

高速公路互通式立交出口识别视距计算模型

潘兵宏, 周锡滇, 周廷文, 赵悦彤, 杨婵君

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 从分流区实际驶出交通流的特点和需求出发, 提出了基于车道变换的高速公路出口识别视距计算模型。计算模型中考虑了驾驶人从内侧车道识别到出口的反应时间, 以及驾驶人一次换道需要的距离。结果表明: 和《路线设计规范》相比, 该计算模型明确了识别视距构成的驾驶行为意义, 界定了识别视距的范围, 推荐的最小识别视距具有唯一选择性。

关键词: 交通工程; 识别视距; 车道变换; 高速公路

中图分类号: U412.33

文献标志码: A

Decision Sight Distance Calculation Model of Expressway Interchange Exit

PAN Binghong, ZHOU Xizhen, ZHOU Tingwen, ZHAO Yuetong, YANG Chanjun

(College of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: A lane transformation-based sight distance calculation model for highway identification was proposed, along with the characteristics and demands of actual traffic flow in the diverging area. In the model, the reaction time of recognition from inner side lane to exit and the distance required by drivers to transform lanes once are considered. The results show that different from the *Design Specification for Highway Alignment*, the model defined the driving behavior meaning and ranges of decision sight distance. Nevertheless, the recommended minimum decision sight distance calculated by the model is of unique selectivity.

Key words: traffic engineering; decision sight distance; lane change; expressway

交通事故的高发路段。在中国, 对某高速公路三年的事故位置进行统计分析, 发现约 50% 的事故发生在出口匝道处, 40% 左右事故发生在入口匝道处^[1]。美国学者对科罗拉多州与弗吉尼亚州北部高速公路事故发生位置进行统计分析^[2-3], 发现约有 35% 的事故发生在匝道出入口处, 其中 50% 的事故发生在匝道出口处。

据公安部交管局统计, 互通与出口区域内发生事故的主要原因是: 内侧车道行驶的驾驶人, 在出口区域受外侧大车的遮挡或是忽略了对出口预告标志的认读, 未在公路出口前一定距离及时换道至最外侧车道; 还有部分驾驶人因出口处识别视距不足, 导致在临近出口处才紧急变道。在调查的 31 起高速公路出口事故中, 所有事故均与车辆紧急换道有关。

根据驾驶人在分流区的驾驶行为特点发现, 满足驾驶人识别视距需求在交通状况复杂的区域显得尤为重要。识别视距可为驾驶人在交通复杂地区发现前方交通情况, 根据需求采取改变方向、避让障碍物、调整操作提供足够的条件距离, 充足的识别视距是驾驶人在分流区安全行驶的重要保障。

美国“绿皮书”中对于判断视距的定义为^[4]: 在复杂地段做出各种判断所需要的视距, 即用以发觉在可能引起视觉混乱的道路环境中意外的、或是难以察觉的信息源或危险, 判别危险或其潜在迹象, 选择适当的速度和路线, 并安全、有效地开始与完成所需的安全运行距离。在判断视距计算中判断视距与设计速度、避让操纵时间有关, 其中避让操纵时间由道路功能决定, 受乡间道路停车、城市道路停车以及乡间道路、市郊道路、城市道路变速/换道/转向的影响。计算公式中将避让操纵 A、B 分为原速行驶距离加停车制动距离, 避让方式 C、D、E 直接采用行驶速

高速公路出入口等交通情况复杂的地方是道路

收稿日期: 2020-03-08

基金项目: 中交科基金([2018]05号)

第一作者: 潘兵宏(1974—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为路线设计、互通式立交设计、道路安全。

E-mail: panbh@chd.edu.cn

通信作者: 周锡滇(1995—), 女, 硕士生, 主要研究方向为路线设计、互通式立交设计、道路安全。

E-mail: zhouxizhen@chd.edu.cn



论文
拓展
介绍

度乘以避让操纵时间。计算方式从理论上并未考虑车辆换道与交通流量的详细情况,只是从停车与否、操纵时间长短上考虑,比较笼统。

目前我国《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)^[5](以下简称《路线规范》)规定,各级公路的互通式立交、服务区、停车区、客运停靠站等各类出口路段应满足识别视距的要求,并给出了不同设计速度需要满足的识别视距,但未对分流区识别视距的具体理论来源进行阐述,也未明确识别视距的具体范围和检查应用方法。国内学者对于识别视距的计算主要是从驾驶人在互通式立交出口处采取的行动进行分析^[6-10]。类似的模型都是通过驾驶人在最理想的情况下,即车辆已经在最外侧车道上行驶的情况下,对出口标志进行认读、判断并采取行动。

国内外识别视距计算模型也都忽略了换道需求这个重要因素。驾驶人采取紧急换道是出口匝道处发生事故的重要原因,所以在考虑识别视距计算模型时,应考虑部分驾驶人因外侧大型车对出口标志的遮挡或者忽略对出口标志的认读,在未看见出口

前没有及时变换至最外侧车道的情况。

考虑驾驶人在内侧车道识别匝道出口位置,然后经过正常换道驶入最外侧车道的行驶过程,重新建立识别视距模型,并对模型中的参数进行分析,进而对识别视距进行修正。

1 识别视距范围界定

为使驾驶人安全通过或驶离互通式立交分流区,公路出口前应提供充足的识别视距,充足的识别视距将给予驾驶人充足的判断决策时间与足够的行动距离。考虑驾驶人驶入互通式立交区的驾驶过程特点,将出口识别视距包括的过程分为反应和换道两个过程。车辆在这两个过程中行驶的距离之和为出口识别视距(见图1)。根据识别视距的作用和意义可知,驾驶人在看见出口后,能做出驶出的判断反应,并能在识别视距范围内完成变道,最后在减速车道渐变段起点之前进入最外侧车道,识别视距末端应为互通式立交减速车道渐变段的起点。

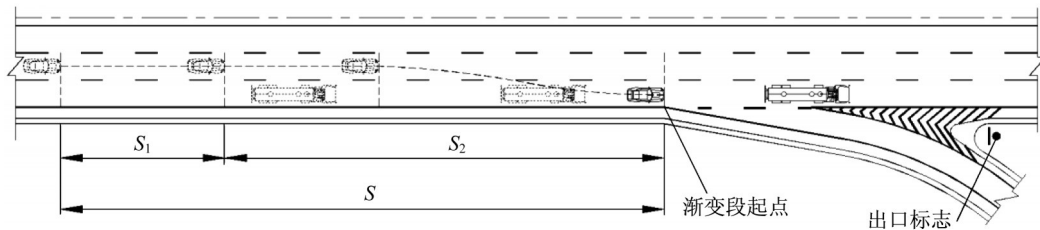


图1 出口匝道识别视距过程组成及范围

Fig.1 Composition and scope of decision sight distance process of exit ramp

2 识别视距计算模型

2.1 反应距离 S_1

驾驶人在看见出口匝道处的标志时,将视觉接收到的信息传到中枢神经,处理后将信息传送给肢体,以采取符合驾驶人期许的动作。计算模型中,驾驶人在内侧车道看到分流区出口标志后才采取换道动作。对驾驶人在公路上反应时间的研究表明:当指路标志上的地名不超过5个,同时考虑驾驶人对路面情况的辨认时间,认为驾驶人在2.616 s内就可以完成对指路标志上汉字的认读和理解^[11]。因此,按照我国目前交通标志上汉字设置高度,驾驶人对互通式立交出口标志的认读时间取2.616 s。考虑驾驶人对出口标志中文字的选择时间随着信息数目的增加而增加,在对一个汉字简单识别的基础上,应

该加上选择反应数目所增加的时间 0.3 s ^[7],因此加上选择反应的时间 0.3 s ,反应时间为 3.0 s 。

在反应时间内,驾驶人维持原速行驶,反应距离

$$S_1 = \frac{V}{3.6} t_1 \quad (1)$$

式中: S_1 为反应距离,m; V 为车辆原始运行速度, $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,取主线设计速度; t_1 为反应时间,s,取 3.0 s 。

2.2 换道距离 S_2

由前文可知,识别视距计算模型中应考虑驾驶人换道距离。假设驾驶人在内侧车道行驶,临近出口才开始换道至最外侧车道,准备驶入出口匝道(见图2)。驾驶人在原车道保持一定速度行驶,直到目标车道出现可插入间隙,才能向右换道至最外侧车道,所以换道距离包括等待可插入间隙的行驶距离(简称等待距离) S_{2-1} 和变道距离 S_{2-2} 。换道距离将受换道次数的影响,但是由于人眼的正常可视距离为

300~500 m, 识别视距超过人眼的可视距离则无意义。因此, 在确定识别视距时, 只考虑一次换道。

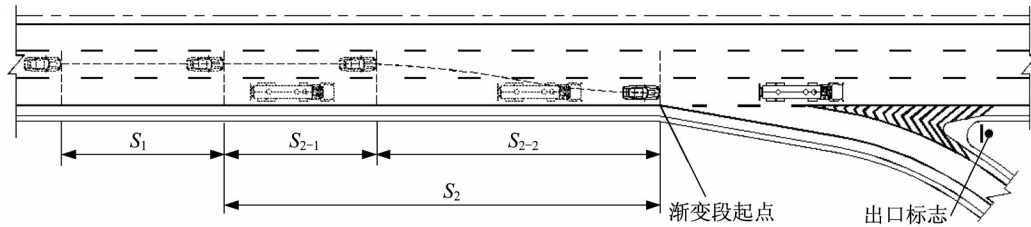


图2 内侧车道车辆换道过程示意图

Fig.2 Lane change process diagram of vehicles in the inner lane

2.2.1 等待距离 S_{2-1}

内侧车道驾驶人在发现公路出口时, 一般在原车道维持原速, 等待可插入间隙进行换道。目前常用的车头时距分布模型有负指数分布模型、位移负指数分布模型、爱尔朗分布模型等。负指数分布模型一般用于交通量 $\leq 500 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ln}^{-1}$ (每小时单根车道的标准车当量数) 的情况; 位移负指数分布模型是对负指数分布模型进行修正后得到的, 概率密度曲线单调递减, 与道路通行的实际情况不符。爱尔朗分布模型可表现不同服务水平、交通量情况下的车头时距分布, 通过阶数变换来适应不同交通流情况, 具有较好的实际参考意义, 国内外学者一般采用爱尔朗分布模型来描述不同情况下车头时距分布。

根据国内外研究, 互通式立交的主线车头时距在设计服务水平下近似服从三阶爱尔朗分布^[12]。当爱尔朗分布用于单车道交通流的车头时距时, 理论上会得出大量的 $0 \sim 1.2 \text{ s}$ 的车头时距, 但实际上这种情况不可能出现。因为车头间距至少为一个车身长加上一定的安全间隔。为了改正这种不合理情况, 将爱尔朗分布曲线从原点 O 沿 t 轴向右移一个车头间隙最小值 τ , 得到修正后的移位三阶爱尔朗分布曲线。移位三阶爱尔朗分布车头时距大于等于 t 的

$$S_{2-1} = \frac{V}{3.6} t_w =$$

$$\frac{V(2(1+\lambda\tau) - (9\lambda^3 t_c^3 + 9(1-2\lambda\tau)\lambda^2 t_c^2 + 3(3\lambda^2 \tau^2 - 4\lambda\tau + 2)\lambda t_c + 3\lambda^2 \tau^2 - 4\lambda\tau + 2)e^{-3\lambda(t_c - \tau)})}{3.6 \times 2\lambda(4.5\lambda^2(t_c - \tau)^2 + 3\lambda(t_c - \tau) + 1)e^{-3\lambda(t_c - \tau)}} \quad (5)$$

式中: V 为等待可插入间隙时运行速度, 取设计速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; t_w 为等待可插入间隙时间, s ; S_{2-1} 为等待可插入间隙时行驶的距离(等待距离), m ; t_c 为车辆临界最小时距, s , 按照 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的换道横移率确定。

2.2.2 变道距离 S_{2-2}

目前, 国内外学者建立了不同车辆行驶条件的换道模型^[16-19]: 匀速横移模型、直圆模型、回旋线模型、余弦型模型等, 但均存在与实际轨迹不符、曲率

概率

$$P(h \geq t) = (4.5\lambda^2(t - \tau)^2 + 3\lambda(t - \tau) + 1)e^{-3\lambda(t - \tau)} \quad (2)$$

式中: τ 为目标车道上车辆车头时距最小值, $\tau = t_r + t_s + \frac{3.6l}{V}$, 其中 t_r 为反应时间, 取 1.0 s , t_s 为协调制动时间, 取 0.4 s , l 为车长, 小汽车取 6 m , τ 与公路上的最小安全行车距离有关, 最小安全行车距离考虑一般条件下前后车之间不发生追尾的情况^[13-15]; h 为车头时距; t 为时间; λ 为邻近车道单位时间车辆平均达到率, $\lambda = Q/3600$, 其中 Q 为相应服务水平下主线单车道最大服务交通量。相应的概率密度

$$f(t) = 13.5\lambda^3(t - \tau)^2 e^{-3\lambda(t - \tau)} \quad (3)$$

变换车道时, 若目标车道上车辆车头时距小于临界最小时距 t_c , 无法完成变道, 则这个车头时距会被拒绝。变换车道的车辆在等到一个可接受时距之前, 必然拒绝了 j 个不可接受时距, 根据概率统计理论, 得到平均等待时间

$$t_w = \frac{\int_{\tau}^{t_c} t f(t) dt}{1 - P(h \geq t_c)} = \frac{1 - P(h \geq t_c)}{P(h \geq t_c)} = \frac{\int_{\tau}^{t_c} t f(t) dt}{P(h \geq t_c)} \quad (4)$$

即等待可插入间隙时车辆行驶距离

不连续等问题。以 $y = ax + b\cos(cx + d)$ 为初始模型, 考虑以下四个边界条件: ①换道轨迹起点处车辆的横移值为零; ②换道轨迹终点处车辆的横移值为横移宽度 W ; ③换道轨迹起点、终点处的曲率为零; ④全段换道轨迹的长度正好是余弦函数的半个周期, 得到的匀速偏移余弦曲线模型如图3所示。

$$x = \frac{W}{2\pi} \left(\pi + \frac{2\pi}{L} \left(y - \frac{L}{2} \right) - \cos \left(\frac{2\pi}{L} y - \frac{\pi}{2} \right) \right),$$

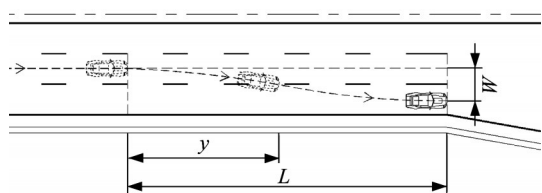


图3 换道模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of lane changing model

$$y \in [0, L] \quad (6)$$

式中: x 为换道段车辆任意时刻的横移宽度,m; y 为换道段车辆任意时刻的前进距离,m; W 为换道的横向宽度,m; L 为换道所需的长度(即 S_{2-2}),m。

为验证匀速横移余弦换道曲线模型的适用性,采用带高分辨率摄像头的无人机在2019年6月12日09:00—10:30和15:00—16:30对西安市绕城高速未央立交出口附近100~500 m范围内车辆自由换道轨迹进行视频采集,数据采集位置位于出口预告标志与出口之间,数据采集期间高速公路路况良好,无拥堵现象。拍摄路段为双向六车道,车道宽度3.75 m,车道由内至外分别采用100~120、80~120、80~100 km·h⁻¹门架式限速标志进行限速提示。拍摄路段内已设置四级出口预告标志,采用区间测速方式进行高速公路出口路段速度控制,路段内标志、标线设置完整。

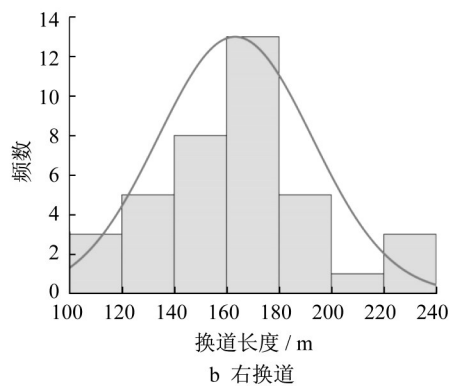
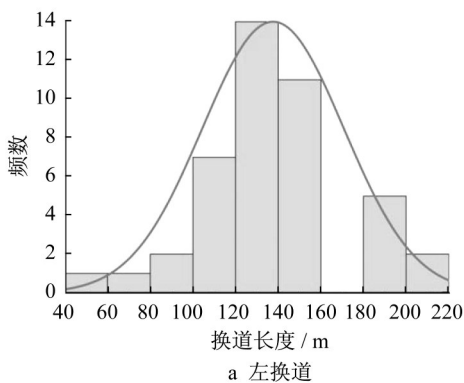


图4 换道长度分布

Fig.4 Distribution of change lane length

(2) 车辆换道宽度

由于驾驶人驾驶习惯与水平的参差不齐,完成换道时的换道宽度也不同。采集的车辆换道宽度分布如图5所示。

由样本轨迹数据可知:43组左换道宽度为1.0~5.5 m,平均换道宽度3.2 m;38组右换道宽度为1.5~5.5 m,平均换道宽度3.4 m。两类换道宽度均服从正态分布,并且差异不大。

(3) 模型适用精度

采集车辆轨迹数据所需的换道长度与宽度均服从正态分布,因此具有统计学意义。利用Origin软件,对Simi-Motion导出的车辆轨迹坐标进行绘图,得到的换道轨迹如图6所示。将采集到的实际换道轨迹的长度与宽度代入式(6),进行模型适用精度计算,得到左换道数据 $R^2=0.8501$,右换道数据 $R^2=0.8763$,结果表明所推荐舒适性换道模型对于不同

利用Simi-Motion软件对车辆换道轨迹数据进行提取,得到换道轨迹与车辆在某坐标处的横向速度、纵向速度、加速度、换道长度、换道时间等数据。

调查共采集到81组单次换道轨迹数据,包括左换道(LLC)43组和右换道(RLC)38组。处理后得到的换道数据样本如表1所示。

表1 车辆换道轨迹样本

Tab.1 Samples of vehicle lane change trajectory

样本编号	换道方向	换道宽度/m	换道长度/m
1	RLC	2.76	169
2	RLC	2.96	168
3	RLC	3.02	118
⋮	⋮	⋮	⋮
38	RLC	2.88	199
39	LLC	3.55	201
⋮	⋮	⋮	⋮
81	LLC	3.46	121

对采集数据的换道特性进行分析。

(1) 车辆换道长度

换道长度分布如图4所示。由样本轨迹数据可知,不同驾驶人在不同情况下进行换道时持续的长度不同。43组左换道长度为40~220 m,平均换道长度137 m;38组右换道长度为100~240 m,平均换道长度163 m。从换道长度分布图可以看出,两类换道长度均服从正态分布。

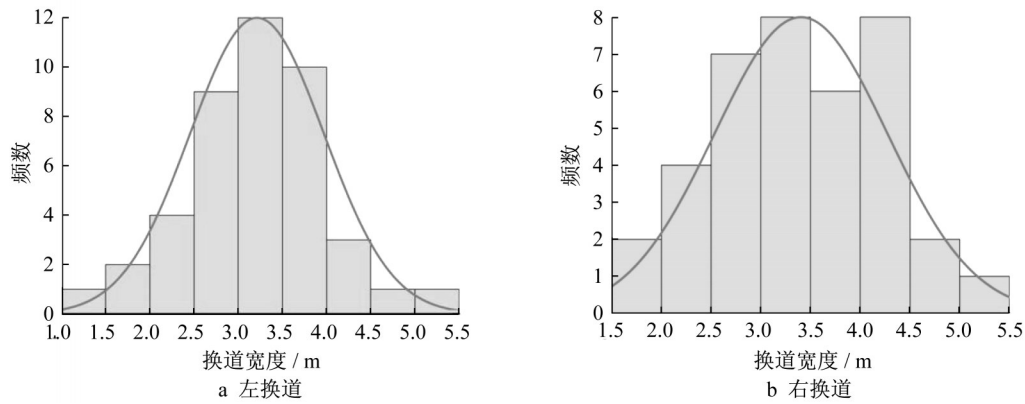


图5 换道宽度分布

Fig.5 Distribution of change lane width

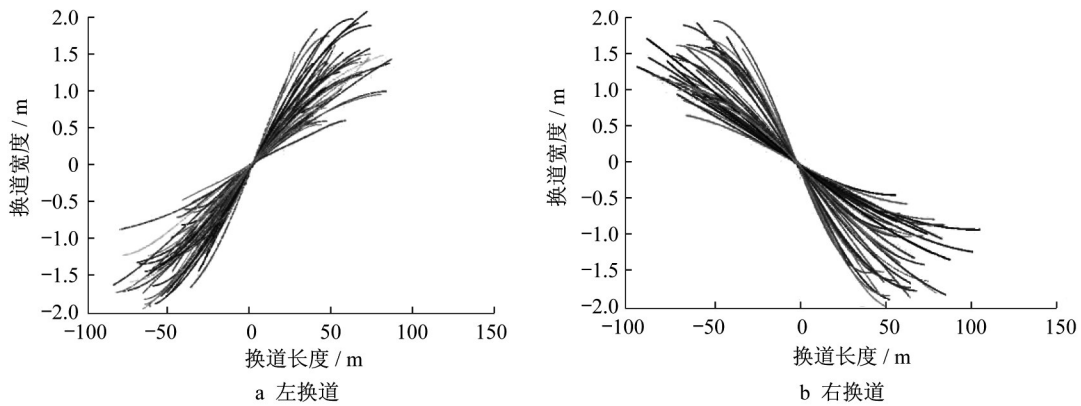


图6 换道轨迹

Fig.6 Lane change trajectory

的车辆换道轨迹具有较好的拟合性,可信程度较高。

将式(6)对换道时间 t 求一阶导数(横向速度)、二阶导数(横向加速度)、三阶导数(横向加速度变化率),如下所示:

$$\begin{cases} x'(t) = W \frac{V}{L} \left(1 + \sin\left(\frac{2\pi}{L}\left(y - \frac{L}{4}\right)\right) \right) \\ x''(t) = 2\pi W \left(\frac{V}{L}\right)^2 \cos\left(\frac{2\pi}{L}\left(y - \frac{L}{4}\right)\right) \\ x'''(t) = -(2\pi)^2 W \left(\frac{V}{L}\right)^3 \sin\left(\frac{2\pi}{L}\left(y - \frac{L}{4}\right)\right) \end{cases} \quad (7)$$

考虑到乘客换道时的舒适性,需满足横向加速度与横向加速度变化率的约束条件,如下所示:

$$\begin{cases} a = x''(t) \leq 2\pi W \left(\frac{V}{L_{\min}}\right)^2 \leq a_{\max} \\ \beta = x'''(t) \leq (2\pi)^2 W \left(\frac{V}{L_{\min}}\right)^3 \leq \beta_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

化简后可得到

$$L \geq L_{\min} = \max\left(\frac{V}{3.6} \sqrt{\frac{2\pi W}{a_{\max}}}, \frac{V}{3.6} \sqrt[3]{\frac{4\pi^2 W}{\beta_{\max}}}\right) \quad (9)$$

式(8)和(9)中: a_{\max} 为横向加速度最大值, $m \cdot s^{-2}$; β_{\max} 为横向加速度变化率最大值, $m \cdot s^{-3}$,考虑人的承受能力,取 $1.0 m \cdot s^{-3}$ [20]。

换道过程一般在路面的单向横坡上就能完成,其轨迹一定有一半位于反向横坡上,根据车辆在圆曲线上的运动平衡方程可知

$$a_{\max} = (\mu - i_h)g \quad (10)$$

换道段车辆行进距离

$$S_{2-2} = \max\left(\frac{V}{3.6} \sqrt{\frac{2\pi W}{(\mu - i_h)g}}, \frac{V}{3.6} \sqrt[3]{\frac{4\pi^2 W}{\beta_{\max}}}\right) \quad (11)$$

式(10)和式(11)中: S_{2-2} 为换道时前进的总距离, m ; μ 为横向力系数,根据公路工程技术标准中计算圆曲线最小半径时的横向力系数,按表2取值; g 为重力加速度,取 $9.81 m \cdot s^{-2}$; i_h 为行车道横坡。

2.3 识别视距计算模型

距离之和,采用的计算模型为

综上,识别视距应满足的距离为反应距离、换道

$$S = S_1 + S_2 = S_1 + S_{2-1} + S_{2-2} =$$

$$\frac{V}{3.6} \left(t_1 + \frac{2(1 + \lambda\tau) - (9\lambda^3 t_c^3 + 9(1 - 2\lambda\tau)\lambda^2 t_c^2 + 3(3\lambda^2 \tau^2 - 4\lambda\tau + 2)\lambda t_c + 3\lambda^2 \tau^2 - 4\lambda\tau + 2)e^{-3\lambda(t_c - \tau)}}{2\lambda(4.5\lambda^2(t_c - \tau)^2 + 3\lambda(t_c - \tau) + 1)e^{-3\lambda(t_c - \tau)}} \right) + \frac{V}{3.6} \max \left(\sqrt{\frac{2\pi W}{(\mu - i_h)g}}, \sqrt{\frac{4\pi^2 W}{\beta_{\max}}} \right) \quad (12)$$

3 推荐识别视距

在式(12)中代入各个参数,计算得到识别视距值和推荐值(见表2)及其关系图(见图7和图8)。图7中,虚线为高速公路,实线为一级公路。

通过图7和表2分析可知:识别视距与公路等级、横坡、设计速度均有关系。在相同设计速度下,公路等级越高,设计通行能力越大,换道等待可插入间隙时间越长,因而识别视距越大。识别视距还与设计速度、道路横坡成正比。当公路等级一定时,设计速度越高,横坡对识别视距的影响越大,识别视距越大。在同一设计速度下,公路等级对识别视距的影响较横坡大。

通过图8和表2分析可知:当公路等级为高速公

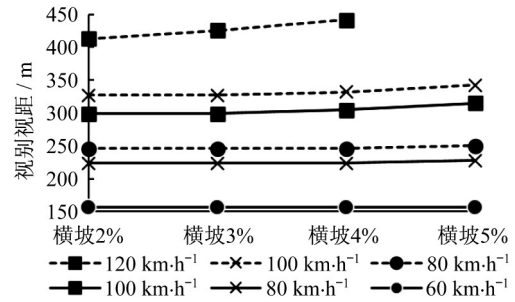


图7 识别视距与横坡、设计速度、公路等级的关系

Fig.7 Relationship between decision sight distance and cross slope, design velocity and highway grade

路时,识别视距推荐值小于《路线规范》的特殊值,而大于一般值。当公路为一级公路、设计速度为60 km·h⁻¹时,识别视距推荐值略小于《路线规范》的一

表2 识别视距计算过程的参数及推荐值

Tab.2 Parameters and recommended value of decision sight distance

参数	高速公路			一级公路		
V/(km·h ⁻¹)	120	100	80	100	80	60
S ₁ /m	100	83	67	83	67	50
Q/(pcu·h ⁻¹ ·ln ⁻¹)	1 650	1 600	1 500	1 400	1 250	1 100
λ/(pcu·s ⁻¹)	0.458	0.444	0.417	0.389	0.347	0.306
t _c /s	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.5
τ/s	1.580	1.616	1.670	1.616	1.670	1.760
t _w /s	3.9	3.5	2.8	2.5	1.8	1.2
S ₂₋₁ /m	130	96	62	69	39	20
μ	0.10	0.12	0.13	0.12	0.13	0.15
满足横向加速度的最小变道距离/m	横坡2%	183	136	104	136	69
	横坡3%	195	143	109	143	72
	横坡4%	211	152	115	152	75
	横坡5%	163	122	163	122	79
横向加速度变化率		1.0				
满足横向加速度变化率的最小变道距离/m	176	147	118	147	118	86
变道距离/m	横坡2%	183	147	118	147	86
	横坡3%	195	147	118	147	86
	横坡4%	211	152	118	152	86
	横坡5%	163	122	163	122	86
识别视距/m	横坡2%	413	327	246	299	156
	横坡3%	425	327	246	299	156
	横坡4%	441	332	246	304	156
	横坡5%	342	250	315	228	156
识别视距推荐值/m	445	345	250	315	230	160
《路线规范》识别视距/m	350(460)	290(380)	230(300)	290(380)	230(300)	170(240)

注:《路线规范》括号内的值为行车环境复杂、出口提示信息较多时应采用的识别视距值,简称特殊值;等待时间小于1.2 s时,采取1.2 s。

般值。研究表明,高速公路出口的识别视距采用《路线规范》的一般值时,可能存在识别视距不足的问题,这也从一定程度上解释了目前高速公路曲线路段出口容易发生强制变道、停车、倒车等事故的原因。

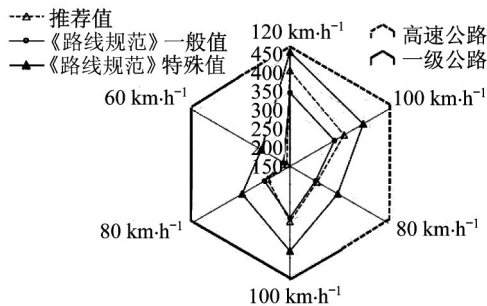


图8 识别视距推荐值与规范值对比

Fig.8 Comparison of recommended value and standard value for decision sight distance

4 结论

(1)因识别视距不足而无法顺利完成车辆换道是影响分流区安全的重要因素,从分流区驾驶行为意义的角度,将识别视距分为反应阶段和换道阶段(等待段与变道段),结合交通流理论,建立了高速公路互通式立交出口识别视距计算模型,明确了识别视距的检查范围。

(2)根据无人机航拍得到的81组高速公路车辆实际换道数据,对提出的匀速偏移余弦曲线换道模型进行精度验证,模型精度高达0.87,表明所使用的换道模型拟合精度较高。

(3)所建立的识别视距计算模型以道路横坡、公路等级、设计速度为主要计算参数。识别视距与道路横坡、公路等级、设计速度成正比,并且公路等级与设计速度为主要影响因素。在实际确定识别视距时,应全面考虑这三个因素。

(4)高速公路出口的识别视距采用《路线规范》的一般值时,可能存在识别视距不足的问题。

在计算识别视距推荐值时,所用的速度值均为设计速度,建议后续研究中采集分流区实际的驾驶运行速度,修正计算模型中的参数取值。同时,对分流区驾驶人驶离行为特性进行分析,对识别视距的反应阶段进行详细研究将是以后研究的重点内容。

参考文献:

[1] 刘亚非, 杨少伟, 潘兵宏. 基于交通心理学的高速公路出口匝

道事故成因研究[J]. 公路, 2011(11): 104.

LIU Yafei, YANG Shaowei, PAN Binghong. Research on expressway off-ramp accident causes based on traffic psychology [J]. Highway, 2011(11): 104.

[2] JANSON B N, AWAD W, ROBLES J, *et al.* Truck accidents at freeway ramps: data analysis and high-risk site identification[J]. Journal of Transportation & Statistics, 1998, 1(1):75.

[3] MCCARTT A T, NORTHRUP V S, RETTING R A. Types and characteristics of ramp-related motor vehicle crashes on urban interstate roadways in Northern Virginia [J]. Journal of Safety Research, 2004, 35(1): 107.

[4] 潘兵宏, 田曦, 董爱强. 高速公路互通式立交合流区安全视距分析[J]. 中外公路, 2016, 36(1): 317.

PAN Binghong, TIAN Xi, DONG Aiqiang. Analysis on safety sight distance of interchange confluence area of expressway [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2016, 36(1): 317.

[5] 中华人民共和国交通运输部. 公路路线设计规范: JTG D20—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.

Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design specification for highway alignment: JTG D20—2017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017.

[6] 吴艳. 高速公路互通式立交出口识别视距研究[J]. 公路与汽运, 2014(3): 109.

WU Yan. Research on recognition distance of interchange exits on expressway [J]. Highways & Automotive Applications, 2014(3): 109.

[7] 沈强儒, 赵一飞, 陈璋勇, 等. 高速公路互通式立交约束型出口识别视距分析[J]. 中外公路, 2012, 32(6): 305.

SHEN Qiangru, ZHAO Yifei, CHEN Zhangyong, *et al.* Recognition distance analysis of restricted exit of expressway interchange [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2012, 32(6): 305.

[8] 沈强儒, 赵一飞, 杨少伟, 等. 基于识别视距的特殊互通式立交出口区域主线线形指标分析[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(3): 89.

SHEN Qiangru, ZHAO Yifei, YANG Shaowei, *et al.* Analyzing the mainline alignment of the special interchange exit based on recognizing the distance [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(3): 89.

[9] 李国春. 基于运行速度下互通式立交分流区识别视距分析[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2017, 19(1): 5.

LI Guochun. Recognition distance analysis in diverge of interchange based on operating speed [J]. Journal of Liaoning Provincial College of Communications, 2017, 19(1): 5.

[10] 包洋旺. 识别视距对互通式立体交叉主线线形指标选用的影响的研究[J]. 公路, 2011(8): 134.

BAO Panwang. Research on the influence of recognition distance on the selection of mainline alignment of interchange [J]. Highway, 2011(8): 134.

(下转第1352页)