

城市交通网络信号控制系统的实时演算模型^{*}

孙景昊, 关楠, 邓庆绪, 张鑫, 杨丰源



(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

通讯作者: 邓庆绪, E-mail: dengqx@mail.neu.edu.cn

摘要: 基于实时演算(real-time calculus, 简称 RTC)理论, 为单/双行道两类城市交通网络的定时和自适应两类信号控制系统建立了统一的形式化模型. 首先, 将车流和交叉路口分别建模为 RTC 的到达曲线和资源曲线; 然后, 根据不同信号控制策略, 将相邻路口间的曲线进行综合计算, 得到整个交通网络的 RTC 模型. 应用最小加代数方法, RTC 模型能够计算车辆在路口的最长等待时间 D 和路口拥堵车队的最大长度 B . 基于 RTC 模型, 应用 MATLAB 对 8 组不同规模的城市交通网络进行仿真, 实验结果表明: (1) 与双行道网络相比, 单行道网络更能有效处理较稀疏的交通流. 以定时控制为例, 在车流频率 $u \leq 1/2$ 时, 单行道网络能够将交通拥堵指标 D 和 B 分别降低至少 2.66 倍和 3 倍; (2) 双行道网络中, 车流频率 u 存在一个临界区域, 在临界域内, 拥堵指标随车流频率递增变化, 一旦 u 低于或超出临界域, 拥堵指标则分别保持稳定不变或不可控; (3) 自适应策略优于定时控制策略, 例如在双行道网络中, 自适应控制策略对应的拥塞指标 D 和 B 比定时控制策略分别降低 1.68 倍和 1.26 倍.

关键词: 实时演算; 城市交通网络; 信号灯控制; 交通拥堵系数

中图法分类号: TP311

中文引用格式: 孙景昊, 关楠, 邓庆绪, 张鑫, 杨丰源. 城市交通网络信号控制系统的实时演算模型. 软件学报, 2016, 27(3): 527-546. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4979.htm>

英文引用格式: Sun JH, Guan N, Deng QX, Zhang X, Yang FY. Modeling urban traffic control systems from the perspective of real time calculus. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016, 27(3): 527-546 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4979.htm>

Modeling Urban Traffic Control Systems from the Perspective of Real Time Calculus

SUN Jing-Hao, GUAN Nan, DENG Qing-Xu, ZHANG Xin, YANG Feng-Yuan

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: This work presents a new framework for urban traffic flow control based on the real time calculus (RTC) method. The queuing behavior of the traffic flow is transformed into an arrival curve, and the capacity of the intersection is characterized by a service curve. According to different signal control strategies, the service and arrival curves at an intersection are used to calculate the outgoing arrival curve. This result curve at each intersection is further integrated with the curves at the adjacent intersections, which finally exhibits the RTC model of the whole traffic network. The presented model can evaluate the bounds of the delay D of a vehicle and the backlog B of an intersection. The experiments are settled on the urban grids, and reveal the changing trend of the congestion factors D and B that are under fixed-time and adapted control strategies respectively. This is followed by a discussion of how this modeling method helps to estimate the effect of different signal control strategies.

* 基金项目: 国家自然科学基金(61300022, 61300194, 61472072); 国家重点基础研究发展计划(973)(2014CB360509); 中央高校基本科研业务费(N130423007); 河北省自然科学基金(F2013501048)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61300022, 61300194, 61472072); National Grand Fundamental Research Program of China (973) (2014CB360509); Fundamental Research Funds for the Central Universities (N130423007); the Natural Science Foundation for Young Scholars of Hebei Province of China (F2013501048)

收稿时间: 2015-07-13; 修改时间: 2015-10-20; 采用时间: 2015-11-27; jos 在线出版时间: 2016-01-05

CNKI 网络优先出版: 2016-01-05 16:39:46, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20160105.1639.003.html>

Key words: real time calculus; urban traffic network; traffic signal control; congestion factor

现代城市交通网络是具有高实时性和不确定性的复杂巨系统^[1].在交通网络中,数量众多的交叉路口彼此相连.各个路口交通灯的实时控制信号共同支配车流在网络中的运行状态.城市交通系统的形式化模型旨在刻画车流和信号控制最本质的行为特征,建立交通网络控制系统的模拟和仿真平台,最终为交通信号控制提供高效的优化方案,或对网络性能做出准确的定量评估^[2].从建模层面的角度来看,当前的研究可分为微观方法和宏观方法两方面^[3].

微观建模方法将交通网络中每辆车均作为独立个体加以研究,通过分析紧邻车辆间的跟驰行为建立车流的统计物理学模型.元胞自动机(cell automata,简称 CA)是刻画车辆个体行为的经典微观模型^[4].在 CA 模型中,道路被离散化为若干元胞,每个元胞只允许包含单一车辆,车辆间的关联仅局限于相邻的两元胞之间.以往的研究大多仅考虑直行车流、单车道和单交叉路口的 CA 模型^[4],而当前的最新研究开始关注车流转向、多车道和多交叉口等复杂情况^[5-9].文献[5]为单行道交叉路口的车流转向行为建立 CA 模型.文献[6]研究了双行道网络中多个交叉路口交通流行为.文献[7]提出了双车道上车辆跟驰行为的 CA 模型.文献[8]研究了考虑应急车辆的多车道 CA 模型.文献[9]应用 CA 对交叉口混合交通流进行仿真.尽管以 CA 为代表的微观模型能够真实模拟实际交通流,但是这类模型却因计算代价高昂,并不适合大规模的交通网络建模.另外,在实际应用中不能预先获得每辆车的位置、速度等实时参数,这也使 CA 模型仅局限于车流历史数据的仿真,而很难用于交通信号控制策略的实时制定与优化^[3].

与微观方法不同,宏观建模方法不再单独以车流仿真为研究对象,而是从整个城市交通系统的全局出发对车流和信号控制策略的协同行为进行建模,其中最具代表性的是 Petri 网模型^[2,3,10-16].最初的研究^[10-12]将城市交通网络看作离散事件系统,以道路上车辆的数目来标识交通系统的离散状态,基于 Petri 网分别为车流和信号控制策略建立离散事件模型.这些离散的 Petri 网模型均无法避免状态空间爆炸问题^[2],这使得交通网络性能的控制策略优化等问题变得异常困难.为此,有学者将原离散模型进行适当松弛,将车流看作是连续变化的物理系统,最终建立城市交通网络的混合 Petri 网模型^[2,3,13].文献[13]应用流体微分方程刻画车流随时间的变化,代入到信号控制策略的离散事件模型中,建立了交通网络控制系统的混合 Petri 网模型,并基于该模型优化现有的信号控制策略,改善网络中某些应急车辆的行驶效率.文献[3]将车流建模为混合逻辑动态系统(mixed logical dynamical system,简称 MLDS),结合整数非线性规划方法对信号控制策略进行优化.文献[2]提出用连续 Petri 网模型来刻画车流.与文献[3,13]的工作相比,文献[2]的模型能够处理随机变化的车流.以上研究建立 Petri 网模型的目的均是获得最优的交通信号控制策略.Petri 网模型的另一个重要用途是,验证给定信号控制策略的正确性^[14-16].文献[14,15]建立了双行道交通信号控制的(同步)时间 Petri 网模型,验证了系统活性、可逆性和无死锁性等关键实时性质.另外,文献[16]应用工作流理论建立了交通信息服务系统的广义随机 Petri 网模型,并对信息服务的时间性质进行了分析和评估.

以上研究多借助统计概率和随机过程等理论方法对交通网络进行定性和定量分析.这些研究能够很好地刻画真实交通环境的不确定性,却很少从实时系统理论的角度对交通网络性能进行评估.城市交通网络信号控制系统是典型的实时系统.网络中的车流可看作是实时任务,在道路上随机释放,并在交叉路口等待通行处理.交叉路口可看作是车流通行所必需的资源,由信号灯控制路口资源对车流的分配.实时系统理论在处理系统的不确定性时,充分考虑路口上车流所有可能的到达情况,关心在最坏情况下,交通网络性能下界是否在可接受的范围之内.

本文从实时系统的角度,应用实时演算(real-time calculus,简称 RTC)理论^[17-19]为城市交通网络信号控制系统进行建模和定量分析.首先,将道路上不定期产生的车流建模为偶发性实时任务^[20],由 RTC 计算每个时段进入交叉路口的车流到达曲线;其次,将交叉路口建模为资源曲线;针对不同信号控制策略,计算路口资源曲线作用于车流到达曲线后的结果,即:车流输出曲线和剩余资源曲线;最后,将交通网络中所有交叉路口级联,综合每个路口的车流输出曲线及其下游路口的车流到达曲线,建立整个城市交通网络信号控制系统的 RTC 模型.

与传统模型相比,本文模型的特色有如下两点:(1) 基于最小加代数理论^[21]对车流曲线和资源曲线进行计算,能够有效避免其他形式化模型(例如 Petri 网)中普遍存在的状态空间爆炸问题;(2) 更重要的是,本文模型能够反映信号灯控制系统处理极端车流的能力.在给定信号控制策略的条件下,本文模型对交通网络性能的两类指标进行精确下界评估:一是每条车流从抵达路口直至离开的最长时间延迟;二是每个路口上车流的最大积压量.这两类指标旨在刻画信号灯控制系统在面临最坏交通流情况下能够达到的最好性能,为评价交通信号控制策略的优劣提供了新的参考.论文最后通过实验揭示了城市交通网格中车流延迟和路口积压在定时控制^[15]和自适应控制^[22,23]策略下的变化规律,计算出使得整个交通网络无拥塞情况出现的最极端车流.基于这些研究结果,本文就当前智能交通领域的一些热点问题进行讨论,为单行道网络效率、分布式自适应控制^[23]有效性和交通网络拥堵因素等问题提供了新的视角和理论支持.

本文第 1 节介绍实时演算理论中与本文相关的形式化定义.第 2 节构建城市交通网络的 RTC 模型.第 3 节应用 RTC 理论实现定时和自适应的信号灯控制策略.第 4 节给出实验分析,并对信号灯控制系统进行性能评估.最后是结束语.

1 实时演算的数学定义

实时演算(RTC)是网络演算在实时应用领域的扩展^[17],两者共同的理论基础是最小加代数理论^[21].与基于状态机(例如时间自动机)的形式化验证方法相比,RTC 方法能够有效避免状态空间爆炸问题^[19].RTC 应用特征曲线为实时系统中的负载和资源进行建模.计算和通信资源联接起来构成资源网络,RTC 刻画负载流通过资源网络的行为,并对网络系统的性能下界进行分析.若要建立 RTC 模型,需要首先获得实时系统的一些重要参数,这些参数主要描述资源网络中各个节点输入事件流的到达曲线和资源曲线以及每个节点上采用的处理模式等.第 1.1 节和第 1.2 节将分别从事件流的特征曲线和网络节点的处理模式两方面介绍 RTC 的相关理论.

1.1 到达曲线和资源曲线

RTC 理论建立离散事件流模型来刻画实时任务到达处理器的行为,并应用特征曲线描述事件流和可用处理器资源的时间性质,其定义如下:

定义 1(到达曲线)^[19]. 给定时间段 $[s, t]$, $R[s, t]$ 表示在 $[s, t]$ 内到达处理器的任务数. α^u 和 α^l 分别定义时段 $[s, t]$ 关联的到达曲线的上界和下界,其满足不等式: $\forall s < t, \alpha^l(t-s) \leq R[s, t] \leq \alpha^u(t-s)$.特殊地, $\alpha^u(0) = \alpha^l(0) = 0$.

定义 2(资源曲线)^[19]. 给定时间段 $[s, t]$, $C[s, t]$ 表示单位处理器资源在时段 $[s, t]$ 内能够处理完成的任务数. β^u 和 β^l 分别定义时段 $[s, t]$ 关联的资源曲线的上界和下界,其满足不等式: $\forall s < t, \beta^l(t-s) \leq C[s, t] \leq \beta^u(t-s)$.特殊地, $\beta^u(0) = \beta^l(0) = 0$.

由以上定义可知:对于任意正数 Δ , $\alpha^u(\Delta)$ 和 $\alpha^l(\Delta)$ 分别表示所有长度为 Δ 的时段内到达的最多和最少任务数.同理, $\beta^u(\Delta)$ 和 $\beta^l(\Delta)$ 分别表示所有长度为 Δ 的时段内单位处理器资源能够处理完成的最多和最少任务数.为方便表述,本文采用 α 和 β 分别简记这两类曲线序偶 (α^u, α^l) 和 (β^u, β^l) .

例 1:到达曲线的示例如图 1(a)所示,其中 E 表示到达处理器的任务序列, α 是序列 E 对应的到达曲线.图 1(a)中用空心圆标注了 $\Delta = \varepsilon, 1, 2$ (其中, ε 为大于 0 的小常数)时,到达曲线 α 的取值.当 $\Delta = \varepsilon$ 时,观察序列 E 易知,时间段 Δ 内至多包含 1 个任务或者不包含任务,因此,对应到达曲线 α 满足 $\alpha^u(\varepsilon) = 1$ 和 $\alpha^l(\varepsilon) = 0$.当 $\Delta = 1$ 时,时间段 Δ 内包含的最多和最少的任务数分别为 2 和 0,故有 $\alpha^u(1) = 2$ 和 $\alpha^l(1) = 0$,如图 1(a)所示.同理,通过观察 E 序列易知, $\alpha^u(2) = 3$ 和 $\alpha^l(2) = 1$.

例 2:图 1(b)给出了资源曲线的示例,其中 R 表示处理资源在时间维上的分配,实心块表示可用的资源, β 是 R 对应的资源曲线.注意到,可用资源每隔 4 个时间单位出现一次,即,周期为 4,故 β 每隔 4 个时间单位递增 1,是时间段 Δ 的阶梯函数.另外,通过观察 R 可知:对于每个时间段 Δ 内,最好情况下,在每个周期起始位置即分配一个可用资源,此时, Δ 内可用资源数为 $\beta^u(\Delta) = 1 + \lfloor \Delta/4 \rfloor$;最坏情况下,每个周期内总是在最后一个时间单元分配可用资源,此时, Δ 内可用资源数为 $\beta^l(\Delta) = \lfloor \Delta/4 \rfloor$.显然, $\beta^u(\Delta)$ 和 $\beta^l(\Delta)$ 对于相同的 Δ 总相差 1,如图 1(b)所示.

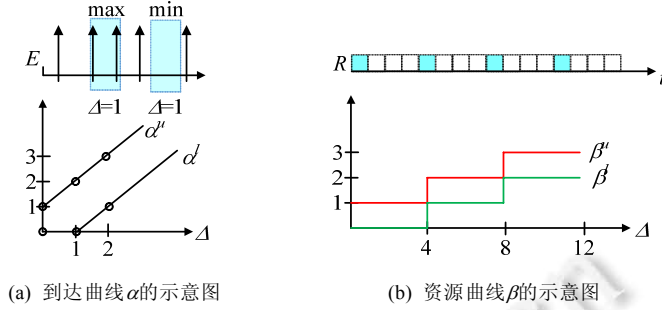


Fig.1 Examples of the arrival and resource curves

图 1 到达曲线和资源曲线的示例

在 RTC 理论中,曲线之间经常进行卷积和去卷积运算,见如下定义:

定义 3(卷积和去卷积运算)^[21]. 两曲线 f 和 g 的最小(大)加卷积 \otimes ($\bar{\otimes}$) 和最小加去卷积 \ominus 运算分别定义如下:

$$(f \otimes g)(\Delta) \triangleq \inf_{0 \leq \lambda \leq \Delta} \{f(\Delta - \lambda) + g(\lambda)\} \tag{1}$$

$$(f \bar{\otimes} g)(\Delta) \triangleq \sup_{0 \leq \lambda \leq \Delta} \{f(\Delta - \lambda) + g(\lambda)\} \tag{2}$$

$$(f \ominus g)(\Delta) \triangleq \sup_{0 \leq \lambda \leq \Delta} \{f(\Delta + \lambda) - g(\lambda)\} \tag{3}$$

在一般情况下,定义 3 中 f 通常代入到达曲线 α^u 或 α^l , g 则代入资源曲线 β^u 或 β^l . 卷积运算 $f \otimes g$ 将时间段分成两部分. $g(\lambda)$ 表示前半部分时段中的已有资源数. $f(\Delta - \lambda)$ 表示后半部分时段中新到达的任务数. 最小(大)加卷积运算即求这两部分之和最小(大). 易知:若 $g(\Delta) \leq (f \otimes g)(\Delta)$, 则在长度为 Δ 的时段内,到达的任务数一定多于所需的资源数,即,任务出现积压情况. 简言之, $f \otimes g$ 是任务不出现积压所需的资源数量下界. 另外,去卷积运算 $f \ominus g$ 则考虑当任务经过一段时间的积累后,计算在未来的一段时间内的任务最大积压量.

另外,本文用到达曲线的分解与合并来刻画车辆在路口转向产生的分流行为.

定义 4(到达曲线的合并与分解)^[24]. 到达曲线 α 与到达曲线集合 $\{\alpha_1, \dots, \alpha_l\}$ 满足如下计算关系:

$$\alpha = \sum_{i=1}^l \alpha_i, \forall \alpha_i(\Delta) = \gamma_i(\alpha(\Delta)), \text{ 即, } (\alpha_i^u(\Delta), \alpha_i^l(\Delta)) = (\gamma_i^u(\alpha_i^u(\Delta)), \gamma_i^l(\alpha_i^l(\Delta))) \tag{4}$$

其中, $\gamma_i(n) = (\gamma_i^u(n), \gamma_i^l(n))$ 是曲线分解函数,其定义域和值域均是任务数集合,具体函数式如下:

$$\gamma_i^u(n) = n + \sum_{j \neq i} \alpha_j^u(\alpha_i^{-l}(n)), \text{ 其中, } \alpha_i^{-l}(n) = \sup \{\Delta \geq 0 : \alpha_i^l(\Delta) \leq n\} \tag{5}$$

$$\gamma_i^l(n) = n + \sum_{j \neq i} \alpha_j^l(\alpha_i^{-u}(n)), \text{ 其中, } \alpha_i^{-u}(n) = \inf \{\Delta \geq 0 : \alpha_i^u(\Delta) \geq n\} \tag{6}$$

则称曲线集合 $\{\alpha_1, \dots, \alpha_l\}$ 合并后得到曲线 α , 反之,曲线 α 分解得到曲线集合 $\{\alpha_1, \dots, \alpha_l\}$.

为方便表述,定义 4 中的曲线合并与分解运算分别定义为 JOIN 和 FORK 函数如下:

$$(\alpha, \gamma_1, \dots, \gamma_l) = \text{JOIN}(\alpha_1, \dots, \alpha_l) \tag{7}$$

$$(\alpha_1, \dots, \alpha_l) = \text{FORK}(\alpha, \gamma_1, \dots, \gamma_l) \tag{8}$$

1.2 处理模式与系统性能分析

在实时系统中,任务流通常加载到处理模块上,由处理模块根据不同模式实现资源到任务的分配. RTC 将这些处理模块抽象为一类曲线转换函数,其定义域和值域均由到达曲线和资源曲线构成. RTC 中两类基本的处理模块包括:贪婪处理模块(greedy processing component, 简称 GPC)和最早截止期优先(earliest deadline first, 简称 EDF)调度模块. 下面分别介绍这两类模块的处理模式语义.

GPC 将到达的实时任务(由曲线 α 表示)按照先进先出(first in first out, 简称 FIFO)次序排列,并在可用资源(由曲线 β 表示)的约束下,以贪婪策略对任务流进行服务,如图 2(a)所示.

根据文献[17]的理论推导, GPC 的任务输出曲线 $\alpha' = (\alpha^u, \alpha^l)$ 和剩余资源曲线 $\beta' = (\beta^u, \beta^l)$ 分别定义如下:

$$\alpha^u(\Delta) \triangleq [(\alpha^u \otimes \beta^u) \ominus \beta^l] \wedge \beta^u(\Delta) \tag{9}$$

$$\alpha^l(\Delta) \triangleq [(\alpha' \otimes \beta^u) \otimes \beta^l] \wedge \beta^l(\Delta) \tag{10}$$

$$\beta^u(\Delta) \triangleq \inf_{0 \leq \lambda \leq \Delta} \{ \beta^u(\Delta + \lambda) - \alpha^l(\Delta + \lambda) \} \tag{11}$$

$$\beta^l(\Delta) \triangleq \sup_{0 \leq \lambda \leq \Delta} \{ \beta^l(\lambda) - \alpha^u(\lambda) \} \tag{12}$$

其中, $(f \wedge g)(\Delta) = \min(f(\Delta), g(\Delta))$. 公式(9)和公式(10)分别给出了任务输出曲线的上界和下界, $[(\alpha' \otimes \beta^u) \otimes \beta^l]$ 和 $[(\alpha' \otimes \beta^u) \otimes \beta^l]$ 分别计算出, 若使下一时段任务无积压, 该时段必须处理的最多和最少的任务数. 公式(11)考虑资源曲线上界和到达曲线下界相互作用的情况, 给出了时段内最多可剩余的资源数. 公式(12)考虑资源曲线下界和到达曲线上界相互作用, 给出剩余资源曲线的下界. 为方便表述, 公式(9)~公式(12)可简记为 $(\alpha', \beta') = \text{GPC}(\alpha, \beta)$.

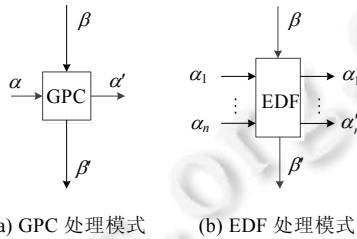


Fig.2 Two process components in RTC

图2 RTC中两个处理模式

根据 RTC 理论, 在 GPC 控制下, 任务流中任意作业的最迟响应时间(delay) $D(\alpha^u, \beta')$ 和 GPC 模块上积压的最多任务数(backlog) $B(\alpha^l, \beta^u)$ 分别可由以下式子计算^[17]:

$$D(\alpha^u, \beta') \triangleq \sup_{0 \leq \lambda} \{ \inf \{ \tau \in [0, \lambda] : \alpha^u(\lambda - \tau) \leq \beta'(\lambda) \} \} \tag{13}$$

$$B(\alpha^l, \beta^u) \triangleq \sup_{0 \leq \lambda} \{ \alpha^l(\lambda) - \beta^u(\lambda) \} \tag{14}$$

直观上解释, $D(\alpha^u, \beta')$ 和 $B(\alpha^l, \beta^u)$ 分别是曲线 α^u 和 β^l 的最大水平和垂直距离, 如图 3 所示. 在交通网络中, $D(\alpha^u, \beta')$ 和 $B(\alpha^l, \beta^u)$ 分别对应车辆在路口的最长等待时间和路口上车流的最大积压量.

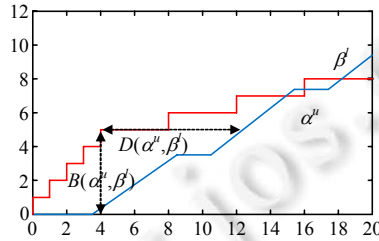


Fig.3 Illustration of $D(\alpha^u, \beta')$ and $B(\alpha^l, \beta^u)$

图3 $D(\alpha^u, \beta')$ 和 $B(\alpha^l, \beta^u)$ 的示意图

EDF 调度模块可并行处理两条以上的任务流, 如图 2(b)所示. 考虑一个 EDF 模块调度 n 条任务流, 其中, 第 i 条任务流中每个作业的相对截止期为 d_i . 这 n 条任务流均能满足截止期的充分条件是: 对于任意长度的时间段, 所有任务流的总处理时间 Ω 小于时段内的最小资源数 β^l . 该条件的具体数学表达式如下^[25]:

$$\Omega(\Delta) = \sum_{i=1}^n \alpha_i^u(\Delta - d_i) \leq \beta^l(\Delta), \forall \Delta \in \mathbb{R}^{\geq 0} \tag{15}$$

公式(15)中, $\alpha_i^u(\Delta - d_i)$ 计算在长度为 Δ 的时段内, 第 i 条任务流释放且完成作业的处理总耗时上界. 在实时系统理论中, $\Omega(\Delta)$ 又被称为需求界限函数(demand bound function, 简称 DBF)^[26].

根据文献[25]中的推导, EDF 模块的任务输出曲线 $\alpha'_i = (\alpha_i^u, \alpha_i^l)$ 和剩余资源曲线 $\beta'_i = (\beta_i^u, \beta_i^l)$ 分别为

$$\alpha_i^u(\Delta) \triangleq \min \{ \alpha_i^u(\Delta + d_i), \min \{ (\alpha_i^u \otimes \beta^u) \otimes \beta_i^l(\Delta), \beta^u(\Delta) \} \} \tag{16}$$

$$\alpha_i^u(\Delta) \triangleq \min\{\alpha_i^l(\Delta - d_i), \min\{(\alpha_i^u \otimes \beta^u) \otimes \beta_i^l(\Delta), \beta_i^l(\Delta)\}\} \tag{17}$$

$$\beta_i^u(\Delta) \triangleq \inf_{\Delta \leq \lambda} \{\beta^u(\lambda) - \sum_{i=1}^n \alpha_i^l(\lambda)\} \tag{18}$$

$$\beta_i^l(\Delta) \triangleq \sup_{0 \leq \lambda \leq \Delta} \{\beta^l(\lambda) - \sum_{i=1}^n \alpha_i^u(\lambda)\} \tag{19}$$

其中, $i=1, \dots, n$. $\beta_i^l(\Delta) = \sup_{0 \leq \lambda \leq \Delta} \{\beta^l(\lambda) - \sum_{j \neq i} \alpha_j^u(\lambda)\}$ 为 EDF 调度模块分配给第 i 条任务流的资源数下界. 另外, 与 GPC 模块类似, 在 EDF 调度下, 第 i 条任务流中任意作业的最迟响应时间 $D(\alpha_i^u, \beta_i^l)$ 和模块上最大积压任务数 $B(\alpha_i^u, \beta_i^l)$ 分别可由以下式子计算^[25]:

$$D(\alpha_i^u, \beta_i^l) \triangleq \sup_{0 \leq \lambda} \{\inf\{\tau \in [0, \lambda] : \alpha_i^u(\lambda - \tau) \leq \beta_i^l(\lambda)\}\} \tag{20}$$

$$B(\alpha_i^u, \beta_i^l) \triangleq \sup_{0 \leq \lambda} \{\alpha_i^u(\lambda) - \beta_i^l(\lambda)\} \tag{21}$$

2 城市交通网络的 RTC 模型

本节建立城市交通网络的 RTC 模型: 车流建模为实时任务, 交叉路口抽象为资源模型. 第 2.1 节网络中每个路口上车流的到达行为将由 RTC 中的到达曲线刻画. 第 2.2 节应用资源曲线建模路口的通行能力, 并给出路口各方向上车流使用路口资源的规则. 第 2.3 节将网络中每个路口的车流与相邻路口车流进行综合, 最终得到整个交通网络的全局模型.

2.1 车流的到达曲线模型

道路上的车流由两部分组成: 一是经由上游路口进入该道路的车流; 二是本段道路上自生的车流. 其中, 道路上的自生车流可抽象为一类偶发性实时任务, 定义为二元组 (e, p) . 其中, e 表示绿灯相位时一个单位车流从到达路口到驶出路口所耗费的最长时间; p 为道路上连续产生两个单位车流的最小时间间隔, 又称为周期. 另外, 定义自生车流的频率为 $u=e/p$, 表示在单位时间内道路上产生的单位车流条数. 注意到, 在理论上可以取一辆车作为单位车流. 但是一辆车通行对应的绿灯时间很短, 如果以单个车辆通过路口的时间作为最小绿灯时间, 会使得信号灯变化过于频繁, 增大了交通事故发生的风险. 因此在实际应用中, 通常参考城市交通系统中定义的最小绿灯时间^[22]给出单位车流的定义, 即, 在信号灯的最小绿灯时间内通过的车流称为单位车流. 根据 RTC 理论, 容易建立偶发性任务的到达曲线模型. 自生车流 (e, p) 的 RTC 模型在形式上是一个周期为 p 的阶梯分段函数^[17].

设自生车流对应的到达曲线为 α_1 , 来自上游路口的车流到达曲线设为 α_2 , 则道路上车流到达其紧邻下游路口的曲线即为 $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$, 如图 4 所示.

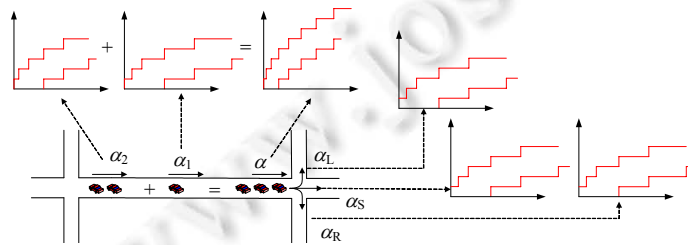


Fig.4 Combined arrival flow curve is decomposed in an intersection

图 4 路口上车流曲线组合与转向分解示意图

车流 α 在到达路口之后, 将会产生 3 种可能的行为: 直行、右转和左转. 接下来应用到到达曲线 α 的分解操作刻画车流的转向行为. 首先定义路口上的转向率为 (t_R, t_L) , 表示车流 α 中右转和左转的车辆数分别是直行车辆数的 t_R 和 t_L 倍; 然后根据定义 4, 构造转向函数曲线集合 $(\gamma_S, \gamma_R, \gamma_L)$:

$$\gamma_S(\alpha(\Delta)) = \alpha(\Delta) / (1 + t_R + t_L) \tag{22}$$

$$\gamma_R(n) = t_R \cdot \gamma_S(n) \tag{23}$$

$$\gamma_L(n) = t_L \cdot \gamma_S(n) \tag{24}$$

根据公式(21)~公式(23)中定义的转向函数,路口上直行和各转向车流可由车流到达曲线 α 分解得到,即:

$$(\alpha_S, \alpha_R, \alpha_L) = \text{FORK}(\alpha, \gamma_S, \gamma_R, \gamma_L) \tag{25}$$

其中, α_S, α_R 和 α_L 分别表示通过路口后直行、右转和左转的车流,如图 4 所示.结合公式(22)~公式(24)以及定义 4 可知:有 $\alpha = \alpha_S + \alpha_R + \alpha_L$ 成立,且有 $\alpha_R = t_R \alpha_S$ 和 $\alpha_L = t_L \alpha_S$ 成立.即:到达路口的车流按照转向率比例分解成 3 股新的车流 α_S, α_R 和 α_L ,驶向下游路口.

2.2 交叉路口的资源曲线模型

本节讨论一个交叉路口中各方向上的车流如何共享和互斥使用路口资源.

- 首先,路口的通行能力被建模为资源曲线 $\beta(\Delta) = \Delta e$,如图 5(a)所示.其中, e 为绿灯相位时一个单位车流通过路口的时间.易知, $\beta(\Delta)$ 表示长度为 Δ 的时间段内通过路口的单位车流条数($\Delta|e=0$);
- 其次定义路口各方向上的车流 a_{DT} ,其中,下标 D 表示车流驶来的方向,T 表示车流的转向.车流符号中用到的所有下标均在表 1 中列出.

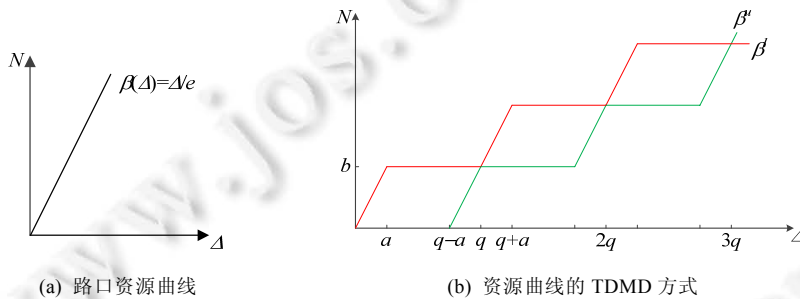


Fig.5 Capacity of an intersection is modeled as a service curve
图 5 路口通行能力的资源曲线模型

Table 1 Notations showing signal movements of traffic
表 1 路口车流信号动作的定义说明

下标	动作描述	下标	动作描述	下标	动作描述	下标	动作描述
NS	北向到达车流直行	SS	南向到达车流直行	ES	东向到达车流直行	WS	西向到达车流直行
NR	北向到达车流右转	SR	南向到达车流右转	ER	东向到达车流右转	WR	西向到达车流右转
NL	北向到达车流左转	SL	南向到达车流左转	EL	东向到达车流左转	WL	西向到达车流左转

接下来分析在信号灯控制下车流对路口资源的互斥和共享情况.在城市交通网络中,交叉口在南北向和东西向各配备一组信号灯,每组信号灯一般都具有 3 类指示灯状态:红灯、黄灯和绿灯.红灯亮起指示本方向上车辆禁止通行,绿灯指示车辆通行,黄灯提示车辆慢行.一般红灯、绿灯配时较长,黄灯配时很短.为简化模型,通常假设黄灯时间为 0^[13-15].基于此,本文考虑两相位信号灯配时方案^[15].即:在一个配时周期内,交叉路口的信号灯在两个状态之间迁移,如图 6 所示.

- 1) 相位 1:南北向信号灯处于绿灯亮起状态,指示南北向车流 α_{NT} 和 α_{ST} 通行.相应地,东西向信号灯处于红灯亮起状态,车流 α_{ET} 和 α_{WT} 禁止通行($T \in \{S, R, L\}$);
- 2) 相位 2:东西向信号灯处于绿灯亮起状态,指示东西向车流 α_{ET} 和 α_{WT} 通行.相应地,南北向信号灯处于红灯亮起状态,车流 α_{NT} 和 α_{ST} 禁止通行($T \in \{S, R, L\}$).

显然,对于南北向和东西向的车流而言,信号灯以一种时分复用(TDMA)^[17]的方式为车流分配路口资源.假设信号灯配时周期为 q .在一个周期 q 内,有 a 个时间单元分配给相位 1,另外 $q-a$ 个时间单元分配给相位 2.应用 RTC 理论,容易为 TDMA 配时方式建模:资源曲线 β 分解为两个周期性分段函数曲线 β_1 和 β_2 .图 5(b)给出了相位 1 对应的资源曲线 $\beta_1 = (\beta_1'', \beta_1')$.其中,红色曲线代表 β_1'' ,表示每个时段内分配给南北向车流的资源.即:每个

周期总是在最开始就把 a 个时间单元分配给相位 1,从而使南北向车流通行.结合 β 定义可知:相位 1 内南北向车流通行的最大车辆数为 $b=a/e$,如图 5(b)中纵坐标所示.另外,绿色曲线代表 β_1^t ,表示每个时段内分配给南北向车流的最少资源.即:在最坏情况下,每个配时周期总是在最后 a 个时间单元内把路口资源分配给相位 1.

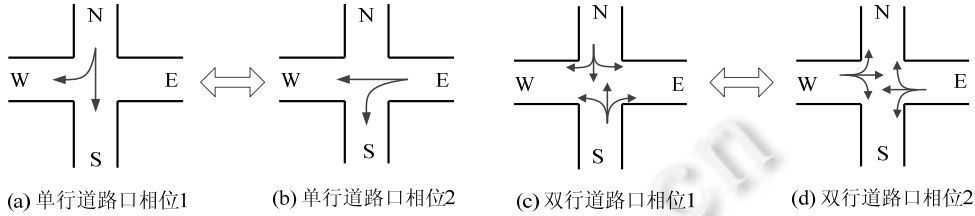


Fig.6 Models of the two-phase transition
图 6 交叉路口信号灯的两相位迁移模型

本文考虑单行道路口和双行道路口两种情况.如图 6(a)和图 6(b)所示,单行道路口上共有两类车流:北向车流 α_{NS} 和 α_{NR} 以及东向车流 α_{ES} 和 α_{EL} .根据两相位信号灯配时方案,这两类车流分时占用路口资源 β 其中:北向车流 α_{NS} 和 α_{NR} 共享相位 1 对应的资源 β_1 ,车流曲线 α_{NS} 和 α_{NR} 与资源曲线 β_1 作用后得到车流输出曲线分别为 α'_{NS} 和 α'_{NR} ;东向车流 α_{ES} 和 α_{EL} 共享相位 2 对应的资源 β_2 ,车流曲线 α_{ES} 和 α_{EL} 与资源曲线 β_2 相互作用后得到的车流输出曲线分别为 α'_{ES} 和 α'_{EL} .令 $\alpha'_S(\Delta)$ 表示经由路口向南驶入下游路口的车流输出曲线,对于任意的时间段 Δ , $\alpha'_S(\Delta)$ 表示在时间段 Δ 内路口的南向输出的最大车流量,其计算公式如下:

$$\alpha'_S(\Delta) = \sup_{0 \leq \lambda \leq \Delta} \{ \alpha'_S(\lambda) + \sup_{0 \leq \lambda' \leq \Delta - \lambda} \{ \alpha'_{NS}(\Delta - \lambda - \lambda') + \alpha'_{EL}(\lambda') \} \} \quad (26)$$

公式(26)中, $\alpha'_S(\Delta)$ 可看作两部分车流的线性组合:

- 一是在 Δ 的前半时段路口上已经输出的南向车流,不妨设前半时段为 Δ_1 ,则这一部分车流即为 $\alpha'_S(\Delta_1)$;
- 二是在后半时段 $\Delta - \Delta_1$ 内从路口新输出的南向车流,这部分新输出的车流由两部分车流曲线综合而成:北向直行车流输出曲线 α'_{NS} ;东向左转车流输出曲线 α'_{EL} .由于北向车流 α'_{NS} 和东向车流 α'_{EL} 分别对应不同的相位,所以这两股车流分时地从路口输出.

不妨设信号灯分配给车流 α'_{EL} 的时长为 λ ,则北向车流的分配时长即为 $\Delta - \Delta_1 - \lambda$.因此,在时段 $\Delta - \Delta_1$ 内,路口的南向输出曲线表达式为 $\alpha'_{NS}(\Delta - \Delta_1 - \lambda) + \alpha'_{EL}(\lambda)$.由定义 1 可知,曲线 $\alpha'_S(\Delta)$ 表示时段 Δ 内输出车流的上界,故公式(26)中对任意的 Δ_1 和 λ 应用 \sup 操作求上确界.另外根据定义 3,公式(26)可简写为最大加卷积形式,本文进一步定义 MIX 操作如下:

$$\alpha'_S = MIX(\alpha'_{NS}, \alpha'_{EL}) = \alpha'_S \otimes (\alpha'_{NS} \otimes \alpha'_{EL}) \quad (27)$$

同理,经由路口向西驶入下游路口的车流输出曲线设为 α'_W .易知, α'_W 可由下式计算得出:

$$\alpha'_W = MIX(\alpha'_{ES}, \alpha'_{NR}) = \alpha'_W \otimes (\alpha'_{ES} \otimes \alpha'_{NR}) \quad (28)$$

另外,双行道路口上有 4 类共 12 条车流,车流的分类及具体下标名称详见表 1.如图 6(c)和图 6(d)所示,相位 1 资源 β_1 作用于北向车流 $\{\alpha_{NS}, \alpha_{NR}, \alpha_{NL}\}$ 和南向车流 $\{\alpha_{SS}, \alpha_{SR}, \alpha_{SL}\}$.注意到,车流 $\alpha_{NS}, \alpha_{NR}, \alpha_{SS}$ 和 α_{SR} 可同时共享使用路口资源 β_1 而不发生冲突.然而, α_{NS} 和 α_{SL} 以及 α_{SS} 和 α_{NL} 这两对车流却会发生冲突,必须互斥地占用资源 β_1 .类似地,相位 2 资源 β_2 作用于东向车流 $\{\alpha_{ES}, \alpha_{ER}, \alpha_{EL}\}$ 和西向车流 $\{\alpha_{WS}, \alpha_{WR}, \alpha_{WL}\}$.车流 $\alpha_{ES}, \alpha_{ER}, \alpha_{WS}$ 和 α_{WR} 彼此无冲突,可共享路口资源 β_2 .车流 α_{NS} 和 α_{SL} 以及 α_{SS} 和 α_{NL} 在使用资源 β_2 时相互冲突,需互斥占用资源 β_2 .

令车流 α_{DT} 对应的输出曲线为 α'_{DT} ($D=\{N,S,E,W\}$ 且 $T=\{S,R,L\}$),路口各方向上输出曲线可由下式计算:

$$\alpha'_N = MIX(\alpha'_{SS}, \alpha'_{WL} + \alpha'_{ER}) \quad (29)$$

$$\alpha'_S = MIX(\alpha'_{NS}, \alpha'_{EL} + \alpha'_{WR}) \quad (30)$$

$$\alpha'_E = MIX(\alpha'_{WS}, \alpha'_{NL} + \alpha'_{SR}) \quad (31)$$

$$\alpha'_W = MIX(\alpha'_{ES}, \alpha'_{SL} + \alpha'_{NR}) \quad (32)$$

公式(29)给出了路口北向输出车流 α'_N .如图 6(b)所示,车流 α'_N 由 3 部分车流曲线整合而成:一是南向直行

车流输出曲线 α'_{SS} , 二是西向右转车流 α'_{WL} , 三是东向左转车流 α'_{ER} . 首先, 由于 α'_{SS} 和其他两条车流分时地从路口输出, 所以对于同一时间段, α'_N 只能在南向车流和东西向车流两者之间择其一取值, 即, 进行 MIX 操作(MIX 运算的定义详见公式(27)和公式(28)); 其次, 由于东西向车流 α'_{WL} 和 α'_{ER} 可同时共享使用路口资源, 即在同一时刻, 通过转向得到的北向输出车流 α'_{N1} 是两者之和, 综上, 北向输出车流 α'_N 分两步计算:

- 1) 求转向输出车流 $\alpha'_{N1} = \alpha'_{WL} + \alpha'_{ER}$;
- 2) 南向直行车流的输出曲线 α'_{SS} 和转向输出车流 α'_{N1} 进行分时整合: $\alpha'_N = MIX(\alpha'_{SS}, \alpha'_{N1})$.

公式(30)~公式(32)与公式(29)有类似的结构, 故在此不再赘述.

2.3 城市交通网络的级联模型

以上两节为交通网络中的单个路口建立了 RTC 模型. 本节建立城市交通网络各个路口之间的级联模型. 综合第 2.1 节、第 2.2 节的建模过程, 路口可看作是一个到达车流曲线的处理函数. 其中, 函数的输入是路口各方向上的到达车流, 这些车流先经过转向分流, 再按照信号灯提供的配时规则有序通过路口; 最后, 将路口每个方向上输出的多条子车流汇总合并, 构成最终的车流输出曲线. 进一步地, 这些车流输出曲线又将作为下游路口的输入变量进行迭代运算, 从而完成路口之间的级联.

图 7(a)给出了包含 9 个路口的单行道网络. 对于网络中第 i 行第 j 列的路口 $R(i, j)$, 定义路口函数为 f_{ij} , 其定义域和值域分别为 $\{\alpha'_N(i, j), \alpha'_S(i, j), \alpha'_E(i, j), \alpha'_W(i, j)\}$ 和 $\{\alpha'_S(i, j), \alpha'_N(i, j), \alpha'_W(i, j), \alpha'_E(i, j), \emptyset\}$. 其中: $\alpha'_D(i, j)$ 为从 D 方向进入路口 $R(i, j)$ 的到达车流; $\alpha'_D(i, j)$ 为从路口流出驶向 D 方向的输出车流, 即, D 向输出车流 ($D \in \{N, S, E, W\}$). 对于 i 的不同取值, 若 i 为奇数, 有 $f_{ij}(\alpha'_E(i, j)) = \alpha'_W(i, j)$, $f_{ij}(\alpha'_W(i, j)) = \emptyset$; 若 i 为偶数, 有 $f_{ij}(\alpha'_W(i, j)) = \alpha'_E(i, j)$, $f_{ij}(\alpha'_E(i, j)) = \emptyset$. 另外, 对于 j 的不同取值, 若 j 为奇数, 有 $f_{ij}(\alpha'_N(i, j)) = \alpha'_S(i, j)$, $f_{ij}(\alpha'_S(i, j)) = \emptyset$; 若 j 为偶数, 有 $f_{ij}(\alpha'_S(i, j)) = \alpha'_N(i, j)$, $f_{ij}(\alpha'_N(i, j)) = \emptyset$. 根据以上路口函数的定义, 算法 1 给出了单行道路口网络级联模型的构造过程.

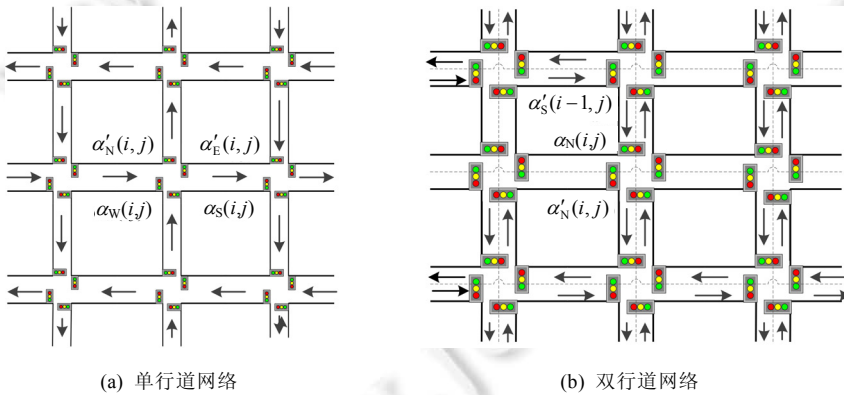


Fig. 7 Traffic network with nine intersections

图 7 包含 9 个交叉路口的城市交通网络

算法 1. 单行道网络的路口级联算法.

输入: $n \times n$ 维单行道网络以及道路自生车流 $\Delta\alpha$;

输出: 网络中每个路口上的输出车流曲线.

1. FOR $1 \leq i \leq n$:
2. FOR $1 \leq j \leq n$:
3. IF $i|2=1$ THEN
4. $\alpha'_E(i, j) := j < n ? \alpha'_W(i, j + 1) + \Delta\alpha : \Delta\alpha$;
5. $\alpha'_W(i, j) := f_{ij}(\alpha'_E(i, j))$;
6. ELSE

```

7.    $\alpha_w(i,j) := j > 1 ? \alpha'_E(i,j-1) + \Delta\alpha : \Delta\alpha;$ 
8.    $\alpha'_E(i,j) := f_{ij}(\alpha_w(i,j));$ 
9.   ENDIF
10.  IF  $j \neq 1$  THEN
11.    $\alpha_N(i,j) := i > 1 ? \alpha'_S(i-1,j) + \Delta\alpha : \Delta\alpha;$ 
12.    $\alpha'_S(i,j) := f_{ij}(\alpha_N(i,j));$ 
13.  ELSE
14.    $\alpha_S(i,j) := i < n ? \alpha'_N(i+1,j) + \Delta\alpha : \Delta\alpha;$ 
15.    $\alpha'_N(i,j) := f_{ij}(\alpha_S(i,j));$ 
16.  ENDIF
17.  ENDFOR
18. ENDFOR

```

算法 1 将单行道网络中的路口分为 4 类进行讨论.

- 1) 奇数行路口 $R(i,j)$ 在东西方向仅有东向车流 $\alpha_E(i,j)$, 算法的第 3 行~第 5 行给出了 $R(i,j)$ 在东西方向与紧邻路口的级联过程: 综合上游路口 $R(i,j+1)$ 的西向输出车流 $\alpha'_W(i,j+1)$ 和自生车流 $\Delta\alpha$ 构成到达车流 $\alpha_E(i,j)$, 同时向下游路口 $R(i,j-1)$ 提供输出车流 $\alpha'_W(i,j)$;
- 2) 偶数行路口 $R(i,j)$ 在东西方向仅有西向车流 $\alpha_W(i,j)$, 该路口上的级联过程见算法的第 6 行~第 9 行: 上游路口 $R(i,j-1)$ 的东向输出车流 $\alpha'_E(i,j-1)$ 参与构造 $\alpha_W(i,j)$, 输出车流 $\alpha'_E(i,j)$ 作为下游路口的到达车流;
- 3) 奇数列路口在南北方向的到达车流仅有 $\alpha_N(i,j)$, 算法的第 10 行~第 12 行将上游路口 $R(i-1,j)$ 的输出用于构造的到达车流, 同时将 $\alpha'_S(i,j)$ 提供给下游路口 $R(i+1,j)$;
- 4) 偶数列路口 $R(i,j)$ 南北方向仅有到达车流 $\alpha_S(i,j)$, 上游路口 $R(i+1,j)$ 的输出 $\alpha'_N(i+1,j)$ 作为 $R(i,j)$ 的输入 $\alpha_S(i,j)$. $R(i,j)$ 的输出 $\alpha'_N(i,j)$ 则作为下游路口 $R(i-1,j)$ 的输入 $\alpha_S(i-1,j)$, 见算法的第 13 行~第 16 行.

另外, 双行道网络的简单示例如图 7(b) 所示. 算法 2 给出了双行道路口的级联方法. 对于网络中的每个路口 $R(i,j)$, 算法 2 将路口级联分为两步进行讨论: 第 1 步, 上游路口输出车流和本路口上的自生车流进行综合, 构造路口的到达车流, 见算法的第 3 行~第 16 行; 第 2 步, 由路口函数 f_{ij} 得出输出车流作为下游路口的输入. 注意到, 在第 1 步中需考虑车流综合的边界条件. 以北向车流 $\alpha_N(i,j)$ 为例, 如图 7(b) 所示, $\alpha_N(i,j)$ 是上游路口 $R(i-1,j)$ 的输出车流 $\alpha'_S(i-1,j)$ 和自生车流 $\Delta\alpha$ 的加和, 见算法的第 6 行. 注意到: 当路口 $R(i,j)$ 处于网络边界, 也即 $i=1$ 时, 上游路口 $R(i-1,j)$ 则不再存在. 此时, 路口的到达车流等于自生车流 $\alpha_N(i,j) = \Delta\alpha$, 见算法的第 3 行. 类似地, 算法 1 中同样考虑了这种网络边界情况. 以北向车流 $\alpha_N(i,j)$ 为例, 算法 1 的第 4 行与算法 2 中的第 5 行~第 7 行等价, 均针对 i 的取值分 $i=1$ 和 $i \neq 1$ 两种情况进行讨论.

算法 2. 双行道网络的路口级联算法.

输入: $n \times n$ 维双行道网络以及道路自生车流 $\Delta\alpha$;

输出: 网络中每个路口上的输出车流曲线.

```

1.  FOR  $1 \leq i \leq n$ :
2.   FOR  $1 \leq j \leq n$ :
3.     $\alpha_N(i,j) := \Delta\alpha; \alpha_S(i,j) := \Delta\alpha;$ 
4.     $\alpha_E(i,j) := \Delta\alpha; \alpha_W(i,j) := \Delta\alpha;$ 
5.    IF  $i > 1$  THEN
6.      $\alpha_N(i,j) := \alpha'_S(i-1,j) + \Delta\alpha;$ 
7.    ENDIF
8.    IF  $i < n$  THEN
9.      $\alpha_S(i,j) := \alpha'_N(i+1,j) + \Delta\alpha;$ 

```

```

10.  ENDIF
11.  IF  $j > 1$  THEN
12.       $\alpha_W(i, j) := \alpha_W(i, j) + \alpha'_E(i, j - 1)$ ;
13.  ENDIF
14.  IF  $j < n$  THEN
15.       $\alpha_E(i, j) := \alpha_E(i, j) + \alpha'_W(i, j + 1)$ ;
16.  ENDIF
17.   $\alpha'_N(i, j) := f_{ij}(\alpha_S(i, j)); \alpha'_S(i, j) := f_{ij}(\alpha_N(i, j))$ ;
18.   $\alpha'_E(i, j) := f_{ij}(\alpha_W(i, j)); \alpha'_W(i, j) := f_{ij}(\alpha_E(i, j))$ ;
19.  ENDFOR
20. ENDFOR
    
```

3 信号灯控制策略的 RTC 实现

上一节构造了城市交通网络的 RTC 模型,将网络中的路口 $R(i, j)$ 抽象成一个处理车流曲线的函数 f_{ij} .本节将讨论函数 f_{ij} 的具体实现,即,如何应用 RTC 建模信号灯控制路口车流的行为.

智能交通系统中的信号灯控制策略主要分为两类:定时控制和自适应控制^[15].其中,定时控制是目前使用最广泛的城市交通控制方法.这种方法为路口提供固定的配时方案,实现简单,但不能适应交通流的实时变化.自适应控制策略则能够响应车流的实时变化,是目前公认的最高效的交通控制策略之一^[22,23].本节应用 RTC 语义刻画以上两类控制策略,并在第 4 节为这两类控制策略进行比较实验.

3.1 定时控制策略

定时控制方法将时间域均匀划分为若干时段,每段称为一个配时周期.在每个配时周期内,以固定比例为路口上的信号灯分配红灯时间和绿灯时间.结合第 2.2 节中路口资源的 TDMA 模型以及路口车流的同步和互斥规则,下面给出定时控制对应的车流曲线处理模块图.

首先,以图 6(a)和图 6(b)中的路口为例,单行道定时控制的 RTC 模型如图 8 所示.路口资源曲线 β 以 TDMA 的方式分解为两条子曲线 β_1 和 β_2 ,这两条资源曲线均加载到 GPC 处理模块,分别对北向车流 α_N 和东向车流 α_E 以贪婪策略进行服务.其中,每个 GPC 模块输出的车流曲线又分为直行和转向两种情况.设北向车流到达曲线 α_N 对应的输出曲线为 α'_1 ,根据第 2.1 节中公式(23)、公式(24)定义的转向函数,令车流向率为 $(t_R, 0)$,对进行 FORK 操作: $(\alpha'_{NS}, \alpha'_{NR}) = \text{FORK}(\alpha'_1, \gamma_S, \gamma_R)$,得到北向直行车流对应的输出曲线 α'_{NS} 以及北向右转车流对应的输出曲线 α'_{NR} .同理,东向直行车流和东向左转车流对应的输出曲线 α'_{ES} 和 α'_{EL} 也可由 FORK 操作获得.最后,根据第 2.2 节中的公式(27)和公式(28),路口的向南输出曲线 α'_S (向西输出曲线 α'_W)可由曲线 α'_{NS} 和 α'_{SL} (α'_{ES} 和 α'_{NR}) 进行 MIX 操作获得.

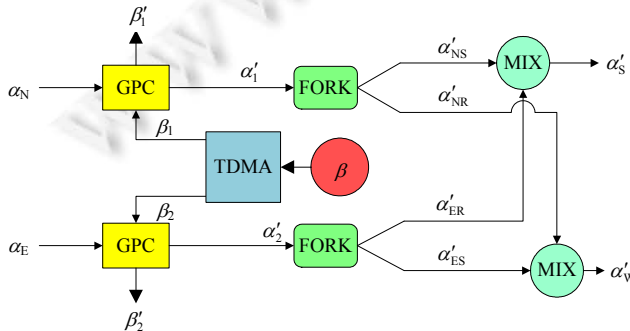


Fig.8 RTC model for the fixed-time control in the lane intersection

图 8 单行道路口定时控制的 RTC 模块图

图 9 给出了双行道路口定时控制的 RTC 模型.与单行道路口不同,双行道路口信号灯的一个相位对应两条车流.如图 6(c)和图 6(d)所示,路口南北向上有两条相向而行的车流:北向车流 α_N 和南向车流 α_S .这两条车流在到达路口后进行分流.根据第 2.1 节中的公式(22)~公式(25),对 α_N 和 α_S 分别进行 FORK 操作可以得到 $\{\alpha_{NS}, \alpha_{NR}, \alpha_{NL}\}$ 和 $\{\alpha_{SS}, \alpha_{SR}, \alpha_{SL}\}$.这 6 条子车流共用资源曲线 β_1 .根据第 2.2 节的分析,北向直行车流 α_{NS} 和南向左转 α_{SL} 互斥使用 β_1 ,以及南向直行车流 α_{SS} 和北向左转 α_{NL} 互斥使用 β_1 .将以上两对车流进行 JOIN 操作: $(\alpha_{N1}, \gamma_{NS}, \gamma_{SL}) = JOIN(\alpha_{NS}, \alpha_{SL})$ 和 $(\alpha_{S1}, \gamma_{SS}, \gamma_{NL}) = JOIN(\alpha_{SS}, \alpha_{NL})$,得到两条整合车流 α_{N1} 和 α_{S1} .易知,车流曲线 $\{\alpha_{N1}, \alpha_{NR}, \alpha_{S1}, \alpha_{SR}\}$ 可同时使用路口资源 β_1 而不产生冲突.如图 9 所示,曲线 $\alpha_{N1}, \alpha_{NR}, \alpha_{S1}$ 和 α_{SR} 分别对应一个处理模块 $\{GPC_1, \dots, GPC_4\}$.这 4 个模块均加载相同的资源曲线 β_1 ,并在该资源的约束下,对相应的到达车流进行服务.

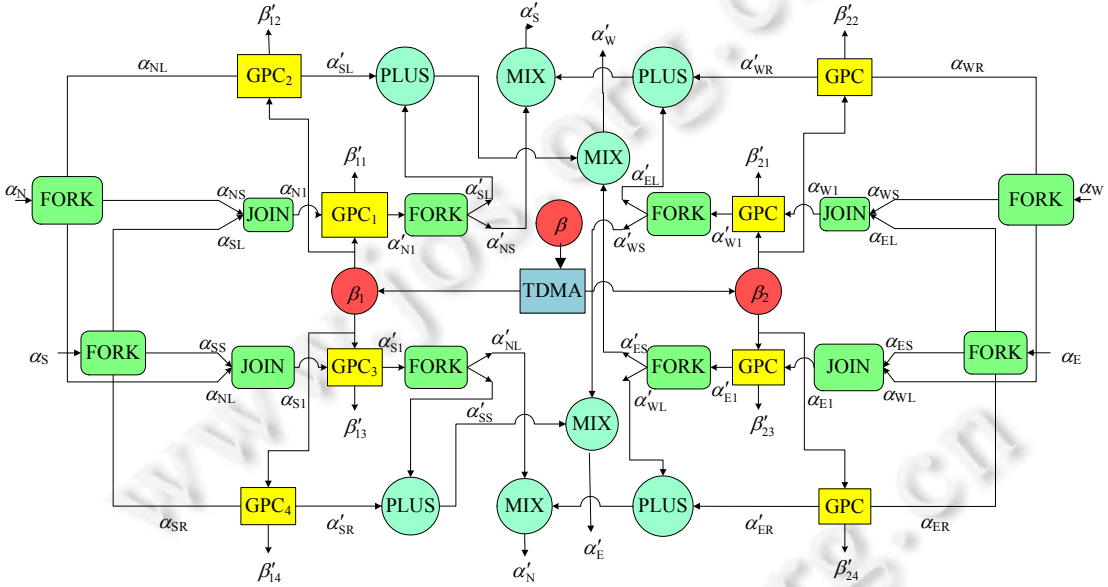


Fig.9 RTC model for the fixed-time control in the dual-way intersection

图 9 双行道路口定时控制的 RTC 模块图

注意到, GPC₁和 GPC₃分别得到整合车流 α_{N1} 和 α_{S1} 对应的输出曲线 α'_{N1} 和 α'_{S1} .其中, α'_{N1} 是北向直行输出车流 α'_{NS} 和南向左转输出车流 α'_{SL} 的和曲线.对 α'_{N1} 进行 FORK 操作可获得曲线 α'_{NS} 和 α'_{SL} :

$$(\alpha'_{NS}, \alpha'_{SL}) = FORK(\alpha'_{N1}, \gamma_{NS}, \gamma_{SL}).$$

同理,对 α'_{S1} 进行 FORK 操作可获得南向直行输出车流 α'_{SS} 和北向左转输出车流 α'_{NL} :

$$(\alpha'_{SS}, \alpha'_{NL}) = FORK(\alpha'_{S1}, \gamma_{SS}, \gamma_{NL}).$$

另外, GPC₂和 GPC₄可分别得到北向右转输出车流 α'_{NR} 和南向右转输出车流 α'_{SR} .综上,图 9 左半部分的 4 个 GPC 模块共得到南北方向 6 条输出车流 $\{\alpha'_{NS}, \alpha'_{NR}, \alpha'_{NL}, \alpha'_{SS}, \alpha'_{SR}, \alpha'_{SL}\}$.类似地,图 9 右半部分的 4 个 GPC 模块可得到东西方向 6 条输出车流 $\{\alpha'_{ES}, \alpha'_{ER}, \alpha'_{EL}, \alpha'_{WS}, \alpha'_{WR}, \alpha'_{WL}\}$.最后,根据第 2.2 节中的公式(29)~公式(32),将以上 12 条输出车流分别代入到相应的 MIX 算式中,得到路口上 4 条最终的输出车流 $\{\alpha'_S, \alpha'_N, \alpha'_W, \alpha'_E\}$.例如,路口向南输出车流曲线 α'_S 即由 α'_{WR} 和 α'_{EL} 做加(PLUS)操作,再和 α'_{NS} 做 MIX 操作得到,如图 9 所示.

3.2 自适应控制策略

信号灯若采用自适应控制策略,需要实时感知交通网络中变化的车流,根据实时路况信息为到达路口的车流安排优先级,从而确定各个方向上车流的通行时序.本文研究基于动态优先级调度的自适应控制策略,即,最早截止期优先(earliest deadline first,简称 EDF)的自适应控制策略.在 EDF 策略中,为路口每个方向上的车流定义一个相对截止期 d ,设车流中某个单位子车流到达路口的时刻为 t ,则定义该单位车流的绝对截止期为 $t+d$.若

车流能够在其绝对截止期内通过路口,则称车流能够成功调度.自适应算法按照绝对截止期的大小来定义单位车流的优先级.在控制过程中,单位车流的绝对截止期距离当前时刻越近,其对应的优先级就越高.这样,路口上的绿灯信号按照车流的优先级高低,依次使各个方向上的车流通行.自适应控制策略的目标是使得路口所有方向上的车流均能在其相应的截止期内通过路口,即,路口各方向上车流均能够成功调度.

图 10 给出了单行道路口上自适应控制策略的 RTC 实现.图中的 EDF 模块加载路口资源 β ,为北向车流 α_N 和东向车流 α_E 提供一个截止期 d ,按照截止期定义的动态优先级为两条车流 α_N 和 α_E 分时提供服务.其中,截止期 d 需满足公式(15),使得路口上所有车流均可调度.即:对于任意的 Δ ,有 $(\alpha_N^u + \alpha_E^u)(\Delta - d) \leq \beta^l(\Delta)$ 成立.又结合公式(13)中最迟响应时间的定义,可得 $d \leq D(\alpha_N^u + \alpha_E^u, \beta^l)$.最后,从 EDF 模块输出的车流先后经过 FORK 和 MIX 运算最终得到路口的向南输出车流 α'_S 和向西输出车流 α'_W .其具体运算过程与第 3.1 节中单行道路口定时控制的 RTC 模型相同,在此不再赘述.

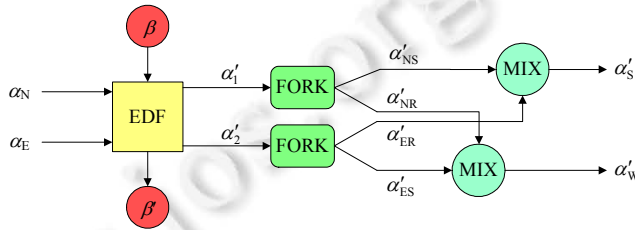


Fig.10 RTC model for the adaptive control in the lane intersection

图 10 单行道路口自适应控制的 RTC 模块图

双行道路口的自适应控制 RTC 模型如图 11 所示.

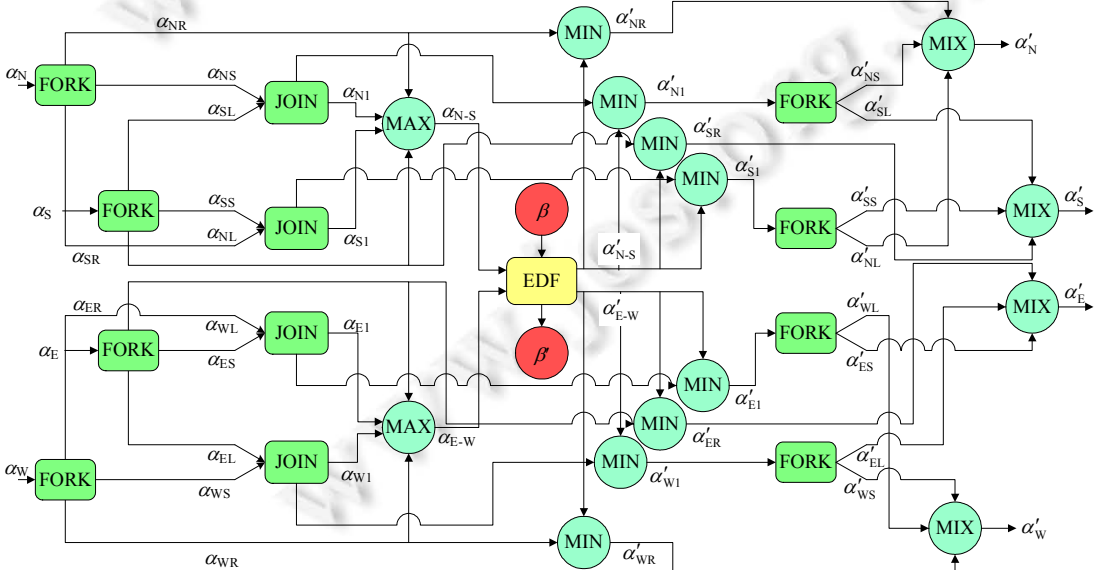


Fig.11 RTC model for the adaptive control in double routers

图 11 双行道路口自适应控制的 RTC 模块图

EDF 模块为南北方向和东西方向两个相位上的车流分配资源 β .设 EDF 模块分配给南北方向上的资源为 β_1 .与第 3.1 节的分析类似,南北方向 6 条车流中有两对车流经过 JOIN 操作,最终得到能够同时使用资源 β_1 的 4 条互不干扰的车流 $\{\alpha_{N1}, \alpha_{NR}, \alpha_{S1}, \alpha_{SR}\}$,如图 11 所示.将这 4 条车流的上界拟合合成曲线 $\alpha_{N-S}(\Delta) = \text{MAX}\{\alpha_{N1}(\Delta),$

$\alpha_{NR}(\Delta), \alpha_{S1}(\Delta), \alpha_{SR}(\Delta)$ }. 易知:若 β_1 能够成功调度车流上界曲线 α_{N-S} , 则 β_1 一定能成功调度 $\{\alpha_{N1}, \alpha_{NR}, \alpha_{S1}, \alpha_{SR}\}$ 中的任意车流. 图 11 中的 EDF 模块即输入上界曲线 α_{N-S} , 其对应的输出曲线定义为 α'_{N-S} . 易知, α'_{N-S} 是输出曲线 $\{\alpha'_{N1}, \alpha'_{NR}, \alpha'_{S1}, \alpha'_{SR}\}$ 的上界:对于任意的 Δ , 有 $\text{MAX}\{\alpha'_{N1}(\Delta), \alpha'_{NR}(\Delta), \alpha'_{S1}(\Delta), \alpha'_{SR}(\Delta)\} \leq \alpha'_{N-S}(\Delta)$ 成立. 另外, 根据第 1.2 节中的公式(16)和公式(17)可知, $\alpha'_{N-S}(\Delta) \leq \beta_1^u(\Delta)$. 其中, $\beta_1^u(\Delta)$ 即为在长度为 Δ 的时段内, 资源 β_1 能够处理的最多车辆数. 如图 11 所示, 这些输出曲线均通过其对应的到达曲线和 α'_{N-S} 进行取最小(MIN)操作获得.

以 α'_{N1} 为例, 对于任意的 Δ :

- 1) 若 $\alpha_{N1}(\Delta) \leq \alpha'_{N-S}(\Delta)$, 则有 $\alpha_{N1}(\Delta) < \beta_1^u(\Delta)$ 成立. 这意味着:在长度为 Δ 的时段内, 资源 β_1 能够处理完这期间到达路口车流 $\alpha_{N1}(\Delta)$ 中的全部车辆. 另外, 考虑最坏情况, 在时段 Δ 之前, 路口上已有拥塞车流, 其长度上界为 $B(\alpha_{N1}, \beta_1^l)$, 其中, $\beta_1^l(\Delta) = \sup_{0 \leq \lambda \leq \Delta} \{\beta_1^l(\lambda) - \alpha_{E-W}^u(\lambda)\}$ 为资源曲线 β_1 的下界. $B(\alpha_{N1}, \beta_1^l)$ 可由公式(21)计算得出. 易知:在时段 Δ 内, 通过路口的车流 $\alpha'_{N1}(\Delta)$ 不会超过 $\text{MIN}\{\alpha_{N1}(\Delta) + B(\alpha_{N1}, \beta_1^l), \alpha'_{N-S}(\Delta)\}$;
- 2) 若 $\alpha_{N1}(\Delta) > \alpha'_{N-S}(\Delta)$, 则有 $\alpha_{N1}(\Delta) > \alpha'_{N1}(\Delta)$ 成立. 这意味着:在长度为 Δ 的时段内, 资源未能处理完到达车流 $\alpha_{N1}(\Delta)$ 中的车辆. 输出车流 $\alpha'_{N1}(\Delta)$ 至多取到 $\alpha'_{N-S}(\Delta)$.

综上, 有 $\alpha'_{N1}(\Delta) = \text{MIN}\{\alpha_{N1}(\Delta) + B(\alpha_{N1}, \beta_1^l), \alpha'_{N-S}(\Delta)\}$ 成立. 类似地, 东西方向上的车流也经过 EDF 调度和 MIN 操作得到 4 条输出车流 $\{\alpha'_{E1}, \alpha'_{ER}, \alpha'_{W1}, \alpha'_{WR}\}$, 在此不再赘述.

如图 11 所示, 通过 MIN 操作得到的 4 条输出曲线 $\{\alpha'_{N1}, \alpha'_{S1}, \alpha'_{E1}, \alpha'_{W1}\}$ 又分别经过 FORK 操作分解成直行和左转两条输出车流, 共 8 条输出车流 $\{\alpha'_{NS}, \alpha'_{SL}, \alpha'_{SS}, \alpha'_{NL}, \alpha'_{ES}, \alpha'_{WL}, \alpha'_{WS}, \alpha'_{EL}\}$. 这些车流以及右转输出车流 $\{\alpha'_{NR}, \alpha'_{SR}, \alpha'_{ER}, \alpha'_{WR}\}$ 之间通过 MIX 操作将最终得到路口 4 个方向上的输出车流 $\{\alpha'_S, \alpha'_N, \alpha'_W, \alpha'_E\}$, 如图 11 所示. 具体的 MIX 过程与图 9 类似, 在此不再赘述.

4 实验结果及分析

本节应用 MATLAB 调用 RTC 工具包^[27]实现了第 3 节和第 4 节的城市交通网络信号控制模型, 分别对单行道网络和双行道网络进行模拟仿真, 实验分析了定时和自适应两类控制策略的性能随网络参数的变化规律. 具体实验程序代码详见 <https://github.com/cpsNEU/RTC-Model-for-traffic-flow-networks>.

针对单行道和双行道两种情况, 本节均设置了从 2×2 到 10×10 个路口组成的共 8 组不同规模的交通网格. 每组网络分别调用定时控制和自适应控制策略对网络中的车流曲线进行处理. 本节主要观测不同控制策略对交通网络的两类拥塞指标的影响: 一是单位车流在路口的最长等待时间 D ; 二是路口每个方向上最多积压的单位车流条数 B . 这两个拥塞指标分别对应第 1.2 节中定义的任务最长响应时间(delay)和模块上任务的最大积压量(backlog). 定时控制网络的拥塞指标计算公式详见公式(13)和公式(14). 自适应控制网络的拥塞指标则由公式(20)和公式(21)计算得出. 下面分别从单行道网络和双行道网络两方面介绍本文的实验工作.

4.1 单行道网络中拥塞指标的影响因素

- (1) 网络规模 n 和转向率 t_T 对拥塞指标无影响

在单行道网络的实验中, 针对固定的信号控制策略, 通过改变网络规模 n , 自生车流频率 $u=e/p$ 和转向率 t_T 等参数, 观察网络拥塞指标 D 和 B 随网络参数的变化规律. 其中, 网络规模 n 从 2×2 取到 10×10 , 车流频率 $u \in (0, 1]$, 转向率 $t_T \in (0, 1]$. 实验发现: 无论网络规模 n 和转向率 t_T 取何值, 只要车辆频率 u 和控制策略固定, 拥塞指标不会发生变化, 如结论 1 所述.

结论 1. 对于给定的信号控制策略和自生车流频率, 拥塞指标 D 和 B 是一个固定常数, 不会随着网络规模和转向率变化而发生改变.

- (2) 自生车流频率 u 对拥塞指标的影响

自生车流的频率 $u=e/p$ 在 $(0, 1]$ 区间变化, u 越大, 说明道路上的车流越稠密. 图 12 给出了在不同控制策略下, 拥塞指标 D 和 B 随车流频率 u 的变化规律.

研究发现, 无论是定时控制或是自适应控制, u 均存在一个相同的阈值 $1/2$: 当 $u \leq 1/2$ 时, 拥塞指标 D 和 B 均

稳定在一个较小的常数值;当 $u > 1/2$ 时, 拥堵指标 D 和 B 则变为无穷大(INF), 如图 12(a)所示:若 $u \leq 1/2$, 定时控制对应的 D 为 0.5, 即, 路口上单位车流的等待时间是其通过路口所耗时间的 0.5 倍; 自适应控制对应的 D 为 0, 即, 路口上单位车流到达路口无需等待即可通行. 显然, 在单行道网络中, 自适应控制优于定时控制. 并且从应对极端车流的角度, 自适应控制策略已经达到最优.

另外, 如图 12(b)所示:当 $u \leq 1/2$ 时, 定时策略和自适应策略对应的 B 完全相同, 均为 1, 即, 路口在最坏情况下最多积压 1 个单位车流. 注意到, 车流频率 $u \leq 1/2$ 的物理意义是: 单位车流连续出现的最小时间间隔至少是其通过路口耗时的 2 倍. 只要道路上的车流密度低于这一阈值, 定时控制和自适应控制一定能成功调度网络上的交通流, 如结论 2 所述.

结论 2. 若道路上车流频率 $u \leq 1/2$, 且道路至少能够承载 1 个单位车流时, 定时控制和自适应控制一定能够成功调度网络上所有路口的车流.

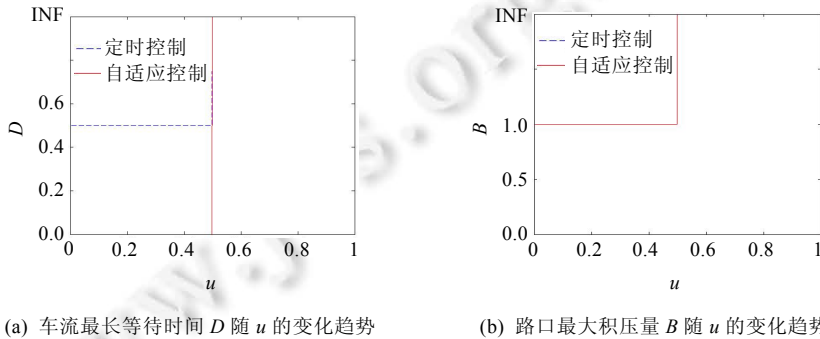


Fig.12 Congestion factors D and B are affected by frequency u in the lane intersection
图 12 单行道网络中车流频率 u 对拥堵指标 D 和 B 的影响

4.2 双行道网络中拥堵指标的影响因素

(1) 网络规模 n 对拥堵指标无影响

给定信号控制策略, 固定自生车流频率 u 和转向率(t_R, t_L), 针对 8 组不同规模的双行道网络进行仿真实验. 发现网络规模 n 的改变对拥堵指标 D 和 B 的取值无影响, 如结论 3 所述.

结论 3. 对于给定的信号控制策略、自生车流频率和转向率, 拥堵指标 D 和 B 是一个固定常数, 不会随着网络规模变化而发生改变.

(2) 自生车流频率 u 对拥堵指标的影响

在给定转向率(t_R, t_L)=(1/2, 1/2)的情况下, 拥堵指标 D 和 B 随车流频率 u 的变化规律如图 13 所示.

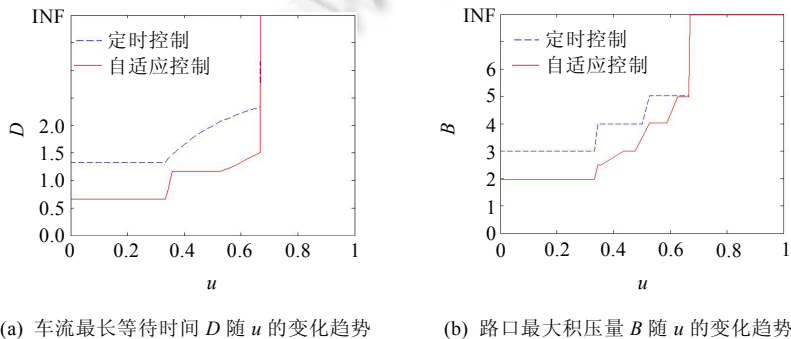


Fig.13 Congestion factors D and B are affected by frequency u in the dual-way intersection
图 13 双行道网络中车流频率 u 对拥堵指标 D 和 B 的影响

研究发现,车流频率 u 存在一个临界域 $(1/3,2/3]$:

- 当 $u \leq 1/3$ 时, D 和 B 稳定在一个较小常数.其中,定时控制对应 D 和 B 的取值分别为 1.33 和 3;自适应控制对应 D 和 B 的取值分别为 0.66 和 1.98;
- 当 $1/3 < u \leq 2/3$ 时,拥塞指标 D 和 B 对应一个取值范围.如图 13(a)所示:在定时和自适应控制下,车流最长等待时间 D 分别在区域 $(1.33,2.33)$ 和 $(0.85,1.5)$ 内随 u 值递增变化.另外,如图 13(b)所示:定时和自适应控制对应的路口最大积压量 B 在区域 $(3,5)$ 和 $(2,5)$ 内随 u 值近似阶梯状递增变化;
- 当 $u > 2/3$ 时,无论是定时控制还是自适应控制,其对应的 D 和 B 均为无穷大.说明在最坏情况下,网络中的交通流不可调度.

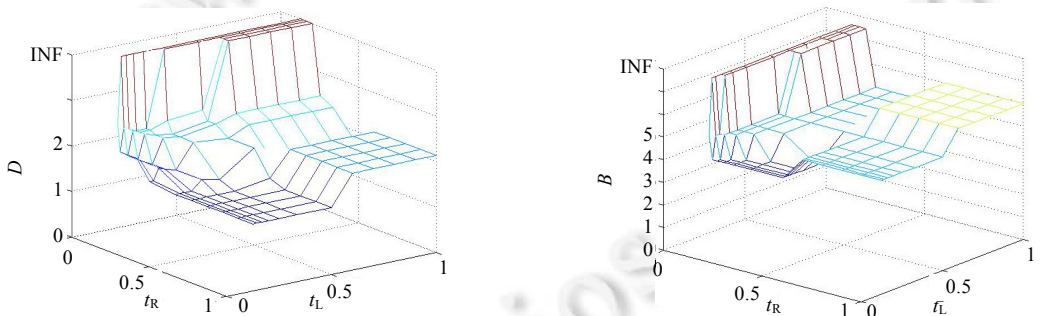
另外,本节还为转向率选取多组不同取值 $(t_R, t_L) \in [(1/8, 1/8) \times (1, 1)]$,发现 D 和 B 随 u 的变化规律均与图 13 类似,故在结论 4 中一并给出总结.

结论 4. 给定转向率,车流频率 u 存在临界区域 $(u_1, u_2]$,其中 $1/3 \leq u_1 < u_2 \leq 2/3$.若 u 落在临界域内, D 和 B 随 u 递增变化;若 $u \leq u_1$,则 D 和 B 稳定在一个较小常数;若 $u > u_2$,则 D 和 B 均为无穷大.并且当 $u \leq u_2$ 时,自适应策略对应 D 和 B 的取值分别比定时策略平均低 1.68 倍和 1.26 倍.

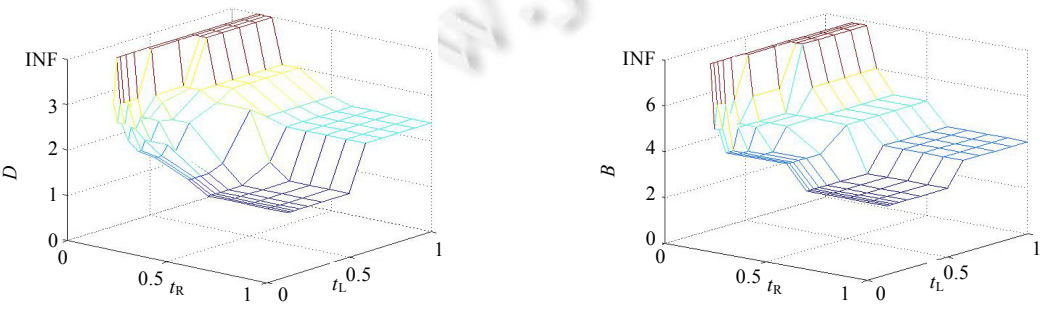
(3) 转向率 (t_R, t_L) 对拥塞指标的影响

由结论 4 可知,在转向率固定的情况下,拥塞指标 D 和 B 随车流频率 u 的变化存在 3 个区域:一是 $u \leq u_1$ 的稳定区;二是 $u_1 < u \leq u_2$ 的临界区;三是 $u > u_2$ 的无解区.本节将分别在这 3 个区域内选取固定的车流频率,改变转向率的取值,观察拥塞指标随转向率的变化规律.

- 首先,实验发现,当 u 处于稳定区域 $(0, u_1]$ 时,无论转向率 (t_R, t_L) 取何值,拥塞系数 D 和 B 的值均不会改变;
- 其次,当 u 落在临界区域 $(u_1, u_2]$ 时,改变转向率 (t_R, t_L) 的取值,会引起拥塞系数 D 和 B 取值发生改变.图 14 给出了在 $u=5/9$ 时, D 和 B 取值随转向率 (t_R, t_L) 的变化规律.



(a) 定时控制下,车流最长等待时间 D 随转向率 (t_R, t_L) 的变化趋势 (b) 定时控制下,路口最大积压量 B 随转向率 (t_R, t_L) 的变化趋势



(c) 自适应控制下,车流最长等待时间 D 随转向率 (t_R, t_L) 的变化趋势 (d) 自适应控制下,路口最大积压量 B 随转向率 (t_R, t_L) 的变化趋势

Fig.14 Congestion factors D and B are affected by turn rate (t_R, t_L) for $u=5/9$

图 14 转向率 (t_R, t_L) 对拥塞指标 D 和 B 的影响($u=5/9$)

如图 14(a)所示:定时控制下车流在路口的最长等待时间 D 随着 t_L 的增大而增大,随着 t_R 的增大而减小.在 $t_R \geq 0.5$ 且 $t_L \leq 0.5$ 时, D 取最小值.另外,定时控制对应的路口最大积压量 B 随着 t_L 的增大而增大,随着 t_R 的增大先是急剧减小后平缓增大,如图 14(b)所示.在 $t_R \times t_L$ 平面内的 $(1/7, 1/8)$, $(1/2, 1/8)$ 和 $(1/2, 1/3)$ 这 3 点确定的三角形域中, B 取最小值.图 14(c)和图 14(d)给出了自适应控制对应拥塞系数的变化趋势.车流最长等待时间 D 和路口最大积压 B 随着随着 t_L 的增大而增大,随着 t_R 的增大而减小,并在 $t_R \geq 0.6$ 且 $t_L \leq 0.5$ 时取到最小值.值得注意的是:当 $t_R < 1/7$ 时,定时控制和自适应控制对应的 D 和 B 均为无穷大.这意味着当自生车流频率为 $5/9$ 且右转的车流与直行车流比例低于 $1:7$ 时,无论是定时控制还是自适应控制,均不能成功调度网络中的交通流.

实验结果表明:当 $u \in (u_1, u_2]$ 时, D 和 B 随转向率 (t_R, t_L) 的变化规律均与图 14 类似,如结论 5 所述.

结论 5. 给定 $u \in (u_1, u_2]$,转向率存在临界值 μ_R .当 $t_R < \mu_R$ 时,定时控制和自适应控制对应的 D 和 B 均取无穷大值.当 $t_R \geq \mu_R$ 时, D 和 B 的取值随着左向转向率 t_L 呈阶梯递增趋势.

最后,当 u 处于区域 $(u_2, 1]$ 时,并非转向率 (t_R, t_L) 的所有取值均使得 D 和 B 取无穷大.图 15 给出了在 $u=10/13$ 时,转向率 (t_R, t_L) 的取值对 D 和 B 的影响.与图 14 类似,在图 15 中, (t_R, t_L) 也存在明显的临界值:当 $t_R \geq 1$ 且 $t_L \leq 1/3$ 时, D 和 B 取较小数值;否则, D 和 B 取无穷大.与图 14 相比,图 15 中 D 和 B 取较小数值的区域变得更加狭小.

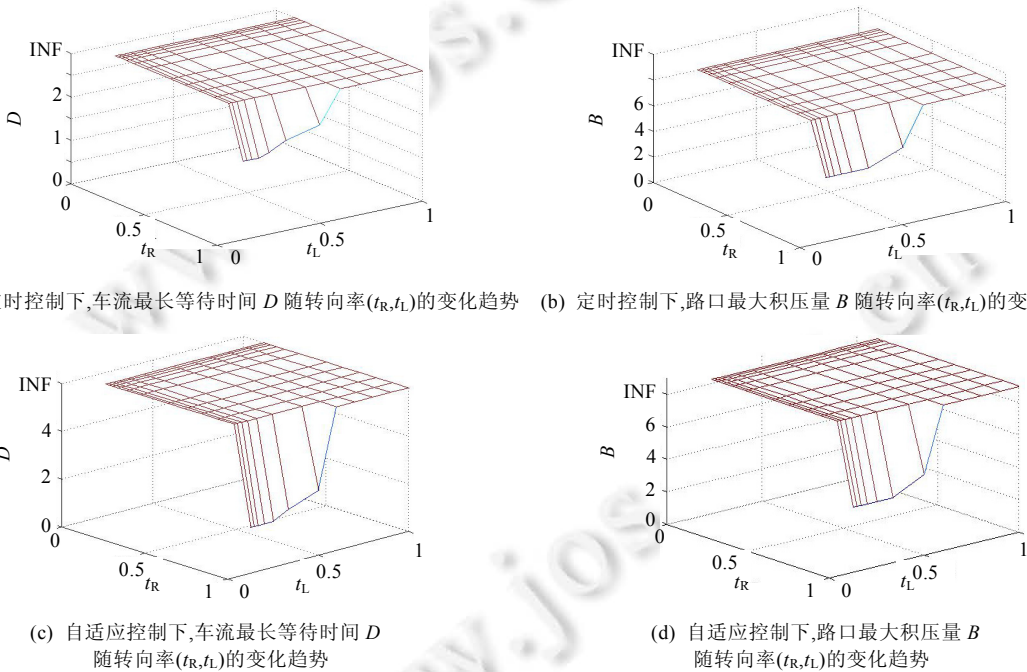


Fig. 15 Congestion factors D and B are affected by turn rate (t_R, t_L) for $u=1/3$

图 15 转向率 (t_R, t_L) 对拥塞指标 D 和 B 的影响 $(u=1/3)$

4.3 实验现象讨论

本节实验通过交通网络拥塞指标量化分析了定时和自适应控制策略的性能,所提出的拥塞指标 D 和 B 均用于评估在最坏情况下,信号灯控制系统给路口带来的拥塞状况,也即体现了信号灯控制策略的在面临最极端车流时的最好性能(简称极端性能).这些实验结果能够从实时系统理论的角度,为 ITS 领域的研究提供一些新的参考和启示:

第一,由结论 1 和结论 3 可知,定时和自适应控制策略的极端性能并不受交通网络规模的影响.尤其在单行道网络中,信号控制策略的极端性能也不会受到转向率的影响.因此在实际应用中,在道路上自生车流频率稳定的前提下,不必担心交通网络规模扩大使得信号灯控制策略应对极端车流的能力变弱.

第二,纵向比较单行道网络和双行道网络中,信号灯控制策略的极端性能.由结论 2 和结论 4 可知:在道路上自生车流频率 $u \leq 1/2$ 时,单行道网络比双行道网络更能有效地缓解交通拥塞.以定时控制策略为例,单行道网络的拥塞指标 D 和 B 能够比双行道网络分别降低至少 2.66 倍和 3 倍.因此,从对应极端车流情况的角度看,在道路车流较为稀疏($u \leq 1/2$)时,单行道网络的效率会明显优于双行道网络.当道路上车流较为稠密时(例如车流频率 $1/2 < u \leq 2/3$),双行道网络的 D 和 B 的取值范围分别是(2,2.33)和(4,5),而单行道网络关联的 D 和 B 均是无穷大.因此在 $1/2 < u \leq 2/3$ 时,单行道网络处理极端车流的能力反而不及双行道网络.注意到:在交通领域,单行道被公认为是解决城市交通拥堵、增加交通容量最直接、最经济有效的方法之一^[22].根据日本国土交通省的相关研究资料,在不改变道路状况的条件下,单向交通网络能够使城市通行能力提高约 30%~50%.然而有专家研究发现,单行道并不适合饱和交通的情况.在单行道网络中,一旦某个路口发生拥堵,车流的积累会快速增长,拥堵状况会迅速向相邻路口传播^[28].本文结论从交通网络应对极端车流的角度佐证了交通领域专家学者的相关论断,即:在车流密度稀疏时,单行道能够有效提高交通网络的通行能力,然而当遭遇饱和交通流(车流密度 $1/2 < u \leq 2/3$)时,单行道网络的通行能力反而弱于双行道网络.

第三,自适应控制策略处理极端车流情况的能力明显优于定时控制:在单行道网络中,自适应控制下,车流的最长等时为 0;在双行道网络中,自适应控制策略对应的 D 和 B 分别比定时控制策略平均低 1.68 倍和 1.26 倍.交通领域的专家学者普遍认为:由于车辆到达的随机性和实时性,定时控制无法适应交通的动态变化;而自适应控制能够根据实时交叉口车辆的到达情况优化确定最佳相位方案以及放行时间,提高交叉口的通行效率.因此与定时控制相比,自适应控制具有更优的性能^[23].本文的实验结论证明了这一观点.另外,本文中的自适应控制策略仅获取本路口及相邻路口的车流信息,属于一种分布式自适应控制^[23].与集中式自适应控制策略相比,分布式策略不需要感知交通网络全局的车流信息,也就不存在通信和计算代价瓶颈问题.本节给出了分布式自适应控制策略应对极端车流的能力评估.在实际应用中,若交通网络中道路上的车流频率在临界点之内,即 $u \leq 2/3$,且道路承载车流的能力也满足路口最大积压量 $B \geq 5$ 的约束,则相较于集中式自适应控制,分布式自适应控制是更为经济的可行方案.

第四,由结论 5 可知:在双行道网络中,在自生车流频率 $u > 1/3$ 时,网络拥塞系数 D 和 B 随左转车流比例的增大而增大,随右转车流比例的增大而减小;尤其当右转车流与直行车流小于 1:7 时,网络中出现极端车流,拥塞系数 D 和 B 变为无穷大.交通领域一直关注转向车流对交通拥塞的影响.针对左转车流,已有众多学者采用建立分析计算公式、直行车当量换算系数、微观仿真模拟和实地数据回归分析等方法进行研究,均认为左转车流比例的增加会降低交叉路口的通行能力^[29].本文结论 5 证明了这一结论的正确性,并指出:在车流密度超过阈值($u > 1/3$)时,该现象变得更加明显.另外,交通领域的专家学者认为:由于路口上的右转车流与其他方向车流基本不构成冲突点,因此右转车流比例的增大不会降低路口的通行能力.本文的仿真结果也验证了这一结论.另外,结论 5 还给出启示:在道路车流较为稠密时($u > 1/3$),应用车流诱导方法以改变转向率,使得路口上右转的车流与直行车流的比例超过 1:7,能够减少甚至避免交通拥堵的可能性.

5 结束语

实时演算是评估实时系统时间特征最有效的理论模型之一.城市交通网络是一个典型的实时系统,网络中的车流瞬息万变,信号灯控制系统经常要处理车流的各种组合情况,甚至是最极端的车流组合.本文将实时演算理论应用于评估城市交通网络的信号控制系统,关注在最极端的车流环境中,信号灯控制系统的运行情况.本文分别为单行道网络和双行道网络建立了形式化模型,并在该模型上实现了定时和自适应两类控制策略.仿真实验揭示了信号灯控制策略的性能随交通网络参数的变化规律.为当前 ITS 领域一些研究热点,例如单行道网络解决交通拥堵的可行性、自适应控制策略的有效性以及交通网络拥堵的影响因素等问题,提供了新的理论参考.另外注意到:本文仅针对规则的城市交通网络进行仿真实验,而且针对较为简单的两相位信号灯配时方案进行建模.本文可视为应用实时演算(RTC)理论研究城市交通信号控制的第一步工作.随着物联网和智能交通技术的发展,精确地获取真实的城市交通网络拓扑成为可能.而且,考虑左(右)转车流专用相位的 6 相位和 8 相位的

信号灯配时方案也成为大中城市交通控制的主流,因此,下一步的工作将应用 RTC 理论为真实的城市交通网络环境建模,并将本文的两相位信号灯控制模型扩展到 6 相位和 8 相位等更复杂的情况。

References:

- [1] Li SB, Wu JJ, Gao ZY, Lin Y, Fu BB. The analysis of traffic congestion and dynamic propagation properties based on complex network. *Acta Physica Sinica*, 2011,60(5):050701 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.7498/aps.63.010508]
- [2] Júlvez J, Boel RK. A continuous Petri net approach for model predictive control of traffic systems. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2010,40(4):686–697. [doi: 10.1109/TSMCA.2010.2041448]
- [3] Kim YW, Kato T, Okuma S, Narikiyo T. Traffic network control based on hybrid dynamical system modeling and mixed integer nonlinear programming with convexity analysis. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2008,38(2):346–357. [doi: 10.1109/TSMCA.2007.914779]
- [4] Schadschneider A, Schreckenberg M. Cellular automaton models and traffic flow. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 1993,26(15):679–683. [doi: 10.1088/0305-4470/26/15/011]
- [5] Foolaadvand ME, Belbasi S. Vehicular traffic flow at an intersection with the possibility of turning. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2011,44(10):105001. [doi: 10.1088/1751-8113/44/10/105001]
- [6] Hu WB, Wang H, Du B, Li PY. A multi-intersection model and signal timing plan algorithm for urban traffic signal control. In: *Proc. of the Transport*. 2014. 1–11. [doi: 10.3846/16484142.2014.940606]
- [7] Jing M, Deng W, Wang H, Ji YJ. Two-Lane cellular automaton traffic model based on car following behavior. *Acta Physica Sinica*, 2012,61(24):323–331 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.7498/aps.61.244502]
- [8] Zhao HT, Mao HY. Cellular automaton simulation of multi-lane traffic flow including emergency vehicle. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(6):060501 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.7498/aps.62.060501]
- [9] Zhang XQ, Wang Y, Hu QH. Research and simulation on cellular automaton model of mixed traffic flow at intersection. *Acta Physica Sinica*, 2014,63(1):010508 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.7498/aps.63.010508]
- [10] Gallego JL, Farges JL, Henry JJ. Design by Petri nets of an intersection signal controller. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 1996,4(4):231–248. [doi: 10.1016/S0968-090X(96)00009-5]
- [11] Tzes A, Kim S, McShane WR. Applications of Petri networks to transportation network modeling. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1996,45(2):391–400. [doi: 10.1109/25.492914]
- [12] Dotoli M, Fantì MP. An urban traffic network model via coloured timed Petri nets. *Control Engineering Practice*, 2006,14(10): 1213–1229. [doi: 10.1016/j.conengprac.2006.02.005]
- [13] Di Febbraro A, Giglio D, Sacco N. Urban traffic control structure based on hybrid Petri nets. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2004,5(4):224–237. [doi: 10.1109/TITS.2004.838180]
- [14] List GF, Cetin M. Modeling traffic signal control using Petri nets. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2004,5(3): 177–187. [doi: 10.1109/TITS.2004.833763]
- [15] Huang YS, Weng YS, Zhou MC. Modular design of urban traffic-light control systems based on synchronized timed Petri nets. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2014,15(2):530–539. [doi: 10.1109/TITS.2013.2283034]
- [16] Lin L, Jiang CJ. Modeling and analysis of TIS based on GSPN. *Chinese Journal of Computers*, 2005,28(1):81–87 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3321/j.issn:0254-4164.2005.01.011]
- [17] Chakraborty S, Künzli S, Thiele L. A general framework for analysing system properties in platform-based embedded system designs. In: *Proc. of the Design, Automation and Test in Europe Conf. and Exhibition (DATE)*. IEEE Computer Society, 2003. 190–195. [doi: 10.1109/DATE.2003.1253607]
- [18] Phan LTX, Chakraborty S, Thiagarajan PS. A multi-mode real-time calculus. In: *Proc. of the Real-Time Systems Symp. USA*: IEEE Computer Society, 2008. 59–69. [doi: 10.1109/RTSS.2008.47]
- [19] Guan N, Yi W. Finitary real-time calculus: Efficient performance analysis of distributed embedded systems. In: *Proc. of the Real-Time Systems Symp.* IEEE Computer Society, 2013. 330–339. [doi: 10.1109/RTSS.2013.40]
- [20] Ka A, Mok L. Fundamental design problems of distributed systems for the hard-real-time environment [Ph.D.Thesis]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1983.
- [21] Killat U. *Entwurf und Analyse von Kommunikationsnetzen*. Vieweg+ Teubner, 2011. 178–179.
- [22] Liu ZY. *Intelligent Traffic Control Theory and Its Application*. Beijing: Science Press, 2003. 51–106 (in Chinese).
- [23] Xu Y, Zhang YL, Sun TT, Su YF. Agent-Based decentralized cooperative traffic control toward green-waved effects. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2012,23(11):2937–2945 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/2937.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04307]
- [24] Perathoner S, Rein T, Thiele L, Lampka K, Rox J. Modeling structured event streams in system level performance analysis. In: *Proc. of the ACM SIGPLAN/SIGBED Conf. on Languages, Compilers and Tools for Embedded Systems (LCTES)*. ACM Press, 2010. 37–46. [doi: 10.1145/1755888.1755895]

- [25] Stoimenov N, Perathoner S, Thiele L. Reliable mode changes in real-time systems with fixed priority or EDF scheduling. In: Proc. of the Design, Automation & Test in Europe Conf. & Exhibition. IEEE, 2009. 99–104. [doi: 10.1109/DATE.2009.5090640]
- [26] Baruah S, Chen D, Gorinsky S, Mork A. Generalized multiframe tasks. Real-Time Systems, 1999,17(1):5–22. [doi: 10.1023/A: 1008030427220]
- [27] Ernesto W, Lothar T. Real-Time calculus (RTC) toolbox. <http://www.mpa.ethz.ch/Rtctoolbox>
- [28] Chen YX, Wu B. Approaching several subjects of dynamic optimization for one-way system. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2007,4(4):94–96 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1009-7716.2007.04.029]
- [29] Chen XH, Ye PY. Impact of proportion of left turn flow at signalized intersections on urban road network efficiency. Journal of Tongji University, 2008,8:1067–1072 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3321/j.issn:0253-374X.2008.08.011]
- [30] Tan GZ, Sun JH, Wang BC, Yao WH. Solving Chinese postman problem on time varying network with timed automata. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2011,22(6):1267–1280 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4033.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.04033]

附中文参考文献:

- [1] 李树彬,吴建军,高自友,林勇,傅白白.基于复杂网络的交通拥堵与传播动力学分析.物理学报,2011,60(5):050701. [doi: 10.7498/aps.63.010508]
- [7] 敬明,邓卫,王昊,季彦姝.基于跟车行为的双车道交通流元胞自动机模型.物理学报,2012,61(24):323–331. [doi: 10.7498/aps.61.244502]
- [8] 赵韩涛,毛宏燕.有应急车辆影响的多车道交通流元胞自动机模型.物理学报,2013,62(6):060501. [doi: 10.7498/aps.62.060501]
- [9] 张兴强,汪滢,胡庆华.交叉口混合交通流元胞自动机模型及仿真研究.物理学报,2014,63(1):010508. [doi: 10.7498/aps.63.010508]
- [16] 林琳,蒋昌俊.基于广义随机 Petri 网的交通信息系统建模与分析.计算机学报,2005,28(1):81–87. [doi: 10.3321/j.issn:0254-4164.2005.01.011]
- [22] 刘智勇.智能交通控制理论及其应用.北京:科学出版社,2003.51–106.
- [23] 徐杨,张玉林,孙婷婷,苏艳芳.基于多智能体交通绿波效应分布式协同控制算法.软件学报,2012,23(11):2937–2945. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/2937.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04307]
- [28] 陈颖雪,吴兵.单行道系统动态优化的若干问题探讨.城市道桥与防洪,2007,4(4):94–96. [doi: 10.3969/j.issn.1009-7716.2007.04.029]
- [29] 陈小鸿,叶彭姚.交叉口左转车流比例对路网运行效率的影响.同济大学学报(自然科学版),2008,8:1067–1072. [doi: 10.3321/j.issn:0253-374X.2008.08.011]
- [30] 谭国真,孙景昊,王宝财,姚卫红.时变网络中国邮路问题的时间自动机模型.软件学报,2011,22(6):1267–1280. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4033.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.04033]



孙景昊(1985—),男,河北沧州人,博士,讲师,主要研究领域为实时系统调度算法,最优化理论,时间自动机。



张鑫(1995—),女,硕士生,主要研究领域为实时演算理论,智能交通系统。



关楠(1981—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究领域为实时系统,嵌入式系统。



杨丰源(1993—),男,硕士生,主要研究领域为交通信号控制优化算法。



邓庆绪(1970—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为实时嵌入式系统,可重构计算,物联网。