

网简化技术在 Petri 网反馈控制器设计中的应用*

王寿光⁺, 颜钢锋, 蒋静坪

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

Application of Net Reduction to Feedback Controller Design of Petri Nets

WANG Shou-Guang⁺, YAN Gang-Feng, JIANG Jing-Ping

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

+Corresponding author: Phn: 86-571-87951637, E-mail: wsg5000@sina.com

<http://ee.zju.edu.cn>

Received 2002-09-03; Accepted 2002-10-22

Wang SG, Yan GF, Jiang JP. Application of net reduction to feedback controller design of Petri nets. *Journal of Software*, 2003,14(6):1037~1042.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1037.htm>

Abstract: The problem of constructing a Petri net feedback controller, which enforces the conjunction of a set of linear inequalities on the reachable marking of the plant modeled by Petri net, is discussed in this paper. A new net reduction——HMSNR (holding marking sum net reduction), is presented, which fuses all the constrained places into one place whose marking is equal to the sum of the markings of the constrained places. The net reduction eases design of controller and holds remarkable advantage especially for the systems with large scale. The method is proved to be simpler and more efficient than the method presented by Moody, et al., using an applied instance that is also used by Moody, et al.

Key words: Petri net; DES (discrete event system); net reduction; supervisory control

摘要: 针对基于 Petri 网离散事件系统库所标识不等式约束反馈控制器的设计问题,提出一项新型网简化技术——标识总量保持网简化技术,并利用此项技术把所有约束库所融合为一个与它们标识总量相等的库所,使控制器的设计更为简单,尤其是对规模较大的系统,其优势更加明显.借助一个应用实例,将该控制器设计方法与 Moody 等人提出的控制器设计方法作比较,表明所提出的控制器设计方法更简单、更有效.

关键词: Petri 网;离散事件系统;网简化技术;监控

中图法分类号: TP301 文献标识码: A

对基于 Petri 网 DES(discrete event system)的监控问题研究,其目的是要设计控制器保证系统的运行满足希望的性能,近十多年来已取得很大的进展,人们针对不同的问题采用不同方法.比较有影响的方法有 Holloway 和 Krogh 的基于受控 Petri 网的路径代数法^[1]、Li 与 Wonham 提出的向量离散事件系统方法^[2,3]和 Moody 等人提出的库所不变量方法^[4].本文提出的方法所针对的问题与 Moody 等人提出的方法所针对的问题相一致,都是有

* 第一作者简介: 王寿光(1977—),男,浙江温州人,博士生,主要研究领域为 Petri 网及其应用,离散事件系统,混合系统.

关库所标识约束问题,但本文提出的控制器设计方法采用局部设计,与 Moody 等人的方法考虑整个模型相比,在控制器的设计方面就简单多了,尤其对于一个规模很大的系统来说,其优势更加明显.本文第 4 节列举了一个实例,很好地说明了这个问题.

网简化技术是一项减少 Petri 网状态爆炸问题的最重要的技术之一.它的目标是减少 Petri 网模型的大小,而保持 Petri 网的一致性,如活性、安全性和有界性.这些技术在实际应用中都取得了比较满意的结果:文献[5]提出一种网简化技术简化实时系统的分析,文献[6]提出一种网简化技术评价柔性制造系统单元,文献[7]把网简化技术应用于通信协议的验证,文献[8]用网简化技术降低调度问题的计算复杂度.本文提出一种新型的网简化技术——标识总量保持网简化技术.本文提出的方法就是采用此项网简化技术把所有约束库所融合为一个与它们的标识总量相等的库所 p_e ,这样就把对约束库所标识的约束转换为对库所 p_e 的标识的约束,经过这样的变换之后,控制器设计就变为一件很简单的事情.

1 标识总量保持网简化

本文提出的标识总量保持网简化技术受到不变量保持技术的启发.不变量保持技术被包括 Berthomieu 在内的多位学者研究.对于有关 Petri 网的定义本文不再给出,可以参见文献[9].

不变量保持网简化技术是以求得不变量为主要目标的,而标识总量保持网简化技术把多个库所融合为一个库所 p_e ,它们的标识总量(即各个约束库所中的托肯数的加权之和)与 p_e 中的托肯数相等.下面给出把多个库所融合为一个库所的算法.

给定 Petri 网 Net,它有 n 个库所和 m 个变迁,它的关联矩阵^[9]为 $W=[w_{ij}]$ (其中 $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$),并假设 Net 中有 k 个约束库所 p_i (其中 $1 \leq i \leq k$),将 k 个约束库所 p_i 融合为一个与它们库所加权标识总量相等的库所 p_e ,即 $M(p_e) = \sum_{i=1}^k l_i M(p_i)$ (其中, l_i 是约束库所标识的加权系数,且为正整数; $M(p_i)$ 是库所 p_i 的托肯数).下面给出计算库所 p_e 的步骤.

步骤 1. 根据 Petri 模型写出它的关联矩阵:

$$W = \begin{matrix} & t_1 & t_2 & \dots & t_m \\ \begin{matrix} p_1 \\ \vdots \\ p_k \\ \vdots \\ p_n \end{matrix} & \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{k1} & w_{k2} & \dots & w_{km} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & w_{nm} \end{pmatrix} \end{matrix}.$$

步骤 2. 在关联矩阵 W 中,把所有约束库所 p_i (其中 $1 \leq i \leq k$)所对应的行合并为库所 p_e 所对应的行.

步骤 2.1. 在关联矩阵 W 中,添加与 p_e 对应的行,且此行中的元素初始化为 0.

步骤 2.2. 在关联矩阵 W 中,各个约束库所 p_i (其中 $1 \leq i \leq k$)所对应的行分别乘以它们各自的加权系数 l_i .

步骤 2.3. 把所有与约束库所对应的行分别累加到与 p_e 对应的行中.

步骤 2.4. 删除与约束库所对应的行,最后求得的关联矩阵为

$$W' = \begin{matrix} & t_1 & t_2 & \dots & t_m \\ \begin{matrix} p_e \\ p_{k+1} \\ p_{k+2} \\ \vdots \\ p_n \end{matrix} & \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^k l_i w_{i1} & \sum_{i=1}^k l_i w_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^k l_i w_{im} \\ w_{k+1,1} & w_{k+1,2} & \dots & w_{k+1,m} \\ w_{k+2,1} & w_{k+2,2} & \dots & w_{k+2,m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & w_{nm} \end{pmatrix} \end{matrix}.$$

步骤 3. 根据关联矩阵 W' ,便可求得约束库所的融合库所 p_e ,它的结构为

$$P_e = p_e \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & \dots & t_m \\ \sum_{i=1}^k l_i w_{i1} & \sum_{i=1}^k l_i w_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^k l_i w_{im} \end{bmatrix}^T. \quad (1)$$

设它的初始标识为

$$M_0(p_e) = \sum_{i=1}^k l_i M_0(p_i), \quad (2)$$

按上面的算法求得的库所 p_e 满足 $M(p_e) = \sum_{i=1}^k l_i M(p_i)$.

证明:已知 $M_0(p_e)[\alpha > M(p_e), M_0(p_i)[\alpha > M(p_i), \alpha$ 是把 M_0 变为 M 的变迁序列.根据可以把 $M_0[\alpha > M$ 写成等式 $M_0 + W \cdot U = M$ (其中 U 是变迁向量,对 Petri 网系统中的任何一个变迁 $t_i, U(t_i)$ 等于 t_i 在 α 中出现的次数),并将 W 和 U 数值代入,得到

$$\begin{aligned} M(p_e) &= M_0(p_e) + \sum_{i=1}^k U(t_i) l_i w_{i1} + \sum_{i=1}^k U(t_2) l_i w_{i2} + \dots + \sum_{i=1}^k U(t_m) l_i w_{im}, \\ M(p_1) &= M_0(p_1) + \sum_{i=1}^m U(t_i) w_{i1}, \\ M(p_2) &= M_0(p_2) + \sum_{i=1}^m U(t_i) w_{i2}, \\ &\dots \\ M(p_k) &= M_0(p_k) + \sum_{i=1}^m U(t_i) w_{ki}. \end{aligned}$$

由以上各式可得

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k l_i M(p_i) &= \sum_{i=1}^k l_i M_0(p_i) + l_1 \sum_{i=1}^m U(t_i) w_{i1} + l_2 \sum_{i=1}^m U(t_i) w_{i2} + \dots + l_k \sum_{i=1}^m U(t_i) w_{ki} \\ &= M_0(p_e) + \sum_{i=1}^k U(t_1) l_i w_{i1} + \sum_{i=1}^k U(t_2) l_i w_{i2} + \dots + \sum_{i=1}^k U(t_m) l_i w_{im} \\ &= M(p_e). \end{aligned}$$

命题得证. \square

从以上计算约束库所的融合库所 p_e 的过程中可以看出,计算库所 p_e 时只用到关联矩阵中与约束库所相关联的元素,所以在计算 p_e 时,只需考虑关联矩阵中与约束库所相关联的元素,写出与约束库所相关联的局部关联矩阵就足够了.

2 控制器的设计

当采用标识总量保持网简化技术把多个约束库所融合为 1 个库所之后,控制器的设计就变为了一件很简单的事情,针对系统的控制任务为

$$\sum_{i=1}^k l_i M(p_i) \leq b \quad (\text{其中 } b \text{ 为正整数})$$

的不等式约束.

在求得这 k 个约束库所的融合库所 p_e 的基础上,作 p_e 的补库所 p_c, p_c 便是我们要设计的控制器.由等式(1)可知,可得控制器库所 p_c 的结构为

$$P_c = p_c \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & \dots & t_m \\ -\sum_{i=1}^k l_i w_{i1} & -\sum_{i=1}^k l_i w_{i2} & \dots & -\sum_{i=1}^k l_i w_{im} \end{bmatrix}^T, \quad (3)$$

它的初始标识为

$$M_0(p_c) = b - M_0(p_e) = b - \sum_{i=1}^k l_i M_0(p_i). \tag{4}$$

针对系统的控制任务为

$$\sum_{i=1}^k l_i M(p_i) \geq b,$$

所求得的控制器的 p_c 与 p_e 的结构相同,即为

$$P_c = p_c \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & \dots & t_m \\ \sum_{i=1}^k l_i w_{i1} & \sum_{i=1}^k l_i w_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^k l_i w_{im} \end{bmatrix}^T, \tag{5}$$

它的初始标识为

$$M_0(p_c) = M_0(p_e) - b = \sum_{i=1}^k l_i M_0(p_i) - b. \tag{6}$$

例:考虑如图 1 所示的 Petri 网,它的初始标识为 $M_0=[M_0(p_1),M_0(p_2),M_0(p_3)]^T=[0,0,3]$.它的控制目标是要求库所 p_1 和 p_2 含有的托肯数在任何时候满足下面的不等式:

$$M(p_1)+2M(p_2) \leq 2,$$

它的关联矩阵为

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} t_1 & t_2 & t_3 & t_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}.$$

由式(3)得到控制器的结构为 $P_c=[-1,1,-1,2]^T$,由式(4)得到控制器的初始标识为 $M_0(p_c)=2-M_0(p_1)-M_0(p_2)=2$,最后求得受控 Petri 网如图 2 所示.

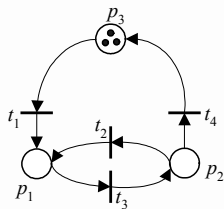


Fig.1 A Petri net model
图 1 一个 Petri 网模型

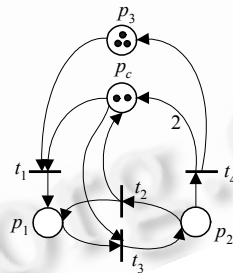


Fig.2 A Petri net model with controller
图 2 带有控制器的 Petri 网

3 自动导航车辆(AGV)协调系统实例

这个例子最初出现在文献[1]中,后被文献[3,4,10]引用,它的 Petri 网模型如图 3 所示.控制目标是在任何共享区中,保证最多只有一部车辆,即任何一个共享区中的所有库所的标识之和不应大于 1.用本文的方法设计出的控制器如图 4 所示,与文献[3]中得到的控制器一样.但用本文的方法不像文献[3]的方法那样要考虑整个 Petri 网模型,只需考虑与约束库所相关联的 Petri 网局部模型.所以对每一条不等式的约束,设计一个控制器,只需考虑与约束库所相关联的局部关联矩阵就足够了.我们以第 1 共享区为例,进行控制器的设计和说明.在第 1 共享区中,它的控制目标可以写成下面的不等式约束形式:

$$p_{11}+p_{12}+p_{13}+p_{14} \leq 1,$$

与这几个约束库所相关联的局部关联矩阵为

$$W_1 = \begin{matrix} & t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} & t_{15} & t_{16} & t_{17} & t_{18} \\ \begin{matrix} p_{11} \\ p_{12} \\ p_{13} \\ p_{14} \end{matrix} & \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}.$$

由式(3)得到控制器的结构为

$$P_{c1} = p_{c1}[1 \quad -1 \quad 1 \quad -1 \quad -1 \quad 1 \quad 1 \quad -1]^T,$$

由式(4)得到控制器的初始标识为

$$M_0(p_{c1})=1-M_0(p_{11})-M_0(p_{12})-M_0(p_{13})-M_0(p_{14})=1.$$

区 2-区 4 的控制器设计与区 1 的控制器设计类似,这里不再给出详细的设计过程,最后设计得到的受控系统如图 4 所示.

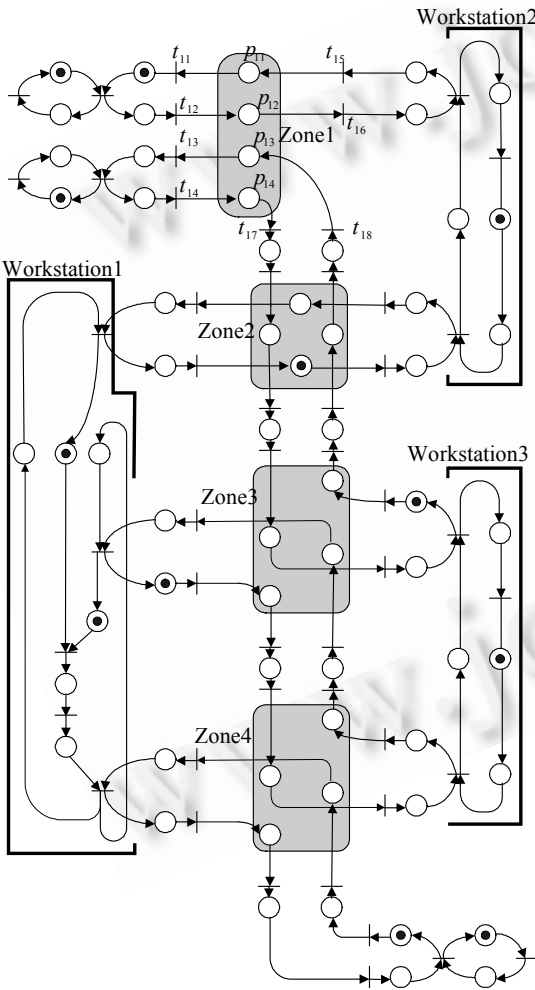


Fig.3 The automated guided vehicle Petri net

图 3 AGV Petri 网模型

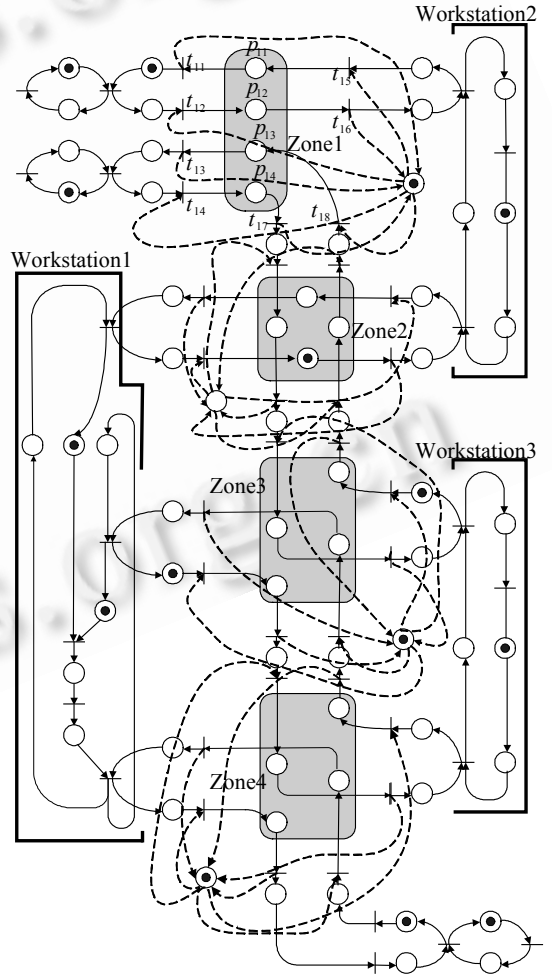


Fig.4 The controlled AGV Petri net

图 4 AGV 受控 Petri 网模型

4 总结

本文提出一种简单的 Petri 网反馈控制器设计方法.此方法先用 Petri 网的网简化技术把所有约束库所融合为一个与它们等价的库所 p_e .这样就将对约束库所标识的约束转换为对库所 p_e 的标识的约束,使控制器设计变为一件很简单的事情.本文提出的控制器设计方法比 Moody 等人提出的 Petri 网控制器设计方法^[3]更加简单、有效.对于复杂控制系统,其优势更加明显.如对于 AGV 协调系统,它的 Petri 网模型中有 64 个库所和 53 个变迁,在关联矩阵中有 64×53 个元素.如用文献[3]中的方法求解控制器,则对此关联矩阵进行运算,计算量可想而知,而用本文提出的方法,可以大幅度地减少计算量,每一条不等式的约束,只涉及 4 个库所和 8 个变迁,由它们构成的局面关联矩阵也只有 32 个元素.从这些数据来看,本文提出的方法与文献[3]中的方法相比,其计算量大为减少.

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是刘妹琴老师、吴维敏博士表示感谢.

References:

- [1] Holloway LE, Krogh BH. Synthesis of feedback logic for a class of controlled Petri nets. IEEE T-AC, 1990,35(5):514~523.
- [2] Li Y, Wonham WM. Control of vector discrete-event systems I—The base model. IEEE T-AC, 1993,38(8):1214~1227.
- [3] Li Y, Wonham WM. Control of vector discrete-event systems II—The base model. IEEE T-AC, 1994,39(3):512~531.
- [4] Yamalidou K, Moody JO, Lemmon MD, Antsaklis PJ. Feedback control of Petri nets based on place invariants. Automatica, 1996, 32(1):15~18.
- [5] Juan EYT, Tsai JJP, Murata T, Zhou Y. Reduction methods for real-time systems using delay time Petri nets. IEEE Transactions on Software Engineering, 2001,27(5):422~448.
- [6] Zhou M. Reduction of timed marked graphs and its applications to manufacturing systems. In: Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1994. 801~806. <http://intl.ieeexplore.ieee.org/Xplore/DynWel.jsp>.
- [7] LEE JK. Reduction rules of Petri nets for verification of the communication protocol. In: Proceedings of the IEEE Singapore International Conference on Information Engineering. 1995. 294~298. <http://intl.ieeexplore.ieee.org/Xplore/DynWel.jsp>.
- [8] Mugarza JC, Camus H, Gentina JC, Teruel E, Silva M. Reducing the computational complexity of scheduling problems in Petri nets by means of transformation rules. In: Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. 1998. 19~25. <http://intl.ieeexplore.ieee.org/Xplore/DynWel.jsp>.
- [9] Yuan CY. Petri Net Theory. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998 (in Chinese).
- [10] Krogh BH, Holloway LE. Synthesis of feedback logic for discrete manufacturing systems. Automatica, 1991,27(4):641~651.

附中文参考文献:

- [9] 袁崇义. Petri 网原理. 北京:电子工业出版社,1998.