

信号交叉口禁左车流交通组织设计

李爱增¹, 贾俊波¹, 张亚飞¹, 李文权²

(1. 河南城建学院 土木与交通工程学院, 河南 平顶山 467036; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要:合理组织禁左车流能够减少左转车辆的绕行延误. 考虑城市道路双向机动车间为隔离栏的情况, 采用排队论和概率论方法研究了“右转—掉头—直行”和“直行—掉头—右转”两种间接左转模式下掉头开口距离交叉口停车线距离的计算方法, 得到“右转—掉头—直行”模式下右转车辆与相交道路直行车辆协调控制与不协调控制时掉头开口距离交叉口停车线距离的计算模型; 得到“直行—掉头—右转”模式下路段设置信号灯与交叉口信号协调控制以及路段不设置信号灯时掉头开口距离交叉口停车线距离的计算模型; 提出了协调控制时路段信号的“早断早启”技术及“早断早启”时间的计算方法. 实例分析表明: 间接左转交通组织方案可行, 对于改善交叉口运行状况效果明显.

关键词:禁左车流; 排队论; 概率论; 交通组织设计; 协调控制; 信号交叉口

中图分类号: U491.2 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.011

0 引言

交叉口禁左既有利于提高交叉口的通行能力, 又有利于交通安全, 但现实生活中左转车辆绕行严重, 延误增加. 为此, 许多学者对交叉口左转车流间接左转的方法进行了研究, 目前主要的间接左转方法有“右转—掉头—直行”和“直行—掉头—右转”两种, 其中“右转—掉头—直行”也有学者称之为“右转+U型弯”. 现有文献主要从交通安全^[1-2]、通行能力^[3]、设置条件^[2]、延误^[4]和经济^[5]等方面进行了分析. 针对具体的掉头车道设计, 张国华^[6]提出“右转+U型弯”模式下中央分隔带的宽度要求, 以及转换车道与交叉口之间的距离要求, 但没有给出该距离的具体确定方法. 王富^[7]提出了“右转+U型弯”模式下中央隔离带回转开口与主交叉口距离、中央开口半径和通道宽度的计算方法, 但没有考虑车辆交织的影响. 文献[8]从安全和通行效率的角度, 分析了“右转+U型弯”模式下, 不同道路条件的掉头开口距上游支路出口应保证的最短距离. 文献[9]研究了“直行—掉头—右转”模式下车辆转弯半径及中央分隔带的开口形式、宽度要求, 并采用

HCM2000 中高速公路 C 型交织理论研究了中央分隔带的开口距离要求. 从现有研究成果来看, 学者主要分析了双向机动车之间为分隔带时掉头车道的设置方法. 但在城市道路中, 由于用地的制约, 大部分道路的双向机动车之间是隔离栏而不是分隔带, 因此现有研究成果使用条件受限. 另外, 隔离带开口距离交叉口的距离也需要结合城市道路交通流的具体特征进行深入分析.

笔者将研究双向机动车之间为隔离栏时, “右转—掉头—直行”和“直行—掉头—右转”的间接左转设置方法, 从而保证间接左转车辆即不对路段车辆产生过大影响, 又能使其快速通过.

1 间接左转交通组织方案

城市道路交叉口禁左时, 左转车流可采用两种模式实现间接左转, 如图 1 所示.

2 “右转—掉头—直行”交通模式

这种交通组织模式下, 根据右转车辆与相交道路直行车辆的相位设计, 可分为两种情况.

2.1 右转车辆与相交道路直行车辆协调控制

右转车辆与本向直行车辆同时放行, 当相交

收稿日期: 2015-06-14; 修订日期: 2015-07-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA11Z210); 国家自然科学基金资助项目(50978057)

作者简介: 李爱增(1972—), 男, 河南汝州人, 河南城建学院副教授, 博士, 主要从事交通流理论与通行能力研究,

E-mail: liaizeng@163.com.

道路直行车辆放行时,右转车辆与本向直行车辆禁止通行.该模式下,右转车辆中的左转车可以方便地由道路外侧车道移动到内侧车道的掉头开口处.此时,掉头开口距离停车线的距离为相交道路

进口道直行车辆排队长度、掉头后待直行的左转弯车辆排队长度、路段隔离栏处左转弯车辆掉头时所需的回转长度,以及掉头开口的合理长度 4 部分的和.

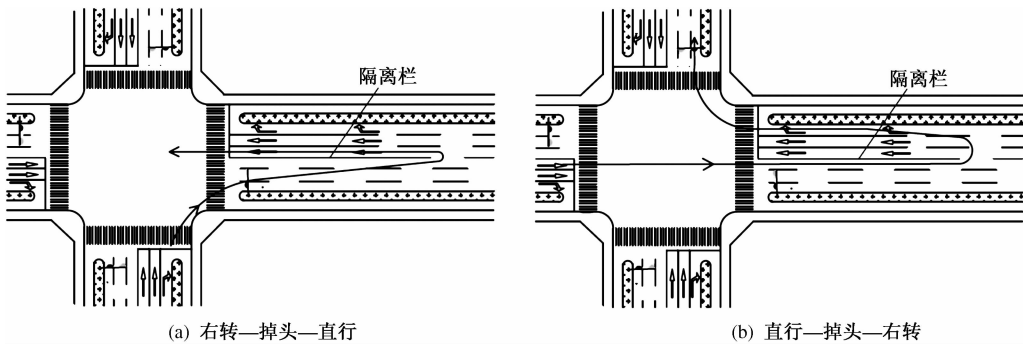


图 1 间接左转组织方案

Fig. 1 Organization modes of indirect left-turn traffic flow

①直行车辆排队长度 L_{11} . 记一个周期内直行车辆的红灯时间为 t_{tr} , s; 直行绿灯启亮后启动波追上停车波的时间为 t_{tw} , s; 直行绿灯启亮后的启动波波速为 V_{tw} , m/s; 直行车辆到达率为 q_t , veh/s; 直行车辆停车时的停车间距为 h_{ts} , m; 交叉口进口道直行车道数为 n_t . 则

$$L_{11} = q_t(t_{tr} + t_{tw})h_{ts}/n_t = (t_{tr} + L_{11}/V_{tw})q_th_{ts}/n_t; \quad (1)$$

$$h_{ts} = h_1 \cdot p_{t1} + h_2 \cdot p_{t2} + h_3 \cdot p_{t3}, \quad (2)$$

式中: h_1 、 h_2 、 h_3 为小型车、中型车、大型车停车时的停车间距, m; p_{t1} 、 p_{t2} 、 p_{t3} 为直行车道中小型车、中型车、大型车所占比例.

由式(1)、式(2)可得

$$L_{11} = q_t t_{tr} h_{ts} V_{tw} / (n_t V_{tw} - q_t h_{ts}). \quad (3)$$

②左转弯车辆排队长度为 L_{12} . 计左转弯车辆的到达率为 q_l , veh/s; 启动波在左转排队车辆中的传递时间为 t_{lw} , s; 左转弯车辆停车时的停车间距为 h_{ls} , m. 则

$$L_{12} = q_l(t_{tr} + t_{tw} + t_{lw})h_{ls}/n_t = (t_{tr} + L_{11}/V_{tw} + L_{12}/V_{tw})q_l h_{ls}/n_t; \quad (4)$$

$$h_{ls} = h_1 \cdot p_{l1} + h_2 \cdot p_{l2} + h_3 \cdot p_{l3}. \quad (5)$$

则由式(4)、式(5)可得

$$L_{12} = (q_l t_{tr} h_{ls} V_{tw} + q_l h_{ls} L_{11}) / (n_t V_{tw} - q_l h_{ls}). \quad (6)$$

式中: p_{l1} 、 p_{l2} 、 p_{l3} 为左转弯中小型车、中型车、大型车所占比例; 其它符号意义同前.

③左转弯车辆掉头时的回转长度为 L_h . 如果双向机动车之间为隔离栏, 在满足大型车顺利回转的情况下, 可取 L_h 为 12 m^[9].

④掉头开口长度 L . 掉头开口长度大小会影响城市道路的通行能力^[3]. 根据城市道路交通状况, L_o 可取 8 m^[9].

⑤掉头开口距离停车线距离 L_1 .

$$L_1 = L_{11} + L_{12} + L_h + L_o = L_{11} + L_{12} + 20. \quad (7)$$

2.2 右转车辆与相交道路直行车辆不协调控制

该情况下, 右转车辆中的左转掉头车辆可以利用本向直行绿灯时间或相交道路绿灯时间由道路外侧车道横移到内侧车道.

2.2.1 利用本向直行绿灯时间变换车道

此时, 掉头开口距交叉口停车线距离的计算公式与式(7)相同, 计该距离为 L_{21} , 则 $L_{21} = L_1$.

2.2.2 利用相交道路绿灯时间变换车道

该情况下, 掉头左转弯车辆需由道路最外侧车道寻找左侧相邻车道上的车辆间隙逐步向内侧车道合流. 当车辆转移到最内侧车道掉头后, 可随相交道路直行车辆在绿灯时间内通过交叉口.

①等待汇入段长度为 L_d . 先分析掉头车辆由最外侧车道向外侧 2 车道合流时的合流段长度. 此时, 外侧 2 车道的车头时距分布是影响车辆合流的一个重要因素. 对于城市道路, 可用 M3 分布对车头时距进行描述^[10-13], 对于 M3 分布

$$P(h \geq t) = \begin{cases} 1, & t < t_m \\ \phi e^{-\gamma(t-t_m)}, & t \geq t_m \end{cases}, \quad (8)$$

式中: ϕ 为自由车流比例; γ 为衰减常量; t_m 为最小车头时距, s. 这几个参数之间存在着如下关系: $\gamma = q\phi/(1 - qt_m)$, 其中, q 为车道流量, veh/s.

记掉头车辆能够汇入外侧 2 车道的临界间隙

为 t_c , 则以 t_c 作为判断标准, 在外侧 2 车道的 n 个车头时距中大于等于临界间隙 t_c 的车头时距个数 X 服从参数为 n, p_c 的二项分布, 即 $X \sim b(n, p_c)$. 则

$$p_k = P\{X = k\} = C_n^k p_c^k q_c^{n-k}, k = 0, 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

式中: p_c 为车头时距 h 大于等于临界间隙 t_c 的概率; $q_c = 1 - p_c$.

当外侧 2 车道车头时距服从 M3 分布时,

$$p_c = P(h \geq t_c) = \phi e^{-\gamma(t_c - t_m)}. \quad (10)$$

由二项分布定义, 当 $k = 0$ 时, p_0 为外侧 2 车道的 n 个车头时距中出现了 0 个车头时距大于等于 t_c 的概率, 则 $\sum_{k=1}^n p_k = 1 - p_0$ 为外侧 2 车道 n 个车头时距中允许车辆完成合流的概率. 令

$$\sum_{k=1}^n p_k = 1 - p_0 \geq \alpha, \quad (11)$$

α 为能使掉头车辆成功汇入外侧 2 车道的概率, 可取较大的值. 将上述计算的 p_c, q_c 代入式 (11), 即可得到掉头车辆成功汇入外侧 2 车道时所需的外侧 2 车道的车头时距个数 n .

$$n = \ln(1 - \alpha) / \ln[1 - \phi e^{-\gamma(t_c - t_m)}]. \quad (12)$$

则由车速 V (km/h) 及流量 Q (veh/h), 可得

$$L_d = 1000nV/Q. \quad (13)$$

② 掉头车辆换车道距离 L_s . 取掉头车辆的换车道时间 t_s 为 $2 \sim 3$ s^[14-15], 则

$$L_s = Vt_s/3.6. \quad (14)$$

③ 掉头车辆交织段总长度 L_j . 假设路段车道数为 n' , 则

$$L_j = (n' - 1)(L_d + L_s). \quad (15)$$

④ 掉头开口距离停车线距离 L_{22} . 取左转车辆掉头时的回转长度 L_h 为 12 m^[9]; 取掉头开口长度 L_o 为 8 m^[9]. 另外, 不协调控制时考虑掉头车辆右转时受相交道路非机动车的影响, 结合城市道路设计要求, 总长度中加上影响段长度 10 m. 得

$$L_{22} = L_j + L_h + L_o + 10 = (n' - 1)(L_d + L_s) + 30. \quad (16)$$

不进行协调控制时掉头开口距离停车线的距离为 L_2 ,

$$L_2 = \max(L_{21}, L_{22}). \quad (17)$$

3 “直行—掉头—右转”交通模式

根据掉头开口处是否设置路段信号灯与交叉口信号灯协调控制, 该模式可分为两种情况.

3.1 设置信号灯协调控制

该种情况下的交通组织模式如图 2 所示.

该模式下, 当交叉口直行车辆放行时, 路段信

号灯也放行; 当交叉口直行红灯时, 路段信号灯也红灯. 但为了保证掉头车辆在尽可能短的距离内实现掉头右转, 并不影响路段直行车辆正常通过交叉口, 路段信号灯绿灯需采取“早断早启”技术. 早断时间应保证绿灯末尾由路段停车线驶向交叉口的车辆到达交叉口时能赶上交叉口绿灯末尾通过; 早启时间应保证路段停车线处车辆由停车线驶向交叉口时, 交叉口绿灯刚好开启.

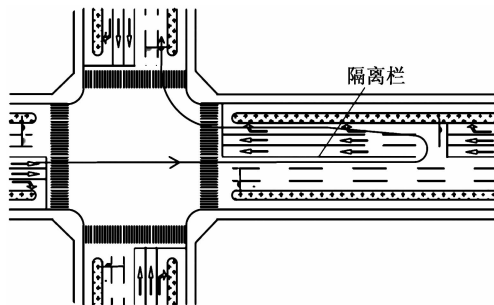


图2 路段信号协调控制图

Fig. 2 Coordination-control diagram of road median-opening signal

3.1.1 掉头开口距离交叉口停车线距离 L_3

① 左转车辆排队长度 L_{31} . 协调控制时, 绿灯期间随直行车辆一起通过交叉口的左转车辆需在隔离栏开口处排队等待

$$L_{31} = t_{lg} q_1 h_{ls}, \quad (18)$$

式中: t_{lg} 为一个信号周期内直行车辆的绿灯时间, s; 其它符号意义同前.

② 掉头开口距交叉口停车线距离 L_3 . 取左转车辆掉头时的回转长度 L_h 为 12 m^[9]; 取掉头开口长度 L_o 为 8 m^[9]. 则

$$L_3 = L_{31} + L_h + L_o = t_{lg} q_1 h_{ls} + 20. \quad (19)$$

3.1.2 路段信号“早断早启”时间 t_e

$$t_e = L_3 / V_a. \quad (20)$$

式中: V_a 为交叉口处车辆车速, m/s, 根据《城市道路工程设计规范》 V_a 可取路段车速的 $0.5 \sim 0.7$ 倍.

3.2 不设置信号灯控制

此时, 左转车辆回转掉头后需不断地由对向内侧车道交织至外侧车道, 交织过程与“右转—掉头—直行”模式中车辆的交织过程相同.

① 车辆掉头后的交织段长度 L_{41} . 同“右转—掉头—直行”模式分析方法,

$$L_{41} = (n' - 1)(L_d + L_s). \quad (21)$$

② 掉头开口距离停车线的距离 L_4 . 取左转车辆掉头时的回转长度 L_h 为 12 m^[9]; 取掉头开口长度 L_o 为 8 m^[9]. 另外, 考虑掉头车辆右转时受交叉

口非机动车的影响,总长度中加上影响段长度 10 m. 得

$$L_4 = L_{41} + L_o + L_h + 10 = (n' - 1)(L_d + L_s) + 30. \quad (22)$$

4 算例分析

以平顶山市长安大道与和谐路交叉口为例. 该交叉口东西向长安大道为城市主干道,双向 8 车道;南北向和谐路为城市次干道,双向 4 车道. 该交叉口采用三相位信号控制,信号相位及配时分别为:南北直左,绿灯 43 s;东西直,绿灯 53 s;东西左,绿灯 20 s;黄灯均为 3 s;右转常绿;周期总长度 125 s. 该交叉口现状:东、南、西、北 4 个进口的左、直、右交通量分别为:140、817、80; 93、114、210;125、834、188; 42、93、122 veh/h.

根据该交叉口现状,在东西进口采取“直行—掉头—右转”的间接左转方式. 经调查,路段平均车速为 35 km/h, t_c 为 3.44 s, t_m 为 2.20 s. 经计算,当路段不设置信号灯协调控制及设置信号灯协调控制时,东西进口掉头开口距交叉口停车线的距离分别为 166 m 和 174 m, 36 m 和 38 m. 协调控制时,东西进口路段信号灯绿灯“早断早启”时间分别为 6.17 s 和 6.51 s. 间接左转后该交叉口采用两相位控制,信号相位及配时分别为:南北直左,绿灯 32 s;东西直,绿灯 62 s;黄灯均为 3 s;右转常绿;周期总长度 100 s.

对交叉口间接左转前后的车辆延误利用 Webster 公式进行计算. 经计算,间接左转前,交叉口平均延误为 23.2 s,间接左转后,不进行信号协调控制和协调控制时,交叉口平均延误比现状分别减少了 7.2 s 和 11.2 s,效果明显.

5 结论

(1)“右转—直行—掉头”模式. 当右转车辆与相交道路直行车辆协调控制时,采用排队论方法得到掉头开口距停车线距离的计算方法. 右转车辆与相交道路直行车辆不协调控制时,分别采用排队论和概率论方法得到右转车辆利用本向直行绿灯时间和相交道路绿灯时间变换车道时掉头开口距停车线距离的计算方法,进而得到不协调控制时掉头开口距停车线距离的计算方法.

(2)“直行—掉头—右转”模式. 当路段开口设置信号灯与交叉口信号灯进行协调控制时,采用排队论方法得到掉头开口距交叉口停车线距离的计算方法,并提出路段信号“早断早启”技术及“早断早启”时间的计算方法. 当路段开口不设置信号灯时,采用概率论方法得到掉头开口距交叉

口停车线距离的计算方法.

参考文献:

- [1] MALLAH M T. Development of a conflict rate prediction model at unsignalized intersections[D]. Tampa: College of Engineering University of South Florida, 2003.
- [2] YANG X K. CORSIM-based simulation approach to evaluation of direct left turn vs. right turn plus U-turn from driveways[D]. Tampa: College of Engineering University of South Florida, 2001.
- [3] LIU P, LU J J, HU F X, et al. Capacity of U-turn movement at median openings on multilane highways[J]. Journal of transportation engineering, 2008, 134(4): 147-154.
- [4] 马万经, 杨晓光. 信号控制交叉口群左转交通协调设计方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(11): 1507-1511, 1525.
- [5] 陈宽民, 罗志忠. 平面交叉口左转车流特性分析及对策研究[J]. 公路交通技术, 2006(2): 114-118.
- [6] 张国华. 信号交叉口设计及微观仿真研究[D]. 北京: 北方交通大学交通运输学院, 2000.
- [7] 王富, 李杰, 石永辉. 左转远引交叉口交通组织与几何参数研究[J]. 中国市政工程, 2010(2): 1-3, 74.
- [8] ZHAO R L, FAN J J, LIU P. Selection of optimal U-turn locations for indirect driveway left-turn treatments on urban streets[J]. Journal of southeast university, 2010, 26(4): 628-632.
- [9] 闫志蕊. 远引左转掉头中央分隔带开口间距的研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2014.
- [10] 邵长桥. 平面信号交叉口延误分析[D]. 北京: 北京工业大学建筑工程学院, 2002.
- [11] KYTE M, KITTELSON W, ZHONG T Z, et al. Analysis of traffic operations at all-way stop-controlled intersections by simulation[J]. Transportation research record, 1996(1555): 65-73.
- [12] BUNKER J M, TROUTBECK R J. Microscopic modeling of traffic within freeway lanes[J]. Transportation research record, 1995(1510): 19-25.
- [13] SULLIVAN D P, TROUTBECK R J. An exponential relationship for the proportion of free vehicles on arterial roads[J]. Transportation research part A, 1997, 31(1): 21-33.
- [14] 吴建. 城市道路平面交叉口进口交织段车辆特性研究[D]. 南京: 东南大学交通学院, 2007.
- [15] 郑弘, 荣建, 任福田. 基于效用选择的换车道模型[J]. 公路交通科技, 2004, 21(5): 88-91.

Traffic Organization and Design of Left-turn Forbidden Traffic Flow on Signalized Intersections

LI Aizeng¹, JIA Junbo¹, ZHANG Yafei¹, LI Wenquan²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Reasonable organization of left-turn forbidden traffic flow could effectively reduce the left-turn vehicles delay through signalized intersection. There are barriers between two-direction vehicles, through the queuing and probability theory, the distance of two indirect left-turn modes from the road turn-around position to the intersection stop line was studied. To “right-turn, turn-around and through” mode, considering coordination-control or not for right-turn signal and intersecting-road through signal, the distance calculation model was established. To “through, turn-around and right-turn” mode, taking the two condition weather setting road median-opening signal to coordinate intersection signal into account, the distance calculation model was obtained too. To the “through, turn-around and right-turn” mode, when the coordination-control policy was adopted, the technique of “early-startup and early-stop” of road median-opening signal was put forward, and the calculation method of the time of “early-startup and early-stop” was put forward as well. The case study indicated that the indirect left-turn organization scheme was feasible, and had obvious effect on improving the operation of the signalized intersections.

Key words: left-turn forbidden traffic flow; queuing theory; probability theory; traffic organization and design; coordination-control; signalized intersections

(上接第 44 页)

[16] 靳凯文,李春葆,秦前清.基于蚁群算法的最短路径搜索方法研究[J].公路交通科技,2006,23(3):128-130,134.

[17] 唐亮,靖可,何杰.网络化制造模式下基于改进蚁群算法的供应链调度优化研究[J].系统工程理论与实践,2014,34(5):1267-1275.

Modified Ant Colony Algorithm and Its Application on Traffic Assignment Model

CHANG Yulin^{1,2}, WANG Xiaoting¹, ZHANG Peng¹

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Urban ITS, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: In order to more quickly and accurately search for the optimal path, an improved ant colony algorithm was established through analyzing the process of car arriving and departure in the signalized intersection. First of all, a new pheromone update model was put forward by improving properly the pheromone update function in traditional ant colony algorithm, which used signal control delay in the intersection and the travel time of vehicles in the road section as pheromone update operators. Then, road section incremental allocation process considering intersection delays, which was through partial distributing traffic flow in the network, was designed based on improved ant colony algorithm. Finally, flow distribution in the road network was simulated based on computer language, and the network running quality was compared with traditional ant colony algorithm. The experimental results showed that the improved ant colony algorithm, which could reduce road section and intersection using rate, was of good optimization ability, and could effectively balance the network traffic and alleviate the pressure of intersections.

Key words: traffic assignment; intersection delay; ant algorithm; optimal path