

设置移位左转的纵列式信号交叉口设计及优化

华雪东^{1,2}, 王宝杰³, 阳建强², 王 炜¹, 赵 德⁴

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 建筑学院, 江苏 南京 210096; 3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 4. 新加坡国立大学 土木与环境工程系, 新加坡 119077)

摘 要:为减少交叉口处左转与直行、右转车辆间的冲突,进一步提升交叉口的通行能力,在常规纵列式交叉口的基础上,提出设置移位左转的纵列式交叉口设计。通过将左转车道移位设置以减少左转与其他方向车辆间的冲突,并优化预信号设置、重新组织交通流线,达到提高进口车道利用率的目的。在此基础上,针对设置移位左转的纵列式交叉口,提出了车道标志及渠化、移位左转车道长度、整理区长度、信号配时方案一体化确定及优化模型,给出了模型的线性化转化与求解算法,设计了 4 种交通情景以验证其在不同情况下的通行能力改善情况。基于敏感性分析,比较了设置移位左转的纵列式交叉口与常规交叉口、纵列式交叉口在不同左转比例下的表现差异。研究结果表明:设置移位左转的纵列式交叉口可显著提升交叉口的通行能力,相比常规交叉口和纵列式交叉口,设置移位左转后交叉口的通行能力分别提升 60%~80%、1%~31%;设置移位左转的纵列式交叉口使用有一定的条件,其更适合左转比例较小的情况,而当交叉口左转比例较高时,常规纵列式交叉口表现更优;此外,在交叉口长期不饱和的情况下,设置移位左转的纵列式交叉口对通行能力提升没有意义,且此时移位的左转设置还会引发额外的延误,并可能引起一定的安全问题。

关键词:交通工程;交通设计;纵列式交叉口;移位左转;信号控制;优化设计

中图分类号:U491

文献标志码:A

Design and optimization of signalized tandem intersections with displaced left-turn

HUA Xue-dong^{1,2}, WANG Bao-jie³, YANG Jian-qiang², WANG Wei¹, ZHAO De⁴

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 2. School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 4. Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, Singapore 119077, Singapore)

Abstract: To reduce traffic conflicts at left turns (LT) through right-turn movements and increase the intersection capacity, the concept of tandem intersection (TI) was extended with displaced left-turn (TIDLT). By displacing LT lanes, optimizing pre-signals, and redesigning traffic flow movements, lane utilization could be improved. An optimization model was proposed for the integrated design of lane assignment, the length and number of the displaced LT lanes, and signal control plan. An optimization problem was solved by reducing it into a set of linear

收稿日期:2018-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51878166,71801042,51678132);江苏省自然科学基金项目(BK20180381);

中国博士后科学基金项目(2018M632211);江苏省博士后科研计划项目(1701082B)

作者简介:华雪东(1987-),男,江苏扬州人,讲师,工学博士,博士后,E-mail:qdurghk@163.com。

programming problems. A numerical test was conducted with four scenarios to show the performance of TIDLT. Besides, a sensitivity analysis was demonstrated to compare TIDLT with TI and conventional intersection(CI) under different LT ratios. The results show that TIDLT can improve the capacity of intersections, the capacity is improved by 60% to 80% and 1% to 3% when compared with that by CI and TI, respectively. TIDLT should be applied to optimize utilization. It is more likely to be the best when the LT ratio is low, while TI is more suitable under high LT ratio conditions. Furthermore, TIDLT is not suitable for intersections that are always undersaturated, as extra capacity is not needed in this case, and the displaced LT can lead to more delay time and safety issues. 3 tabs, 4 figs, 25 refs.

Key words: traffic engineering; traffic design; tandem intersection; displaced left-turn; signal control; operation optimization

0 引言

随着城市中机动化出行需求的逐步增长,城市交通变得越来越拥堵。在高峰时段内,过饱和的交通状况极易导致交叉口处的拥堵频发。众多学者尝试通过增加交叉口的通行能力与承载力,以期在一定程度上缓解交叉口的拥堵情况。一方面,学者通过提高空间利用效率来提供更多的进口车道数,提出了包括港湾式左转车道、车道展宽等方法^[1-3]。Zhang 等采用微观仿真的方法,研究了左转车道展宽段较短的情况下道路的实际通行能力^[4]。最近的研究也提出了一些非常规的交叉口设计方法,如纵列式交叉口^[5]、动态可变车道^[6]等。Zhao 等提出了一种对出口车道的动态分配使用的方法,研究表明该方法可以在提升交叉口通行能力的同时,降低车均延误^[7]。另一方面,通过提高绿信比与有效绿灯时间以提升交叉口的通行效率也吸引了众多学者的关注^[8]。Ma 等提出了一种基于预信号的信号交叉口控制方法,可以有效提升交叉口处左转车流的通行能力与效率^[9]。赵冬斌等总结了自适应动态规划方法在城市道路交通信号优化控制方面的研究与应用情况^[10]。此外,考虑到左转对交叉口通行能力的影响,Goldblatt 等试图限制或修改交叉口处左转的时空规则,提出了包含远引掉头、超级街道、领结交叉口等多种交叉口渠化与信号设计方案^[11-15]。

纵列式交叉口(又名排阵式交叉口,tandem intersection,简称 TI),是一种应用前景广泛的交叉口设计概念^[16]。其最大的优点在于通过预信号设置与交通组织的优化,使得无论在左转、直行还是右转(直右)相位时,车辆通过纵列式交叉口时均可使用几乎全部的进口道通行,大大增加了交叉口的通行能力与时空资源的利用效率^[5]。根据深圳市的实际

使用效果来看,纵列式交叉口的引入提升了约 40% 的交叉口通行能力,在单位时间内通过的左转车辆数比常规信号交叉口提高了 1 倍^[17]。鉴于纵列式交叉口的诸多优点,近年来学者开始研究纵列式交叉口的通行能力、延误、排队长度,以及信号控制方案优化等方面^[5,18-20]。

虽然大量的研究已经关注并试图优化纵列式交叉口的通行能力与运行效率,然而在常规的纵列式交叉口中,直行、右转车辆与左转车辆间仍存在一定冲突。若可通过对左转车辆的运行规则做进一步限制,降低(甚至消除)纵列式交叉口中左转车辆与其他车辆间的运行冲突,其通行能力有望得到进一步提升。鉴于此,本文将通过引入移位左转(displaced left-turn)的概念来拓展纵列式交叉口的设计理念,通过构建设置移位左转的纵列式信号交叉口优化模型,实现对设置移位左转的纵列式交叉口车道设置、移位左转设计与信号配时方案的一体化设计。

1 设置移位左转的纵列式信号交叉口

常规纵列式交叉口的的基本设计原理如图 1(a)、(b)所示。可以发现,在纵列式交叉口的每个进口方向均设有预信号及对应的停车线,预信号的周期时长与主信号相同。由于预信号及对应停车线的存在,可以将其视为一种非典型的交叉口。定义原有十字交叉口为主交叉口,而由于预信号引入而形成子交叉口。在子交叉口的上游,每个车道均画有固定的导向标线;而在子交叉口的下游则设置有可变情报板,用于实时的引导车辆流向。预信号与主信号之间的区域称为整理区,主要用于车辆的换道与排队^[5]。通过预信号与主信号间的联动,车辆可以预先在主信号停车线处依次停车,并在主信号绿灯

时使用几乎全部的进口车道行驶。以进口方向 2 为例,当主信号为直行绿灯时,如图 1(a)所示,直行、右转车辆使用了全部的 3 个进口道行驶;而当主信号转为左转绿灯时,如图 1(b)所示,左转车辆则可

以使用全部的 3 个车道行驶。这一过程中,预信号通过提前开启对应相位的绿灯信号,使得车辆可以提前充满整理区。关于常规纵列式交叉口的详细介绍可以参考文献[5]。

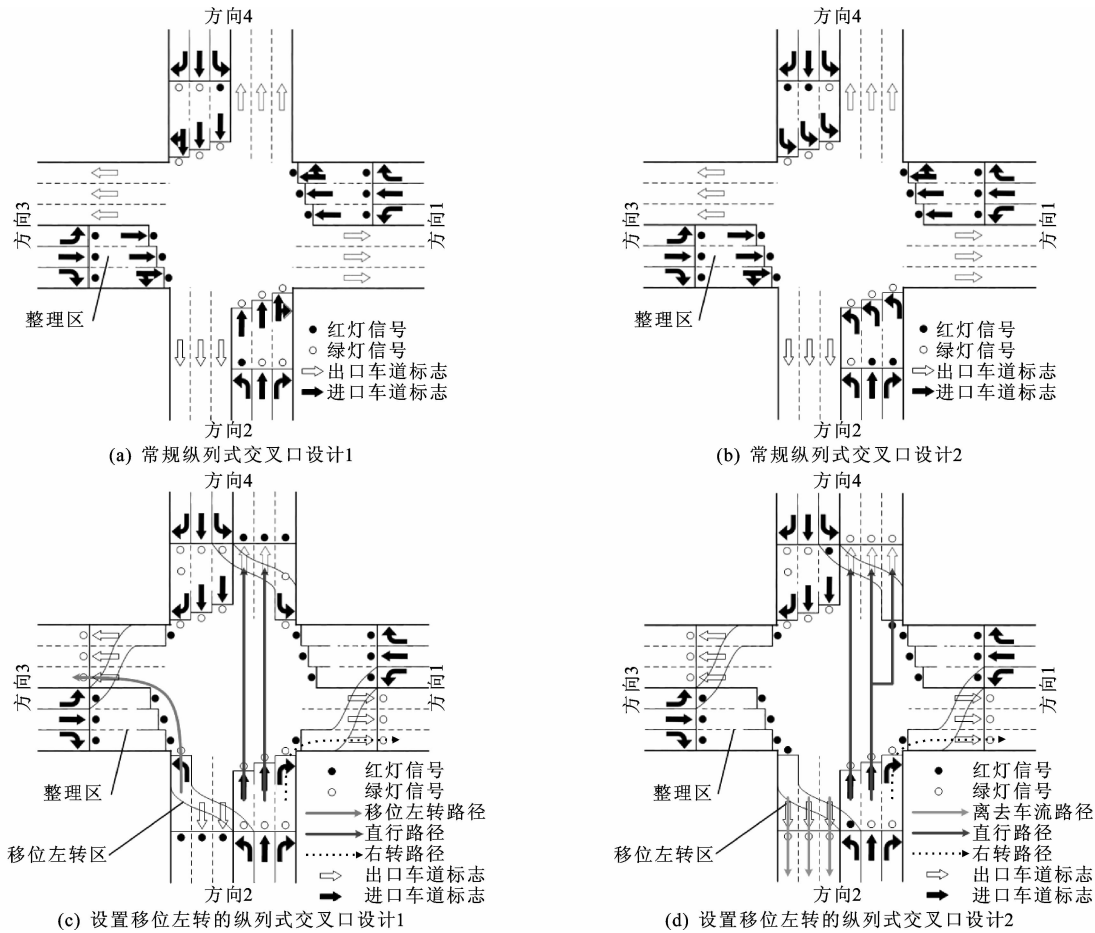


图 1 常规及设置移位左转的纵列式交叉口设计

Fig. 1 Conventional TI and TI with displaced left-turn intersection design

常规纵列式交叉口通过提升进口车道利用效率来提升交叉口的通行能力,但是其相位数与传统信号交叉口相比并没有变化,左转车流与其他车流间仍然存在冲突,需要专门的左转相位来分隔左转与直行、右转车流。本文试图在纵列式交叉口中引入移位左转,减少(甚至消除)左转保护相位的时间,提高纵列式交叉口的绿信比,进一步提升交叉口的通行效率。设置移位左转的纵列式信号交叉口布局设计如图 1(c)、(d)所示,可以看到,在整理区范围内,左转车辆移位至出口的最外侧车道行驶。通过预信号的控制,在避免左转与对向直行车流间冲突的同时,实现了本方向左转、直行、右转同时行驶的控制方案。同样以进口方向 2 为例,图 1(c)中,在绿信号相位时,进口方向 2 的所有车辆均可以通过交叉口。容易发现,左转车辆此时并不会和对向的直行车辆发生冲突,但是为了保证左转车道的通行,对向

的直行车辆在通过交叉口后,需要在预信号停车线停车。当预信号切换为绿灯后,如图 1(d)所示,此时这些停车等候的车辆可以行使离开。

表 1 给出了常规纵列式交叉口和本文提出的设置移位左转的纵列式交叉口信号控制的相序,后文的模型部分均是基于表 1 的相序开展的。表 1 中,EXIT 代表的是子交叉口处受到预信号控制的离去车流。需要特别注意的是,表 1 中任何一列的 2 个相位并不代表其相位时长相同。

2 优化模型及求解算法

在提出设置移位左转的纵列式信号交叉口及信号设计方案的基础上,本节给出一种包括车道标志及渠化、移位左转车道长度、整理区长度、信号配时方案一体化确定及优化的模型,并给出该模型的一般求解算法。

表 1 信号控制(相序)设计
Tab. 1 Signal control sequence design

交叉口类型	常规纵列式交叉口				设置移位左转的纵列式交叉口			
	相位 1	相位 2	相位 3	相位 4	相位 1	相位 2	相位 3	相位 4
主交叉口								
子交叉口 1								
子交叉口 2								
子交叉口 3								
子交叉口 4								

2.1 模型的目标函数

目标函数的构建考虑了 2 个方面的因素。主交叉口通行能力的提升作为模型优化的首要目标。选择了主交叉口的流量乘数 μ_0 作为指标,流量乘数 μ_0 越大,说明主交叉口的饱和度越小,主交叉口的通行能力越大^[14-15,21-24]。

此外,由于预信号的存在,使得在每个进口方向的上游各存在一个子交叉口。将子交叉口通行能力的提升作为模型的次要优化目标。同样选择子交叉口 z 的流量乘数 μ_z 作为指标, z 取 1、2、3、4,分别代表东、南、西、北 4 个子交叉口。为了体现两者间的差异,引入权重系数 P_0 和 P_z 区别两者在模型中的不同贡献。

本文提出优化模型的目标函数表示为

$$\max \{ P_0 \mu_0 + \sum P_z \mu_z \} \quad P_0 > P_z \tag{1}$$

2.2 模型的限制与约束条件

2.2.1 流量分配约束条件

约束条件式(2)和式(3)保证了每个进口方向上出行需求与各个车道的流量和相等;约束条件式(4)限制了子交叉口的流量要大于或者等于主交叉口对应进口方向的流量;约束条件式(5)则是对子交叉口离去流量的约束,其等于上游对应流向上的流量和,即

$$\mu_0 Q_{iw} = \sum_{k=1}^{n_i+n_i^d} q_{iwk}^{\text{main}} \quad \forall i=1,2,3,4 \quad \forall w=1,2,3 \tag{2}$$

$$\mu_z Q_{i'w} = \sum_{k=1}^{n_z+n_z^d} q_{z'wk}^{\text{sub}} \quad \forall w=1,2,3,4 \tag{3}$$

$$\sum_{k=1}^{n_i+n_i^d} q_{i'wk}^{\text{main}} \leq \sum_{k=1}^{n_z+n_z^d} q_{z'wk}^{\text{sub}} \quad \forall w=1,2,3 \quad z=i \tag{4}$$

$$\sum_{k=1}^{n_z+n_z^d} q_{z'wk}^{\text{sub}} = \sum_{k=1}^{n_{i_1}+n_{i_1}^d} q_{i_1 1k}^{\text{main}} + \sum_{k=1}^{n_{i_2}+n_{i_2}^d} q_{i_2 2k}^{\text{main}} + \sum_{k=1}^{n_{i_3}+n_{i_3}^d} q_{i_3 3k}^{\text{main}} \quad (z,i_1,i_2,i_3) \in \{(1,4,3,2), (2,1,4,3), (3,2,1,4), (4,3,2,1)\} \tag{5}$$

式中: i,i_1,i_2,i_3 为进口方向指数,取值均为 1、2、3、4,分别代表东、南、西、北 4 个进口方向; w 为车流流向指数, w 取 1、2、3、4 分别代表左转车流、直行车流、右转车流、子交叉口处的离去车流; k 为进口道序号(从内侧车道开始编号); Q_{iw} 为进口方向 i 上流向 w 的交通需求; $q_{i'wk}^{\text{main}}$ 为主交叉口中,进口方向 i 车道 k 上流向 w 的分配流量; $q_{z'wk}^{\text{sub}}$ 为子交叉口 z 中,车道 k 上流向 w 的分配流量; n_i,n_z 分别为主交叉口进口方向 i 上的进口车道数、子交叉口 z 的进口车道数; n_i^d,n_z^d 分别为主交叉口进口方向 i 上的移位左转车道数、子交叉口 z 上的移位左转车道数。

2.2.2 路权分配限制条件

当且仅当通行参数 $x_{i'wk}^{\text{sub}}$ 和 $x_{i'wk}^{\text{main}}$ 的值为 1 时,车道 k 上的车辆才有向 w 方向行驶的路权,如限制条件式(6)和式(7)所示

$$Mx_{i'wk}^{\text{main}} \geq q_{i'wk}^{\text{main}} \geq 0 \quad \forall w=1,2,3 \quad \forall k=1,2,\dots,n_i+n_i^d \tag{6}$$

$$Mx_{i'wk}^{\text{sub}} \geq q_{i'wk}^{\text{sub}} \geq 0 \quad \forall w=1,2,3,4 \quad \forall k=1,2,\dots,n_z+n_z^d \tag{7}$$

式中: M 为一较大的自然数; $x_{i'wk}^{\text{sub}}$ 为子交叉口 z 中车道 k 上是否允许流向 w 通行的参数,1 为允许,0 为

禁止; x_{i2k}^{main} 为主交叉口进口方向 i 车道 k 是否允许流向 w 通行的参数,1 为允许,0 为禁止。

2.2.3 车道分配限制条件

子交叉口及主交叉口的车道分配限制分别如式(8)~式(14)以及式(15)~式(20)所示。子交叉口每个转向方向的最大及最小车道数限制如式(8)所示。限制条件式(9)表明了任意进口车道仅能供 1 个或者 2 个转向方向(直行、右转车道)使用。限制条件式(10)限制了左转车道不与其他转向共用,而式(11)则限制了最多只能有 1 条直右车道。限制条件式(12)和式(13)进一步限制了出现冲突的可能,如直行车道不能设置在右转车道右侧。限制条件式(14)则是针对设置移位左转的纵列式交叉口的离去车流,限制其只可以使用没有设置移位左转车道的出口车道驶离交叉口,各限制条件表达式如下

$$n_z + n_z^d - 1 \geq \sum_{k=1}^{n_z+n_z^d} x_{z2k}^{\text{sub}} \geq 1 \quad \forall w = 1, 2, 3 \quad (8)$$

$$2 \geq \sum_{w=1}^3 x_{z2k}^{\text{sub}} \geq 1 \quad \forall k = 1, 2, \dots, n_z + n_z^d \quad (9)$$

$$x_{z1k}^{\text{sub}} \sum_{w=2}^3 x_{z2k}^{\text{sub}} = 0 \quad \forall k = 1, 2, \dots, n_z + n_z^d \quad (10)$$

$$n_z + n_z^d + 1 \geq \sum_{w=1}^3 \sum_{k=1}^{n_z+n_z^d} x_{z2k}^{\text{sub}} \geq n_z + n_z^d \quad (11)$$

$$\max\{x_{z1k}^{\text{sub}}, 2x_{z2k}^{\text{sub}}, 3x_{z3k}^{\text{sub}}\} \leq \max\{x_{z1k+1}^{\text{sub}}, 2x_{z2k+1}^{\text{sub}}, 3x_{z3k+1}^{\text{sub}}\} \quad \forall k = 1, 2, \dots, n_z + n_z^d - 1 \quad (12)$$

$$n_z + n_z^d + 1 - \sum_{k=1}^{n_z+n_z^d} x_{z2k}^{\text{sub}} \geq \max\{kx_{z2k}^{\text{sub}}\} \quad \forall k = 1, 2, \dots, n_z + n_z^d \quad (13)$$

$$x_{z4k}^{\text{sub}} = 1 \quad \forall k = 1, 2, \dots, n_i^{\text{exit}} - n_z^d, z = i \quad (14)$$

式中: n_i^{exit} 为进口方向 i 上的出口车道数。

对于主交叉口,限制条件式(15)从交通安全的角度出发,确保了直行车道的数量需小于下游离去车道的数量。限制条件式(16)和式(17)分别限制了设置移位左转的纵列式交叉口的最大左转和右转车道数。由于设置移位左转的纵列式交叉口的左转已被移位设置,因而只需要限制主交叉口直行和右转间冲突的发生,如式(18)~式(20)所示

$$\sum_{k=1}^{n_i+n_i^d} x_{i2k}^{\text{main}} \leq n_i^{\text{exit}} - n_i^d \quad (i, i') \in \{(1, 3), (2, 4), (3, 1), (4, 2)\} \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^{n_i+n_i^d} x_{i1k}^{\text{main}} + \sum_{k=1}^{n_i+n_i^d} x_{i3k}^{\text{main}} \leq n_i^{\text{exit}} \quad (i, i_1, i_3) = \{(1, 4, 2), (2, 1, 3), (3, 2, 4), (4, 3, 1)\} \quad (16)$$

$$\max\{kx_{i2k}^{\text{main}}\} = n_i^d \quad \forall k = 1, 2, \dots, n_i + n_i^d \quad (17)$$

$$\max\{2x_{i2k}^{\text{main}}, 3x_{i3k}^{\text{main}}\} \leq \max\{2x_{i2k+1}^{\text{main}}, 3x_{i3k+1}^{\text{main}}\} \quad \forall k = n_i^d + 1, \dots, n_i^d + 2, \dots, n_i + n_i^d \quad (18)$$

$$n_i + 1 \geq \sum_{w=2}^3 \sum_{k=n_i^d+1}^{n_i+n_i^d} x_{i2k}^{\text{main}} \geq n_i \quad (19)$$

$$kx_{i2k}^{\text{main}} - n_i^d \leq \sum_{k=1}^{n_i+n_i^d} x_{i2k}^{\text{main}} \quad \forall k = 1, 2, \dots, n_i + n_i^d \quad (20)$$

式中: i' 也表示进口方向指数, i' 取值不能与 i 相同。

2.2.4 主交叉口信号配时约束条件

约束条件式(21)给出了信号的周期时长范围。与以往研究^[14-15]相同,为了使模型线性化求解,本文采用了周期时长的倒数作为参数,即

$$\frac{1}{C_{\min}} \geq \xi \geq \frac{1}{C_{\max}} \quad (21)$$

式中: C_{\min} 、 C_{\max} 分别为最小、最大周期时长; ξ 为周期时长的倒数。

约束条件式(22)和式(23)分别给出了绿灯开始时间、绿信比的范围。约束条件式(24)确保了任何一个被禁止的转向运动都不会被分配绿灯信号。约束条件式(25)给出了 1 个信号配时的初始条件。约束条件式(26)给出了连续的 2 个相位绿灯开始时间之间的关系,而约束条件式(27)确保了同一个相位的绿灯开始时间相同。约束条件式(28)限制了受同一个相位控制的转向运动,其绿信比需相同。

$$1 \geq g_{i2w}^{\text{main}} \geq 0 \quad \forall w = 1, 2, 3 \quad (22)$$

$$1 \geq \lambda_{i2w}^{\text{main}} \geq 0 \quad \forall w = 1, 2, 3 \quad (23)$$

$$\sum_{k=1}^{n_i+n_i^d} x_{i2k}^{\text{main}} \geq \lambda_{i2w}^{\text{main}} \geq - \sum_{k=1}^{n_i+n_i^d} x_{i2k}^{\text{main}} \quad \forall w = 1, 2, 3 \quad (24)$$

$$g_{i2}^{\text{main}} = 0 \quad (25)$$

$$g_{i'w'}^{\text{main}} \geq g_{i2w}^{\text{main}} + \lambda_{i2w}^{\text{main}} + II\xi \quad \forall w, w' = 1, 2, 3 \quad P(iw, i'w') = 1 \quad (26)$$

$$g_{i'w'}^{\text{main}} = g_{i2w}^{\text{main}} \quad \forall w, w' = 1, 2, 3 \quad P(iw, i'w') = 0, 2 \quad (27)$$

$$\lambda_{i'w'}^{\text{main}} = \lambda_{i2w}^{\text{main}} \quad \forall w, w' = 1, 2, 3 \quad P(iw, i'w') = 0 \quad (28)$$

式中: w' 也表示车流流向车数, w' 取值不能与 w 相同; g_{i2w}^{main} 为主交叉口中进口方向 i 上,转向方向 w 的绿灯开始时间; $\lambda_{i2w}^{\text{main}}$ 为主交叉口中进口方向 i 上,转向方向 w 的绿信比; II 为最小清空时长; $P(iw, i'w')$ 为主交叉口的相序指数。

需要特别说明,在约束条件式(26)~式(28)中,主交叉口的相序指数 $P(iw, i'w') = 1$ 表示相位 (i, w) 紧随相位 (i', w') 后, $P(iw, i'w') = 0$ 表示相位 (i, w) 和相位 (i', w') 为同一相位, $P(iw, i'w') = 2$ 表示相位 (i, w) 和相位 (i', w') 同时开始绿灯信号,但是绿信比不同, $P(iw, i'w') = 3$ 表示其他情况。

此外,每个车道的饱和度需小于系统所能接受的最大饱和度,如约束条件式(29)~式(31)所示

$$\frac{q_{i1k}^{\text{main}}}{s_{ik}} \leq s_{\max} \lambda_{i1}^{\text{main}} \quad \forall k = 1, 2, \dots, n_i + n_i^d \quad (29)$$

$$\frac{q_{i2k}^{\text{main}} + q_{i3k}^{\text{main}}}{s_{ik}} \leq s_{\max} \lambda_{i2}^{\text{main}} \quad \forall k = 1, 2, \dots, n_i + n_i^d \quad (30)$$

$$\frac{q_{i2k}^{\text{main}} + q_{i3k}^{\text{main}}}{s_{ik}} \leq s_{\max} \lambda_{i3}^{\text{main}} \quad \forall k = 1, 2, \dots, n_i + n_i^d \quad (31)$$

式中: s_{\max} 为最大饱和度; s_{ik} 为主交叉口进口方向 i 车道 k 的饱和流率。

2.2.5 子交叉口信号配时约束条件

为了保证子交叉口与主交叉口信号的协同控制,两者信号的周期时长需要保持相同。对于绿灯开始时间、绿信比、饱和度的约束,子交叉口的要求与主交叉口基本一致,其约束条件如式(32)~式(40)所示。子交叉口 z 的相序指数 $P^{\text{sub}}(zw, z'w')$,其取值含义与 $P(iw, i'w')$ 相同。

$$1 \geq g_{zw}^{\text{sub}} \geq 0 \quad \forall w = 1, 2, 3, 4 \quad (32)$$

$$1 \geq \lambda_{zw}^{\text{sub}} \geq 0 \quad \forall w = 1, 2, 3, 4 \quad (33)$$

$$\sum_{k=1}^{n_z + n_z^d + n_z^w} x_{zkw}^{\text{sub}} \geq \lambda_{zw}^{\text{sub}} \geq - \sum_{k=1}^{n_z + n_z^d + n_z^w} x_{zkw}^{\text{sub}} \quad \forall w = 1, 2, 3, 4 \quad (34)$$

$$g_{zw}^{\text{sub}} \geq g_{zw}^{\text{sub}} + \lambda_{zw}^{\text{sub}} + II\xi \quad \forall w, w' = 1, 2, 3, 4 \quad P^{\text{sub}}(zw, z'w') = 1 \quad (35)$$

$$g_{zw}^{\text{sub}} = \lambda_{zw}^{\text{sub}} \quad \forall w, w' = 1, 2, 3, 4 \quad P^{\text{sub}}(zw, z'w') = 0, 2 \quad (36)$$

$$\lambda_{zw}^{\text{sub}} = \lambda_{zw}^{\text{sub}} \quad \forall w, w' = 1, 2, 3, 4 \quad P^{\text{sub}}(zw, z'w') = 0 \quad (37)$$

$$\frac{q_{zkw}^{\text{sub}}}{s_{zk}} \leq s_{\max} \lambda_{zw}^{\text{sub}} \quad \forall w = 1, 4 \quad \forall k = 1, 2, \dots, n_z + n_z^d \quad (38)$$

$$\frac{q_{z2k}^{\text{sub}} + q_{z3k}^{\text{sub}}}{s_{zk}} \leq s_{\max} \lambda_{z2}^{\text{sub}} \quad \forall k = 1, 2, \dots, n_z + n_z^d \quad (39)$$

$$\frac{q_{z2k}^{\text{sub}} + q_{z3k}^{\text{sub}}}{s_{zk}} \leq s_{\max} \lambda_{z3}^{\text{sub}} \quad \forall k = 1, 2, \dots, n_z + n_z^d \quad (40)$$

式中: g_{zw}^{sub} 为子交叉口 z 中,转向方向 w 的绿灯开始时间; $\lambda_{zw}^{\text{sub}}$ 为子交叉口 z 中,转向方向 w 的绿信比; s_{zk} 为子交叉口 z 车道 k 的饱和流率。

考虑到协同控制的要求,需要对子交叉口的信

号作进一步的约束。约束条件式(41)保证了所有通过子交叉口的车辆可以不停车通过主交叉口。约束条件式(42)则保证了当子交叉口信号变为绿色时,整理区已经开始清空,有空间供车辆驶入,即

$$g_{zw}^{\text{sub}} + \lambda_{zw}^{\text{sub}} \leq g_{iw}^{\text{main}} + \lambda_{iw}^{\text{main}} - \frac{l_{\text{sort}}}{d} \quad \forall w, w' = 1, 2, 3 \quad P^{\text{sub}}(zw, z'w') = 0 \quad z = i \quad (41)$$

$$g_{zw}^{\text{sub}} \geq g_{iw}^{\text{main}} \quad \forall w, w' = 1, 2, 3 \quad P^{\text{sub}}(zw, z'w') = 1 \quad z = i \quad (42)$$

式中: l_{sort} 为整理区长度; d 为排队车头间距。

2.2.6 整理区长度限制条件

限制条件式(43)明确了整理区的长度需不小于车辆的排队长度,以防止车辆溢出至上游,即

$$\frac{l_{\text{sort}}}{d} \geq \frac{\sum_{w=1}^3 q_{iwk}^{\text{main}}}{3600\xi} \quad \forall w = 1, 2, 3 \quad \forall k = 1, 2, \dots, n_i + n_i^d \quad (43)$$

2.3 模型的求解

本文建立的优化模型是一个混合整数非线性规划问题,包含了1个目标函数和42个限制条件。容易看出,若将其中的参数 l_{sort} 、 n_i^d 和 n_z^d 设为常数,则该优化模型可以退化为混合整数线性规划问题,此时可以采用常用的分支定界法求解^[25]。由于上述参数的取值均在一定的范围内,可以通过固定参数 l_{sort} 、 n_i^d 和 n_z^d 取值,从而获得该取值下的最优解。通过对比各种可能参数取值下的最优值,从而获得该优化模型的全局最优解。

本文采用常用的优化问题求解软件 LINGO 来求解模型并评价设置移位左转的纵列式交叉口的表现。模型的求解步骤如下:

步骤1,模型参数初始化,并将其写成 LINGO 代码;

步骤2,确定参数 l_{sort} 、 n_i^d 和 n_z^d 的可行取值;

步骤3,对于任一可行取值,求解混合整数线性规划问题,并记录此时的最优解;

步骤4,对比全部的最优解,获得全局最优解。

3 数值试验设计

数值试验的部分,采用了城市中常见的十字交叉口作为测试交叉口,且该交叉口的每个进口方向和出口方向均有3个车道。参数 s_{ik} 和 s_{zk} 均设为 1 800 veh/h。最大饱和度 s_{\max} 为 0.85,最小、最大周期时长分别为 60 和 120 s。整理区的长度范围取

50~150 m。 M 为 1.0×10^6 , P_o 、 P_z 分别为 0.99、0.01。清空时间设为 3 s,期望车速设为 15 m/s,排队车头间距取为 5 m。

本文设计了 4 种不同的交通情景,用于测试设置移位左转的纵列式交叉口的表现。4 种交通情景的设计主要模拟了城市中较为常见的主路与主路相

交、主路与支路相交的情况,并考虑了不同左转比例对设置移位左转的纵列式交叉口的可能影响。对于支路与支路相交的情况,由于交叉口流量较小,该种情况下并没有提升交叉口通行能力的需求,故在情景设计时没有考虑。4 种交通情景下的交通需求如表 2 所示。

表 2 交通需求

Tab. 2 Traffic Demand														veh · h ⁻¹
进口方向		1			2			3			4			合计
方向		左转	直行	右转	左转	直行	右转	左转	直行	右转	左转	直行	右转	
交通情景	S1	150	650	200	250	1 000	300	150	650	200	250	1 000	300	5 100
	S2	200	300	200	50	750	250	200	300	200	50	750	250	3 500
	S3	200	600	300	200	600	300	200	600	300	200	600	300	4 400
	S4	50	600	350	50	600	350	50	600	350	50	600	350	4 000

S1:进口方向 2 和 4 为主路,其余进口方向为支路,且所有进口方向的左转比例中等。

S2:进口方向 2 和 4 为主路,直行车辆比例较高;另外 2 个进口方向为支路,转向车辆比例较高。

S3:4 个进口方向均为主路,且左转车辆比例均较高。

S4:4 个进口方向均为主路,且左转车辆比例均较低。

4 结果分析与评价

设置移位左转的纵列式交叉口 TIDLT、常规的信号交叉口(CI)与纵列式交叉口(TI)在 4 种交通

情景下的数值试验结果见表 3。

由表 3 可看出:设置移位左转的纵列式交叉口可以显著的提升交叉口的通行能力,与常规信号交叉口相比,其通行能力分别提升 68.31%、60.44%、82.96%、75.00%;与常规纵列式交叉口相比,设置移位左转的纵列式交叉口仍然表现更优,其通行能力的提升在 1%~31%之间。此外,由表 3 还可看出,整理区的长度与流量乘数相关,一般而言,流量乘数越大,整理区长度越长。

图 2 以交通情景 S3 为例,给出了基于模型优化后得到的常规纵列式交叉口、设置移位左转的纵列式交叉口车道分配方案。

表 3 4 种交通情景下的结果

Tab. 3 Optimal results under four scenarios									
交通情景	交叉口 类型	流量乘数						通行能力 提升/%	整理区 长度/m
		最小值	μ_0	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4		
S1	CI	0.93	0.93						
	TI	1.46	1.46	1.67	1.46	1.67	1.46	56.82	106
	TIDLT	1.57	1.57	2.73	1.57	2.57	1.57	68.31	133
S2	CI	1.45	1.45						
	TI	2.30	2.30	2.30	2.72	2.30	2.72	58.33	115
	TIDLT	2.33	2.33	2.91	2.33	2.91	2.33	60.44	146
S3	CI	1.06	1.06						
	TI	1.73	1.73	1.73	1.88	1.73	1.88	63.61	87
	TIDLT	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	82.96	97
S4	CI	1.31	1.31						
	TI	1.75	1.75	1.75	2.77	1.75	2.77	33.51	93
	TIDLT	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	75.00	122

图 3 以交通情景 S3 为例,给出了基于模型优化后的信号配时方案。图 3 中,黑色实线为主交叉口的绿灯信号,虚线为子交叉口的绿灯信号,字母 E 代表子交叉口处的离去车辆。由图 3 可看出,本文

模型可以生成完整的交叉口信号配时方案,任意冲突的转向之间不存在绿信号的重叠,且相邻 2 个相位间的清空时间也大于最小值的要求。

从上述的分析可以看出,本文提出的设置移位

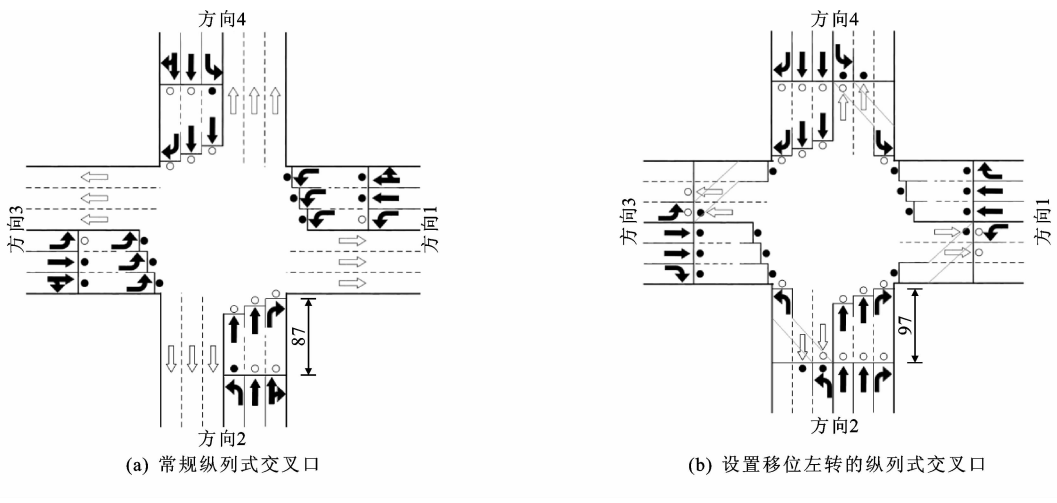


图 2 交叉口车道分配优化设计
Fig. 2 Optimal intersection layout

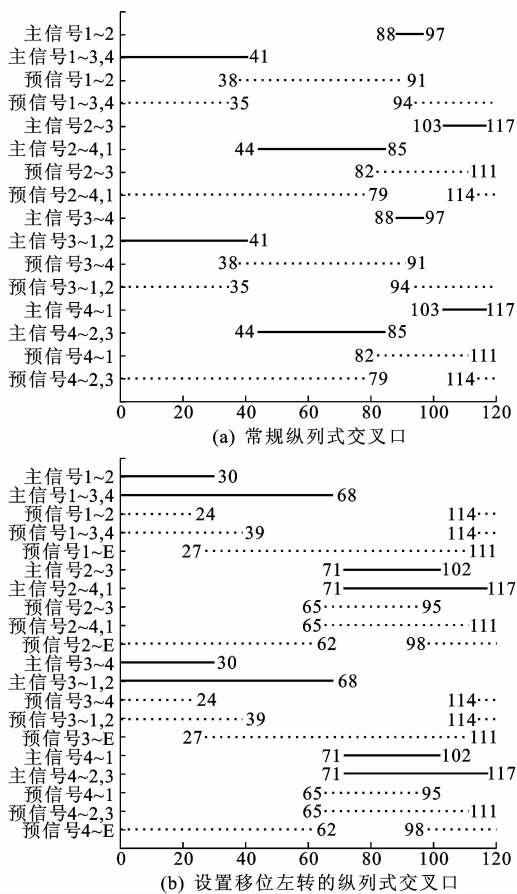


图 3 交叉口信号配时优化设计

Fig. 3 Intersection signal timing optimization design

左转的纵列式交叉口具有更大的通行能力。为了进一步分析设置移位左转的纵列式交叉口在不同左转比例下的表现,采用敏感性分析法,设置左转车的比例为 5%~30%,其他参数的取值同交通情景 S4,敏感性分析的结果如图 4 所示。由图 4 可知:随着左转比例的提高,流量乘数先增大后减小,且对于不同

的交叉口类别,流量乘数的最大值出现在不同的左转比例情况下,当左转比例较小时,设置移位左转的纵列式交叉口具有显著的优势;随着左转比例的提高,其与常规纵列式交叉口之间的差距开始缩小;当左转比例为 30%,常规纵列式交叉口的通行能力开始超过设置移位左转的纵列式交叉口。

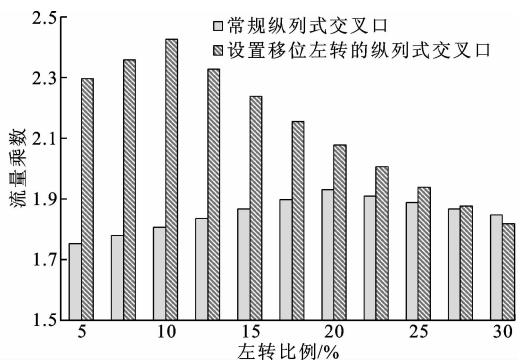


图 4 不同左转比例的交叉口流量乘数
Fig. 4 Common flow multipliers under different left-turn proportions

本文提出的设置移位左转的纵列式交叉口可以有效提高交叉口的通行能力,尤其在左转比例较小的情况下。在左转比例较大的情况下,设置移位左转的纵列式交叉口的优势开始减弱,甚至不如常规的纵列式交叉口。

5 结 语

(1)提出的设置移位左转的纵列式交叉口可以显著的提升交叉口的通行能力,与常规交叉口相比,设置移位左转的纵列式交叉口可以提升 60%~80%的通行能力,与纵列式交叉口相比,设置移位左转的纵列式交叉口可以提升 1%~31%的通行

能力。

(2)针对设置移位左转的纵列式交叉口特征所提出的优化模型,可以确定与优化设置移位左转的纵列式交叉口车道标志及渠化、移位左转车道长度、整理区长度、信号配时方案。

(3)设置移位左转的纵列式交叉口的使用需要结合实际的交通条件,其更适合交叉口流量较大、左转比例较小的情况;而对于左转比例较高时,常规纵列式交叉口的表现更优。

(4)在交叉口长期不饱和的情况下,设置移位左转的纵列式交叉口并不适用,此时通行能力的提升对交叉口的意义不大,且移位的左转设置还会带来额外的延误,并可能引起安全问题。

(5)后续的研究需要重点关注影响设置移位左转的纵列式交叉口的各种因素,以及其实际应用效果。由于需要对左转车辆进行移位设置,因而设置移位左转的纵列式交叉口必将对车辆的延误产生影响,这也是在未来研究中需要重点考虑的。

参考文献:

References:

- [1] HURLEY J. Utilization of auxiliary through lanes at signalized intersections with downstream lane reductions [J]. Transportation Research Record, 1997 (1572):167-173.
- [2] TARAWNEH M. Utilization of auxiliary through lanes at intersections of four-lane, two-way roadways [J]. Transportation Research Record, 2000 (1737): 26-33.
- [3] 吴梦倩,袁黎,崔二娟,等.平面交叉口港湾式左转车道安全设计[J].公路交通技术,2012(2):118-121.
WU Meng-qian, YUAN Li, CUI Er-juan, et al. Safety design of harbor type left-turn lane at grade crossing [J]. Technology of Highway and Transport, 2012 (2):118-121.
- [4] ZHANG Y, TONG J. Modeling left-turn blockage and capacity at signalized intersection with short left-turn bay [J]. Transportation Research Record, 2008 (2071):71-76.
- [5] XUAN Y, DAGANZO C F, CASSIDY M J. Increasing the capacity of signalized intersections with separate left turn phases [J]. Transportation Research Part B, 2011, 45(5):769-781.
- [6] 傅立骏,郭海锋,董红召.基于动态交通流量的可变车道自适应控制方法[J].科技通报,2011,27(6):

899-903.

- FU Li-jun, GUO Hai-feng, DONG Hong-zhao. An adaptive control method of variable lane based on dynamic traffic flow[J]. Bulletin Science and Technology, 2011, 27(6):899-903.
- [7] ZHAO J, MA W, 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(2355):49-59.
- [8] YIN Y, LI M, SKABARDONIS A. Offline offset refiner for coordinated actuated signal control systems [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133 (7):423-432.
- [9] MA W, XIE H, LIU Y, et al. Coordinated optimization of signal timings for intersection approach with presignals[J]. Transportation Research Record, 2013 (2355):93-104.
- [10] 赵冬斌,刘德荣,易建强.基于自适应动态规划的城市交通信号优化控制方法综述[J].自动化学报, 2009, 35(6):676-681.
ZHAO Dong-bin, LIU De-rong, YI Jian-qiang. An overview on the adaptive dynamic programming based urban city traffic signal optimal control[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6):676-681.
- [11] GOLDBLATT R, MIER F, FRIEDMAN J. Continuous flow intersections[J]. ITE Journal, 1994, 64(7): 35-35.
- [12] HUMMER J E. Unconventional left-turn alternatives for urban and suburban arterials—Part one[J]. ITE Journal, 1998, 68(9):26-29.
- [13] REID J D. Using quadrant roadways to improve arterial intersection operations[J]. ITE Journal, 2000, 70 (6):34-45.
- [14] ZHAO J, MA W, HEAD K L, et al. Optimal operation of displaced left-turn intersections: A lane-based approach[J]. Transportation Research Part C, 2015, 61:29-48.
- [15] ZHAO J, MA W, HEAD K L, et al. Optimal intersection operation with median U-turn: Lane-based approach [J]. Transportation Research Record, 2014 (2439):71-82.
- [16] YAN C, JIANG H, XIE S. Capacity optimization of an isolated intersection under the phase swap sorting strategy[J]. Transportation Research Part B, 2014, 60:85-106.
- [17] 智慧交通 114. 深圳“排阵式”交通控制方式应用情况及效果[EB/OL]. (2017-06-05)[2018-12-15]http://www.sohu.com/a/146249946_649849.

(下转第 126 页)