数 h_t :

$$\forall p \in F(t), h_t(p) = \begin{cases} 1, & \prod_{p \in O_p(p) - O_p(t, p)} m(p) > 0 \\ 0, & \prod_{p \in O_p(p) - O_p(t, p)} m(p) = 0 \end{cases}$$

8b) 如果 $\sum_{p \in F} w(p) \cdot m(p) + \sum_{p \in F(t)} w(p) \cdot h_t(p) - \sum_{p \in \bullet t} w(p) \cdot m(p) \leq k$, 那么 $u(c^t) = 0$; 否则, $u(c^t) = 1$.

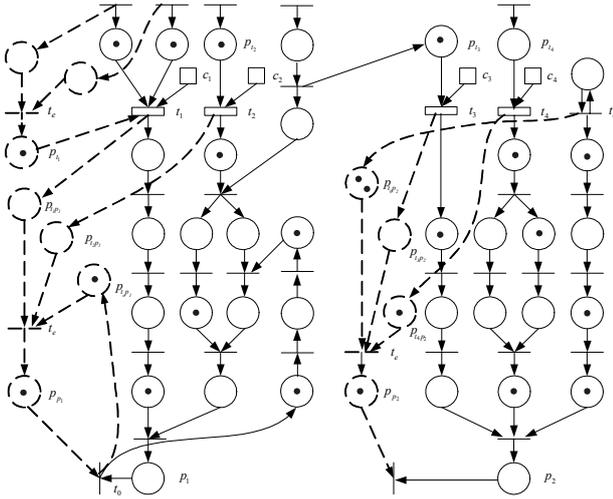


图 3 一个受控事件图
Fig. 3 An controlled mark graph

算法 1 的有效性可以根据定理 1 和定理 4 直接证明，限于篇幅，证明从略。

示例：在图 3 所示的事件图上实现广义互斥约束 (w, k) ： $w \cdot m = m(p_1) + 2 \cdot m(p_2) \leq 4$ 。

根据算法 1 给出该监控问题的最大允许控制策略的计算方法：

1) $F = \{p_1, p_2\}$ ，设计路径观测器和库所观测器： $p_{t_1 p_1}$ ， $p_{t_2 p_1}$ ， $p_{t_3 p_1}$ ， $p_{t_4 p_1}$ ， $p_{t_1 p_2}$ ， $p_{t_2 p_2}$ ， $p_{t_3 p_2}$ ， $p_{t_4 p_2}$ 和 p_{p_2} ；

2) $m_0(p_1) + 2 \cdot m_0(p_2) < 4$ ，监控器存在；

3) $\mathcal{T}_r = \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$ ， $F(t_1) = F(t_2) = \{p_1\}$ ， $F(t_3) = F(t_4) = \{p_2\}$ ， $O_p(p_1) = \{p_{t_1 p_1}, p_{t_2 p_1}, p_{t_3 p_1}\}$ ， $O_p(t_1, p_1) = \{p_{t_1 p_1}\}$ ， $O_p(t_2, p_1) = \{p_{t_2 p_1}\}$ ， $O_p(p_2) = \{p_{t_3 p_2}, p_{t_4 p_2}, p_{t_1 p_2}\}$ ， $O_p(t_3, p_2) = \{p_{t_3 p_2}\}$ ， $O_p(t_4, p_2) = \{p_{t_4 p_2}\}$ ；

4) 设计 \mathcal{T}_r 内变迁的状态使能观测器： p_{t_1} 、 p_{t_2} 、 p_{t_3} 和 p_{t_4} ；

5) 初始状态为当前状态，其对应的最大允许的控制 $u = U(m_0)$ 计算如下：

6) $m_0(p_{t_4}) = 0 \Rightarrow u(c_4) = 1$ ；

7) 求解 $\mathcal{T}_r - \{t \in \mathcal{T}_r | m(p_t) \leq 0\} = \{t_1, t_2, t_3\}$ 内关于任意变迁 t 的函数 h_t 。其中 $h_{t_1} : \{p_1\} \rightarrow \{0, 1\}$ ， $h_{t_1}(p_1) = 0$ ； $h_{t_2} : \{p_1\} \rightarrow \{0, 1\}$ ， $h_{t_2}(p_1) = 0$ ； $h_{t_3} : \{p_2\} \rightarrow \{0, 1\}$ ， $h_{t_3}(p_2) = 1$ ；

8) $\sum_{p \in F} w(p) \cdot m(p) + \sum_{p \in F(t_1)} w(p) \cdot h_{t_1}(p) - \sum_{p \in \bullet t_1} w(p) \cdot m(p) = 3 < 4 \Rightarrow u(c_1) = 1$ ， $\sum_{p \in F} w(p) \cdot m(p) + \sum_{p \in F(t_2)} w(p) \cdot h_{t_2}(p) - \sum_{p \in \bullet t_2} w(p) \cdot m(p) = 3 < 4 \Rightarrow u(c_2) = 1$ ， $\sum_{p \in F} w(p) \cdot m(p) + \sum_{p \in F(t_3)} w(p) \cdot h_{t_3}(p) - \sum_{p \in \bullet t_3} w(p) \cdot m(p) = 5 > 4 \Rightarrow u(c_3) = 0$ 。

那么，当前状态下的最大允许控制是 $u = (1, 1, 0, 1)^T$ 。

5 结论

设计 Petri 网禁止状态控制器，需要分析在某一控制下系统是否会不可控地进入禁止标识，这实质是一种可达性分析，而可达性分析的计算复杂性很高，因为系统的状态空间随网的规模指数级地增长。本文给出了观测器的设计方法，且仅利用这些观测器的标识就可以完成控制器算法所需的可

达性分析，观测器比对象网中的库所少得多，显然观测器技术有效地减小了设计控制器所需观测器的系统的状态空间，从而提高了控制器设计所需完成的可达性分析的计算效率。下一步要做的工作是继续研究事件图上其它禁止状态问题，例如死锁、广义互斥约束的逻辑与和逻辑或问题等。

References

- Holloway L E, Krogh B H. Synthesis of feedback control logic for a class of controlled Petri nets. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1990, **35**(5): 514~523
- Krogh B H, Holloway L E. Synthesis of feedback control logic for discrete manufacturing systems. *Automatica*, 1991, **27**(4): 641~651
- Holloway L E, Guan X, Zhang L. A generalization of state avoidance policies for controlled Petri nets. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, **41**(6): 804~816
- Ghaffari A, Rezg N, Xie Xiao-Lan. Feedback control logic for forbidden-state problems of marked graphs: application to a real manufacturing system. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, **48**(1): 18~29
- Darondeau Ph, Darondeau, Xie X. Linear control of live marked graphs. *Automatica*, 2003, **39**(3): 429~440
- Wu Wei-Min, Dong Li-Da, Wang Xiao, Su Hong-Ye, Chu Jian. Combined Petri net controller for discrete event systems. *Acta Automatica Sinica*, 2003, **29**(5): 681-688 (吴维敏, 董利达, 王肖, 苏宏业, 褚健. 离散事件系统的混合型监控系统设计. *自动化学报*, 2003, **29**(5): 681~688)
- Murata T. Petri nets: properties, analysis and application. *Proceedings of the IEEE*, 1989, **77**(4): 541~580
- David R, Alla H. Petri nets for modeling of dynamic systems - a survey. *Automatica*, 1994, **30**(2): 175-202

罗继亮 博士，华侨大学讲师，从事离散事件系统监控、Petri 网理论与应用等研究。E-mail: ljlg77@yahoo.com.cn, jlluo@hqu.edu.cn

(LUO Ji-Liang Received his Ph.D. degree in Department of Control Science and Engineering from Zhejiang University in 2006. He is currently a lecturer at Huaqiao University. His research interests include discrete event systems supervisory and Petri net theory and application.)

吴维敏 博士，浙江大学副教授，从事离散事件系统、Petri 网理论与应用、混杂系统等研究。本文通信作者。E-mail: wmwu@iipc.zju.edu.cn

(WU Wei-Min Received his Ph.D. degree in Department of Control Science and Engineering from Zhejiang University in 2002. He is currently an associate professor of Department of Control Science and Engineering at Zhejiang University. His research interests include discrete event systems, Petri net theory and application, and hybrid systems. Corresponding author of this paper.)

苏宏业 浙江大学教授，从事时滞系统与非线性系统控制理论、鲁棒控制理论、混杂系统、离散事件系统等研究。E-mail: hysu@iipc.zju.edu.cn

(SU Hong-Ye Professor of Department of Control Science and Engineering at Zhejiang University. His research interests include the control theory of time-delay systems and nonlinear systems, robust control theory, hybrid systems, and discrete event systems.)

褚健 浙江大学教授，从事时滞系统与非线性系统控制理论、鲁棒控制理论、混杂系统等研究。E-mail: chuj@iipc.zju.edu.cn

(CHU Jian Professor of Department of Control Science and Engineering at Zhejiang University. His research interests include the control theory of time-delay systems and nonlinear systems, robust control theory, and hybrid systems.)