

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022071924021980

文章编号: 1674-599X(2024)01-0107-09

引用格式: 张生, 滕康明, 苏伟鹏. 信控交叉口借道左转设计的延误优化研究[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(1): 107-115.

Citation: ZHANG Sheng, TENG Kangming, SU Weipeng. Delay optimization of the contraflow left-turn lane design at signalized intersection[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2024, 40(1): 107-115.

# 信控交叉口借道左转设计的延误优化研究

张生, 滕康明, 苏伟鹏

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 为准确分析交叉口借道左转设计的左转延误, 针对现有的延误模型的不足, 建立一个合适的延误优化模型, 并提升其设置的科学性。先对逆向车道长度进行优化; 再通过分析左转车辆的累计到达驶离曲线, 以左转总延误最小为优化目标, 建立一种新的考虑预信号延误的优化模型; 最后, 以长沙市芙蓉中路一个交叉口为实例, 进行验证, 分析左转到达流率对借道左转设计延误的影响及逆向车道长度对左转车均延误的影响。研究结果表明: 左转流率越大, 越能充分发挥借道左转设计的优势, 该模型的左转延误下降可达59.21%; 当左转流量偏低时, 预信号位置的延误占比较大, 随着左转流量的增大, 传统车道和逆向车道的延误占比逐步增加。该研究可以准确评价借道左转设计的实用性和优劣程度, 对借道左转设计的推广与应用具有重要意义。

**关键词:** 借道左转设计; 累计到达驶离模型; 左转延误; 预信号; 逆向左转车道

中图分类号: U491.4

文献标志码: A

## Delay optimization of the contraflow left-turn lane design at signalized intersection

ZHANG Sheng, TENG Kangming, SU Weipeng

(School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology,  
Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to accurately analyze the left-turn delay of the borrowed left-turn design at intersections, a suitable delay optimization model is established to address the inadequacies of the existing delay models and to improve the scientificity of their settings. Firstly, the length of the reverse lane is optimized. Then, by analyzing the cumulative arrival/departure curves of the left-turning vehicles, a new optimization model considering the pre-signal delay is established with the objective of minimizing the total left-turning delay. Finally, a validation is carried out at an intersection on Furong Road in Changsha City, which analyzes the effect of the left-turn arrival rate on the delay of the borrowed-left-turn design as well as the effect of the length of the reverse lane on the delay of the left-turning vehicles. The results of the study show that: the larger the left-turn flow rate is, the more the advantage of the borrowed left-turn design can be fully utilized, and the left-turn delay can be reduced up to 59.21%; when the left-turn flow rate is low, the delay of the pre-signal position accounts for a larger proportion, and with the increase of the left-turn flow rate, the delays of the traditional and

收稿日期: 2022-07-19

基金项目: 长沙理工大学国际合作拓展项目(2019IC10); 湖南省交通科技进步与创新项目(202140)

作者简介: 张生(1980—), 男, 长沙理工大学副教授, 博士。E-mail: zs2001@126.com

reverse lanes account for a gradual increase in the delay proportion. This study can accurately evaluate the practicality and advantages of the borrowed left-turn design, which is of great significance for the further promotion and application of the borrowed left-turn design.

**Key words:** design of contraflow left-turn; cumulative arrival-departure model; total left turn delay; pre-signal; contraflow left-turn lane

在车流高峰期的交叉口,排队左转车辆常由于左转信号周期过短而产生二次排队行为。因此,在高峰期对左转车流进行优化组织是提升交叉口通行效率的重要手段<sup>[1]</sup>。在实际应用中,研究人员通常采取信号优化、非常规设计等措施来增加交叉口容量和降低延误。传统的信号优化方法适用于交叉口整体交通量较小的情况<sup>[2]</sup>;当交叉口容量达到饱和时,一些非常规交叉口设计的效果逐步凸显,如可变车道<sup>[2]</sup>、移位左转设计<sup>[3-4]</sup>、排阵式设计<sup>[5-7]</sup>、Hook—turn<sup>[8]</sup>、U—turn<sup>[9]</sup>等。在这些设计中,部分需要对车流进行重新整合,甚至改变左转位置,要求司机对路况的熟悉程度较高,其应用受限也较多。而借道左转设计(left turn lane, CLL)作为潮汐车道设计的一种变型,设置简单且较为灵活,对交叉口

整体运行过程影响较小,在中国众多城市的交叉口设计中得到了广泛应用<sup>[10]</sup>。

## 1 国内外研究现状

借道左转设计是一种充分利用逆向道路资源的设计。由于借道左转设计存在着巨大的发展潜力,因此国内外学者对该设计展开了深入研究。ZHAO等<sup>[11]</sup>在2013年首次对借道左转设计进行理论层面的研究。崔凯<sup>[12]</sup>分析了左转逆向可变车道设置的基本条件。在延误建模方面,目前主要存在4种类型的交叉口延误模型:固定排队模型、冲击波模型、稳态随机延误模型和时变随机延误模型。表1为国内外借道左转设计延误模型的研究现状。

表1 借道左转设计延误模型研究现状

Table 1 Research status of contraflow left-turn lane delay model

作者	年份	输入参数	对延误计算方法
WU等 <sup>[13]</sup>	2016	左转交通量、开口长度、预信号	建立到达驶离曲线模型;Vissim仿真验证
SU等 <sup>[14]</sup>	2016	绿灯时长	
陈松等 <sup>[15]</sup>	2018	周期时长、主预信号时长、逆向车道长度	陈松建立8种情形下的到达驶离曲线模型;王予瑞根据HCM2010建立车均延误计算模型;张泰文引入了左转车道释放流率系数以改进交叉口车均延误计算公式。这些研究都将传统左转车道视为一个整体,对预信号停车的延误估计不足。
王予瑞等 <sup>[16]</sup>	2021		
张泰文等 <sup>[17]</sup>	2020		
CHEN等 <sup>[18]</sup>	2019	逆向车道长度、预信号绿灯时长、车辆类型	建立左转车辆CA模型;得到左转交通量固定时,不同逆向车道长度对车均延误影响。
LIU等 <sup>[19]</sup>	2020	主预信号配时、逆向车道长度	开发细胞传输模型;优化主预信号的信号配时以及逆流车道的长度。
GUO等 <sup>[20]</sup>	2021	逆向车道长度、主预信号配时	建立冲击波模型;根据逆向车道利用率最大化原则估算逆向车道长度,再通过仿真以验证。
CHEN等 <sup>[21]</sup>	2021	预信号绿灯时长、平均速度	将孤立交叉路口的借道左转设计和优化方法扩展到主干道上的一组交叉口,以控制整体延误。

由表1可知,在借道左转设计延误模型的研究方面,研究人员已经取得较多的学术成果。在建模层面,陈松等<sup>[15,17]</sup>众多学者所采用的模型主要是固定排队模型。但他们在建模过程中没有区分预信号处、传统车道以及逆向车道这3个位置的延误变

化。借道左转设计实现了排队的跃迁,左转延误的减少主要来自逆向车道排队车辆,但预信号的设置将导致车辆产生二次排队行为。预信号处的左转延误大小是评价借道左转效率的一个重要指标。目前,涉及对预信号位置的左转延误分析的研究鲜

见。因此,本研究通过分析设置逆向车道的实际交叉口延误情况,建立合适的延误优化模型,以弥补借道左转设计预信号处延误研究的缺乏,准确评价借道左转设计的实用性和优劣程度,以期借道左转设计提供参考。

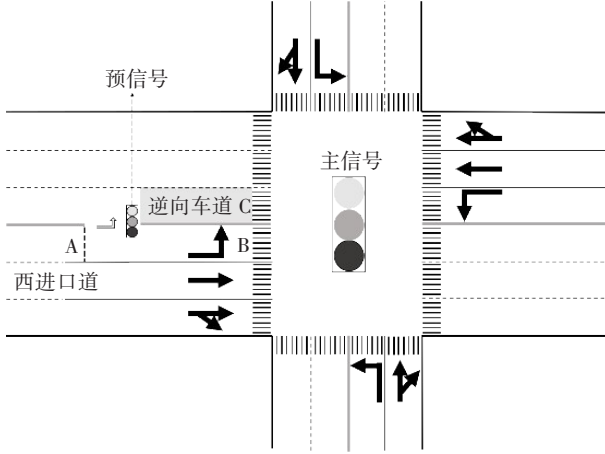


图1 信号交叉口借道左转设计布局

Fig. 1 Signalized intersection with CLL

信号交叉口借道左转设计布局如图1所示。本研究旨在建立一种考虑预信号位置延误的优化模型,以降低交叉口借道左转设计的延误并提升设置的科学性。先建立最优逆向车道长度计算模型;再通过累计到达驶离图分析左转相位中预信号位置A、传统车道B、逆向车道C位置的累计车辆变化,分别建立这三处位置的延误优化模型;最后,分析左转到达流率对借道左转设计延误与逆向车道长度对左转车均延误的影响。该模型为实际交叉口设置灵活的逆向车道长度提供了参考;为当左转交通流量更大时,可设置更多条逆向车道提供了理论依据。

## 2 模型的建立

### 2.1 假设条件

为有针对性地建立借道左转延误优化模型,忽略其他方向车流与行人二次过街等因素的干扰,作出以下假设:

- 1) 交叉口有专用左转车道和左转相位;
- 2) 左转交通量在高峰期达到过饱和。

### 2.2 目标模型

以逆向车道长度、左转到达量作为模型的输入

参数,以左转总延误最小化为目标函数,构建延误优化模型。

该模型的目标函数为

$$\min D = \sum_{j=1}^3 D_j \quad (1)$$

式中: $D$ 为借道左转设计左转总延误;

$D_j$ 为位置 $j$ 的左转延误。

### 2.3 约束条件

#### 2.3.1 借道左转设计流量条件

借道左转设计适用于左转交通流较大,左转车辆到达流率超过一个周期内的左转通行能力的交叉口,借道左转设计流量条件为

$$Q \geq \left( \frac{G_{m,2} - \frac{v}{2a}}{h_t} \right) N_L \quad (2)$$

式中: $Q$ 为一周期左转车辆到达车辆数;

$G_{m,i}$ 为主信号相位 $i$ 绿灯时长;

$a$ 为左转车辆加速度;

$v$ 为车辆通过交叉口速度;

$h_t$ 为示车头时距;

$N_L$ 表示左转车道数。

根据HCM 2010提供的一条常规车道通行能力计算式,可得到通行能力与有效绿灯时间的计算式:

$$Q_0 = 3600 \lambda_{\max} \times \frac{G_e}{C} \quad (3)$$

$$Q_1 = \frac{3600Q}{C} \quad (4)$$

式中: $Q_0$ 为左转车道通行能力;

$\lambda_{\max}$ 为左转车辆饱和离开流率;

$G_e$ 为有效绿灯时长;

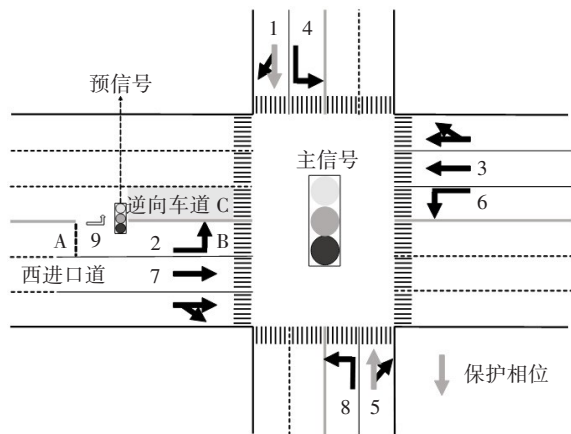
$C$ 为周期时长;

$Q_1$ 为一小时内左转到达流量。

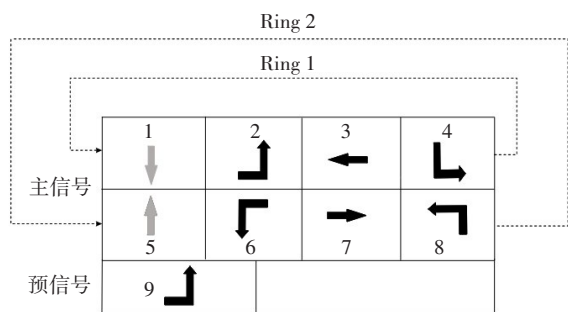
#### 2.3.2 主信号与预信号的配时控制

预信号的位置和主预信号的协调控制是影响借道左转设计通行能力和安全性的关键因素。借道左转设计交叉口的传统固定控制策略相位设计如图2所示。在图2中,以次干路直行相位即保护相位1/5为起始绿灯相位,预信号相位9相应为绿灯,左转车辆可以选择进入传统车道或逆向车道排队;在保护相位结束后,主信号左转相位2/6绿灯开启,位于传统车道和逆向车道的车流开始排放,为

确保位于逆向车道车辆的安全性,预信号在相位2/6绿灯结束时的 $T_0$ 时,变为红灯,时间 $T_0$ 称为早断时间;主信号下一相位为直行相位3/7;最后为次干道直行相位4/8,直至周期结束。



(a) 交叉口信号相位图



(b) 交叉口信号相序图

图2 借道左转设计信号控制

Fig. 2 Signal control with CLL design

为确保主预信号周期的一致性,作出约束:

$$C = G_{m,1} + G_{m,2} + G_{m,3} + G_{m,4} = G_p + R_p \quad (5)$$

式中: $G_p$ 为预信号绿灯时长;

$R_p$ 为预信号红灯时长。

在实际应用中,暂无对预信号的最短绿灯时间的规定。通常预信号的最短绿灯时间与行人过街时间、车辆清空、驾驶员等因素有关。早断时间 $T_0$ 需考虑交叉口大小和车头时距等因素。因此,早断时间 $T_0$ 和预信号最短绿灯时间应满足约束:

$$T_0 \geq \frac{L + L_{cll}}{v} \quad (6)$$

$$G_{min} \leq G_p \leq G_{m,1} + G_{m,2} - \frac{L + L_{cll}}{v} \quad (7)$$

式中: $L$ 为停车线至左转出口道停车线距离;

$L_{cll}$ 为逆向车道长度;

$G_{min}$ 为预信号的最短绿灯时长。

### 2.3.3 到达率与左转交通量条件

一个周期内到达率与左转交通量关系满足约束:

$$\lambda = \frac{Q}{C} \quad (8)$$

式中: $\lambda$ 为左转车辆到达流率。

### 2.4 相邻交叉口间距条件

交叉口在设置逆向车道后,交叉口间距可分为三部分,如图3所示。在图3中, $L_{cll}$ 为逆向车道长度; $L_2$ 为中央分隔带开口长度; $L_3$ 为预信号处左转车辆排队段。通过对这 $L_{cll}$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 这三部分长度进行约束,建立相应的长度关系式,确立在设置借道左转时相邻交叉口之间的最小间距。

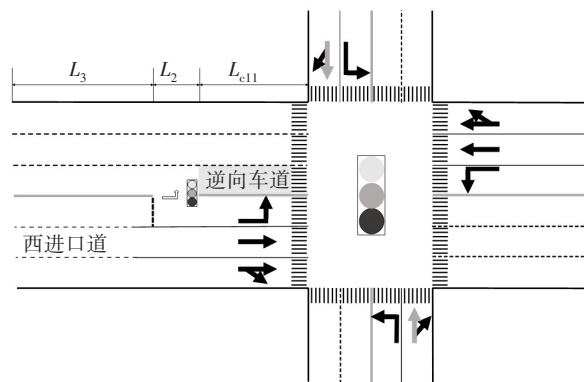


图3 交叉口间距条件图

Fig. 3 Condition graph of intersection

#### 2.4.1 逆向车道长度

逆向车道的长度直接影响左转车流的通行效率。若逆向车道过长,则主预信号难以协调一致,且非高峰时段的利用率过低;若逆向车道过短,则通行效率不足,无法提高逆向车道的利用率。因此,逆向车道长度是影响逆向车道效率的关键之一。

在交叉口高峰期,逆向车道长度与左转到达交通量、主信号左转绿灯时长、左转车道饱和排放流率均有关。 $L_{cll}$ 应满足约束:

$$T_n = \frac{L_{cll}}{v_i} \quad (9)$$

$$L_{cll} = qL_{car} + (q - 1)h_c \quad (10)$$



$$CQ_1 \leq 3600 \left[ 2q + \lambda_{\max} \left( G_{m2} - \frac{L + L_{\text{cll}}}{2v} - \frac{L_{\text{cll}}}{v_i} \right) \right] \quad (11)$$

式中:  $T_n$  为启动波传递到第  $n$  辆车的时长;

$v_i$  为车辆启动后,启动波传递波速;

$q$  为一条逆向车道所能容纳的车辆数;

$L_{\text{car}}$  为标准车辆长度;

$h_c$  为左转车辆排队车头间距。

#### 2.4.2 中央分隔带开口长度

在保证车辆行驶稳定性的基础上,一个合理的中央分隔带开口处长度是提升通行效率的关键因素之一。左转车辆进入逆向车道的合理行驶路线如图4所示。

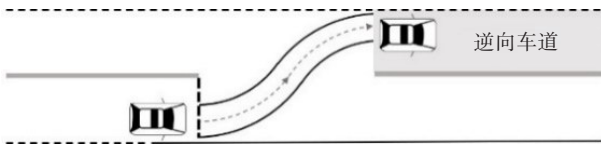


图4 左转车辆驶入逆向车道路线

Fig. 4 Left-turning vehicles into the reverse lane route

左转车辆驶入逆向车道轨迹如图5所示。在图5中,左转车辆沿着轨迹,从位置A以最小转弯半径  $R$  驶到B点,进行换道;随后从B点沿着轨迹以相等的  $R$  驶到C点,完成整个换道过程。中央分割带开口长度最小值  $L_{2\min}$  计算公式为

$$L_{2\min} = \sqrt{(2R - K)^2 - (2R - K_1 - K_2 - K_3)^2} \quad (12)$$

式中:  $K$  为车辆宽度;

$K_1$  为车道宽度;

$K_2$  为车道中分带宽度;

$K_3$  为逆向可变车道宽度。

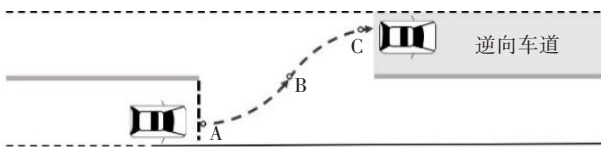


图5 左转车辆驶入逆向车道轨迹

Fig. 5 Left-turning vehicles into the reverse lane track

在现交叉口上设置逆向车道,中央分隔带开口长度通常只与车辆宽度  $K$ 、最小转弯半径  $R$  有关。小客车标准尺寸为  $6.0 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$ ;大客车标准尺寸为  $12.0 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ ,算例中大客车对小客车的当量换算系数为2;最小转弯半径  $R$  与车速  $v$  相关;强制停车处的

转向速度为  $5 \text{ km/h}$ ,对应的最小转弯半径为  $8.0 \text{ m}$ ;转向速度为  $20 \sim 30 \text{ km/h}$ ,对应的最小转弯半径为  $12.0 \text{ m}$ <sup>[22]</sup>。

综上所述,设置借道左转车道时,中央分隔带开口长度可根据所需设置交叉口的具体几何指标及车型等进行计算。根据对中国现有的借道左转交叉口设置方案,通常情况下,中央分隔带开口长度为  $10.0 \sim 20.0 \text{ m}$ 。

#### 2.4.3 预信号处左转车辆排队段

与传统左转交通组织方式不同,左转车辆在预信号位置可能会二次停车,因此,该部分路段长度应满足高峰时段的左转车辆排队需求,以避免左转车辆溢出到上游交叉口。 $L_3$  的长度与车头间距、左转车辆到达率等相关, $L_3$  应满足以下基本约束<sup>[15]</sup>:

$$L_3 \geq \max \left\{ \frac{3600 h_c \lambda_s (1 - C_{ps})}{n(N_s - 1)}, \frac{3600 h_c \lambda (1 - C_{pl})}{n(N_L - 1)} \right\} \quad (13)$$

式中:  $\lambda_s$  为直行车辆到达流率;

$\lambda$  为左转车辆到达率;

$C_{ps}$  为直行车道的有效绿信比;

$C_{pl}$  为左转车道的有效绿信比;

$N_s$  为直行车道数;

$N_L$  为左转车道数。

因此,相邻交叉口之间的间距可由逆向车道长度  $L_{\text{cll}}$ 、中央分隔带长度  $L_2$  以及预信号处车辆排队段  $L_3$  得到,其长度应大于这三部分长度之和,即:

$$L \geq L_{\text{cll}} + L_{2\min} + L_3 \quad (14)$$

### 2.5 延误模型

左转车辆通过借道左转设计交叉口的累计到达驶离曲线如图6所示。

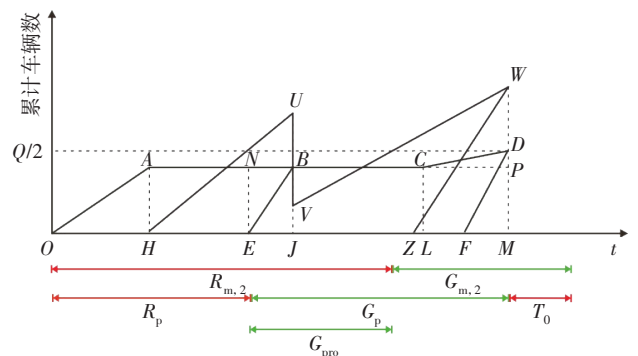


图6 CLL设计累计到达-驶离曲线

Fig. 6 Cumulative arrival-departure curve with CLL design

#### 2.5.1 传统车道延误

在图6中,折线  $OACDF$  表示位于传统车道车流

的到达驶离变化情况,以直行相位3/7绿灯为起始相位,线段 $OA$ 表示在直行相位3/7与左转相位4/8绿灯期间,左转车辆以固定到达率 $\lambda$ 进入传统左转车道。其中, $AH$ 表示传统车道和逆向车道能容纳的车辆数;当传统车道饱和,预信号处形成排队线段 $AC$ ;借道左转相位2/6绿灯,位于两条车道的车辆以饱和流率 $\lambda_{\max}$ 排放,预信号排队车辆可以选择传统车道或逆向车道进入交叉口,形成线段 $CD$ ;线段 $DF$ 表示借道左转相位2/6绿灯开启,左转车辆以饱和流率排放造成的延误。多边形 $OACDF$ 的面积则表示传统车道的总延误 $D_1$ 。

$$D_1 = S_{OACDF} = \frac{q^2}{2\lambda} + q\left(C - \frac{q}{\lambda}\right) + \frac{1}{2}(G_{m,2} - T_n)\left(\frac{Q}{2} - q\right) - \frac{Q^2}{8\lambda_{\max}} \quad (15)$$

### 2.5.2 逆向车道延误

在图6中,折线 $EBCDF$ 表示逆向车道车流的到达驶离变化情况。线段 $OE$ 表示预信号红灯,此时,车辆无法进入逆向车道;线段 $EB$ 表示保护相位1/5绿灯,同时预信号绿灯开启,此时,车辆以饱和流率进入逆向车道;线段 $BC$ 表示左转车辆在预信号处排队状态;借道左转相位2/6绿灯,此时,位于两条车道的车辆以饱和流率 $\lambda_{\max}$ 排放,同时预信号处的排队车辆可以选择传统车道或逆向车道进入交叉口,形成线段 $CD$ ;线段 $DF$ 表示逆向车道以饱和流率排放造成的延误。多边形 $EBCDF$ 的面积则表示逆向车道总延误 $D_2$ 。

$$D_2 = S_{EBCDF} = \frac{q^2}{2\lambda_{\max}} + q\left(C - \frac{q}{\lambda}\right) - q\left(R_p - \frac{q}{\lambda} + \frac{q}{\lambda_{\max}}\right) + \frac{1}{2}(G_{m,2} - T_n - T_0)\left(\frac{Q}{2} - q\right) - \frac{Q^2}{8\lambda_{\max}} \quad (16)$$

### 2.5.3 预信号处延误

预信号处延误 $D_3$ 可以分为两个阶段来考虑。①逆向车道饱和以前的延误 $S_{HUIJ}-S_{EIJ}$ ;②为逆向车道饱和以后的延误 $S_{VWMJ}-S_{ZWM}$ ,则有

$$D_3 = S_{HUIJ} - S_{EIJ} + S_{VWMJ} - S_{ZWM} = \frac{1}{2}\lambda\left(R_p - \frac{q}{\lambda} + \frac{q}{\lambda_{\max}}\right)^2 - \frac{1}{2}q\left(\frac{q}{\lambda_{\max}}\right) + \left[\lambda\left(R_p - \frac{q}{\lambda} + \frac{q}{\lambda_{\max}}\right) + \lambda C - 3q\right]\left(G_p - \frac{q}{\lambda_{\max}}\right) - \frac{\left[\lambda\left(C - \frac{q}{\lambda}\right) - q\right]^2}{2\lambda_{\max}} \quad (17)$$

### 2.6.4 常规设计左转延误

常规设计交叉口的左转累计到达驶离过程如图7所示。在图7中, $S_1+S_2$ 为一个周期内左转总延误为 $d$ ;其中 $S_1$ 为滞留车辆延误, $S_2$ 为驶离车辆延误。

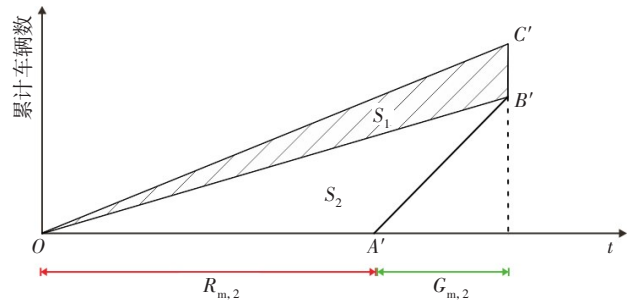


图7 常规设计累计到达-驶离曲线图

Fig. 7 Conventional design of cumulative arrival-departure curve

$$d = \frac{\lambda\lambda_{\max}(C - G_{m,2})^2}{2(\lambda - \lambda_{\max})} + \frac{C(Q - G_{m,2}\lambda_{\max})}{2} \quad (18)$$

## 3 算例分析

为验证该模型有效性,对长沙市芙蓉中路一交叉口进行交通调查。该交叉口主干道走向为东西向,次干道为南北向,逆向车道布置在西进口道上。通过在合适点位对交叉口进行摄像,采集现状交叉口的几何布局、信号配时以及交通流等数据,整理后得到该信号控制交叉口基本参数,见表3。

表3 基本参数的具体值

Table 3 Specific values of basic parameters

符号	数值
$\lambda / (\text{pcu} \cdot \text{s}^{-1})$	0.10
$\lambda_{\max} / (\text{pcu} \cdot \text{s}^{-1})$	0.39
$v_l / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	4
$v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	20
$G_{m,1} / \text{s}$	38
$G_{m,2} / \text{s}$	22
$G_{m,3} / \text{s}$	75
$G_{m,4} / \text{s}$	13
$L_{\text{car}} / \text{m}$	4
$h_l / \text{m}$	1.5
$T_0 / \text{s}$	6
$L_z / \text{m}$	15

### 3.1 不同逆向车道长度的车均延误比较

到达流率与逆向车道长度的关系见表4。当交叉口的流量条件满足式(2)时,将不同左转到达量代入式(8)~(10),得到借道左转设计不同左转到达量下的最佳逆向车道长度。

表4 到达流率与逆向车道长度关系

Table 4 Variation of arrival flow rate versus CLL length

参数	取值									
$Q/\text{pcu}$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$Q_l/\text{pcu}$	249	272	294	317	340	362	385	408	430	453
$L_{\text{cll}}/\text{m}$	9.3	13.8	18.2	22.7	27.1	31.6	36.0	40.4	44.9	49.3

不同逆向车道长度的延误变化情况如图8所示。从图8可以看出,左转车辆低、中、高到达流量分别为275、350、425 pcu/h。在低到达流量下,借道左转设计的车均延误减少幅度不大,随着到达流量的增大,借道左转设计的优势逐渐凸显。其原因是在到达流量较小时,左转车辆不用进行二次停车,在绿灯期间内能全部通过交叉口。在最佳逆向车道长度确定方面,以到达流量为425 pcu/h为例,在逆向车道长度为40.0 m时,随着长度延长,其车均延误基本无变化,这原因是当逆向车道长度达到最佳值时,所有左转车辆均可在周期内通过,故逆向车道长度的增大,对车辆通行影响较小,车均延误基本维持不变。且由表4可知,此时最佳逆向车道长度为44.0 m,与模型较为符合。

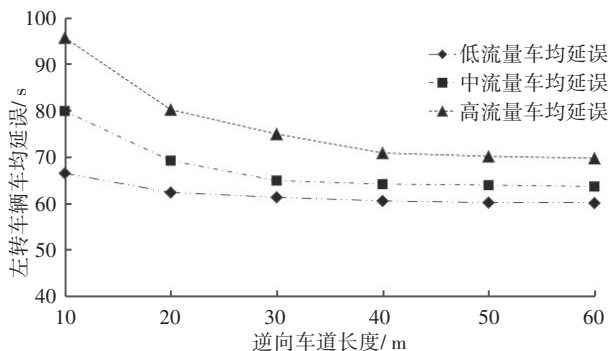


图8 不同逆向车道长度的延误变化

Fig. 8 Delay variation in different reverse lane lengths

### 3.2 借道左转设计的左转延误比较

不同交通量条件下的左转延误对比如图9所示。从图9可以看出,借道左转设计的总延误在整

体上都小于常规控制总延误;在左转到达流量小于250 pcu/h时,常规控制交叉口也可使左转车辆全部通过。尽管逆向车道的利用率很高,但每条车道无法以饱和流率排放。因此,两种方案的总延误相差不大。当左转到达流量为250 pcu/h时,常规设计将导致左转车辆二次停车,此时延误下降比例快速增大;随左转交通量的增大,左转延误下降占比越来越大。当 $Q_l$ 为475 pcu/h时,延误下降占比为59.21%。这种现象的主要原因是当仅有传统左转车道时,更多车辆需进行二次停车,此时借道左转设计的优越性更能充分发挥。在各位置左转延误占比方面,左转流量偏低时,预信号处的延误占比较大,其原因是在该流量条件下逆向车道长度较短,左转到达车辆更多在预信号处排队,随着左转流量的增大,传统车道和逆向车道的延误占比增加。

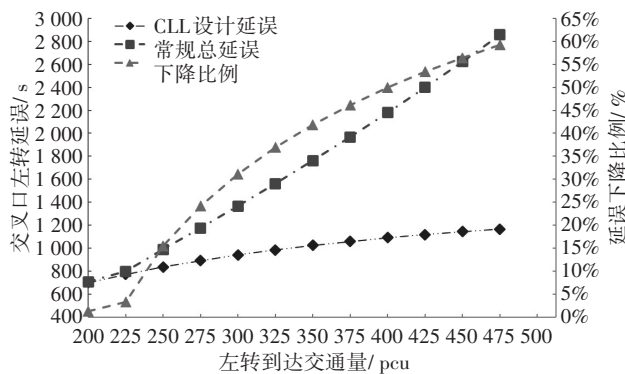


图9 不同交通量条件下的左转延误对比

Fig. 9 Comparison of left-turn delays under different traffic volume conditions

## 4 结论

通过考虑交叉口间距条件模型和主预信号配时控制,研究了一个考虑预信号位置停车延误的优化模型,分析了不同逆向车道长度对车均延误的影响以及不同设计下的总延误对比。

本研究的创新性工作主要有:

1) 提出一个交叉口间距条件模型。在该模型中,对逆向车道长度进行了优化;

2) 建立一个考虑预信号位置停车延误的优化模型,并运用MATLAB数值软件对其进行了仿真,分析在不同交通量下左转车辆的占比对借道左转设计的延误影响。

基于该研究结论,借道左转设计更适用于高流量交叉口。城市交通管理者可以考虑逆向车道仅在高峰期开启,平峰期关闭,以确保行车安全。该模型为实际交叉口设置灵活的逆向车道长度提供了理论参考,为交叉口设计多条逆向车道的流量条件和延误分析提供新的思路。本文所建立的最佳逆向车道长度模型,是在固定的信号周期及到达率条件下得到的,具有一定的局限性。由于设置逆向车道后会致使各进口道流量比发生改变,尚需在考虑交通量条件、逆向车道长度及利用率等因素后,深入研究借道左转设计的设置条件及信号配时优化方法对左转延误的影响。

### 参考文献(References):

- [1] 吴家明. 信号交叉口借道左转车道运行特性与优化设计[D]. 南京: 东南大学, 2019. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2019.003827.  
WU Jiaming. Operational analysis and optimization of the contraflow left-turn lane design at signalized intersections[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [2] 姜涛, 马倩楠. 多时段可变导向车道设置与信号优化方法[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(1): 86-93. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.01.015.  
JIANG Tao, MA Qiannan. Multi-time variable guiding lane setting and signal optimization method[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(1): 86-93. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.01.015.
- [3] ZHAO J, MA W J, HEAD K L, et al. Optimal operation of displaced left-turn intersections: a lane-based approach [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 61: 29-48. DOI: 10.1016/j.trc.2015.10.012.
- [4] Goldblatt R, Mier F, Friedman J.. Continuous flow intersection [J]. Institute of Transportation Engineers Journal, 1994, 64 (7) 35-42.
- [5] 赵靖, 陈凯佳, 周溪召. 排阵式交叉口几何设计与信号控制协同鲁棒优化[J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 296-305. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.11.024.  
ZHAO Jing, CHEN Kaijia, ZHOU Xizhao. Joint robust optimization of layout design and signal control for tandem intersections[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(11): 296-305. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.11.024.
- [6] YU C H, MA W J, HAN K, et al. Optimization of vehicle and pedestrian signals at isolated intersections [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 98: 135-153. DOI: 10.1016/j.trb.2016.12.015.
- [7] GRIGOROPOULOS G, LEONHARDT A, KATHS H, et al. Traffic flow at signalized intersections with large volumes of bicycle traffic [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2022, 155: 464-483. DOI: 10.1016/j.tra.2021.11.021.
- [8] BIE Y M, CHENG S W, LIU Z Y. Optimization of signal-timing parameters for the intersection with hook turns [J]. Transport, 2017, 32 (2): 233-241. DOI: 10.3846/16484142.2017.1285813.
- [9] 邓雷, 刘婷婷, 朱彤, 等. 基于 VISSIM 的城市道路交叉口掉头模式评价[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(3): 70-76. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.03.010.  
DENG Lei, LIU Tingting, ZHU Tong, et al. Evaluation on U-turn mode of urban Road Intersection based on VISSIM [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(3): 70-76. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.03.010.
- [10] 安实, 宋浪, 王健, 等. 非常规交叉口设计研究现状与展望[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4): 1-20. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.04.001.  
AN Shi, SONG Lang, WANG Jian, et al. Research status and prospect of unconventional arterial intersection design [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(4): 1-20. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.04.001.
- [11] ZHAO J, MA W J, ZHANG H M, et al. Increasing the capacity of signalized intersections with dynamic use of exit lanes for left-turn traffic[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013, 2355(1): 49-59. DOI: 10.3141/2355-06.
- [12] 崔凯. 左转逆向可变车道的优化设计与控制策略[D]. 济南: 山东大学, 2017.  
CUI Kai. Optimal design and control strategy of left-turn reverse variable lane [D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [13] WU J M, LIU P, TIAN Z Z, et al. Operational analysis of the contraflow left-turn lane design at signalized intersections in China [J]. Transportation Research Part



- C: Emerging Technologies, 2016, 69: 228-241. DOI: 10.1016/j.trc.2016.06.011.
- [14] SU P, Krause C, Bared J G, et al. Operational advantages of contraflow left-turn pockets at signalized intersections[R].2016.
- [15] 陈松, 李显生, 王运豪, 等. 借对向出口车道左转交叉口交通控制方案优化[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50 (3) : 74-82. DOI: 10.11918/j. issn. 0367-6234.201711033.
- CHEN Song, LI Xiansheng, WANG Yunhao, et al. Traffic control plan optimization for the intersection with contraflow left-turn lane [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50 (3) : 74-82. DOI: 10.11918/j. issn.0367-6234.201711033.
- [16] 王予瑞, 刘昱岗, 郑帅. 考虑逆向可变车道的预信号公交优先控制[J]. 交通运输工程与信息学报, 2022, 20 (3) : 68-80. DOI: 10.19961/j. cnki. 1672-4747.2021.04.015.
- WANG Yurui, LIU Yugang, ZHENG Shuai. Transit priority control based on presignal and contraflow left-turn lane [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2022, 20 (3) : 68-80. DOI: 10.19961/j. cnki.1672-4747.2021.04.015.
- [17] 张泰文, 张存保, 周斌, 等. 逆向可变车道动态切换及信号控制优化方法[J]. 交通信息与安全, 2020, 38 (5): 59-66. DOI: 10.3963/j.jssn.1674-4861.2020.05.007.
- ZHANG Taiwen, ZHANG Cunbao, ZHOU Bin, et al. A method of dynamic switch control and signal timing optimization for reverse variable lane [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2020, 38 (5) : 59-66. DOI: 10.3963/j.jssn.1674-4861.2020.05.007.
- [18] CHEN Q, YI J X, WU Y L. Cellular automaton simulation of vehicles in the contraflow left-turn lane at signalised intersections [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2019, 13 (7) : 1164-1172. DOI: 10.1049/iet-its.2018.5451.
- [19] LIU S, WANG Z L, JIANG H. Signal timing optimisation with the contraflow left-turn lane design using the cell transmission model [J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2022, 18 (3) : 1254-1277. DOI: 10.1080/23249935.2021.1936280
- [20] GUO R W, LIU J L, ZHAO Q, et al. Signal timing and geometric design at contraflow left-turn lane intersections [J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2022, 11 (3) : 619-635. DOI: 10.1016/j.ijtst.2021.08.003.
- [21] CHEN X, JIA Y Q. Sustainable traffic management and control system for arterial with contraflow left-turn lanes [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 124256. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124256.
- [22] 李奇. 借道左转平面交叉口交通设计研究[D]. 西安: 长安大学, 2020. DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2020.000880.
- LI Qi. Study on traffic design of contraflow left-turn lane intersection[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- (责任编辑:李脉;校对:欧兆虎;英文编辑:刘至真)