

12-12-2019

Operation Control Method for Connected and Autonomous Vehicles at Intersection

Linguo Chai

1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; ;

Baigen Cai

1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; ;2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; ;3. Beijing Engineering Research Center of EMC and GNSS Technology for Rail Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

Shangguan Wei

1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; ;2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; ;3. Beijing Engineering Research Center of EMC and GNSS Technology for Rail Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

Wang Jian

1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; ;2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; ;3. Beijing Engineering Research Center of EMC and GNSS Technology for Rail Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Operation Control Method for Connected and Autonomous Vehicles at Intersection

Abstract

Abstract: A novel approach for coordinating connected and autonomous vehicles at intersection is proposed in this paper. *The road connecting the specific intersection is divided into two areas: status calculation area and status adjustment area. When the vehicle enters the status calculation area, LOOSE algorithm which is implemented in the infrastructure would be triggered to calculate the target status of the vehicle for it to avoid collision in the intersection. The results of LOOSE would be optimized by COMPACT algorithm with the objective of minimum queue length. And then operational suggestions for the vehicle to move in the adjustment area would be generated based on vehicle kinematic models.* Simulation results show that the method is able to improve the capacity of the intersection, especially for balanced traffic flow. And the method performs better than traditional signal control method in reducing the average vehicle delay.

Keywords

intelligent transportation, intersection control, slot-based crossing, collision avoidance

Authors

Linguo Chai, Baigen Cai, Shangguan Wei, Wang Jian, and Junjie Chen

Recommended Citation

Chai Linguo, Cai Baigen, Shangguan Wei, Wang Jian, Chen Junjie. Operation Control Method for Connected and Autonomous Vehicles at Intersection[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(9): 1875-1882.

基于间隙理论的智能车交叉口运行控制方法

柴琳果¹, 蔡伯根^{1,2,3}, 上官伟^{1,2,3}, 王剑^{1,2,3}, 陈俊杰¹

(1. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044;
3. 北京交通大学 北京市轨道交通电磁兼容与卫星导航工程技术研究中心, 北京 100044)

摘要: 提出了基于间隙理论的智能车在交叉口控制方法, 连接交叉口的道路被分为两个区域: 状态计算区和状态调整区, 当车辆进入状态计算区域时, 路侧设备通过 LOOSE (Location optimization on sequence evaluation) 算法计算无碰撞时车辆需要达到的目标状态, 然后通过 COMPACT (Cooperative optimization method for previous allocation comparatively transforming) 算法降低每条车道的排队长度, 并结合车辆运动学模型给出车辆在状态调整区的运行策略。仿真结果表明, 本文方法能够有效提高交叉口通行量, 并且对均衡交通流具有更优的控制效率; 较传统信号控制能够有效降低车辆平均延误。

关键词: 智能交通; 交叉口控制; 间隙穿行; 车辆避碰

中图分类号: U491.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 09-1875-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0337

Operation Control Method for Connected and Autonomous Vehicles at Intersection

Chai Linguo¹, Cai Baigen^{1,2,3}, Shangguan Wei^{1,2,3}, Wang Jian^{1,2,3}, Chen Junjie¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

3. Beijing Engineering Research Center of EMC and GNSS Technology for Rail Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A novel approach for coordinating connected and autonomous vehicles at intersection is proposed in this paper. The road connecting the specific intersection is divided into two areas: status calculation area and status adjustment area. When the vehicle enters the status calculation area, LOOSE algorithm which is implemented in the infrastructure would be triggered to calculate the target status of the vehicle for it to avoid collision in the intersection. The results of LOOSE would be optimized by COMPACT algorithm with the objective of minimum queue length. And then operational suggestions for the vehicle to move in the adjustment area would be generated based on vehicle kinematic models. Simulation results show that the method is able to improve the capacity of the intersection, especially for balanced traffic flow. And the method performs better than traditional signal control method in reducing the average vehicle delay.

Keywords: intelligent transportation; intersection control; slot-based crossing; collision avoidance

引言

交叉口拥堵是造成城市道路拥堵的主要原因



收稿日期: 2017-07-14 修回日期: 2017-10-21;
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1200100), 国家自然科学基金(61490705), 国家自然科学基金面上项目(61773049), 北京市自然科学基金(4172049), 北京交通大学研究生创新基金(2016YJS035);
作者简介: 柴琳果(1988-), 男, 湖北荆门, 博士, 讲师, 研究方向为智能车运行控制方法。

之一, 造成交叉口拥堵的原因一方面是城市道路中趋于饱和的车流, 另一方面是交叉口的控制策略^[1]。传统的信号控制算法本质上是以保障车辆安全为目的, 是车辆安全和车流效率折中的做法。

智能车能够通过车载传感器对车辆行为进行精确控制, 并且能够进行车车和车地通信, 因此智能车能够提前预知前方情况并且提前计算较优的

控制策略^[2]。在这种条件下,基于间隙穿行的交叉口智能车运行控制策略得以实现。当两车跟驰行驶时,两车需要保持一定的车距以防止追尾事故发生,两车间的间距长度能够根据车辆的速度进行调整,间隙穿行的思想是适当调整车辆间距,使得冲突方向的车辆能够通过两车之间的空隙安全驶过交叉口,以达到提高车流效率的目的。目前国内外已经有相关学者对基于间隙穿行的车辆控制理论进行了研究。

Lee 等^[3]对车辆的运行行为进行了控制,设计了一种能够保证车辆安全前提下的交叉口车辆运行控制方法,并且在单车道 4 方向的交叉口进行了仿真验证。Cai 等^[4]提出了一种基于时延 petri 网的交叉口车辆安全控制方法,车载设备能够计算车辆的运行控制曲线,并在 Q-Paramics 中进行了仿真验证,结果表明了算法的可行性。Wu 等^[5]设计了一种关于两车的速度引导方法用来降低车辆延误以及车辆在交叉口的停车次数,这种方法建立在车辆速度和交通灯信号配时基础之上,能够降低车辆延误。MIT^[6] sensible city lab 提出了基于间隙控制的交叉口 SIs (Slot-based Intersections) 的概念,指出 SIs 能够替代传统的交通灯,并且能够显著的降低排队长度和车辆延误,本文用了装载传感器和通信设备的智能车进行了仿真实验,采用 FARE (平等) 和 BATCH (组合) 方法对车辆进行控制,结果证明了 SIs 的可行性和高效性。

综上所述能够看出,目前关于基于间隙控制的 SIs 的研究,基本上都是建立在 FCFS(first come first serve)基础之上,并且为了最大限度上保障车辆的运行安全,在进行算法设计时,约束条件之一是交叉口内不允许出现冲突车流。目前投入使用的交叉口面积大小不一,这种算法在面积较大的交叉口中会造成通行量的浪费。尤其是在智能车 100%渗透率情况下,车辆的运行轨迹能够被精确控制和预测,因此现有的 SIs 控制方法控制效果仍然存在优化空间。

本文提出了一种智能车环境下基于车辆运动

模型的 SIs 控制方法,本文将包括道路在内的交叉口分为 2 个区域:状态计算区和状态调整区。当车辆进入状态计算区时,路侧设备通过 LOOSE (Location Optimization On Sequence Evaluation)算法基于当前的车辆位置计算无碰撞时车辆的需要达到的基本状态,然后通过 COMPACT (Cooperative Optimization Method for Previous Allocation Comparatively Transforming) 算法对 LOOSE 算法结果进行优化,在仍然满足安全约束条件下,压缩每条车道的车辆排队长度,并结合车辆运动学模型给出车辆运行控制策略;车辆通过执行控制策略,最终实现所有车辆在无碰撞、无减速、无停车条件下通过交叉口的目标。在此基础上,针对不同冲突车流最小安全距离和车流输入,计算交叉口的通行能力。

1 方法概述

当道路中两车发生跟驰行为^[7]时,必须保持最小的安全跟车距离以防止追尾事故发生,可将两车之间的距离视作间隙,如果适当的增大间隙能够让冲突相位的车辆从间隙中安全通过,交通效率能够得以提升,这是 SIs 的基本思想。因此,SIs 控制是在效率和安全两个交通参数中寻求更优的平衡。SIs 的控制模式如图 1 所示。

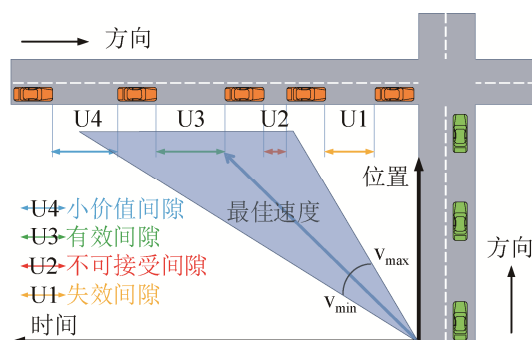


图 1 SIs 中的间隙分类
Fig. 1 Slots types in SIs

可将不同的间隙分为 4 类,分别是:小价值间隙,车辆大幅减速才能够通过间隙;有效间隙,车辆如果按照速度引导建议,能够正常通过间隙;不

可接受间隙, 间隙太小不能通过; 失效间隙, 车辆如果通过, 速度会超出道路限速。

通过上述能够看出, 只有有效间隙才能在保证车辆安全、不影响道路其他车辆、不超过道路限速的条件下让车辆安全通过, 但是仅仅采用有效间隙会产生间隙的浪费, 因此如何对车辆的运行情况进行合理控制从而改变间隙大小成为 SIS 控制的核心。本文将交叉口区域划分为了状态计算区和状态调整区, 并且通过车辆运动模型对车辆的控制决策进行计算。图 2 为状态计算区和状态调整区示意图。

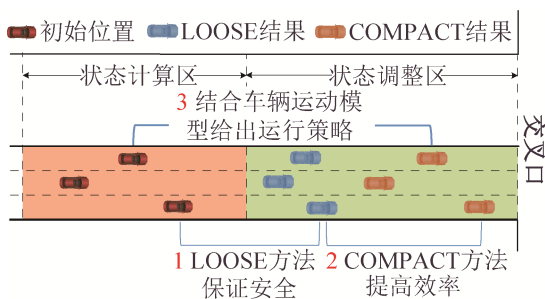


图 2 状态计算和状态调整区域
Fig. 2 Status calculation and adjustment areas

当车辆进入状态计算区之后, 根据 LOOSE 方法流程, 并且结合车辆在交叉口安全通行的条件, 计算出车辆在状态调整区的位置; 然后在 LOOSE 方法得到的车辆目标位置基础上, 通过 COMPACT 方法, 对车辆的目标位置进行优化, 使得车辆目标位置更加靠近交叉口, 以达到提高通行效率的目的。然后根据车辆的当前位置和车辆的目标位置, 并且结合时间约束条件(即车辆从当前位置运动到目标位置需要的时间), 给出车辆的速度引导建议。状态计算区和状态调整区的长度并不固定, 但需满足两个条件: 一个条件是 LOOSE 和 COMPACT 方法计算出的目标位置需要在状态调整区之内, 另一条件是车辆能够在时间约束条件内达到目标位置和目标速度。LOOSE 算法能够对车辆的位置进行调整, 在不用急加减速条件下实现间隙通行; COMPACT 算法能够对每一方向、每一车道的车辆进行压缩, 在满足间隙通行安全约束的条件下, 缩

短车道总的车辆长度, 提高运行效率。本文将状态计算区和状态调整区设置为 250 m, 控制区域的长度可根据实际情况进行调整。

2 车辆行为分析

2.1 单车道最大通行能力分析

车辆的跟车距离与速度成非线性正增长关系, 本文根据最小安全距离跟驰模型计算车道的通行能力, 发生跟驰行为的车辆满足:

$$s_{gap} + \frac{v_l^2}{2a_{dcc}} \geq \tau + \frac{v_f^2}{2(a_{dcc}/2)} \quad (1)$$

式中: v_l 是前车速度; v_f 是后车速度; $a_{dcc} = 6\text{m/s}^2$ 是车辆的最大减速度^[8]; s_{gap} 是车辆在行进过程中的跟车距离; τ 是跟驰最小安全距离, 本文中取 5 m。因此, 车道通行能力为 η :

$$\eta = \frac{n}{((n-1)\tau + nL)/v} \quad (2)$$

式中: n 表示状态计算区域中某一车道上的车辆总数, L 是车长为 5 m, 本文中取车宽为 2 m。通过数值运算, 能够得到当 η 取最大时的速度值 v_{opt} 。

$$v_{opt} = \sqrt{60(2n-1)/n-1} \quad (3)$$

图 3 是 η , v_{opt} 和 n 的关系。

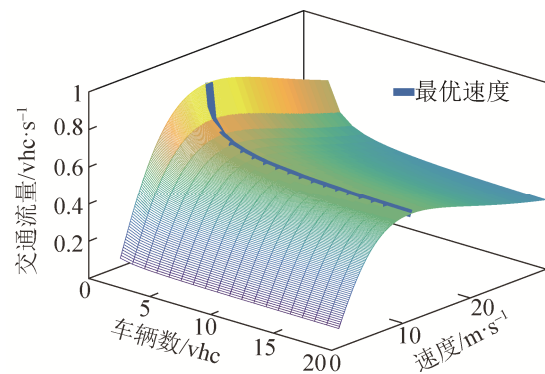


图 3 不同车辆数对应的最优速度
Fig. 3 Optimal speed for different vehicle number

能够看出, 当车辆总数不同时, 最优速度也不同, 最优速度的变化范围在 10.95~13.42 m/s 之间, 小于车辆的最大转弯速度^[9]。本文在进行车辆间隙穿行算法设计中, 视车辆按照最优速度做匀速行驶。

2.2 交叉口冲突分析

图 4 给出了典型的双向六车道交叉口基本属性和冲突车流的冲突点, 针对本文方法的分析将基于以下交叉口进行。

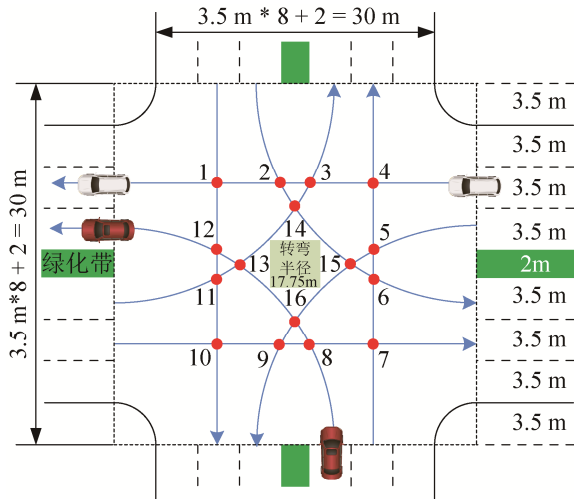


图 4 六车道交叉口

Fig. 4 Intersection with six lanes

本文采用弧转向模型^[10]和匀速行驶模型对车辆的轨迹进行预测。下面给出了以由东向南的左转车辆为例的车辆轨迹预测过程。

$$EL_{n+1} = \begin{bmatrix} el_{x_1}, el_{x_2}, \dots, el_{x_{ael}} \\ el_{y_1}, el_{y_2}, \dots, el_{y_{ael}} \end{bmatrix}_{n+1} \quad (4)$$

EL_{n+1} 包含了第 $n+1$ 个仿真步长时由东向西左转车道的所有车辆的位置信息, el_{x_i} 表示车辆的横坐标, (i 表示离交叉口最近的第 i 辆车), el_{y_i} 表示纵坐标, ael 表示此车道的车辆总数。因此, 对于第 m 辆车, 在由东向西道路中行驶时的轨迹可以通过式(5)表示:

$$\begin{cases} EL_{n+1}(1, m) = EL_n(1, m) + t_{step} \times v_{opt} \begin{pmatrix} E \rightarrow W \\ Road \end{pmatrix} \\ EL_{n+1}(2, m) = EL_n(2, m) \end{cases} \quad (5)$$

在交叉口内时, 车辆轨迹可以通过式(6)表示:

$$\begin{cases} \theta = t_{step} \times v_{opt} / r + \text{asin}((EL_n(2, m) - 500) / r) \\ EL_{n+1}(1, m) = 500 + r \times \cos \theta \\ EL_{n+1}(2, m) = 500 + r \times \sin \theta \end{cases} \quad (\text{Intersection}) \quad (6)$$

在由北向南的道路中行驶时, 轨迹可以通过式(7)表示:

$$\begin{cases} EL_{n+1}(1, m) = EL_n(1, m) \\ EL_{n+1}(2, m) = EL_n(2, m) + t_{step} \times v_{opt} \begin{pmatrix} N \rightarrow S \\ Road \end{pmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

式中: t_{step} 表示仿真步长, 本文中取 0.1 s 。在双向六车道的交叉口中, 一共有 16 个冲突点, 冲突点集合 Φ 如式(8)所示。

$$\Phi = \{ (EL, SS), (EL, SL), (EL, WS), (EL, NL), (ES, SS), (ES, WL), (ES, NL), (ES, NS), (SL, WS), (SL, WL), (SL, NS), (SS, WS), (SS, NL), (WL, NS), (WL, NL), (WS, NS) \} \quad (8)$$

E、S、W 和 N 分别表示方向东、南、西和北, L 和 S 表示左转和直行。在仿真运行的任意时刻, 如果下式成立, 则需要对车辆位置进行优化。

$$\forall k \in [1, 16], f(\Phi(k)) \leq \sigma \quad (9)$$

式中: σ 是冲突车流中的车辆必须保持的最小安全距离^[11]; f 为计算车辆直线距离的函数。

3 车辆运行控制方法

本文将交叉口区域分为了状态计算区和状态调整区, 其中, 状态调整区首先采用 LOOSE 算法以车辆安全为目标, 通过轨迹演化, 确定车辆的目标位置, 使车辆如果按照最优速度匀速行驶时不会出现危险, 满足 SIs 控制的基本要求; 然后通过 COMPACT 方法, 在保证安全的前提下, 对车队进行压缩, 以最大交通流量为目标, 对车队进行优化。LOOSE 和 COMPACT 均能在保证安全的条件下提高道路的通行效率。

3.1 LOOSE 算法

LOOSE 算法能够在不大幅度调整车辆位置的条件下保障 SIs 的正常运行, LOOSE 算法流程如下:

FV = optimizing vehicles sequence

FV=FV + status calculating area length, AV = FV

for all vehicles VHC \in FV

while ()

AV advance by t_{step}

if VHC \in AV in intersection

for all vehicles CF conflict with VHC

```

if distance between CF and VHC <  $\sigma$ 
    position data of VHC in FV -1 m
    AV = FV, break
end if
end for
end if
if all vehicles in AV leave intersection
    break
end if
end while
end for

```

通常, 如果车辆按照本身位置和速度匀速行驶, 路侧设备根据车辆的状态能够识别危险, 本文根据这种预警信息对车辆的目标位置进行计算。假设车辆按照最优速度匀速行驶, 如果行进至交叉口后与其他车辆存在危险, 则对车辆距离交叉口的初始位置进行-1 m 处理。

3.2 COMPACT

COMPACT 算法在 LOOSE 算法之后执行, LOOSE 算法能够产生初始的 SIs-based 车辆位置, COMPACT 方法能够让车辆位置更加紧凑, 从而在应对大规模车流时提高通行效率, COMPACT 执行算法流程如下:

```

FV = optimizing vehicles sequence
Opt = 0, AV = FV
for all vehicles VHC  $\in$  FV
    while ( )
        AV advance by  $t_{step}$ 
        if VHC  $\in$  AV in intersection
            for all vehicles CF conflict with VHC
                if distance between CF and VHC <  $\sigma$ 
                    opt = 1, AV = FV, break
                end if
            end for
            if opt == 1 break
        end if
        if all vehicles in AV leave intersection
            position data of VHC in FV +1 m
        end if
    end while
end for

```

end for

当 LOOSE 和 COMPACT 算法执行时, 均需要选定下一辆进行优化的车辆, 因此, 本文引入了最短冲突时间的概念来确定下一辆优化的车辆, 如图 5 所示。

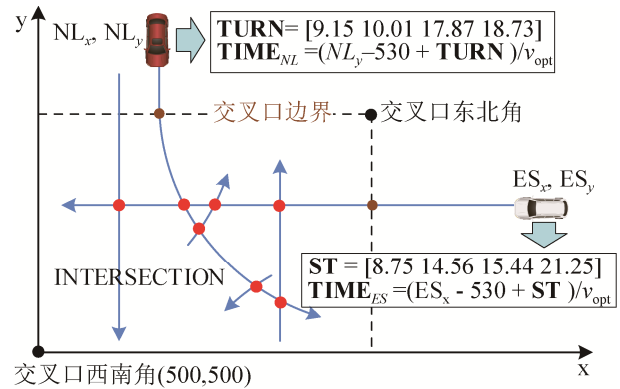


图 5 最短冲突时间

Fig. 5 Minimum conflict time

根据交叉口的 16 种不同类型的车流冲突及车辆的状态数据, 能够计算出每条车道的第一辆车的最短冲突时间, 下一辆优化的车辆为最短冲突时间最小的车辆。

3.3 车辆状态调整

当所有车辆优化完毕之后, 车辆开始调整自身运行状态至目标状态, 目标状态包含了位置、速度和时间约束。

$$\begin{bmatrix} d_1 & 0 & v_1 \\ d_2 & 0 & v_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ d_n & 0 & v_n \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} D_1 & T_0 & V_1 \\ D_2 & T_0 & V_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ D_n & T_0 & V_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: d_n 表示车辆 n 距离交叉口的初始距离; v_n 表示第 n 辆车的初始速度; D_n 表示车辆的目标状态距离交叉口的距离; T_0 表示时间约束条件; V_n 表示目标速度。其中时间上的约束由车道第一辆车的状态决定, 视第一辆车做匀加/减速运动, 时间 T_0 定义为:

$$T_0 = \frac{2(D_1 - d_1)}{V_1 + v_1} \quad (11)$$

其他车辆的运行过程分为加速/减速、匀速和减

速/加速 3 个阶段。考虑到舒适性, 车辆加速/减速的加速度/减速度绝对值均为 $\alpha = 2 \text{ m/s}^2$, 因此每辆车的 3 个阶段时间计算过程如下:

$$s_1 = v_n T_1 + \frac{1}{2} a T_1^2 \tag{12}$$

$$s_2 = (v_n + a T_1)(T_0 - T_1 - T_3) \tag{13}$$

$$s_3 = (v_n + a T_1) T_3 + \frac{1}{2} a T_3^2 \tag{14}$$

$$v_n + a T_1 + a T_3 = V_n \tag{15}$$

$$s_1 + s_2 + s_3 = D_n - d_n \tag{16}$$

通过式(12)~(16), 能够得到车辆的状态控制曲线。图 6 所示为某次仿真中, 5 辆车需要通过 30 s 时长从不同初始位置行驶至目标位置, 并且满足目标速度要求时车辆距交叉口距离、时间和速度的变化曲线。

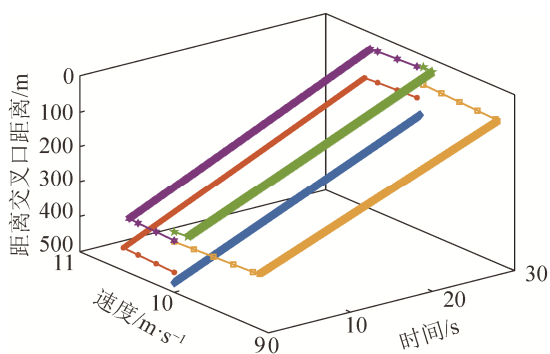


图 6 车辆状态调整曲线

Fig. 6 Status adjustment curve of vehicle

4 仿真实验

本文通过 MATLAB 建立了仿真环境, 仿真环境包含了道路渠化、车辆跟驰模型、车辆避撞模型、车辆运动学模型、LOOSE 和 COMPACT 模型。图 7 给出了输入为每条车道 8 辆车、最小安全距离 σ 为 8 m 时在执行 COMPACT 模型之后仿真时间为 13 s-17.8 s 之间交叉口中车辆的运行情况。

通过本文方法, 能够做到车辆在交叉口以恒定的速度运行并且无碰撞通过。不对车辆进行控制、LOOSE 算法之后的位置和 COMPACT 算法之后的位置如图 8 所示。图 8 中圆点线是根据在车辆当前距离交叉口位置上减去状态调整区长度得到的, LOOSE 和 COMPACT 结果是根据车辆的当前位置经过计算得到的。

通过图 8 能够看出, LOOSE 算法优化之后的车辆距交叉口的距离, 要大于等于车辆的初始位置减去状态调整区的长度之后的位置, 这是因为 LOOSE 算法注重安全, 通过将车辆位置调整的远离交叉口来实现 SIs。COMPACT 算法之后的车辆距离交叉口的距离要明显小于车辆的初始位置和 LOOSE 之后的车辆位置, 这是由于 COMPACT 算法对车队长度进行了压缩, 以优化交通流量为目标进行了优化操作。

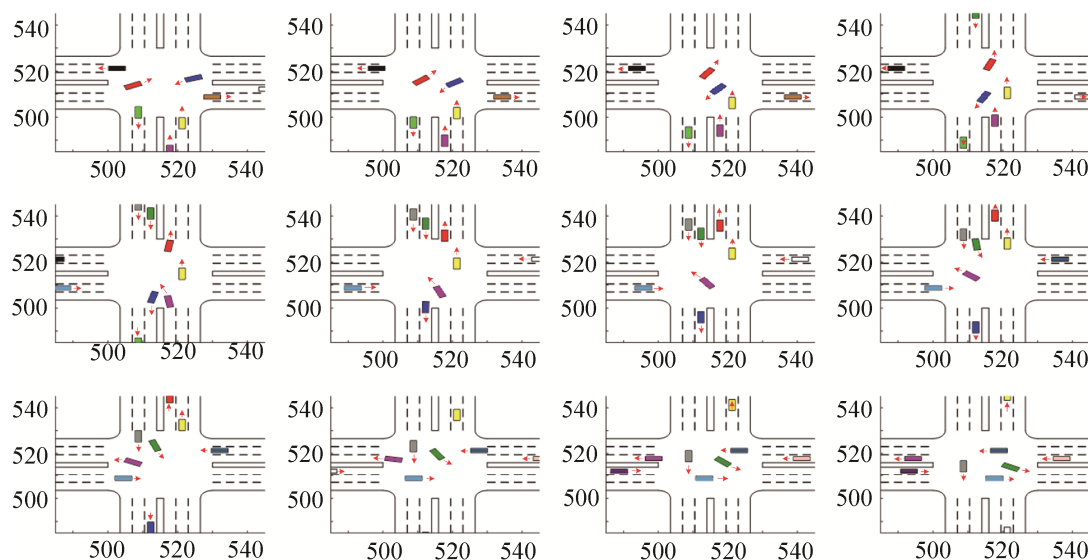


图 7 仿真过程

Fig. 7 Simulation process

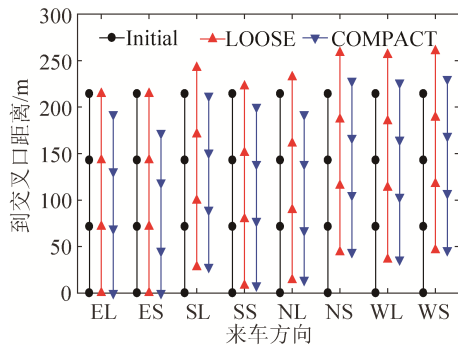


图 8 LOOSE 和 COMPACT 之后的车辆位置
Fig. 8 Vehicle position after LOOSE and COMPACT

图 9 中, 每条车道的输入量相同, 为 1-18 辆, 因此图中横坐标变化范围为 1×8 到 18×8 。本文在不同的最小安全距离条件下进行了仿真, 在最小安全距离相同时, 通过幂指数函数进行拟合, 交叉口的交通流量最后会趋于平稳, 在 9 m、8 m 和 7 m 时, 交通流量最终分别趋近于为 1.38 vhc/s、1.5 vhc/s 和 1.75 vhc/s, 要优于传统交叉口信号控制的平均 1 vhc/s。随着最小安全距离的减小, 交通流量最终趋于平稳的数值越大, 这与实际情况相符。本文中的安全条件为冲突车辆之间的最小间距, 考虑到正常小客车车长为 5 m 左右, 一般小于 5 m, 因此本文采用了 7 m, 8 m 和 9 m 作为安全条件进行仿真。冲突车辆的最小间距值设置的越大, 控制方法的安全性越高, 车流效率越低; 冲突车辆的最小间距值设置的越小, 控制方法的安全性越低, 车流效率越高。

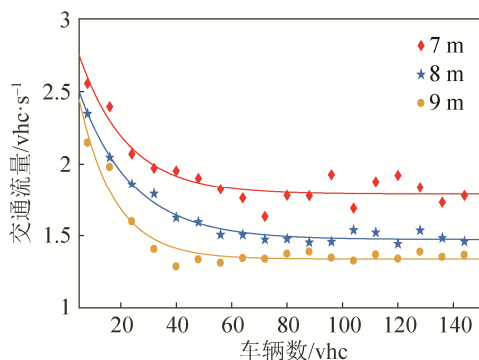


图 9 均衡交通流下仿真结果
Fig. 9 Simulation results for balanced traffic

为验证在非均衡交通流中本文算法效果, 本文设计了 3 种不同的非均衡交通流输入条件: 一条道

路交通流变化 3-13/车道、两条对向道路交通流变化 3-13/车道和两条相邻道路交通流变化 3-13/车道, 其中, 保持不变的道路的流量为每条车道 8 辆车。图 10 为非均衡交通流条件下的仿真验证结果。

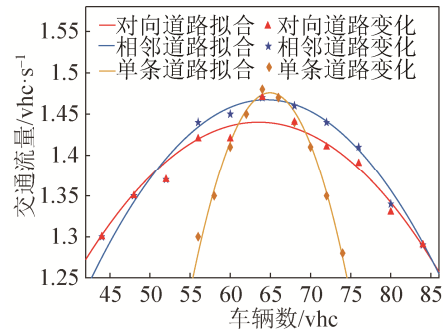


图 10 非均衡交通流下仿真结果
Fig. 10 Simulation results for imbalanced traffic

通过图 10 可以看出, 在每条车道输入均为 8 时能够达到最大的通行效率, 说明本文方法对于均衡交通流有着较好的适应性; 当对向的 2 条道路车流发生变化时, 最终得到的结果相差不大, 这与交叉口和交叉口冲突点的各向同性关系吻合; 2 条道路车流变化的交通流量要大于 1 条道路车流变化的交通流量, 说明当由每条车道的车辆数组成的数据集方差越大, 能够得到的最大交通流量越小。

为验证交通流效率, 本文通过车辆平均延误对定时控制、自由流和本文采用的 SIs 控制方法进行了比较, 其中定时控制中车流输入为每条车道每 10 s 一辆车, SIs 控制输入为均衡交通流每条车道 1~16 辆, 结果如图 11 所示。

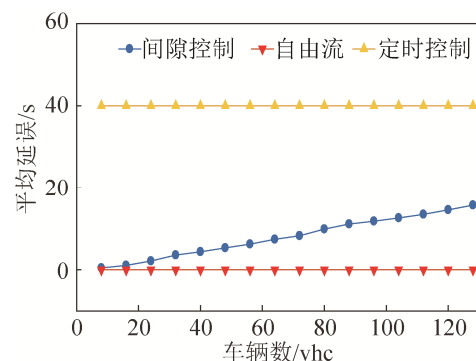


图 11 交叉口不同控制方法效果比较
Fig. 11 Comparison of different control strategies

通过图 11 可以看出, 对于 SIs 控制, 随着车辆总数的增大, 平均车辆延误增大, 这是因为文中所选取的最优速度要小于自由流中车辆转弯或直行的速度, 但是总体上, 文中提出的 SIs 控制方法计算出的平均延误要远小于定时控制的平均延误, 并且文中提出的 SIs 控制方法中车辆平均延误, 随着每次计算的车辆总数变化而变化, 如果适当缩小状态计算和状态调整区域的路段长度, 车辆的平均延误可以得到明显降低。

5 结论

本文基于 LOOSE 和 COMPACT 提出了一种新的 SIs 控制方法, 本文将交叉口分为 2 个区域: 状态计算区和状态调整区。当车辆进入目标状态计算区域时, 路侧设备通过 LOOSE 算法和 COMPACT 算法计算出车辆所需要达到的目标状态, 然后根据目标状态给出车辆的运行控制策略, 最终达到所有车辆在不碰撞危险、无减速停车的条件下通过交叉口。结果表明, 本文给出的 SIs 控制算法能够提高路口的通行效率, 在冲突车流安全距离分别为 9 m、8 m 和 7 m 时, 最终的交通流量可以达到分别为 1.38 vhc/s、1.5 vhc/s 和 1.75 vhc/s。并且本文方法能够有效降低车车辆平均延误, 总体要远小于定时控制方法; 如果适当缩小状态计算和状态调整区域的路段长度, 车辆的平均延误可以继续降低至零。LOOSE 和 COMPACT 也可以不同时使用, 本文提出的方法具有适用性, 并且能够提供较优的通行能力。

后续工作将会集中在: 从算法性能层面看, 算法计算可以继续优化, 适当调节算法中参数取值, 减少迭代次数, 能够提高算法效率; 从避碰规则来看, 本文未考虑车辆碰撞过程, 以冲突车流的最小安全距离作为约束条件虽然仍然能够将结果限定在安全范围内, 但是这种限定仅仅在空间上, 需要进一步结合时间-空间上的车辆状态对车辆安全的定义进行优化。

参考文献:

[1] David E, Hillel B G, Meir B. Vortex-based zero-conflict

design of urban road networks[J]. *Networks & Spatial Economics* (S1566-113X), 2013, 13(3): 229-254.

[2] Biswas S, Tatchikou R, Dion F. Vehicle-to-vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety[J]. *IEEE Communications Magazine* (S0163-6804), 2006, 44(1): 74-82.

[3] Joyoung L, Byungkyu P. Development and evaluation of a cooperative vehicle intersection control algorithm under the connected vehicles environment[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (S1524-9050), 2012, 13(1): 81-90.

[4] Cai B G, Zheng Z R, Shanguan W, et al. Unsignalized Cooperative Optimization Control Method Based on Vehicle Speed Guidance and Information Interaction[C]. *Proceedings of 2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE: Piscataway, NJ, 2014: 57-62.

[5] Wu W, Li P K, Zhang Y. Modelling and simulation of vehicle speed guidance in connected vehicle environment [J]. *International Journal of Simulation Modelling* (S1726-4529), 2015, 14(1): 145-157.

[6] Remi T, Paolo S, Stanislav S, et al. Revisiting street intersections using slot-based systems[J]. *PLOS ONE* (S1932-6203), 2016, 11: 1-9.

[7] 徐程, 曲昭伟, 金盛. 考虑侧向偏移的车辆跟驰行为建模及仿真[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2014, 44(6): 1609-1615.

Xu Cheng, Qu Zhaowei, Jin Sheng. Modeling and simulation of car following behavior considering lateral separation[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2014, 44(6): 1609-1615.

[8] Jiang R, Wu Q S, Zhu Z J. Full velocity difference model for a car-following theory[J]. *Physical Review E* (S2470-0045), 2001, 64(1): 17101.

[9] Ahmed O, Tarek S, Said E. Framework for evaluating risk of limited sight distance for permitted left-turn movements: case study[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering* (S0315-1468), 2016, 43(4): 369-377.

[10] Leng J Q, Feng Y Q, Zhai J, et al. Travel time model of left-turning vehicles at signalized intersection[J]. *Mathematical Problems in Engineering* (S1024-123X), 2012, 473847: 1-10.

[11] 曹凯, 黄肖肖, 于云, 等. 自主车辆避障安全路径的可达集建模[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(3): 526-533.

Cao Kai, Huang Xiaoxiao, Yu Yun, et al. Modeling method based on reachable set for safety path in autonomous vehicle obstacle avoidance[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(3): 526-533.