车联网环境下考虑调头开口的单点全感应控制方法

孙 立[1],姚荣涵[2],杜筱婧[3],张文松[4],徐洪峰[1],孙 锋[2]

(1.大连理工大学 建设工程学院,辽宁 大连 116024;2.山东理工大学 交通与车辆工程学院,山东 淄博 255049;3.中共大连市委党校,辽宁 大连 116013;4.河北地质大学 城市地质与工程学院,石家庄 050031)

摘 要:面向网联车辆渗透率为100%的车联网环境,为提高设置调头开口和左转短车道的交叉口的运行效率,提出一种新的单点全感应控制方法。分析了调头开口、左转短车道和信号相位方案对不同转向车辆运行轨迹的影响,尤其是左转相位与左侧进口道直行相位的衔接关系对调头车流的影响。根据直接实时获取的网联车辆转向意图、位置、速度和加速度,提出了网联车辆所需绿灯时间计算方法。分别针对左转相位和直行相位,基于完全释放车道组内所有排队车辆,提出了初始绿灯时间计算方法;基于相位饱和度最大化和滑动时间窗法,提出了绿灯延长时间计算方法。考虑2个交叉口、3种高峰交通需求和16种信号相位方案,使用定时控制方法、传统全感应控制方法和本文方法,采用正交实验设计方法确定本文方法的最佳参数组合,运用Python和VISSIM软件实施1 728种交通仿真实验。结果表明:相比定时控制方法,本文方法使交叉口车均延误降低了12.13%～32.14%、平均排队长度缩短了15.49%～47.20%;相比传统全感应控制方法,本文方法使交叉口车均延误降低4.47%～5.71%、平均排队长度缩短7.90%～16.79%。可见,本文方法优于定时控制方法和传统全感应控制方法。

关键词:交通运输系统工程;车联网;全感应控制;信号交叉口;调头开口;左转短车道

中图分类号:U491.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2026)06-1605-13

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241325

Fully-actuated control method for an isolated intersection considering U-turn median openings in connected vehicle environment

SUN Li[1], YAO Rong-han[2], DU Xiao-jing[3], ZHANG Wen-song[4], XU Hong-feng[1], SUN Feng[2]

(1. *School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian* 116024, *China*; 2. *School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo* 255049, *China*; 3. *Party School of Dalian Municipal Committee of CPC, Dalian* 116013, *China*; 4. *School of Urban Geology and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang* 050031, *China*)

Abstract: To improve the operational efficiency of an intersection with U-turn median openings and left-turn bays, a new fully-actuated control method for isolated intersections was proposed in a connected

收稿日期:2024-12-12.

基金项目:国家自然科学基金项目(52172314);泰山学者工程专项经费项目;山东省自然科学基金项目(ZR2024MG021).

作者简介:孙立(1990-),男,博士研究生.研究方向:智能交通管理与控制.E-mail:sunli0315@yeah.net

通信作者:姚荣涵(1979-),女,教授,博士.研究方向:智能交通管控及规划.E-mail:cyanyrh@sdut.edu.cn

vehicle environment with a 100% penetration rate of connected vehicles. The impacts of U-turn median openings, left-turn bays and signal phase schemes on the travel trajectories of different turning vehicles were analyzed. Specifically, it was analyzed that the connective relationship between the left-turn phase and the through phase for the left approach affects the U-turn flow. Based on the directly and real-time acquired turning intentions, positions, speeds and accelerations of connected vehicles, the required green time calculation methods for connected vehicles were proposed. For the left-turn phase and the through phase, respectively, the initial green time calculation methods were presented based on fully releasing all the queued vehicles on each lane group; and the green extension time calculation methods were developed based on the maximization of the saturation degree of each phase and the sliding time window method. Two intersections, three peak traffic demands and sixteen signal phase schemes were considered. The pretimed control method, the traditional fully-actuated control method, and the proposed method were implemented. The orthogonal experimental design method was adopted to determine the optimal parameter combination for the proposed method. 1 728 sets of traffic simulation experiments were conducted using the Python and VISSIM software. The results reveal that compared with the pretimed control method, the proposed method makes the average vehicle delay reduce by 12.13%～32.14% and the average queue length shorten by 15.49%～47.20%. Compared with the traditional fully-actuated control method, the proposed method makes the average vehicle delay reduce by 4.47%～5.71% and the average queue length shorten by 7.90%～16.79%. It can be seen that the proposed method is superior to both the pretimed control method and the traditional fully-actuated control method.

Key words: engineering of communication and transportation system; internet of vehicles; fully-actuated control; signalized intersections; U-turn median openings; left-turn bays

0 引 言

孤立交叉口(简称单点)是指不与相邻交叉口进行协调控制的交叉口。随着机动车保有量增长,在路段开口处调头的车辆在冲突车流中找到可插车间隙愈发困难。为借助交通信号分离交通冲突,将调头开口移至下游信号交叉口[1-3]。为提高交叉口通行能力,常采用进口道展宽方式,展宽车道长度有限且常用于左转,称为左转短车道[4]。因此,设置调头开口和左转短车道的交叉口现已较为常见。

当进口道设置调头开口和左转短车道时,调头车辆和左转车辆通常共用左转短车道,前者排队和驶离以调头开口为准,后者排队和驶离以进口道停止线为准[5]。一方面短车道上排队车辆可能溢出以致阻塞相邻车道,另一方面相邻车道上排队车辆可能阻塞短车道入口,将二者统称为短车道效应[6]。相比进口道不设置调头开口或左转短车道,进口道设置调头开口和左转短车道使交通流时变过程更复杂[7,8],此时要求信号配时方案能实时响应交通流变化。

感应控制方法根据交通需求变化实时优化信号配时方案[9]。传统感应控制方法依赖传统车辆检测器感知的交通需求,但传统车辆检测器易损坏或检测精度受天气影响[10]。进口道设置调头开口和左转短车道时,传统车辆检测器尽管能根据车辆驶离交叉口的转向反推混行车流中车辆的转向意图,但是无法直接获取混行车流中车辆的转向意图,所得数据缺乏实时性,致使传统感应控制方法效果有限。

从车联网环境中可直接实时获取所有网联车辆的转向意图、位置、速度、加速度等信息,恰好可弥补传统车辆检测器的固有缺陷[11-14]。对于设置调头开口和左转短车道的交叉口,根据直接实时获取的所有网联车辆信息,能实时预估不同转向车辆驶离交叉口需要的绿灯时间,进而根据交叉口交通流运行状态实时优化信号配时方案。为提高设置调头开口和左转短车道的交叉口的运行效率,有必要利用车联网环境探究考虑调头开口的单点全感应控制方法。

许多学者关注基于车联网环境的信号控制方法。有学者利用网联车辆数据提出了信号相位及配时优化方法,并探讨了网联车辆渗透率对交通

流运行性能的影响[15,16]。假设网联车辆渗透率为100%，徐洪峰等[11]提出了基于扩展车长转化率的单点全感应控制方法；Li等[17]建立了最小化车辆油耗和行程时间的混合整数非线性信号优化方法；张存保等[18]提出了最大化相位饱和度的绿灯时间滚动优化方法。另有学者总结了基于车联网环境的信号控制优化方法[19-21]。研究结果表明：相比传统感应控制方法，基于车联网环境的信号控制方法能显著降低交叉口车辆延误或排队长度，然而这些研究不涉及车辆调头。

为提高调头开口的运行效率，吴文静等[22]提出了调头区域车路协同控制方法。现有研究能为开发设置调头开口和左转短车道的交叉口的感应控制方法提供借鉴，但仍存在以下不足：①忽略了进口道设置调头开口和左转短车道时，调头车流与其他车流相互作用对交叉口运行效率的影响；②基于特定信号相位方案，没有考虑不同信号相位方案对调头车流及其相关车流的差异化影响。

网联车辆并非具备高级自动驾驶功能的智能网联车辆，而是配备具有车联网功能的车载终端的人工驾驶车辆[11]。目前，国家大力发展车联网产业，已有城市将智能手机作为车载终端，试点具有类似功能的手机应用程序[23]。从技术发展和应用成本角度考虑，未来该类手机应用程序很可能研发成功并全面推广。不考虑车辆驾驶行为，假设网联车辆渗透率为100%，依赖这样的车联网环境可直接实时获取车辆信息。

针对车联网环境下设置调头开口和左转短车道的交叉口，本文分析了调头开口、左转短车道和信号相位方案共同影响的交通流运行规律，利用网联车辆转向意图、位置、速度、加速度等实时信息提出车辆驶离交叉口所需绿灯时间计算方法以及新的单点全感应控制(fully-actuated control considering U-turn median openings and left-turn bays in a connected vehicle environment，FACUL-CV)方法。

1　考虑调头开口与左转短车道的交通流特性

1.1　交叉口渠化方案

以四路交叉口(见图1)为例，记进口道编号为a，设置调头开口和左转短车道的进口道a包含：1个调头开口、1条左转短车道、M_a^{L}条左转车道($M_a^{\mathrm{L}}\geqslant 0$)、$M_a^{\mathrm{T}}$条直行车道($M_a^{\mathrm{T}}\geqslant 1$)、$M_a^{\mathrm{R}}$条右转车道($M_a^{\mathrm{R}}\geqslant 0$)。其中，$W_a^{\mathrm{U}}$为进口道$a$中央分隔带宽度，即调头开口宽度，m；$L_a$为调头开口与进口道$a$停止线的间距，即调头开口位置，m；$L_a^{\mathrm{U}}$为进口道$a$调头开口长度，m；$L_a^{\mathrm{LB}}$为进口道$a$左转短车道长度，即短车道区域长度，m。图1中，粗虚线所围区域即短车道区域，是指短车道起点所在断面与进口道停止线之间的进口道区域。进口道设置调头开口的前提是：进口道中央分隔带和相邻反向出口道总宽度满足车辆一次完成调头。

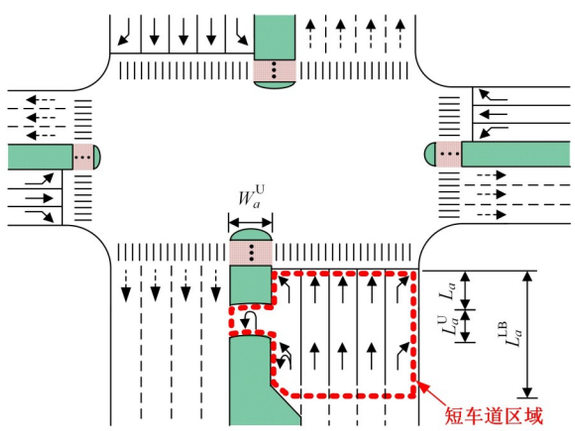


图1　设置调头开口和左转短车道的交叉口进口道示意图

Fig. 1　Schematic diagram of an intersection approach with an U-turn median opening and a left-turn bay

1.2　信号相位方案

信号相位方案参照美国NEMA(National electrical manufactures association)标准给出的双环结构[24]，采用调头相位控制调头车流。为避免交通冲突且提高信号相位灵活性，调头相位跟随当前进口道左转相位和左侧进口道直行相位运行。若当前进口道左转相位和左侧进口道直行相位相邻，则这两个相位的绿灯间隔时间内调头相位持续亮绿灯，即调头信号连续；否则，调头信号不连续。

如图2所示，以南北方向为例，该方向有4种信号相位方案，每种信号相位方案有3种车流放行顺序，即该方向共有12种车流放行顺序；同理，东西方向也有4种信号相位方案和12种车流放行顺序。如表1所示，交叉口共有16种信号相位方案和144种车流放行顺序。信号相位方案1和6使所有调头信号均连续，信号相位方案2和5使所有调头信号均不连续，其余信号相位方案均使半数调头信号连续。调头信号连续时，L-T表示当前进口道左转相位先行、左侧进口道直行相位

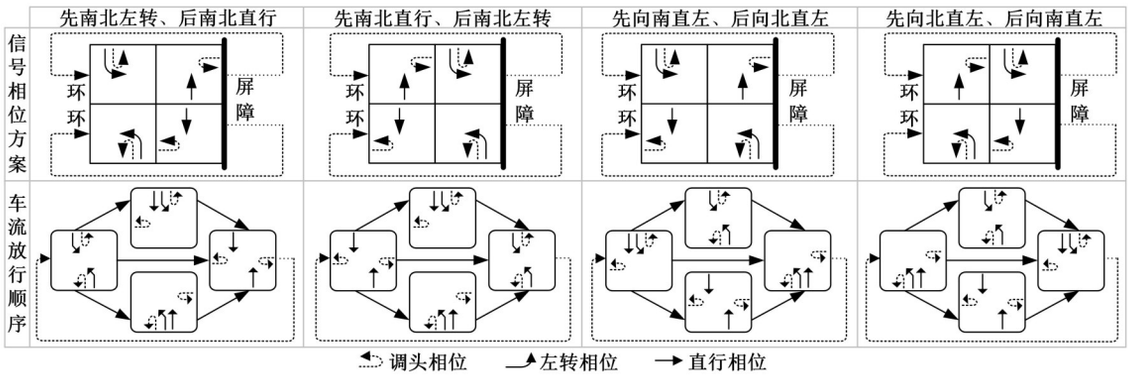


图2 设置调头开口的进口道的信号相位方案及车流放行顺序

Fig. 2 Signal phase schemes and movement sequences for approaches with U-turn median openings

表1 设置调头开口的交叉口的信号相位方案

Table 1 Signal phase schemes for an intersection with U-turn median openings

方案编号	进口道车流放行顺序		调头信号连续性			
	南北方向	东西方向	WB	NB	EB	SB
1	先南北左转、后南北直行	先东西左转、后东西直行	T-L	T-L	T-L	T-L
2		先东西直行、后东西左转	—	—	—	—
3		先向东直左、后向西直左	—	—	T-L	T-L
4		先向西直左、后向东直左	T-L	T-L	—	—
5	先南北直行、后南北左转	先东西左转、后东西直行	—	—	—	—
6		先东西直行、后东西左转	L-T	L-T	L-T	L-T
7		先向东直左、后向西直左	L-T	L-T	—	—
8		先向西直左、后向东直左	—	—	L-T	L-T
9	先向南直左、后向北直左	先东西左转、后东西直行	T-L	—	—	T-L
10		先东西直行、后东西左转	—	L-T	L-T	—
11		先向东直左、后向西直左	—	L-T	—	T-L
12		先向西直左、后向东直左	T-L	—	L-T	—
13	先向北直左、后向南直左	先东西左转、后东西直行	—	T-L	T-L	—
14		先东西直行、后东西左转	L-T	—	—	L-T
15		先向东直左、后向西直左	L-T	—	T-L	—
16		先向西直左、后向东直左	—	T-L	—	L-T

注:WB、NB、EB和SB分别为东进口、南进口、西进口和北进口。

后行,T-L表示左侧进口道直行相位先行、当前进口道左转相位后行。

1.3 车辆运行特征

进口道设置调头开口和左转短车道时,可能发生8种车辆排队情形,如表2所示。无论发生何种排队情形,左转相位绿灯期间短车道区域内左转车辆和调头车辆驶离过程不受直行排队车辆影响;直行相位绿灯期间短车道区域内直行车辆驶离过程不受左转排队车辆和调头排队车辆影响。为使FAC-UL-CV方法稳定地优化相位绿灯时间,各相位绿灯时间均应满足短车道区域的车辆通行需求。

1.3.1 左转相位绿灯期间车辆驶离过程

如图3(a)所示,当前进口道左转相位若后接左侧进口道直行相位,绿灯期间已驶入短车道区域的调头车辆可在下一相位继续通行,此时这些调头车辆无需更多绿灯时间。

如图3(b)(c)所示,当前进口道左转相位若没有后接左侧进口道直行相位,绿灯期间已驶入短车道区域的调头车辆无法在下一相位正常通行。若要使这些调头车辆尽快驶离交叉口,就需为其提供更多绿灯时间。

1.3.2 直行相位绿灯期间车辆驶离过程

如图3(d)所示,当前进口道直行相位绿灯期间,无论调头信号是否连续,直行车辆都可正常通行,右侧进口道调头车辆也可正常通行但不占当前进口道空间资源。因此,直行相位绿灯时间仅需考虑当前进口道直行车辆通行需求。

表 2 设置调头开口和左转短车道的进口道车辆排队情形

Table 2　Vehicle queue situations for an approach with an U-turn median opening and a left-turn bay

车辆排队情形	车辆排队特征
1	左转短车道上,左转排队车辆阻塞调头开口,且调头或左转排队车辆溢出并阻塞相邻车道
2	左转短车道上,调头排队车辆阻碍左转车辆,且调头或左转排队车辆溢出并阻塞相邻车道
3	相邻车道上排队车辆阻塞左转短车道入口,且左转短车道上左转排队车辆阻塞调头开口
4	相邻车道上排队车辆阻塞左转短车道入口,且左转短车道上调头排队车辆阻碍左转车辆
5	相邻车道上排队车辆阻塞左转短车道入口,而左转短车道上左转车辆和调头车辆互不影响
6	左转短车道上,无排队车辆溢出,入口未被阻塞,而左转排队车辆阻塞调头开口
7	左转短车道上,无排队车辆溢出,入口未被阻塞,而调头排队车辆阻碍左转车辆
8	左转短车道上,无排队车辆溢出,入口未被阻塞,且左转车辆和调头车辆互不影响

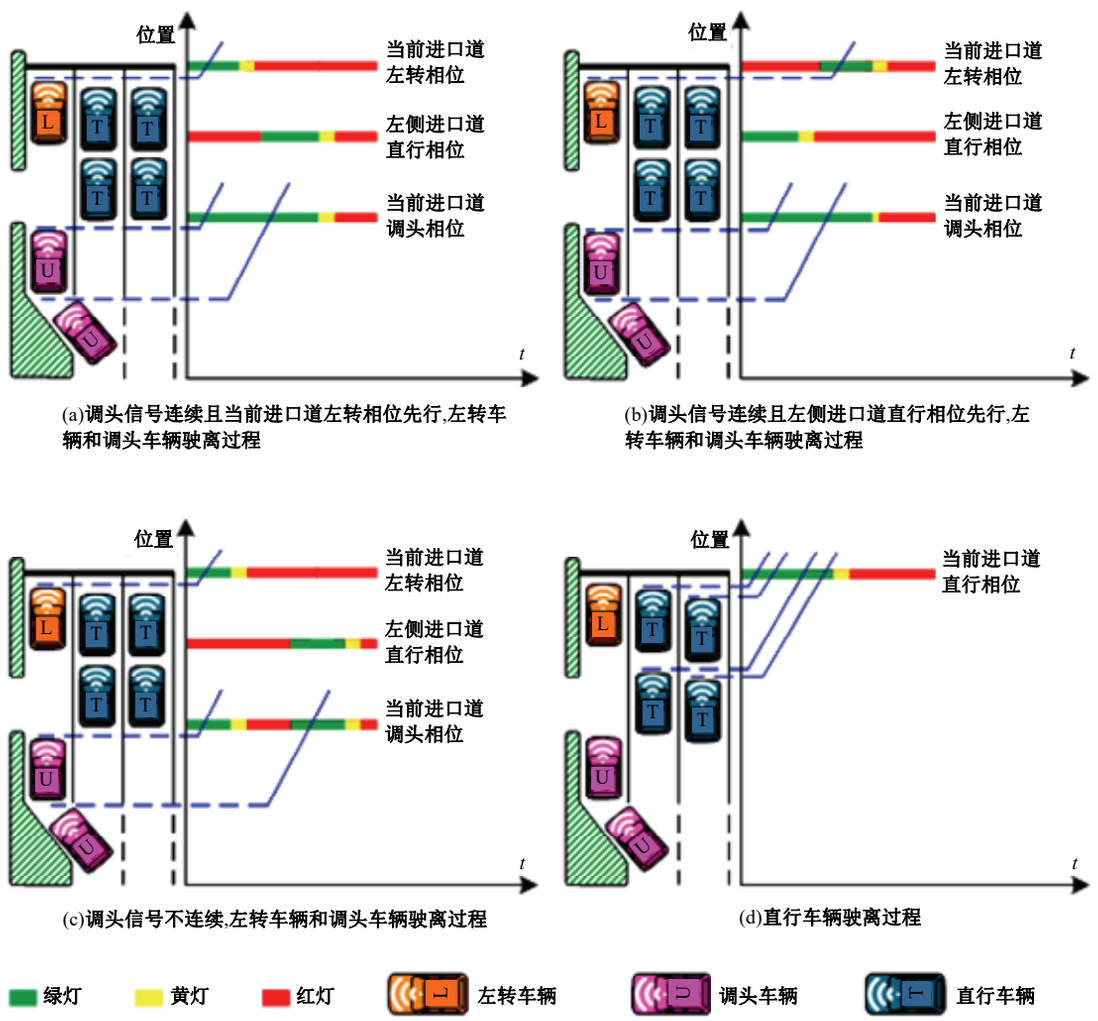


图 3　设置调头开口和左转短车道的进口道车辆驶离过程

Fig. 3　Vehicle departure processes for an approach with a U-turn median opening and a left-turn bay

为更好地实时优化信号配时方案,可从车联网环境中直接实时获取短车道区域的所有车辆各时刻的转向意图、位置、速度、加速度等信息,尤其是左转短车道上混行车流中每辆车的转向意图,这些信息的准确性不受车辆加速性能、驾驶员驾驶风格等因素影响。

2　FAC-UL-CV 方法

2.1　信号控制逻辑

2.1.1　相位控制逻辑

如图 4 所示,针对左转相位和直行相位,FAC-UL-CV 方法在最小绿灯时间和最大绿灯时间约束下将相位绿灯时间分成初始绿灯时间和

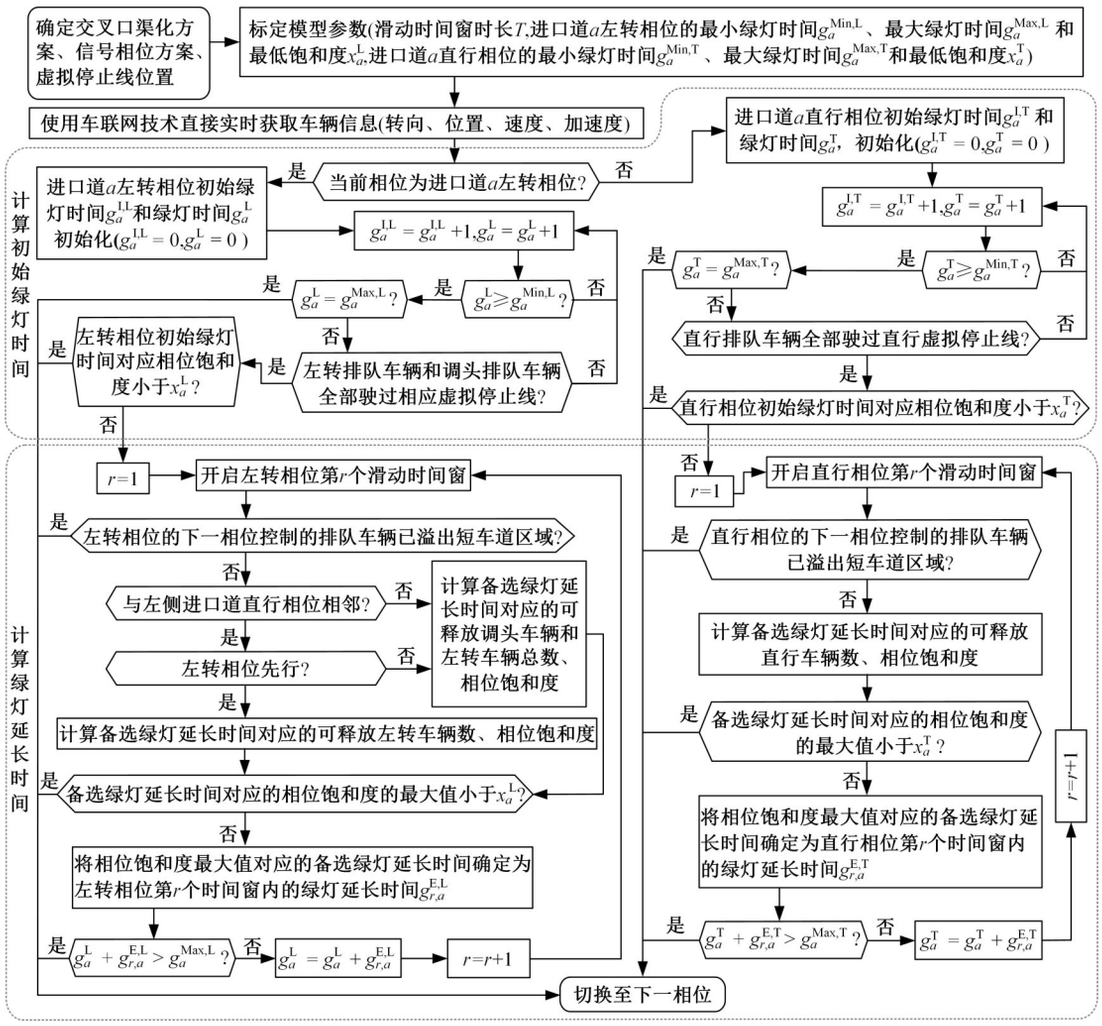


图 4 FAC-UL-CV 方法的应用流程

Fig. 4 Procedure for implementing the FAC-UL-CV method

绿灯延长时间两部分。为避免“二次排队”,初始绿灯时间应使短车道区域内所有排队车辆完全释放。为提高交叉口通行效率,绿灯延长时间应尽可能多地释放更多后续到达短车道区域的车辆(简称后续车辆)。

黄灯亮时,停止线附近的车辆若不能安全地在停止线前停车,则可利用黄灯时间驶过停止线。为充分利用绿灯延长时间,当保证车辆在绿灯延长时间内驶过停车线上游某特定断面时,则可保证这些车辆在本次绿灯时间延长后驶过停止线。为便于理解,将停止线称为实际停止线,将停止线上游某特定断面称为虚拟停止线。充分利用绿灯延长时间的条件为,虚拟停止线与实际停止线的间距不大于车辆以 30 km/h 的速度行驶 2 s 后驶过的距离[10]。

为调头车辆、左转车辆和直行车辆分别设置虚拟停止线,分别称为调头虚拟停止线、左转虚拟停止线和直行虚拟停止线,其位置如图 5 所示。其中,D_a^{U}为进口道 a 调头开口左侧边界线与调头虚拟停止线的间距,m,D_a^{L}和D_a^{T}分别为进口道 a 实际停止线与左转虚拟停止线的间距和与直行虚拟停止线的间距,m。

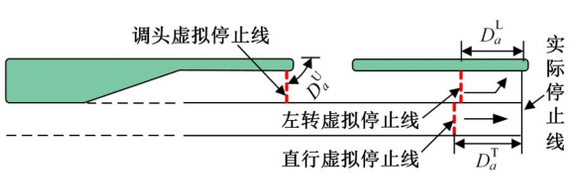


图 5 虚拟停止线位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of locations of virtual stop lines

为避免绿灯时间延长过多导致绿灯时间损失,利用滑动时间窗法逐步延长绿灯时间。该方法通过滑动时间窗确定每个时间窗内是否延长绿灯时间。具体来说,若当前时间窗内某备选绿灯延长时间可释放的车辆数足以触发绿灯延长机

制,则将该备选绿灯延长时间作为当前时间窗的绿灯延长时间,该绿灯延长时间过后立即开启下一时间窗;否则,当前时间窗内不再延长绿灯时间,即切换至下一相位。

为充分利用绿灯延长时间,计算当前时间窗内所有备选绿灯延长时间对应的相位饱和度,选择不小于最低饱和度的相位饱和度最大者对应的备选绿灯延长时间,作为当前时间窗的绿灯延长时间;否则,终止当前相位。最低饱和度宜取0.6～0.9,以充分利用绿灯延长时间释放更多后续车辆[9]。

《道路交通信号控制机(GB25280－2016)》规定信号持续时间的调节步长为1 s,因此每个时间窗内备选绿灯延长时间在$\{1,2,\cdots,T\}$中取值。T为滑动时间窗时长,其值不宜过大,一般为2～5 s,以便更好地捕捉交通流的动态特征[18]。

FAC-UL-CV方法同样适用于以下情况:①若进口道未设置调头开口,调头相位仅与左转相位并发;②若进口道设置直左混行车道,左转相位应与直行相位并发;③若进口道设置直右混行车道,还需计算直右混行车道上右转车辆所需绿灯时间,与直行车辆所需绿灯时间计算方法类似。

2.1.2　相位终止条件

为避免绿灯时间过长造成绿灯时间损失和短车道区域内累积排队车辆过多致使车辆排队上溯,若计算绿灯延长时间时从车联网环境中发现以下任一种情形,立即终止当前相位:①相位绿灯时间达到最大绿灯时间;②初始绿灯时间未能满足设定的最低饱和度;③当前时间窗内备选绿灯延长时间均不能满足设定的最低饱和度;④下一相位控制的车道组已出现排队车辆溢出短车道区域。

2.2　网联车辆所需绿灯时间

2.2.1　排队车辆所需绿灯时间

如前所述,最小绿灯时间结束时,若排队车辆已驶过相应虚拟停止线,则其一定能利用黄灯时间驶过实际停止线,此时将最小绿灯时间记为该排队车辆所需绿灯时间;否则,其所需绿灯时间等于相位绿灯启亮时刻至该车辆驶过相应虚拟停止线经历的时间。因此,左转排队车辆、调头排队车辆和直行排队车辆所需绿灯时间分别为:

$$t_{i_{k,a}^{\mathrm{L}}}=\max\left\{g_a^{\mathrm{Min,L}},t_{i_{k,a}^{\mathrm{L}}}^{\mathrm{P}}\right\} \tag{1}$$

$$t_{i_{k,a}^{\mathrm{U}}}=\max\left\{g_a^{\mathrm{Min,L}},t_{i_{k,a}^{\mathrm{U}}}^{\mathrm{P}}\right\} \tag{2}$$

$$t_{i_{k,a}^{\mathrm{T}}}=\max\left\{g_a^{\mathrm{Min,T}},t_{i_{k,a}^{\mathrm{T}}}^{\mathrm{P}}\right\} \tag{3}$$

式中:$k\in\{1,2,\cdots,K\}$,k和K分别为车辆类型编号和车辆类型数;$i_{k,a}^{\mathrm{L}}$和$I_{k,a}^{\mathrm{L}}$分别为进口道a短车道区域内第k类左转排队车辆的编号和数量,$i_{k,a}^{\mathrm{L}}\in\left\{1,2,\cdots,I_{k,a}^{\mathrm{L}}\right\}$;$i_{k,a}^{\mathrm{U}}$和$I_{k,a}^{\mathrm{U}}$分别为进口道$a$短车道区域内第$k$类调头排队车辆的编号和数量,$i_{k,a}^{\mathrm{U}}\in\left\{1,2,\cdots,I_{k,a}^{\mathrm{U}}\right\}$;$i_{k,a}^{\mathrm{T}}$和$I_{k,a}^{\mathrm{T}}$分别为进口道$a$短车道区域内第$k$类直行排队车辆的编号和数量,$i_{k,a}^{\mathrm{T}}\in\left\{1,2,\cdots,I_{k,a}^{\mathrm{T}}\right\}$;$t_{i_{k,a}^{\mathrm{L}}}$、$t_{i_{k,a}^{\mathrm{U}}}$和$t_{i_{k,a}^{\mathrm{T}}}$分别为车辆$i_{k,a}^{\mathrm{L}}$、$i_{k,a}^{\mathrm{U}}$和$i_{k,a}^{\mathrm{T}}$所需绿灯时间,s;$g_a^{\mathrm{Min,L}}$和$g_a^{\mathrm{Min,T}}$分别为进口道$a$左转相位和直行相位的最小绿灯时间,s;$t_{i_{k,a}^{\mathrm{L}}}^{\mathrm{P}}$和$t_{i_{k,a}^{\mathrm{U}}}^{\mathrm{P}}$分别为左转相位绿灯启亮时刻至车辆$i_{k,a}^{\mathrm{L}}$驶过左转虚拟停止线和$i_{k,a}^{\mathrm{U}}$驶过调头虚拟停止线经历的时间,s;$t_{i_{k,a}^{\mathrm{T}}}^{\mathrm{P}}$为直行相位绿灯启亮时刻至车辆$i_{k,a}^{\mathrm{T}}$驶过直行虚拟停止线经历的时间,s。

2.2.2　后续车辆所需绿灯时间

初始绿灯时间结束时,若后续车辆已驶过相应虚拟停止线,则其所需绿灯时间为0;否则,其所需绿灯时间等于其由当前位置行驶至相应虚拟停止线需要的时间。由于$T\leqslant 5$ s,假设单个时间窗内后续车辆加速度不变,根据运动学公式计算后续车辆所需绿灯时间。

记　$j_{k,a}^{\mathrm{L}}\in\left\{1,2,\cdots,J_{k,a}^{\mathrm{L}}\right\}$、$j_{k,a}^{\mathrm{U}}\in\left\{1,2,\cdots,J_{k,a}^{\mathrm{U}}\right\}$、$j_{k,a}^{\mathrm{T}}\in\left\{1,2,\cdots,J_{k,a}^{\mathrm{T}}\right\}$,$j_{k,a}^{\mathrm{L}}$和$J_{k,a}^{\mathrm{L}}$分别为后续到达进口道$a$短车道区域的第$k$类左转车辆的编号和数量;$j_{k,a}^{\mathrm{U}}$和$J_{k,a}^{\mathrm{U}}$分别为后续到达进口道$a$短车道区域的第$k$类调头车辆的编号和数量;$j_{k,a}^{\mathrm{T}}$和$J_{k,a}^{\mathrm{T}}$分别为后续到达进口道$a$短车道区域内的第$k$类直行车辆的编号和数量。那么,车辆$j_{k,a}^{\mathrm{L}}$、$j_{k,a}^{\mathrm{U}}$和$j_{k,a}^{\mathrm{T}}$所需绿灯时间$t_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}$、$t_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}$和$t_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}$分别为:

$$t_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}=\begin{cases}0, & D_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}\leqslant D_a^{\mathrm{L}}\\ \sqrt{\left(\dfrac{v_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}}{a_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}}\right)^2+\dfrac{2(D_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}-D_a^{\mathrm{L}})}{a_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}}}-\dfrac{v_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}}{a_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}}, & D_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}>D_a^{\mathrm{L}}\end{cases} \tag{4}$$

$$t_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}=\begin{cases}0, & D_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}\leqslant D_a^{\mathrm{U}}\\ \sqrt{\left(\dfrac{v_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}}{a_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}}\right)^2+\dfrac{2(D_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}-D_a^{\mathrm{U}})}{a_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}}}-\dfrac{v_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}}{a_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}}, & D_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}>D_a^{\mathrm{U}}\end{cases} \tag{5}$$

$$t_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}=\begin{cases}0, & D_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}\leqslant D_a^{\mathrm{T}}\\ \sqrt{\left(\dfrac{v_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}}{a_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}}\right)^2+\dfrac{2(D_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}-D_a^{\mathrm{T}})}{a_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}}}-\dfrac{v_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}}{a_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}}, & D_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}>D_a^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{6}$$

式中:$D_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}$为车辆$j_{k,a}^{\mathrm{L}}$与进口道a实际停止线的间距,m;$v_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}$为车辆$j_{k,a}^{\mathrm{L}}$的速度,m/s;$a_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}$为车辆$j_{k,a}^{\mathrm{L}}$的加速度,m/s^2;$D_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}$为车辆$j_{k,a}^{\mathrm{U}}$与进口道a调头开口左侧边界线的间距,m;$v_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}$为车辆$j_{k,a}^{\mathrm{U}}$的速度,m/s;$a_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}$为车辆$j_{k,a}^{\mathrm{U}}$的加速度,m/s^2;$D_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}$为车辆$j_{k,a}^{\mathrm{T}}$与进口道a实际停止线的间距,m;$v_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}$为车辆$j_{k,a}^{\mathrm{T}}$的速度,m/s;$a_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}$为车辆$j_{k,a}^{\mathrm{T}}$的加速度,m/s^2。

这里$t_{i_{k,a}^{\mathrm{L}}}^{\mathrm{P}}$、$t_{i_{k,a}^{\mathrm{U}}}^{\mathrm{P}}$、$t_{i_{k,a}^{\mathrm{T}}}^{\mathrm{P}}$、$D_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}$、$v_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}$、$a_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}$、$D_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}$、$v_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}$、$a_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}$、$D_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}$、$v_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}$和$a_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}$均从车联网环境中直接实时获取。

2.3 左转相位绿灯时间

2.3.1 左转相位初始绿灯时间

若左转相位最小绿灯时间结束时,左转排队车辆和调头排队车辆均已驶过相应虚拟停止线,此时该相位初始绿灯时间等于该相位最小绿灯时间;若左转相位最大绿灯时间结束时,仍有左转排队车辆或调头排队车辆未驶过相应虚拟停止线,此时该相位初始绿灯时间等于该相位最大绿灯时间;否则,该相位初始绿灯时间等于该相位绿灯启亮时刻至所有左转排队车辆和调头排队车辆均已驶过相应虚拟停止线需要的时间。因此,进口道a左转相位初始绿灯时间$g_a^{\mathrm{I,L}}$为:

$$g_a^{\mathrm{I,L}}=\min\left\{\max\left(g_a^{\mathrm{Min,L}},g_a^{\mathrm{Max,QL}},g_a^{\mathrm{Max,QU}}\right),g_a^{\mathrm{Max,L}}\right\} \tag{7}$$

$$g_a^{\mathrm{Max,QL}}=\begin{cases}0, & \sum_{k=1}^{K}I_{k,a}^{\mathrm{L}}=0\\ \max\left\{t_{i_{k,a}^{\mathrm{L}}}\middle|\, D_{i_{k,a}^{\mathrm{L}}}\leqslant L_a^{\mathrm{LB}}\right\}, & \sum_{k=1}^{K}I_{k,a}^{\mathrm{L}}\geqslant 1\end{cases}$$

$$g_a^{\mathrm{Max,QU}}=$$

$$\begin{cases}0, & \sum_{k=1}^{K}I_{k,a}^{\mathrm{U}}=0\\ \max\left\{t_{i_{k,a}^{\mathrm{U}}}\middle|\, D_{i_{k,a}^{\mathrm{U}}}\leqslant W_a^{\mathrm{U}}+L_a^{\mathrm{LB}}-L_a^{\mathrm{U}}-L_a\right\}, & \sum_{k=1}^{K}I_{k,a}^{\mathrm{U}}\geqslant 1\end{cases}$$

式中:$g_a^{\mathrm{Max,QL}}$、$g_a^{\mathrm{Max,QU}}$分别为进口道a左转排队车辆和调头排队车辆所需最大绿灯时间,s;$g_a^{\mathrm{Max,L}}$为进口道a左转相位最大绿灯时间,s;$D_{i_{k,a}^{\mathrm{L}}}$为左转排队车辆$i_{k,a}^{\mathrm{L}}$与进口道a实际停止线的间距,m;$D_{i_{k,a}^{\mathrm{U}}}$为调头排队车辆$i_{k,a}^{\mathrm{U}}$与进口道a调头开口左侧边界线的间距,m。

这里$D_{i_{k,a}^{\mathrm{L}}}$和$D_{i_{k,a}^{\mathrm{U}}}$同样从车联网环境中直接实时获取。

2.3.2 左转相位绿灯延长时间

计算左转相位绿灯延长时间时,若$t_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}\leqslant T$,左转车辆$j_{k,a}^{\mathrm{L}}$能在当前时间窗内驶过左转虚拟停止线,考虑车辆$j_{k,a}^{\mathrm{L}}$,反之,忽略车辆$j_{k,a}^{\mathrm{L}}$;若$t_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}\leqslant T$,调头车辆$j_{k,a}^{\mathrm{U}}$能在当前时间窗内驶过调头虚拟停止线,考虑车辆$j_{k,a}^{\mathrm{U}}$,反之,忽略车辆$j_{k,a}^{\mathrm{U}}$。

根据前述分析,T一定小于绿灯间隔时间和后接相位最小绿灯时间之和,若左转相位后接左侧进口道直行相位,能在左转相位当前滑动时间窗内驶离的调头车辆一定能在下一相位绿灯期间驶离。此时,计算进口道a左转相位第r个滑动时间窗内绿灯延长时间$g_{r,a}^{\mathrm{E,L}}$时,仅考虑当前时间窗内可释放的左转车辆数,$g_{r,a}^{\mathrm{E,L}}$可表示为:

$$g_{r,a}^{\mathrm{E,L}}=\begin{cases}f_{\mathrm{R1,Max2}}\left\{\left(0,x_{r,a}^{\mathrm{L}}(t^{\mathrm{L}})\right)\middle|\, x_{r,a}^{\mathrm{L}}(t^{\mathrm{L}})<x_a^{\mathrm{L}}\right\}\\ f_{\mathrm{R1,Max2}}\left\{\left(t^{\mathrm{L}},x_{r,a}^{\mathrm{L}}(t^{\mathrm{L}})\right)\middle|\, x_{r,a}^{\mathrm{L}}(t^{\mathrm{L}})\geqslant x_a^{\mathrm{L}}\right\}\end{cases} \tag{8}$$

$$x_{r,a}^{\mathrm{L}}(t^{\mathrm{L}})=N_{r,a}^{\mathrm{L}}(t^{\mathrm{L}})\Big/\left(t^{\mathrm{L}}\cdot S_a^{\mathrm{L}}\right),\ t^{\mathrm{L}}\in\{1,2,\cdots,T\}$$

$$N_{r,a}^{\mathrm{L}}(t^{\mathrm{L}})=$$

$$\mathrm{sum}\left\{E_k\middle|\, t_{j_{k,a}^{\mathrm{L}}}\leqslant t^{\mathrm{L}}\leqslant T\right\},\ t^{\mathrm{L}}\in\{1,2,\cdots,T\}$$

式中:$f_{\mathrm{R1,Max2}}$为找到当前集合所有子集中第2个元素的最大值,并返回对应子集中第1个元素;$r\in\{1,2,\cdots,R\}$,r和R分别为滑动时间窗的编号和数量;$x_{r,a}^{\mathrm{L}}(t^{\mathrm{L}})$为第$r$个滑动时间窗内进口道$a$左转相位绿灯延长时间$t^{\mathrm{L}}$对应的相位饱和度;$t^{\mathrm{L}}$为左转相位当前滑动时间窗内可选绿灯延长时间,s;$x_a^{\mathrm{L}}$为进口道$a$左转相位强制终止的最低饱和度;$N_{r,a}^{\mathrm{L}}(t^{\mathrm{L}})$为第$r$个滑动时间窗内左转相位绿灯延长时间为$t^{\mathrm{L}}$对应的进口道$a$可释放左转车辆数,pcu;$S_a^{\mathrm{L}}$为进口道$a$左转车道组的饱和流率pcu/s;$E_k$为第$k$类车辆的折算系数;sum为求和。

若左转相位没有后接左侧进口道直行相位,左转相位初始绿灯时间结束后,已驶入短车道区域的调头车辆无法在下一相位继续行驶。此时,计算$g_{r,a}^{\mathrm{E,L}}$需要考虑当前滑动时间窗内可释放的左转车辆数和调头车辆数,则$x_{r,a}^{\mathrm{L}}(t^{\mathrm{L}})$改写为:

$$x_{r,a}^{\mathrm{L}}(t^{\mathrm{L}})=\frac{N_{r,a}^{\mathrm{L}}(t^{\mathrm{L}})+N_{r,a}^{\mathrm{U}}(t^{\mathrm{L}})}{t^{\mathrm{L}}\cdot S_a^{\mathrm{L}}} \tag{9}$$

$$t^{\mathrm{L}}\in\{1,2,\cdots,T\}$$

式中:$N_{r,a}^{\mathrm{U}}(t^{\mathrm{L}})$为第$r$个滑动时间窗内左转相位绿灯延长时间为$t^{\mathrm{L}}$对应的进口道$a$可释放的调头车辆数,pcu,$N_{r,a}^{\mathrm{U}}(t^{\mathrm{L}})=\mathrm{sum}\left\{E_k\middle|\, t_{j_{k,a}^{\mathrm{U}}}\leqslant t^{\mathrm{L}}\leqslant T\right\}$。

进口道a左转相位绿灯时间延长R次后,所

有滑动时间窗内绿灯延长时间总和应满足:

$$g_a^{\mathrm{I,L}}+\sum_{r=1}^{R}g_{r,a}^{\mathrm{E,L}}\leqslant g_a^{\mathrm{Max,L}} \tag{10}$$

2.4　直行相位绿灯时间

2.4.1　直行相位初始绿灯时间

类似左转相位初始绿灯时间,为满足直行排队车辆的清空需求,进口道 a 直行相位初始绿灯时间 $g_a^{\mathrm{I,T}}$ 为:

$$g_a^{\mathrm{I,T}}=\min\left\{\max\left(g_a^{\mathrm{Min,T}},g_a^{\mathrm{Max,QT}}\right),g_a^{\mathrm{Max,T}}\right\} \tag{11}$$

$$g_a^{\mathrm{Max,QT}}=\begin{cases}0, & \sum_{k=1}^{K}I_{k,a}^{\mathrm{T}}=0\\ \max\left\{t_{i_{k,a}^{\mathrm{T}}},D_{i_{k,a}^{\mathrm{T}}}\leqslant L_a^{\mathrm{LB}}\right\}, & \sum_{k=1}^{K}I_{k,a}^{\mathrm{T}}\geqslant 1\end{cases}$$

式中:$g_a^{\mathrm{Max,QT}}$ 为进口道 a 直行排队车辆所需最大绿灯时间,s;$g_a^{\mathrm{Max,T}}$ 为进口道 a 直行相位最大绿灯时间,s;$D_{i_{k,a}^{\mathrm{T}}}$ 为直行排队车辆 $i_{k,a}^{\mathrm{T}}$ 与进口道 a 实际停止线的间距,m。

这里 $D_{i_{k,a}^{\mathrm{T}}}$ 同样从车联网环境中直接实时获取。

2.4.2　直行相位绿灯延长时间

计算直行相位绿灯延长时间时,若 $t_{j_{k,a}^{\mathrm{T}}}\leqslant T$,车辆 $j_{k,a}^{\mathrm{T}}$ 能在当前时间窗内驶过直行虚拟停止线,考虑车辆 $j_{k,a}^{\mathrm{T}}$;反之,忽略车辆 $j_{k,a}^{\mathrm{T}}$。因此,第 r 个滑动时间窗内进口道 a 直行相位绿灯延长时间 $g_{r,a}^{\mathrm{E,T}}$ 为:

$$g_{r,a}^{\mathrm{E,T}}=\begin{cases}f_{\mathrm{R1,Max2}}\left\{\left(0,x_{r,a}^{\mathrm{T}}(t^{\mathrm{T}})\right)\middle|\, x_{r,a}^{\mathrm{T}}(t^{\mathrm{T}})<x_a^{\mathrm{T}}\right\}\\ f_{\mathrm{R1,Max2}}\left\{\left(t^{\mathrm{T}},x_{r,a}^{\mathrm{T}}(t^{\mathrm{T}})\right)\middle|\, x_{r,a}^{\mathrm{T}}(t^{\mathrm{T}})\geqslant x_a^{\mathrm{T}}\right\}\end{cases} \tag{12}$$

$$x_{r,a}^{\mathrm{T}}(t^{\mathrm{T}})=N_{r,a}^{\mathrm{T}}(t^{\mathrm{T}})\Big/\left(t^{\mathrm{T}}\cdot S_a^{\mathrm{T}}\right),t^{\mathrm{T}}\in\{1,2,\cdots,T\}$$

$$N_{r,a}^{\mathrm{T}}(t^{\mathrm{T}})=\mathrm{sum}\left\{E_k\middle|\, t_{j_{\mathrm{T},k,a}}\leqslant t^{\mathrm{T}}\leqslant T\right\}$$

式中:$x_{r,a}^{\mathrm{T}}(t^{\mathrm{T}})$ 为第 r 个滑动时间窗内进口道 a 直行相位绿灯延长时间 t^{T} 对应的相位饱和度;t^{T} 为直行相位当前滑动时间窗内可选绿灯延长时间,s;x_a^{T} 为进口道 a 直行相位强制终止的最低饱和度;$N_{r,a}^{\mathrm{T}}(t^{\mathrm{T}})$ 为第 r 个滑动时间窗内直行相位绿灯延长时间为 t^{T} 对应的进口道 a 可释放的直行车辆数,pcu;S_a^{T} 为进口道 a 直行车道组的饱和流率,pcu/s。

进口道 a 直行相位绿灯时间延长 R 次后,所有滑动时间窗内绿灯延长时间总和应满足:

$$g_a^{\mathrm{I,T}}+\sum_{r=1}^{R}g_{r,a}^{\mathrm{E,T}}\leqslant g_a^{\mathrm{Max,T}} \tag{13}$$

3　案例分析

为验证 FAC-UL-CV 方法的可靠性和有效性,选择定时控制方法[25]和传统全感应控制(Traditional fully-actuated control,Trad-FAC)方法[26]作为对比方法。实地调查设置调头开口和左转短车道的交叉口,获得其渠化方案和交通需求,并利用 Vissim 软件为其建立交通仿真模型。

利用 Python 软件,通过 Vissim 软件的 COM 接口,读取交通仿真模型中每时刻所有车辆的转向意图、位置、速度、加速度等信息和每时刻所有信号灯组的灯色状态。使用 Python 软件实现定时控制方法[25]、Trad-FAC 方法[26]和 FAC-UL-CV 方法,再通过 Vissim 软件的 COM 接口更新交通仿真模型中每时刻所有信号灯组的灯色状态。假设每辆车均为网联车辆,通过 Vissim 软件和 Python 软件的交互,即可模拟网联车辆渗透率为 100% 的车联网环境[11]。交通仿真实验的实施流程如图 6 所示。

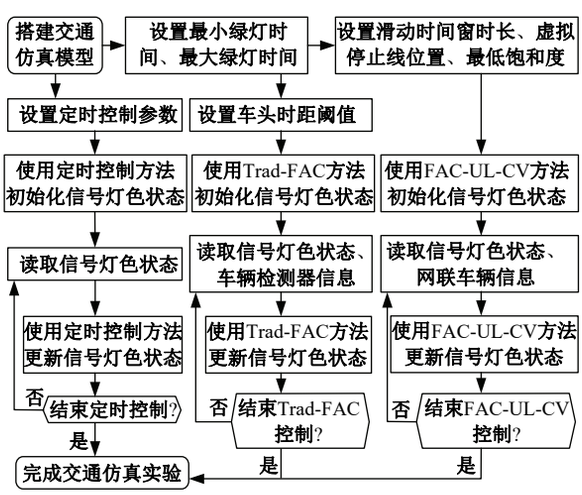


图 6　交通仿真实验实施流程

Fig. 6　Procedure for implementing traffic simulation experiments

3.1　案例说明

选择山东省淄博市南京路-华光路(简称南华)交叉口和南京路-新村西路(简称南新)交叉口,这 2 个交叉口的渠化设计参数如表 3 所示,某工作日早高峰(7:00~8:00)、午高峰(11:00~12:00)和晚高峰(17:00~18:00)3 个时段的流量如表 4 所示。由实地调查数据可得,交通流组成为小汽车、中型车和公交车;调头、左转和直行车

表3 交叉口渠化设计参数

Table 3 Channelization design parameters of two intersections

参数	南华交叉口				南新交叉口			
	NB	EB	SB	WB	NB	EB	SB	WB
调头开口数	1	1	1	1	1	1	1	1
左转短车道数	1	1	1	1	1	1	1	1
M_a^{L}	0	1	0	1	0	1	1	1
M_a^{T}	3	3	3	3	3	3	3	3
M_a^{R}	1	1	1	1	1	1	1	1
W_a^{U}/m	5	14	5	14	5	1.5	5	1.5
L_a/m	60	100	60	60	60	60	60	60
L_a^{U}/m	8	8	8	8	8	8	8	8
L_a^{LB}/m	100	130	100	130	100	100	100	100

表4 交叉口高峰时段交通需求

Table 4 Traffic demands of two intersections during different peak periods veh/h

流向	车辆类型	南华交叉口												南新交叉口											
		MN				MD				EN				MN				MD				EN			
		NB	EB	SB	WB	NB	EB	SB	WB	NB	EB	SB	WB	NB	EB	SB	WB	NB	EB	SB	WB	NB	EB	SB	WB
左转	小汽车	240	356	187	272	139	150	113	206	248	265	169	361	177	379	582	78	64	154	181	100	97	295	260	153
	中型车	72	90	55	118	38	44	32	87	56	77	40	145	46	100	115	23	18	70	57	23	29	107	83	43
	公交车	5	2	5	13	0	0	0	5	4	2	6	17	7	20	22	4	3	9	10	5	5	26	18	10
调头	小汽车	103	95	78	75	49	51	38	49	96	87	79	98	44	95	41	12	15	40	38	23	24	77	26	46
	中型车	51	33	54	40	24	25	39	29	45	36	55	45	16	21	18	7	2	10	9	6	10	25	17	7
	公交车	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
直行	小汽车	792	623	594	492	355	365	260	313	706	621	616	646	678	916	1146	754	478	502	634	532	784	820	794	1 100
	中型车	443	252	482	302	207	212	353	223	397	290	505	333	176	241	226	224	134	228	200	123	233	297	254	312
	公交车	18	11	22	21	44	29	21	29	29	19	28	13	26	48	42	41	25	30	35	27	42	71	55	74
右转	小汽车	244	139	175	93	108	46	63	60	176	133	165	51	165	87	389	232	89	79	188	313	124	127	349	458
	中型车	102	364	216	155	78	67	93	69	103	126	127	289	43	23	77	69	25	36	59	72	37	46	112	130
	公交车	12	7	2	13	16	6	8	12	6	12	8	24	6	5	14	13	5	5	10	16	7	11	24	31

注:MN、MD和EN分别表示早高峰、午高峰和晚高峰。

流的饱和车头时距分别为2.25、2.25和2.12 s/pcu,平均车速分别为30、30和40 km/h;左转车道和直行车道的饱和流率分别为1600和1700 pcu/h。根据文献[2],小汽车、中型车和公交车的折算系数分别为1.0、1.5和2.5,车辆停车安全间距为1.5 m。

3.2 实验设计

使用定时控制方法时,考虑调头车辆占用左转短车道并可在左转绿灯期间通行,将调头需求全计入左转需求,利用文献[25]的方法计算信号配时方案。使用Trad-FAC方法时,参照文献[26],检测器布设在各进口道导向车道停止线上游50 m处,车头时距阈值设为3 s,即:若车道组上每条车道均出现前后相邻两车驶过检测器的时间差大于3 s的情形时,判定车流不连续,终止当前相位。

使用FAC-UL-CV方法时,采用正交实验设计方法,结合极差分析和方差分析,确定滑动时间窗时长、虚拟停止线位置和最低饱和度3个参数的最佳组合,并探究这3个参数对FAC-UL-CV方法控制效果的影响。这里滑动时间窗时长分别取2、3、4和5 s,虚拟停止线位置分别取10、12、14和16 m,最低饱和度分别取0.6、0.7、0.8和0.9,如此3因素4水平实验根据$L_{16}(4^5)$正交表设计,如表5所示。

对于所选3种信号控制方法,相邻相位之间的黄灯时间和全红时间分别取3 s和2 s;参照文献[26],对于FAC-UL-CV方法和Trad-FAC方法,左转相位最小绿灯时间均为8 s,直行相位最小绿灯时间均为12 s,各相位最大绿灯时间均为45 s。

对于2个交叉口、3种交通需求(用流量表示)和16种信号相位方案,使用定时控制方法、Trad-FAC方法和FAC-UL-CV方法分别建立96、96和1 536种交通仿真实验。每种交通仿真实验运行5次,随机种子分别取8、18、28、38和48;单次仿真时间为4 200 s,其中预热时间为600 s。以各

表 5　正交实验设计方案

Table 5　Design schemes of orthogonal experiments

编号	滑动时间窗时长/s	虚拟停止线位置/m	最低饱和度
1	2	10	0.6
2	2	12	0.7
3	2	14	0.8
4	2	16	0.9
5	3	10	0.7
6	3	12	0.6
7	3	14	0.9
8	3	16	0.8
9	4	10	0.8
10	4	12	0.9
11	4	14	0.6
12	4	16	0.7
13	5	10	0.9
14	5	12	0.8
15	5	14	0.7
16	5	16	0.6

进口道停止线上游 150 m 为界划定节点评价区域,选取车均延误和平均排队长度 2 个指标进行节点评价。

3.3　结果分析

3.3.1　FAC-UL-CV 方法的最佳参数组合

通过极差分析得到两个交叉口不同时段的最佳参数组合,结合方差分析确定两个交叉口最佳参数组合,如表 6 所示。由表 6 可见,使用 FAC-UL-CV 方法时,滑动时间窗长度、虚拟停止线位置和最低饱和度的最佳取值依次为 5 s、10 m 和 0.9。

表 6　FAC-UL-CV 方法最佳参数

Table 6　Optimal parameters of the FAC-UL-CV method

评价指标	交叉口	最佳参数组合		
		早高峰	午高峰	晚高峰
车均延误	南华交叉口	(5,10,0.9)	(3,10,0.9)	(4,10,0.8)
	南新交叉口	(5,10,0.7)	(5,10,0.9)	(5,10,0.9)
平均排队长度	南华交叉口	(5,10,0.9)	(3,10,0.7)	(5,10,0.9)
	南新交叉口	(5,10,0.9)	(5,10,0.6)	(5,10,0.8)
最终方案		(5,10,0.9)		

注:括号中数据依次为滑动时间窗时长、虚拟停止线位置和最低饱和度。

3.3.2　信号控制方法的性能对比

定时控制方法、Trad-FAC 方法和取最佳参数组合的 FAC-UL-CV 方法的仿真结果,如图 7 所示。其中,FT、Td-FA 和 FA-UL 分别表示定时控制方法、Trad-FAC 方法和 FAC-UL-CV 方法。图 7 表明:①早、晚高峰时段,相比定时控制方法和 Trad-FAC 方法,FAC-UL-CV 方法使两个交叉口车均延误降低、平均排队长度缩短;②午高峰时段,3 种控制方法无明显差异。

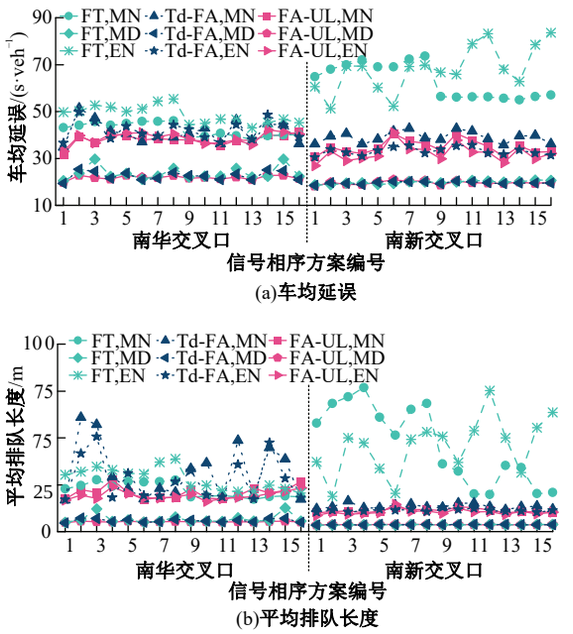


图 7　信号控制方法的仿真结果

Fig. 7　Simulation results for signal control methods

上述 3 种信号控制方法的性能指标对比结果,如图 8 所示。由图 8 可见:①相比定时控制方法,FAC-UL-CV 方法使南华交叉口和南新交叉口的车均延误分别降低了 12.13% 和 32.14%、平均排队长度分别缩短了 15.49% 和 47.20%;②相比定时控制方法,Trad-FAC 方法使南华交叉口和南新交叉口的车均延误分别降低了 6.44% 和 29.55%、平均排队长度分别增加 13.45% 和缩短 44.78%;③相比 Trad-FAC 方法,FAC-UL-CV 方法使南华交叉口和南新交叉口的车均延误分别降低了 5.71% 和 4.47%、平均排队长度分别缩短了 16.79% 和 7.90%。

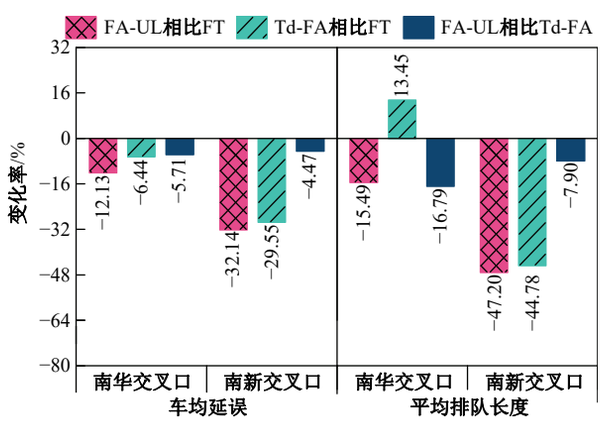


图 8　信号控制方法的性能指标

Fig. 8　Performance indices of signal control methods

为更好地说明FAC-UL-CV方法的优势,进一步对定时控制方法、Trad-FAC方法和FAC-UL-CV方法的所选评价指标进行配对样本t检验。经过置信水平为95%的配对样本t检验,所有配对样本的车均延误的p值均小于0.05;除南新交叉口的Trad-FAC方法和定时控制方法的配对样本外,其他配对样本的平均排队长度的p值均小于0.05。这说明FAC-UL-CV方法相比定时控制方法和Trad-FAC方法均能显著减少车均延误和平均排队长度,Trad-FAC方法相比定时控制方法能显著降低车均延误。可见,FAC-UL-CV方法可靠且有效。

4 结束语

为提高车联网环境下设置调头开口和左转短车道的交叉口的运行效率,提出了一种新的单点全感应控制(FAC-UL-CV)方法。在网联车辆渗透率为100%的车联网环境下,该方法关注交叉口渠化方案、信号相位方案和调头信号连续性对车辆运行特征的共同影响,基于直接实时获取的车辆信息提出网联车辆所需绿灯时间计算方法。然后,针对左转相位和直行相位,分别提出了以完全释放红灯期间到达的排队车辆为目标的初始绿灯时间计算方法,并基于滑动时间窗法提出了以相位饱和度最大化为目标的绿灯延长时间计算方法。为验证所提FAC-UL-CV方法的可靠性和有效性,组合运用Python和Vissim软件以及正交实验设计方法创建了1 728种交通仿真实验。结果表明,在95%置信水平下:①相比定时控制方法,FAC-UL-CV方法使交叉口车均延误至少降低12.13%,使平均排队长度至少缩短15.49%;②相比Trad-FAC方法,FAC-UL-CV方法使车均延误至少降低4.47%,使平均排队长度至少缩短7.90%。

参考文献:

[1] Zhao Z Y, Tian C X, Guo B H, et al. Analyzing delay and CO emissions: a simulation study of the median U-turn method at intersections[J]. Applied Sciences, 2024, 14(9): No. 3737.

[2] Yao R H, Sun L, Sun F, et al. Optimizing the location of U-turn median openings at signalized intersections with multitype vehicles[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2019, 145(9): No. 4019038.

[3] Sun F, Sun L, Ma D F, et al. Optimal location of the U-turn at a signalised intersection with double left-turn lanes[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2019, 13(3): 531-540.

[4] Yang Q, Deng K, Gao F, et al. Characterizing the dynamics and uncertainty of queues at signalized intersections with left-turn bay[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2022, 599: No. 127439.

[5] 孙锋, 孙立, 李庆印, 等. 基于通行效率最优的交叉口调头选位[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(2): 334-339.
Sun Feng, Sun Li, Li Qing-yin, et al. Location of U-turn openings at signalized intersections based on optimal traffic capacity[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(2): 334-339.

[6] Yang Q, Shi Z. The queue dynamics of protected/permissive left turns at pre-timed signalized intersections[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2021, 562, No. 125406.

[7] Abuhijleh A, Dias C, Alhajyaseen W, et al. Effect of U-turns and heavy vehicles on the saturation flow rates of left-turn lanes at signalized intersections[J]. Sustainability, 2020, 12(11): No. 4485.

[8] Mohanty M, Dey P. Modelling the major stream delay due to U-turns[J]. Transportation Letters, 2019, 11(9): 498-505.

[9] 李瑞敏, 章立辉. 城市交通信号控制[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2021.

[10] Yang K, Guler S, Menendez M. Isolated intersection control for various levels of vehicle technology: conventional, connected, and automated vehicles[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 72: 109-129.

[11] 徐洪峰, 陈虹瑾, 张栋, 等. 面向网联汽车环境的单点全感应式信号配时技术[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2022, 52(6): 1324-1336.
Xu Hong-feng, Chen Hong-jin, Zhang Dong, et al. Fully-actuated signal timing technique for isolated signalized intersections in connected vehicle environment [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(6): 1324-1336.

[12] Moradi H, Sasaninejad S, Wittevrongel S, et al. The contribution of connected vehicles to network traffic control: a hierarchical approach[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 139: No. 103644.

[13] Gao K, Han F R, Dong P P, et al. Connected vehicle as a mobile sensor for real time queue length at signalized intersections[J]. Sensors, 2019, 19(9): No. 2059.

[14] Xu B, Ban X, Bian Y, et al. Cooperative method of traffic signal optimization and speed control of connected vehicles at isolated intersections[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(4): 1390-1403.

[15] Feng Y, Head K, Khoshmagham S, et al. A real-time adaptive signal control in a connected vehicle environment[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 55: 460-473.

[16] Liang X, Guler S, Gayah V. A heuristic method to optimize generic signal phasing and timing plans at signalized intersections using connected vehicle technology[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 111: 156-170.

[17] Li W, Ban X. Connected vehicles based traffic signal timing optimization[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(12): 4354-4366.

[18] 张存保, 冉斌, 梅朝辉, 等. 车路协同下道路交叉口信号控制优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(3): 40-45.
Zhang Cun-bao, Ran Bin, Mei Chao-hui, et al. An optimal method of traffic signal control based on cooperative vehicle infrastructure system[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(3): 40-45.

[19] Guo Q, Li L, Ban X. Urban traffic signal control with connected and automated vehicles: a survey[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 101: 313-334.

[20] Wang J D, Jiang S C, Qiu Y, et al. Traffic signal optimization under connected-vehicle environment: an overview[J]. Journal of Advanced Transportation, 2021, 2021:No. 3584569.

[21] Li J J, Yu C H, Shen Z L, et al. A survey on urban traffic control under mixed traffic environment with connected automated vehicles[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 154: No. 104258.

[22] 吴文静, 陈润超, 贾洪飞, 等. 车路协同环境下路段掉头区域车辆协同控制[J]. 吉林大学学报:工学版, 2019, 49(4): 1100-1106.
Wu Wen-jing, Chen Run-chao, Jia Hong-fei, et al. Collaborative control method of vehicles in U-turn zone under environment of cooperative vehicle infrastructure system[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(4): 1100-1106.

[23] 人民网. 全国率先推出!淄博公安交警开发建设“车路协同”智慧交通系统[EB/OL]. http://society.people.com.cn/n1/2022/0927/c1008-32535146.html.

[24] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Signal Timing Manual[M]. 2nd ed. Washington, DC: The National Academies Press, 2015.

[25] Yao R H, Zhang W S, Long M, et al. Modelling and sensitivity analysis of uncoordinated paired intersections with left-turn bays[J]. Transport, 2020, 35(3): 283-299.

[26] 徐洪峰, 柳爽, 张栋, 等. 单点全感应式信号控制方法的参数取值[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2019, 49(1): 45-52.
Xu Hong-feng, Liu Shuang, Zhang Dong, et al. Configuring parameters of fully actuated control at isolated signalized intersections[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(1): 45-52.