

基于MPC的可变相序交通信号优化控制方法

杨利红,王列伟

(中国电子科技集团公司第三十八研究所 合肥公共安全技术研究院,安徽 合肥 230000)

摘要:传统基于固定相序机制的道路交叉口信号控制算法的局限性较大,而使用可变相序信号控制方法则具有更多的优化空间。提出了一种基于混合Petri网的可变相序信号控制模型,该模型充分体现了Petri的特点,结构简单紧凑、直观易懂。基于该模型,交叉口交通信号的优化问题可以直接转化为模型中冲突解决策略的选择问题。使用基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的算法框架,采用滚动优化策略,基于当前系统状态以及整个信号周期内的预测状态设计优化目标函数,算法具有更好的动态适应性,从而达到交通信号的相序及绿灯通行时间的深度优化。以单交叉口4相位信号控制模型为例,使用基于MPC的可变相序优化控制方法,路口平均排队长度缩短了12%。

关键词:道路交叉口;Petri网;可变相序;模型预测控制;信号优化;仿真

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2018)08-0032-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2018.08.007

A Variable Phases Traffic Signal Optimal Control Method Based on MPC

YANG Li-hong, WANG Lie-wei

(The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation,
Hefei Research Institute of Public Safety Technology, Hefei 230000, China)

Abstract: The traditional road intersection signal control algorithm based on fixed phase sequence mechanism has great limitations, while there is a larger optimization space for variable-phases optimization algorithm. We propose a variable-phases traffic signal control model based on hybrid Petri nets, which fully embodies the Petri, and is compact and intuitive with simple structure. Based on this model, the optimization of intersection traffic signals can be directly translated into the choice of conflict resolution strategy. We use the algorithm framework based on MPC (model predictive control), with the rolling optimization strategy, and design the optimization objective function based on the current state of the system and the signal cycle prediction state. The algorithm has better dynamic adaptability, so as to achieve the deep optimization of traffic signal phase order and the green passage time. Taking the 4-phase signal control model of single intersection as an example, the average queue length of intersections is shortened by 12% using MPC-based variable phase order optimization control method.

Key words: traffic intersection; Petri nets; variable phases; MPC; signal optimization; simulation

0 引言

由路段、交叉口、部署在交叉口的交通信号灯,以及车辆和人的动态行为组成的城市道路交通网络系统可以被看成一类含有大量不确定性的复杂的离散事件系统。而城市道路交叉口信号系统的设计与优化是提高城市道路利用率、减少拥堵的关键。文中研究了基于Petri网的道路交叉口信号控制系统的建模及优化方法。

Petri网是一种常见的离散事件系统模型^[1]。Petri

网模型对动态系统中常见的并行(parallelism)、同步(synchronization)、资源共享(resource sharing)等特性具备强大表述能力,广泛应用于工业制造系统、软件系统设计、工作流、并行计算、交通系统等领域。近年来,使用Petri网对道路交叉口系统进行建模的方法受到学者的广泛关注,具有代表性的成果见文献[2-8]。其中文献[2-5]建立基于Petri网的微观交通模型,通过时延Petri网、随机Petri网、着色Petri网等结构,描述交叉口信号灯色的切换、车辆在道路上的移动速度

收稿日期:2017-10-13

修回日期:2018-02-28

网络出版时间:2018-04-28

基金项目:国家自然科学基金(61503352)

作者简介:杨利红(1985-),女,工程师,博士,研究方向为自动化控制、智能交通。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20180427.1626.018.html>

以及车辆在交叉口内可能的转向和路径选择等信息。系统仿真证明,通过这类模型可以较准确地计算出车辆排队长度以及车辆在交叉口的平均等待时间。文献[6-8]不以单个车辆作为建模对象,而是类似于连续时间系统(continuous-time system),主要以交通流量、车辆速度,以及车辆密度等作为描述对象,建立基于混合网结构的宏观交通模型。然而,上述这些交叉口建模及优化算法都是基于传统的交通信号固定相序逻辑,没有充分考虑车流到达的随机性、突发性等不规则的动态特征,优化空间有限。在文献[9-10]中,作者虽然考虑了基于可变相序的优化算法,但是优化函数大都是根据当前或者历史数据构造(例如通过当前的车辆排队长度、车辆停留时间、车辆通过时间等),而没有考虑系统状态的预测,对车流实时状态的适应性有待提高。

文中首先建立了基于混合 Petri 网的可变相序交通信号模型,并创新性地提出了一种基于 MPC(model predictive control,模型预测控制)^[11-12]的优化控制算法。根据 MPC 控制模型,该算法在每一个采样瞬间通过求解一个有限时域开环最优控制问题,获得在一个完整交通信号周期内的最优相序及绿灯通行时间,之后放行该最优解中的第一个相位,等到该放行相位结束后,再更新系统状态,并将当前状态作为最优控制问题的初始状态,求解下一个最优相序。

1 交通信号可变相序的 Petri 网模型

Petri 网有多种定义形式,其中应用比较广泛的是库所/变迁(place/transition)网。经典离散 Petri 网的形式化定义如下:

定义:一个 Petri 网系统是一个二元组 $\langle N, M_0 \rangle$, 其中 $N = \langle P, T, \text{Pre}, \text{Post} \rangle$ 是一个网状结构。(1) P 和 T 是不相交的,分别表示库所和变迁的有限集合;(2) $\text{Pre}, \text{Post} \in N^{|P| \times |T|}$ 是关联矩阵, N 表示非负整

数集合;(3) $M_0 \in N^{|P|}$ 是系统的初始状态。假设 $p_i, i = 1, 2, \dots, |P|$ 和 $t_j, j = 1, 2, \dots, |T|$ 分别表示库所和变迁,在 Petri 网模型图中通常用圆圈和矩形框表示。在关联矩阵中,如果 $\text{Pre}[i, j] > 0$,则在网系统中有一条从 p_i 指向 t_j 的弧,弧上的权重为 $\text{Pre}[i, j]$;在关联矩阵 Post 中,如果 $\text{Post}[i, j] > 0$,则在网系统中有一条从 t_j 指向 p_i 的弧,弧上的权重为 $\text{Post}[i, j]$ 。如果模型中的一条弧上不标明数字,则默认该条弧上的权重为 1。Petri 网的标识状态(又称为 marking)由分布在各个库所中的托肯(token)表示。系统的全局标识状态向量用 M 表示,非负整数 $M[p_i]$ 表示库所 p_i 中包含的托肯个数,也称为库所的标识。在系统状态 M 下,一个变迁被称为使能(enabled),当且仅当该变迁的输入库所中都包含有足够多的托肯,并使得式 1 成立。

$$\forall p_i \in *t_j, M[p_i] \geq \text{Pre}[i, j] \tag{1}$$

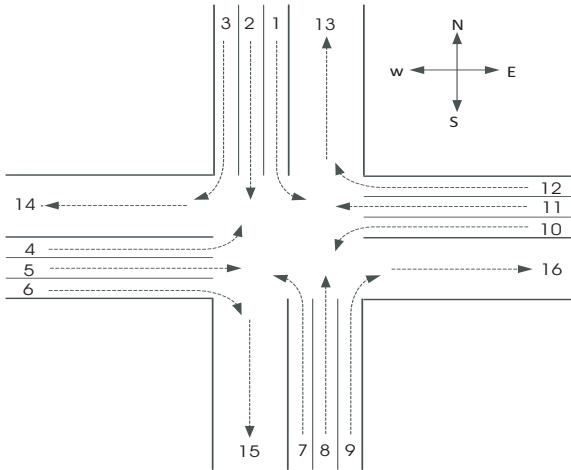
其中, $*t_j$ 表示变迁 t_j 的所有输入库所的集合。

当一个变迁使能时,该变迁具备触发(fire)条件,即系统中有足够的资源在其输入库所中。一个变迁触发后会将其输入库所中的资源(托肯)转移到其输出库所中。当一个或者多个变迁触发后,系统进入新的状态 M' ,并满足基本状态等式 2。

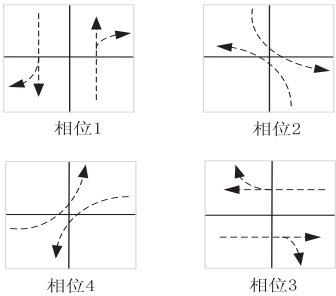
$$M' = M_0 + (\text{Post} - \text{Pre}) \cdot \sigma, M' \in N^{|P|}, \sigma \in N^{|T|} \tag{2}$$

其中, σ 为触发向量, $\sigma[j]$ 为系统从初始状态 M_0 进入状态 M' 的过程中,变迁 t_j 触发的次数。

道路交通系统模型可以大致划分为车流模型、交叉口模型,以及信号灯及其控制模型等部分。文中重点考虑交叉口及信号灯控制模型,对于非交叉口内的部分,只考虑进出交叉口的禁止车辆随意变道区域的车流模型。如图 1(a)所示的交叉口模型,4 个方向均为双向六车道,且每个方向进入交叉口车流分为直行、左转和右转。



(a) 交叉口车流示意图



相位	车流
1	2, 3, 8, 9
2	1, 7
3	5, 6, 11, 12
4	4, 10

(b) 4 相位信号控制方案

相位中的车流具有通行权。例如,如果库所 p_1 中含有托肯,则相位 1 中的车流 2、3、8、9 具备了通行权(见图 1)。库所 $p_{e1}, p_{e2}, p_{e3}, p_{e4}$ 用于确保在一个完整的信号周期内,任何一个相位都只能获得一次通行权,从而避免某个相位的车流长时间处于等待状态;在状态 M 下,如果 $M[p_{ei}] = 1$,表示在当前的信号周期内,相位 i

尚未获得过绿灯通行权,其中 $i = 1, 2, 3, 4$;只有当库所 p_0 和 p_{ei} 同时含有托肯时($M[p_{ei}] = M[p_0] = 1$),相位 i 才有机会获得绿灯通行权。库所 p_s 的作用是标识一个新的信号周期的开始。在文中的 4 相位交通信号控制模型中, $M[p_s] = 4$ 表示所有的相位都获得了一次通行权,信号控制系统将进入下一个信号周期。

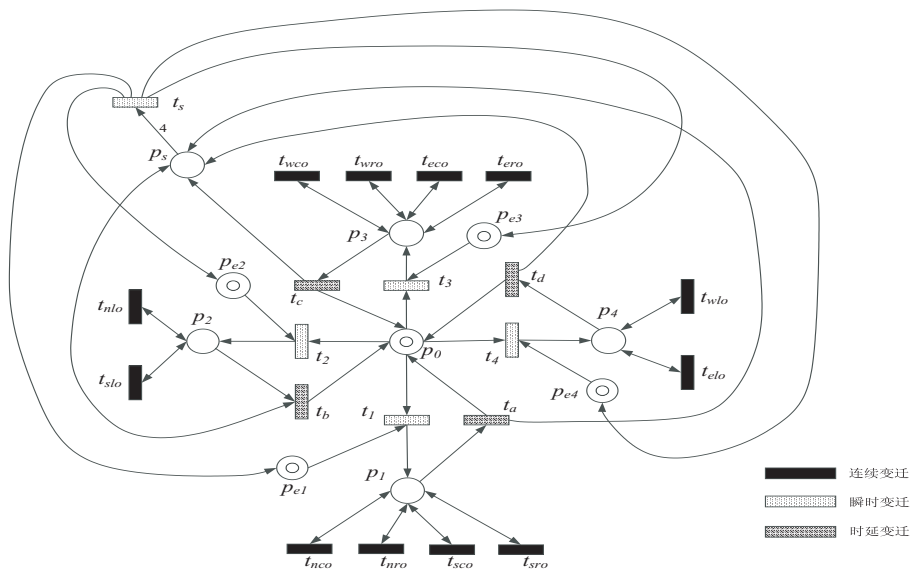


图2 交叉口4相位可变相序交通信号控制模型

变迁 t_1, t_2, t_3, t_4 为瞬时变迁(immediate transition),也就是假设其变迁触发时间为零。当瞬时变迁被使能时,立即完成触发并更新系统状态。变迁 t_a, t_b, t_c, t_d 为固定时延变迁(determined delay transition),每个变迁具有一个延迟时间,分别表示为 $\delta_a, \delta_b, \delta_c, \delta_d$ 。当一个固定时延变迁在时间点 τ 被使能,则经过其对应的时延 δ_i ,在时间点 $\tau + \delta_i$ 变迁 t_i 完成触发并更新系统状态。

在初始状态下, $M[p_{e1}] = M[p_{e2}] = M[p_{e3}] = M[p_{e4}] = M[p_0] = 1$,因此变迁 t_1, t_2, t_3, t_4 都被使能,这在 Petri 网模型中形成了一个典型的冲突关系;在对应的交通信号模型中,这意味着所有的相位都有机会在下一时刻获得绿灯通行权。因此, Petri 网模型中的冲突解决策略决定了信号系统的相序选择。例如,假设此时的冲突解决策略是变迁 t_1, t_2, t_3, t_4 的优先级依次降低。在初始状态,变迁 t_1 将优先获得触发,库所 p_0 和 p_{e1} 中的托肯被转移到 p_1 中,因此相位 1 对应的车流获得绿灯通行权,此时 t_a 被使能;经过时延 δ_a (相位 1 的绿灯通行时间)后,变迁 t_a 触发,库所 p_1 中的托肯重新转移到 p_0 中,同时库所 p_s 也获得一个托肯;注意,此时库所 p_{e1} 中的托肯被清空,因此变迁 t_1 不再使能,即在该周期内相位 1 不再获得通行权;根据优先级,下一时刻变迁 t_2 触发(相位 2 的车流获得通行权);当变迁 t_1, t_2, t_3, t_4 全部获得触发后,库所 $p_{e1}, p_{e2}, p_{e3}, p_{e4}$ 中的托肯全部被清空,库所 p_s 获得 4 个托肯,因此变迁 t_s 被使

能, t_s 触发后系统信号控制系统回到初始状态,意味着一个新的信号周期开始。

2 基于 MPC 的可变相序优化算法

预测模型的建立和滚动优化过程是 MPC 控制算法的核心。文中创新性地 将 MPC 算法框架应用到交通信号可变相序的优化问题中。

在任一个信号周期的起始时刻,以信号周期的总时长作为 MPC 模型的优化时间域,通过建立优化函数,求解在该信号周期内的最优相序策略;在获得当前时间点的相序及绿灯通行时间后,应用当前第一个相位的通行策略,直到该相位绿灯时长结束;之后在下一相位通行开始前,再滚动式地优化有限时域内的控制策略,获取下一个最优相位及其绿灯通行时间。需要注意的一点是,虽然与传统 MPC 算法类似,为了使得模型能够尽量细致地描述系统在整个时间域内的动态特征,从而取得较好的优化效果,在优化模型中采用了较小的步长(1 s)。但是由于每个相位的通行时间必须是连续的,因此在计算出当前采样时刻的最优控制策略后,采取的控制动作不以优化步长为单位,而以单个相位的通行绿灯时长为单位。

根据图 1、图 2 中的交通流及信号控制模型,求解最优相序的问题可以转换为求解变迁 t_1, t_2, t_3, t_4 的最优冲突解决策略问题。定义对角线矩阵 W 为冲突解决矩阵,其对角线元素的定义如下:

$$W_{(i,j)} = \begin{cases} 1 & t_j \in \Lambda \text{ 且的流具有通行} \\ 0 & t_j \in \Lambda \text{ 且的流不具有通行} \\ 1 & t_j \notin \Lambda \end{cases} \quad (5)$$

$$J(M^\tau, T) = \frac{\sum_{\delta=1}^T \sum_{p_i \in \psi} M^{\tau+\delta}[p_i]}{T} \quad (6)$$

其中, $\Lambda = \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$ 。

相序优化考虑的优化指标可以有多种, 比较常用的包括排队长度、车流通过率、车流停留时间等。在该算法中, 假设当前的采样时刻为 τ , 在一个完整信号周期 T 中, 交叉口内各方向车流平均排队长度构造相序优化的目标函数 J 为:

其中, $p_i \in \psi = \{p_{no}, p_{wo}, p_{eo}, p_{so}\}$; $M^{\tau+\delta}[p_i]$ 表示在时刻 $\tau + \delta$ 库所 p_i 对应队列的排队长度。

在每一个采样周期, 通过解决优化问题(见式 7), 求解在信号周期内的 T 个最优的冲突解决矩阵 $W^\tau, W^{\tau+1}, \dots, W^{\tau+T}$:

$$\min J(M^\tau, T)$$

$$\text{s. t. } M^{\tau+\delta+1} = M^{\tau+\delta} + \theta \cdot C \cdot W^{\tau+\delta}, \delta = 0, 1, \dots, T-1 \quad (a)$$

$$f_j^{\tau+\delta} = \lambda_j \cdot \text{enab}(t_j, M_j^{\tau+\delta}), \delta = 0, 1, \dots, T-1 \quad (b)$$

$$\forall \delta_1 < \delta < \delta_2, t_j \in \Lambda, \text{if } W_{(j,j)}^{\tau+\delta_1} = 0, \text{then } W_{(j,j)}^{\tau+\delta_1} \cdot W_{(j,j)}^{\tau+\delta_2} = 0 \quad (c)$$

$$\exists \delta_1 < \delta < \delta_2, W_{(j,j)}^{\tau+\delta_1} = 1, W_{(j,j)}^{\tau+\delta_2} = 1, \delta_2 - \delta_1 \geq G_{\min} \quad (d)$$

$$\forall \delta_1 < \delta < \delta_2, W_{(j,j)}^{\tau+\delta_1} = 1, W_{(j,j)}^{\tau+\delta_2} = 1, \delta_2 - \delta_1 \leq G_{\max} \quad (e)$$

$$T_i > 1, \sum T_i = T \quad (f)$$

其中, $M^{\tau+\delta}$ 为 Petri 网系统模型在采样时刻 $\tau + \delta$ 的状态; $f^{\tau+\delta}$ 为系统模型在采样时刻 $\tau + \delta$ 的各变迁的输出流向量; $W^{\tau+\delta}$ 为采样时 $\tau + \delta$ 的冲突解决矩阵。条件(a)中, θ 为采样时间间隔, 该算法中每秒采样一次并计算最优解, 即 $\theta = 1\text{ s}$; 条件(b)中的 $f_j^{\tau+\delta}$ 为变迁 t_j 在时刻的输出流; 条件(c)保证了每个相位绿灯时间的连续性, 也就是说任何相位都不可能在一个信号周期内多次获得通行权。通过条件(d)和(e)使得最优解中每个相位的绿灯通行时间都介于最小绿灯时间和最大绿灯时间之间; 条件(f)保证在任何一个信号周期中, 每个相位都能够获得通行权, 且总的信号时长等于信号周期 T 。

3 算法仿真及比较结果

针对图 1 中的 4 相位道路交通交叉口信号控制系统, 本节基于混合结构的 Petri 模型(交通流使用了连续时间 Petri 网, 其他采用离散时间 Petri 网), 分别使用固定相序模型以及图 2 所示的可变相序模型进行定量的仿真及比较分析。

对于车流模型, 假设变迁 t_i 对应的车流到达和离开时间的间隔都符合参数为 $\theta_i = 1/\lambda_i$ 的指数分布, 在连续模型中采用无限服务语义模型, 则变迁的触发速率为 λ_i 。假设在交叉口外, 每个车流方向不允许变道区域的最大排队长度限制为 20; 驶出交叉口的车流最大排队长度限制为 30(通过在模型中加入自环库所实现, 可参考文献[12,16])。

文中定量地比较了交叉口内各个车流队列的平均排队长度 L , 也就是模型中库所 $p_{no}, p_{wo}, p_{so}, p_{eo}$ 的平均托肯数量。实验中采用基于 Matlab 的 Petri 网仿真工具, 经过 100 次仿真后取平均值。 L 定义如下:

$$L_{p_i} = \frac{\sum_{j=1}^K \sum_{\tau=1}^T M_j^\tau[p_i]}{K}, L = \frac{\sum_{p_i \in \psi} L_{p_i}}{4} \quad (8)$$

其中, $K = 100$ 为仿真次数; $\psi = \{p_{no}, p_{wo}, p_{eo}, p_{so}\}$ 。

在固定相序的仿真方案中, 第 1 和第 3 相位的绿灯时间固定为 40 s, 第 2 和第 4 相位的绿灯时间固定为 25 s, 总信号周期 $T = 130\text{ s}$ 。假设交叉口各方向的车流到达及离开的分布满足表 1 中参数配置。

表 1 车流 Petri 网模型参数配置

变迁 t_i	$\theta_i = 1/\lambda_i$	变迁 t_i	$\theta_i = 1/\lambda_i$	变迁 t_i	$\theta_i = 1/\lambda_i$	变迁 t_i	$\theta_i = 1/\lambda_i$
t_{sci}	1	t_{wci}	2	t_{eci}	1	t_{nci}	2
t_{sco}	0.5	t_{wco}	0.5	t_{eco}	0.5	t_{nco}	0.5
t_{wli}	2	t_{nli}	3	t_{sli}	2	t_{eli}	3
t_{wlo}	0.5	t_{nlo}	0.5	t_{slo}	0.5	t_{elo}	0.5
t_{eri}	2	t_{sri}	3	t_{nri}	2	t_{wri}	3
t_{ero}	0.5	t_{sro}	0.5	t_{nro}	0.5	t_{wro}	0.5
t_{mro}	3	t_{eo}	3	t_{wo}	3	t_{so}	3

采用传统的固定相序信号控制策略,以及文中提出的可变相序模型和优化算法(两种方案采用的总信号周期相同),分别在 Matlab 下进行仿真,得到的仿真结果如表 2 所示。

表 2 仿真结果比较

相序模型	$T = 130$				L
	T_1	T_2	T_3	T_4	
固定相序	40	25	40	25	17.5
可变相序	46	18	49	17	15.4

从仿真结果中可以看出,使用可变相序模型以及基于 MPC 的相序优化算法,交叉口的平均排队长度优化了 12% (从 17.5 降到 15.4)。

4 结束语

道路交叉口交通信号的优化能够进一步提高车辆的通行效率以及道路资源的利用率,因此一直是交通系统控制与优化的热点问题,在智能交通迅速发展的今天尤其受到重视。针对传统固定相序交通信号控制机制的不足,提出了基于 Petri 网的可变相序控制模型,并结合 MPC 算法框架实现了相序与通行时间的优化。仿真结果表明,与传统固定相序算法相比,该算法能有效减少交叉口内各方向的平均排队长度,从而减少了拥堵。

参考文献:

[1] PETRI C A. Communication with automata[D]. Germany: University of Bonn,1962.

[2] FEBBRARO A D, SACCO N, GIGLIO D. On using Petri nets for representing and controlling signalized urban areas; new model and results[C]//12th international conference on intelligent transportation systems. St. Louis, MO, USA: IEEE,2009;1-8.

[3] 张四平,余 维,王 梅. 一类模糊混合 Petri 网的交通信号灯实时控制[J]. 科学技术与工程,2013,13(20):5867-5871.

[4] 安毅生,雷 甜,袁绍欣,等. 基于 TCPN 的交叉口信号控制模型与优化[J]. 计算机应用研究,2016,33(1):194-198.

[5] 顾鸿儒,孙连坤. 基于层次颜色 Petri 网的交通紧急调度算法与建模[J]. 计算机工程与应用,2016,52(16):261-270.

[6] KUTIL M,HANZALEK Z. Light controlled intersection model based on the continuous Petri net[J]. IFAC Proceedings Volumes,2009,42(15):519-525.

[7] 牟海波,俞建宁,刘林忠. 基于混合 Petri 网的单点信号优化感应控制[J]. 中南大学学报:自然科学版,2015,46(7):2727-2734.

[8] VAZQUEZ R,SUTARTO H Y,BOEL R,et al. Hybrid Petri net model of a traffic intersection in an urban network[C]//IEEE international conference on control applications. Yokohama, Japan:IEEE,2010:658-664.

[9] 赵忠杰,刘小强,谢光秋. 单交通路口变相位变周期信号控制[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(6):70-72.

[10] 牟海波,俞建宁,刘林忠. 基于 Petri 网的城市主干道交通信号协调优化[J]. 交通运输工程学报,2013,13(2):106-113.

[11] MACIEJOWSKI J M. Predictive control with constraints[M]. Englewood Cliffs,NJ:Prentice-Hall,2002.

[12] MAHULEA C,GIUA A,RECALDE L,et al. Optimal model predictive control of timed continuous Petri nets[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,2008,53(7):1731-1735.

[13] 岳 昊,吴哲辉. 基于混合 Petri 网的城市交通网络建模与仿真[J]. 系统仿真学报,2009,21(19):6239-6245.

[14] SILVA M,JULVEZ J,MAHULEA C,et al. On fluidization of discrete event models;observation and control of continuous Petri nets[J]. Discrete Event Dynamic Systems:Theory and Applications,2011,21(4):427-497.

[15] SILVA M,RECALDE L. On fluidification of Petri net models;from discrete to hybrid and continuous models[J]. Annual Reviews in Control,2004,28(2):253-266.

[16] DAVID R,ALLA H. Discrete,continuous and hybrid Petri nets[M]. Berlin:Springer,2004.