

基于车道变换的立交最小净距模型

黄治炉^{1,2}, 陈宽民¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘 要:为了充分发挥城市外环路对不同车流对象的服务功能,解决两互通式立交之间因间距不够引起的各种交通问题,建立了两独立互通式立交之间的最小净距模型。分析了驾驶人对道路交通信息的发现、识别、分析、判断等心理、生理反应过程,建立了驾驶人车道变换模型,根据调查资料得出运行速度与驾驶人变道转角之间的回归关系,分析了驾驶人在寻找可接受间隙期间行驶的距离,得出了两互通式立交净距的关系模型,并结合深圳外环高速公路进行了实例分析。研究结果表明:距离较近的两互通立交之间宜适当减少非必要道路交通标志的设置;双向 6 车道设计速度分别为 100 km/h 和 80 km/h 时,互通立交之间的净距不宜小于 1 410 m 和 880 m;大型车比例较高或交通组织混合严重的互通式立交最小净距宜适当增加 180~200 m。

关键词:道路工程;互通式立交;城市外环快速路;最小净距;车道变换

中图分类号:U411

文献标志码:A

Interchange minimum spacing model based on the lane changing

HUANG Zhi-lu^{1,2}, CHEN Kuan-min¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CCCC First Highway Consultants Co. Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: The minimum spacing model between two independent interchanges was built in order to play the service function of different traffic objects sufficiently on urban external loop expressway and resolve the traffic problems caused by inadequate spacing between two independent interchanges. The driver's psychological and physiological reaction process to the identification, analysis, and judgement of road traffic information were analyzed and the model of driver lane changing was built. The regression relationship between running speed and lane changing steering angle was obtained from survey data, and the driving distance during the period of searching for an acceptable gap was analyzed. The relation schema of the spacing between two independent interchanges was obtained. Combined with the SJ1 contract segment on Shenzhen external loop expressway, this paper carried on instance analysis. The results indicate that non-essential road traffic signs between two closer interchanges should be decreased appropriately; when the design speed for six-lane two-way are 100 km/h and 80 km/h, the spacing between two independent interchanges should not less than 1 410 m and 880 m as to the interchanges with higher proportion of large vehicles or severely mixed traffic, the minimum spacing should be increased 180-200 m. 4 tabs, 7 figs, 16 refs.

Key words: road engineering; interchange; urban external loop expressway; minimum spacing; lane changing

0 引言

近年来,随着城市中心的不断发展,以中心城市为核心,不断向四周外扩充的环形放射式路网结构成了中国大都市外围发展的主流,连接各区域的城市外环快速道路成为广泛关注的重点,其能为各区域人们提供快速的交通出行条件,同时与过境高速公路连接,为过境车辆提供交通转换。但为了有效的解决平面交叉存在的交通冲突问题,提高道路的运行服务水平,过境高速公路与城市外环快速路之间往往采用互通式立交来连接。随着高速路网的发展,与城市外环快速路连接的两互通式立交之间的间距过近引起的交通流交织运行、交通拥堵和交通安全事故等问题,引起了各界学者的广泛关注。Bared 等从安全的角度对城市快速路互通立交之间的间距进行了探讨^[1];美国交通运输研究委员会从几何线形、交通量、安全、交通标志等因素出发对互通立交间距进行了相关的分析研究^[2],指出互通立交间距对交通安全运行的重要性,并提出了有关的建议值,但其是建立在当地交通流状况的基础上来分析的,中国互通立交之间间距的确定不能完全引用;高鲁宾等以重庆绕城高速为主,结合其他城市环线高速公路互通立交的设置,对互通立交密度进行探讨并提出有关对策措施^[3],但缺乏两互通立交之间间距大小的量化标准,适用性受到限制;张加华等对城市快速路互通立交最小间距进行了分析研究,但是均未提出统一的量化计算模型,实际应用受到了限制^[4-5]。除此之外,2004 年美国各州公路与运输工作者协会出版的“A Policy on Geometric Design of Highways and Streets”指出市区互通式立交最小间距的一般经验值是 1.6 km;《日本高速公路设计要领》中指出两互通式立体交叉中心间距至少为 1 km。

综上所述,城市外环快速路上互通式立交的间距还没有统一的规定,对于不同类型、不同结构、不同交通组成的两互通式立交之间的间距问题,规范文件中也没有较为明确的相关规定,部分城市外环高速路上两互通式立交之间的净距是否满足车辆运行的要求并没有进行定量的分析,对两互通式立交之间间距问题的定量分析还需进一步深入的研究。为此,本文以深圳外环高速公路为依托,从驾驶人在

城市外环高速公路上行驶对道路信息的获取和操作执行的生理心理特性分析出发,结合车辆变换车道的运动特性分析,建立了两独立互通式立交之间的净距模型,剔除了不同类型、不同结构的两互通式立交之间因变速车道长度的影响对互通式立交间距的影响,并且考虑了主线在不同设计速度和车道数的影响下两互通立交之间的净距模型,对工程实践中两互通立交之间间距的计算具有重要的指导意义和实用性。

1 城市外环路的特点及互通式立交净距的界定

1.1 城市外环路的特征分析

城市外环路是主干道级别以上的道路,是连接城市各区域之间的纽带,对解决过境、市际、区间和绕行交通有较大的优势,是公路和城市道路交通相互连接、转换的重要骨架道路,兼具有公路和城市道路的双重特性。

城市外环路上的互通式立交,是环线交通得以快速、安全、便利运行的“咽喉”。在功能上,既要服务于过境、市际交通快速周转运行,又要服务于区间和绕行交通实现交通转换的目的。若互通式立交密度过大,不仅不能给车辆提供快速、舒适的运行环境,而且上下快速路的车辆车道变换频繁,影响其交通功能的发挥并诱发交通安全问题的发生;同时各放射线或被交路的等级、交通量、交通组成不同,城市外环路互通式立交的型式和结构应区别对待,采用不同的技术标准。故本文基于车道变换模型的立交最小净距模型的建立对工程实践具有重要的指导意义。

1.2 互通式立交净距的界定

互通式立交净距是指在满足匝道几何布置、驾驶人视认标志和驾驶顺适的前提下,同一交通流方向前一互通式立交加速车道终点与后一互通式立交减速车道起点之间必须保持的距离。根据互通式立交匝道结构的不同,二者之间的连接方式可分为以下几种情况。

下页图 1(a)、图 1(b)所示的两互通式立交连接方式,主要针对两互通式立交之间的净距较小、车流之间存在交织运行的状况,为减少交织运行对直行交通的干扰而采取将前后两互通式立交的加速车道

和减速车道用辅助车道连接的方式;图 1(c)是两互通式立交之间的间距较大,交织运行对直行交通的影响较小,中间路段视为独立区域来设计,可有效节约工程占地和造价,提高互通式立交建设的经济效益。鉴于篇幅有限,本文主要针对图 1(c)所示的两互通式立交最小净距进行计算分析。

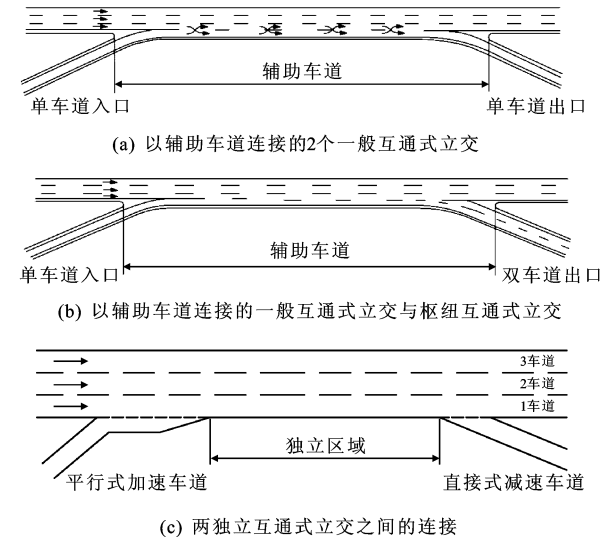


图 1 两互通式立交之间的连接方式

Fig. 1 Connection between the interchanges

2 两互通式立交最小净距模型分析

2.1 净距模型分析

根据驾驶人在道路上的行驶特性,两互通式立交之间的最小净距主要应考虑驾驶人在复杂的道路运行过程中,对道路信息的获取、分析及操作的可行性。对此本文运用最不利安全分析法(图 2),将其分为两部分:一是驾驶人对道路信息的获取和分析判断,即从驾驶人在前一互通式立交加速车道终点发现交通标志 AB,到对图形和字符的认识 BC,及相应的心理决策、反应过程 CE;二是操作执行阶段,即经驾驶人对道路信息的分析判断后,内侧车道车辆要在后一互通式立交匝道驶出,而进行的车道变换过程 EG。两互通式立交之间的最小净距 L_j 为

$$L_j = i + j + h + L \tag{1}$$

式中: i 为驾驶人发现交通标志的视认距离(m); j 为驾驶人对交通标志的认读距离(m); h 为驾驶人经判断分析操作的反应距离(m); L 为变换车道的操作距离(m)。

2.2 参数分析

2.2.1 信息的获取和分析阶段

相关研究表明^[6-8]:在驾驶活动中,信息的获取

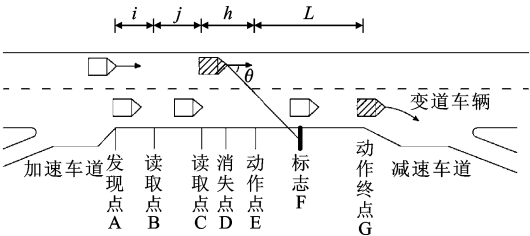


图 2 驾驶人对道路交通标志的视认过程

Fig. 2 Process of driver's visual recognition of road traffic signs

有 90% 以上通过视觉获得。车辆行驶过程中,道路环境和驾驶人都处于运动状态,驾驶人视觉特性及变化规律与静止状态不同,随着车辆运行速度的变化,驾驶人的视力、视野、视角、注意力等的变化如图 3 所示。

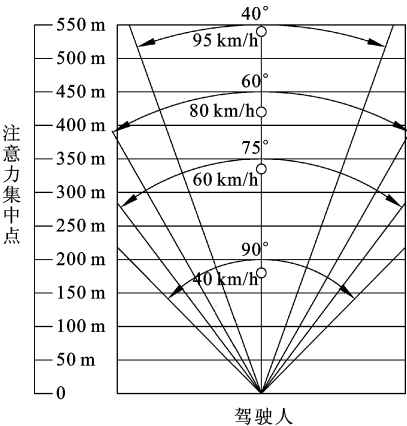


图 3 驾驶人注视中心和视野随速度的变化情况

Fig. 3 Changes of driver's watching center and view field with the speed changing

行驶过程中,驾驶人在既定操作环境的限制下,所能看到的范围往往局限在小于 180° 的视野空间内,随着视角大小的变化,视力呈现出不同程度的下降,并且高速行驶的车辆对距离近的景物呈现出模糊的景象。有关试验表明:当行驶速度为 64 km/h 时,只能看清 24 m 以外的物体;当行驶速度为 96 km/h 时,只能看清 30 m 以外的物体^[8-10]。通常驾驶人在视野内察觉一个目标平均约需 0.4 s;如果要达到清晰辨认,则平均约需 1 s^[8]。考虑到城市外环高速公路运行速度较高、交通组成复杂等特性,从概率理论考虑,本文以 80% 保证率来确保车辆能及时发现、读取道路信息,于是 $i = 0.5v, j = 1.25v$, 其中 v 为内侧车道设计速度。

除此之外,在对道路信息有初步的认识后,驾驶人结合自己的行驶目的,对交通标志有一个理解和接受的过程,进而为操作执行提供支撑,通常这一过

程称为驾驶人的反应时间,即在驾驶人付出行动之前的反应距离 CE,据有关研究这一时间通常为 $2 \sim 3 \text{ s}$ ^[6],本文取 2 s 作为计算值,故 $h=2v$ 。

2.2.2 操作执行阶段

两互通式立交之间,内侧车道的操作执行阶段主要在于驾驶人做出判断后,在外侧车道中寻找可插入间隙,选择有利的机会,以一定的角度 θ 变换到外侧车道的过程。这一过程可分为 2 个部分:一是内侧车道车辆在寻找外侧可接受间隙期间行驶的距离;二是车辆变换车道期间沿着路线前进方向行驶的距离。

(1) 车道变换的运动学分析

根据车辆变道行驶特征,车辆进行车道变换的运动方程为

$$\begin{cases} x = (v\Delta t + \frac{1}{2}a_1\Delta t^2)\sin(\theta) \\ y = (v\Delta t + \frac{1}{2}a_1\Delta t^2)\cos(\theta) \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 为车辆变换车道的横向距离(m); y 为车辆变换车道期间行驶的纵向距离(m); v 为车辆运行速度(m/s); a_1 为车道变换的加速度(m/s²); Δt 为车道变换的时间(s), $\Delta t = (\sqrt{v^2 + 2a_1x/\sin(\theta)} - v)/a_1$ 。

根据 Masahiro 等对驾驶人车道变换的决策模型分析^[8]及裴玉龙等应用 Matlab 程序对车辆变换车道行驶轨迹模拟分析^[9],车辆变换车道的期望运行轨迹曲线如图 4 所示。此外,陈斌等经调查表明,在高速公路上转向角 θ 值的变化范围一般不超过 1.6° ,随着运行速度的增大,转角呈减小的趋势,调查数据统计如图 5 所示,经线性回归分析得速度与转向角之间存在的关系式为

$$\theta = (-0.067v + 17.06676)/180 \quad (3)$$

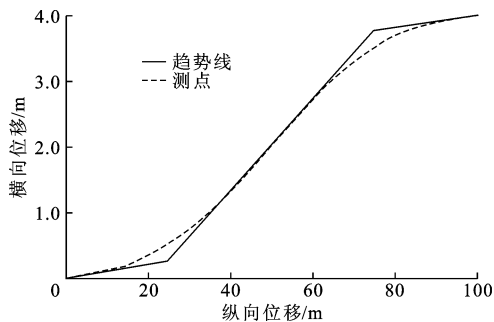


图 4 车道变换期望运行轨迹

Fig. 4 Expected trajectory of lane-changing

式中: θ 为车辆变换的转向角(rad)。

金立生等通过对车辆变道模型进行模拟得到变道行驶的速度 V_m 变化曲线^[10],如图 6 所示。

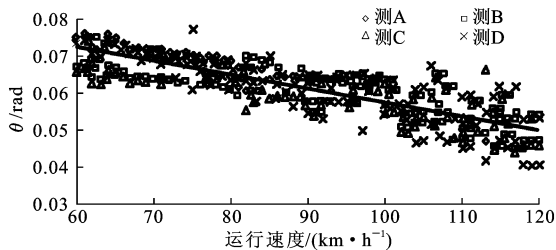


图 5 车辆变道转向角与速度的关系

Fig. 5 Relationship between lane-changing steering angle and running speed

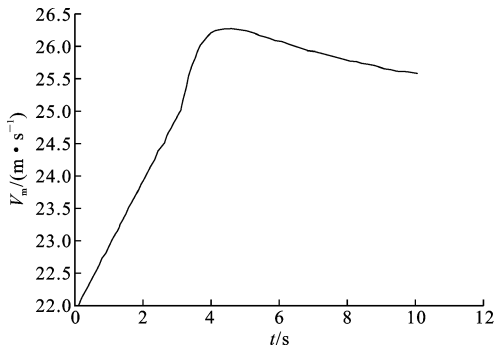


图 6 车道变换的速度变化曲线

Fig. 6 Speed variation curve of lane-changing

由图 6 可知,车辆变换车道行驶过程中,运行速度不断增大,车辆逐渐向目标车道稳定行驶,经约 3.15 s 运行速度发生突变,实现车道的变换,约 1 s 后速度达到最大,之后运行速度不断降低,车道变换完成,车辆趋于以稳定的速度行驶。为充分体现车辆变换的加速度特征,以车辆稳定行驶状态下的运行速度变化和运行时间为依据,确定车辆变换车道的加速度 a_1 ,经计算得 $a_1 = 1.5 \text{ m/s}^2$ 。

(2) 车道变换可接受间隙分析

如图 7 所示,内侧车道车辆可实现车道变换的外侧车道车头时距 τ 的条件式为

$$\tau \geq \Delta t - (y - \Delta S)/v \quad (4)$$

其中 ΔS 为车辆之间保持的安全距离,不同运行速度下车辆之间应保持的相对安全行车间距见下页表 1^[11]。

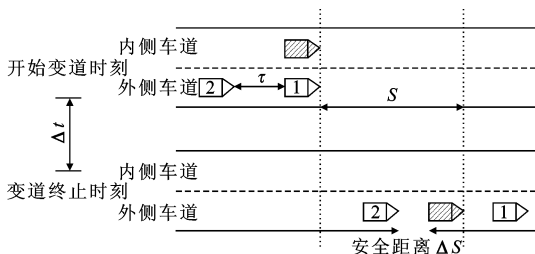


图 7 车道变换可接受间隙

Fig. 7 Acceptable gap of lane-changing

表 1 不同车速对应的安全距离值

Tab. 1 Safe distance value corresponding to the different speed

车速/(km·h ⁻¹)	40	60	80	100	120
相对安全行车间距/m	35	55	80	105	140

根据交通流理论^[12],为了充分体现内侧车道车辆变换到外侧车道的实际状况,本文假定外侧车道的车头时距服从移位负指数分布,即

$$P(h>\tau)=e^{-\lambda(\tau-t_m)},t\geqslant t_m\tag{5}$$

式中: λ 为外侧车道车流的平均到达率(pcu/s), $\lambda=Q/3\ 600$, Q 为流量; t_m 为最小车头时距(s), $t_m=\Delta S/v$ 。

于是, $-\lambda(\tau-t_m)=\ln(1-P(h\leqslant\tau))$,则在一定的车流率下,为了保证车辆能顺利地由内侧车道变换到外侧车道,在 α 可靠度水平下,内侧车道能顺利实现车道变换所需的空挡数 $n=\frac{\ln(1-\alpha)}{\ln(1-P)}$,则外侧车道有 $n+1$ 辆车排队。于是,外侧车道车辆的排队长度与内外侧车道车辆行驶的距离关系式为

$$\begin{cases} S_1=V_2n\tau \\ S_2=(V_1^2-V_{min}^2)/(2a_2)-V_2(V_1-V_{min})/a_2 \end{cases}\tag{6}$$

式中: V_1 为内侧车道车辆的运行速度(m/s); V_2 为外侧车道车辆的运行速度(m/s); V_{min} 为内侧车道车辆的最低限速值(m/s); a_2 为内侧车道车辆的减速度,考虑到冰雪路面条件汽车刹车的制动特性,取 2 m/s^2 ^[11]; S_1 为出现可接受间隙时,外侧车道车辆的排队长度(m); S_2 为等待可接受间隙期间,内、外侧车道车辆行驶的距离差(m)。

由速度和相对距离的关系,外侧车道出现可接受间隙的时间和内侧车道行驶的距离为

$$\begin{cases} t=(S_1+S_2)/(V_2-V_{min}) \\ S=V_2t-S_1 \end{cases}\tag{7}$$

式中: t 为外侧车道出现可接受间隙的等待时间(s);

表 2 不同设计速度的服务交通量

Tab. 2 Service traffic volume with different design speeds

设计速度/(km·h ⁻¹)	最大服务交通量/(pcu·h ⁻¹ ·车道 ⁻¹)			λ /(pcu·s ⁻¹)
	一级服务水平	二级服务水平	三级服务水平	
100	850	1 500	2 000	0.56
80	700	1 300	1 600/1 800	0.50

3.2.2 分车道限速值确定

根据相关学者对车道限速的研究^[13-16],经分析对不同设计速度下的分车道限速取值如下页表 3 所示。

3.3 计算结果分析

根据上述理论分析和相关参数标定,计算设计

S 为出现可接受间隙时,内侧车道车辆行驶的距离(m)。

由式(2)和式(7)可得,驾驶人实现车道变换行驶的距离 L 为

$$L=(N-1)(S+y)\tag{8}$$

式中: N 为主线单向车道数。

综上所述,根据车道变换规则,基于车道变换的两互通式立交间最小净距计算式为

$$\begin{aligned} L_j &= i+j+h+L=0.5v+1.25v+2v+(N-1)(S+y)=3.75v+(N-1)(S+y) \end{aligned}\tag{9}$$

3 实例分析

3.1 项目概况

深圳外环高速公路位于深圳市东、北部,为深圳市西东向的一条外环快速干线,是深圳市“七横十三纵”干线路网布局的重要组成部分,路线全长约 92.86 km,采用全线 6 车道高速公路建设标准。其中起点至惠盐高速以西段设计速度为 100 km/h,惠盐高速以东至终点段设计速度为 80 km/h,全线规划共设互通式立交 22 处,其中预留互通 8 处。本文以设计速度 100、80 km/h 为例,取 95% 的可靠度水平分别计算双向 6 车道外环高速路两互通式立交之间的最小净距值。

3.2 参数标定

3.2.1 车流平均到达率

根据《城市外环快速路设计规程》规定,不同设计车速的设计通行能力宜采用三级服务水平来设计。为了充分发挥道路的需求,以设计服务水平下的最大服务交通量为依据确定车流的平均达到率,见表 2。

时速 100、80 km/h 下,双向 6 车道的城市外环城快速路上两互通式立交之间基于驾驶人对道路信息的获取和车道变换选择的最小净距取值,计算结果见下页表 4。

由表 4 计算结果可知,不同设计速度下,两互通式立交之间的净距取值是不一样的,在设计速度

表 3 不同设计速度分车道限速区间

Tab. 3 Lane speed limit range of different design speeds

设计速度	内侧车道		中间车道		外侧车道	
	最高限速	最低限速	最高限速	最低限速	最高限速	最低限速
100	100	80	100	70	80	60
80	80	60	80	50	60	50

表 4 不同设计速度下两互通式立交净距的计算结果统计

Tab. 4 Calculated results between two interchanges spacing with different design speeds

设计速度/ (km·h ⁻¹)	车道变换	$\Delta t/s$	y/m	$\Delta S/m$	τ/s	S/m	操作执行 距离/m	信息获取 与分析/m	互通式立 交净距/m
100	3—2	2.40	57.58	105	4.11	514.13	1 303.22	104.17	1 407.39 (1 410)
	2—1	2.56	54.45	80	3.70	677.06			
80	3—2	2.76	51.65	80	4.04	320.93	788.76	83.33	872.09 (880)
	2—1	3.05	49.11	55	3.40	367.07			

注:车道划分是从外环快速干线最外侧车道起至道路中心依次为 1 车道、2 车道、3 车道,3—2 和 2—1 分别指从 3 车道变换到 2 车道和从 2 车道变换到 1 车道。

分别为 100、80 km/h 时,净距计算值分别为 1 410、880 m,这与美国和日本提出的两互通立交之间间距应为 1.6 km 或 1 km 并不完全相符,充分说明了不同的几何条件、交通量、设计速度、交通标志设置等对两互通立交之间的间距影响。

随着设计速度的提高,驾驶人在道路上寻找可接受间隙的时间增长,临界车头时距增大,内侧车辆在寻找变道时机的时间随之增大;相应地,随着设计速度的增大,车辆间安全距离的增长幅度也较大,在设计速度分别为分别 100、80 km/h 时,车辆从 3 车道变换到 2 车道,寻找可接受间隙时所行驶过的距离分别为 514、320 m,二者之间相差较大,成为了影响不同设计速度主线的两互通式立交之间间距的主要因素。

(3)车辆变道过程中行驶的纵向距离,主要与车辆的运行速度和加速性能有关,速度越高,纵向移动的距离也越大,但不同运行速度下,其对两互通式立交净距的影响相对较小,在计算的设计速度为 100、80 km/h 时二者之间的最大值和最小值之间仅差 8 m。

(4)驾驶人对道路交通信息的识别、获取、分析、判断,随着车辆运行速度的不同,也是有所不同,速度越大,在这一过程中车辆驶过的距离也越大,这与车辆在变道过程中的纵向移动距离的变化相一致,主要与车辆的运行速度有关。

(5)在相同的车流到达率下,两车道的速度差越大,车辆寻找可接受间隙的时间就越长。设计速度为 100 km/h 时,从 3 车道变换到 2 车道所行驶的距

离为 514 m,远小于从 2 车道变换到 1 车道所行驶的距离 677 m,这是由于 2 车道为混合车道,交通组成对车流的运行速度影响较大,在变换车道时慢速车流对快速车流的运行干扰较大。

4 结 语

(1)两互通式立交之间的最小净距,主要由车辆实现车道变换期间的车辆运行速度和车流到达率决定,设计速度为 100、80 km/h 时,车道变换所需的净距离分别为 1 300、790 m;而驾驶人对道路信息识别所行驶的距离仅 105 m,故建议距离较近的两互通式立交之间适当减少非必要道路交通标志的设置,降低对驾驶人行驶的影响。

(2)从最不利安全角度出发,提出一种计算两互通式立交净距的数学模型,以深圳外环高速公路上两互通式立交之间间距计算为基础,建议双向 6 车道设计速度为 100、80 km/h 时,互通净距值不宜小于 1 410、880 m。

(3)同一设计速度 100 km/h,因混合车流的影响,车辆从 3 车道变换到 2 车道与从 2 车道变换到 1 车道所需的距离分别为 514、677 m,建议大、中型车比例较高或交通组成混合严重的两互通式立交间最小净距宜适当增加 180~200 m。

(4)目前中国高速公路网已逐步形成,建立合理的立交最小净距模型,对高速公路网形成、交通安全保障具有重要意义。进一步完善本文提出的基于车道变换的立交最小净距模型以扩大其计算结果的广泛应用,对高速公路网后期加密建设是十分必要的。

参考文献:

References:

- [1] Bared J G, Edara P K, Kim T. Safety impact of interchange spacing on urban freeways[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2006.
- [2] Butorac M A, Wen J C. Access management on cross-roads in the vicinity of interchanges[R]. Washington DC: Transportation Research Board Publication, 2004.
- [3] 高鲁宾, 孙家驷, 张 铭. 重庆绕城高速公路互通密度研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(1): 45-48.
GAO Lu-bin, SUN Jia-si, ZHANG Ming. Research on interchange density of Chongqing ring highway[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2010, 29(1): 45-48. (in Chinese)
- [4] 张加华. 城市环路互通立交最小间距研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
ZHANG Jia-hua. The research on minimum distance between interchanges[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- [5] 李爱增, 李文权, 王 炜. 城市快速路互通立交最小间距[J]. 公路交通科技, 2008, 25(6): 104-110.
LI Ai-zeng, LI Wen-quan, WANG Wei. Minimum interchange spacing of urban expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(6): 104-110. (in Chinese)
- [6] 赖维铁. 交通心理学[M]. 北京: 华中理工大学出版社, 1988.
LAI Wei-tie. Traffic psychology[M]. Beijing: Huazhong University of Science and Technology Press, 1988. (in Chinese)
- [7] 陈 斌, 郭远辉. 高速公路车道变换仿真模型[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2007, 26(3): 35-40.
CHEN Bin, GUO Yuan-hui. A simulation model for expressway lane-changing[J]. Journal of Xihua University: Natural Science, 2007, 26(3): 35-40. (in Chinese)
- [8] Masahiro H, Takamasa S, Akehiro O. A study on driver model for lane change judgment[J]. JSAE Review, 2001, 22(2): 186-188.
- [9] 裴玉龙, 张 银. 车道变换期望轨迹[J]. 交通与计算机, 2008, 26(4): 68-71.
PEI Yu-long, ZHANG Yin. Lane-changing virtual desire trajectory simulation[J]. Computer and Communications, 2008, 26(4): 68-71. (in Chinese)
- [10] 金立生, Bartvan A, 杨双宾, 等. 高速公路汽车辅助驾驶安全换道模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(3): 582-586.
JIN Li-sheng, Bartvan A, YANG Shuang-bin, et al. Safety lane change model of vehicle assistant driving on highway[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(3): 582-586. (in Chinese)
- [11] 任才贵, 查伟雄. 对安全行车间距的探讨[J]. 公路, 2010, 12(2): 129-132.
REN Cai-gui, ZHA Wei-xiong. Discussion on safety distance[J]. Highway, 2010, 12(2): 129-132. (in Chinese)
- [12] 徐吉谦, 陈学武. 交通工程总论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
XU Ji-qian, CHEN Xue-wu. Fundamentals of traffic engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)
- [13] Shuster J, Coffman Z, Warren D. Synthesis of safety research related to speed and speed limits[R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 1998.
- [14] Jaehyun P. Modeling of setting speed limits on urban and suburban roadways[D]. Tampa: University of South Florida, 2003.
- [15] 程国柱. 高速道路车速限制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
CHENG Guo-zhu. Research on the method of setting speed limits on freeway and urban expressway[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [16] 贺玉龙, 汪双杰, 孙小端, 等. 中美公路运行速度与交通安全相关性对比研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(增): 73-78.
HE Yu-long, WANG Shuang-jie, SUN Xiao-duan, et al. Operating speed and highway safety in china and the United States[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(S): 73-78. (in Chinese)