

# 车联网环境下信号交叉口车速控制策略

鹿应荣, 许晓彤, 丁川\*, 鲁光泉

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院 车路协同与安全控制北京市重点实验室, 北京 100191)

**摘要:** 为了减轻城市道路上信号交叉口对交通流的阻断, 针对车联网环境下个体车辆可以与路侧设施及交叉口中心控制系统实时信息交互的特征, 提出了信号交叉口车速控制策略, 在提高交叉口通行效率的基础上兼顾驾驶舒适性与环境友好性. 为验证车速控制模型的有效性, 基于多智能体技术建立了车联网环境下信号交叉口车速控制仿真系统, 以典型十字路口为例, 模拟对比分析了传统驾驶和车联网2种环境下车辆通过交叉口的行程时间、燃料消耗与污染物排放. 结果表明, 该速度控制策略下车辆通过交叉口的平均行程时间减少了约60%, 燃料消耗减少了约40%, 污染物的排放也有显著减少.

**关键词:** 智能交通; 车速控制; 多智能体; 信号交叉口; 车联网

## A Speed Control Strategy at Signalized Intersection under Connected Vehicle Environment

LU Ying-rong, XU Xiao-tong, DING Chuan, LU Guang-quan

(Beijing Key Laboratory for Cooperative Vehicle Infrastructure System and Safety Control, School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to reduce the blocking of traffic flow of the signalized intersection on the urban road, for individual vehicles can interact the information with the roadside facilities and the intersection control system under the connected vehicle environment, a speed control strategy in the signalized intersection is proposed. This strategy considers driving comfort and environmental friendliness with the improvement of traffic efficiency. To verify the efficiency of the speed control model, the speed control simulation system embodying the characteristics of the connected vehicle environment in the signalized intersection is developed using the multi-agent technology, and a typical intersection is selected as an example, in which the travel time, fuel consumption and pollutant emissions under the traditional environment are compared with that of the connected vehicle environment when vehicles pass the intersection. The results show that when vehicles go through intersections, the average travel time is reduced by about 60% by the aid of the speed control strategy, with the fuel consumption reducing by about 40%. In addition, pollutant emissions are also reduced significantly.

**Keywords:** intelligent transportation; speed control; multi-agent; signalized intersection; connected vehicle

### 0 引言

随着国民经济的高速发展, 我国机动车保有量迅速增加, 交通拥堵和环境污染问题越来越突出. 信号交叉口作为城市道路网的节点, 这一问题尤为严重. 车辆在信号交叉口处受控制信号的周期

性干扰而处于一种“停—走”式的交通运行模式, 导致交叉口的通行效率下降, 车辆的延误时间、燃油消耗及污染物排放上升<sup>[1]</sup>. 在交叉口前一定区域提前对车辆速度进行控制, 使其平滑地通过交叉口对于提高通行效率、节能减排等具有长远的经

收稿日期: 2017-06-20

修回日期: 2017-09-11

录用日期: 2017-09-19

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(U1564212, U1664262).

作者简介: 鹿应荣(1965-), 女, 吉林长春人, 教授.

\*通信作者: cding@buaa.edu.cn

济效益和社会效益。

对于车联网环境下信号交叉口处的速度控制问题,国内外学者都做了一定的研究,比较有代表性的成果有:林培群等<sup>[2]</sup>构建了车联网环境下交叉口交通流微观控制模型,提出了交叉口分区控制思想,并给出了交叉口区域的冲突消解算法;李鹏凯等<sup>[3-4]</sup>在车路协同环境下利用车车、车路实时通信,分别建立了针对个体车辆和多车协同的车速诱导模型并进行了仿真验证;Fortelle<sup>[5]</sup>基于完全车联网的技术环境,在交叉口前根据车辆位置、速度等信息,为到达交叉口的车辆规划出1条可以避免冲突的轨迹;Kamal等<sup>[6-7]</sup>研究了车联网环境下多车道高效通行控制方法,并提出了针对部分车联网环境下的车速诱导控制;Chen等<sup>[8]</sup>将动态车速控制模型与信号配时调整模型结合起来考虑,但实际实施难度较大。

自动驾驶是未来汽车的发展方向,在分析前人研究成果和不足的基础上,本文提出一种车联网环境下信号交叉口自动驾驶车辆车速控制方法,目的是使车辆在不停车的前提下尽快通过交叉口,同时尽可能地保证驾驶舒适性并减少信号交叉口处的燃油消耗和污染物排放。

## 1 问题描述

假设距离交叉口停车线 $L_0$ 距离有1辆车将要通过交叉口,如果以当前速度继续行驶,车辆将会在 $T_0$ 时刻到达交叉口停车线,而绿灯在 $T_g$ 时刻已经结束,车辆将被迫停车。在车联网环境下,通过车辆与交叉口信号灯之间双向的信息交流,适当地控制车辆加速或减速可以达到让车辆不停车通过信号交叉口的目的。如图1所示,控制车辆速度由 $v_0$ 加速到 $v_1$ ,车辆仍然可以在绿灯期间通过交叉口。

## 2 车联网环境下信号交叉口自动驾驶车辆车速控制系统

### 2.1 系统架构

每个信号交叉口配备一个中心控制单元,用于接收与处理路侧位置单元发送来的车辆运动状

态与信号灯信息;各进口道速度控制区域配备一个路侧位置单元,用于汇总速度控制区域内全部车辆的运动状态信息并发送至中心控制单元;每辆即将进入交叉口的车辆全部配备一个车载单元,用于采集车辆的运动状态信息,接收中心控制单元发送的车速调整信息并在自动驾驶状态下控制车辆的运动。图2所示为信号交叉口自动驾驶车辆车速控制系统架构示意图,椭圆形虚线框内的区域即为预先设定的速度控制区,车辆在驶入速度控制区后切换为自动驾驶模式。

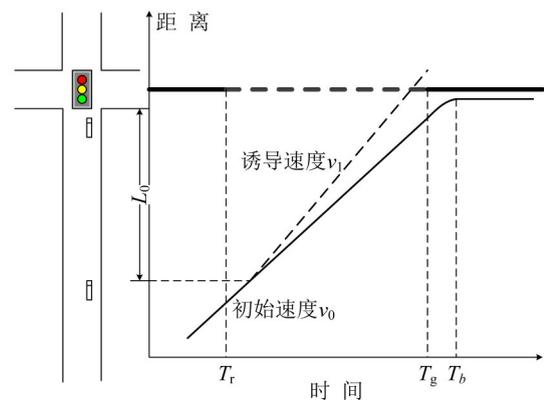


图1 交叉口前速度引导示意图

Fig. 1 Schematic of speed guidance before the intersection

### 2.2 模型假设

为具体化研究对象,本研究建立在以下基本假设条件之上。

(1) 车辆驶入控制区域之后进入自动驾驶模式,车载单元和路侧位置单元、中心控制单元可实时通信,通信延迟在可接受范围之内。

(2) 在控制区域内车辆不会主动超车或变换车道。

(3) 各进口道速度控制区域前车辆的到达服从泊松分布。

(4) 车辆行驶路面平坦,重力对车辆加速度的影响可忽略不计。

(5) 不考虑行人和非机动车的干扰。

### 2.3 各进口道速度控制区域的界定

交叉口各进口道速度控制区域的界定方法如下:设路段上车辆的最大速度和最小速度分别是 $v_{\max}$ 和 $v_{\min}$ , $a$ 为车辆加速度的绝对值, $d$ 为车辆减速度

的绝对值.最短控制范围应保证车辆不管以何种速度进入控制区域都有足够的时间进行速度调整;最长控制范围应保证车辆可以在1个信号周期( $C$ )内通过交叉口<sup>[1]</sup>.式(1)为速度控制区域长度 $L$ 的计算方法.

$$L \subset \left[ \max \left\{ \frac{v_{\max}^2 - v_{\min}^2}{2a}, \frac{v_{\max}^2 - v_{\min}^2}{2d} \right\}, Cv_{\min} \right] \quad (1)$$

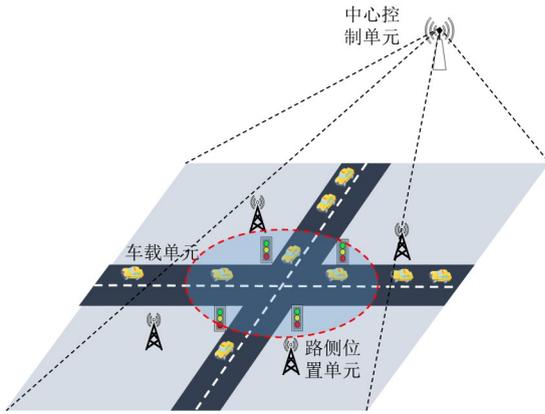


图2 信号交叉口自动驾驶车辆车速控制系统架构示意图

Fig. 2 Schematic of automatic vehicle speed control system architecture at signalized intersection

## 2.4 车速控制策略

在交通流理论中,流量等于速度和密度的乘积,所以最大化停车线前车辆的密度和速度可以提高交叉口的通过率.当车辆进入速度控制区时,中心控制单元会收到车辆的位置、速度、转向等信息.如果此时交叉口该方向为绿灯,判断车辆从当前速度加速至最大速度 $v_{\max}$ 时是否可以通过,若可以通过,控制车辆加速至路段限速 $v_{\max}$ 尽快通过.如果当车辆进入交叉口时交叉口该方向相位为红灯,判断车辆以当前速度行驶是否可以在该红灯结束之后的第1个绿灯期间通过,若可以通过,则以当前速度继续行驶;否则,控制车辆减速至 $v_i$ 使其在该红灯结束之后的第2个绿灯期间通过交叉口.图3为车速控制流程图.

### 2.4.1 加速控制模型

选取一个驾驶员普遍感觉舒适的加速度 $a$ ,判断以该加速度加速到路段限速 $v_{\max}$ ,然后以 $v_{\max}$ 行驶

到交叉口停车线时信号灯是否为绿灯,若为绿灯,则启动加速控制模型.图4为加速控制示意图.

加速控制模型的目标函数为车辆加速到达停车线的时刻最小,其表达式为

$$\min T_i = T_{i0} + \frac{v_{\max} - v_{i0}}{a} + \frac{L - \frac{v_{\max}^2 - v_{i0}^2}{2a}}{v_{\max}} \quad (2)$$

加速控制模型的约束条件为

$$T_i \leq T_g \quad (3)$$

$$T_i \geq T_{i-1} + t_s \quad (4)$$

$$S \geq \frac{v_{i-1}^2 - v_i^2}{2a} + v_i \Delta t + L_{i-1} \quad (5)$$

$$v_i \leq v_{\max} \quad (6)$$

式中: $T_i$ 为第 $i$ 辆车通过停车线的时刻(s); $L$ 为设定的速度调整区域的长度(m); $a$ 为预先设定的车辆加速度( $\text{m/s}^2$ ); $v_{i0}$ 为车辆进入速度控制区的速度( $\text{m/s}$ ); $T_{i-1}$ 为第 $i-1$ 辆车通过停车线的时刻(s); $T_g$ 为绿灯结束时刻(s); $t_s$ 为最小车头时距(s); $T_{i0}$ 为第 $i$ 辆车开始进入速度控制区的时刻(s); $S$ 为前后车的安全间距(m); $\Delta t$ 为反应、机械延误等损失时间之和(s); $L_{i-1}$ 为第 $i-1$ 辆车的长度(m).

### 2.4.2 减速控制模型

如果车辆以当前速度行驶必然会遇到红灯且加速至路段限速 $v_{\max}$ 也不能在绿灯结束前通过,则启动减速控制模型控制车辆减速以便在下一绿灯期间通过交叉口.减速控制示意图如图5所示.仍然选取一个驾驶员普遍感觉舒适的减速度 $d$ ,减速控制模型优化的目标函数是使车辆减速后通过交叉口停车线时的速度最大,即 $\max v_i$ .车辆在速度控制区内先减速后匀速行驶的时间为

$$t_i = \frac{v_{i0} - v_i}{d} + \frac{L - \frac{v_{i0}^2 - v_i^2}{2d}}{v_i} \quad (7)$$

式(7)整理可得目标函数的表达式为

$$\max v_i = v_{i0} - dt_i + \sqrt{d^2 t_i^2 - 2dt_i v_{i0} + 2dL} \quad (8)$$

式中: $t_i$ 为车辆在速度控制区内行驶的时间(s), $t_i = T_i - T_{i0}$ ;  $d$ 为预先设定的车辆减速度( $\text{m/s}^2$ ); $v_i$ 为车辆经减速后的速度( $\text{m/s}$ ).

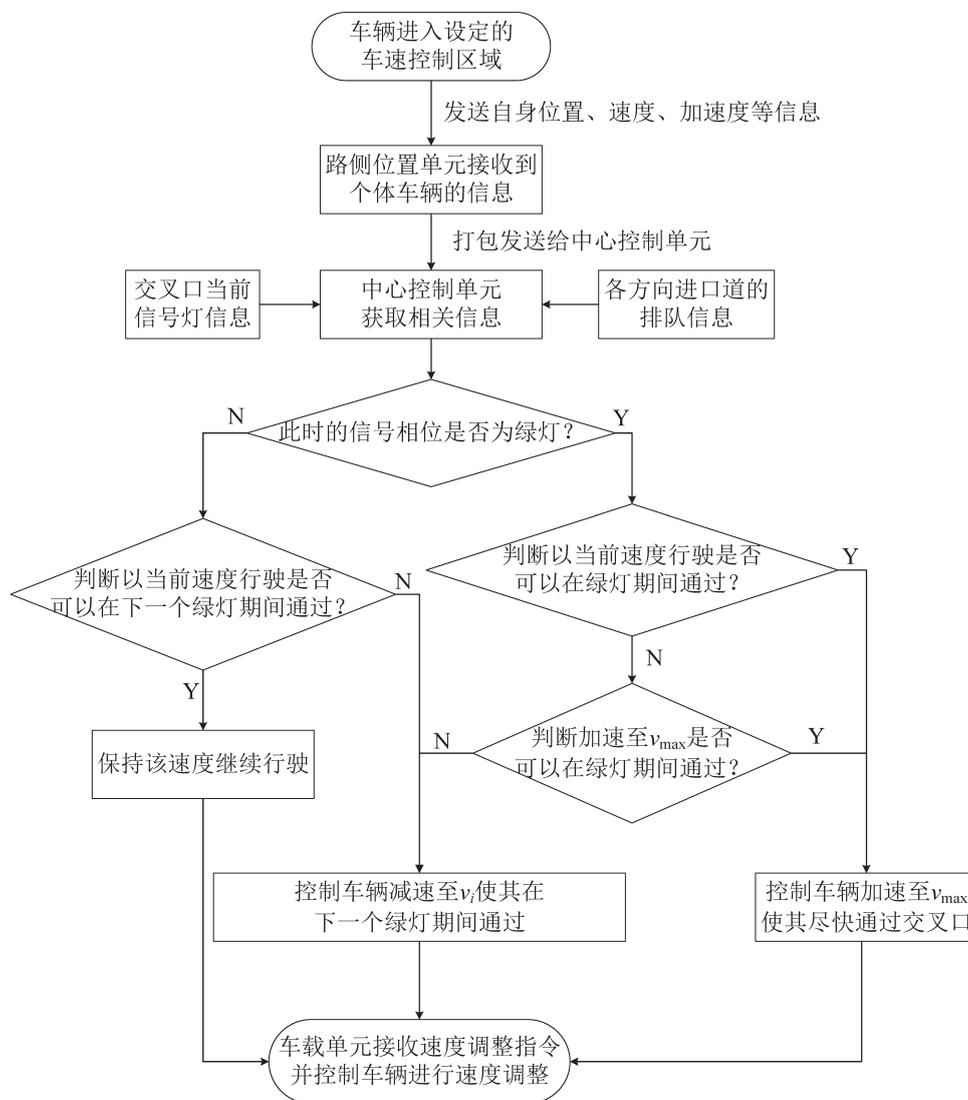


图3 车速控制流程图

Fig. 3 Flow chart of speed control

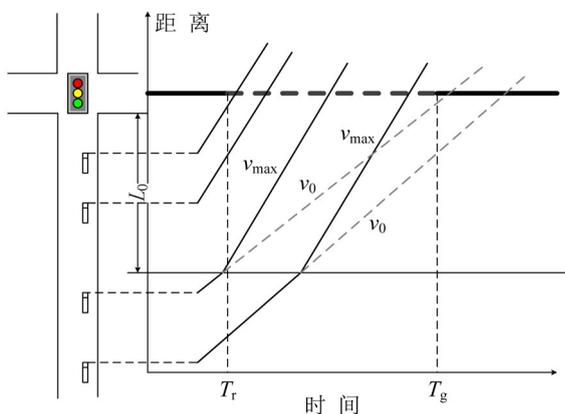


图4 加速控制示意图

Fig. 4 Schematic of acceleration control

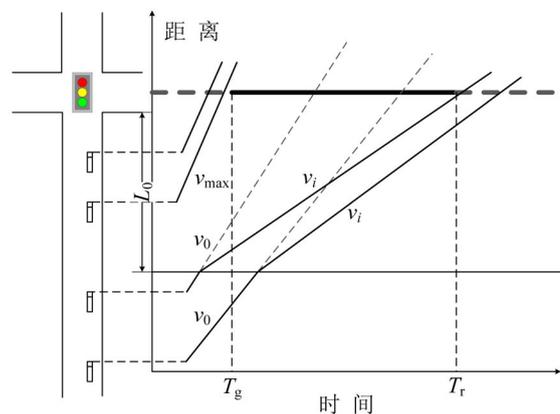


图5 减速控制示意图

Fig. 5 Schematic of deceleration control

减速控制模型的约束条件为

$$T_g - T_0 \leq \frac{v_{\max} - v_{i0}}{a} + \frac{L - \frac{v_{\max}^2 - v_{i0}^2}{2a}}{v_{\max}} \quad (9)$$

$$T_i > T_r \quad (10)$$

$$T_i \geq T_{i-1} + t_s \quad (11)$$

$$S \geq \frac{v_{i-1}^2 - v_i^2}{2d} + v_i \Delta t + L_{i-1} \quad (12)$$

$$v_{\min} \leq v_i \leq v_{i0} \quad (13)$$

式中: $T_r$ 为红灯结束时刻(s).

本文提出的速度控制模型适用于在车流到达符合泊松分布的情况下.在完全车联网的环境下,交叉口中心控制单元可以实时接收到交叉口各进口道前车辆的运动状态信息,因此可以实时获取每条进口道停车线前的排队车辆数及排队长度.当车流密度比较大时,根据 Yang 等<sup>[9]</sup>提出的排队消散

时间预测方法,可以预估后续车辆到达停车线的时刻,进而可修正本文提出的加速/减速控制模型,对车辆进行有效的速度控制.

## 2.5 模型求解过程

车速控制模型的求解流程图如图6所示.

车速控制模型的求解过程为:

(1) 第*i*辆车进入速度控制区域时,判断以当前速度加速到 $v_{\max}$ 是否可以在绿灯时间内通过,若可以通过,则启动加速控制模型;若不能通过,则启动减速控制模型.

(2) 根据相关约束条件,确定第*i*辆车通过停车线的时刻 $T_i$ .

(3) 确定车辆经加速或减速后最终通过停车线时的速度 $v_i$ .

(4)  $i = i + 1$ ,重复上述步骤.

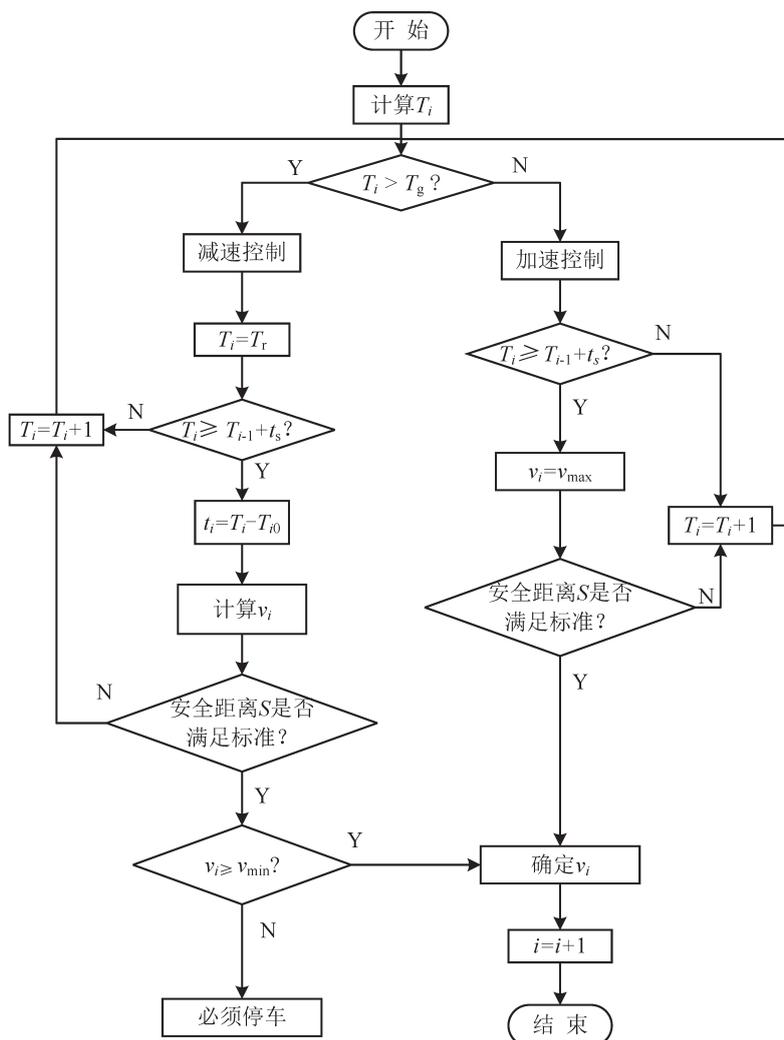


图6 车速控制模型的求解流程图

Fig. 6 Flow chart of speed control model

### 3 模型仿真与验证

#### 3.1 仿真平台

为验证上述车速控制模型及算法的有效性和正确性,本文运用开源多智能体仿真工具NetLogo进行仿真验证.仿真系统中构建了典型十字交叉口的仿真环境,该十字交叉口为2条双向2车道道路相交,相位配时采用两相位信号配时,信号周期总长为110 s,每个相位的绿灯时长为50 s,黄灯时长3 s,全红时长2 s,在仿真系统中,仿真时钟1 ticks代表实际时间0.2 s,不同转向交通流之间的让行规则为左转车让直行车先行,相对方向行驶的右转车让左转车先行.

速度控制区域的长度 $L=200$  m,路段最大限速

$v_{max}=60$  km/h,最小限速 $v_{min}=10$  km/h,根据驾驶舒适性与车辆加速度之间关系的相关研究<sup>[10]</sup>,在该仿真系统中取驾驶员普遍感觉舒适的加速度 $a=1.5$  m/s<sup>2</sup>,减速度 $d=2$  m/s<sup>2</sup>.

#### 3.2 仿真结果分析

##### 3.2.1 行程时间对比分析

仿真中设定的直行车、右转车、左转车的比例为5:3:2,通过NetLogo仿真模拟得到图7~图9所示的车辆行程时间对比图.从图中可以直观的看出,在车联网环境下运用速度控制策略可以显著减少车辆通过交叉口的行程时间,2种驾驶环境下不同转向车辆的行程时间对比如表1所示.

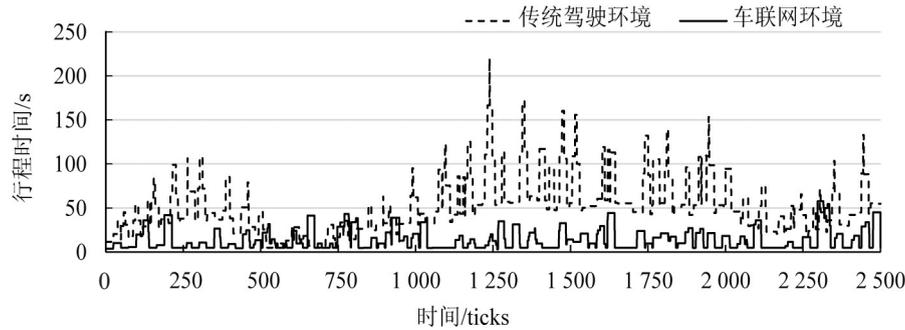


图7 传统驾驶环境和车联网环境下直行车辆行程时间

Fig. 7 Travel time of straight vehicles under traditional environment and connected vehicle environment

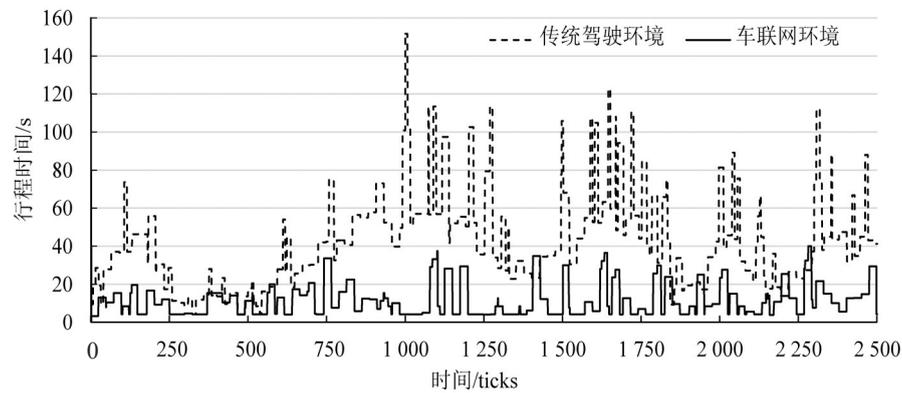


图8 传统驾驶环境和车联网环境下右转车辆行程时间比较

Fig. 8 Travel time of right-turning vehicles under traditional environment and connected vehicle environment

表1 2种驾驶环境下不同转向车辆的行程时间对比

Table 1 Travel time of different turning vehicles under two kinds of driving environment (s)

转向	传统驾驶环境			车联网环境		
	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值
直行	12.1	35.8	147.6	11.6	12.5	67.8
右转	11.2	34.0	117.2	10.0	12.2	49.4
左转	13.5	37.9	160.4	12.8	13.6	57.5

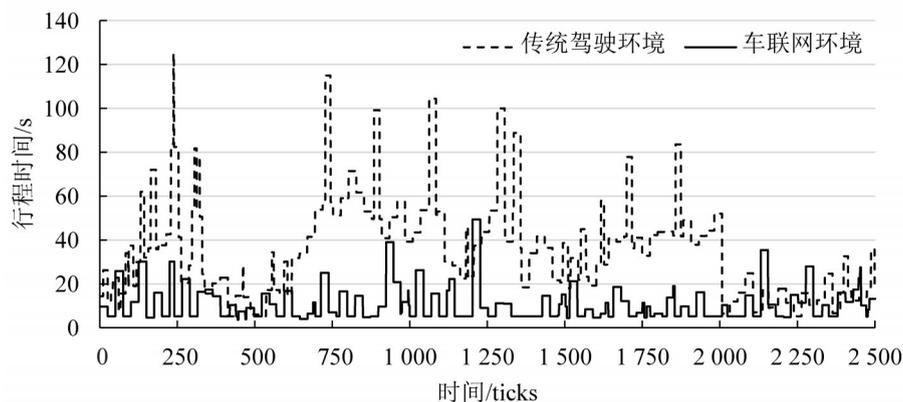


图9 传统驾驶环境和车联网环境下左转车辆行程时间比较

Fig. 9 Travel time of left-turning vehicles under traditional environment and connected vehicle environment

根据表1计算得出,在车联网环境下运用速度控制策略,直行车、右转车、左转车的平均行程时间均减少了60%以上,且行程时间的极差和方差明显减小。

### 3.2.2 燃油消耗和污染物排放对比分析

燃油消耗和污染物排放信息通过经典的VT-micro模型<sup>[11]</sup>计算得到,该模型的输入是车辆的速度和加速度对,输出是每秒的机动车污染物排放及油耗,模型表达式为

$$M_{y,i}(k) = \exp(v_i(k)P_y a_i(k)) \quad (14)$$

式中: $M_{y,i}(k)$ 为第*i*辆车的污染物排放量和油耗量(L/s); $v_i(k)$ 为第*i*辆车的速度; $a_i(k)$ 为第*i*辆车的加速度( $m/s^2$ ); $P_y$ 为系数矩阵,根据橡树岭国家实验室的实验数据获得; $y$ 为CO、HC、 $NO_x$ 排放和燃油消耗等因子。

根据上述油耗和排放模型,仿真得出的结果如图10~图13所示.图中曲线上每个点表示当前仿真时刻控制区域内所有车辆的瞬时燃油消耗量和CO、HC、 $NO_x$ 的瞬时排放总量.具体的燃油消耗和污染物排放量比较如表2所示。

表2 2种驾驶环境下单位时间车辆的燃油消耗和污染物排放对比

Table 2 Fuel consumption and pollutant emission of different turning vehicles under two kinds of driving environment

驾驶环境	燃油消耗/(L/ticks)	CO排放/(mg/ticks)	HC排放/(mg/ticks)	$NO_x$ 排放/(mg/ticks)
传统驾驶环境	4.63	12.42	7.97	9.24
车联网环境	2.75	11.94	2.03	2.47

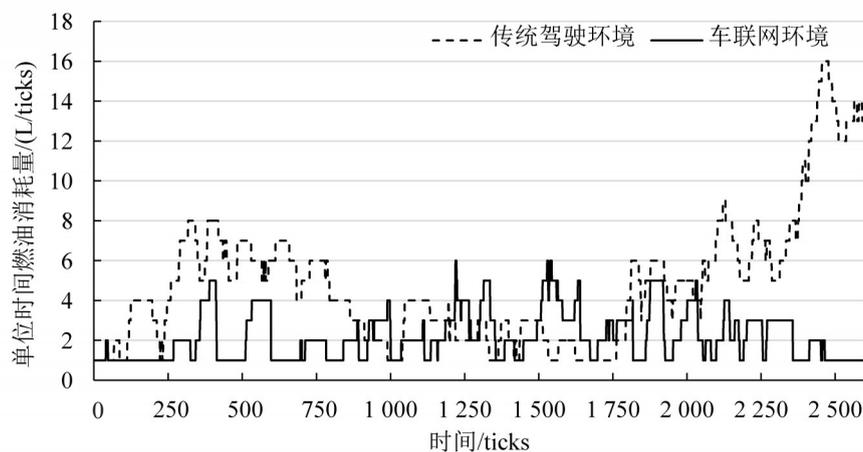


图10 传统驾驶环境和车联网环境下单位时间燃油消耗比较图

Fig. 10 Fuel consumption of per unit time under traditional environment and connected vehicle environment

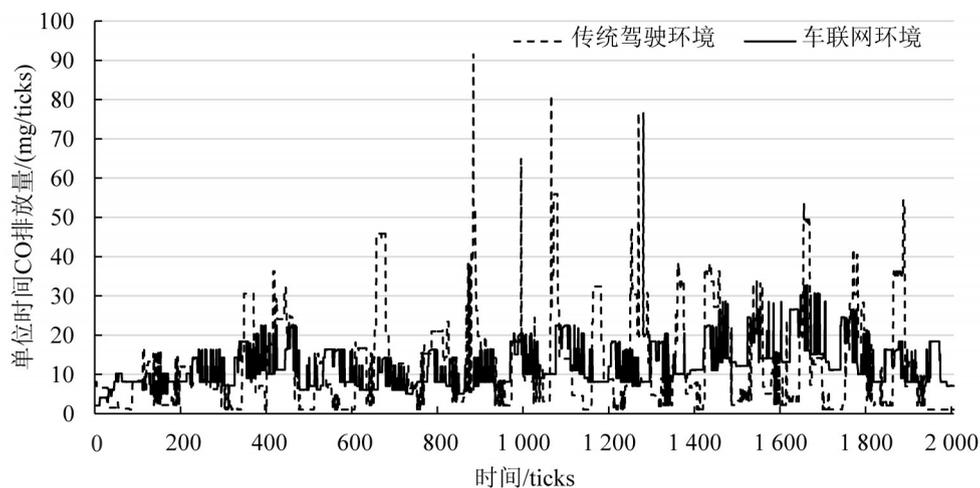


图 11 传统驾驶环境和车联网环境下单位时间 CO 排放量比较图

Fig. 11 CO emissions of per unit time under traditional environment and connected vehicle environment

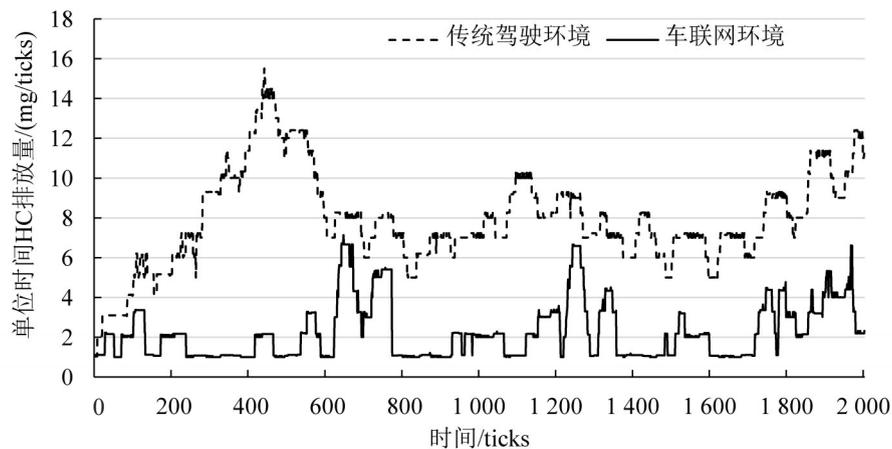


图 12 传统驾驶环境和车联网环境下单位时间 HC 排放量比较图

Fig. 12 HC emissions of per unit time under traditional environment and connected vehicle environment

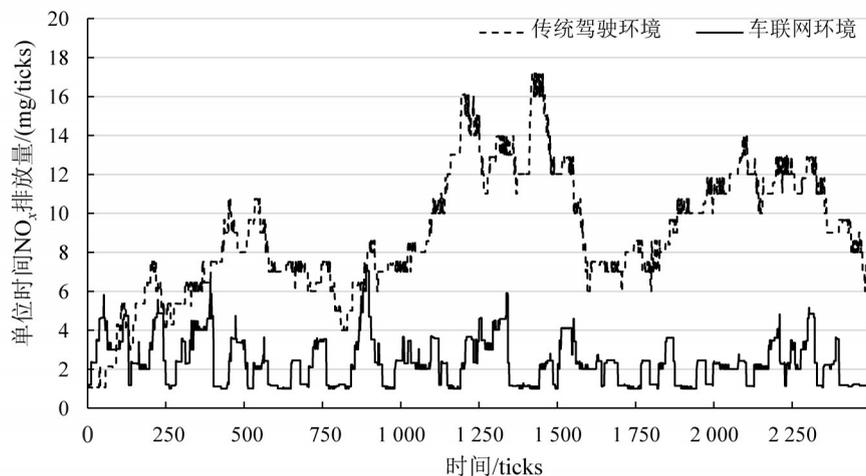


图 13 传统驾驶环境和车联网环境下单位时间NO<sub>x</sub>排放量比较图

Fig. 13 NO<sub>x</sub> emissions of per unit time under traditional environment and connected vehicle environment

根据表2计算得出,在车联网环境下运用速度控制策略,单位时间内的燃油消耗量降低了40.6%,CO排放量降低了3.8%,HC排放量降低了74.5%,NO<sub>x</sub>排放量降低了73.3%。除CO排放量的降低不明显外,单位时间内的油耗量和其他污染物的排放量均有显著降低。研究表明CO的排放量对速度比较敏感,当车速比较快时,CO的排放量明显增加,本文中的车速控制策略优先考虑的是通行效率,即让可以在绿灯时间内通过交叉口的车辆以较大的速度尽快通过,这是导致CO排放量降低不明显的主要原因。但是,从图11可以看出,车联网环境下单位时间内CO的排放量趋于平稳,有效减少了CO排放量突然增加的情况。

仿真结果显示,速度控制模型下车辆通过信号交叉口的平均行程时间、总的燃油消耗量和污染物排放量都有显著减少,因此,从总体来看,该车速控制模型是有效的。但是由于加入速度控制和不加速度控制需要运行2次仿真程序,并且仿真过程中生成的车辆数及车辆的初始速度在一定范围内都是随机的,因此图7~图13中出现了在个别时刻速度控制模型下的行程时间及油耗和排放比传统驾驶环境下还要高的情况。此外,由于车辆的瞬时燃油消耗量和污染物排放量与车辆的速度、加速度密切相关<sup>[10]</sup>,在速度控制模型下为了达到提高通行效率的目的,某些时刻需要车辆进行加速的调整,也会导致速度控制下个别时刻的燃油消耗量及污染物排放量比传统驾驶环境下略高的情况。

#### 4 结 论

本文利用车联网环境下个体车辆可以与路侧设施及交叉口中心控制系统实时信息交互的特征,在不改变交叉口原有信号配时的前提下提出了一种新的交叉口车速控制策略,使车辆得以高效平滑地通过交叉口。仿真试验表明,该策略可以显著降低车辆通过交叉口的行程时间,同时也减少了整个交叉口区域内车辆的燃油消耗和污染物的排放,对当前提倡的绿色驾驶具有十分重要的意义。

本文假设车辆的到达服从泊松分布进而推导出信号交叉口速度控制模型。在车流密度比较大的

情况下,排队车流会对车速控制模型产生一定影响,因此对高饱和状态下的车速控制模型仍需深入研究。同时,本研究未考虑相邻交叉口之间的影响,对个体车辆的速度控制可能并非系统最优,对多交叉口的情况仍需进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 安实,姚焯东,姜慧夫,等. 信号交叉口绿色驾驶车速控制方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(5): 53-59. [AN S, YAO H D, JIANG H F, et al. A green driving speed control method at signal intersection[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(5): 53-59.]
- [2] 林培群,卓福庆,姚凯斌,等. 车联网环境下交叉口交通流微观控制模型及其求解与仿真[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 82-90. [LIN P Q, ZHUO F Q, YAO K B, et al. Solving and simulation of microcosmic control model of intersection traffic flow in connected-vehicle network environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 82-90.]
- [3] 李鹏凯,吴伟,杜荣华,等. 车路协同环境下多车协同车速引导建模与仿真[J]. 交通信息与安全, 2013, 31(2): 134-139, 148. [LI P K, WU W, DU R H, et al. Modeling and simulation of multi-vehicles cooperative speed guidance under connected vehicles[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2013, 31(2): 134-139, 148.]
- [4] 李鹏凯,杨晓光,吴伟,等. 车路协同环境下信号交叉口车速引导建模与仿真[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(3): 136-140, 156. [LI P K, YANG X G, WU W, et al. Modeling vehicle speed guidance at signal intersection under IntelliDriverSM[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2012, 30(3): 136-140, 156.]
- [5] FORTELLE A D L. Proceedings of the 13th international IEEE annual conference on intelligent transportation systems[C]. New York: IEEE, 2010.
- [6] KAMAL M A S, IEEE M, TAGUCHI S, et al. Efficient driving on multilane roads under a connected vehicle environment[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(9): 2541-2551.
- [7] KAMAL M A S, TAGUCHI S, YOSHIMURA T. Proceedings of the 18th international IEEE annual conference on intelligent transportation systems[C]. Spain: IEEE, 2015.
- [8] CHEN S Y, SUN J, YAO J. Proceedings of the 14th international IEEE annual conference on intelligent transportation systems[C]. Washington DC: IEEE, 2011.

下转第95页