

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.04.052

基于稳定流态下隧道与主线出入口最小净距研究

牛敏强¹, 蒲华乔², 符铨砂², 苏堪祥¹, 郑伟²

(1. 广东省南粤交通仁博高速公路管理中心, 广东 韶关 512638; 2. 华南理工大学 土木与交通学院)

摘要:对地形及设计条件受限的山区高速公路而言,容易产生隧道出入口与主线出入口小净距路段,小净距路段的事故发生率远高于主线其他路段,成为高速公路运营管理的安全痛点。该文根据不同交通断面流率下的车头时距模型,深入研究稳定流态下车辆等待可插入间隙的行驶距离,量化净距的直接影响因素,构建车辆变道模型,进而建立隧道与主线出入口最小净距模型。最后通过 VISSIM 仿真建模测试,验证了研究结果的准确性和合理性。

关键词:隧道出入口; 主线出入口; 最小净距; VISSIM

1 前言

隧道出入口与主线出入口之间的最小净距值,与驾驶员生心理特性、道路环境、线形条件和车辆动力特性等因素间接相关,与车辆运行速度、交通流特性和车辆变道过程等因素直接相关。该文主要贴合车辆行驶实况,分析稳定流态下小净距路段车辆变道过程,尽量量化影响净距的直接影响因素,建立准确的最小净距

模型,最后通过验证证实其可靠性,为小净距路段的净距控制设计提供理论依据。

该文在后续隧道出入口与主线出入口最小净距值的计算中,综合考虑车道数、设计速度和限速管制措施等因素进行运行速度取值。其中,单向二、三车道最内侧车道采用设计速度,外侧车道依次比内侧车道小 10 km/h 速度值;单向四车道内侧两车道采用设计速度,外侧两车道采取小于设计速度 20 km/h 速度值。具体取值情况如表 1 所示。

表 1 各车道运行速度采用值

设计速度/ (km · h ⁻¹)	运行速度/(km · h ⁻¹)								
	四车道				三车道			二车道	
	车道 1	车道 2	车道 3	车道 4	车道 1	车道 2	车道 3	车道 1	车道 2
120	120	120	100	100	120	110	100	120	110
100	100	100	80	80	100	90	80	100	90
80	80	80	60	60	80	70	60	80	70

2 隧道出口与主线出口最小净距模型

在隧道出口与主线入口路段的净距控制设计时,现行规范 JTG D20—2017《公路路线设计规范》、JTG 3307—2018《公路隧道设计规范》等对于隧道出入口线形设计方面也有相关规定(比如 3S 行程),强调通用性及广泛性,该文则是在定量研究测试隧道及主线出入

口变道过程后,得到其较为准确的推荐值,所依据的“最小净距值”基于小净距路段间可能存在的最不利行车情况计算得出,即交通流处于稳定流状态时,驾驶员不熟悉道路交通状况下,保证最低乘车舒适度,驾驶小客车从道路最内侧车道驶出隧道,经过明适应距离后,识读出口标志,决策并采取行动,驾驶车辆变道横移,逐渐到达最外侧车道,最终确认安全距离,驶出主线,该过程示意图如图 1 所示。

收稿日期:2020—09—16(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51778242,51978283);广东省交通运输厅科技计划项目(编号:科技—2014—02—010)

作者简介:牛敏强,男,高级工程师, E-mail: 104443200@qq.com

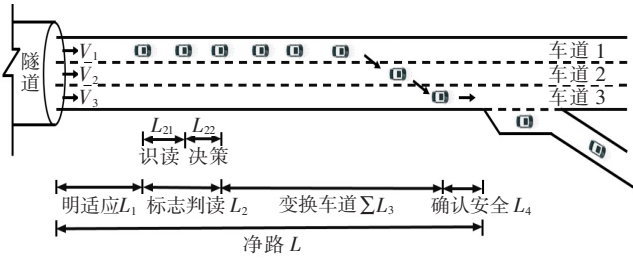


图 1 隧道出口与主线出口最小净距组成示意图

2.1 驾驶员明适应距离 L_1

由于隧道洞口光照强度的变化产生的“白洞效应”，对驾驶员造成“视觉滞后现象”，根据已有研究成果，驾驶员在 1~3 s 的时间内能逐渐适应光照强度的变化。该文基于最不利行车情况，驾驶员明适应时间取 3 s，则各设计速度下明适应距离计算公式如式(1)，计算值如表 2 所示。

$$L_1 = \frac{V}{3.6} t_1 \tag{1}$$

表 2 驾驶员明适应距离计算值

设计速度/(km·h ⁻¹)	明适应距离/m
120	100.00
100	83.33
80	66.67

2.2 标志判读行动距离 L_2

驾驶员从隧道出口出来后，发现主线出口标志并采取行动所行驶的距离称为标志判读行动距离 L_2 ，其中包括驾驶员识读距离 L_{21} 和行动决策距离 L_{22} 。

(1) 标志识读距离 L_{21} ：驾驶员从发现标志开始，到识读完标志内容驾驶车辆所行驶的距离，计算公式为：

$$L_{21} = \frac{V}{3.6} t_{21} + \sqrt{\left(\frac{H}{\tan\theta}\right)^2 - B^2} \tag{2}$$

式中： L_{21} 为标志识读距离(m)； t_{21} 为标志识读反应时间(s)， $t_{21} = t'_{21} + t''_{21}$ ， t'_{21} 为标志在驾驶员视野中的最小作用时间(s)，若 $t'_{21} \leq 1$ s，则驾驶员将无法清晰辨认，因而该文取 1 s 进行计算； t''_{21} 为驾驶员识读反应时间，一般取 2.5 s； H 为交通标志与驾驶员视线的高差(m)，其中标志牌的高度一般取 7.5 m，驾驶员视线高度一般取 1.2 m； B 为驾驶员视点到单悬臂指路标志的侧距(m)，一般取 10.5 m； V 为车辆运行速度(km/h)； θ 为驾驶员的视点与路侧单悬臂标志的夹角(°)，取 15°。

(2) 行动决策距离 L_{22} ：驾驶员识读标志后根据出行目的反应判断是否需要采取措施所行驶的距离，决策时间 t_{22} 为：

$$t_{22} = 1.237\ 554e^{0.258\ 913x} \tag{3}$$

式中： x 为信息容量(bit)，1 bit 表示从 2 个相同概率的反应中选择 1 个所需的信息处理量，为 1.6 s。需要驶出主线的驾驶员可根据标志内容结合自身行车需求从驶离和不驶离中做出选择，即相当于 1 bit 的信息容量，故 t_{22} 取 1.6 s，计算公式为：

$$L_{22} = \frac{V}{3.6} t_{22} \tag{4}$$

则小客车判读标志行动距离 L_2 计算公式如式(5)，计算结果如表 3 所示。

$$L_2 = L_{21} + L_{22} \tag{5}$$

表 3 内侧车道判读标志牌所行驶距离

设计速度/ (km·h ⁻¹)	标志阅读 距离/m	行动决策 距离/m	内侧车道判读标志 牌所行驶距离/m
120	137.71	53.33	191.04
100	118.26	44.44	162.70
80	98.82	35.56	134.38

2.3 变换车道行驶距离 $\sum L_3$

$$\sum L_3 = L_{31} + L_{32} + L_{33} + L_{34} \tag{6}$$

式中： L_{31} 为等待可插入间隙的行驶距离； L_{32} 为变换车道调整车位车速的行驶距离； L_{33} 为判断可插入间隙的反应距离； L_{34} 为车辆横移变道距离。

对于车头时距的分布模型，国内外已有较多研究成果，目前比较成熟且具有代表性的为裴玉龙等的实地观测拟合结果：“车道断面流率小于 250 veh/h 时，车头时距服从负指数分布；为 250~750 veh/h 时，车头时距服从移位负指数分布；为 750~1 500 veh/h 时，车头时距服从 Cowan M3 分布”。

稳定流状态下，此时车头时距出现任意一个间隙可接受的概率为：

$$P(H \geq t_c) = \alpha e^{-\lambda(t_c - \tau)} \tag{7}$$

通过函数求解换算，得到稳定流态下车辆平均等待一个可插入间隙时间为：

$$t_w = \frac{-(t_c + \frac{1}{\lambda})\alpha e^{-\lambda(t_c - \tau)} + \alpha(\tau + \frac{1}{\lambda})}{\alpha e^{-\lambda(t_c - \tau)}} \tag{8}$$

式中： t_w 为车辆平均等待可插入间隙时间(s)； t_c 为车辆临界间隙(s)； τ 为车队中车辆间的最小车头时距

(s); α 为按畅通流状态形式车辆所占的比例,即为按最小车头视距跟驰行驶的车辆所占的比例,采用 $\alpha = \begin{cases} 1.25-1.13\tau q, \tau q > 0.22 \\ 1, \text{其他} \end{cases}$ 计算; λ 为特征参数,采用 $\lambda = aq/(1-\tau q)$ 计算,其中: q 为平均到达率(veh/s),采用 $q = Q/3\ 600$ 计算,其中: Q 为最大服务交通量(veh/h),取高速公路三级服务水平。

上述参数具体取值见表 4。

各车道运行速度按照表 1 取值,则各车道平均等待可插入间隙时间 t_w 如表 5 所示。

表 4 稳定流态下平均等待可插入时间及 M3 模型参数取值

主线速度/ 度/ (km·h ⁻¹)	服务交通 量/ (veh·h ⁻¹)	平均到达 率/ (veh·h ⁻¹)	最小车头 时距 τ /s		畅通流状态车 比例 α		特征参数 λ		换道车辆所需 临界间隙 t_c /s		平均等待可插入 间隙时间 t_w /s			
			小型车	大型车	小型车	大型车	小型车	大型车	小型车	大型车	小一小	小一大	大一大	大一小
120	1 650	0.458	1.2	1.4	0.628	0.525	0.640	0.671	3.5	3.75	6.979	6.845	8.758	8.819
110	1 625	0.451	1.2	1.4	0.638	0.537	0.627	0.657	3.5	3.75	6.726	6.589	8.412	8.482
100	1 600	0.444	1.2	1.4	0.647	0.547	0.617	0.643	3.5	3.75	6.529	6.355	8.095	8.221
90	1 550	0.431	1.2	1.4	0.666	0.568	0.595	0.617	3.5	3.75	6.139	5.916	7.506	7.704
80	1 500	0.417	1.2	1.4	0.685	0.591	0.571	0.590	3.5	3.75	5.720	5.502	6.954	7.153
70	1 425	0.396	1.2	1.4	0.713	0.624	0.538	0.555	3.5	3.75	5.184	4.968	6.247	6.451
60	1 350	0.375	1.2	1.4	0.742	0.657	0.506	0.519	3.5	3.75	4.694	4.467	5.588	5.816

表 5 各车道平均等待可插入间隙时间

设计速度/ (km·h ⁻¹)	可插入间隙时间/s									
	四车道				三车道			二车道		
	车道 1	车道 2	车道 3	车道 4	车道 1	车道 2	车道 3	车道 1	车道 2	
120	6.979	6.845	6.529	6.355	6.979	6.589	6.355	6.845	6.589	
100	6.529	6.355	5.720	5.502	6.529	5.916	5.502	6.355	5.916	
80	5.720	5.502	4.694	4.467	5.720	4.968	4.467	5.502	4.968	

(1) 等待可插入间隙的行驶距离 L_{31}

当车辆准备变换车道时,会先减速,与相邻目标车道车流形成一定的速度差,以等待目标车道上出现可插入间隙。研究表明:此时车速约为基本路段运行速度的 0.76 倍。当驾驶员通过后视镜发现可插入间隙时,便调整车位车速,同时缓慢加速至目标车道车流速度,操作车辆实施换道。

因此,车辆在等待可插入间隙时所行驶的距离为:

$$L_{31} = \frac{V_1}{3.6} t_w \tag{9}$$

式中: V_1 为车辆等待相邻目标车道出现可插入间隙过程中的运行速度(km/h),该文取基本路段设计速度的 0.76 倍; t_w 为等待可插入间隙平均等待时间(s)。

则各交通流态下驾驶员等待可插入间隙行驶距离计算结果如表 6 所示。

表 6 稳定流态下驾驶员等待可插入间隙行驶距离

设计速度/ (km·h ⁻¹)	等待可插入间隙行驶距离/m									
	四车道				三车道			二车道		
	车道 1	车道 2	车道 3	车道 4	车道 1	车道 2	车道 3	车道 1	车道 2	
120	176.80	173.41	137.83	134.16	176.80	153.01	134.16	173.41	153.01	
100	137.83	134.16	96.60	92.92	137.83	112.40	92.92	134.16	112.40	
80	96.60	92.92	59.46	56.58	96.60	73.42	56.58	92.92	73.42	

(2) 调整车位车速的行驶距离 L_{32}

驾驶员等到可插入间隙后,因自身车速与相邻目标车道车流速度存在速度差,因而需要调整车位车速至目标车道车速,与可插入间隙并行,该过程称为驾驶员调整过程。驾驶员调整距离 L_{32} 可采用下式计算:

$$L_{32} = \frac{V_0 + V_t}{3.6 \times 2} t_{32} \tag{10}$$

式中: V_0 为车位调整前的车辆运行速度(km/h); V_t 为车位调整后的车辆运行速度(km/h); t_{32} 为驾驶员调整车位车速所需时间(s)。

驾驶员调整距离计算结果如表 7 所示。

(3) 判断可插入间隙的反应距离 L_{33}

驾驶员驾驶车辆在调整车位车速后,采取操作换道横移前,需要一定的反应时间判断相邻目标车道出现的间隙是否可供车辆顺利插入,该段时间内行驶的距离称为判断可插入间隙的反应距离。参考 AASH-TO 关于反应时间的规定,取判断反应时间为 2.5 s,采用式(11)计算,结果如表 8 所示。

$$L_{33} = \frac{V}{3.6} t_{33} = \frac{V}{3.6} \times 2.5 = 0.694V \tag{11}$$

表 7 驾驶员调整距离

设计速度/ (km · h ⁻¹)	调整车位车速行驶距离/m								
	四车道				三车道			二车道	
	车道 1	车道 2	车道 3	车道 4	车道 1	车道 2	车道 3	车道 1	车道 2
120	63.33	58.06	52.78	47.50	60.69	55.42	47.50	60.69	50.14
100	52.78	47.50	42.22	36.94	50.14	44.86	36.94	50.14	39.58
80	42.22	36.94	31.67	31.67	39.58	34.31	31.67	39.58	34.31

表 8 驾驶员判断可插入间隙的反应距离

设计速度/ (km · h ⁻¹)	判断可插入间隙的反应距离/m								
	四车道				三车道			二车道	
	车道 1	车道 2	车道 3	车道 4	车道 1	车道 2	车道 3	车道 1	车道 2
120	63.29	63.29	52.74	52.74	63.29	58.02	52.74	63.29	58.02
100	52.74	52.74	42.20	42.20	52.74	47.47	42.20	52.74	47.47
80	42.20	42.20	31.65	31.65	42.20	36.92	31.65	42.20	36.92

(4) 车辆横移变道距离 L_{34}

驾驶员调整好车位及车速后准备实施换道,分析换道过程,车辆以目标车道车辆运行速度行驶于本车道中心线上,转向时加速进行换道,侧向驶入相邻车道,完成后减速并调整车位,使车辆车速车位与目标车道相匹配。该文选择 5 阶多项式确定车辆的换道轨迹。其中, $X(t)$ 表示车辆纵向位移, $Y(t)$ 表示车辆横向位移,如下式所示:

$$\begin{aligned} X(t) &= A_5 t^5 + A_4 t^4 + A_3 t^3 + A_2 t^2 + A_1 t + A_0 \\ Y(t) &= B_5 t^5 + B_4 t^4 + B_3 t^3 + B_2 t^2 + B_1 t + B_0 \end{aligned} \tag{12}$$

式中: A_i 、 B_i 为函数式系数; t 为换道使用时间(s)。

经分析换算后,考虑最不利情况,取最大加速度 $a_{\max} = 1.8 \text{ m/s}^2$,得到变道操作距离计算公式如下所示:

$$\begin{aligned} S_t &= 0.005 T_t^5 + V_t T_t \\ S_c &= 0.008 T_c^5 + V_c T_c \end{aligned} \tag{13}$$

式中: S_t 、 S_c 分别为大型车、小型车变道操作所需长度(m); V_t 、 V_c 分别为大型车与小型车准备变道、变道结束时刻的运行速度(m/s); T_t 、 T_c 分别为大型车、小型车变道操作持续时间(s),小型车取 3.468 s,大型车取 4 s。

则车辆横移变道操作所得结果如表 9 所示。

2.4 确认安全行驶距离 L_4

驾驶员完成换道行驶至最外侧车道后,保持畅通状态行驶时需要有足够的距离确认安全,以准备转入主线出口匝道。结合相关研究,该文取确认安全时间为 2.5 s,则确认安全行驶距离根据式(14)计算,计算结果见表 10。

$$L_4 = \frac{V}{3.6} t_4 \tag{14}$$

表 9 车辆横移变道行驶距离

设计速度/ (km·h ⁻¹)	横移变道行驶距离 L_{34} /m									
	四车道				三车道			二车道		
	车道 1	车道 2	车道 3	车道 4	车道 1	车道 2	车道 3	车道 1	车道 2	车道 3
120	119.61	100.35	100.35	81.08	109.98	100.35	81.08	109.98	81.08	
100	100.35	81.08	81.08	61.81	90.71	81.08	61.81	90.71	61.81	
80	81.08	61.81	61.81	61.81	71.45	61.81	61.81	71.45	61.81	

表 10 主线出口的匝道入口确认的安全距离

外侧车道速度/ (km·h ⁻¹)	安全确认 距离/m	外侧车道速度/ (km·h ⁻¹)	安全确认 距离/m
120	69.44	90	62.50
110	76.39	80	41.67
100	55.56	70	48.61

2.5 理想最小净距值

采用表 1 运行速度值代入计算,最小净距值计算结果如表 11 所示。

2.6 推荐最小净距值

分析结果还表明:标志反应距离在整个净距构成中占有较大比例。无论是否考虑标志反应,均有出口

表 11 理想最小净距计算值

车道数	设计速度/ (km·h ⁻¹)	明适应 距离/m	标志判读 距离/m	变换车道 距离/m	确认安全 距离/m	最小净距 值/m
双向八车道	120	100.00	194.04	1 161.84	69.44	1 522.33
	100	83.33	162.70	921.29	55.56	1 222.89
	80	66.67	134.38	690.79	41.67	933.50
双向六车道	120	100.00	194.04	777.56	69.44	1 138.05
	100	83.33	162.70	617.24	55.56	918.84
	80	66.67	134.38	456.28	41.67	698.99
双向四车道	120	100.00	194.04	407.37	76.39	774.80
	100	83.33	162.70	327.76	62.50	636.30
	80	66.67	134.38	246.15	48.61	495.80

预告标志设在隧道出口前,亦即驾驶员在出隧道之前应接收到有关出口的信息。因此,为求得在满足运行安全前提下,受现场条件限制时的最小净距,不考虑标志反应时的稳定流状态下的最小净距可作为推荐值,如表 12 所示。

3 基于 VISSIM 仿真的最小净距值验证

为验证研究成果的准确性和合理性,结合实车行驶数据分析结果及实地交通调研信息,利用 VISSIM 仿真系统模拟实际交通情况,进行净距验证测试。

3.1 建立 VISSIM 仿真模型

VISSIM 仿真系统是由德国 PTV 公司研发的一种基于驾驶员生心理反应特性和规则变道模型的微观

表 12 隧道出口与前方主线出口之间最小净距推荐值

主线设计		最小净距/m		
速度/ (km·h ⁻¹)	项目	主线单向 二车道	主线单向 三车道	主线单向 四车道
120	计算值	384	643	905
	该研究推荐值	400	650	950
	细则规定值	500	700	1 000
100	计算值	384	643	905
	该研究推荐值	400	650	900
	细则规定值	400	600	800
80	计算值	276	458	643
	该研究推荐值	300	450	650
	细则规定值	300	450	600

仿真建模工具,因其能较准确地满足各个交通环境下的仿真分析,已广泛应用于道路交通领域。该文利用 VISSIM5.3 仿真建模的步骤主要为:设计仿真试验、建立路网并设定参数、运行测试和输出结果。

(1) 设计仿真试验

该文基于实际道路调研分析结果,设计 VISSIM 仿真试验,以主线直行车辆平均速度、变道驶出车辆平均速度和主线交通冲突数作为评价指标,反映最内侧车道驶出车辆在不同变道距离 X 时对路段整体运行情况的影响,如图 2 所示,以验证探讨最小净距值。

(2) 建立路网并设定参数

根据该文建立的隧道出口与主线出口最小净距模型,因隧道出口后驾驶员明适应距离和标志判读距离难以在 VISSIM 中仿真实现,该节以最常见的设计速度 120 km/h 的双向六车道道路为例,对车辆变道及确认安全部分进行仿真建模,路网示意图如图 2 所示。

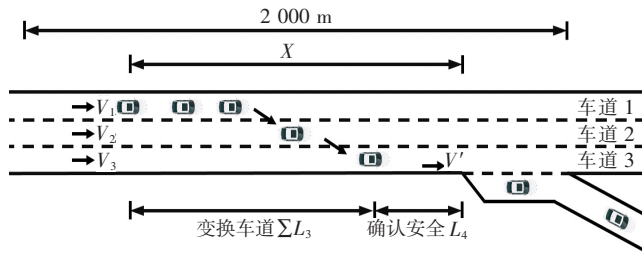


图 2 净距验证路段组成示意图

各参数设定如下:

① 道路参数:双向六车道,设计速度 120 km/h,车道宽 3.75 m,匝道宽 3.50 m,仿真路段主线长 2 000 m,最内侧车道驶出车辆变道连接线长 X 。

② 交通量参数:设计速度 120 km/h 下每车道最大服务交通量为 1 650 pcu/h,直行车辆与驶出主线车辆之比为 7 : 3。

③ 速度参数:变道初始速度设定值为每车道运行速度的 0.76 倍,即 $V_1 = 120 \times 0.76 = 91.2$ km/h、 $V_2 = 110 \times 0.76 = 83.6$ km/h、 $V_3 = 100 \times 0.76 = 76$ km/h。

④ 车辆性能参数:按照标准小客车车型,设定车辆长度为 4.760 m,宽度为 1.5 m,车辆最大加减速度为 1.8 m/s^2 ,换道模型为必要车道变换(用于到达下一个路径的路段连接器),跟驰模型采用 Wiedemann99,优先原则采用右转让直行。

⑤ 车头间距参数:最大排队长度 500 m,稳定流时最大车头间距 15 m。

⑥ 仿真时间及步长参数:因仿真初始交通流不稳

定,故仿真数据记录时间取 600~4 200 s,步长取 10 步长/s。

⑦ 检测器设置位置:分别在减速车道渐变段起点、距离减速车道渐变段起点 X 处的最内侧车道、2 km 主线路段的起点和终点处设置检测器,收集交通数据,对交通量、行程时间、车辆平均速度、排队长度及交互作用状态进行检测。

(3) 运行测试

为仿真检测变道驶出车辆对主线的影响情况,得出最小距离值,试验依次布设的最内侧车道驶出车辆变道连接线长 X 为 2 000、1 500、1 200、1 000、900、800、700、600 和 400 m,并进行仿真测试,采集试验数据。

(4) 输出结果

仿真测试运行结束后,系统将输出提前配置好的评价参数和车辆记录配置数据文件。

① 交通冲突数

仿真输出评价数据样本见表 13。

在车辆跟驰交互作用过程中,判定状态为“制动 AX”的车辆与前车跟车距离属于紧急制动范围,为严重冲突;判定状态为“制动 BX”的车辆与前车之间虽然较近,但仍有一定距离,为轻微冲突。该文将状态为“制动 AX”和“撞车”判定为交通冲突,进行统计分析。

表 13 仿真输出评价数据样本

车辆编号	交互作用过程	车道	仿真时间/s
592	跟车	3	600.0
601	撞车	1	600.0
620	制动 AX	1	600.0
645	自由	2	601.0
618	制动 BX	1	601.0
...

② 平均速度

因所测试的 2 km 主线路段和可供变道距离长度 X 均已知,该文通过输出平均行程时间,以计算路段的平均运行速度。仿真交通冲突数及平均行程时间统计如表 14 所示。

3.2 仿真结果分析

采用散点图分别描述不同变道驶出距离下主线直行车辆平均速度、变道驶出车辆平均速度和主线交通冲突数变化情况,进行验证分析。

(1) 不同变道距离对主线直行车辆影响分析

分析表 14 可知:在可供变道距离小于 800 m 时,

表 14 仿真输出平均行程时间及交通冲突数统计

变道距离/m	主线直行车辆平均行程时间/s	主线直行车辆平均速度/(km·h ⁻¹)	最内侧车道驶出车辆平均行程时间/s	最内侧车道驶出车辆平均速度/(km·h ⁻¹)	交通冲突数/个
400	201.00	35.82	22.70	63.44	716
600	197.90	36.38	35.50	60.85	688
700	199.30	36.13	40.30	62.53	675
800	194.40	37.04	47.40	60.76	725
900	182.40	39.47	51.10	63.41	306
1 000	162.90	44.20	51.70	69.63	284
1 200	145.90	49.35	59.00	73.22	291
1 500	130.10	55.34	73.90	73.07	306
2 000	101.30	71.08	89.10	80.81	281

主线直行车辆平均速度较低,仅为 36 km/h 左右,且随着变道距离的进一步减小,平均速度较为稳定;当可供变道距离大于 900 m,主线直行车辆平均速度急剧增加,2 000 m 时达到 71 km/h。因而认为变道距离等于或小于 800 m 时,车辆从最内侧车道驶出时已对主线直行车辆造成较大干扰,严重影响交通运行状态,即 800~900 m 附近为变道驶出车辆对主线直行车辆影响较小的最小变道距离。

(2) 不同变道距离对变道驶出车辆影响分析

分析表 14 可知:在可供变道距离大于 900 m 时,驶出主线车辆平均速度较大,其中 1 000~1 500 m 处稳定为 72 km/h 左右,且随着距离增大,平均速度越大。当可供变道距离小于 900 m 时,变道驶出车辆平均速度急剧减小至 62 km/h 左右。因而认为 900 m 附近为车辆顺利驶出主线的最小变道距离。

(3) 不同变道距离对主线交通冲突的影响分析

分析表 14 可知:当可供变道驶出距离大于 900 m 时,主线交通冲突数较低,且随着距离的变大稳定为 300 个左右。当可供变道驶出距离小于 800 m 时,主线交通冲突数较高,且随着距离进一步减小稳定为 700 个左右。而主线交通冲突数为 800~900 m 处急剧变化,因而认为 800~900 m 为保证主线车辆和变道驶出车辆运行效率及安全性的最小变道距离。

综合前述 3 个评价指标的分析结果可知,800~900 m 附近为仿真测试所得的最小变道距离。而根据该文基于实测数据的最小净距研究成果,即最小变道距离 777.56 m 与确认安全距离 68.44 m 之和为 847 m,与 VISSIM 仿真结论相同。且通过仿真结果可知,在实际道路设计时,净距值应尽量大于该文推荐的最

小净距值,以保证车辆运行效率和交通安全性。如若条件受限,应当设置合理的限速方案,使车辆能够安全驶出主线。

4 结语

从车道变换理论出发,考虑驾驶员心理变化和交通流特性等主要影响因素,根据稳定流率下的车头时距模型,深入研究了稳定流态下车辆等待可插入间隙的行驶距离,构建了车辆变道模型。同时,基于实际交通状况下最小净距路段运行速度研究成果,对不同设计工况下的净距值进行了计算。最后,从交通运行效率和道路安全性的角度设计 VISSIM 仿真验证试验,验证最小净距值的准确性和合理性。

参考文献:

[1] 裴玉龙,李松龄,薛长龙.快速路交织区车头时距分布特征[J].公路交通科技,2008(6).

[2] 马亚坤.高速公路隧道出口与服务区最小间距研究[D].长安大学硕士学位论文,2013.

[3] 吕纪云,陈瑾,章坤鹏.互通式立交与隧道出入口安全净距研究[J].中外公路,2019(2).

[4] JTG B05—2015 公路项目安全性评价规范[S].

[5] JTG D70—2014 公路隧道设计规范[S].

[6] 赵一飞,陈敏,潘兵宏.隧道与互通式立交出口最小间距需求分析[J].长安大学学报(自然科学版),2011(3).

[7] 潘兵宏,赵一飞,梁孝忠.动视觉原理在公路线形设计中的应用[J].长安大学学报(自然科学版),2004(6).

[8] 姚晶.主线分合流与隧道及主线出入口最小间距研究[D].长安大学硕士学位论文,2017.