

基于 VISSIM 仿真的十字信号交叉口 待行区适用性分析

陈凯佳, 赵靖

(上海理工大学 管理学院, 上海市 200093)

摘要:设置交叉口待行区可以充分利用交叉口内部空间,但是不合理的设置同样会降低运行效率。为了确定十字信号交叉口左转、直行以及全待行区设置方式的适用条件,选取了流量水平大小、转向车比例以及主次路流量比作为主要影响因素,以储备通行能力最大为目标,构建待行区信号交叉口信号优化模型,采用分支定界法对模型进行求解。基于 VISSIM 微观仿真的输出延误,提出了不同待行区设置形式适用性的判别依据。案例分析结果表明:在交叉口接近饱和并且主次流量比小于 0.6 时设置待行区的优化效果最明显,其中左转比例小于 0.4 时左转待行区表现最好,全待行区在交通波动比较明显的情况下具有更高的鲁棒性,适用性最好。

关键词:交通工程;待行区;信号优化;适用性;延误

随着交通需求的剧增,城市道路变得日益拥挤,交叉口作为道路的咽喉,提高其运行效率可以有效地改善道路整体状况。传统提高交叉口通行能力的方法包括,优化信号控制方法,调整交叉口几何布局等。其中,交叉口待行区作为一种不需要改变几何布局且有较好优化效果的设计方法正在越来越多地被应用。

交叉口待行区主要分为两种:左转待行区和直行

待行区。左转待行区出现得较早对其适用性的研究也比较多。王殿海从几何以及流量条件对左转待行区设置的条件进行了研究;倪颖等综合考虑尾气污染的影响,从车道数及车道容量角度对左转待行区的设置条件进行了研究;陈冰清等针对左转待行区的设置从几何及左转、直行车流量进行了量化;尚德申等对直行待行区的设置方法以及最优长度进行了初步研究,从而

求的桥梁护栏最低防护等级 SB 级要求。提出的 3 种改造方案仿真结果各项安全性能指标均满足评价标准要求,其中钢结构加强改造方案满足五(SA)级要求,防护能量达到 400 kJ;植筋加高式改造方案与包封式改造方案均满足六(SS)级要求,防护能量达到 520 kJ。3 种改造方案虽然通过了仿真碰撞分析验证,但若将其应用于实际公路工程上,建议采用实车足尺碰撞试验对护栏的安全防护性能做进一步评价。

参考文献:

- [1] JTG D81-2017 公路交通安全设施设计规范[S].
- [2] JTG/T D81-2017 公路交通安全设施设计细则[S].
- [3] JTG B05-01-2013 公路护栏安全性能评价标准[S].
- [4] 闫书明.有限元仿真方法评价护栏安全性能的可行性

- [J].振动与冲击,2011(1).
- [5] 李勤策,龚帅,喻丹凤,等. HA 级三横梁组合式桥梁护栏设计优化[J]. 城市道桥与防洪,2017(12).
- [6] 闫秋实,邵慧芳,李亮. 冲击荷载作用下装配式钢筋混凝土梁力学性能研究[J]. 工程力学, 2017(4).
- [7] 闫书明. 城市桥梁新型桥侧混凝土护栏的碰撞分析[J]. 武汉科技大学学报,2014(3).
- [8] 罗爱道,龚帅,滕玉禄,等. 黄龙带特大桥桥侧护栏优化[J]. 城市道桥与防洪,2016(7).
- [9] 庞杰,李雷,谢鹏. 基于桥侧护栏形式的中央分隔带护栏结构设计及优化研究[J]. 公路工程,2017(2).
- [10] 刘明虎,张门哲,亢寒晶,等. 桥梁嵌固式基础中央分隔带钢护栏安全性分析[J]. 中外公路,2019(3).
- [11] 雷正保,刘漫雪. 岳阳洞庭湖二桥钢护栏优化设计[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2015(2).

提高待行区的使用效率;李颖宏等建立了直行待行区通行能力模型,结合实例对其适用性进行了研究,结果表明:在饱和度较大的情况下能显著提升通行能力;杨林等通过建立排队模型对直行待行区的运行效益进行了分析,通过 VISSIM 得出在过饱和情况下更有必要设置直行待行区的结论;林芬等从对环境的污染角度出发,对直行待行区的适用条件进行了研究,得到了最优的流量及右转比例范围。

全待行区是指一个进口同时设置了左转以及直行待行区的情况,目前在中国的深圳、上海等大城市被越来越多地应用。其设置方法以及控制方法与常规左转及直行待行区相似,但目前对其适用性的研究还比较少。

综上,目前对于左转以及直行待行区的适用性已经进行了相关的研究。但是研究中考虑的影响因素还比较单一,并且缺乏对这几种待行区之间适用性统一的研究,在不同情况下它们适用性的高低还不得而知。该文建立交叉口待行区信号控制的优化模型,并从流量大小、主次路流量比以及转向比例 3 个角度通过 VISSIM 仿真对不同待行区设置方式的最优运行效率进行研究,进而定量地确定几种待行区的适用性范围,可为实际中十字信号交叉口待行区的设置提供一定的依据。

1 待行区几何及信号控制特征

待行区一般设置在交通量较大且比较大型的交叉口,在不会对其他流向车辆干扰的情况下通过将主停止线向交叉口内部延伸来缩短停车等待车辆通过交叉口的时间。相比于常规交叉口,设有待行区的交叉口车辆可以充分利用交叉口内部空间,启动点更加靠前。但是由于设有两段停止线,车辆往往需要二次停车甚至三次停车,因此不合理的待行区设置方式反而会导致运行效率低下。通过设置待行区信号指示牌可以引导不同流向车辆提前进入待行区等待,其通常设置在对向出口道路缘,如图 1 所示。该指示牌在上一相位绿灯开始时刻启亮,提醒车辆进入待行区排队,另外为了保证待行区内车辆全部通过要提前关闭。

设置有待行区的交叉口往往都是四相位控制,其中左转待行区绿灯指示牌在其他流向直行绿灯开始后启亮,直行待行区在同向左转绿灯开始后启亮。同时设有左转待行区以及直行待行区交叉口的几何构造及信号控制方法具体如图 1 所示。

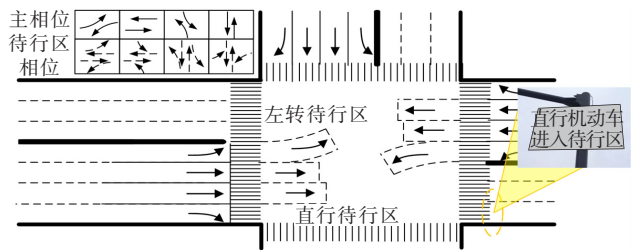


图 1 待行区交叉口几何构造及信号相位

2 控制方案优化模型

2.1 模型建立

2.1.1 目标函数

为了提高交叉口的整体效率,以储备通行能力最大为优化目标,如式(1)所示:

$$Z = \max \mu \quad (1)$$

式中: Z 为目标函数; μ 为流量系数, μ 与输入各流向流量的乘积表示储备通行能力, $\mu > 1$ 说明交叉口已经达到饱和。

2.1.2 约束条件

(1) 交通流量约束:分配在各条车道的交通量和应等于流量系数乘以输入流量。

$$\mu q_{ij}^{\text{in}} = \sum_{k=1}^n q_{iwbk}^{\text{out}} \quad \forall i=1, \dots, N; j=1, \dots, N-1 \quad (2)$$

式中: q_{ij}^{in} 为 i 进口 j 流向的输入流量, $i=1,2,3,4$ 分别为北、西、南、东, $j=1,2,3$ 分别为左转、直行、右转; q_{iwbk}^{out} 为 i 进口 j 流向分配到 k 车道的流量。

(2) 周期时长约束:周期时长应该满足最小最大时长的范围。

$$C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \quad (3)$$

式中: C 为周期时长(s); C_{\min} 、 C_{\max} 分别为周期时长最小值和最大值(s)。

(3) 绿灯时长约束:各流向绿灯时间要大于最小绿灯时长。

$$G_{ij}^{\min} < G_{ij} < C \quad (4)$$

式中: G_{ij} 为 i 进口 j 流向的绿灯时长(s); G_{ij}^{\min} 为 i 进口 j 流向的最小绿灯时长(s)。

(4) 待行区绿灯约束:为了防止车辆滞留在待行区对其他流向交通造成影响,需对待行区绿灯指示牌进行早断控制。

$$g_{ij} + G_{ij} \geq g_{ij}^w + G_{ij}^w + \frac{L_{ij}}{v} \quad (5)$$

式中: g_{ij} 为 i 进口 j 流向的绿灯开始时间(s); g_{ij}^w 、 G_{ij}^w 分别为 i 进口 j 流向待行区指示牌开始时间、持续时长(s); L_{ij} 为 i 进口 j 流向待行区长度(m); v 为车辆行驶速度(m/s)。

(5) 清空时间:任意一组冲突相位,后一相位开始时间要大于前一相位结束时间加清空时间。

$$g_{lm} \geq g_{ij} + G_{ij} + \omega_{ij,lm} \quad \forall (i,j),(l,m) \in \Omega \quad (6)$$

式中: Ω 为不同岔口不同流向的集合; $\omega_{ij,lm}$ 为相互冲突的两个流向 ij (后)与 lm (前)的最小清空时间(s)。

(6) 饱和度约束

$$y_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^{N-1} q_{ijk}^{out}}{S_{ik}} \quad (7)$$

$$X_{\max} \frac{G_{ik}}{C} \geq y_{ik} \quad (8)$$

式中: y_{ik} 为 i 进口 k 车道的流量比; X_{\max} 为最大饱和度。

2.2 算法

模型的决策变量为流量系数 μ 以及各流向绿灯时长 G_{ij} ,由于待行区长度 L_{ij} 及行驶速度 v 是已知的,因此该模型为一个混合整形线性规划问题,该文使用分支定界法对其进行求解。

步骤 1:将模型中绿灯时间 G_{ij} 、 G_{ij}^w 先作为实数处理,进而求解该松弛问题。判断最优解中的参数是否满足整数的限制,满足则跳出,不满足转步骤 2。

步骤 2:分支,选择不满足整数限制的变量,根据该值建立上下两个整数子集,即两条分支。

步骤 3:定界。目标函数最大作为上界,满足整数条件的分支中目标函数 Z^* 作为下界。分支过程中一旦找到解的值 $Z \geq Z^*$,则令 $Z^* = Z$ 。

步骤 4:当寻找不到分支的值大于 Z^* 后,结束分支,该值即为模型最优解,输出最优信号控制方案。

3 基于 VISSIM 仿真的适用性分析

该节以左转、直行以及全待行区为研究对象,在最优控制方案的基础上建立 VISSIM 微观仿真方案,利用输出评价指标进行对比分析,定量地得出其适用性结论。

3.1 数据输入

选用案例为上海市张扬路与居家桥路交叉口,其几何结构如图 2 所示,其中张扬路 4 条进口道,3 条出口车道,居家桥路 3 条进口道,2 条出口道。交叉口进

口道宽度均为 3 m,出口道宽度均为 3.5 m,目前仅有张扬路出口设有左转待行区,其长度约为 18 m。

为了对比左转、直行以及全待行区的运行效益,保持交叉口其他几何条件不变,改变待行区的设置方案,如图 3 所示,其中直行待行区长度设为 16 m。

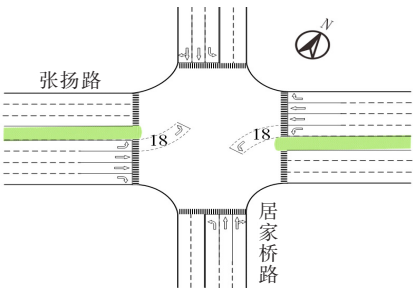


图 2 张扬路—居家桥路几何图(单位:m)

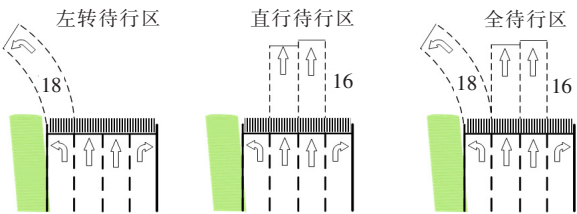


图 3 3 种待行区渠化图(单位:m)

信号优化模型中周期时长的最大、最小值分别取 60、120 s;最小绿灯时长为 5 s,清空时长为 4 s,饱和流率为 1 800 pcu/h,车正常行驶速度为 40~45 km/h,最大饱和度 X_{\max} 取 0.85。为了对不同流量水平下的运行效果进行比较,根据调查得到的数据将交通需求分为低、中、高 3 个等级,如表 1 所示,其中为了公平起见 3 种水平下转向车比例相同。

3.2 优化控制方案及评价指标输出

使用 Matlab 软件对第 2 节信号优化模型进行求解,在 2.2 GHz CPU,8GB 内存配置的计算机中,求解时间均在 2 s 以内。由于该文中 3 种流量水平下各转向比例都相等,且优化目标函数为储备通行能力最大,因此计算得到的控制方案相同,如表 2 所示。

表 1 不同流量水平下主次路流量及转向比例

交通需求	进口道总交通量/(pcu · h ⁻¹)		转向比例(直/左/右)/%
	主路	支路	
低	1 000	700	70/20/10
中	1 400	1 000	70/20/10
高	1 800	1 250	70/20/10

表2 信号控制方案

控制方案	时长/s	控制方案	时长/s
G_{21}, G_{41}	22	G_{21}^w, G_{41}^w	50
G_{22}, G_{42}	39	G_{22}^w, G_{42}^w	63
G_{11}, G_{31}	16	C	120
G_{12}, G_{32}	27		

分别将优化得到的控制方案输入 VISSIM 仿真软件,并对 3 种流量水平下图 3 中不同待行区设置方法进行 VISSIM 仿真,为避免软件随机性的影响,通过修改随机种子进行多次仿真。

延误作为衡量交叉口运行效率的重要指标,是衡量不同待行区适用性的一个关键参数,为了定量地确定几种待行区设置的范围,该文以车均延误作为评价指标在仿真中输出。

3.3 多情景下适用性分析

为了确定不同流量水平下设置待行区的效果,分别计算不同流量水平下 4 个进口不同待行区设置方式以及常规进口在最优控制方案下的车均延误,其结果如图 4 所示。

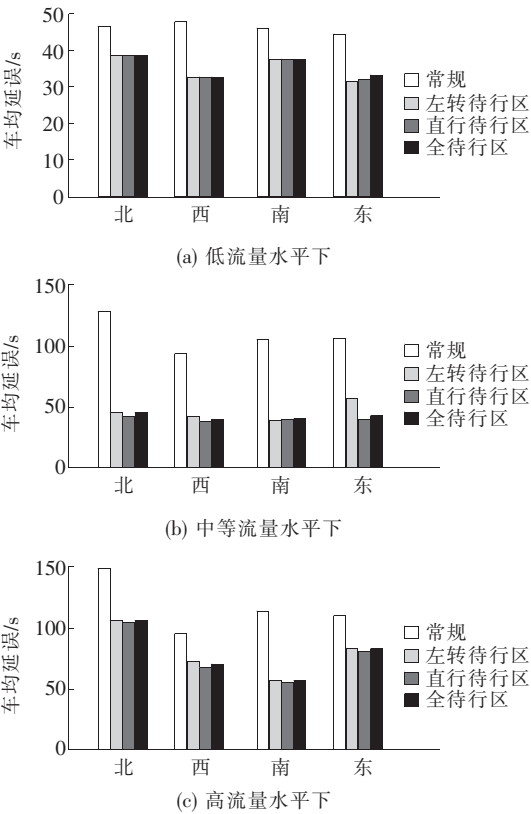


图4 不同流量水平下交叉口运行效率

由图 4 可得:在不同流量水平下,3 种待行区都能

提高交叉口通行能力,其中在流量中等($\mu = 0.89$)时相比于交叉口畅通($\mu = 0.68$)以及严重拥堵($\mu = 1.25$)时设置待行区的优化效果更为显著。在该流量水平下,交叉口设有左转、直行以及全待行区对于车均延误的优化程度分别达到 56%、62%以及 60%。因此可以得出结论:交叉口在接近饱和的情况下待行区最为适用,这与杨林的研究结果相同。

为了研究车辆转向比例对适用性的影响,保持主路流量 1 400 pcu/h,次路流量 1 000 pcu/h,以 5%为间隔改变左转车比例。将参数代入信号优化模型计算最优控制方案,并对其进行 VISSIM 仿真,输出相应延误值。敏感性分析的结果如图 5 所示。

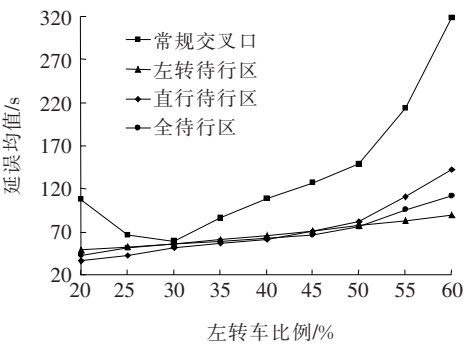


图5 不同转向比例下交叉口运行效率

从图 5 可以发现:当左转比例为 30%时,直行车道与左转车道流量接近相同,此时交叉口整体效率最高,设置待行区的优化效果不明显。在左转比例较小的情况下直行待行区表现最好,随着左转比例的增大,交叉口急剧恶化,此时左转待行区体现出明显的优势,而从整体上来看全待行区表现得最为稳定。

由于待行区往往设置在主路的较多,为了研究次路流量对主路待行区设置的影响,保持其他参数不变,将次路流量以 200 pcu/h 为间隔从 200~1 400 pcu/h 改变,对其进行敏感性分析,其结果如图 6 所示。

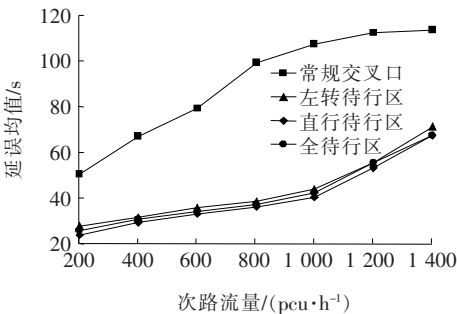


图6 不同次路流量下交叉口整体效率

从图 6 可以发现:次路流量的大小对主路待行区设置的优化效果具有直接的影响,其中设置转向比例为 20%,直行待行区优化效果最好,这与前面的分析结果相同,当次路流量与主路流量比例超过 60%时待行区的优化效果明显降低,即主路待行区在次路流量相对较小时最为适用。

4 结 论

以交叉口储备通行能力最大为目标建立了交叉口待行区信号优化模型,并在此基础上对 3 种待行区(左转待行区、直行待行区以及全待行区)在不同流量水平、转向车比例以及主次路流量比下的适用性进行了研究,得到以下结论:

(1) 在不同流量水平下,通过设置待行区都能够提升交叉口整体运行效率,其中当流量接近饱和状态时优化效果最为明显。

(2) 当左转车道流量与直行车道流量接近时,交叉口整体运行效率最高,待行区的优化效果最不明显。当左转车比例小于 40%时,直行待行区最为适用,相反当左转车比例超过 40%左转待行区更具有适用性。当交叉口交通波动性较大,转向比例不稳定的情况下全待行区的优化效果相比于单独设置待行区的效果更好,具有较好的鲁棒性。

(3) 主次路流量比的大小对主路待行区的优化效果也会产生影响,当主次路流量比小于 0.6 时待行区优化效果较好,随着流量比增大,优化效果从 63%降低为 40%。

待行区在实际应用时,由于不可避免地增加了停车次数使得车辆在交叉口的尾气排放量增加,这也是影响其适用性的主要因素。该文仅以效率为影响指标,未考虑对环境的污染性,可作为下一步研究方向。

参考文献:

[1] 杨佩昆. 车辆通过冲突点的红绿灯交叉口通行能力的分

析方法[J]. 同济大学学报, 1981(3).

- [2] 王殿海,李丽丽,陈永恒. 机动车左弯待转区设置的临界条件[J]. 公路交通科技, 2009(11).
- [3] 倪颖,李克平,徐洪峰. 信号交叉口机动车左转待行区的设置研究[J]. 交通与运输(学术版), 2006(2).
- [4] 孙冰清,陈景雅. 城市信号交叉口左转待行区设置及效益评价研究[J]. 公路交通技术, 2014(4).
- [5] 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(1).
- [6] 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(7).
- [7] 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(18).
- [8] 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(1).
- [9] 李小帅,贾顺平,孙海瑞. 机动车待行区设置方法的实证研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011(S1).
- [10] 蒲超伦. 基于正交试验的道路交叉口仿真分析及优化[J]. 中外公路, 2019(2).
- [11] Wong C K, Wong S C. Lane-Based Optimization of Signal Timings for Isolated Junctions[J]. Transportation Research, Part B (Methodological), 2003, 37(1): 63-84.
- [12] Zhao J, Ma W, Michael Zhang H, et al. Increasing the Capacity of Signalized Intersections with Dynamic Use of Exit-Lanes for Left-Turn Traffic[J]. Transportation Research Record, 2013, 2 355: 49-59.
- [13] Yu C, Ma W, Lo H K, et al. Robust Optimal Lane Allocation for Isolated Intersections[J]. Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(1): 72-86.
- [14] 潘兵宏,霍永富,高健强,等. 基于 VISSIM 仿真的改进型环形平面交叉口研究[J]. 中外公路, 2018(1).
- [15] 李赞勇,冯焘. 分离式立交与平面交叉口合理间距研究[J]. 中外公路, 2018(3).
- [16] 仇锦. 基于 VISSIM 仿真的信号交叉口优化研究[D]. 山东建设大学硕士学位论文, 2013.
- [17] 刘淑敏,赵龙生. 城市道路与高速公路相交节点方案研究[J]. 中外公路, 2018(3).
- [18] 张焱,成卫. 城市涡轮式环形交叉口的设计及仿真研究[J]. 中外公路, 2018(5).