

A Survey of Petri Nets Supervision Based on Place Invariants

Shouguang WANG¹, Junwen YU², Liangxu ZHAO³

College of Information and Electronic engineer, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, China

Email: wangshouguang@mail.zjgsu.edu.cn, yujunwen@pop.zjgsu.edu.cn

Abstract: Petri Net is one of the powerful tools for system analysis and description, which has been widely used for addressing the problems of modeling and supervising of Discrete Event Systems in recent years. Firstly, this article briefly introduces the theories on Discrete Event System Supervision, the developments and features of Petri Net and its advantages on Discrete Event System Supervision. Secondly, the related theories of Supervision on Petri Net, including constraint transitions, supervision based on path and supervision based on place-invariants, are stated. Finally, this article focuses on the supervision based on place invariants, which is one of the important features of Petri Net. Moreover, this article also reveals the developments and improvements of the supervising methods based on place invariants.

Keywords: Petri Net; place invariants; supervisory control

基于位置不变量的 Petri 网监控综述

王寿光¹, 喻均文², 赵良煦³

浙江工商大学信息与电子工程学院, 杭州, 中国, 310018

Email: wangshouguang@mail.zjgsu.edu.cn, yujunwen@pop.zjgsu.edu.cn

摘要: Petri 网是一种系统描述和分析的有力工具, 近年来被广泛地应用于解决离散事件系统建模以及监控问题。本文先简要的介绍离散事件系统监控理论, Petri 网的发展及其应用于离散事件系统监控的优势, 然后介绍 Petri 网监控的相关理论, 包括约束变迁、基于路径监控和基于位置不变量监控。最后对基于 Petri 网重要性质——位置不变量的监控进行了概述, 并叙述了基于位置不变量的相关监控方法的发展和完善。

关键词: Petri 网; 位置不变量; 监控

1 引言

离散事件系统是描述一类由不规则时间间隔出现的事件驱动的一种动态系统, 其名称最早由美国哈佛大学的何毓奇教授提出^[1]。“事件驱动”从本质上刻画了系统状态演变的原因, 因此离散事件系统是一类内涵广泛的动态系统。

离散事件系统监控理论起始于上世纪八十年代末加拿大多伦多大学的 Ramadge 和 Wonham 的开创性工作^[2], 他们的研究以自动机 (Finite State Machine, FSM) 和形式语言模型为主要的研究工具, 所获得的研究成果被称为 RW 理论^[3, 4]。RW 理论不考虑时间因素, 只是

考虑事件出现的先后顺序, 即解决逻辑层次的问题, 因此具有概念清晰、逻辑严谨和形式完美的优点。但是, RW 监控理论面临自动机模型导致的计算复杂性问题, 即状态空间爆炸问题。这种计算复杂性问题很大程度上是由自动机模型本身导致的, 因为自动机缺乏对离散事件系统的结构描述, 其孤立的状态没有揭示子系统间的关系, 这就使得自动机模型随对象规模呈指数级增长^[5], 从而导致计算复杂性太高, 难以实时应用。

相对于自动机, Petri 网更适合描述并发, 而且在计算效率方面表现出了优越的性能。根据自动机和 Petri 网的定义, 自动机的状态用一个节点 (位置或库所) 来表示, 而 Petri 网采用一组节点 (位置或库所) 来描述。在 Petri 网中每一个节点 (位置或库所) 对应一个子系统, 子系统之间的关系被描述为库所与变迁之间的拓扑

资助信息: 浙江工商大学青年人才基金项目“基于 Petri 网离散事件系统最优控制器的研究”; 浙江工商大学研究生科研创新基金项目“S3PR 网无死锁控制器设计”。

结构,那么系统的状态就可以描述为向量。在实时应用中,即使系统的状态空间很大,其 Petri 网模型仍然可以保持较小的规模。因此相对于自动机, Petri 网建模具有明显的效率优势,已经成为解决离散事件系统建模及监控问题的主要研究工具之一^[6-8]。

位置不变量(Place Invariants)是 Petri 网的一个重要性质,自从 Valette 等将其作为一个分析工具开始^[9-10],位置不变量已经普遍应用于对 Petri 网模型的分析,而基于位置不变量的监控(The supervision based on place invariants, SBPI)也成为 Petri 网监控的一种很有效的方法^[11]。

2 Petri 网监控理论

2.1 Petri 网用于离散事件系统的优势

上世纪 60 年代, C. A. Petri 博士在其博士论文^[12]中首次提出 Petri 网的概念,它适合于描述异步的、并发的计算机系统模型。Petri 网既有严格的数学表述方式,也有直观的图形表达方式。在逻辑层次上, Petri 网具有更高的语言复杂性、紧凑且图形化的状态空间表示、模块化的监控器综合能力^[13]。

通常认为离散事件系统最主要的特征如下所示:异步,顺序关系、并发性、非确定性、死锁、相互抑制等^[14]。现代社会中典型的离散事件系统有柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统、排队系统、物流系统、计算机操作系统、数据库管理系统、交通控制系统、通信网络系统、自动导航系统、军事指挥中的 C³I 系统等等。

实践证明 Petri 网理论是对离散事件系统建模与分析的最佳选择。一般认为,以 Petri 网作为工具来设计离散事件系统的监控器具有以下优势^[14]:(1)可简单准确地表示系统中的并发、资源共享、冲突、相互抑制以及非确定性等特征;(2)可以使用自顶而下和自底而上的设计方法,使系统具有不同的抽象层次成为可能;(3)从 Petri 网模型可以直接生成控制代码;(4)良好定义的语义能够为系统设计提供定性和定量的分析;(5)图形界面可以给出系统的直观视图;(6) Petri 网可用于系统设计的各个阶段,从系统建模、分析、仿真、确认、性能评价,到调度、控制和监控的整个过程。

2.2 基于 Petri 网的监控理论

2.2.1 监控的目的

基于 Petri 网的离散事件系统监控的基本目的是

设计控制器和控制策略去优化系统的全局性能^[15],使得系统不能进入特定的状态(通常这类问题称为禁止状态监控问题)或者能够按照预想的状态运行下去。在现代计算机和通信技术的支撑下,系统往往规模庞大、结构复杂,比如一个由 5 部车辆组成的自动导航车辆系统其 Petri 网模型的状态就达数百万之巨,而且存在不可控事件(无法禁止发生的事件。因此,系统的监控问题非常复杂^[16]。要使离散事件系统安全、稳定、连续运行并达到最优等性能指标,就需要强有力的监控器对系统进行监督和控制。

对应一个禁止状态监控问题, Petri 网的状态空间相应的可以分为不相交合法标识集和禁止标识集。禁止状态监控的任务就是:为 Petri 网设计监控器,利用监控器(监控算法)实时地禁止某些事件的激发从而避免系统到达禁止状态。如果一个监控器能够使得系统永远不进入禁止状态,那么它是允许的。如果一个允许的监控器每次只禁止最少的变迁激发,那么它是最大允许(最优)的。即对于每一个状态,使能的变迁集应该尽可能大。更多关于 Petri 网禁止状态的详细介绍可以参阅文献^[17]。

对于控制器,在具体的监控过程中首要的目的是保证系统能够正常工作,即必须避免危险的形势,比如禁止系统到达死锁状态(死锁是指两个或多个系统进程在执行过程中,因争夺系统资源而造成的一种互相等待的现象。死锁通常会造整个或部分系统的停顿,有时候可能产生重大的经济损失乃至灾难性的后果)。在实时应用中,为了控制系统,所设计的控制器必须有能力去避免确定变迁的发生,例如对于交通控制系统,将车辆作为确定的变迁,那么通过在十字路口设置交通灯,当显示红灯状态时即可避免确定车辆进入十字路。

2.2.1 基于 Petri 网的监控理论

基于 Petri 网的监控理论是由 RW 理论演化而来的,主要有以下四类方法:(1)基于受控 Petri 网(Controlled Petri Nets, CtlPN)的状态反馈方法^[16,18,19];

(2)基于标识 Petri 网(Labeled Petri Nets)的事件反馈方法^[20-23];(3)基于线性代数表示的矢量离散事件系统(Vector DES, VDES)方法^[24-26];(4)位置不变量方法^[27-29]。本文将重点概述基于位置不变量的监控方法。

针对 Petri 网监控中的禁止状态控制规范, Giua 等在文献^[30]中提出了广义互斥约束(Generalized Mu-

tual Exclusion Constraints, GMEC) : $L\mu \leq b$ (广义互斥约束在某些文献中也称为线性不等式约束), 其中 L 是一个整数常矢量, b 是一个整数。它是基于系统资源的有限性提出的, 要求网内各库所包含托肯数的加权和不超过某一上界。在系统中施加广义互斥约束则可以避免因资源有限而导致的冲突。虽然广义互斥约束无法表示全部的禁止状态控制规范, 但是广义互斥约束广泛的应用背景使得它一经提出就得到了极大的关注。目前禁止状态问题的研究多以广义互斥约束为控制规范, 例如化学反应过程^[31] (Yamalidou and Kantor), AVGs 的协调^[32] (Krogh and Holloway), 制造业约束^[33] (Moody and Antsaklis), 相互排斥的批处理问题^[34] (Tittus and Egardt) 等。而后 Iordache 和 Antsaklis 将广义互斥约束化为线性约束, 这方面的应用可以参阅文献^[35]。

Yamalidou 和 Giua 等则尝试描述任何关于安全 Petri 网的禁止标识规范^[24, 31]: 如果一个 Petri 网的所有可达标识都是二进制向量, 那么这个 Petri 网将是安全的。这个性质对于 Petri 网的特定子类的监控问题, 特别是对于标记图, 是很有意义的。

随后, Petri 网监控领域的很多重要的方法被提出, 比如对于 Petri 网禁止状态的监控可以通过基于路径的方法达到^[16]。此外, 基于监控的解决方案, 如基于位置不变量的监控也被提出, 具体可参阅文献^[30]。Li 和 Wonham 对文献^[2]中的 Petri 网监控理论提出了扩展 (标记 Petri 网执行语言)^[36]。本篇文章主要介绍基于位置不变量的 Petri 网监控理论, 而基于路径的 Petri 网监控理论的综述则可以参阅文献^[37]。

此外, 对于系统的最大允许状态, Krogh 和 Holloway 给出了最大允许状态反馈控制律存在的充分必要条件, 但该控制律也不是唯一确定的。针对这个问题, Takai 等在并发假设下给出了唯一确定的最大允许状态反馈控制律存在的充分必要条件。另一方面, Li 和 Wonham 指出, 在非并发假设下, 唯一确定的最大允许状态反馈控制律是存在的。他们把问题转化为运用一个不唯一确定的控制律来求得最大可达性。

3 基于位置不变量的 Petri 网监控

3.1 位置不变量简介

如果一个 Petri 网系统中有一些库所, 这些库所中托肯数的总和在任何可达标识下均为常数, 即在任何

可达标识下, 系统中库所的托肯加权和等于其初始标识下库所的托肯加权和, 那么这些库所就可以称作系统的位置不变量 (Petri 网中除位置不变量外还有变迁不变量, 可参阅文献^[38])。

位置不变量是由网的结构性质所决定的, 与初始标识无关。由于位置不变量对于任意动态进程允许网结构被独立研究, 因而成为分析 Petri 网以及对其设计监控器的重要途径^[39]。

3.2 基于位置不变量的 Petri 网监控

当系统完全可控时, Moody 在文献^[36]中提出用位置不变量法处理具有关于库所标识向量的线性不等式约束。此方法的基本思想是把线性不等式约束中的库所外加控制库所作为闭环控制系统期望的位置不变量。通过矩阵运算, 可获得 Petri 网反馈控制器的结构, 最后设计的 Petri 网反馈控制器是最大允许的。但由于这种方法实时应用时需要处理关联矩阵, 当关联矩阵是一个高维矩阵时, 书写和计算都将会很麻烦。

Giua, Moody, Antsaklis, Yamalidou 等提出基于文献^[36]中方法的改进。在 Petri 网相关文献中通常假设变迁不并发, 但是很多结果并不被这个设定所限制, 因此需要考虑到并发。假定一组变迁能够每隔几次被发射, 并且通过相同的发射序列发射的, 则对于变迁, 如果记录下其发射发射的次数, 那么通过一个不等式约束, 就可以在任何并发设定下禁止变迁的发生, 具体可以参阅文献^[37]。

Giua 等对 SBPI 的研究则集中于广义互斥约束的冗余, 等价的论述和建模规范能力, 以及对完全可控可观察的 Petri 网的执行力。他们还研究了怎样基于整型约束, 关联矩阵和初始状态去建造一个控制器并取得预期的效果, 具体可参阅文献^[30]。

Yamalidou 在^[40]中基于位置不变量考虑了包含标记和发生向量的线性约束, 并设计了仅包含库所和有向弧的控制器。文中还对安全的 Petri 网提出了一种简单的方法将其布尔表达式转换为广义互斥约束, 并验证这种方法实际可用且计算上具有高效性。

Moody 和 Antsakli 提供关于 SBPI 易于理解的陈述, 同时扩展了包含不可控变迁和不可观变迁的 Petri 网。基于 Moody 和 Antsakli 的工作, M. V. Iordache 和 P. J. Antsaklis 在文献^[11]中对部分可控和部分可观的 Petri 网设计了监控器的建造方法。具体为: 首先检查设计的监控器是否满足条件, 如果满足条件则监控器

是最佳的并且是可接纳的，反之，转变约束条件并针对新的约束条件设计控制器。文中还分别对单独可控和可观的变迁，标记 Petri 网和双重标记 Petri 网分别设计算法去建造控制器并用软件实现。

当系统是一个大而复杂的系统时，其关联矩阵往往是一个高维的矩阵，那么使用 Moody 在文献^[38]中的方法时，其计算有效性将大受影响。当系统大而复杂时，针对位置不变量方法计算效率的缺点，吴维敏、王寿光等人提出了有限容量库所法^[41-2]、标识总量保持网简化技术法^[43]。吴维敏等人利用有限容量库所的概念设计 Petri 网反馈控制器，使 Petri 网反馈控制器的计算效率比位置不变量方法有较大的提高，并且把有限容量库所方法运用到具有库所标识和变迁激发的混合约束的离散事件系统的 Petri 网反馈控制器设计中去^[42]，与现有的方法相比，所涉及的系统 and 约束更具一般性。王寿光等人^[43]提出的基于标识总量保持网简化技术的 Petri 网反馈控制器的设计方法，使 Petri 网反馈控制器的设计更为简单，尤其是对规模较大的系统，其优势更为明显。

基于文献^[36,44]，王寿光等人^[45]把 Iordache 等基于广义互斥约束扩展得到的不等式约束 ($Lu+Cv\leq b$ ，其中 $v: T\rightarrow Z$ 是一个 Parikh 向量) 转变为只包括 Parikh 向量的不等式约束 ($Cv\leq b$)，然后基于 Petri 库所是关于 Parikh 向量不等式约束的观点构造控制器。这种方法不需要对关联矩阵进行运算，就可以直接获得控制器。与 Iordache 等提出的 Petri 网控制器设计方法相比，在求解控制器时省去了 C-变换和 C-逆变换两个步骤，同时省去了中间模型，简化了 Petri 网模型，因此它更简单、有效。

4 总结

本文对 Petri 网监控理论作了详细的回顾，介绍了相关理论的发展和解决的问题，并着重对基于位置不变量的 Petri 网监控理论进行了概述。各种 Petri 网监控理论和相关算法都在不断的完善中，且每一种方法都有各自的优缺点。本文中概述的方法及其改进方法依然只能解决完全可控的离散事件系统的某些特殊问题，对于不完全可控系统的监控问题仍需要在未来进行深入的研究。

References (参考文献)

[1] Y. C. Ho and C. Cassandras, "Computing costate variable for discrete event systems," in Proc. of 1980 IEEE Int. Conf. on De-

cision and Control, pp. 690-700, 1980.

[2] R. J. Ramadge and W. M. Wonham, The control of discrete event systems, Proc. of the IEEE, 1989, 71(1): 81-98.

[3] R. J. Ramadge and W. M. Wonham, Supervisory control of a class of discrete event systems, SIAM J. Contr. Optimiz., 1987, 25(1): 206-230.

[4] R. J. Ramadge and W. M. Wonham, Modular feedback logic for discrete-event systems, SIAM J. Contr. Optimiz., 1987, 25(5):1202~1218.

[5] Gohari P, Wonham W M, On the complexity of supervisory control design in the RW framework [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B, 2000, 30(5):643—652.

[6] Jiang Changjun, PN Machine Theory on Discrete Event Dynamic Systems, Beijing, Science Press, 2000.
蒋昌俊, 离散事件动态系统的 PN 机理论, 北京, 科学出版社, 2000.

[7] Lin Chuang, Stochastic Petri nets and performance evaluation(Second Edition). Beijing, Tsinghua University Press, 2005.
林闯, 随机 Petri 网和系统性能评价 (第 2 版). 北京, 清华大学出版社, 2005.

[8] Zheng Dazhong, Zhao Qianchuan, Discrete Event Dynamic Systems. Beijing, Tsinghua University Press, 2001.
郑大钟, 赵千川, 离散事件动态系统. 北京, 清华大学出版社, 2001.

[9] Valette. R. (1986).Nets in production systems. In Advances in Petri Nets Part II - Petri Nets: Applications and Relations to Other Models of Concurrency, pp. 191-217. Lecture Notes in Computer Science, Vol.255, Springer-Verlag, Berlin.

[10] Valette. R. M. Courvoisier, H. Dommou, J.M. Bigou and C. Desclaux(1985). Putting Petri nets to work for controlling flexible manufacturing systems. In proc. ISCAS '85, Kyoto, pp. 929-932.

[11] M. V. Iordache and P. J. Antsaklis, "Supervision based on place invariants: A survey," Discrete Event Dynamic Systems, vol. 16, pp. 451-492, 2006.

[12] Petri C A. Kommunikation mit automaten. Institut fur Instrumentelle Mathematik, Schriften des IIM 2, Bonn, 1962.

[13] A. Giua. Petri net techniques for supervisory control of discrete event systems. In Proc. First International Workshop on Manufacturing and Petri Nets, pages 1-30, Osaka, Japan, June 1996.

[14] Li Zhiwu, Zhou Mengchu, Modeling, Analysis, and Deadlock Control of Automated Manufacturing Systems. Beijing, Science Press, 2009.
李志武, 周孟初, 自动制造系统建模、分析与死锁控制. 北京, 科学出版社, 2009.

[15] L. Ben Naoum, R. Boel, L. Bongaerts, B. De Schutter, Y. Peng, P. Valckenaers, J. Vandewalle, and V. Wertz, Methodologies for discrete event dynamic systems: A survey Journal A, vol. 36, no. 4, pp. 3{14, Dec. 1995.

[16] L. E. Holloway and B. H. Krogh. Synthesis of feedback control logic for a class of controlled petri nets. IEEE Transactions on Automatic Control, 35:514-523, May 1990.

[17] Krogh B (1987) Controlled Petri nets and maximally permissive feedback logic. In: Proc. 25th Annual Allerton conference, University of Illinois, Urbana, Illinois, pp317-326.

[18] B. H. Krogh and L. E. Holloway. Synthesis of feedback control logic for discrete manufacturing systems. Automatica, 27:642-651, April 1991.

[19] L. E. Holloway, X. Guan, and L. Zhang. A generalization of state avoidance policies for controlled petri nets. IEEE Transactions on Automatic Control, 41:804-816, June 1996.

[20] A. Giua and F. DiCesare. Supervisory design using petri nets. In Proc. of 30th IEEE Conf. on Decision and Control, pages 92-97, Brighton, UK, 1991.

[21] A. Giua and F. DiCesare. Blocking and controllability of petri nets in supervisory control. IEEE Transactions on Automatic Control, 39:818-823, April 1994.

[22] A. Giua and F. DiCesare. Petri net structural analysis for super-

- visory control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 10:185–195, April 1994.
- [23] R. Kumar and L. E. Holloway. Supervisory control of deterministic petri nets with regular specification languages. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 41:245–249, February 1996.
- [24] Y. Li and W. M. Wonham. Control of vector discrete-event systems i – the base model. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 38:1214–1227, August 1993.
- [25] Y. Li and W. M. Wonham. Control of vector discrete-event system ii – controller synthesis. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 39:512–531, March 1994.
- [26] Y. Li and W. M. Wonham. Concurrent vector discrete-event system. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 40:628–638, April 1995.
- [27] J. O. Moody and P. J. Antsaklis. *Supervisory Control of Discrete Event Systems Using Petri Nets*. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [28] M. V. Iordache and P. J. Antsaklis. Synthesis of supervisors enforcing general linear constraints in petri nets. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48:2036–2039, November 2003.
- [29] J. O. Moody and P. J. Antsaklis. Synthesis of supervisors enforcing general linear constraints in petri nets. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45:462–476, March 2000.
- [30] Giua A, DiCesare F, Silva M (1992) Generalized mutual exclusion constraints on nets with uncontrollable transitions. In: *Proc. IEEE international conference on systems, man and cybernetics*, Chicago, Illinois, pp 974–979.
- [31] Yamalidou E, Kantor J (1991) Modeling and optimal control of discrete-event chemical processes using Petri nets. *Comput Chem Eng* 15(7):503–519.
- [32] Krogh B, Holloway L (1991) Synthesis of feedback control logic for manufacturing systems. *Automatica* 27(4):641–651.
- [33] Moody J. O, Antsaklis PJ (1998) Supervisory control of discrete event systems using Petri nets, Kluwer, Boston, Massachusetts.
- [34] TittusM, Egardt B (1999) Hierarchical supervisory control for batch processes. *IEEE Trans Control Syst Technol* 7(5):542–554.
- [35] Iordache M, Antsaklis P (2003b) Synthesis of supervisors enforcing general linear vector constraints in Petri nets. *IEEE Trans Automat Contr* 48(11):2036–2039.
- [36] Moody J. O, Antsaklis P.J, Lemmon M. D. Petri Net Control Design in the Presence of Uncontrollable Transitions[A]. *Proc 34th IEEE Conf on Decision and Control [C]*. New Orleans Hilton Riverside New Orleans, Louisiana, USA, LA, 1:9.5-906.
- [37] Stremersch G (2001) *Supervision of Petri nets*. Kluwer, Boston, Massachusetts.
- [38] Reisig. W. (1985). *Petri Nets*, Springer-Verlag, Berlin.
- [39] Lautenbach. O. (1987). Linear algebraic techniques for place/transition nets. In *Advances in Petri Nets. Part I-Petri Nets: Central Models and Their Properties*, pp.142-167. *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 254, Springer-Verlag, Berlin.
- [40] Yamalidou E, Moody J. O, Antsaklis PJ, Lemmon MD (1996) Feedback control of Petri nets based on place invariants. *Automatica* 32(1):15–28.
- [41] Wu Weimin, Synthesis of Petri nets controller for discrete event systems. *Dissertation for the Doctor Degree of Zhejiang University. Zhejiang*, 2002.
吴维敏, 离散事件系统的 Petri 网控制器综合. 浙江大学博士学位论文, 浙江, 2002.
- [42] Ru Yu, Wu Weimin, Finite Capacity Place Method Based Deadlock Prevention Algorithm. *Journal of System Simulation*, 2003, 5:59-66.
茹雨, 吴维敏. 基于有限容量库所方法的死锁防止算法. *系统仿真学报*, 2003, 5:59-66.
- [43] Wang Shouguang, Yan Gangfeng, Jiang Jingping. Application of net reduction to feedback controller design of Petri nets[J]. *Journal of Software*, 2003, 14(6):1037-1042.
王寿光, 颜钢峰, 蒋静坪. 网简化技术在 Petri 网反馈控制器设计中的应用. *软件学报*, 2003, 14(6):1037-1042.
- [44] Iordache U V, Antsaklis P J, Synthesis of supervisors enforcing general linear constraints in Petri nets [J]. *IEEE T-AC*, 2003, 48(11):2036—2039.
- [45] Wang Shouguang, Yan Gangfeng, A method for the design of Petri net controller enforcing general linear constraints[J]. *Journal of Software*, 2005, 16 (3):419-426.