

基于时延 Petri 网建模的主从自适应协调控制方法

孙莉^{1,2} 章昭辉^{1,2,3} 崔相如^{1,2}

(安徽师范大学计算机科学与技术系 芜湖 241000)¹ (安徽师范大学高性能计算研究中心 芜湖 241000)²
(同济大学嵌入式系统与服务计算教育部重点实验室 上海 200092)³

摘要 为了保证城市道路“绿波带”的通行效率,合理协调主从道路的车流量,通过利用时延 Petri 网建模,提出了一种主从自适应协调控制方法。该方法可以根据干线主路口的车流量自动调整其相位时间,也可根据主路口的相位及车流量自动协调变换从路口的相位时间。通过案例分析,该方法可以有效实现主从路口的自适应协调控制,在保证绿波带畅通的同时,使通过支路的车辆数尽可能大,有助于提高交叉口的通行效率。

关键词 协调控制,绿波带,时延 Petri 网,自适应控制

中图分类号 TP273+.2

文献标识码 A

DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.07.014

Method of Main and Branch Road Adaptive Coordinate Control on Timed Petri Net Modeling

SUN Li^{1,2} ZHANG Zhao-hui^{1,2,3} CUI Xiang-ru^{1,2}

(Department of Computer Science & Technology, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)¹

(Research Center of High Performance Computing, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)²

(The Key Laboratory of Embedded System and Service Computing of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)³

Abstract In order to keep the high efficient access rate of the green wave and coordinate the reasonable traffic flows of the main road and the branch road, a method of main and branch road adaptive coordinate control on timed Petri net modeling was presented. According to the traffic flows of the main road, this method can change the phase time automatically. According to the phase time and the traffic flows of the main road, this method can also change the phase time of the branch road automatically. By analyzing this case, this method can achieve the adaptive coordinate control of the main road and the branch road effectively. Then, it makes the number of vehicles in the branch road passing the intersection as large as possible, and it can guarantee the smooth flow of the green wave band. Thus the method can improve the access efficiency of the intersections.

Keywords Coordinate control, Green wave band, Timed Petri net, Adaptive control

1 引言

随着社会经济和城市交通的发展,城市的规模不断扩大,交通变得更加复杂,红绿灯成为了疏导交通常用的手段。在城市交通网中,当主次干道的交叉口都设置了单点信号控制灯时,车辆经常会遇到红灯、堵车,造成交通不便。为了缓解车辆在交叉口的延误,目前已经设计出了“绿波带”^[1],就是将一条干线上的各个相邻的信号灯彼此连接起来,进行协调控制,使车流通过交叉口时,正好遇到“绿灯”。但目前的研究主要是针对干线的协调控制^[1-3],对支线的研究很少,尤其是支线的拥堵会对绿波干线造成很大的干扰。本文根据干线路口的车流量(除干线直行及右转的车流量外),协调控制干线支线的信号灯,使得从路口信号灯相位转换能够自适应主路口进入从路口的车流量,从而保证干线路口畅通。

2 相关工作

文献[1]基于 Petri 网设计了一种应答式交通信号灯,通

过相邻信号灯的联系方式,提前给出道路的信息,使车辆能选择出行的道路,避免在红绿灯前排长队。文献[2]采用混合 Petri 网,通过控制红绿灯改善交通流。文献[4]基于时间颜色 Petri 网建立了信号灯系统,并实现了 5 个十字路口的协同控制。文献[6]提出了基于多尺度融合的仿真系统,从宏观、中观、微观 3 个尺度运用相应的算法进行融合,对城市交通路网系统进行设计。文献[7]主要分析了路网的交通流和车辆密度,从单一的交叉口分析扩展到分析两个交叉口,最后分析整个城市的交通控制系统。文献[9,13]是对绿波带宽的优化,文献[9]设计双向带宽的最大化模型,可以在保证总带宽最大化的情况下,根据需求按比例分配带宽。文献[11]建立了通用干道双向绿波协调控制模型,并利用混合整数线性规划方法实现了控制模型的优化求解。文献[14]则设计了一种代数方法来进行干线信号协调控制的优化。目前这些技术大多是干线协调控制优化的前沿技术,但是仅仅考虑干线协调控制不能完全满足城市交通控制的需要。

收稿日期:2013-04-10 返修日期:2013-05-15 本文受同济大学嵌入式系统与服务计算教育部重点实验室开放课题(2012)资助。

孙莉(1989-),女,硕士生,主要研究方向为服务计算、智能交通;章昭辉(1971-),男,教授,硕士生导师,CCF 会员,主要研究方向为网络计算、服务计算、智能交通,E-mail:zhzhang@163.com;崔相如(1987-),男,硕士生,主要研究方向为服务计算、智能交通。

3 时延 Petri 网建模和控制方法设计

3.1 问题描述

如图 1 所示,南北方向即 ABE 方向为绿波控制的干线方向,C、D 两点是和 A 相邻的两个支线信号灯,C、D 两点不处在任何绿波带上。通过协调控制 C 点和 A 点、D 点和 A 点的信号灯,使得从 BA、EA 方向左转转向 C、D 的车流能够顺利通过 A 而不至于在 A 处堵塞,从而保证绿波带的通畅。

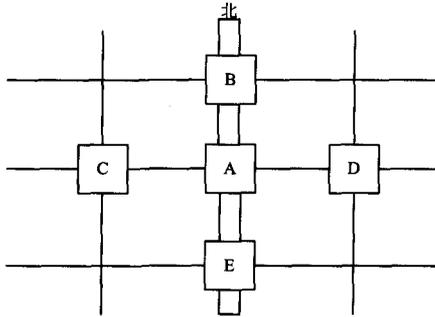


图 1 交通协调控制图

3.2 基于时延 Petri 网的控制与建模

信号相位就是指在一个交叉口,某个方向或几个方向的车流得到通行权。当一个信号灯有 m 个信号相位时,就称其为 m 相位信号灯。本文中,以十字形路口为研究对象。干线上的信号灯是四相位信号灯,支线上信号灯为了协调车流量,在四相位的基础上,添加一个新的相位构成五相位信号灯。因为黄灯也可以通车,所以将黄灯时间折算到绿灯时间内,不再单独考虑。本文重点考虑图 1 中 C 与 A 的协同,D 与 A 的协同和 C 与 A 一样。图 2 为主路口 A 各相位变换控制图,图 3 为从路口 C 各相位变换控制图。

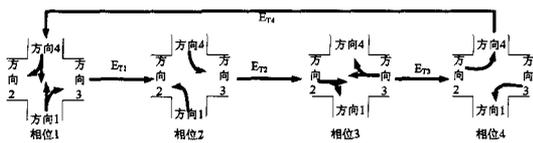


图 2 主路口 A 各相位变换控制图

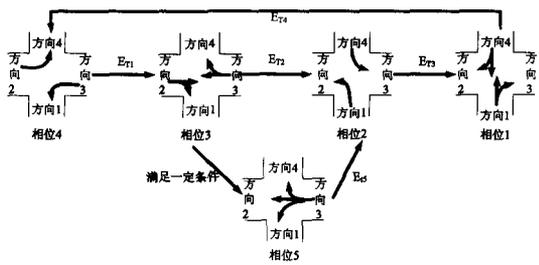


图 3 从路口 C 各相位变换控制图

根据时延 Petri 网的定义^[5],建立如图 4 所示的干线与支线的时延 Petri 网协调控制模型。图 4 中的符号含义如表 1 所列。如图 2、图 3 所示,只有当从路口处于第四相位时,从路口才没有驶向主干路口的车辆,所以初始状态可以定义为,主路口为第一相位,从路口为第四相位。正常情况下,主路口经过时间 E_{T1} 、 E_{T2} 、 E_{T3} 、 E_{T4} 后, T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别触发,相位经由主路口第一相位到第二相位到第三相位到第四相位,最终回到第一相位;从路口经过 t_3 、 t_2 、 t_1 、 t_4 分别触发,相位由从路口第四相位到第三相位到第二相位到第一相位,最终回到第四相位。

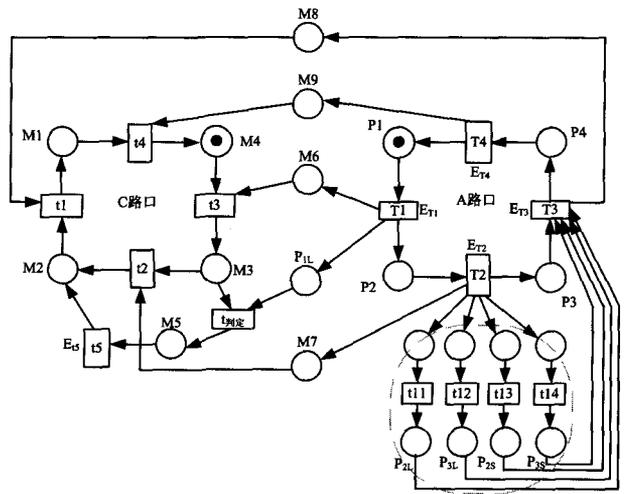


图 4 协调控制时延 Petri 网模型

表 1 时延 Petri 网模型各符号含义

P_1-P_4	主路口的 4 个信号灯相位	P_{1L}	从主路口 A 左转驶向从路口 C 的车辆
T_1-T_4	主路口 4 个信号灯相位绿灯触发时延变迁	$t_{11}-t_{14}$	探测器停止计数
M_1-M_5	从路口的 5 个信号灯相位	$t_{判定}$	一个变迁函数,用于判定条件符合与否
t_1-t_4	从路口前 4 个信号灯相位绿灯触发即时变迁	E_{i5}	从路口相位 5 绿灯持续时间
P_{2S} 、 P_{3S}	从方向 2、3 驶来的即将直行(右转)的车流	$E_{T1}-E_{T4}$	主路口各变迁触发需要的间隔时间
P_{2L} 、 P_{3L}	从方向 2、3 驶来的即将左转的车流	M_6-M_9	主路口发给从路口的一个消息,通知从路口可以触发的条件

特殊情况下,当从 EA 方向左转驶向 C 的车流量较大,有可能导致 A 点堵塞时,从路口 C 转到第五相位,释放车流量,当车辆恢复平衡后,从路口回到正常相位变化情况。

主路口 A 的相位 P_1 和相位 P_2 控制干线方向的车流放行,相位 P_3 和相位 P_4 控制支线方向的车流放行。主从路口保持相位周期一致,从路口的相位变换由主路口决定。 $t_{判定}$ 是一个判定变迁,用于判定在 AC 路段中排队等待的车加上从 A 路口 EA 方向左转驶向 C 路口的车,二者的总和是否接近 AC 路段的总长度,当接近总长度并达到设定的阈值时,条件满足, $t_{判定}$ 触发;若得到的车辆排队总长度没有达到设定的阈值,从路口转到第五相位条件不满足, $t_{判定}$ 不触发。

图 4 中圆角虚线框部分是 A 路口从路方向上的车流控制。根据 A 路口从路方向上直行(右转)和左转的车流量,自动调整 E_{T3} 和 E_{T4} 的时长。根据图 4,这个时长也决定了从路口 t_1 和 t_4 的触发时机。

3.3 自适应协调控制方法

如图 2 所示,每个路口有 4 个方向,1、4 方向为干线方向;2、3 方向为支线方向。在距离信号灯 150~200m 处有一个车辆探测器,用于探测进入探测区的车辆。

因为干线方向是绿波带控制,绿波周期固定,干线绿灯时间 E_{T1} 和 E_{T2} 是已经确定的固定值,所以支线驶来的车辆所能得到的绿灯总的持续时间也是确定的,可以假定时间为 T ,即: $T = E_{T3} + E_{T4}$ 。在现实交通中,信号灯取值是有时间范围的,即下限 t_L 和上限 t_H 。同时一条道路上能够停的车辆数有一个最高的阈值,当超过这个阈值时可能会发生堵塞。

根据图 4 的控制模型,主路口 A 控制方法描述如下:

(1) A 路口开始处在第一相位,经过时间 E_{T1} 后, A 路口变为第二相位,同时向从路口 C 发出消息 M6 和 P_{1L} , M6 是通知 C 可以切换到 M3, P_{1L} 则将左转车辆的信息通知 C;

(2) 经过时间 E_{T2} 后, A 路口变为第三相位,同时给 C 路口一个信号消息 M7, 并且将 A 路口探测器测得的 2、3 方向需要直行(右转)和左转的车辆数发给 A 路口的控制器, 控制器根据比例计算 $E_{T3} = \frac{\text{直行(右转)车辆数}}{\text{总等待车数}} * T$;

(3) 将 E_{T3} 和信号灯的时间取值区间作比较, 若在区间之内, 则 E_{T3} 就等于所求得值, 若小于下限值, 则 E_{T3} 等于下限值, 若大于或等于上限值, 则 E_{T3} 等于上限值;

(4) 计算 E_{T4} ;

(5) 经过时间 E_{T3} 后, A 路口变为第四相位, 同时给 C 路口一个信号消息 M8;

(6) 经过时间 E_{T4} 后, A 路口又回到第一相位, 同时给 C 路口一个信号消息 M9。至此完成主路口的一个周期。

从路口 C 控制方法描述如下:

(1) 初始状态 C 处在第四相位, 当接收到 A 发来的信号 M6 时, $t3$ 触发, C 切换到第三相位;

(2) C 接收到 A 发来的信号 P_{1L} 后, 计算 AC 路段中排队等待的车加上从 A 路口 EA 方向左转驶向 C 路口的车的总和;

(3) 根据平均每辆车的长度计算总共需要的距离, 并与设定的阈值比较, 大于等于阈值, $t_{判定}$ 触发, 否则 $t_{判定}$ 不触发;

(4) 若 $t_{判定}$ 不触发, C 路口继续接收到 A 发来的信号 M7、M8、M9, 那么 $t2$ 、 $t1$ 、 $t4$ 相继触发, C 路口最终回到第四相位;

(5) 若 $t_{判定}$ 触发, C 路口变到第五相位, 经过时间 E_{t5} 后, $t5$ 触发, C 路口切换到第二相位, 然后继续正常的相位变换。

性质 1 当从路口第五相位发生时, 一定是 T2 先于 $t5$ 触发, 即: $E_{t5} \geq E_{T2}$ 。

证明: 因为若 $t5$ 先触发, 那么第五相位结束时, A 路口还是第二相位, 还有左转驶向 C 的车辆, 那么有可能导致路口的堵塞, 所以 T2 先于 $t5$ 触发。

性质 2 要保证主从路口的周期一致, $E_{T2} \leq E_{t5} \leq E_{T2} + E_{T3} - t_L$ 。

证: 主从路口的周期要一致, 并使 M2 和 P3 保持对应关系, 那么 $E_{t5} < E_{T2} + E_{T3}$ 。这是因为如果 $E_{t5} \geq E_{T2} + E_{T3}$ 时, T3 先触发, $t5$ 触发后, 那么 M2 相位维持时间为 0。同时为了确保 M2 可以持续最低的绿灯时间, 也就是 M2 要有绿灯下限 t_L , 那么 $E_{t5} \leq E_{T2} + E_{T3} - t_L$, 根据性质 1, 其取值范围由 $E_{T2} \leq E_{t5} \leq E_{T2} + E_{T3} - t_L$ 决定。当求出的 E_{t5} 值属于该范围时, E_{t5} 的值就是求出的值; 若求出的值超过 $E_{T2} + E_{T3} - t_L$, 那么 E_{t5} 的值就等于 $E_{T2} + E_{T3} - t_L$ 的值; 若求出的值低于 E_{T2} , 那么 E_{t5} 的值就等于 E_{T2} 的值。

4 案例分析

如图 1 所示, 假定 AC 两个交叉口距离为 $S_{AC} = 600\text{m}$, $E_{T1} = 40\text{s}$, $E_{T2} = 40\text{s}$, A 路口支线方向得到的绿灯时间总和 $T = 40\text{s}$, $T = E_{T3} + E_{T4}$, 平均每辆车占位长 $S_0 = 4\text{m}$, 平均每辆车通过十字路口用时 $t = 2\text{s}$, 阈值 $S = 550\text{m}$, AC 路段原来等

待的车为 m_0 辆, 探测器测得从 A 左转驶向 C 的车辆数最大为 $n = E_{T2}/t = 20$ 辆, 信号灯时间范围 $t_L = 15\text{s}$, $t_H = 40\text{s}$ 。

对于 A 处的绿灯时间分配, 在时间 T 内支线可以放行车辆 20 辆, 假定直行(右转)的车 12 辆, 左转的车 8 辆, 则可以求出对应的绿灯持续时间 $E_{T3} = \frac{\text{直行(右转)车辆数}}{\text{总等待车数}} * T = \frac{12}{20} * 40 = 24\text{s}$, 求出的值在信号灯时间范围内, 所以 $E_{T3} = 24\text{s}$, 因为总周期固定, 所以 $E_{T4} = 16\text{s}$ 。

当 AC 路段原来等待的车辆数较少时, 例如 $m_0 = 10$, 可求得 $(m_0 + n) * S_0 = 120\text{m}$, 小于阈值 $S = 550\text{m}$, $t_{判定}$ 不触发, 从路口继续正常相位变化。

当 AC 路段原来等待的车辆数较多时, 例如 $m_0 = 140$, 可求得 $(m_0 + n) * S_0 = 640\text{m}$, 大于阈值 $S = 550\text{m}$, $t_{判定}$ 触发, 从路口切换到第五相位。所以需要至少放行 $640 - 550 = 90\text{m}$ 的车流量, 也就是 23 辆左右的车, 而平均每辆车通过十字路口用时 $t = 2\text{s}$, 则 23 辆车共用时 46s, 因为 $E_{t5} \leq E_{T2} + E_{T3} - t_L = 49\text{s}$, 则可以得到 $E_{t5} = 46\text{s}$ 。

本案例的可达图如图 5 所示。为简化表示, 其中 P 表示图 4 中圆角虚线框部分。当 $t_{判定}$ 不被触发时, 系统状态按 $M_0 \rightarrow M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_4 \rightarrow M_5 \rightarrow M_6 \rightarrow M_7 \rightarrow M_0$ 方式变换, 从路口的 4 种相位与主路口 4 种相位的时间保持一致; 当 $t_{判定}$ 被触发时, 系统状态按 $M_0 \rightarrow M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_8 \rightarrow M_9 \rightarrow M_4 \rightarrow M_5 \rightarrow M_6 \rightarrow M_7 \rightarrow M_0$ 方式变换。此时, M_8 是在 $t5$ 和 T2 都触发后转化为 M_4 状态。当 $t_{判定}$ 被触发后, 从路口的 M2 和 M1 相位维持时间不一定与主路口的 E_{T3} 和 E_{T4} 相位时间保持一致, 其决定于 M5 相位的维持时间。即当主路口有过多的左转至从路口的车辆时, 从路口根据进入的车流量自动开启第五相位, 保证主路口的左转车辆不堵塞在主路口。

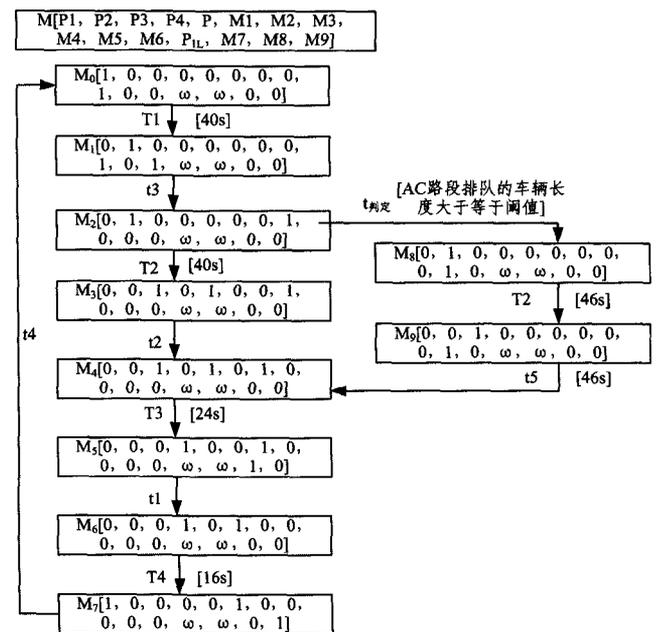


图 5 协调控制时延 Petri 网的可达标识图

结束语 本文通过时延 Petri 网建模分析城市交通信号灯系统, 设计了一种主从自适应协调控制方法, 以 3 个连续交叉口为例进行分析, 干线方向通过车流量调整信号灯时间, 支线方向通过信号灯时间调节车流量。该方法通过协调控制干

(下转第 96 页)

本文贡献如下:(1)针对先前固定值方法的缺陷,引入了分支有效区间的概念;(2)分析了用分支有效区间寻找最优路径的方法,并给出了寻找最优路径的方法;(3)用实例验证了在分支有效区间内寻找流程最优路径的有效性,即保全了流程模型的所有信息,将寻找区域最大化,通过逐个比较得到的最优解更有说服力。

本文下一步将优化该方法,并进一步针对有效区间来分析业务流程变化域等。

参 考 文 献

[1] Yannibelli V, Amandi A. Hybridizing a multi-objective simulated annealing algorithm with a multi-objective evolutionary algorithm to solve a multi-objective project scheduling problem [J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40: 2421-2434

[2] Ranjan S P, Km B, Raghurama G. An approach of optimal path generation using ant colony optimization [C] // 2009 IEEE Region 10 Conference (TENCON 2009). Singapore: IEEE, 2009: 1632-1637

[3] Weidlich M, Ziekow H, Mendling J. Optimising complex event queries over business processes using behavioural profiles [C] // *Business Process Management Workshops*, 2011. Hoboken, NJ: Stevens Inst Technol, 2011: 743-754

[4] Fazlollahtabar H, Mahdavi-Amiri N. Producer's behavior analysis in an uncertain bicriteria AGV-based flexible jobshop manufacturing system with expert system [J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2013, 65: 1605-1618

[5] Smirnov S, Weidlich M, Mendling J. Business process model ab-

straction based on behavioral profiles [C] // *Service-Oriented Computing (ICSOC 2010)*. San Francisco, CA, 2010: 1-16

[6] Smirnov S, Weidlich M, Mendling J. Business process model abstraction based on synthesis from well-structured behavioral profiles [J]. *Information Systems*, 2012, 21(1): 55-83

[7] Weidlich M, Mendling J, Weske M. Efficient consistency measurement based on behavioural profiles of process models [J]. *Software Engineering*, 2011, 37(3): 410-429

[8] Weidlich M, Weske M, Mendling J. Change propagation in process models using behavioural profiles [C] // *IEEE Int. Conf. on Services Computing*. Potsdam, 2009. 2009: 33-40

[9] 蒋昌俊. Petri 网的行为理论及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 6-42

[10] Fang Xian-weng, Hao Wen-jun. The Approach of Analyzing the Smallest Change Domain in Process Models based on Petri Nets [J]. *Applied Mathematics and Information Sciences*, 2012, 6(3): 943-949

[11] Elhog-Benzina D, Haddad S, Hennicker R. Refinement and Asynchronous Composition of Modal Petri Nets [C] // *Trans. on Petri Nets and Other Models of Concurrency V (LNCS 6900)*. Berlin Heidelberg: Springer, 2012: 96-120

[12] Weidlich M, Polyvyanyy A, Desai N, et al. Process compliance analysis based on behavioural profiles [J]. *Information Systems*, 2011, 36(7): 1009-1025

[13] Weidlich M. Behavioural profiles—a relational approach to behaviour consistency [D]. Potsdam: Hasso Plattner Institute, University of Potsdam, 2011

(上接第 76 页)

线支线的信号灯,可以自适应调节支线交叉口各方向绿灯的时间分配,使得从主路口驶向从路口的车流量可以顺利通过从路口,避免了因支线道路排队车辆过多而导致干线交叉路口的堵塞,可以在保证绿波带畅通的同时,使支线车辆尽可能多地通过,提高了交叉路口的通行效率。

参 考 文 献

[1] 卢凯,徐建闽,陈思溢,等. 通用干道双向绿波协调控制模型及其优化求解 [J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(4): 551-555

[2] Hu Pei-feng, Tian Zong-zhong, Yuan Zhen-zhou, et al. Variable-Bandwidth Progression Optimization in Traffic Operation [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2011, 11(1): 61-72

[3] Qu Da-yi, Huang Rong-gui, Chen Xiu-feng, et al. Algebraic Optimization Method for Arterial Road Signal Coordination Control [C] // *ASCE*. 2011: 923-932

[4] Huang Y S, Su P J. Modeling and Analysis of Traffic Light Control Systems [J]. *IET Control Theory Appl*, 2009, 3(3): 340-350

[5] 吴哲辉. Petri 网导论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006

[6] 李晓峰, 黄国兴, 李东. 基于多尺度融合的城市交通路网仿真系统研究 [J]. *计算机科学*, 2013, 40(2): 108-111

[7] Farhi N, Goursat M, Quadrat J P. The Traffic Phases of Road Networks [C] // *Transportation Research Part C*. 2011, 19: 85-102

[8] 徐杨, 张玉林, 孙婷婷, 等. 基于多智能体交通绿波效应分布式协同控制算法 [J]. *软件学报*, 2012, 23(11): 2937-2945

[9] Lu Kai, Zeng Xiao-si, Li Lin, et al. Two-Way Bandwidth Maximization Model with Proration Impact Factor for Unbalanced Bandwidth Demands [J]. *American Society of Civil Engineers*, 2012, 138: 527-534

[10] Song Xian-min, Tao Peng-fei, Chen Li-gang, et al. Offset Optimization Based on Queue Length Constraint for Saturated Arterial Intersections [J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2012, 2012: 907639

[11] Michel dos Santos Soares. Responsive Traffic Signals Designed with Petri Nets [C] // *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Suntec Singapore. October 2008: 1942-1947

[12] Wu Xian-yu, Tian Zong, Hu Pei-feng, et al. Bandwidth Optimization of Coordinated Arterials Based on Group Partition Method [J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2012, 43: 232-244

[13] Vazquez C R, Sutarto H Y, Boel R. Hybrid Petri net model of a traffic intersection in an urban network. *IEEE International Conference on Control Applications [C] // Part of 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control*. Yokohama, 2010: 658-664

[14] Dezani H, Gomes L, Damiani F. Controlling Traffic Jams on Urban Roads Modeled in Coloured Petri Net using Genetic Algorithm [C] // *38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Montreal, Canada, October 2012: 3043-3048