

引用格式:花蝶,史娟,王坦,等.城市主干路交叉口直行待行区相位差优化模型[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(5):52-58.

HUA Rong, SHI Juan, WANG Tan, et al. Optimal offset model for urban main road intersection with waiting areas for through vehicles[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 37(5):52-58.

城市主干路交叉口直行待行区相位差优化模型

花 蝶,史 娟,王 坦,傅 游

(山东科技大学 计算机科学与工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:合理的直行待行区设置能够减少延误,提高路网的通行能力。针对目前对直行待行区的研究局限在单个路口且因未考虑相位差协调、从而难以使整条主干路达到最佳通行状态的问题,以设置直行待行区的主干道的最小车辆延误为目标,建立了城市主干路交叉口直行待行区相位差优化模型,并采用遗传算法求解延误最小时的最优相位差。最后,结合交通实例进行Vissim仿真,仿真结果证明模型能够有效减少交通延误、提高路网的通行能力。

关键词:相位差优化;主干路;直行待行区;遗传算法;Vissim 仿真

中图分类号:TP391.9

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2018)05-0052-07

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.05.008

Optimal Offset Model for Urban Main Road Intersections with Waiting Areas for Through Vehicles

HUA Rong, SHI Juan, WANG Tan, FU You

(College of Computer Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: A reasonable waiting-area setting for through vehicles can reduce the delay and improve the traffic capacity of roads. However, the confinement of recent researches on waiting areas for through vehicles to one single intersection and the lack of taking the coordination of offsets into consideration make it difficult to achieve optimal traffic status of the whole road. To minimize vehicle delay in the main road, an optimal offset model was presented for urban main road intersections with waiting areas for through vehicles. The genetic algorithm was used to solve the optimal offset in order to minimum the traffic delay. Finally, traffic examples combined with the optimal offset are simulated on the Vissim platform. The results show that the optimal offset model can effectively reduce traffic delay and improve the traffic capacity of the road.

Key words: optimal offset; main road; waiting area for through vehicles; genetic algorithm; Vissim simulation

研究数据表明,在日常出行中交通延误占到总出行时间的30%左右,其中交叉口的延误占总延误的50%以上^[1],在个别城市,交叉口的延误甚至占到总延误的80%以上^[2]。故减少交叉口的延误,对提高道路

收稿日期:2017-11-02

基金项目:山东省科技发展计划项目(13GGX10118)

作者简介:花 蝶(1969—),男,江苏常州人,副教授,博士,主要从事高性能计算、轨道交通控制方面研究。

史 娟(1990—),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事智能交通方面的研究。

傅 游(1968—),女,山东聊城人,教授,博士生导师,主要从事高性能计算、智能交通等方面的研究,本文通信作者。

E-mail:fuyou@sdust.edu.cn

的通行能力有很重要的意义。尚申德等^[3]分析了直行待行区的设置方法和设置长度,并通过北京市区内一典型四相位交叉口证明了直行待行区的合理设置能够减少车辆平均延误,提高进口车道的利用率;左天福等^[4]阐述了直行待行区的含义并初步分析了直行待行区设置的原则和适用条件,并对比了虹梅—宜山交叉口直行待行区设置前后的交通效益指标,证明了合理的设置直行待行区能够减少平均延误;李颖宏等^[5]深入研究了交叉口是否设置直行待行区通行能力和延误模型的异同,并通过实例交叉口和仿真结果证明了直行待行区的能够降低车均延误;刘梅等^[6]建立了以最短排队长度、最大直行进口道通行能力、最小车均停车率为优化目标的交叉口直行待行区时空资源集成多目标优化模型,通过 Vissim 仿真,证明了合理设置直行待行区能够提高交通运行效益和环境效益;林芬等^[7]基于节能减排确定了设置直行待行区的最优条件,通过实例仿真得到了设置直行待行区能够减少车均延误,提高行车效率;杨林等^[8]基于排队长度模型确定了直行待行区的临界条件,并通过实例仿真证明了设置直行待行区能够减少车辆延误,提高通行能力。

上述研究都证明了合理设置直行待行区能够减少延误,提高路网的通行能力。但是上述直行待行区的研究均为单路口的情况,整条主干路未达到最佳的通行状态^[9]。合理的相位差能够使整条主干路达到最大交通流量和最高的服务水平^[10],但上述研究对直行待行区的研究均停留在静态阶段,未考虑相位差的协调,整条主干路的通行状态不是最优的。本研究以设置直行待行区的主干道的最小车辆延误为目标,从上下行两个方向的延误出发,建立了城市主干路交叉口直行待行区相位差优化模型,并采用遗传算法求解延误最小时的最优相位差,针对 3 个交叉口路况实例,以相位差为 0 和最优相位差分别在 Vissim 平台进行仿真,证明了该模型使各交叉口的延误均有不同程度的减小,其中总延误的减小为 16.3%。

1 问题描述

假设路网中某主干路有 n 个交叉口,其中 m 个交叉口设有直行待行区。一般交叉口的示意图如图 1 所示,设有直行待行区的交叉口如图 2 所示。 S_i 表示第 i 个交叉口,交叉口 S_i 和交叉口 S_{i+1} 之间的距离为 l_i ,直行待行区长度为 L_i 。根据直行待行区设置应该具备的条件,特作以下假设:

- 1) 交叉口至少要是四相位;
- 2) 车道设有专门的左转车道;

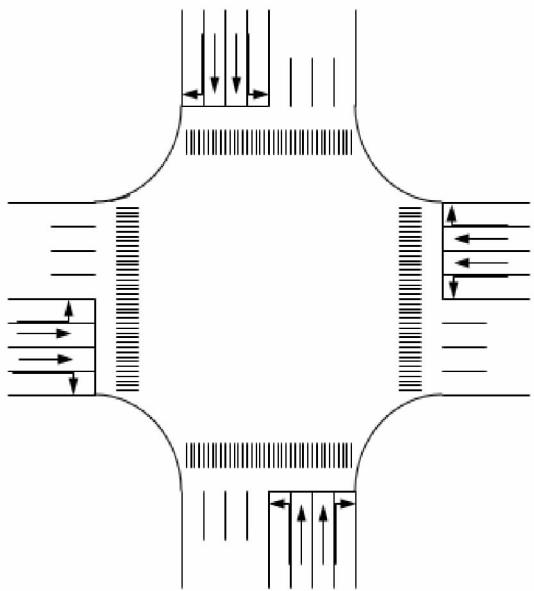


图 1 一般交叉口

Fig. 1 General intersection

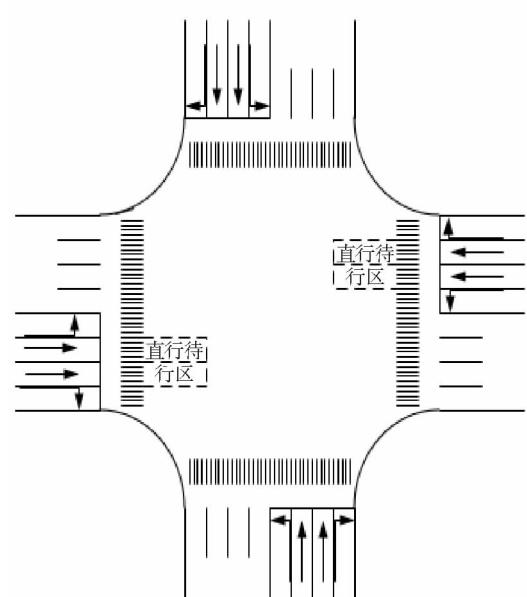


图 2 设有直行待行区的交叉口

Fig. 2 Waiting area for through vehicles at intersection

- 3) 车辆以均匀的随机到达率和均匀的随机消散率到达和离开交叉口, 到达率和消散率互不影响;
- 4) 交叉口有足够的消散能力, 不会出现二次排队的情况;
- 5) 将黄灯时间看做红灯时间;
- 6) 交叉口的初始排队长度均为 0。

2 模型建立

2.1 交叉口直行待行区相位差优化模型

上下行延误的计算原理一致, 故以车辆由交叉口 S_{i+1} 上行至交叉口 S_i 的延误计算为例进行具体分析。

若交叉口 S_i 设有直行待行区, 直行待行区长度为 L_i , 车辆到达交叉口 S_i 的第二停车线时遇红灯停车, 后续车辆以均匀的随机到达率 σ_1 到达并形成排队。异向绿灯开启后车辆以均匀的随机消散率 ζ_1 驶向直行待行区并在第一停车线处进行等待, 之后车辆继续排队至本相位绿灯亮起, 此时车辆以均匀随机消散率 ζ_1 开始消散, 直至车辆完全消散。其延误如图 3 所示。

其中, 红灯时间为 t_r , 绿灯时间为 t_g , 车辆在第二停车线停车至异向绿灯开启经过的时间为 t_1 , 车队头部到达交叉口 S_i 的第二停车线至 S_i 本相位的红灯结束时间为 t_2 , 本相位绿灯亮起至车辆全部消散的时间为 t_3 。图中阴影部分的面积为一个周期 T 内该交叉口的延误总值。

车辆由 S_{i+1} 上行至 S_i 的速度为 v_1 , 则行驶时间为 l_i/v_1 , S_i 相对于 S_{i+1} 的相位差为 $\varphi_{i,i+1}$, 那么有

$$[l_i/v_1](\bmod T) + t_2 = \varphi_{i,i+1}, \quad (1)$$

由公式(1)可知:

$$t_2 = \varphi_{i,i+1} - [l_i/v_1](\bmod T), \quad (2)$$

车辆在 t_2 和 t_3 时间段内均以均匀随机到达率 σ_1 到达, 当异向绿灯亮起时车辆进入直行待行区, 所需时间为 L_i/v_1 , 当本向绿灯亮起时经过 t_3 时间段以均匀随机消散率 ζ_1 完全消散。根据车辆守恒定律可得

$$\sigma_1(t_2 + t_3) = \zeta_1(t_3 + L_i/v_1), \quad (3)$$

经过化简可得

$$t_3 = (\sigma_1 t_2 - \zeta_1 L_i/v_1)/(\zeta_1 - \sigma_1). \quad (4)$$

则从 S_{i+1} 上行至 S_i 的延误

$$\begin{aligned} d_{i,u} &= \frac{1}{2}(t_2 - \frac{L_i}{v_1})\sigma_1(t_2 + t_3) - \frac{(t_2 - t_1 - L_i/v_1)(t_2 + t_3)L_i\sigma_1}{L_i + v_1 t_3} \\ &= \frac{\zeta_1 \sigma_1}{2(\zeta_1 - \sigma_1)} t_2^2 - \frac{L_i \zeta_1^2}{(\zeta_1 - \sigma_1)v_1} t_2 + \frac{L_i^2 \zeta_1 (2\zeta_1 - \sigma_1)}{2v_1^2 (\zeta_1 - \sigma_1)} + \frac{\zeta_1 L_i t_1}{v_1}, \end{aligned} \quad (5)$$

将式(2)代入式(5)可以得到 S_{i+1} 上行至 S_i 的延误

$$\begin{aligned} d_{i,u} &= \frac{\zeta_1 \sigma_1}{2(\zeta_1 - \sigma_1)} \{ \varphi_{i,i+1} - [l_i/v_1](\bmod T) \}^2 - \frac{L_i \zeta_1^2}{(\zeta_1 - \sigma_1)v_1} \{ \varphi_{i,i+1} - [l_i/v_1](\bmod T) \} \\ &\quad + \frac{L_i^2 \zeta_1 (2\zeta_1 - \sigma_1)}{2v_1^2 (\zeta_1 - \sigma_1)} + \frac{\zeta_1 L_i t_1}{v_1}. \end{aligned} \quad (6)$$

同理, 可得 S_{i-1} 下行至 S_i 的延误 $d_{i,d}$:

$$d_{i,d} = \frac{\zeta_2 \sigma_2}{2(\zeta_2 - \sigma_2)} \{ \varphi_{i,i-1} - [l_{i-1}/v_2](\bmod T) \}^2 - \frac{L_i \zeta_2^2}{(\zeta_2 - \sigma_2 + 1)v_2} \{ \varphi_{i,i-1} - [l_i/v_2](\bmod T) \}$$

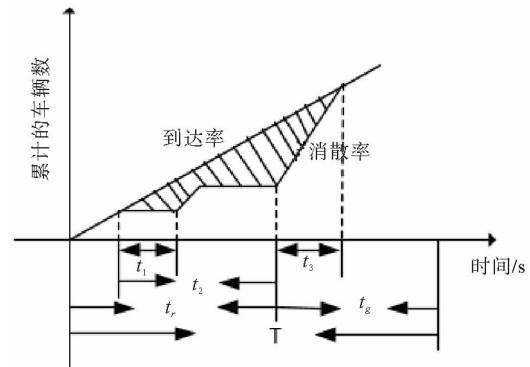


图 3 设有直行待行区的交叉口延误

Fig. 3 Delay of waiting area for through vehicles at intersection

$$+ \frac{\zeta_2 L_i^2 (2\zeta_2 - \sigma_2)}{2v_2^2 (\zeta_2 - \sigma_2)} + \frac{\zeta_2 L_i t_1}{v_2} \quad (7)$$

其中 v_2 为车辆下行速度, σ_2 为下行车辆到达率, ζ_2 为消散率, $\varphi_{i,i-1}$ 为 S_i 相对于 S_{i-1} 的相位差, t_1 为车辆在 S_i 停车至异向绿灯开启的时间。

2.2 主干路交叉口直行待行区相位差优化模型

根据文献[11]可知,无直行待行区的交叉口 S_i 的上行延误 $d_{i,u}^1$ 为

$$d_{i,u}^1 = \frac{\zeta_1 \sigma_1}{2(\zeta_1 - \sigma_1)} \{ \varphi_{i,i-1}^1 - [l_i/v_1] (\bmod T) \}^2 \quad (8)$$

无直行待行区的交叉口 S_{i+1} 的下行延误 $d_{i,d}^1$ 为

$$d_{i,d}^1 = \frac{\zeta_2 \sigma_2}{2(\zeta_2 - \sigma_2)} \{ \varphi_{i,i-1}^1 - [l_{i-1}/v_2] (\bmod T) \}^2 \quad (9)$$

假设路网中某主干路共有 n 个交叉口,其中 m ($m \leq n$) 个交叉口设有直行待行区。对于主干路的起点 S_1 和主干路的终点 S_n 只考虑离开主干路车辆产生的延误,即对于 S_1 来说只是考虑交叉口 S_1 下行至交叉口 S_2 的延误,对于 S_n 来说只是考虑交叉口 S_n 上行至交叉口 S_{n-1} 的延误。

对于非起点和终点的交叉口 S_i 考虑 S_{i+1} 上行至 S_i 和 S_{i-1} 下行至 S_i 两部分的延误,若 S_i 设置了直行待行区则交叉口 S_i 的总延误为 $d_{i,u} + d_{i,d}$,否则交叉口 S_i 的总延误为 $d_{i,u}^1 + d_{i,d}^1$ 。

整条主干路的交叉口总延误 D 为 S_1 下行至 S_2 的延误、 S_n 上行至 S_{n-1} 的延误和其余各交叉口的上下行延误之和,用公式 11 表示。

$$D = \sum_{i=1}^{n-1} d_1 + \sum_{i=2}^n d_2, \quad (11)$$

其中 d_1 和 d_2 分别为上行延误和下行延误并满足公式 12。

$$d_1 = \begin{cases} d_{i,u}, & \text{交叉口存在直行待行区} \\ d_{i,u}^1, & \text{交叉口不存在直行待行区} \end{cases}, \quad (12)$$

$$d_2 = \begin{cases} d_{i,d}, & \text{交叉口存在直行待行区} \\ d_{i,d}^1, & \text{交叉口不存在直行待行区} \end{cases}.$$

综上所示,整条主干路交叉口的总延误

$$D = \sum_{i=1}^{n-1} d_1 + \sum_{i=2}^n d_2,$$

其中约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq \varphi_{i,i-1}^1 \leq T, \\ 0 \leq \varphi_{i,i+1}^1 \leq T, \\ 0 \leq \varphi_{i,i-1} \leq T, \\ 0 \leq \varphi_{i,i+1} \leq T. \end{cases} \quad (13)$$

3 模型仿真

3.1 交通实例路况

交通实例采用金华市与双龙南街交叉的 3 个交叉口,为了叙述简便,交叉口从左至右依次记为交叉口 A、B、C。金华未设置直行待行区,故假设在宾虹路和双龙南路的交叉口设置了长为 12 m 的直行待行区,其路段长度和交通流量如图 4 和图 5 所示。

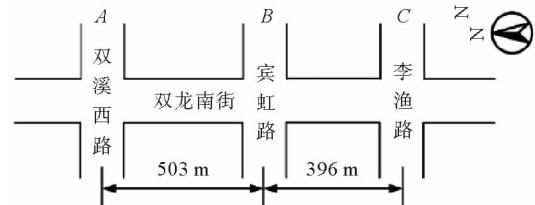


图 4 路段长度

Fig. 4 Section length

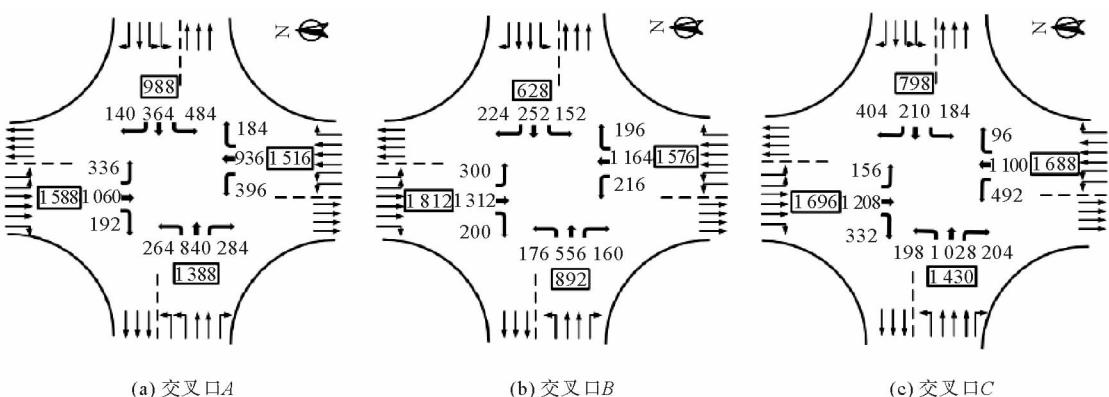


图 5 各交叉口流量

Fig. 5 Flow at each intersection

3 个交叉口均采用 4 相位,信号周期为 124 s,各交叉口的各周期的绿灯时长如表 1。

表 1 3 个交叉口的绿灯时长

Tab. 1 Green light length of 3 intersections

相位	交叉口 A 绿灯时长/s	交叉口 B 绿灯时长/s	交叉口 C 绿灯时长/s
东西直行	43	48	48
东西左转	19	22	26
南北直行	37	33	34
南北左转	25	21	16

3.2 路况仿真

对于相位差的求解采用遗传算法,其中种群个数 40,迭代次数为 200 次,采用二进制编码,变异概率为 0.1,交叉概率为 0.7,求解得到各交叉口的相位差分别为 $\varphi_{BA} = 36, \varphi_{CB} = 64, \varphi_{BC} = 60, \varphi_{AB} = 88$ 。

采用金华市双龙南的 3 个交叉口的路况,以原相位差和求得的相位差分别在 Vissim 平台进行仿真,交叉口 B 的 Vissim 仿真如图 6 所示。

仿真结果采用不同的随机种子数多次仿真求其平均值,其结果如表 2。

由表 2 可知,各交叉口的延误均有不同程度的减小,其中总延误的减小值为 18.9%。

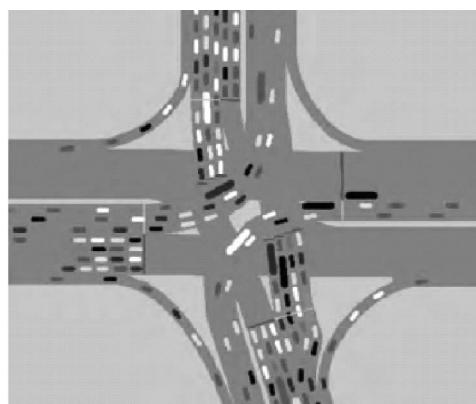


图 6 交叉口 B 的 Vissim 仿真图

Fig. 6 Vissim simulation of intersection B

表 2 Vissim 仿真结果

Tab. 2 Vissim simulation results

交叉口	相位差 0 时延误/s	优化相位差时延误/s	延误减少百分比/%
下行 B	257.5	198.7	22.8
下行 C	17.2	14.1	18.0
总下行	519.8	417.2	19.7
上行 B	263.2	228.9	13.0
上行 A	494.8	385.9	22.0
总上行	1 061.4	863.9	18.6
总延误	1 581.2	1 281.1	18.9

采用文献[11]的相位差模型计算最优相位差,其结果为 $\varphi_{AB} = 36, \varphi_{BC} = 65, \varphi_{CB} = 60, \varphi_{BA} = 89$ 。文献[11]和本文求得相位差不同在于 φ_{BC} 和 φ_{BA} 的值,此时受影响的交叉口为下行方向的交叉口 C 和上行方向的交叉口 A,其延误如表 3。

表 3 待行区设置与否的最优相位差下的延误对比
Tab. 3 The delay of intersections with or not the waiting area

交叉口	本文求得延误/s	文献[11]求得延误/s	延误减小百分比/%
下行 C	14.1	15.5	9
上行 A	47.4	48.8	3

由表 3 可知,直行待行区存在情况下,本文模型下的延误更小,证明了模型的有效性。

为了进一步说明本文方法的效果,下面与相位差优化模型的几种典型求解算法进行对比分析。求解相位差优化模型常用的解法为:图解法和数解法。图解法是通过几何作图,建立时间-距离图,反复调节速度和周期时长来达到最优的相位差。遗传算法较图解法计算过程更简洁,计算速度更快,结果更直观。下面通过仿真对相位差优化模型中的数解法进行比较。

数解法求解得到的相位差为: $\varphi_{BA} = 41, \varphi_{CB} = 77, \varphi_{BC} = 47, \varphi_{AB} = 83$ 。通过 Vissim 仿真得到两个算法延迟的对比如表 4。

表 4 数解法和本文采用遗传算法求解相位差的延误对比
Tab. 4 The delay comparison of Numerical solution and Genetic algorithm

交叉口	数解法相位差时延误/s	优化相位差时延误/s	延误减少百分比/%
下行 B	242.5	198.7	18.0
下行 C	16.8	14.1	16.0
总下行	459.8	417.2	9.3
上行 B	256.2	228.9	10.8
上行 A	457.6	385.9	15.7
总上行	985.6	863.9	12.3
总延误	1 489.5	1 281.1	14.0

可以看出,本文采用遗传算法求解相位差的求解结果比相位差优化模型中的数解法求解结果更优。

综上,分析得到交叉路口数量、车辆数量、车辆速度对仿真结果的影响:车速增大则延误会减小,车速减小则延误会增大;若消散率不变,则车辆数量增大则会增大延误,车流量数量减小,则会减小延误;在到达率和消散率不变的情况下,交叉口数量的多少对延误无影响。

4 结论

本文分析了交叉口直行待行区的上下行延误,并结合一般交叉口的上下行延误建立了主干路交叉口直行待行区相位差优化模型。采用遗传算法求解最优相位差,在 Vissim 平台对路况进行仿真,仿真结果证明了模型的有效性。但是本文还存在一定的不足,如车辆速度为定值,且只考虑了队头延误,将在以后的研究工作中进一步改进。

参考文献:

- [1]长沙市城管局.长沙市中心区道路交通整治方案[R].长沙:长沙市城管局,2008.
- [2]苏州市规划局.2007苏州城市道路交通发展年度报告[R].苏州:苏州市规划局,2007.
- [3]尚德申,王山川,王文红.信号交叉口直行待行区的设置研究[J].中外公路,2010,30(1):29-31.
- [4]左天福,陶晟陶.关于设置平面交叉口直行待行区的思考与实践[J].交通与运输,2011(1):21-25.
ZUO Tianfu, TAO Shengtao. Study and practice on waiting-area for through vehicles at grade intersection[J]. Traffic & Transportation, 2011(1): 21-25.
- [5]李颖宏,郑增强,郭伟伟,等.交叉口直行待行区设置研究[J].公路交通科技,2015,32(7):120-126.
LI Yinghong, ZHENG Zengqiang, GUO Weiwei, et al. Research on setting of waiting area for through vehicles at intersection [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(7): 120-126.
- [6]刘梅,韩印,顾佳磊.交叉口直行待行区时空资源集成优化模型[J].上海理工大学学报,2015,37(4):385-391.
LIU Mei, HAN Yin, GU Jialei. Integrated optimization model for the time-space resource of waiting-area for through vehicles[J]. University of Shanghai for Science and Technology, 2015, 37(4): 385-391.
- [7]林芬,程琳.考虑节能减排的直行待行区仿真分析[J].交通信息与安全,2016,34(1):105-109.
LIN Fen, CHENG Lin. A simulation analysis of waiting area for through vehicle considering emission reduction[J]. Journal of Transportation Information and Safety. 2016, 34(1): 105-109.
- [8]杨林,宋志国.信号交叉口机动车直行待行区设置研究[J].科学技术与工程.2016,16(18):278-282.
YANG Lin, SONG Zhiguo. Research on setting of waiting area for through vehicles at signalized intersection[J]. Science Technology and Engineering. 2016, 16(18): 278-282.
- [9]KHAMIS M A, GOMAA W. Adaptive multi-objective reinforcement learning with hybrid exploration for traffic signal control based on cooperative multi-agent framework[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2014, 29: 134-151.
- [10]朱文兴,贾磊.城市交通主干路相位差优化研究[J].计算机工程与应用,2005,41(20):212-214.
ZHU Wenxing, JIA lei. Optimal research on the offset of the urban traffic main road[J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(20): 212-214.
- [11]万绪军,陆华普.线控系统中相位差优化模型的研究[J].中国公路学报,2001,14(2):99-102.
WAN Xujun, LU Huapu. An optimal offset model for artery traffic signal control system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(2): 99-102.

(责任编辑:李 磊)