

文章编号:1671-1637(2016)03-0142-07

左转许可控制的平交口直左与左转车道延误比较

邵海鹏^{1,2}, 吕纪娜¹, 董海倩^{1,3}

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长沙理工大学 公路工程教育部重点实验室, 湖南 长沙 410004;
3. 西安市城市规划设计研究院, 陕西 西安 710082)

摘要:为了在左转许可相位下比较左转专用和直左共用车道的延误,分析了2种左转交通组织方式下交通流在交叉口运行的规律,基于可接受空当理论,以到达率和左转车辆比例为变量,分别建立了在泊松分布到达情况下2种左转交通组织方式下的延误模型,以西安市某交叉口的几何设计和信号控制数据为例进行了延误分析。计算结果表明:总延误随着到达率和左转车辆比例的增大而增大;到达率较小时设置左转专用车道的延误较大,随着到达率的增大设置直左共用车道的延误逐渐接近甚至超过设置左转专用车道的延误;直左共用车道适用于较小交通需求,左转专用车道适用于较大交通需求;当到达率不大于 $0.12 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$,或到达率为 $0.12 \sim 0.18 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$ 、左转车辆比例不大于0.2时,建议设置直左共用车道;当到达率不小于 $0.18 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$,或到达率为 $0.12 \sim 0.18 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$ 、左转车辆比例大于0.2时,建议设置左转专用车道。

关键词:交通控制;交叉口;左转车道;直左车道;延误

中图分类号:U491.223

文献标志码:A

Delay comparison between through-left lane and left turn lane for at-grade intersection with permitted left turn control

SHAO Hai-peng^{1,2}, LU Ji-na¹, DONG Hai-qian^{1,3}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Highway Engineering of Ministry of Education, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 3. Xi'an City Planning and Design Institute, Xi'an 710082, Shaanxi, China)

Abstract: In order to compare the delays of exclusive left turn lane and through-left shared lane in permitted left turn phase, the operation laws of traffic flow under two left turn traffic organization modes were analyzed. Based on the gap acceptance theory, the arrival rate and the left turn vehicle percentage were taken as variables to build the delay models for two left turn traffic organization modes with Poisson arrival condition respectively. The geometric design and signal control data of a intersection in Xi'an were taken as example to analyze the delays. Calculation result shows that total delays increase with the increase of arrival rate and left turn vehicle percentage. When arrival rate is smaller, the delay with exclusive left turn lane is larger. The delay with through-left shared lane gradually approaches or even overtakes the delay with exclusive left turn lane with the increase of arrival rate. Through-left shared lane is suitable for smaller traffic demand, and exclusive left turn lane is suitable for larger traffic demand. When arrival rate is no more than $0.12 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$, or arrival rate is $0.12 \sim 0.18 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$ and left turn

收稿日期:2016-01-11

基金项目:国家自然科学基金项目(50808021,51208054);长沙理工大学公路工程教育部重点实验室开放基金项目(kfj140203);同济大学道路与交通工程教育部重点实验室开放课题(K201208)

作者简介:邵海鹏(1978-),男,江苏沛县人,长安大学副教授,工学博士,从事交通系统设计与管理研究。

vehicle percentage is no more than 0.2, through-left shared lane layout is recommended. When arrival rate is no less than $0.18 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$, or arrival rate is $0.12\text{--}0.18 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$ and left turn vehicle percentage is more than 0.2, exclusive left turn lane layout is recommended. 2 tabs, 9 figs, 33 refs.

Key words: traffic control; intersection; left turn lane; through-left lane; delay

Author resume: SHAO Hai-peng (1978-), male, associate professor, PhD, +86-29-82334886, shaohp@chd.edu.cn.

0 引言

对于实施两相位控制的普通十字交叉口,每个进口道的左转交通流都会与对向直行车流产生冲突,因此左转交通流的处理是交叉口设计和控制中需要重点考虑的因素之一。人们常采用设置左转相位的方法把冲突点在时间上分开,然而左转相位的设置会增加相位切换时间和绿灯损失时间,因而会影响交叉口的通行效率。在整体交通量较低时,采用两相位信号,左转车辆在许可相位通过是较为普遍的做法。当左转流量较小时,设置专用左转车道可能会造成不必要的浪费,但左转流量较大时,直左共用车道会引起直行和左转车辆相互影响,带来额外的延误。

《道路通行能力手册》主要从左转交通量、对向交通量和安全性三个方面来考虑左转车道的设置。Agent 等通过逐渐增加左转交通量的方式,根据设置左转相位前后延误的变化,找到设置左转相位的临界流量^[1-2];王京元等针对无信号交叉口和信号交叉口提出左转车道设置的阈值^[3-4];李丽丽对信号交叉口左转车道设置的临界问题进行了研究^[5];Shebeeb选择车均延误作为设置左转相位的指标^[6];Roy 等则在3种左转控制条件下保持周期时长和相位差不变,基于现场实测流量和延误,建立了流量与延误的关系模型^[7];Lee 等通过软件模拟了前置型左转相位与后置型左转相位的运行方式,并得到了两种方式下的左转车辆延误数据^[8];Lin 等提出仅通过交通量来决定设置左转相位并不科学,因为还有许多其他因素影响左转交通流特性^[9];林培群等比较了直接左转与右转-掉头2种左转方式,发现交叉口整体延误特征与左转比例相关^[10];赖元文等发现基于排队增量累计方法的延误模型在有左转许可相位的交叉口应用中比 Webster 模型更符合实际^[11];马国胜等用车头视距分布对两相位交叉口左转与直行车流冲突延误模型进行了研究^[12];郑长江等建立了直行优先两相位交叉口左转车辆在冲突点

处的延误模型^[13];孙锋对信号控制交叉口左转专用相位设置依据进行了研究,将左转、直行车流的延误分成停车线前和冲突点处两部分来计算^[14]。

目前,普遍接受的左转相位设置规则是由美国交通工程师学会提出的方法制定的,规则给出了设置条件和是否设置保护/许可相位的临界条件^[15-16]。左转车辆利用直行车辆可穿越空当实现左转与每个周期内出现可穿越车头时距的长短、次数、左转车辆数以及它们的分布规律有关^[17],但仅凭可接受空当理论难以准确描述左转交通流特性。能否设置左转专用车道还在一定程度上取决于进口道有无足够的蓄车长度。Yang 等基于泊松到达的假设,提出信号交叉口合理的左转长度设计方法^[18];王京元等从满足左转排队需求的角度分别建立了保护相位和许可相位下左转车道存储段长度模型^[19-20];Oppenlander 等则通过蒙特卡罗模拟的方法研究在没有左转专用相位情况下左转车道的存储段长度^[21]。

还有一部分研究从左转交通的通行能力、交通流特性方面展开。成卫等应用统计回归分析方法研究了共用左转车道的通行能力^[22];李淑庆等应用仿真方法研究了左转车道的通行能力^[23];成卫等利用多变量回归技术结合实测数据建立了模型,以确定保护相位和许可相位转换的阈值^[24];秦雅琴等则从设施设计的角度,利用仿真分析的方法提出左转专用车道设置的依据^[25];李硕等利用仿真方法研究了左转车辆与交叉口延误的关系^[26];杨晓光利用空当理论研究了左转车辆与交叉口延误的关系^[27];袁以武等利用排队论研究了左转车辆与交叉口延误的关系^[28];Xu 等给出了直左共用车道在许可相位下的通行能力计算方法^[29];Lin 研究了直左共用车道饱和流率和通行能力,指出对向车道数量、对向车流的流率、左转车辆比例等是主要影响因素^[30];Zhou 等则考虑允许直行车辆在左转保护相位下在左转车道排队,发现在不影响左转车辆效率的情况下显著提高了直行车辆的通行效率^[31];Chen 等比较了《道路通行能力手册》(2000年)与日本土木工程学会关于

饱和流率的取值,指出两者均高估了共用车道的运行状况,且当共用车道许可左转时,左转车流将与行人发生冲突^[32-33]。

综上所述,目前,国内外关于设置左转车道条件的研究已有一些,但针对中国部分城市老城区道路空间先天不足的情况以及一些小城市次要道路状况,设置左转专用车道的流量、左转比例等条件尚缺乏系统的研究,因此,本文在左转许可条件下分别对设置直左共用车道和设置左转专用车道两种情况下的进口道延误进行建模,在给定的交叉口基础条件下,研究延误与流量、左转车辆比例的关系,并对两种设置方式下的延误进行对比分析,为左转专用车道设置决策提供理论支持。

1 信号交叉口左转交通运行特征

信号交叉口左转车流组织主要有以下几种情况:有左转专用车道与左转专用相位;无左转专用车道与左转专用相位;有左转专用车道与无左转专用相位。一般来说,设置了左转专用相位的交叉口,必须设置左转专用车道。

在延误分析中,以中国城市道路中部分次干路上有代表性的断面形式为基础建立模型:路段有 2 个车道;进口道有 3 个车道,右侧为右转车道,中间为直行车道,左侧为左转专用或直左共用车道,在交叉口进口道的交通流组成中,左转车辆和右转车辆的比例分别为 k_1 、 k_2 , $0 \leq k_1 < 1$, $0 \leq k_2 < 1$ 。中国的道路交叉口多数情况下右转交通都不严格受控,左转车道设置与否对其通行能力没有直接影响,在不影响研究目标的前提下,不考虑右转车辆的延误,仅考虑直行和左转车辆的延误。

设置直左共用车道的交叉口运行方式见图 1。在通行过程中,左转车辆与对向直行车辆相互冲突,左转车辆须等待对向直行车流的可接受穿越空当通过交叉口;左转车辆对紧跟其后的直行车辆产生影响。显而易见,左转车辆所占比例越大,直行车辆受到的影响就越大。

设置左转专用车道的交叉口运行方式见图 2。

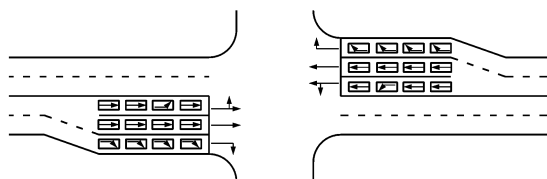


图 1 设置直左共用车道的交叉口

Fig. 1 Intersection with through-left shared lane

左转车辆在空间上与直行车辆分离,在两相位控制条件下,左转车辆仍需等待对向直行车流的可接受穿越空当,但同向的直行车辆和左转车辆互不影响。

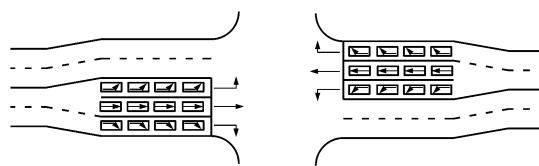


图 2 设置左转专用车道的交叉口

Fig. 2 Intersection with exclusive left turn lane

车辆到达交叉口时,通常有以下 2 种运行情况:车辆到达队尾时,车速由正常速度逐渐下降,在完全停止时,前方车辆疏散完毕,此时重新加速,到达另一个稳定的速度;车辆减速至完全停止,绿灯启亮后启动加速,恢复到另一个稳定的速度。但不论哪种方式,都存在先减速后加速的过程,因此,在计算交叉口进口道延误时,对不同功能的车道分别计算,然后再将各车道的延误相加。

2 设置直左共用车道的交叉口延误

根据图 1,由于进口道左侧 2 个车道均允许直行,因此,这 2 个车道排队长度相等,队尾到达的直行车辆以相同的概率选择 2 个队尾,则有

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{2\lambda(1-k_2)}{2} = \lambda(1-k_2) \quad (1)$$

式中: λ 为车道到达率; λ_1 为直左共用车道队尾的到达率; λ_2 为直行车道队尾的到达率。

2.1 直行车道的延误

信号交叉口的延误主要取决于车辆的到达率和交叉口的通行能力。设初始时刻无排队,在稳态到达的情况下,直行车道上车辆的到达和离去曲线见图 3, q 为车辆消散离去的饱和流率, R 为红灯时间。根据稳态延误模型,直行车道的延误 D_1 为

$$D_1 = \frac{\lambda_2 q R^2}{2(q - \lambda_2)} \quad (2)$$

2.2 直左共用车道的延误

直行和左转车辆共用车道时,绿灯启亮后,直行方向路权优先,左转车辆通过交叉口时要等待对向直行车流中出现可接受穿越空当通过交叉口。直左共用车道上车辆的到达和离去曲线见图 4, t_1 为对向直行车辆消散时间。同时,直左共用车道上的左转车辆在等待空当时,会影响其后的直行车辆通行,因此,直行车辆的延误包括:本相位禁止通行的时间,包括红灯及其他损失时间;绿灯启亮后对向直行排队车辆消散时间,对向直行车辆以饱和车头时距

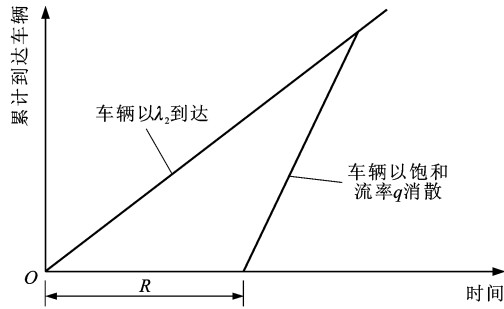


图3 直行车道的车辆累计曲线

Fig. 3 Vehicle cumulative curve of through lane

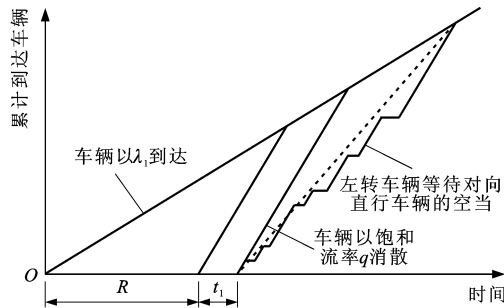


图4 直左共用车道的车辆累计曲线

Fig. 4 Vehicle cumulative curve of through-left shared lane

驶离停车线,在排队消散之前不可能出现可穿越空当,本向左转车辆无法左转;对向直行排队车辆消散后左转弯车辆等待可接受穿越空当的时间。在建模时将延误分成2部分计算:对向直行车辆排队消散前的延误;对向直行车辆消散后的延误。计算中假设双向交通特性均衡,队尾车辆泊松到达,交叉口的信号控制对称。

对向直行车辆在红灯期间到达的车辆在交叉口排队,绿灯启亮后,对向直行车流以饱和流率疏散,不会产生可穿越空当,左转弯车辆无法通行,此时

$$t_1 = \lambda_2 (T - t_2) / (q - \lambda_2) \quad (3)$$

式中: T 为信号周期; t_2 为有效绿灯时间。

为了简化模型,认为排队中的左转弯车辆均匀分布于左转弯车道中。在直左共用车道上,左转弯车辆交通量占进口道总交通量比例为 k_1 ,直行车辆占比为 $(1-k_2)/2-k_1$,因此,平均每辆左转弯车辆与其后的 $(1-k_2)/2k_1-1$ 辆直行车辆组成一个车组,即每个车组包含 $(1-k_2)/2k_1$ 辆车。将一个车组作为一个整体单元,则车组的到达率 λ_3 为

$$\lambda_3 = \frac{2\lambda_1 k_1}{1-k_2} \quad (4)$$

令 ω 为左转弯车辆等待对向直行车流空当的平均等待时间,在泊松到达的情况下有^[27]

$$\omega = \frac{(1-e^{-\lambda_2 \tau}) \left\{ 1 - \exp[-\lambda_0 e^{-\lambda_2 \tau} T (\lambda_0 e^{-\lambda_2 \tau} T + 1)] \right\}}{\lambda_0 e^{-\lambda_2 \tau}} \quad (5)$$

$$T = t_2 + \frac{Y+r}{2} - t_3 - t_1$$

$$\lambda_0 = \lambda_2 \frac{1 - e^{-\lambda_2 \tau}}{1 - e^{-\lambda_2 \tau} (1 + \lambda_2 \tau)}$$

式中: Y 为对向直行车辆占用的黄灯时间; r 为全红时间; t_3 为启动损失时间; τ 为最小可接受空当。

当一个车组的头车(左转弯车)完成穿越空当,其随后的直行车辆也就跟随通过交叉口。根据稳态延误公式有

$$D_2 = \frac{\lambda_3 q_0 (R + t_1)^2 (1 - k_2)}{4(q_0 - \lambda_3)k_1} \quad (6)$$

$$q_0 = \frac{1}{\omega + [(1 - k_2)/2k_1 - 1]h}$$

式中: D_2 为直左共用车道的延误; q_0 为以车组为基本单元组成的车流离去率; h 为直行车辆的饱和车头时距。

3 设置左转专用车道的交叉口延误分析

根据图2,在车行道的最左侧设置左转专用车道,将左转弯车辆从直左共用车流中分离出来,消除了左转弯车辆等待转向时对后面直行车辆的影响。与设置直左共用车道时的延误计算不同的是,左转弯车辆和直行车辆的延误可分别单独计算。左转专用车道的车辆累计曲线见图5,设置左转专用车道的车辆累计曲线形式和设置直左共用车道相似,但左转专用车道中不存在本向左转车辆与直行车辆的相互干扰,所以直行车道的队尾到达率 λ_2 为 $2\lambda(1-k_1-k_2)$,左转弯车道的队尾到达率 λ_4 为 $2\lambda k_1$ 。

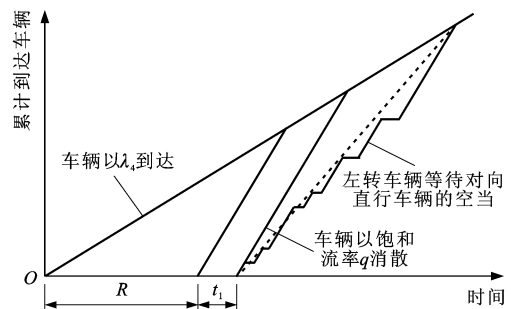


图5 左转专用车道的车辆累计曲线

Fig. 5 Vehicle cumulative curve of exclusive left turn lane

3.1 直行车道的延误

直行车道延误与设置直左共用车道时的直行车道延误计算见式(2)。

3.2 左转专用车道的延误

车流的离去率为 $q_1 = 1/\omega$,也可以理解为左转弯车道在许可相位中等待空当通过交叉口的当量离去率。可得

$$D_3 = \frac{\lambda_4 q_1 (R + t_1)^2}{2(q_1 - \lambda_4)} \quad (7)$$

式中: D_3 为左转专用车道的延误。

4 实例分析

本文以西安市某交叉口进口道为例进行延误计算,进口道的红灯时长为 50 s,黄灯时长为 3 s,绿灯时长为 70 s。假设路段上的车辆以泊松分布到达,在进口道停车排队。各参数的取值为: $h=2$ s, $q=0.5$ pcu · s⁻¹, $\tau=7$ s, $t_3=1.5$ s。

4.1 方案设计

经过试算,当 λ 达到 0.21 pcu · s⁻¹ 以上时,延误急剧增加,并出现异常值,异常值是到达率较大引起排队无法完全消散而产生的,超出了本算例的合理范围,因此,本文设定 $\lambda \leq 0.21$ pcu · s⁻¹,计算间隔为 0.03 pcu · s⁻¹;理论上 $0 \leq k_1 < 1$,但根据实际观察,在不设左转相位的交叉口中,左转车辆比例一般不超过 0.4,因此,取 $0 \leq k_1 \leq 0.4$,计算间隔为 0.1; $k_2=0.1$ 。

4.2 结果分析

有无左转专用车道的延误随到达率变化的对比见图 6~9,可知:总体来讲,总延误随着路段到达率的增大而增大,也随着左转车辆比例的增大而增大;低流量时设置左转专用车道的延误大于设置直左共用车道的延误,这是由于在较低的流量下,左转车辆等待可穿越空当带来的延误不大,同时左转专用车道会造成一定的通行时空资源的浪费,带来延误,此时直行车辆的延误占较大比例;随着路段到达率的增大,直左共用车道上左转与直行车辆的互相影响逐渐严重,造成这部分延误急剧增加。

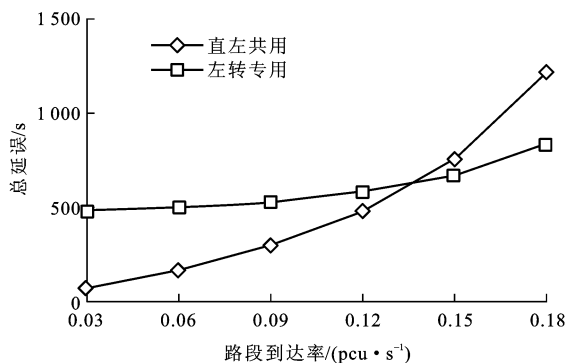


图 6 $k_1=0.1$ 时的总延误

Fig. 6 Total delays when k_1 is 0.1

表 1 为 2 种左转交通组织方式总延误的差值,为设置左转专用车道的总延误减去设置直左共用车道时的总延误。

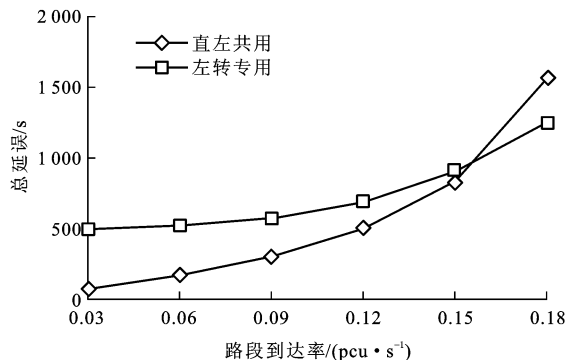


图 7 $k_1=0.2$ 时的总延误

Fig. 7 Total delays when k_1 is 0.2

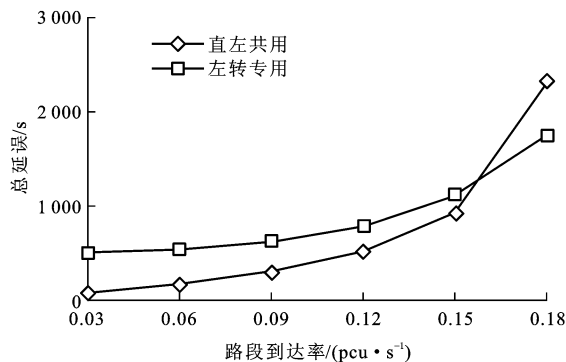


图 8 $k_1=0.3$ 时的总延误

Fig. 8 Total delays when k_1 is 0.3

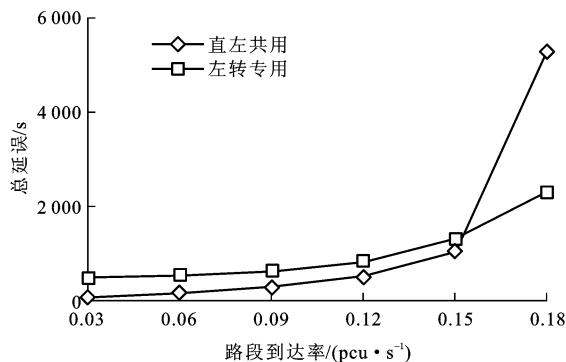


图 9 $k_1=0.4$ 时的总延误

Fig. 9 Total delays when k_1 is 0.4

表 1 两种方式下总延误的差值

Tab. 1 Differences of total delays between two modes

| 到达率/ (pcu · s ⁻¹) | 差值/s | | | |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | $k_1=0.1$ | $k_1=0.2$ | $k_1=0.3$ | $k_1=0.4$ |
| 0.03 | 409 | 418 | 427 | 436 |
| 0.06 | 327 | 351 | 373 | 391 |
| 0.09 | 225 | 273 | 313 | 343 |
| 0.12 | 99 | 191 | 263 | 300 |
| 0.15 | -85 | 79 | 179 | 258 |
| 0.18 | -384 | -316 | -570 | -2 982 |
| 0.21 | -1 112 | -1 080 | — | — |

由表1可知:随着交通需求增大,2种设计方式下的延误差异逐渐变小,以图6为例,在 $k_1=0.1$ 且 $\lambda>0.14 \text{ pcu} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,设置直左共用车道的延误超过了设置左转专用车道的延误,在图7~9中也表现出这种趋势,这说明不论左转车辆比例为多少,在交通需求总量增加时,左转专用车道会在降低延误方面逐渐表现出优势;当路段到达率不变时,随着左转车辆比例的增加,延误的绝对值增加,同时设置左转专用车道与设置直左共用车道时的延误差也在增加,但增加幅度不大;同时,左转车辆在直左共用车道上逐渐变为主要部分,尽管直行车辆可以到直左共用车道排队等待,但实际情况中车道中各转向的分布情况已与设置了左转专用车道的情况很接近。

通过对图6~9的曲线趋势分析可知:随着到达率的增加,延误增速提高,而且左转车辆比例越大这种趋势越明显,说明在对向直行车辆连续通行时产生可接受空当的概率下降,左转车辆等待空当造成的延误急剧增大并成为延误的主要部分,实际情况中很可能产生二次排队甚至道路的阻塞。表1中无数据的情况即是由于在设定的信号配时条件下,在相应的路段到达率和左转比例下交通状况达到了饱和,此时的总延误实际上已经接近或达到了应设置左转专用相位的阈值,即便设置了左转专用车道,左转许可相位已经不能满足左转交通的需求。这也从另一个角度证明,当左转交通流量达到一定值时,需要对信号控制措施进行调整,设置左转专用相位。

4.3 左转车道设置建议

根据以上分析,以延误最小为目标,路段双车道、交叉口进口道三车道条件下左转车道设置建议见表2。

表2 左转车道设置建议

Tab. 2 Recommendations of left turn lane layout

| 到达率/($\text{pcu} \cdot \text{s}^{-1}$) | 左转车辆比例 | 设置建议 |
|--|----------------|--------|
| ≤ 0.12 | — | 直左共用车道 |
| $0.12 \sim 0.18$ | $0 \sim 0.2$ | |
| | $0.2 \sim 1.0$ | 左转专用车道 |
| ≥ 0.18 | — | |

5 结 语

(1)根据对设置直左共用车道和设置左转专用车道的交叉口运行情况的分析,考虑直行车辆和左转车辆的互相影响,建立延误模型,在不同到达率和左转车辆比例情况下,比较了2种左转交通组织方式下的延误。

(2)不同左转交通组织方式下延误随交通需求和左转车辆比例增长的变化规律,可用于决策交叉口是否应设置左转专用车道。在具体应用时,为得出某个特定交叉口设置左转车道的阈值,还要考虑信号相位设计、周期、交叉口几何设计条件等因素。

(3)延误计算结果和路段车道数、交叉口车道数及其功能划分有直接的关系,本文提出的延误计算公式和所得结果适用于路段双车道、进口道三车道的情况,将公式中关于车道的系数改为参数的形式加以推广后可适用于路段三车道以上及交叉口进口道四车道以上的情况。

(4)本文的研究范围只涉及机动车,并未涉及到非机动车以及行人过街对车流的影响,另外未将信号周期、绿信比、车道数等作为变量考虑,后续将对这些因素进行研究。

参考文献:

References:

- [1] AGENT K R, DEEN R C. Warrants for left-turn signal phasing[R]. Frankfort: Department of Transportation, Commonwealth of Kentucky, 1978.
- [2] AGENT K R. An evaluation of permissive left-turn phasing[J]. ITE Journal, 1981, 51(12): 16-20.
- [3] 王京元, 庄 焰. 信号交叉口左转车道设置研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2007, 24(1): 41-46.
WANG Jing-yuan, ZHUANG Yan. Study on left-turn lane guidelines for signalized intersections[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2007, 24(1): 41-46. (in Chinese)
- [4] 王京元, 庄 焰. 无信号交叉口左转车道设置准则研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2007, 24(2): 188-193.
WANG Jing-yuan, ZHUANG Yan. Study on left-turn lane warrants for unsignalized intersections[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2007, 24(2): 188-193. (in Chinese)
- [5] 李丽丽. 信号交叉口左转交通组织中的临界问题研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
LI Li-li. Research on the critical questions of left-turn traffic organization at signalized intersections[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [6] SHEBEEB O. Safety and efficiency for exclusive left-turn lanes at signalized intersections[J]. ITE Journal, 1995, 65(7): 52-59.
- [7] ROY C, LINDBERG M. A study of left turn operations at signalized intersections[C]// ITE. Proceedings of ITE 2004 Annual Meeting and Exhibit. Washington DC: ITE, 2004: 1-17.
- [8] LEE J C, WORTMAN R H, HOOK D J P, et al. Operational comparison of leading and lagging left turns[J]. Transportation Research Record, 1993(1421): 1-10.

- [9] LIN H J, MACHEMEHL R B. Developmental study of implementation guidelines for left-turn treatments[J]. Transportation Research Record, 1983(905): 96-105.
- [10] 林培群, 顾玉牧, 卓福庆, 等. 交叉口左转交通流两种组织方式的延误计算模型[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2015, 43(12): 119-126.
- LIN Pei-qun, GU Yu-mu, ZHUO Fu-qing, et al. Delay models for two kinds of left-turn traffic flow organizations at intersection[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2015, 43(12): 119-126. (in Chinese)
- [11] 赖元文, 荣建, 刘小明. 基于 IQA 方法的信号交叉口左转延误计算[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2012, 36(2): 274-277, 282.
- LAI Yuan-wen, RONG Jian, LIU Xiao-ming. Left-turn delay computation at signalized intersection based on incremental queue accumulation[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2012, 36(2): 274-277, 282. (in Chinese)
- [12] 马国胜, 马万经. 两相位交叉口左转交通流冲突延误改进模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(10): 75-78.
- MA Guo-sheng, MA Wan-jing. Improved left-turn conflict delay model at two-phase intersection[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(10): 75-78. (in Chinese)
- [13] 郑长江, 徐瀚, 陈田星. 直行优先情况下左转车辆冲突延误模型研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2014, 33(3): 108-110.
- ZHENG Chang-jiang, XU Han, CHEN Tian-xing. Conflict delay model for left turning car in the case of straight priority[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2014, 33(3): 108-110. (in Chinese)
- [14] 孙锋. 信号控制交叉口左转专用相位设置依据研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- SUN Feng. Study on principles of operation on protected left-turn phase at signalized intersection[D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- [15] KOUPAI P A, KOTHARIA M. Recommended guidelines for protected/permissive left-turn phasing[C]//ITE. Transportation Frontiers for the Next Millennium: 69th Annual Meeting of the Institute of Transportation Engineers. Washington DC: ITE, 1999: 1-7.
- [16] COTTRELL B H. Guidelines for protected/permissive left-turn signal phasing[J]. Transportation Research Record, 1986(1069): 54-61.
- [17] SAYED T, ZEIN S. Traffic conflict standards for intersections[J]. Transportation Planning and Technology, 1999, 22(4): 309-323.
- [18] YANG Ji-dong, ZHOU Hua-guo. Integrating left-turn lane geometric design with signal timing[J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137(11): 767-774.
- [19] 王京元, 王炜. 保护相位下左转车道存储段长度计算[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(4): 852-859.
- WANG Jing-yuan, WANG Wei. Calculation of storage lengths for left-turn lanes with protected phases[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(4): 852-859. (in Chinese)
- [20] 王京元, 王炜. 许可相位下左转车道存储段长度计算[J]. 土木工程学报, 2011, 44(9): 114-123.
- WANG Jing-yuan, WANG Wei. Calculation of storage lengths for left-turn lanes with permitted phases[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(9): 114-123. (in Chinese)
- [21] OPPENLANDER J C, OPPENLANDER J E. Simulation of left-turn storage lengths without separate signal phase[J]. ITE Journal, 2002, 72(5): 34-38.
- [22] 成卫, 李江, 孙绍云. 共用左转车道通行能力比较分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2004, 34(2): 294-297.
- CHENG Wei, LI Jiang, SUN Shao-yun. Comparative analysis on capacity of shared through and left turn lanes[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2004, 34(2): 294-297. (in Chinese)
- [23] 李淑庆, 谢晓忠, 邹贵冬. 城市道路两相位交叉口左转车道通行能力研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(5): 745-749.
- LI Shu-qing, XIE Xiao-zhong, WU Gui-dong. Capacity analysis on left-turn lane at two-phase intersection of urban road[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2010, 29(5): 745-749. (in Chinese)
- [24] 成卫, 张瑾, 姜华平. 信号交叉口左转保护—许可相位转换阈值研究[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2003, 28(6): 107-109, 116.
- CHENG Wei, ZHANG Jin, JIANG Hua-ping. A study of developing transitional threshold from permissive to protected left-turn phase at signalized intersection[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Science and Technology, 2003, 28(6): 107-109, 116. (in Chinese)
- [25] 秦雅琴, 熊坚, 李海琼. 公路平交口左转专用道设置阈值的仿真研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2011, 35(3): 575-578.
- QIN Ya-qin, XIONG Jian, LI Hai-qiong. Simulation study on the threshold value of the left-turn lane for highway intersection[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Technology, 2011, 35(3): 575-578. (in Chinese)
- [26] 李硕, 高岩, 张建龙, 等. 基于 VISSIM 仿真的内侧左转车辆流延误分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(4): 49-56.
- LI Shuo, GAO Yan, ZHANG Jian-long, et al. Delay analysis on inside left-turning flow based on VISSIM simulation[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012, 12(4): 49-56. (in Chinese)
- [27] 杨晓光. 直行优先信号控制交叉口左转交通流延误模型[J]. 同济大学学报, 1998, 26(3): 284-289.
- YANG Xiao-guang. Traffic delay model of left-turn flow on signalized intersection with straight-going priority[J]. Journal

(in Chinese)

- [19] 宋晓静. 基于 Hough 变换目标检测问题研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
SONG Xiao-jing. Object detection based on Hough transform[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014. (in Chinese)
- [20] KAINIELI A, MEISELS A, FISHER L, et al. Automatic extraction and evaluation of geological linear features from digital remote sensing data using a Hough transform[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, 62(5): 525-531.
- [21] PALMER P L, KITTLER J, PETROU M. An optimizing line finder using a Hough transform algorithm[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1997, 67(1): 1-23.
- [22] WAN E A, VAN DER MENVE R. The unscented Kalman filter for nonlinear estimation[C]//IEEE. IEEE Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium. New York: IEEE, 2000: 153-158.
- [23] EVENSEN G. The ensemble Kalman filter; theoretical formulation and practical implementation[J]. Ocean Dynamics, 2003, 53(4): 343-367.
- [24] FRANKE U, LOOSE H, KNÖPPEL C. Lane recognition on country roads[C]//IEEE. Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. New York: IEEE, 2007: 99-104.
- [25] WATANABE A, NAITO T, NINOMIYA Y. Lane detection with roadside structure using on-board monocular camera[C]//IEEE. Proceedings of the 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. New York: IEEE, 2009: 191-196.
- [26] 夏楠, 邱天爽, 李景春, 等. 一种卡尔曼滤波与粒子滤波相结合的非线性滤波算法[J]. 电子学报, 2013, 41(1): 148-152.
XIA Nan, QIU Tian-shuang, LI Jing-chun, et al. A nonlinear filtering algorithm combining the Kalman filter and the particle filter[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(1): 148-152. (in Chinese)
- [27] 李从宇, 王宝光. 嵌入式 DSP 系统 C 语言硬件编程技术[J]. 测控技术, 2007, 26(4): 68-70.
LI Cong-yu, WANG Bao-guang. Techniques of C language hardware programming in embedded DSP system[J]. Measurement and Control Technology, 2007, 26(4): 68-70. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第 148 页)
- of Tongji University, 1998, 26(3): 284-289. (in Chinese)
- [28] 袁以武, 董力耘, 戴世强. 交叉口左转专用信号灯对车辆延误的影响[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(4): 80-85.
YUAN Yi-wu, DONG Li-yun, DAI Shi-qiang. Effect of left-turning traffic signal lights on vehicle motion delay at intersection[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(4): 80-85. (in Chinese)
- [29] XU Jian, YANG Xiao-guang, LAO Yun-teng. Study on the capacity of left-through shared lane with permitted left-turn phasing[C]//IEEE. Proceedings of 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. New York: IEEE, 2008: 498-503.
- [30] LIN F B. Saturation flow and capacity of shared permissive left-turn lane[J]. Journal of Transportation Engineering, 1992, 118(5): 611-630.
- [31] ZHOU Ya-ping, ZHUANG Hong-bin. Traffic performance in signalized intersection with shared lane and left-turn waiting area established[J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(7): 852-862.
- [32] CHEN Peng, NAKAMURA H, ASANO M. Saturation flow rate analysis for shared left-turn lane at signalized intersections in Japan[J]. Procedia—Social and Behavioral Sciences, 2011, 16: 548-559.
- [33] CHEN Peng, NAKAMURA H, ASANO M. Lane utilization analysis of shared left turn lane based on saturation flow rate modeling[J]. Procedia—Social and Behavioral Sciences, 2012, 43: 178-191.