

均衡流量和饱和度的交通瓶颈控制

朱海峰[†], 刘畅, 温熙华, 刘彦斌, 韦学武, 刘云鹏

(中电海康集团研究院, 浙江 杭州 310012)

摘要: 为快速疏散交通瓶颈, 提出一种均衡流量和饱和度的交通控制方法. 首先, 利用过车数据获得各路段与瓶颈的关联度, 据此得到相关路段, 并依据路段剩余空间和排队增长趋势确定可控与不可控路段; 其次, 依据瓶颈的流量和排队长度, 确定总消散量, 并分配到可控路段上; 可控路段再依据约束条件动态调节分配量, 并进行绿灯时长优化; 同时不可控路段将多余流量均衡到周边路段; 然后, 以饱和度均衡为目标进行配时优化. 从而, 该方法可消散已识别瓶颈, 消除潜在瓶颈. 最后, 通过仿真实验对所提方法的有效性进行了验证.

关键词: 交通控制; 交通拥堵; 均衡约束; 动态仿真; 信号优化

引用格式: 朱海峰, 刘畅, 温熙华, 等. 均衡流量和饱和度的交通瓶颈控制. 控制理论与应用, 2019, 36(5): 816 – 824

DOI: 10.7641/CTA.2018.80009

Traffic bottleneck control with flow equilibrium and saturation equilibrium

ZHU Hai-feng[†], LIU Chang, WEN Xi-hua, LIU Yan-bin, WEI Xue-wu, LIU Yun-peng

(CETHIK Group Corporation Research Institute, Hangzhou Zhejiang 310012, China)

Abstract: In order to evacuate traffic bottleneck, a traffic control method aims at flow equilibrium and saturation equilibrium is proposed. Firstly, the relevancies between the other roads and bottleneck are calculated by analyzing passing record of vehicles, according to which the related roads are obtained, and the controllable and uncontrollable roads are identified based on the remaining capacity of the related roads and the growth trend of queuing; Secondly, by calculating queue length and flow of bottleneck, total flow that need to be adjusted is obtained and assigned to controllable roads. For each controllable road, real allocation of flow is adjusted dynamically taking consideration of constraints, and green time is optimized; At the same time, for each uncontrollable road, extra traffic flow is assigned to surrounding roads; Then green time is optimized to achieve saturation equilibrium. Thus, this method can dissipate the identified bottlenecks and eliminate the potential bottlenecks. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by simulation experiments.

Key words: traffic control; traffic congestion; equilibrium constants; dynamic simulation; signal optimization

Citation: ZHU Haifeng, LIU Chang, WEN Xihua, et al. Traffic bottleneck control with flow equilibrium and saturation equilibrium. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(5): 816 – 824

1 引言

随着我国机动车保有量逐年上升, 很多城市路网出现交通需求大于道路供给能力, 进而产生拥堵的问题^[1], 车辆无法在绿灯时间内得到有效释放, 造成路段排队长度逐渐增加, 接近或等于路段长度, 引发排队上溯、形成路段“瓶颈”^[2], 在城市道路中, 瓶颈路段是影响交叉口通行能力、造成路网瘫痪的潜在因素. 因此, 以瓶颈路段拥堵疏散为目标的交通控制方法, 逐渐成为研究的热点.

朱文兴等^[3]通过对区域内交叉口周期时长和绿灯

时间进行优化, 以减少行车延误. 赵莹莹^[4]通过需求控制和供给控制, 对与瓶颈直接相连的上下游交叉口信号配时进行优化, 达到减少路段排队的目的, Ma 等^[5]基于线圈检测数据, 提出了滚动时间占有率的基本概念及统计方法, 研究了排队长度与基本检测信息的对应关系, 确定了针对不同检测器布设位置的瓶颈触发与消散阈值. 朱仁伟^[6]提出了基于滞留车辆压力的多进口道增流控制方法. 朱森来等^[7]以交通网络储备容量模型为基础, 提出了宏观交通网络潜在瓶颈路段识别方法, 并设计了储备容量模型的求解算法.

收稿日期: 2018–01–04; 录用日期: 2018–06–01.

[†]通信作者. E-mail: rim611@163.com.

本文责任编辑: 徐建闽.

工信部2016年工业转型升级(中国制造2025)项目(0714-EMTC02-5737/5)资助.

Supported by the Industrial Transformation and Upgrading Project of Ministry of Industry and Information Technology in 2016 (Made in China 2025) (0714-EMTC02-5737/5).

Sun等^[8]针对瓶颈交叉口及上下游交叉口为优化对象, 提出一种实时优化方法. 孙凌涛^[9]根据路段与路径的所属关系, 确定瓶颈路段车流交通负荷与上下游路段交通流之间的影响率及分担率, 提出了多点联动瓶颈控制方法. 王力等^[10]提出一种基于分群同步的多智能体路网协调方法, 来缓解城市局部拥堵. 王福建等^[11]通过关键路径的筛选, 定位上游可控制路段, 利用负荷度均分的思想提出了一种基于过车信息的瓶颈控制方法.

文献[3-9]没有提到流量均衡的概念, 文献[10]没有考虑路段状态的实时变化, 文献[11]考虑了负荷均分, 但在控制的过程中, 忽视了潜在瓶颈或不可控路段的处理以及路口非相关相位^[12]的均衡问题, 容易造成拥堵转移.

本文利用电警过车数据实时动态地对流量进行溯源和追踪, 提出了一种基于流量和饱和度均衡的交通瓶颈控制方法. 实现: 1) 快速消散已识别出的瓶颈; 2) 提前缓解潜在瓶颈; 3) 路网流量均衡. 基本思想为: 将瓶颈路段的流量分散到周边路段上, 每条路段获得一定的分配量. 考虑路段承载能力的约束, 若路段本身已有较长的排队, 则不接受分配, 同时把其多余的排队作为消散对象, 也分散到周边路段上. 4) 路口非相关相位饱和度的均衡. 在控制方案实施后, 已识别出的瓶颈得到消散, 潜在的瓶颈得到消除. 基本步骤: 在识别到瓶颈后, 首先对流量进行溯源和追踪, 明确瓶颈路段流量的来源和去向, 计算需要消散的总流量, 以及上下游路段各个转向与瓶颈的关联度. 然后根据关联度判断该路段该转向是否与瓶颈相关, 确定上下游相关路段的集合. 接着根据路段剩余空间的情况, 确定瓶颈相关路段的可控性, 如路段可控, 则接受分配的消散量, 参与到瓶颈控制中; 如路段不可控, 则不接受消散量, 同时将此路段作为潜在瓶颈进行流量回溯和追踪, 将路段超出安全排队范围的流量作为新的消散量, 附加到瓶颈控制中. 将消散量按照可控路段的等级进行分配, 同时考虑到约束条件的限制, 对消散量进行动态调整, 直至流量分配完毕, 或者到达路网边缘. 最后, 以饱和度均衡为目标, 压缩或延长非相关相位绿灯时长, 完成配时优化.

主要创新点为: 1) 通过流量回溯和追踪, 给出一种利用过车数据计算上下游路段与瓶颈路段关联度的实时查询方法. 2) 考虑到路段的承载能力约束, 给出了瓶颈路段消散量的动态调整方法, 在对已识别瓶颈进行控制的同时, 消除潜在瓶颈, 实现路网流量均衡. 3) 以饱和度均衡为目标, 对非相关相位配时进行优化.

2 过车数据实时查询

定义 1 Q 为车辆数, a 为瓶颈的上游路段, lane为车道, i 为转向. 设当前时刻为 T_0 , $T_1 = T_0 - \Delta t_1$, $T_2 = T_0 - \Delta t_2$. $\Delta t_1, \Delta t_2$ 一般分别取5 min, 20 min.

假设瓶颈为路段 b . 场景示意如图1所示.

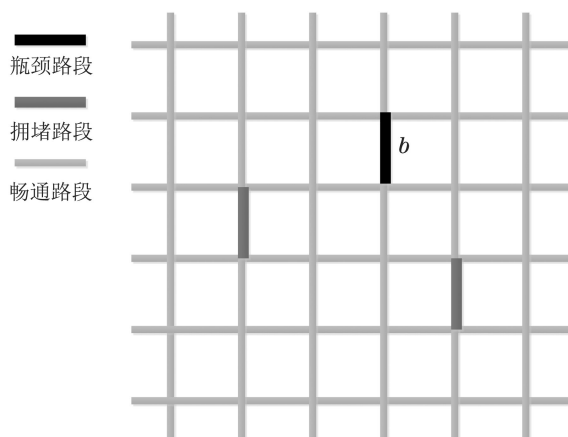


图 1 瓶颈示意图

Fig. 1 Sketch map of bottleneck

2.1 瓶颈路段流量回溯

流量回溯示意如图2所示.

Step 1 在过车记录中, 查找 T_1 到 T_0 时间段内, 所有通过瓶颈路段 b 的车辆编号, 获得车辆编号集合 CN_1 , 车辆总数 Q_{in} .

Step 2 遍历集合 CN_1 , 在过车数据表中查找每辆车在 $T_2 - T_0$ 时间段内的所有过车记录, 如果车辆在某条车道上有过车记录, 则车道的车辆数 Q_{lane} 加1. 遍历完毕获得每个车道lane通过的车辆数 Q_{lane} .

Step 3 将各路段 a 相同转向 i 的车道上的车辆数相加, 获得每条路段 a 不同转向 i 对瓶颈路段 b 贡献的车辆数 $Q_{a,b,i}$.

Step 4 用各转向的车辆数 $Q_{a,b,i}$ 除以 CN_1 集合中总车辆数 Q_{in} , 获得各路段各转向与瓶颈路段的关联度 $\alpha_{a,b,i}$:

$$\alpha_{a,b,i} = \frac{Q_{a,b,i}}{Q_{in}}. \quad (1)$$

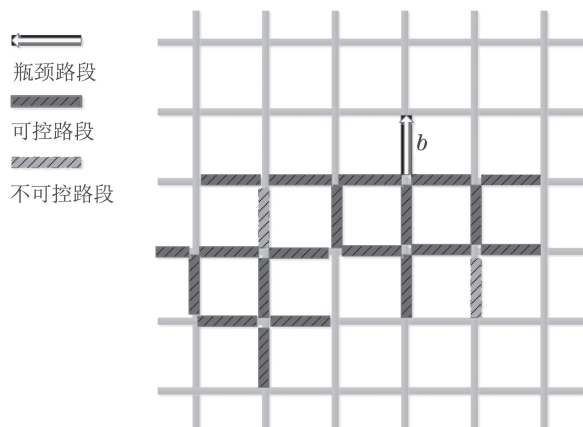


图 2 流量回溯

Fig. 2 Flow backtracking

2.2 瓶颈路段流量追踪

流量追踪示意如图3所示.

Step 1 查找 T_1 到 T_0 时间段内的所有车辆编号, 获得集合 CN_2 . 查找 T_2 到 T_0 时间段内所有通过瓶颈路段的车辆编号, 获得集合 CN_3 .

Step 2 遍历集合 CN_3 , 与 CN_2 的数据进行匹配. 若车辆编号在两个集合中都有记录, 且在 CN_3 中出现的时间早于在 CN_2 中出现的时间, 判断为匹配成功, 获得集合 CN_4 , 车辆总数 Q_{out} . 每次匹配, 将车辆在 CN_2 中出现时所在车道上的车辆数 Q_{lane} 加1. 遍历完毕获得每条车道lane通过的车辆数 Q_{lane} .

Step 3 将各路段 c 相同转向 j 的车道上的车辆数相加, 获得瓶颈路段对下游路段 c 不同转向 j 贡献的车辆数 $Q_{b,c,j}$.

Step 4 用路段 c 不同转向 j 车辆数 $Q_{b,c,j}$ 除以 CN_4 集合中总车辆数 Q_{out} , 获得瓶颈路段与路段 c 各转向 j 的关联度 $\alpha_{b,c,j}$:

$$\alpha_{b,c,j} = \frac{Q_{b,c,j}}{Q_{out}} \quad (2)$$

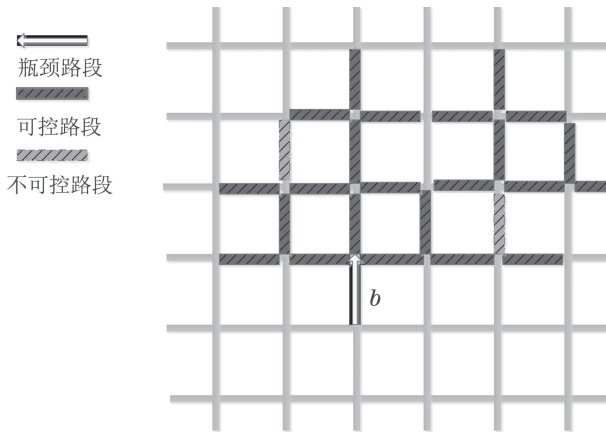


图3 流量追踪

Fig. 3 Flow tracing

3 关联路段的筛选

在进行流量回溯和追踪后, 已经获得了各路段各转向与瓶颈的关联度, 显然需要对关联度大的路段和转向进行调控. 设上下游的关联度阈值分别为 δ_1 , δ_2 , 大于阈值的路段即为瓶颈关联路段, 对上游有

$$\alpha_{a,b,i} \geq \delta_1 \quad (3)$$

对下游有

$$\alpha_{b,c,j} \geq \delta_2 \quad (4)$$

同时, 需要注意的是, 关联路段不一定都适合进行调控. 对上游路段, 若其本身的排队已经很长, 进行限流使其排队继续增加, 很容易产生新的拥堵, 造成瓶颈转移. 因此, 需要根据路段剩余容纳空间来进行调控. 首先, 定义路段的排队安全预留长度 L_{safe} . 对于每条路段, 都需要预留出一部分空间 L_{safe} 来应对流量的波动, 若路段 a 的长度为 L_a , 那么路段的安全排队长度

为 $L_a - L_{safe}$, 路段的安全排队系数为

$$\beta_a = 1 - \frac{L_{safe,a}}{L_a} \quad (5)$$

每条路段根据自身长度的不同, 有不同的安全排队系数. 路段越长, 系数越高. 那么理论上, 路段上剩余的可容纳空间 L_s 为

$$L_s = \beta_a L_a - L_{a,max} \quad (6)$$

其中 $L_{a,max}$ 为路段 a 的最大排队长度. 因路段流入流出不平衡, 会有部分车辆滞留, 造成排队长度增长. 滞留的车辆数 $Q_{a,d}$ 为路段上游流入量与下游流出量的差值:

$$Q_{a,d} = (q_{a,in} - q_{a,out})T \quad (7)$$

$q_{a,in}$ 为路段 a 流入流量, $q_{a,out}$ 为路段 a 的流出流量. 因此路段实际还可容纳的车辆数为

$$U_a = \frac{n(\beta L_a - L_{a,max})}{h_s} - Q_{a,d} \quad (8)$$

其中: h_s 为平均车头间距, n 为车道数. 若 $Q_{a,d} > 0$ 表示路段排队有自然增长, 实际可容纳车辆数比计算的少; 若 $Q_{a,d} < 0$ 表示路段排队有自然衰减, 实际可容纳车辆数比计算的多.

对于路段 a , 若 $U_a > 0$ 表示路段最多还能容纳 U_a 辆车, 在分配调节量时, 只要不超过 U_a 就可以避免新拥堵的产生, 防止拥堵转移. 若 $U_a < 0$, 表示路段本身的排队已经超出了安全范围, 不仅不能作为瓶颈相关的可控路段, 还要同瓶颈路段一样, 把超出的部分 $|U_a|$ 分散到其他路段上去.

设上游可控路段的集合为 AC_1 , 下游可控路段的集合为 AC_2 , 若上游路段可控, 需要满足

$$a \in AC_1, \text{ 如果 } \alpha_{a,b,i} \geq \delta_1 \text{ 且 } U_a > 0. \quad (9)$$

若下游路段可控, 需要满足

$$c \in AC_2, \text{ 如果 } \alpha_{b,c,j} \geq \delta_2 \text{ 且 } U_c > 0. \quad (10)$$

设上游不可控路段的集合为 AC_3 , 下游不可控路段的集合为 AC_4 , 若上游路段不可控, 需要满足

$$a \in AC_3, \text{ 如果 } \alpha_{a,b,i} \geq \delta_1 \text{ 且 } U_a < 0. \quad (11)$$

若下游路段不可控, 需要满足

$$c \in AC_4, \text{ 如果 } \alpha_{b,c,j} \geq \delta_2 \text{ 且 } U_c < 0. \quad (12)$$

4 上下游消散量的初始值

瓶颈控制的目的是有3点: 1) 快速消散已识别出的瓶颈. 2) 提前缓解潜在瓶颈. 3) 实现路网流量均衡. 因此, 总消散量包含两部分, 一部分为已识别瓶颈的待消散量, 另一部分为潜在瓶颈的待均衡量, 前者在算法开始时确定, 后者在计算过程中确定. 已识别瓶颈的待消散量包括瓶颈路段上下游流量差以及瓶颈

路段需要消散的排队车流量. 计算方式为

$$\Delta q = \sum_{a \in A_{in}} q_{a,b} - \sum_{c \in A_{out}} q_{b,c} + \frac{n_b \cdot (1 - \beta_b) \cdot L_b}{h_s \cdot T}, \quad (13)$$

$q_{a,b}$ 为上游路段 a 流入瓶颈路段 b 的流量, A_{in} 为与瓶颈直接相连的上游路段的集合, $q_{b,c}$ 为瓶颈路段驶入下游路段的流量, A_{out} 为与瓶颈直接相连的下游路段的集合, L_b 为瓶颈路段的长度.

按照瓶颈上游需求^[13]和下游剩余供给能力的比例分配消散量. 其中, 上游需求为瓶颈路段的流入流量与同其直接相连的上游路段的排队.

$$q_{demand} = \sum_{a \in A_{in}} (q_{a,b} + \frac{n_a \cdot L_g}{h_s \cdot T}), \quad (14)$$

其中 L_g 为绿灯结束时的排队长度. 下游剩余供给能力为

$$q_{supply} = \min \{S_{b,k}(\lambda_{b,k,max} - \lambda_{b,k}) | k \in K\}, \quad (15)$$

其中: K 为路段 b 转向的集合, $\lambda_{b,k,max}$ 为路段 b 转向 k 的最大绿信比, $\lambda_{b,k}$ 为路段 b 转向 k 在当前配时方案下的绿信比.

上游初始消散量为

$$\Delta q_{up} = \Delta q \cdot \frac{q_{demand}}{q_{demand} + q_{supply}}. \quad (16)$$

下游初始消散量为

$$\Delta q_{down} = \Delta q \cdot \frac{q_{supply}}{q_{demand} + q_{supply}}. \quad (17)$$

5 下游消散量动态调整

因为下游消散量 Δq_{down} 需要全部从瓶颈路段流出, 所以需要判断瓶颈路段所对应的交叉口是否可以满足调节的需求, 若下游无法分配完, 那么应把剩余的部分调整到上游. 在调整的同时, 对瓶颈路段出口交叉口相关相位的绿灯时间进行优化.

5.1 瓶颈路段理论上的绿灯延长时间

设瓶颈路段转向 k 的转向流量为 $q_{b,k}$, 流出总量为 $q_{b,out}$, 则转向 k 的分配量为

$$\Delta Q_{b,k} = \frac{T \cdot \Delta q_{down} \cdot q_{b,k}}{q_{b,out}}. \quad (18)$$

转向 k 对应的绿灯时间增加量为

$$\Delta g_{b,k} = \frac{\Delta Q_{b,k} \cdot C}{T \cdot S_{b,k}}, \quad (19)$$

其中: $S_{b,k}$ 为路段 b 转向 k 的饱和流率, C 为信号周期.

5.2 瓶颈路段实际的绿灯延长时间

设路段 b 转向 k , 原有的绿灯时间为 $g_{b,k}$, 最大绿灯时间为 $g_{b,k,max}$. 若 $g_{b,k} + \Delta g_{b,k} \leq g_{b,k,max}$, 说明分

配的量可以完全被接受, 剩余量

$$\Delta Q_{b,k,diff} = 0. \quad (20)$$

按照计算出的值更新绿灯时间. 若 $g_{b,k} + \Delta g_{b,k} > g_{b,k,max}$, 说明无法满足调节需求, 实际绿灯调节量 $\Delta g_{b,k,real}$ 为

$$\Delta g_{b,k,real} = g_{b,k,max} - g_{b,k}. \quad (21)$$

将所有的剩余量返回给上游:

$$\Delta q_{up,new} = \Delta q_{up} + \frac{\sum_k \Delta Q_{b,k,diff}}{T}. \quad (22)$$

下游消散量:

$$\Delta q_{down,new} = \Delta q_{down} - \frac{\sum_k \Delta Q_{b,k,diff}}{T}. \quad (23)$$

5.3 瓶颈路段实际的消散量

由实际的绿灯调节时间反推实际消散量:

$$\Delta Q_{b,k,real} = \frac{\Delta g_{b,k,real} \cdot T \cdot S_{b,k}}{C}, \quad (24)$$

剩余量为

$$\Delta Q_{b,k,diff} = \Delta Q_{b,k} - \Delta Q_{b,k,real}. \quad (25)$$

5.4 下游消散量分配及时配优化

根据路段的邻接关系, 与瓶颈路段直接相连的路段为一级路段, 与一级路段相连的路段为二级路段, 依次类推. 用 f 表示路段所在层级.

5.4.1 下游父子路段关系

在下游路段关系中, 父路段和子路段同属一个交叉口, 父路段为交叉口的进口路段, 子路段为从父路段出来的车辆可能驶向的交叉口出口路段. 若父路段属于第 f 层, 那么子路段属于第 $f + 1$ 层. 如图 4, 路段 1 为父路段, 路段 2, 3, 4 为子路段.

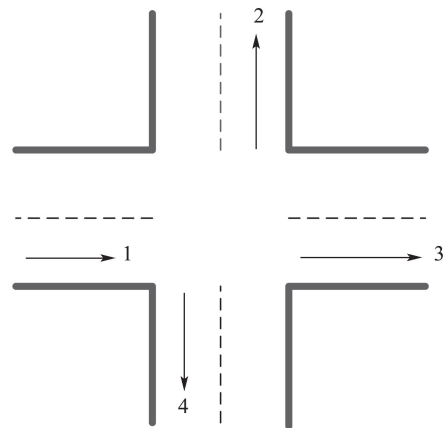


图 4 下游路段关系

Fig. 4 Relationship between downstream roads

5.4.2 分配及优化步骤

Step 1 计算可控路段消散量. 计算的核心思路是基于流量追踪结果, 对于每一级 f 可控制路段 c_f 的转向 j , 按照其占瓶颈路段流出量的比例 $\alpha_{b,c,f}$ 之比分配上一级 $f-1$ 父路段的消散量 $\Delta Q_{c,f-1}$. 初始时, 只有一个父路段, 即瓶颈路段消散量:

$$\Delta Q_{\text{down},0} = \Delta q_{\text{down,new}} \cdot T. \quad (26)$$

Step 2 从一级可控制路段开始计算 $f=1$.

Step 3 每一层级 f , 各可控路段按关联度的比例分配其父路段的消散量.

$$\Delta Q_{c,\text{assignment},f} = \frac{\alpha_{b,c,f}}{\sum_d \alpha_{b,d,f}} \Delta Q_{c,\text{assignment},f-1}, \quad (27)$$

其中路段 c_{f-1} 是路段 c_f 的父路段. 若遇到不可控路段, 对不可控路段进行流量追踪, 方法与瓶颈路段相同. 下游不可控追踪如图5所示.

不可控路段与瓶颈路段追踪到相同关联路段时, 进行关联度的叠加, 如图6所示.

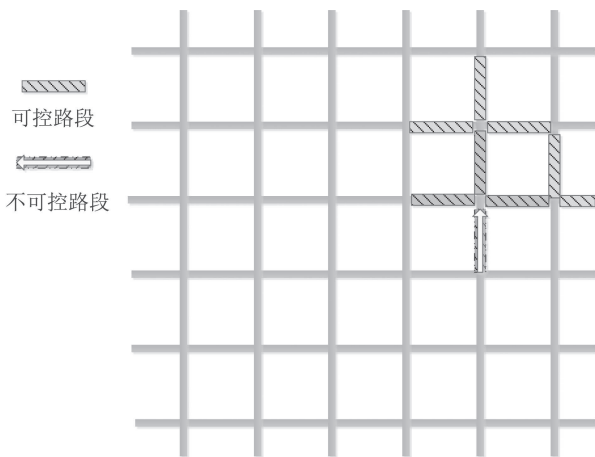


图5 下游不可控路段追踪

Fig. 5 Downstream uncontrollable roads tracking

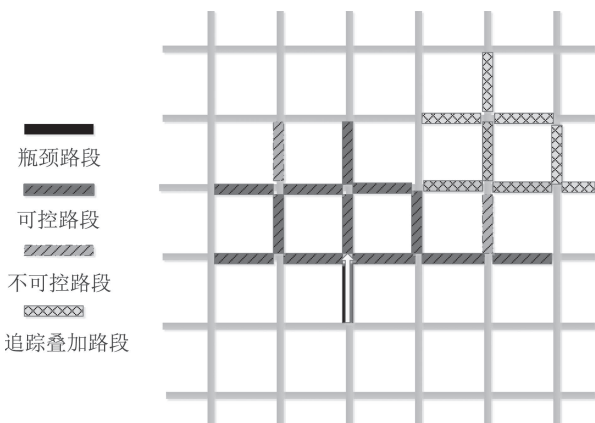


图6 下游关联叠加

Fig. 6 Downstream relevancy superposition

Step 4 根据分配量计算理论绿灯延长时间 $\Delta g_{c,j,1}$, 计算方法同公式(19).

Step 5 考虑最大绿灯时间约束, 绿灯延长不能超过 $\Delta g_{c,j,2}$:

$$\Delta g_{c,j,2} = g_{c,j,\text{max}} - g_{c,j}. \quad (28)$$

Step 6 考虑下游子路段的剩余容量 $U_{c,f+1}$, 绿灯延长不能超过 $\Delta g_{c,j,3}$.

Step 7 为保持周期不变, 按双环八相位的配时原则, 与相位 j 在同一个环内的其他相位需要进行绿灯时间压缩. 设其他几个相位最大压缩时间为 $\Delta g_{c,j,4}$. 则瓶颈相关相位的实际绿灯延长时间为:

$$\Delta g_{c,g,\text{real}} = \min \{ \Delta g_{c,g,1}, \Delta g_{c,g,2}, \Delta g_{c,g,3}, \Delta g_{c,g,4} \}. \quad (29)$$

Step 8 按公式(24)计算消散量 $\Delta Q_{c,j,\text{real}}$. 按公式(25)计算剩余量 $\Delta Q_{c,j,\text{diff}}$. 把剩余量返回给上游.

$$\Delta q_{\text{up,new}} = \Delta q_{\text{up,new}} + \frac{\sum_k \Delta Q_{c,j,\text{diff}}}{T}. \quad (30)$$

Step 9 判断下一级是否还有可控路段. 如果有, $f=f+1$, 返回Step 3; 如果没有, 算法结束.

$$\Delta g_{c,j,3} = \frac{U_{c,f+1}}{S_{c,j} \lambda_{c,j} T} g_{c,j}. \quad (31)$$

6 上游消散量动态调整

6.1 上游父子路段关系

上游路段关系中, 父路段和子路段同属一个交叉口, 父路段为交叉口的出口路段, 子路段为流量可能流入父路段的交叉口入口路段. 若父路段属于第 f 层, 那么子路段属于第 $f+1$ 层. 如图, 路段1为父路段, 路段2, 3, 4为子路段.

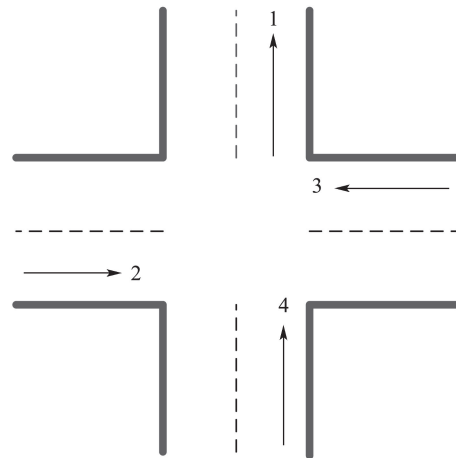


图7 上游路段关系

Fig. 7 Relationship between upstream roads

6.2 上游可控路段消散量分配步骤

Step 1 从一级可控路段开始计算 $f=1$.

Step 2 判断路段的可控性. 如果路段可控, 计算路段消散量. 计算的核心思路是基于流量溯源结果, 对于每一级 f 可控路段 a_f 按瓶颈关联度 $\alpha_{a,b,f}$ 之比分配上一级 $f-1$ 父路段剩余的消散量 $\Delta Q_{\text{spurplus},f-1}$. 初始时, 上游剩余消散量 $\Delta Q_{\text{spurplus},0}$:

$$\Delta Q_{\text{spurplus},0} = \Delta Q_{\text{up}} = T \cdot \Delta q_{\text{up,new}}. \quad (32)$$

如果路段不可控, 且剩余容量 $U_{a,f}$ 小于 0, 那么需要把小于 0 的部分加入到下一级的消散量中:

$$\Delta Q_{a,\text{spurplus},f} = \Delta Q_{a,\text{spurplus},f-1} - U_{a,f}. \quad (33)$$

同时对不可控路段进行流量回溯, 过程与瓶颈回溯相同, 如图 8 所示.

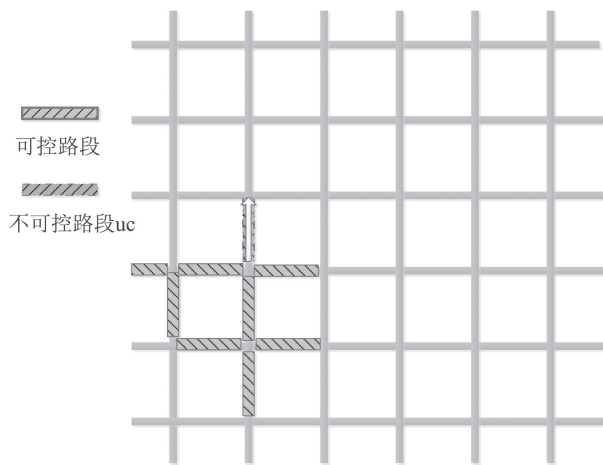


图 8 不可控路段回溯

Fig. 8 Uncontrollable road backtracking

不可控路段与瓶颈路段回溯到相同关联路段时, 进行关联度的叠加. 如图 9 所示.

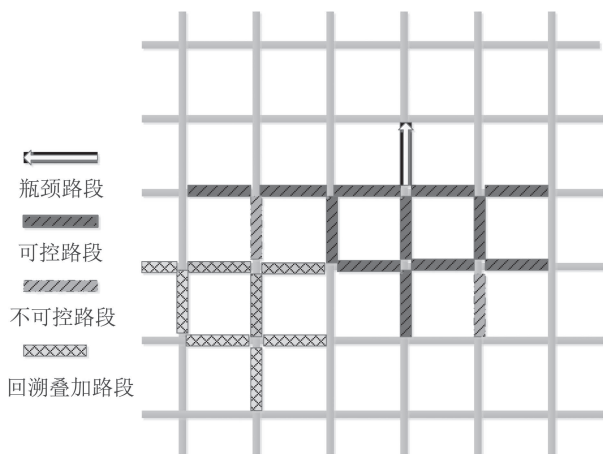


图 9 上游关联叠加

Fig. 9 Upstream relevancy superposition

$f = f + 1$. 重新计算 Step 2.

Step 3 每一层级 f , 各可控制路段按关联度的比例分配总消散量.

$$\Delta Q_{a,\text{assignment},f} = \frac{\alpha_{a,b,f}}{\sum_m \alpha_{m,b,f}} \Delta Q_{\text{spurplus},f-1}, \quad (34)$$

m 为层级 f 内各可控路段.

Step 4 计算可控路段的剩余容量 $U_{a,f}$, 判断剩余容量是否满足分配量的需求. 如果 $\Delta Q_{a,\text{assignment},f} \leq U_{a,f}$ 说明剩余容量可以容纳分配量, 参加绿灯调节的量:

$$\Delta Q_{a,\text{adjust},f} = \Delta Q_{a,\text{assignment},f}. \quad (35)$$

如果 $\Delta Q_{a,\text{assignment},f} > U_{a,f}$, 说明剩余量无法容纳分配量, 最多只能吸收掉剩余可容纳的部分. 参加绿灯调节的部分:

$$\Delta Q_{a,\text{adjust},f} = U_{a,f}. \quad (36)$$

剩余分配量:

$$\Delta Q_{\text{spurplus},f} = \Delta Q_{a,\text{assignment},f} - U_{a,f}. \quad (37)$$

Step 5 按照分配量计算绿灯时间压缩量:

$$\Delta g_{a,i} = \frac{\Delta Q_{a,\text{adjust},i} \cdot C}{T \cdot S_{a,i}}. \quad (38)$$

Step 6 判断压缩是否可完成, 计算本级剩余量. 设路段 a 转向 i , 原有的绿灯时间为 $g_{a,i}$, 最小绿灯时间为 $g_{a,i,\text{min}}$. 若 $g_{a,i} - \Delta g_{a,i} \geq g_{a,i,\text{min}}$, 说明分配的量可以完全被接受, 剩余量为 0, 按照计算出的值更新绿灯时间, 此分支的计算结束, 不再寻找下一层. 若 $g_{a,i} - \Delta g_{a,i} < g_{a,i,\text{min}}$, 说明无法满足调节需求, 实际绿灯调节量 $\Delta g_{a,i,\text{real}}$ 为

$$\Delta g_{a,i,\text{real}} = g_{a,i,\text{min}} - g_{a,i}. \quad (39)$$

实际消散量为

$$\Delta Q_{a,i,\text{real}} = \frac{\Delta g_{a,i,\text{real}} \cdot T \cdot S_{a,i}}{C}. \quad (40)$$

因达到最小绿灯时间产生的剩余量为

$$\Delta Q_{a,i,\text{diff}} = \Delta Q_{a,i} - \Delta Q_{a,i,\text{real}}. \quad (41)$$

总剩余量为

$$\Delta Q_{\text{spurplus},f} = \Delta Q_{\text{spurplus},f} + \Delta Q_{a,i,\text{diff}}. \quad (42)$$

Step 7 判断 $\Delta Q_{\text{spurplus},f}$ 是否为 0, 为 0 表示流量已经分配完毕, 结束; 如果不为 0, $f = f + 1$, 进入 Step 2.

Step 8 判断是否达到路网边界. 如果已经达到路网边界, 结束; 如果没有, $f = f + 1$, 返回 Step 2.

7 非瓶颈相关相位绿灯时长优化

在前两节中, 已经计算了各个瓶颈相关相位的绿灯时长. 考虑到瓶颈出现时, 需要尽快疏散交通流, 保障通行效率, 接下来按照双环八相位^[14]的配时规则, 保持原周期不变, 以饱和度均衡为目标^[15]对非瓶颈相关相位进行配时调整. 双环八相位的配时方案为表 1.

表1 双环八相位方案
Table 1 Dual-ring eight-phase scheme

	相位组1	相位组2
环1	$ a_1, b_1 $	$ c_1, d_1 $
环2	$ a_2, b_2 $	$ c_2, d_2 $

假设 b_1 为瓶颈相关相位, 优化后绿灯时间在原方案基础上变化 Δg_{b_1} . 则优化后, 瓶颈相关相位的绿灯时间为

$$g_{b_1, new} = g_{b_1} + \Delta g_{b_1}. \quad (43)$$

非瓶颈相关相位的绿灯时长需满足周期约束:

$$C = g_{a_1, new} + g_{b_1, new} + g_{c_1, new} + g_{d_1, new}, \quad (44)$$

$$C = g_{a_2, new} + g_{b_2, new} + g_{c_2, new} + g_{d_2, new}. \quad (45)$$

同时对每个相位组有

$$g_{a_1, new} + g_{b_1, new} = g_{a_2, new} + g_{b_2, new}, \quad (46)$$

$$g_{c_1, new} + g_{d_1, new} = g_{c_2, new} + g_{d_2, new}. \quad (47)$$

此外还需满足最大绿灯时长和最小绿灯时长的约束:

$$g_{p, new} \geq g_{p, min}, \quad (48)$$

$$g_{p, new} \leq g_{p, max}, \quad (49)$$

其中 p 为相位.

8 算例分析

8.1 路网数据

本文选用合肥市某路网进行算法验证. 路网包含27个交叉口, 112条路段. 路网如图10.

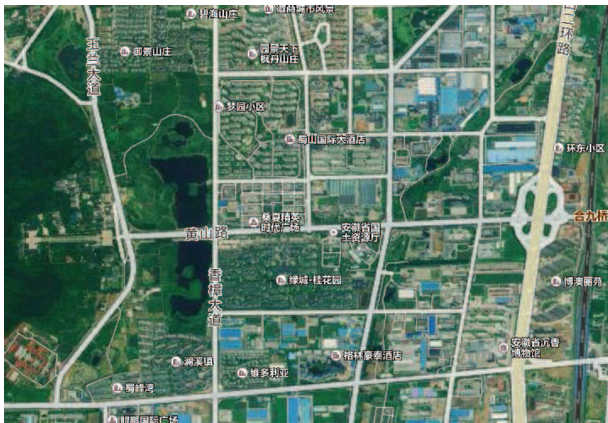


图10 路网

Fig. 10 Road network

8.2 动态仿真

在VISSIM4.3交通仿真软件中中等比例绘制仿真图, 如图11, 输入初始交通需求, 配时方案等交通参数, 其中数字表示交叉口编号. 通过VISSIM二次开发, 实现每秒采集一次过车记录, 并存入数据库, 模拟电警系统的功能.

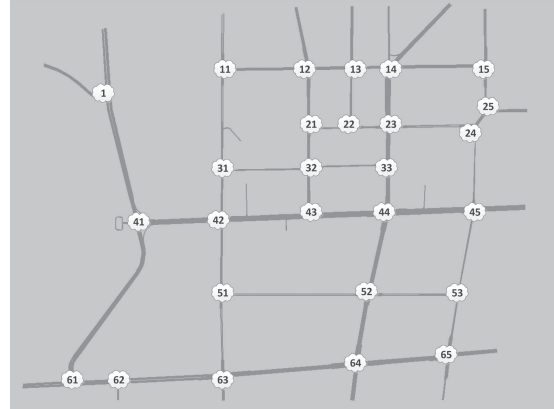


图11 路网VISSIM仿真图

Fig. 11 VISSIM simulation diagram of road network

仿真时长为3600 s, 在1087 s识别到瓶颈出现在交叉口31和42之间. 为验证瓶颈控制算法的有效性, 本文对两次仿真的结果进行对比. 仿真1采用原有配时方案, 运行3600 s, 称为“优化前”; 仿真2在瓶颈被识别后, 调用控制算法对原配时方案进行优化, 获得新的配时方案, 并下发给VISSIM, 称为“优化后”. 因此, 在1087 s之前(瓶颈未出现)两个仿真都使用原始配时方案, 在1087 s之后(瓶颈出现)仿真1依旧使用原方案, 仿真2使用新方案. 从而, 实现动态仿真对比.

8.3 结果对比

本文采用延误、流量、平均排队长度、最大排队长度4个路网评价指标对运行效果进行评价. 将VISSIM每秒输出的数据, 以2 min为时间间隔进行统计, 绘制曲线图. 同时, 对比了统计值的变化. 详见表2和图12、表3和图13、表4和图14、表5和图15.

1) 延误 D : 路网中每辆车的平均延误, 单位为s.

表2 优化前后路网中每辆车的平均延误对比
Table 2 Comparison of the average delay of each vehicle in road network before and after optimization

时段	D_{before}	D_{after}	差值	百分比/%
1087~3600	48.75	44.81	-3.94	-8.08

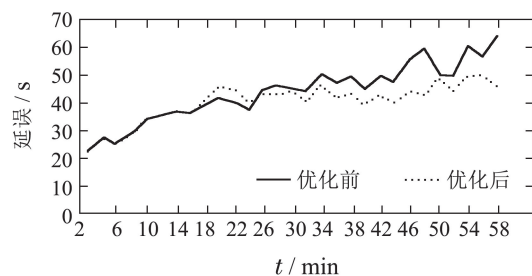


图12 路网延误对比

Fig. 12 Comparison of road network delay

2) 流量 X : 评价时长 $t_0 - t_1$ 内路网中所有交叉口检测到的总车辆数, 单位为 veh.

表 3 优化前后路网流量对比

Table 3 Comparison of traffic flow in road network before and after optimization

时段	X_{before}	X_{after}	差值	百分比/%
1087~3600	25957	26962	1005	3.87

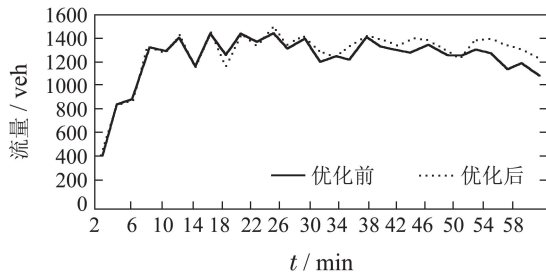


图 13 路网流量变化曲线图

Fig. 13 Comparison of road network flow

3) 平均排队长度 L_{avg} : 评价时长 $t_0 - t_1$ 内路网中所有路段每 2 min 平均排队长度的平均值, 单位为 m.

表 4 优化前后路网平均排队长度对比

Table 4 Comparison of average queue length of road network before and after optimization

时段	$L_{\text{avg, before}}$	$L_{\text{avg, after}}$	差值	百分比/%
1087~3600	34.54	28.68	-5.86	-16.98

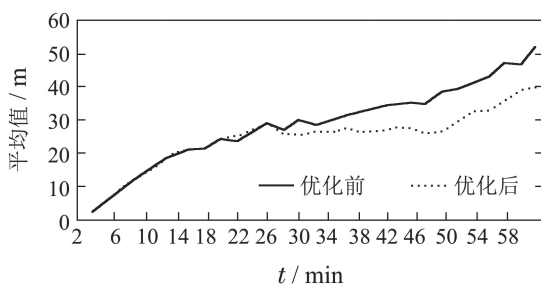


图 14 平均排队长度变化曲线图

Fig. 14 Comparison of average queue length

4) 最大排队长度 L_{max} : 评价时长 $t_0 - t_1$ 内路网中所有路段每 2 min 的最大排队长度的和, 单位为 m.

表 5 优化前后路网最大排队长度对比

Table 5 Comparison of maximum queue length of road network before and after optimization

时段	$L_{\text{max, before}}$	$L_{\text{max, after}}$	差值	百分比/%
1087~3600	6567.61	6167.33	-400.28	-6.09

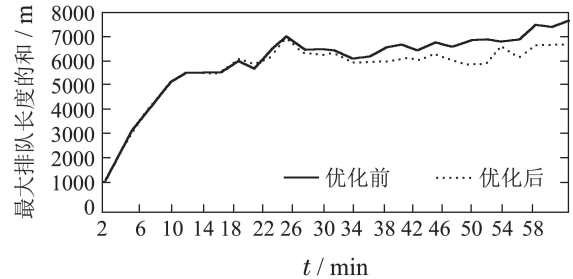


图 15 最大排队长度变化曲线图

Fig. 15 Comparison of maximum queue length

从上述图表中可以看出, 在实施瓶颈控制算法前, 两条曲线重合; 在实施瓶颈控制算法后, 路网出现小段时间的调整, 之后延误减少, 流量增加, 排队长度减少, 最大排队长度减少, 且时间越长越明显. 在不进行瓶颈优化的情况下, 排队往往会溢出, 甚至蔓延到周边路段, 导致路网运行效率降低. 而优化后, 排队得到及时有效地控制, 评价指标得到改善.

9 结语

1) 基于区域内瓶颈、不可控、可控路段的流量均衡比定时控制更能适应真实交通需求, 更有利于消除瓶颈.

2) 在周期不变的情况下, 基于饱和度均衡对路口非相关相位进行时间分配与人工仅考虑非相关相位最小绿最大绿限制的分配方式更利于均衡区域内的交通流.

3) 需要进一步研究周期可变下的瓶颈控制, 进一步提高优化效率, 这是下一步的工作重心.

参考文献:

- [1] ZHANG Mengting. *The study on travel behavior and congestion tolling strategies of multi-bottleneck model*. Hefei: Hefei University of Technology, 2017. (张梦婷. 多瓶颈路段出行行为分析及拥堵收费策略研究. 合肥: 合肥工业大学, 2017.)
- [2] DAGANZO C F. Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2007, 41(1): 49 - 62.
- [3] ZHU Wenxing, JIA Lei, YANG Licai. Optimal control of traffic signal in "big unit". *Control Theory & Applications*, 2006, 23(3): 491 - 494. (朱文兴, 贾磊, 杨立才. "大路口" 交通信号的优化控制. 控制理论与应用, 2006, 23(3): 491 - 494.)
- [4] ZHAO Yingying. *Research on signal control method of bottleneck intersection*. Changchun: Jilin University, 2011. (赵莹莹. 瓶颈交叉口信号控制方法研究. 长春: 吉林大学, 2011.)
- [5] MA D F, WANG D H, SUN F, et al. Method of spillover identification in urban street networks using loop detector outputs. *Journal of Central South University*, 2013, 20(2): 572 - 578.
- [6] ZHU Renwei. *Control method of signalized intersections base on queue overflow at roadway bottleneck*. Nanjing: Southeast University, 2013. (朱仁伟. 面向瓶颈路段排队溢流的信号交叉口控制方法. 南京: 东南大学, 2013.)

- [7] ZHU Senlai, CHENG Lin, XU Xiangdong. Identifying bottleneck links in transportation networks based on reserve capacity. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2014, 34(6): 1572 – 1577.
(朱森来, 程琳, 许项东. 基于储备容量的交通网络潜在瓶颈路段识别. 系统工程理论与实践, 2014, 34(6): 1572 – 1577.)
- [8] SUN W L, WU X K, WANG Y P, et al. A continuous-flow-intersection-lite design and traffic control for oversaturated bottleneck intersections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 56: 18 – 33.
- [9] SUN Lingtao. *Study on the method of multipoint interlink gating control based on loop detector data*. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
(孙凌涛. 基于线圈检测数据的多点联动瓶颈控制方法研究. 杭州: 浙江大学, 2016.)
- [10] WANG Li, LI Dai, HE Zhonghe, et al. Urban traffic network control based on cluster consensus of multi-agent systems. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(11): 1448 – 1456.
(王力, 李岱, 何忠贺, 等. 基于多智能体分群同步的城市路网交通控制. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1448 – 1456.)
- [11] WANG Fujian, GONG Chengyu, MA Dongfang, et al. Signal coordination control for traffic bottleneck using OD data. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2017, 51(2): 273 – 278.
(王福建, 龚成宇, 马东方, 等. 采用交通出行量数据的多点联动瓶颈控制方法. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(2): 273 – 278.)
- [12] SUN Hui. *Research on coordination control methods of traffic bottlenecks under queue length restriction*. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
(孙辉. 排队长度约束下的瓶颈交叉口协调控制方法研究. 成都: 西南交通大学, 2010.)
- [13] YANG Yijun, HU Linglong, ZHANG Wei, et al. Queue length based adaptive signal control algorithm for single road intersection. *The 11th China Intelligent Transportation Annual Conference*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016: 453 – 460.
(杨义军, 胡灵龙, 张伟, 等. 基于排队长度的单点自适应信号控制方法. 第十一届中国智能交通年会优秀论文集. 北京: 电子工业出版社, 2016: 453 – 460.)
- [14] ZHOU Bin. *Urban traffic signal control based on connected vehicles simulation platform*. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
(周斌. 基于车联网仿真平台的城市交通信号控制. 杭州: 浙江大学, 2016.)
- [15] ZHANG Yongzhong, ZHANG Fusheng, LIU Xiaoming, et al. *Optimal Traffic Control Urban Intersections*. Beijing: China Water & Power Press, 2012.
(张永忠, 张福生, 刘小明, 等. 城市交通信号优化控制. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.)

作者简介:

朱海峰 硕士研究生, 主要研究方向为城市交通信号控制、人工智能, E-mail: rim611@163.com;

刘畅 硕士研究生, 主要研究方向为系统工程、智能交通控制, E-mail: liuchang@cetiti.com;

温熙华 高级工程师, 主要研究方向为车联网、智慧交通, E-mail: wenxh@cetiti.com;

刘彦斌 高级工程师, 主要研究方向为智能交通系统、人工智能, E-mail: liuyanbin@cetiti.com;

韦学武 硕士研究生, 主要研究方向为智能计算、交通规划, E-mail: weixuewu@cetiti.com;

刘云鹏 高级工程师, 主要研究方向为车路协同、通信工程, E-mail: liuyunpeng@cetiti.com.