

城市信号交叉口非机动车待行区设置分析*

张驿丹¹, 张向军²

(1.太原科技大学 车辆与交通工程学院, 山西 太原 030024; 2.山西省乡宁公路管理段, 山西 乡宁 041200)

摘要:以 3 种非机动车待行区为研究对象,基于交通流理论,以均衡相位延误公式为基础,分别建立交叉口机动车和非机动车平均延误分析模型,以车辆平均延误为评价指标,分析设置 3 种非机动车待行区交叉口的机动车、非机动车到达量及平均延误的变化规律。结果表明,非机动车到达量小于 1 000 veh/h 时,设置普通待行区与非机动车停车线提前待行区交叉口的非机动车平均延误相差不大,大于 1 000 veh/h 时设置非机动车停车线提前待行区交叉口的平均延误比设置普通非机动车待行区交叉口的平均延误低;在交叉口大小允许的情况下,设置非机动车停车线提前待行区最优,设置左转非机动车待行区交叉口的非机动车整体平均延误比设置其他形式待行区交叉口的的大,但随着非机动车到达率增加,与设置普通待行区交叉口的延误差值逐渐减小。最后结合信号交叉口服务水平标准和车辆到达率提出信号交叉口非机动车待行区设置形式建议。

关键词:城市交通;信号交叉口;非机动车待行区;车辆延误

中图分类号:U491.59

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)05-0018-06

共享经济的兴起,非机动车出行量增加,但道路资源有限,机动车与非机动车在进入交叉口时的相互干扰加剧,交叉口服务水平降低。为有效管理与引导非机动车流,提升交叉口非机动车运行效率,在信号交叉口进口道设置非机动车待行区分离机、非交通量,减少机动车与非机动车的相互干扰^[1]。

常见非机动车交通设计方法有左转二次过街、非机动车停车线前移等^[2-4]。冯天军等结合韦伯斯特机动车延误模型,描述了不同非机动车过街方式的人均延误与车流流量的变化关系,以最小延误为优化指标,给出了待行区选择的参考依据^[3];邝先验等分析设置非机动车等候区时车流状态特性及非机动车密度和等候区纵向长度对信号交叉口的影响,认为设置等候区虽能在一定程度上提高交叉口的通行能力,但长度过大会增大对机动车的阻滞^[5];崔力中以机动车与非机动车的交通冲突数为非机动车待行区安全水平评价指标,建立考虑不同非机动车待行区随机效应的负二项分布回归模型,提出了信号交叉口非机动车待行区的设置形式选择方法^[6];王耀东等在现有非机动车停车线后方增设第二条非机动车停车线和信号控制灯,形成两个非机动车停车等待区域,通过两个信号灯的错时开启使两个区域内的非机动车先后通行,以减少机动车与非机动车

之间的冲突,增强右转区域的安全可靠性和通行效率^[7];Buch T. S.等认为采用非机动车停车线前移形式待行区可显著降低绿灯初期的机动车与非机动车冲突数^[8]。已有研究鲜有结合信号交叉口服务水平标准、占地面积等因素提出设置形式选择建议。本文针对不同非机动车待行区形式分别建立信号交叉口机动车和非机动车平均延误分析模型,通过分析机动车、非机动车到达率,对比分析普通非机动车待行区、非机动车停车线提前待行区、左转非机动车待行区对交叉口车辆平均延误的影响,结合交叉口服务水平标准提出信号交叉口非机动车待行区设置形式建议。

1 非机动车待行区形式

1.1 普通非机动车待行区

普通非机动车待行区的机动车与非机动车的停车线为同一停车线,非机动车到达交叉口进口道后在停车线后的非机动车道上等候(见图 1)。它是最常见的待行区设置方式之一。交叉口红灯亮时,非机动车和机动车分别在各自停车线上游处等候;绿灯亮时,机动车和非机动车在同一相位进入交叉口。该待行区的设置可在很大程度上缩短信号周期、减少车辆平均延误,提高交叉口的运行效率。但存在

* 基金项目:2022 年度太原科技大学教学改革创新项目(JG2022773)

右转机动车与直行非机动车、左转非机动车与直行机动车等交通冲突,会降低交叉口的安全性。

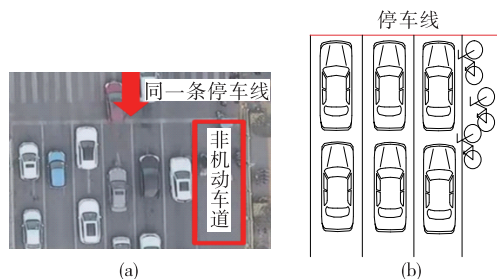


图 1 普通非机动车待行区示意图

1.2 非机动车停车线提前待行区

非机动车停车线提前待行区中非机动车停车线设置在机动车停车线之前,待行区位于非机动车停车线与机动车停车线之间(见图 2)。交叉口红灯亮时,非机动车提前驶入待行区等候;绿灯亮时,待行区内非机动车先驶入交叉口,机动车在非机动车后方进入交叉口^[6]。该待行区的设置可在一定程度上避免绿灯初期机动车与非机动车之间的冲突,提高非机动车的运行效率。但会延长交叉口的信号周期,增加机动车延误。

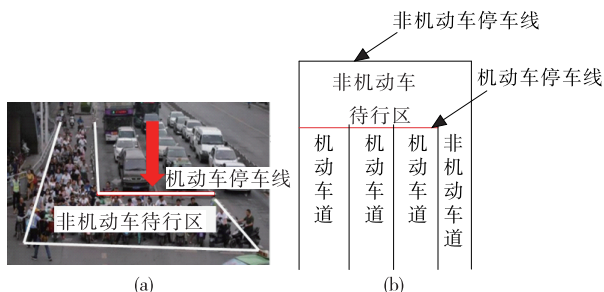


图 2 非机动车停车线提前待行区示意图

1.3 左转非机动车待行区

左转非机动车待行区是在普通非机动车待行区的基础上,在人行道的前方设置一块区域,该区域一般位于非机动车道前方,并未占用机动车停车线前方区域(见图 3)。设置该待行区的交叉口,非机动车左转需二次过街(逆时针方向)。如图 3(b)所示,红灯期间,左转非机动车驶入待行区 1 内等候;绿灯初期,待行区 1 内非机动车直行到待行区 2,调转方向;随后,待行区 2 内的非机动车在该进口道绿灯期间直行,完成左转为^[3]。该待行区的设置可大大减少左转非机动车和其他方向机动车之间的冲突,提高交叉口的安全水平。但左转非机动车须至少等待一个红灯期,交叉口运行效率和服务水平降低,且

容易造成交叉口处非机动车拥堵。

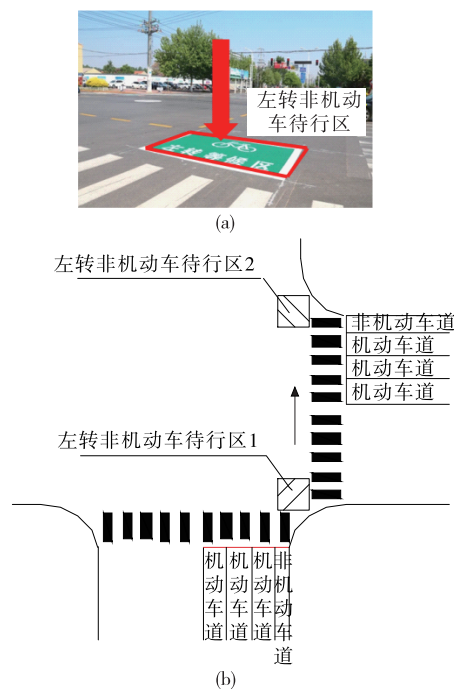


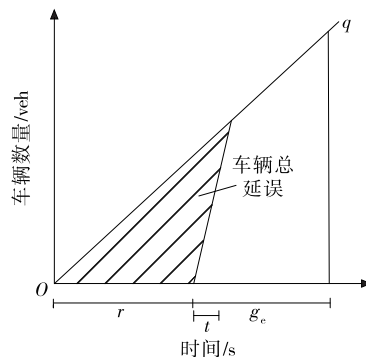
图 3 左转非机动车待行区示意图

2 延误模型的建立

以车辆平均延误为评价指标,针对设置不同形式非机动车待行区的交叉口分别建立机动车平均延误模型和非机动车平均延误模型。

2.1 设置普通非机动车待行区交叉口的车辆延误模型

设置普通非机动车待行区的信号交叉口进口道,机动车与非机动车的平均延误规律相似(见图 4)。



q 为机动车到达量或非机动车到达量(veh/h); r 为红灯时长(s); t 为时间; g_e 为绿灯时长(s)

图 4 设置普通非机动车待行区交叉口的车辆延误

在绿灯初期,机动车和非机动车同时以饱和流率 S_1 通过进口道停车线,时间为 t ,随后释放到达车辆。忽略机动车和非机动车在绿灯期间释放的相互

干扰。根据 HCM 2010《道路通行能力手册 2010》中均衡相位延误公式^[9],设置该待行区交叉口的机动车平均延误模型和非机动车平均延误模型均为:

$$d_c = \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)}$$

式中: d_c 为机动车或非机动车的平均延误(s); c 为信号交叉口周期时长(s); λ 为机动车或非机动车的绿信比; x 为机动车或非机动车的饱和度。

2.2 设置非机动车停车线提前待行区交叉口的车辆延误模型

设置非机动车停车线提前待行区的信号交叉口进口道,机动车与非机动车的平均延误规律见图 5。

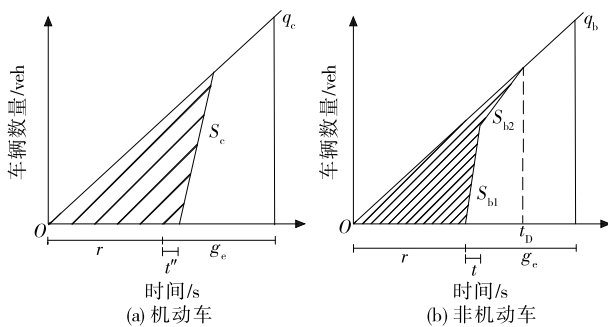


图 5 设置非机动车停车线提前待行区交叉口的车辆延误

设非机动车待行区宽度为 L_t 、长度为 W_t ,即机动车停车线向后水平移动距离为 W_t 。一般情况下, L_t 的取值以机动车道宽度为基础,待行区的面积 B 以非机动车停车面积为基础,则长度 $W_t = B/L_t$ 。

相比于普通交叉口,设置非机动车停车线提前待行区交叉口的机动车信号周期总损失时间不再限于车辆起动损失时间、绿灯间隔时间和黄灯时间,还包括机动车穿过非机动车待行区所需时间 t' 和等待待行区非机动车进入交叉口的时间 t'' 。 t' 和 t'' 的计算公式如下:

$$t' = \frac{W_t}{v_c}; t'' = \frac{W_t}{v_b}$$

式中: v_c 为机动车穿过非机动车待行区的平均速度(km/h); v_b 为待行区内最后一排非机动车穿过待行区的平均速度(km/h)。

信号交叉口进口道通行能力计算一般采用 HCM 2010 推荐的方法,为饱和流率与绿信比的乘积。机动车流饱和度按下式计算:

$$x_c = \frac{q_c}{S_c(g_c - t' - t'')/c}$$

式中: q_c 为机动车到达量(veh/h); S_c 为交叉口机动车饱和流率, $S_c = 3\ 600/\bar{h}_t$; \bar{h}_t 为饱和车头时距平

均值^[9]。

机动车平均延误 \bar{d}_c 为:

$$\bar{d}_c = \frac{c[1-\lambda+(t'+t'')/c]^2}{2\{1-[\lambda-(t'+t'')/c]x_c\}}$$

设置该待行区后,非机动车在红灯期间须先行驶到待行区等候,待行区车辆占满后,其余非机动车依旧在非机动车道等候;绿灯初期,待行区内非机动车先以饱和流率 S_{b1} 进入交叉口,持续时间为 t ,随后非机动车道上非机动车以饱和流率 S_{b2} 释放,直至 t_D 时刻排队车辆释放完毕。 S_{b1} 、 S_{b2} 、 t_D 计算公式如下:

$$S_{b1} = \frac{L_t W_t}{A_b} \cdot \frac{3\ 600}{c} + S_{b2}; S_{b2} = \frac{3\ 600}{\bar{h}_t}$$

$$t_D = t + r + \frac{q_b r - t S_{b1} + q_b t}{S_{b2} - q_b}; t_D \leq 110\text{ s}$$

式中: A_b 为非机动车的单位占地面积(m^2),其值为 1.5 m^2 ; q_b 为非机动车到达量(veh/h)。

如图 5(b)所示,信号交叉口一个周期内非机动车的总延误 d_b 为多边形阴影区域的面积,按下式计算:

$$d_b = \frac{1}{2}[t_D^2 q_b - S_{b2}(t_D - r - t)^2 + S_{b1} t^2] - S_{b1} t(t_D - r)$$

非机动车的平均延误 \bar{d}_b 为:

$$\bar{d}_b = \frac{d_b}{q_b c}$$

2.3 设置左转非机动车待行区交叉口的车辆延误模型

设置左转非机动车待行区的信号交叉口进口道,机动车与非机动车的平均延误规律见图 6。

非机动车待行区一般设置在非机动车道前方,绿灯初期释放车辆时,机动车受非机动车的干扰较小,机动车释放规律与普通非机动车待行区相似,机动车平均延误 \bar{d}_c 为:

$$d_c = \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)}$$

与非机动车停车线提前待行区不同,左转非机动车待行区利用待行区将行驶方向为左转的非机动车划分出来。红灯期间,左转非机动车须先行驶到待行区等候,其余非机动车依旧在非机动车道停车线后等候。绿灯初期,待行区内和非机动车道停车线后的部分非机动车同时进入交叉口至 t_z 时刻,此

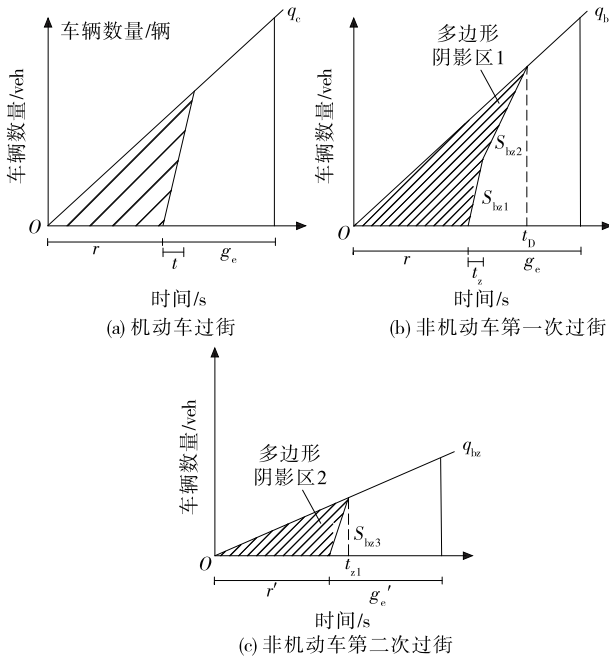


图6 设置左转非机动车待行区交叉口的车辆延误

时的饱和流率为 S_{bz1} ,随后非机动车道停车线后的其余车辆以饱和流率 S_{bz2} 释放,直至 t_D 时刻排队车辆释放完毕,其中 $S_{bz1} = S_{dz1} + S_{bz2}$, $S_{bz2} = 3600/\bar{h}_t$ 。

设待行区宽度 L_z 为非机动车道宽度、长度为 W_z ,则:

$$S_{dz1} = \frac{L_z W_z}{A_b} \cdot \frac{3600}{c} + S_{bz2}$$

左转非机动车须二次过街,即到达待行区2之后继续与对应进口道非机动车再次直行穿过交叉口。该过程可以视为非机动车以 q_{bz} (左转非机动车到达量) 到达待行区2,允许释放后,再次通过交叉口。

如图6(b)、(c)所示,信号交叉口一个周期内非机动车的总延误 d_b 为多边形阴影区1和阴影区2的面积,两区域的延误分别为:

$$d_{bz1} = \frac{1}{2} [t_D^2 q_b - S_{bz2} (t_D - r - t_z)^2 + S_{bz1} t_z^2] -$$

$$S_{bz1} t_z (t_D - r)$$

$$d_{bz2} = \frac{1}{2} q_{bz} (r' + t_{z1}) r'$$

式中: r' 为左转非机动车到达待行区2后等待红灯的时长(s); t_{z1} 为左转非机动车从待行区2以饱和流率 S_{bz3} 进入交叉口的持续时间(s)。

非机动车的平均延误 \bar{d}_{bz} 为:

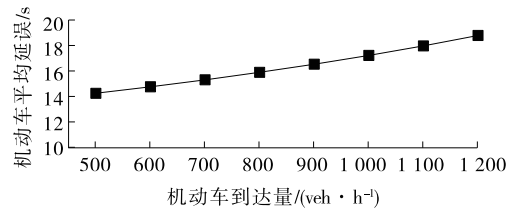
$$\bar{d}_{bz} = \frac{1}{q_{bc}} (d_{bz1} + d_{bz2})$$

3 非机动车待行区的车辆延误分析

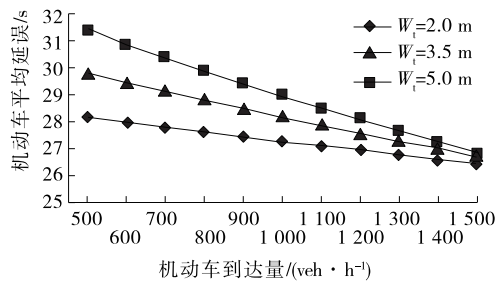
根据上文所述设置普通非机动车待行区、非机动车停车线提前待行区、左转非机动车待行区交叉口的机动车、非机动车平均延误模型,通过改变车辆到达率对车辆延误进行进一步分析。参考文献[2]和文献[10—11],非机动车停车线待行区长度 W_i 的取值为2~5 m,非机动车纵向占地长度为1.5 m左右, W_i 分别取2.0 m、3.5 m、5.0 m,非机动车道宽度为2.5 m,机动车道宽度为3.5 m。

3.1 机动车平均延误与机动车到达量的关系

设置不同形式待行区交叉口的机动车平均延误与机动车到达量的关系见图7。由图7可知:1) 设置普通非机动车待行区与左转非机动车待行区的交叉口,机动车进口道停车线前未设置非机动车待行区,机动车在进入交叉口时几乎不会被非机动车待行区影响,机动车平均延误随着机动车到达量的增加而增大。2) 设置非机动车停车线提前待行区的交叉口与之相反,机动车平均延误随着机动车到达量的增加而减小,但递减速度逐渐减缓。机动车到达量一定时,待行区的长度越长,机动车平均延误越大。但随着机动车到达量的增加,不同待行区长度对应的机动车平均延误差值逐渐减小。



(a) 普通非机动车待行区与左转非机动车待行区



(b) 非机动车停车线提前待行区

图7 设置不同形式待行区交叉口的机动车平均延误

如图8所示,与设置普通非机动车待行区交叉口相比,设置非机动车待行区交叉口的机动车平均延误最少增加5 s,最多增加15 s;机动车到达量与机动车平均延误增加值呈负相关。

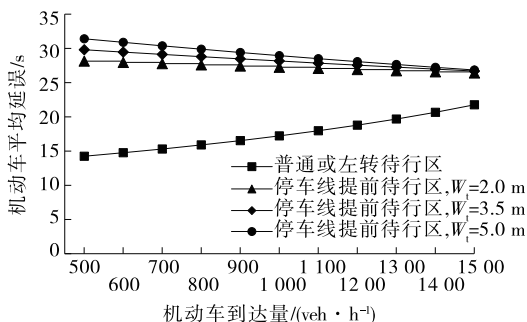


图8 设置不同形式待行区交叉口的机动车平均延误对比

3.2 非机动车平均延误与非机动车到达量的关系

设置不同形式待行区交叉口的非机动车平均延误与非机动车到达量的关系见图9。

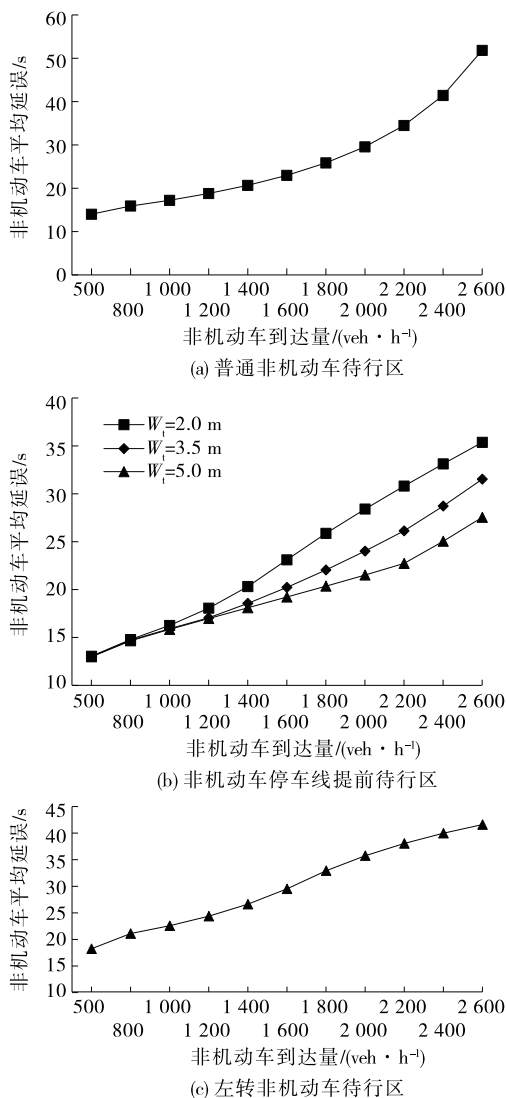


图9 设置不同形式待行区交叉口的非机动车平均延误

由图9可知:1) 设置普通非机动车待行区交叉口的非机动车平均延误随着非机动车到达量的增加

呈先缓慢增大后加速增长的趋势,非机动车到达量为3 000 veh/h时,其平均延误接近60 s。2) 设置非机动车停车线提前待行区的交叉口,待行区长度越大,待行区面积越大,非机动车平均延误越少。非机动车到达量较低时,不同待行区长度对应的非机动车平均延误相差不大,到达量大于1 000 veh/h时,随着非机动车到达量的增加,不同待行区长度对应的非机动车平均延误之间的差值增大。3) 设置左转非机动车待行区交叉口的非机动车平均延误随着非机动车到达量的增加呈上升趋势。

如图10所示,设置非机动车停车线提前待行区交叉口的非机动车平均延误总体比设置普通非机动车待行区交叉口的少,但非机动车到达量不超过1 000 veh/h时,二者的非机动车平均延误相差并不大,随着非机动车到达量的增加,二者的非机动车平均延误差值增大;设置左转非机动车待行区交叉口的非机动车平均延误比设置非机动车停车线提前待行区交叉口的非机动车平均延误大14 s;与普通非机动车待行区相比,设置左转非机动车待行区会增加非机动车平均延误,非机动车到达量大于2 400 veh/h时,其延误才会比普通待行区少,但此时非机动车到达量较大,一般交叉口可能无法设置允许承载左转非机动车的停车区域。因此,可根据交叉口进口道实际可停车承载量选择性设置左转非机动车待行区。

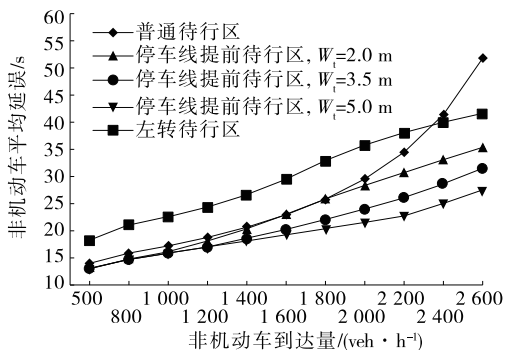


图10 设置不同形式待行区交叉口的非机动车平均延误对比

4 非机动车待行区设置形式建议

综合以上分析,结合美国交叉口机动车服务水平标准、信号交叉口非机动车道服务水平标准^[12],同时考虑节约占地面积,提出表1所示信号交叉口非机动车待行区设置形式建议。

表 1 信号交叉口非机动车待行区设置形式建议

机动车到达量/ (veh · h ⁻¹)	非机动车到达 量/(veh · h ⁻¹)	待行区设置 形式建议
<700	<1 000	普通非机动车待行区
		普通非机动车待行区、非机动 车停车线提前待行区($L_t =$ $7.0\text{ m}, W_t = 2.0\text{ m}$)
	[1 000,1 400)	非机动车停车线提前待行区 ($L_t = 7.0\text{ m}, W_t = 3.5\text{ m}$)
	[1 400,1 600)	非机动车停车线提前待行区 ($L_t = 7.0\text{ m}, W_t = 3.5\text{ m}$)
	[1 600,2 200)	非机动车停车线提前待行区 ($L_t = 7.0\text{ m}, W_t = 5.0\text{ m}$)
[700,1 000)	[2 200,2 400)	非机动车停车线提前待行区 ($L_t = 7.0\text{ m}, W_t = 5.0\text{ m}$)、左转 非机动车待行区(视交叉口 非机动车允许承载量而定)
≥1 400	≥2 400	

5 实例验证

以西安市高新区某交叉口为例,对机动车、非机动车高峰小时到达量等交通信息进行调查,用录像法获取工作日早高峰(7:30—8:30)交通数据,调查结果见表 2。该交叉口最右侧机动车道为直右车道,非机动车道宽度为 3.0 m,设置普通非机动车待行区。

表 2 西安市高新区某交叉口早高峰交通调查数据

项目	调查结果
待行区设置形式	普通非机动车待行区
非机动车到达量/(veh · h ⁻¹)	1 034
机动车到达量/(veh · h ⁻¹)	768
机动车平均延误/s	15.7
非机动车平均延误/s	17.5

根据表 1,该交叉口可设置普通非机动车待行区和非机动车停车线提前待行区($L_t = 7.0\text{ m}, W_t = 2.0\text{ m}$)。利用均衡相位延误公式计算,该交叉口设置非机动车停车线提前待行区($L_t = 7.0\text{ m}, W_t = 2.0\text{ m}$)时,机动车和非机动车的平均延误分别为 27.6 s、18.3 s,与设置普通非机动车待行区相比,分别增加 11.9 s、0.8 s。可见,该交叉口更适合设置普通非机动车待行区。

6 结语

本文以交叉口不同形式非机动车待行区为研究

对象,基于交通流理论,分别建立交叉口机动车、非机动车平均延误模型,通过改变交叉口机动车、非机动车到达量,对比分析 3 种待行区形式下交叉口车辆平均延误,结合信号交叉口服务水平标准、占地面积等因素,提出信号交叉口非机动车待行区设置形式建议。研究结果可为城市交叉口非机动车待行区选择、交通管理和控制方案优化提供依据。

参考文献:

[1] 道路与交通工程研究会.交通信号控制指南:德国现行规范 R11SA[S].李克平,译.北京:中国建筑工业出版社,2006.

[2] 雷升龙.关于非机动车待行区的研究与应用[J].交通科技,2019(4):105—108.

[3] 冯天军,孙学路,黄家盛,等.基于三种过街方式的两相位信号交叉口延误[J].吉林大学学报(工学版),2022,52(3):550—556.

[4] 王涛,覃国峰,杨岸磊,等.信控交叉口非机动车待行特性[J].山东交通学院学报,2016,24(3):36—42.

[5] 邝先验,陈自如.设置非机动车等候区的信号交叉口交通流模型[J].交通运输系统工程与信息,2019,19(4):179—186.

[6] 崔力中.基于交通冲突的信号交叉口非机动车待行区设置形式选择方法研究[D].西安:长安大学,2019.

[7] 王耀东,陈雨人.减少机动车与非机动车冲突的交叉口交通组织方法[J].西安交通大学学报,2015,49(8):109—115.

[8] BUCH T S,JENSEN S U.Incidents between straight-ahead cyclists and right-turning motor vehicles at signalised junctions[J].Accident Analysis and Prevention,2017,105:44—51.

[9] 李锐,李文权,邱丰.考虑主路左转延误的主路优先交叉口信号设置流量阈值[J].东南大学学报(自然科学版),2012,42(3):551—554.

[10] DONG C,MA R,YIN Y,et al.Traffic conflict analysis of motor vehicles and nonmotor vehicles based on improved cellular automata[J].Mathematical Problems in Engineering,2020(1):1—11.

[11] 中华人民共和国公安部,中华人民共和国住房和城乡建设部.城市道路交通标志和标线设置规范:GB 51038—2015[S].北京:中国计划出版社,2015.

[12] 袁晶矜,袁振洲.信号交叉口服务水平评价体系指标的分析及应用[J].公路交通技术,2006,22(4):145—149+153.