

基于轨迹数据分析的城市道路交叉口提前掉头设置研究

魏金丽, 姜鑫鑫, 李安琪, 张林浩

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要: 为了降低掉头车流对左转车流及对向车流的影响, 提高交叉口车辆通过率及安全性, 降低交通拥堵, 基于掉头车流轨迹数据建立模型, 对城市道路路段提前掉头车道设置问题进行研究。采用 Tracker 提取交叉口视频轨迹数据, 通过界定车辆掉头行驶过程中的转弯临界点, 确定掉头轨迹范围, 建立模型验证掉头轨迹与掉头开口宽度间的关系; 通过计算排队长度进一步确定掉头口设置位置, 通过 VISSIM 仿真验证优化方案的科学合理性。仿真结果表明, 优化后的方案相较原方案通行能力提高了 37%, 延误降低了 34.5%, 停车次数降低了 15%, 排队长度减少了 62.6%。验证了基于轨迹数据的车辆提前路段掉头设定方法的合理性和科学性, 为城市道路提前转向掉头的应用提供了一定的参考。

关键词: 掉头车道; VISSIM 仿真; 路段提前掉头; 轨迹数据; 排队长度; Tracker

中图分类号: U491.1⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)05-0119-08

Research on advanced U-turn settings at urban road intersections based on statistical data analysis

WEI Jinli, JIANG Xinxin, LI Anqi, ZHANG Linhao

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: In order to reduce the impact of U-turn traffic flow on left-turn traffic flow and opposing traffic flow, improve the vehicle passing rate and safety at intersections, and reduce traffic congestion, a model was established based on U-turn traffic flow trajectory data to study the issue of early U-turn lane setting on urban road sections. Tracker was used to extract the intersection video trajectory data, and the range of U-turn trajectories was determined by defining the critical turning points during vehicle U-turns. A model was then established to verify the relationship between U-turn trajectories and U-turn opening widths, and the location of U-turn openings was further determined by calculating the queue length. The scientific rationality of the optimization plan was finally verified through VISSIM simulation. The simulation results show that compared with the original solution, the optimized solution has a 37% increase in traffic capacity, a 34.5% reduction in delays, a 15% reduction in parking times and a 62.6% reduction in queue length. The rationality and scientificity of the vehicle U-turn setting method based on trajectory data are verified, providing a certain reference for the application of early U-turn on urban roads.

收稿日期: 2024-03-18

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2023MG058)

作者简介: 魏金丽(1982—), 女, 山东滨州人。硕士, 副教授, 主要从事城市公交系统分析及优化方面的研究。

E-mail: 632165430@qq.com。

Key words: U-turn lane; VISSIM simulation; early U-turn of road sections; trajectory data; queue length; Tracker

随着城市化进程的加快和机动车保有量的不断增加,道路交通拥堵现象日趋严重,给人们的出行带来了困扰。掉头车道作为一种重要的城市道路交通设施,在改善交通流量和减少交通事故方面具有一定的意义。掉头车道设置的合理性和安全性能提高交通效率,减少交通拥堵,进而改善出行条件,提升行车安全水平。

目前,国内外关于掉头车道设定的研究多侧重于设定条件、安全评价和效率评价等方面。杨建伟、邱美华等^[1-2]的研究主要是针对掉头车道的设置参数、不同组织方式进行分析,验证不同形式的掉头方案设置的适用性及合理性。韩高峰、梁鸣璋等^[3-4]的研究主要是选定评价指标,综合分析掉头方式评价和设计优化,通过 VISSIM 在典型应用环境下的微观模拟,为系统的性能评估和优化设计奠定理论基础。陈永恒、BARED、KIM 等^[5-7]的研究主要是分析比较不同掉头方式下交通流组织的车辆运行过程,通过对比分析,建立计算模型,进一步验证研究内容及方式的可行性。

总之,过去对城市掉头模式的研究主要是通过交通流特征、交叉口交通特性、安全性评价和通行能力等指标对不同掉头方式进行研究,对掉头车流轨迹及延误变化研究较少。为了进一步验证路段提前掉头的设置与左转交通之间的相互作用,提高交叉口通行效率,本文通过对路段提前掉头方式掉头轨迹建立模型,通过仿真验证路段提前掉头优化方案的可行性与科学性,为左转掉头路段提前掉头方式的设置提供一定的参考。

1 左转掉头车道的设置

左转掉头车道是城市道路交通设计中常见的一种交通设施,其设置对于交通流的合理组织和道路通行效率的提高起到了至关重要的作用。当设置左转-掉头并联车道时,一般需要对向车道留出充足的路面宽度,包括对向车道和中央分隔带宽度的总和。依据不同的路口形式及道路交通条件,左转与掉头合并车道在交叉口的掉头设置^[8]形式有3种:停止线前方交叉口内掉头、停止线后方掉头以及路段提前开口处掉头^[9],如图1所示。

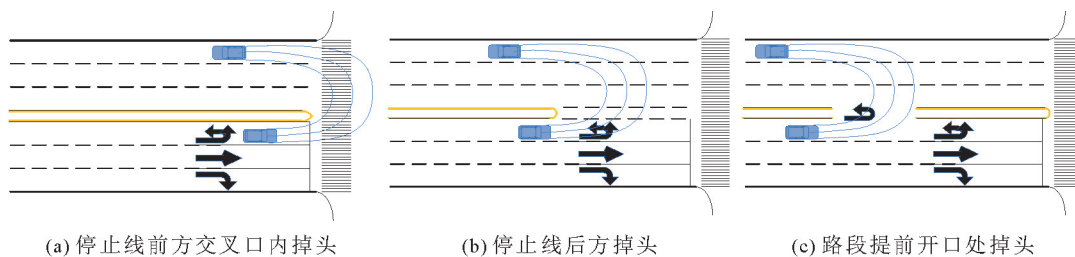


图1 左转掉头设置的3种形式

1.1 停止线前方交叉口内掉头

停止线前方交叉口内掉头是在交叉口内设置供车辆掉头使用的专用车道,通常与左转车道合并,主要用于解决交叉口附近车辆掉头需求较大的情况。这种类型的掉头车道通常与交通信号灯相配合,通过信号控制车辆的掉头行为,确保交通流的安全和顺畅。

当车道车流量小且不适合设置路段掉头回转车道时可采用这种形式,需要与左转车道共用信号控制,只有在左转相位时间内才能进行掉头,因此,掉头交通流和左转交通流混行,对左转交通流的运行效率有很大影响。且该设置形式下的掉头车辆在掉头时会穿越2次人行横道,较易与行人产生冲突。

1.2 停止线后方掉头

停止线后方掉头的形式适用于路段不适合设置掉头车道,左转和掉头车流相对较少的情况。采用这

种掉头形式,可以将左转车流和掉头车流进行分离,掉头车流不再受左转相位信号控制,可以选择对向车流较少,有可插间隙时进行掉头,这种掉头形式有利于提高掉头车辆和交叉口车流的通行效率,同时也可以避免掉头车辆 2 次穿越人行横道带来的冲突问题。

1.3 路段提前开口处掉头

路段提前开口处掉头主要用于解决交叉口附近或者非交叉口路段车辆掉头需求较大的情况。这种类型的掉头车道通常通过中央隔离带的设置,将道路分为 2 个方向,分别设置掉头车道,确保车辆掉头时的安全和顺畅。这种模式可以有效地避免路口的交通信号对掉头车辆通行造成的干扰,同时也可以有效地解决与行人交叉造成的冲突问题^[9]。但是,对对面直行车辆会产生一些影响,并且会产生合流冲突;如果左转车辆的队列长度超出了掉头转向口的位置,则需要左转相位的时候,与左转车一起排队等候,以达到掉头转弯的目的。当采用这种形式进行掉头时,其掉头位置需要根据多因素进行设置。

本研究主要对左转与掉头合并车道的路段提前开口处掉头的相关设置进行研究。

2 路段掉头设置的关键参数

判断路段掉头车流设置是否合理以及运行效率优劣的关键几何参数^[10]有:掉头开口宽度的大小、掉头开口位置以及掉头车流在开口处的排队长度。

2.1 掉头开口宽度大小设置

目前,国内多数城市道路中间分隔带均为双黄线+隔离栏,且交叉口间距较小,提前掉头设置存在许多问题。考虑到汽车的安全行驶,转弯口的宽度必须满足不同型号车辆转弯时的间距,中心隔离栏的转弯开口宽度应根据汽车转弯轨迹的宽度、转弯开始位置以及侧向摇摆的安全间距来确定,因此,中心隔离栏的掉头开口宽度 W_d 取决于车辆掉头轨迹的宽度 W_t 和开始转弯掉头位置 h 及横向摆动的安全距离 c ^[11],其函数关系如下:

$$W_d = W_t + 2c + h \quad (1)$$

式中: W_d 为中心隔离栏掉头开口宽度, m; W_t 为车辆掉头轨迹的宽度, m; c 为车辆横向安全距离, m; h 为驾驶员开始转弯位置, m。

根据波良可夫经验公式,车辆横向安全距离与车速的函数关系如下:

$$c = 0.4 + 0.02V^{0.75} \quad (2)$$

式中: V 为车速, m/s。

对青岛市黄岛区内中央分隔带为双黄线+隔离栏的城市道路进行调查,选定具有单通道(M/M/1)模式的掉头口,采用高空无人机分别在工作日高峰时段对选定掉头口进行每天不少于 30 min 的拍摄。因掉头车流相对左转和直行车流较少,采集的掉头车辆数据少且不连贯,经过对实际采集的 600 辆车掉头轨迹数据进行人工分析筛选处理,对选用的数据进行分组发现,车辆从开始掉头到顺利完成掉头行为的车速在 7 ~ 18 km/h,此处取显著值 14 km/h,车辆横向安全距离^[10] c 取 0.455 m。

通过对高空视频采集数据进行轨迹处理分析,每一辆车通行的轨迹有所差别,可以发现其总是处于道路中的相对范围之中,对掉头范围进行定点分析,模拟出轨迹范围大致如图 2 所示。

通过观察所收集的小型汽车转弯路径数据,发现当汽车在最小转弯半径范围内,车体内部到中心隔离栏双黄线中线的最大距离 d 为 3 m,在 d 超过 3 m 的情况下,车辆不会以此为转弯半径回转;随着 d 的变化,车辆转弯轨道的宽度 W_t 也发生了变化,图 3 和图 4 中表示出了 W_t 和 d 的关系。

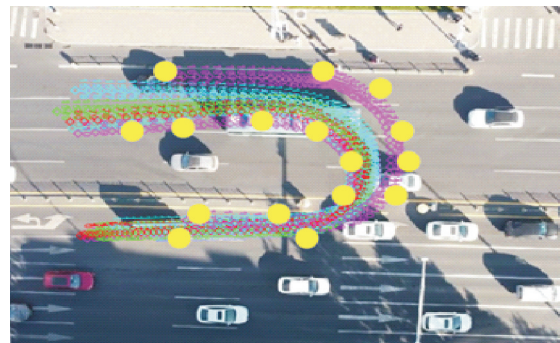


图 2 车辆掉头运行轨迹范围定点
● 标示轨迹范围定点

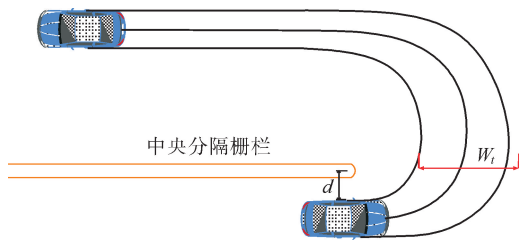


图3 车辆以最小转弯半径掉头运行轨迹

使用 SPSS 软件对上述轨迹宽度变化数据进行相关性回归分析,结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出,立方拟合度 $R^3 = 0.994$ 相比平方拟合度 $R^2 = 0.973$ 更高,所以 W_t 与 d 值之间的函数关系为

$$W_t = -0.05d^3 + 0.5d^2 - 1.7d + 5.53 \quad (3)$$

当汽车没有在最小半径内进行回转的时候,由于车速较小忽略车身摆动偏移产生的横向值,此时 W_t 与 d 值之间的函数关系为

$$W_t = W_v + \frac{(d_1 + d_2)^2}{2R} \quad (4)$$

式中: W_v 为车身宽度, m; d_1 为车辆轴距, m; d_2 为车辆前悬, m; R 为车辆转弯半径, m。

综合分析式(1)和式(2)可得 W_t 与 d 之间的函数关系为

$$W_t = \begin{cases} -0.05d^3 + 0.5d^2 - 1.7d + 5.53, & d \leq 3.0 \\ 1.8 + \frac{21.16}{2d + 3.6}, & d > 3.0 \end{cases} \quad (5)$$

本次研究驾驶员开始进行转弯掉头的位置选择范围长度 h 的取值为 2.6 m, 结合式(1)则能够得到中心隔离栏掉头开口间距 W_d 的计算模型为

$$W_d = \begin{cases} -0.05d^3 + 0.5d^2 - 1.7d + 9.04, & d \leq 3.0 \\ 5.31 + \frac{21.16}{2d + 3.6}, & d > 3.0 \end{cases} \quad (6)$$

根据上述模型,可以计算出城市道路中常见的不同道路条件下的掉头开口宽度参考值。

2.2 掉头车道开口位置设置

将掉头点设在引导车道的上游,以减缓交叉口内的通行压力,并避免掉头行为对过街行人通行产生影响。当掉头开口到上游路口的距离 L 过小时,排队等候转弯掉头的车辆有可能妨碍左转弯车辆的正常交通;反之,如果 L 与上游路口相距过远,会增加掉头车辆的绕行距离,从而使设立提前掉头口的优势丧失。此外,当掉头口设置在下游交叉口的功能区域时,行车环境将更为复杂,各车间的交互作用也将增强,从而提高交通事故的风险。因此,合理确定掉头口的位置对于保障交叉口车流的顺畅运行至关重要。

在将掉头的位置设定在路段内的情况下,掉头开口与停车线之间的距离 L 应当大于左侧转弯的最大排队长度 L_a 、直行的最大排队长度 L_b 和引导车道的长度 L_c , 并且,为使要进入左侧车道的车辆不被等候转向的车辆所挡住,在转弯掉头口的位置还要留出可供 1 辆车变换车道的必要长度 L_t , 如图 6 所示。

则上述的函数关系^[12]为

$$L \geq \max(L_a, L_b, L_c) + L_t \quad (7)$$

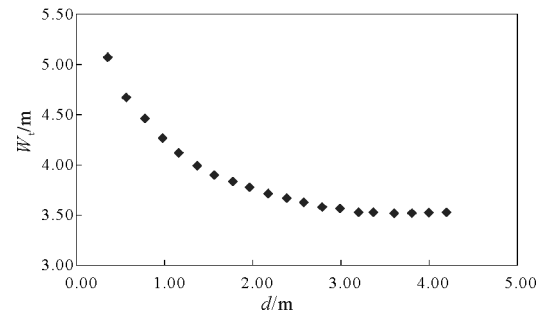


图4 小型汽车转弯 W_t 变化曲线

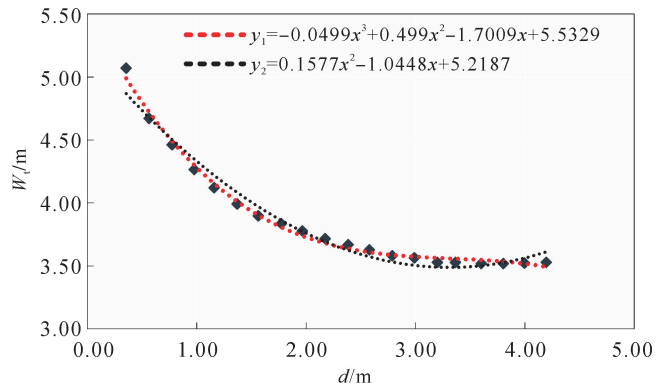


图5 轨迹宽度变化曲线拟合结果

式中: L 为掉头出口与停止线之间的距离, m ; L_a 为左侧转弯的最大排队长度, m ; L_b 为直行的最大排队长度, m ; L_c 为引导车道长度, m ; L_t 为车辆变换车道的必要长度, m 。

根据稳态延迟理论,非饱和条件下交叉口入口处排队车辆最大个数 N 的计算模型是:

$$N = \begin{cases} q \cdot r / 3600 + 1.5(x - x_0) / (1 - x), & x > x_0 \\ q \cdot r / 3600, & x \leq x_0 \end{cases} \quad (8)$$

$$x_0 = 0.67 + S \cdot g / 600 \quad (9)$$

式中: q 为高峰时段车辆到达率, $辆/h$; r 为红灯时间, s ; x 为饱和度; S 为饱和流量, $辆/h$; g 为有效绿灯时间, s 。

超饱和状态下最大排队车辆数的计算模型为

$$N = Q \cdot r / 3600 + q \cdot t / 3600 - Q \cdot t / 3600 \quad (10)$$

式中: Q 为实际交通量等于通行能力时的到达率, $辆/h$; t 为观察持续时间, s 。

根据《城市道路交叉口设计规程》(CJJ 152—2010)^[13],平均车头距为 9 m。因此,车辆排队长度 L_n 的^[14]计算方法为

$$L_n = 9 \cdot N \quad (11)$$

根据《城市道路交叉口设计规程》(CJJ 152—2010)^[13],渐变段长度是当机动车以设计速度 70% 连续穿越一条车道时,应按 3 s 的速度进行计算。车辆在减速变道到相邻车道^[15]时 L_t 为

$$L_t = \begin{cases} W_c \cdot V^2 / 155, & V \leq 60 \text{ km/h} \\ 0.625V \cdot W_c, & V > 60 \text{ km/h} \end{cases} \quad (12)$$

式中: W_c 为变换车道宽度, m ; V 为车速, km/h 。

综上所述,在引导车道上游设计 U 形转弯时,应根据式(8)一式(11)计算左转弯和直线的最大排队长度,然后根据式(12)计算变道长度,最后利用式(7)计算掉头转弯距离停车线的最小距离。

3 实例分析

3.1 现状分析

以青岛市某路段提前掉头车道为例,在工作日 17:00—19:00 通过高空无人机对目标交叉口及左转提前掉头车道进行多次拍摄并实地测量、采集交叉口数据。数据采集包括车道宽度、中央分隔带宽度、交叉口出口道宽度、导向车道长度、信号配时和车流量等。对采集的交叉口实际数据、车流量和信号配时进行人工筛选和梳理,最终得到交叉口实际数据。信号周期和车流量数据如表 1 所示。

据实际测量交叉口为双向四车道,西侧单车道宽度为 3 m,西侧出口道的宽度为 12 m(不包括非机动车道)。中心隔离栏间隔为 1.5 m,引导车道 L_c 为 33.64 m。现有掉头开口位置距离停止线长度 L 为 27 m。晚高峰交通量采用高峰小时交

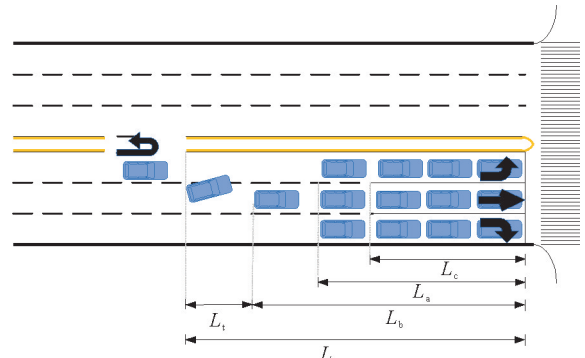


图 6 掉头口长度示意

表 1 实例路口数据

进口道	流向	排队长度/m	晚高峰交通量/(辆·h ⁻¹)	有效绿灯时间/s
东进口	左转	63.8	450	15
	直行	94.2	1890	30
	右转	32.7	30	110
西进口	左转	70.8	240	20
	掉头	—	90	110
	直行	72.12	2070	50
北进口	右转	20.25	260	110
	左转	27.12	30	15
	直行	19.82	120	15
南进口	右转	—	120	110
	左转	28.96	210	15
	直行	38.19	120	15
	右转	12.45	210	110

通量,例如在调查该交叉口西进口道直行车流量时,以17:00—19:00 2 h为基本调查时间,每15 min记录一次流量数据。通过观察得出,高峰小时发生在17:15—18:15时间段,流量之和为2070辆/h,高峰15 min流量发生在17:45—18:00,数值为533辆/15 min,得出该车道高峰小时系数PHF为0.971,最大排队长度测量结果为72.12 m,其余车道测量过程相同。

选取的十字路口信号配时周期是110 s,相位如图7所示。

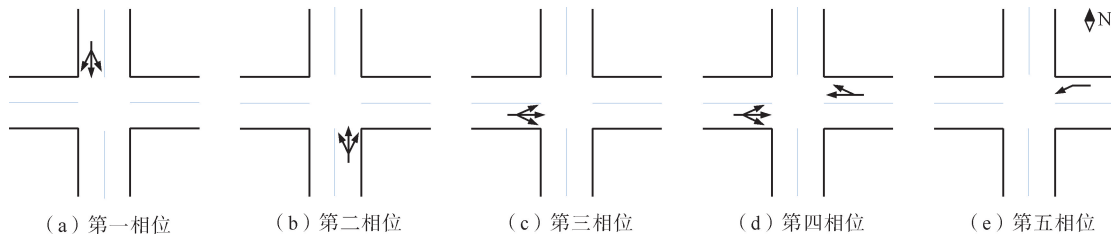


图7 实例路口相位

从上述数据可以看出,本次研究路口 L_c 远大于 L ,当有车辆在此处掉头等待时,不管信号灯处于何种状态都严重阻碍了左转车流的运行效率,需对现有掉头方案进行优化。

3.2 优化分析

根据式(6)计算得出本路口设置掉头口的开口宽度 W_d 参考值为8.03,现有掉头方案大于参考值,满足掉头车辆进行最小限度掉头,因此掉头开口宽度不予改动;根据现场实际测算和视频数据显示,左转最大排队长度为70.8 m,直行最大排队长度为72.12 m,车辆在实际变道时速度不超过60 km/h,平均速度为30 km/h,根据式(12)计算得出 L_t 为17.42 m。

对于在中心隔离栏进行路段提前掉头,根据式(7), L 应该大于 L_a 、 L_b 、 L_c ,还应预留 L_t 。因此优化方案将掉头开口位置从距离停车线27 m调整至距离停车线89.5 m。

为了进一步验证此优化方案,采用VISSIM对优化方案进行仿真验证。

3.3 仿真验证

选用VISSIM软件进行仿真建模,将道路在仿真软件VISSIM中按测量好的数据进行还原搭建,根据已知距离设置VISSIM中的距离缩放比例;将由视频观测得到的流量和车辆转向、车辆运行速度等参数输入到VISSIM模型中;根据信号配时方案设置相应的VISSIM信号配时;根据交通标线和车道功能设置相应的交通运行规则,仿真时间设置为1800 s。

对现有掉头方案设置进行仿真,在中心分隔栅栏进行路段提前掉头, L 应该大于 L_a 、 L_b 、 L_c ,还应预留 L_t ,而现有掉头方案很明显不符合这一条件,掉头口距离停止线仅27 m(图8)。仿真验证显示左转车辆排队等待时严重影响掉头车辆掉头效率,掉头车流在无左转车辆阻挡时,还受对向直行车流影响。

优化方案仿真是对掉头口设置在距离停止线89.5 m位置进行仿真验证,如图9所示。

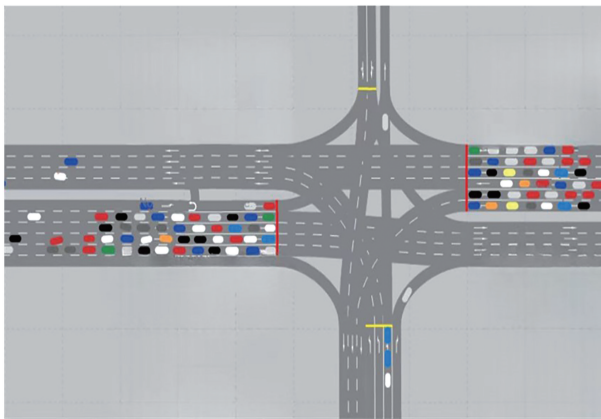


图8 原方案仿真

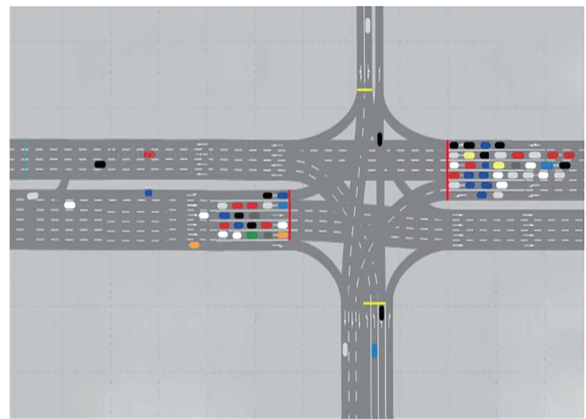


图9 优化方案仿真

从通行能力、车辆延误、车辆停车次数及排队长度对比分析该优化方案是否优于原掉头方案。数据对比分析如表2所示。

表2 优化方案数据对比分析

分析对比指标	通行能力/辆	车辆延误/s	车辆停车次数/次	排队长度/m
原掉头方案	241	168.6	1.06	72.00
优化方案	330	110.4	0.90	26.89

相比较优化前的方案,优化后的方案通行能力提高了37%,说明优化后的方案可以更好地提高左转掉头混用车道的通行效率,延误情况比原有方案降低了34.5%,优化后的平均车辆停车次数降低了15%,从仿真数据可以发现,优化后的排队长度减少了62.6%,极大地减少了排队等待时长,提高了交叉口通行效率。因此,相较原掉头方案,优化后掉头方案更适用于该交叉口的掉头设置。

4 结论

本研究通过提取掉头车辆轨迹建立掉头轨迹模型,对比原路段提前掉头开口设置方式,结合建立的模型提出路段提前掉头开口设置的优化方案,验证城市道路路段提前掉头开口设置的合理性,为城市道路路段提前掉头开口设置提供了一定的参考依据。

1) 提出掉头轨迹宽度 W_t 与车身内侧至双黄线之间距离 d 的关系,运用回归分析法建立掉头轨迹模型。

2) 根据掉头车道设置应大于车道的最大排队长度,且需留出变道所需长度的理论方法,建立了路段提前掉头开口位置确定公式。

3) 运用 VISSIM 仿真软件进行有效验证,验证了优化方案比原有方案通行能力提高了37%,延误降低了34.5%,平均车辆停车次数降低了15%,排队长度减少了62.6%。

本研究的不足在于只考虑了中央分隔形式为中央分隔栅栏和双黄线的类型,未考虑有绿化带的中央分隔带形式的不同中央分隔带宽度,没有对车型进行区分,未考虑平峰和高峰的差异,以上不足将在此后的研究中进一步进行分析。

参考文献(References):

- [1] 杨建伟. 信控交叉口掉头车道交通设计研究[J]. 交通与运输, 2022, 35(S1): 97-100.
YANG Jianwei. Research on traffic design of U-turn lane at signalized intersection[J]. Traffic & Transportation, 2022, 35(S1): 97-100.
- [2] 邱美华, 叶丽敏, 胡爱秀, 等. 基于 VISSIM 的远引调头组织效果研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2021, 37(6): 731-738.
QIU Meihua, YE Limin, HU Aixiu, et al. Study on organizational effect of far lead U-turn based on VISSIM[J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2021, 37(6): 731-738.
- [3] 韩高峰, 叶雨霞. 基于车辆延误的左转车道远引掉头设置方法[J]. 交通节能与环保, 2019, 15(6): 58-61.
HAN Gaofeng, YE Yuxia. The methods of setting left-turn lane with U-turn based on vehicle delay[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2019, 15(6): 58-61.
- [4] 梁鸣璋, 孙凤英. 基于 VISSIM 的交叉口调头点设置仿真研究[J]. 森林工程, 2014, 30(1): 127-130.
LIANG Mingzhang, SUN Fengying. Study on setting U-turn points at intersection based on VISSIM simulation[J]. Forest Engineering, 2014, 30(1): 127-130.
- [5] 陈永恒, 曲昭伟, 郑倩. T型交叉口车辆远引掉头评价模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(S2): 150-153.
CHEN Yongheng, QU Zhaowei, ZHENG Qian. Evaluation model of U-turn at unsignalized T intersection[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(S2): 150-153.
- [6] BARED J G, KAISAR E I. Median U-turn design as an alternative treatment for left turns at signalized intersections[J]. ITE Journal, 2002, 72(2): 50-54.
- [7] KIM T, EDARA P K, BARED J G. Operational and safety performance of a nontraditional intersection design: The superstreet[C]// Transportation Research Board Meeting, Washington DC, 2007: 13P07-0312.

- [8] 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.
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.
- [9] 王二标. 浅析城市道路掉头车道及开口设置[J]. 安徽建筑,2018,24(6):253-254.
WANG Erbiao. A brief analysis of the U-turn lanes and opening settings of urban roads[J]. Anhui Architecture,2018,24(6):253-254.
- [10] 张小龙,赵界,李冰,等. 车辆提前掉头几何参数设置及阈值流量研究[J]. 公路交通技术,2022,38(1):135-141.
ZHANG Xiaolong,ZHAO Jie,LI Bing,et al. Vehicle early turnaround geometry parameter setting and threshold flow study[J]. Technology of Highway and Transport,2022,38(1):135-141.
- [11] 龚小婷. 城市干道路段掉头口设置研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2016.
GONG Xiaoting. Research on setting of mid-block U-turn opening on urban arterial[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2016.
- [12] 王宇轩. 城市道路交叉口进口道掉头交通设计方法研究[D]. 西安:长安大学,2019.
WANG Yuxuan. Research on design method of U-turn traffic at entrance of urban road intersection[D]. Xi'an:Chang'an University,2019.
- [13] CJJ 152—2010,城市道路交叉口设计规程[S].
CJJ 152—2010, Design code for urban road intersections[S].
- [14] SHAO H P,WANG Y X,CHEN X Y,et al. Setting conditions of U-turns at entrances of signalized intersections[J]. Journal of System Simulation,2018,30(11):4429-4436.
- [15] 张卫华,陈靖生,董瑞娟,等. T型交叉口主路左转远引设置方法及延误研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(11):91-96.
ZHANG Weihua,CHEN Jingsheng,DONG Ruijuan,et al. Research on the location of indirect left turn with U-turn at T-type intersections and delay[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science),2018,37(11):91-96.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)

(上接第 64 页)

- [5] BRACE W F,BYERLEE J D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes[J]. Science,1966,153:990-992.
- [6] BYERLEE J D. Frictional characteristics of granite under high confining pressure[J]. Journal of Geophysical Research,1967,72(14):3639-3648.
- [7] 刘畅,江权,阮航,等. 常法向应力下非连续结构面剪切破坏特征研究[J]. 岩土力学,2023,44(S1):173-185.
LIU Chang,JIANG Quan,RUAN Hang,et al. Shear failure characteristics of intermittent joints under constant normal stress[J]. Rock and Soil Mechanics,2023,44(S1):173-185.
- [8] 吴备创. 恒定法向应力条件下三维粗糙节理面剪切特性试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.
WU Beichuang. Experimental study on shear mechanical properties of 3D rough rock joint under constant normal stress conditions[D]. Chongqing:Chongqing University,2021.
- [9] ZHAO Z H,PENG H,WU W,et al. Characteristics of shear-induced asperity degradation of rock fractures and implications for solute retardation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2018,105:53-61.
- [10] MORAD D,HATZOR Y H,SAGY A. Rate effects on shear deformation of rough limestone discontinuities[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2019,52(6):1613-1622.
- [11] LIU C,JIANG Q,XIN J,et al. Shearing damage evolution of natural rock joints with different wall strengths[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2022,55(3):1599-1617.
- [12] ZHOU X P,HE Y,SHOU Y D. Experimental investigation of the effects of loading rate,contact roughness,and normal stress on the stick-slip behavior of faults[J]. Tectonophysics,2021,816:229027.
- [13] MENG F Z,WONG L N Y,GUO T. Frictional behavior and micro-damage characteristics of rough granite fractures[J]. Tectonophysics,2022,842:229589.
- [14] MENG F Z,WONG L N Y,ZHOU H,et al. Shear rate effects on the post-peak shear behaviour and acoustic emission characteristics of artificially split granite joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2019,52(7):2155-2174.
- [15] MENG F Z,ZHOU H,WANG Z Q,et al. Characteristics of asperity damage and its influence on the shear behavior of granite joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2018,51(2):429-449.
- [16] MENG F Z,SONG J,WONG L N Y,et al. Characterization of roughness and shear behavior of thermally treated granite fractures[J]. Engineering Geology,2021,293:106287.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)