

考虑边界交叉口交通拥堵的反馈阀门控制

张卫华, 陈 森, 丁 恒[†]

(合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 基于路网宏观基本图(macroscopic fundamental diagram, MFD)实施城市区域交通控制时, 为了防止边界交叉口受阻方向的车辆排队长度过长, 同时提高路网内车辆完成率, 提出了考虑受控区域边界交叉口交通拥堵状况的交通流反馈阀门控制方法, 通过对边界控制阀门处路段停放车辆富余空间的分析, 提出了阀门交叉口位置和数量选择模型; 针对可能造成的阀门交叉口交通拥堵, 提出了受控区域边界拥堵交通流分配算法, 也即通过提前调节阀门上游交叉口的绿灯时间, 把部分交通流提前控制在其它相邻上游交叉口. 通过实际路网仿真, 结果表明该方法可以有效控制阀门交叉口的车辆排队长度, 降低阀门交叉口车辆平均延误时间和平均停车次数.

关键词: 城市交通; 交通拥堵; 边界控制; 流量分配算法; 宏观基本图

引用格式: 张卫华, 陈森, 丁恒. 考虑边界交叉口交通拥堵的反馈阀门控制. 控制理论与应用, 2019, 36(2): 241 – 248

DOI: 10.7641/CTA.2018.70031

Feedback gating control considering the congestion at the perimeter intersection

ZHANG Wei-hua, CHEN Sen, DING Heng[†]

(School of Automobile and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China)

Abstract: The present study is dedicated to exploring how actualizing the perimeter control on basis of the macroscopic fundamental diagram (MFD) of road network. In order to prevent the over-long queue at blocked direction of perimeter intersection and improve the vehicle completion rate in the network, a feedback gating control method considering the congestion at the perimeter intersection was proposed. A selecting model for intersection location and quantity was proposed after analyzing the surplus volume at the perimeter control gating section. Then, a congestion flow assignment algorithm was put forwarded to deal with the possible traffic congestion at the gating intersection. The assignment algorithm was applied to control part of the traffic at adjacent upstream intersections in advance by regulating the signal timing (green light time) of gating upstream intersection. The simulation results showed that the proposed method could effectively control the queue length, reduce the average delay and the average number of stops at the gating intersection.

Key words: urban traffic; traffic congestion; perimeter control; traffic flow assignment algorithm; macroscopic fundamental diagram

Citation: ZHANG Weihua, CHEN Sen, DING Heng. Feedback gating control considering the congestion at the perimeter intersection. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(2): 241 – 248

1 引言

随着机动化的发展, 城市路网容量已难以满足快速增长的交通需求, 导致城市交通拥堵问题日益突出, 而实施精准的城市交通控制是提高交通效率和缓解城市交通拥堵的重要措施之一. 关于交通控制的研究国内外学者主要集中在单点交叉口和干道协调控制两方面, 包括单点信号控制算法和信号控制相位优化

模型及求解算法方面^[1-2]、路网信号协调控制算法和实时信号控制模型等^[3-4]; 对于过饱和状态下的信号控制, 相关学者也做了很多研究^[5-6]; 此外, 关于区域交通控制的研究成果也非常丰富, 但既有研究绝大多数是针对拥堵发生后的被动疏散, 这也使得控制策略难以达到期望的控制效果.

近年来, 很多学者开展了基于宏观基本图(macro-

收稿日期: 2017-01-15; 录用日期: 2018-07-02.

[†]通信作者. E-mail: dingheng@hfut.edu.cn; Tel.: +86 551 62919161.

本文责任编辑: 贾英民.

国家自然科学基金项目(51578207, 61304195), 安徽省自然科学基金项目(1408085QF111), 安徽省科技攻关计划项目(1704d0802189)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51578207, 61304195), the National Natural Science Foundation of Anhui Province (1408085QF111) and the Anhui Science and Technology Project (1704d0802189).

scopic fundamental diagram, MFD)的区域交通控制研究. MFD概念由Godfrey于1969年首次提出^[7]. 自Daganzo, Geroliminis, Gonzales等^[8-10]先后采用日本横滨、肯尼亚内罗毕的交通流检测数据验证了其存在性以来, MFD作为一种描述路网平均流量、平均密度、平均速度之间的关系逐渐被国内外学者所认可. MFD描述了特定路网内上述3个变量之间稳定可再现的函数关系, 同时也反映出网络内移动的车辆数和流出网络车辆数(完成量)之间的关系. 由于利用MFD特性对路网实施交通控制无需了解路网复杂的OD分布并可有效掌握路网动态参数, 近年来在交通控制领域的应用得到快速发展. 根据研究区域数量的不同, 现有基于MFD的区域控制方法可分为单个区域入口边界控制、两个区域入口边界控制和多个区域边界控制^[11-19]; 有学者通过对交通信号的迭代学习控制, 确保交通流在更优的宏观基本图下运行^[20]; 也有部分学者充分考虑路网中机动车的运行效率和燃油状况, 提出了相应的边界控制方法^[21-22]. 这些边界控制方法中, 绝大部分研究成果是以提高所控制路网内交通流完成率为目标, 而往往忽略了边界排队对控制区域外围路网交叉口和路段运行状态的影响. 虽然Haddad^[14]在研究两个区域最优控制时初步考虑了车辆在边界处的排队问题, 但是对于如何消除边界阀门处车辆排队的影响并未提供相应的控制方法.

为解决控制边界阀门处交叉口的队列平衡和管理问题, 在Keyvan-Ekbatani等^[11]提出的反馈阀门控制方法基础上, 探究考虑边界交叉口拥堵的反馈阀门控制方法, 构建边界阀门交叉口位置选择模型和边界阀门交叉口拥堵流量分配算法, 并通过协调阀门交叉口和其相邻上游交叉口各相位的绿灯时间, 把即将拥堵在阀门交叉口的交通流量控制在其相邻上游交叉口, 以此来实现缓解阀门交叉口交通拥堵的目的.

2 宏观网络反馈阀门控制方法

2.1 宏观基本图简介

Daganzo等^[10]从理论上证明了同质路网上的车辆数与离开路网的交通流量呈现如图1所示的单峰型关系, 其中横轴代表网络内车辆数 n , 纵轴代表网络车辆完成率 $Q(n)$. 随着网络内移动的车辆数的增加, 网络车辆完成率也增加; 当网络内车辆数增加到临界车辆数 n_{cr} 时, 车辆完成率达到最大值 $Q(n)_{max}$. 随着网络内的车辆数继续增加, 网络车辆完成率开始下降, 这时网络呈现拥堵状态. 为了避免网络拥堵, 需要将网络车辆完成率控制在峰值附近, 也就是将网络内车辆数控制在 n_{cr} 附近.

研究表明^[23], 车辆完成率与网络内移动的车辆数的回归模型为

$$Q(n) = \alpha n^3 + \beta n^2 + \gamma n + \eta, \quad (1)$$

式中: $Q(n)$ 为网络内车辆完成率(veh/h); n 为网络内移动的车辆数(veh); $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ 为模型待定系数.

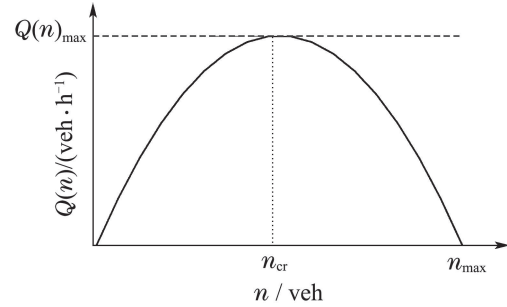


图1 区域宏观基本图

Fig. 1 The MFD of Road Network

路网存在理想MFD的前提是路网内车流具有同质性. 针对一些非同质路网, 需要将其划分为若干个独立拥有MFD的同质子路网(如图2), 具体划分方法可参考文献[24].

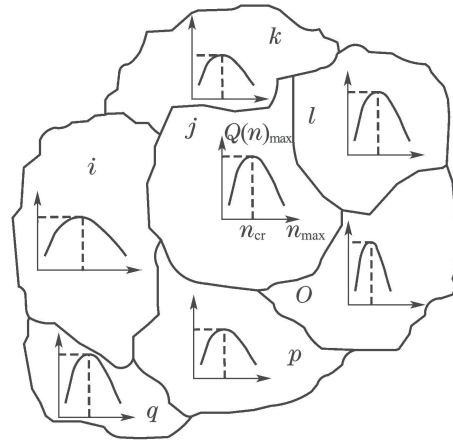


图2 基于宏观基本图的非同质路网划分示意图

Fig. 2 The diagrams of the heterogeneous network based on MFD

2.2 反馈阀门控制方法

基于城市道路交通网络MFD, 针对车流密度同质性的路网, 文献[11]提出了反馈阀门控制方法. 该方法根据路网MFD特性, 对路网区域交通运行状态进行总体调控, 利用由关键节点和路段上检测器采集的数据对网络流入量 q_{in} 、网络内车辆数 $n(t)$ 和网络车辆完成率 $Q(n)$ 进行监控, 通过区域边界设置的“控制阀门”控制网络流入量 q_{in} , 将网络内移动的车辆数控制在 n_{cr} 值附近, 以达到提高网络车辆完成率的目的. 基于MFD的路网反馈控制逻辑如图3所示, 图中: K_P 和 K_I 分别为PI控制比例和积分系数, ξ 为输出相关系数, q_d 为不受边界控制的随机扰动交通量, q_{out} 为网络流出交通量.

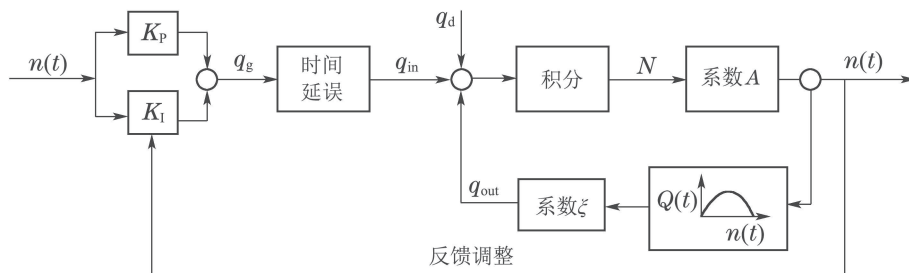


图3 路网反馈阀门控制逻辑图

Fig. 3 The feedback gating control logic diagram of road network

3 考虑边界交叉口拥堵的反馈阀门控制方法

上述反馈阀门控制方法仅考虑所控制子区路网内道路的通行效率,而忽略了子区边界阀门处的队列平衡和管理问题,该方法为了让子区路网内交通效率保持在较高水平,往往牺牲了子区外围道路的通行效率。为了克服上述控制方法的缺点,考虑阀门处的队列平衡和管理问题,下面对该控制方法进行改进,提出阀门位置选择模型和阀门处拥堵流量分配算法(边界阀门交叉口拥堵流量是指边界阀门交叉口进口道停车等待车辆数)。通过提前改变阀门位置相邻上游交叉口各相位的绿灯时间,把即将拥堵甚至溢出在阀门处的交通量提前控制在其它上游交叉口(控制措施即通过减少相邻上游交叉口流入阀门方向的相位绿灯时间,来减少下一时刻阀门位置的到达流量)。控制流程如图4所示。

图4中: $Q(t)$ 为PI控制器计算出 t 时刻通过阀门应

流入子区网络总的车辆数; $Q_{in}(t)$ 为子区外至子区内的实际交通需求; q_{in} 为通过阀门流入子区网络车辆数,当 $Q_{in}(t)$ 大于 $Q(t)$ 时, q_{in} 等于 $Q(t)$, 反之则 q_{in} 等于 $Q_{in}(t)$; $n(t)$ 为 t 时刻子区网络内车辆数。

图4中控制流程表示网络有2种交通状态。第1种状态: 当网络车辆数接近 n_{cr} 时, 阀门启动控制模式(即开始实施反馈阀门控制方法), 如果边界阀门交叉口处的实际交通需求大于 $Q(t)$, 启动交叉口拥堵流量分配算法, 将多出的流量分配到上游交叉口未饱和进口道, 而此时流入网络的流量为 $Q(t)$, 可以采用交叉口动态信号控制(控制相应出口道绿灯时间)来实现; 第2种状态: 由于阀门控制效果和交通需求的减少, 子区网络内车辆数 $n(t)$ 逐渐减少, 网络已经不再拥堵, 阀门将不实施控制, 也即阀门交叉口为正常的定时信号控制, 入口流量为实际交通需求 $Q_{in}(t)$, 因边界阀门整体通行能力不小于交通需求, 此时阀门处不会出现排队拥堵现象。

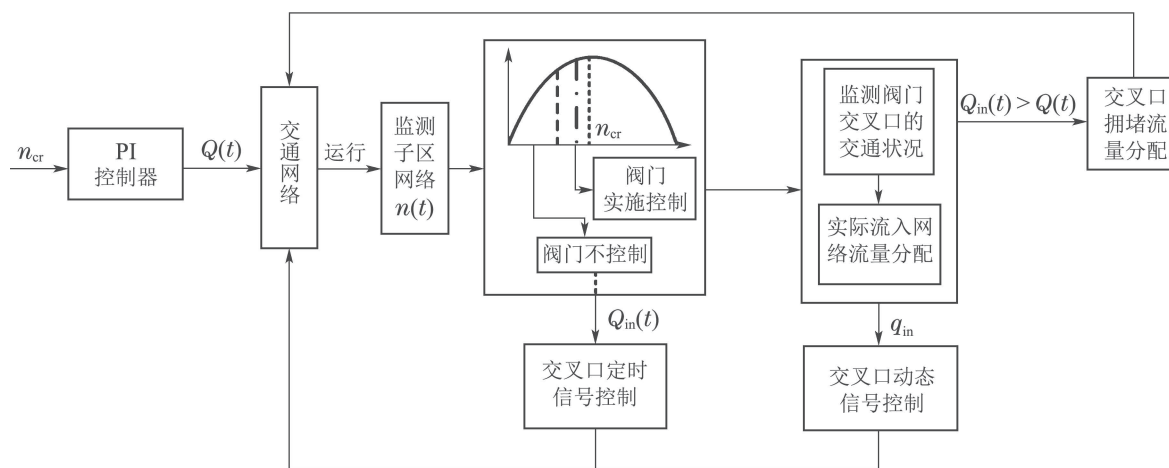


图4 路网控制流程图

Fig. 4 The control flow chart of Road Network

3.1 阀门交叉口位置选择模型

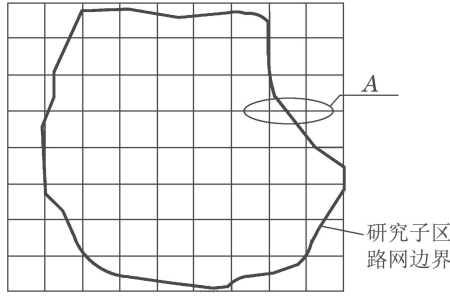
理论上研究区域路网边界处所有交叉口上游路段都可以作为控制阀门。当研究路网区域较大时,边界处交叉口数目比较多,如果这些交叉口都作为

阀门交叉口,会加大流量分配算法的复杂性和资源的浪费,还有可能造成一些阀门处交叉口的严重拥堵。一般阀门交叉口位置选择遵循2个依据: 1) 可以为排队车辆提供足够的空间; 2) 对边界上游交叉口

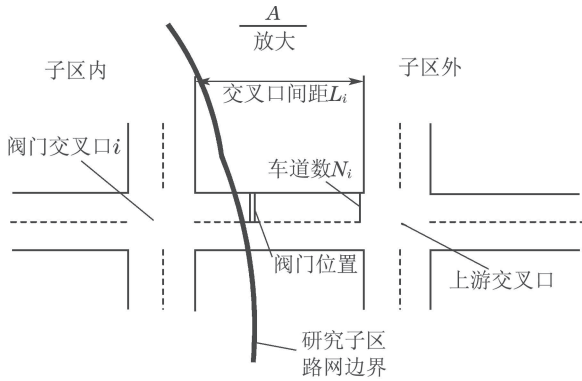
交通流状态产生最小的影响。

假设研究区域路网边界有 m 个可供选择阀门位置的交叉口, 可选阀门交叉口 i 与上游相邻交叉口之间的距离为 L_i , 可选阀门处路段单向进口车道数为 N_i , 可选阀门处路段(即可选阀门位置所属路段)的实际交通需求最大值为 $Q_{i \max, \text{in}}$, λ 为车均停车长度, 如图5所示, 则评估边界处交叉口 i 重要度模型为

$$\text{IMPI}_i = L_i \times N_i - \lambda \times Q_{i \max, \text{in}}. \quad (2)$$



(a) 宏观基本图子区及其路网示意图



(b) 子区边界控制阀门放大示意图

图5 子区路网和边界阀门示意图

Fig. 5 The diagrams of sub-region network and perimeter gating

IMPI_i 值越大, 可选阀门处路段停放车辆的富余空间值越大, 说明交叉口 i 更适合作为阀门交叉口。

除了确定阀门位置, 还需要确定阀门个数, 其确定的原则是要使得所有阀门交叉口最大绿灯时间下的整体通行能力不小于子区外至子区内的实际交通最大需求量, 这样可以确保在不启动阀门控制时边界交叉口不会出现过饱和状态, 也即保证阀门交叉口服务能力的降低(引起排队拥堵)主要是由于启动阀门控制后造成的。边界交叉口阀门个数的选择模型为

$$Q_{\text{in}}(t)_{\max} \leq \sum_{i=1}^n S_i, \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{in}}(t)_{\max}$ 为流入网络边界实际交通需求的最大值; S_i 为在最大绿灯时间下, 阀门交叉口 i 的通行

能力。

通过计算所有边界交叉口 IMPI_i , 并从大到小排列, 取前 n 个 IMPI_i 值较大且满足式(3)要求的交叉口作为阀门交叉口, 由此可计算出合适的 n 个阀门。

3.2 阀门交叉口流入量分析

网络流入量是指通过子区边界流入子区路网的车辆数, 阀门交叉口 i 在 t 时刻的实际流入流量为

$$q_{i, \text{in}}(t) = \min\{Q(t) \times \alpha_i, Q_{i, \text{in}}(t)\}, \quad (4)$$

其中: $q_{i, \text{in}}(t)$ 为阀门交叉口 i 在 t 时刻的实际流入量; α_i 为分配到阀门交叉口 i 的网络流入量占总网络流入量比例; $Q_{i, \text{in}}(t)$ 为阀门交叉口 i 阀门路段在 t 时刻的交通需求。

为了尽可能减少阀门控制对阀门交叉口状态影响, 充分考虑每个阀门交叉口的交通需求和通行能力条件下, 分配到阀门交叉口 i 的网络流入量的比例为^[25]

$$\alpha_i = \frac{[Q_{i, \text{in}}(t)]^2 [S_i - S_i(t)]}{\sum_i [Q_{i, \text{in}}(t)]^2 [S_i - S_i(t)]}, \quad (5)$$

其中: S_i 为在最大绿灯时间下阀门交叉口 i 阀门路段的通行能力; $S_i(t)$ 为 t 时刻阀门交叉口 i 阀门路段的通行能力。

阀门交叉口 i 处网络流入量所属车道组的绿灯时间为

$$t_i(t) = \frac{q_{i, \text{in}}(t)}{S_i} \times T_i, \quad (6)$$

其中: $t_i(t)$ 为阀门交叉口 i 处网络流入量所属车道组的绿灯时间; T_i 为交叉口 i 的周期时长。

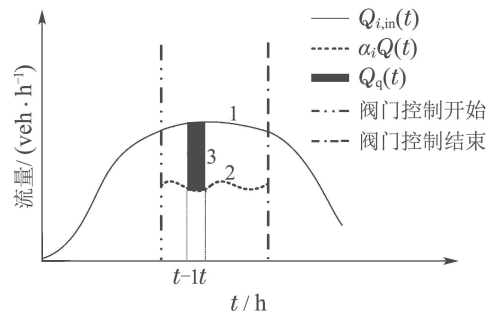


图6 子区边界阀门交叉口拥堵流量示意图

Fig. 6 The diagram of perimeter gating intersection congestion flow in sub-region

阀门交叉口 i 的实际交通需求量 $Q_{i, \text{in}}(t)$ 是随着时间 t 变化的函数(如图6中的线1所示), 由PI控制器计算得到的 t 时刻分配给阀门交叉口 i 的网络流入量为 $\alpha_i Q(t)$ (如图6中的线2所示), 从图中可以看出实际交通需求 $Q_{i, \text{in}}(t)$ 要大于计算分配的流量 $\alpha_i Q(t)$ 。采用反馈阀门控制后, 在 $t-1$ 时刻到 t 时刻这段时间

内拥堵在阀门处的交通量 $Q_q(t)$ 为 $\int_{t-1}^t (Q_{i,\text{in}}(t) - \alpha_i Q(t))dt$, 如图6中的线3所示. 为减少阀门处的交通拥堵, 改进的反馈阀门控制方法是将拥堵交通量 $Q_q(t)$ 提前控制在阀门交叉口 i 相邻的上游交叉口(即通过改变相邻上游交叉口的信号配时, 来减少在 $t-1$ 时刻至 t 时刻的阀门交叉口 i 的到达量), 减缓阀门交叉口 i 的排队车辆数, 以达到减少边界交叉口排队长度和平均延误的目的.

3.3 边界阀门交叉口拥堵流量分配算法

如上所述, 既有的反馈阀门控制方法只利用了阀门交叉口相邻路段的存储能力, 没有充分利用研究区域外路段的存储能力, 极有可能引起边界阀门交叉口上游路段的排队溢出, 降低边界外路网的运行效率. 为此, 提出考虑拥堵流量分配算法的反馈阀门控制方法, 不仅可以使得研究路网内的通行效率高, 而且通过施加分配算法, 将子区边界阀门处的排队车辆控制在子区路网外的多个路段上, 以避免阀门处路段出现拥堵.

边界阀门交叉口拥堵流量分配算法流程如图7所示, 算法流程是按照拥堵流量从阀门处向外围交叉口逐层控制的方式进行设计的, 基于拥堵流量越往外围交叉口分配比例越小的特征, 算法将通过比较最终的流量分配比率 K 与拥堵流量分配设定的阈值 α 来确定分配次数 n . 具体步骤如下:

步骤1 计算 $t-1$ 到 t 时刻阀门交叉口 i 的拥堵流量(堵在阀门路段), $P_1 = \int_{t-1}^t (Q_{i,\text{in}}(t) - \alpha_i Q(t))dt$;

步骤2 在 $t-1$ 时刻将阀门交叉口 i 在 $t-1$ 时刻到 t 时刻的拥堵流量(阀门路段排队车辆)控制在交叉口 i 相邻的上游交叉口及上上游交叉口(以十字路口为例, 则将流量控制在上游交叉口的3个进口道, 通过在 $t-1$ 时刻减少上游交叉口流向阀门处的绿灯时间来减少相应进口道的流出量), 各进口道分配的流量分别为 $k_{nl}P_n$, 其中 $l = 1, 2, 3$, n 为分配次数, $K = \prod_{l=1}^n k_{nl}$;

步骤3 计算相邻上游交叉口流向阀门相位对应进口道绿灯时间

$$G_{jl} = G_{jl}(t) - \frac{k_{nl}P_n}{s_{jl}}, \quad l = 1, 2, 3,$$

式中: j 为上游交叉口编号, $G_{jl}(t)$ 为相邻上游交叉口流向阀门方向的对应进口道相位初始绿灯时间, s_{jl} 为上游交叉口单位绿灯时间内流向阀门方向对应进口道的饱和流率;

步骤4 若 $K > \alpha$, 转步骤5; 否则, 转步骤6;

步骤5 将 $K > \alpha$ 的相应进口道路段作为拥堵疏

散路段, 更新流量分配阀门交叉口 i 为上游 j 位置, 令 $n = n + 1$, $P_n = k_{(n-1)l}P_{n-1}$ ($l = 1, 2, 3$), 转步骤2;

步骤6 计算上述相应进口道的各项评价指标(包括交叉口平均停车次数, 交叉口平均延误, 交叉口平均排队长度等);

步骤7 结束.

算法中: α 为拥堵流量分配比率阈值, 即 $K \leq \alpha$ 时, 拥堵流量无需再向上游交叉口分配; k_{nl} 为拥堵流量分配比, 即交叉口 i 阀门路段第 n 次分配时, 相邻上游交叉口第 l 个进口路段分配的拥堵车辆数占此次分配拥堵总车辆数的比值, k_{nl} 的取值可由进口路段 l 的富余空间大小决定.

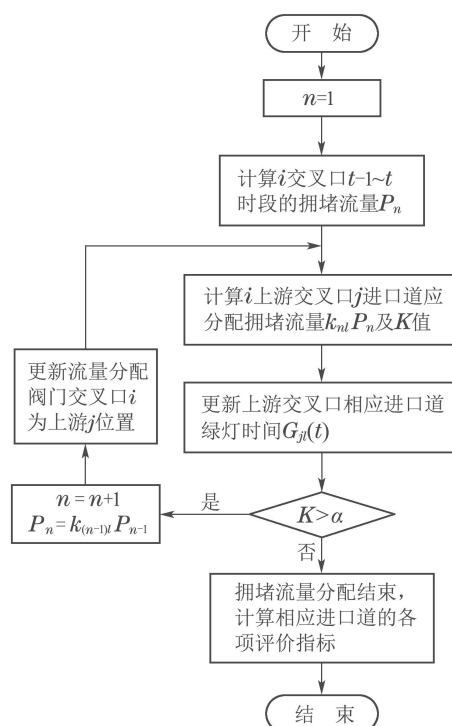


图7 拥堵流量分配算法流程图

Fig. 7 The flow chart of congestion flow assignment algorithm

4 案例分析

4.1 仿真参数标定

如图8所示, 以某市滨湖新区道路网作为研究对象. 该区域面积约为20 km², 路段长度范围为300 ~ 820 m, 路网交叉口数量75个、路网交叉口周期时长90 ~ 120 s、边界交叉口数量26个、边界交叉口周期时长90 ~ 120 s、对外交通车道数92条. 区域边界设置18个“控制阀门”.

根据VISSIM仿真实验结果, 可以得到该区域MFD曲线方程系数为

$$\alpha = 5.634 \times 10^{-10},$$

$$\beta = -9.918 \times 10^{-5},$$

表 1 不同控制方法的效果对比

Table 1 The effect comparison of different control methods

控制方法	交叉口平均 停车次数/次	交叉口平均 延误/s	网络离开车 辆数/veh	网络车辆平 均行程时间/h	平均排队长 度/veh
NC	1.41	52.99	53416	0.32	18.48
PI阀门控制	2.91	109.08	57120	0.26	28.69
SFPI阀门控制	1.08	40.60	57832	0.25	12.04
(PI-SFPI)/PI改 善效果/%	62.88	62.77	1.25	2.76	58.03
(NC-PI)/PI改 善效果/%	-51.54	-51.42	-35.59	23.08	6.50

5 结论

1) 基于反馈阀门控制方法, 提出了阀门交叉口位置选择模型, 使阀门交叉口位置的选择依据从定性分析到定量分析, 有利于更合理地选择阀门交叉口。

2) 考虑反馈阀门控制方法中存在的阀门处交叉口拥堵问题, 提出了拥堵流量分配算法。该方法解决了阀门处交叉口路段排队过长甚至溢出问题, 可有效降低阀门处交叉口的延误、停车次数和排队长度。

本次研究中选取的阀门位置是静态的。由于路网拥堵区的变化, 通过应用实时的阀门位置识别算法如何获得动态的阀门位置还有待进一步研究。此外, 所提出的考虑边界交叉口拥堵的反馈阀门控制方法只针对单个控制子区, 如何解决多个关联MFD子区的边界交叉口拥堵也有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] CHANG T H, LIN J T. Optimal signal timing for an oversaturated intersection. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2000, 34(6): 471 – 491.
- [2] CHANG T H, SUN G Y. Modeling and optimization of an oversaturated signalized network. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2004, 38(8): 687 – 707.
- [3] ABOUDOLAS K, PAPAGEORGIOU M, KOSMATOPOULOS E. Store-and-forward based methods for the signal control problem in large-scale congested urban road networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2009, 17(2): 163 – 174.
- [4] ABOUDOLAS K, PAPAGEORGIOU M, KOUVELAS A, et al. A rolling-horizon quadratic-programming approach to the signal control problem in large-scale congested urban road networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2010, 18(5): 680 – 694.
- [5] TANG Dehua, XU Lunhui, LIN Quan. Multi-objective control model of over-saturated signalized intersection. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(19): 5726 – 5729.
(唐德华, 许伦辉, 林泉. 过饱和信号交叉口的多目标控制模型. 科学技术与工程, 2009, 9(19): 5726 – 5729.)
- [6] CHEN J, YUAN C L. Urban oversaturated traffic network control based on preference multi-objective compatible optimization control. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(10): 13 – 16.
- [7] GODFREY J W. The mechanism of a road network. *Traffic Engineering and Control*, 1969, 11(7): 323 – 327.
- [8] DAGANZO C F. Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2007, 41(1): 49 – 62.
- [9] GONZALES E J, CHAVIS C, LI Y, et al. *Multimodal transport modeling for Nairobi, kenya: insights and recommendations with an evidence based model*. Berkeley, CA: UC Berkeley Center for Future Urban Transport, 2009.
- [10] GEROLIMINIS N, DAGANZO C F. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2008, 42(9): 759 – 770.
- [11] KEYVAN-EKBATANI M, KOUVELASA, PAPAMICHAIL I, et al. Exploiting the fundamental diagram of urban networks for feedback-based gating. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2012, 46(10): 1393 – 1403.
- [12] HADDAD J, SHRAIBER A. Robust perimeter control design for an urban region. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, 68: 315 – 332.
- [13] Fu H, LIU N, HU G. Hierarchical perimeter control with guaranteed stability for dynamically coupled heterogeneous urban traffic. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 83: 18 – 38.
- [14] HADDAD J. Optimal perimeter control synthesis for two urban regions with aggregate boundary queue dynamics. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 96: 1 – 25.
- [15] DING H, ZHANG Y, ZHENG X Y, et al. Hybrid perimeter control for two-region urban cities with different states. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, DOI: 10.1109/TCST.2017.2746061.
- [16] DING Heng, ZHENG XiaoYan, ZHANG Yu, et al. Optimal control for traffic congested area boundary in macroscopic traffic network. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(6): 111 – 120.
(丁恒, 郑小燕, 张雨, 等. 宏观交通网络拥堵区边界最优控制. 中国公路学报, 2017, 30(1): 111 – 120.)
- [17] DING Heng, GUO Fang, JIANG Chengbin, et al. Coordinated method of perimeter control for multiple MFD sub-regions. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(4): 548 – 559.
(丁恒, 郭放, 蒋程斌, 等. 多个MFD子区边界协调控制方法. 自动化学报, 2017, 43(4): 548 – 559.)
- [18] DING H, GUO F, ZHENG X Y, et al. Traffic guidance-perimeter control coupled method for congestion area of marco network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 81: 300 – 316.

- [19] ZHOU Z, SCHUTTER B D, LIN S, et al. Two-Level hierarchical model-based predictive control for large-scale urban traffic networks. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, 25(2): 496 – 508.
- [20] YAN Fei, TIAN Fuli, SHI Zhongke. Iterative learning control of urban traffic signals and its influence on macroscopic basic map of road network. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(5): 645 – 652.
(闫飞, 田福礼, 史忠科. 城市交通信号的迭代学习控制及其对路网宏观基本图的影响. 控制理论与应用, 2016, 33(5): 645 – 652.)
- [21] ZHANG Weihua, CHEN Sen, DING Heng. The traffic control model based on efficiency and fuel consumption of the road network. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2016, 16(6): 74 – 80.
(张卫华, 陈森, 丁恒. 基于燃油消耗与交通效率的区域交通控制模型. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(6): 74 – 80.)
- [22] DING Heng, HUANG Wenjuan, CHEN Sen, et al. Boundary signal optimization for congestion network based on energy saving. *System Engineering Theory and Practice*, 2017, 37(3): 700 – 709.
(丁恒, 黄文娟, 陈森, 等. 拥堵交通网络能耗节约边界信号优化方法. 系统工程理论与实践, 2017, 37(3): 700 – 709.)
- [23] GEROLIMINIS N, HADDAD J, RAMEZANI M. Optimal perimeter control for two urban regions with macroscopic fundamental diagrams: a model predictive approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(1): 348 – 359.
- [24] JI Y, GEROLIMINIS N. On the spatial partitioning of urban transportation networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2012, 46(10): 1639 – 1656.
- [25] JI Y B, MO C, MA W, et al. Feedback gating control for network based on macroscopic fundamental diagram. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 2016(1398): 1 – 11.

作者简介:

张卫华 博士生导师, 主要研究方向为交通系统规划理论与方法、交通管理与控制、交通安全, E-mail: ahweihua@163.com;

陈森 硕士研究生, 主要研究方向为交通管理与控制, E-mail: 1272604167@qq.com;

丁恒 硕士生导师, 主要研究方向为交通管理与控制、智能交通系统, E-mail: dingheng@hfut.edu.cn.