

潘兵宏,章泽龙,周 乾,等. 基于 sigmoid 换道模型的匝道连续分流间距[J]. 长安大学学报(自然科学版),2023,43(6):37-48.

PAN Bing-hong,ZHANG Ze-long,ZHOU Qian,et al. Continuous diversion spacing of ramps based on sigmoid lane-change model[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2023,43(6):37-48.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.06.004

基于 sigmoid 换道模型的匝道连续分流间距

潘兵宏¹,章泽龙¹,周 乾²,马朝辉³,王 潮¹

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司,湖南 长沙 410219;

3. 保利长大工程有限公司,广东 广州 511400)

摘 要:为解决现有匝道连续分流间距规定未考虑匝道设计速度及车辆换道紧急程度,导致匝道设计速度较高时相邻出口间距不足车辆紧急换道的问题,开展匝道连续分流间距研究。首先,基于车辆运行特征并考虑换道安全性,将驾驶人在匝道连续分流区的操作过程划分为 4 个阶段:减速过程、标志认读过程、等待过程和换道过程。其次,基于实测车辆运行轨迹,提出了考虑换道紧急程度的 sigmoid 换道轨迹模型,并通过拟合优度检验证明了该模型对匝道连续分流区的适用性。最后,分析了间距模型中参数的取值,提出了匝道连续分流最小间距推荐值。结果表明:sigmoid 换道模型对于匝道中车辆左换道和右换道的拟合优度分别可达 97.83%和 96.63%,拟合精度较高,能够准确描述匝道连续分流区的换道行为。提出的间距计算模型符合车辆行驶特点,与轨迹吻合度高;当匝道设计速度在小于 60 km/h 和大于 60 km/h 时,匝道连续分流最小间距分别受主线设计速度和匝道设计速度控制,设计速度较高的匝道所需间距明显更长。与《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)和《公路立体交叉设计细则》(JTG/T D21—2014)中规定值相比,当匝道设计速度小于 60 km/h 时,间距推荐值与规定值相近;当匝道设计速度大于 60 km/h 时,规定值偏小。提出的最小间距推荐值,可为设计人员对该指标的灵活设计提供参考。

关键词:道路工程;最小间距;换道行为;匝道连续分流;轨迹模型

中图分类号:U412.35

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2023)06-0037-12

Continuous diversion spacing of ramps based on sigmoid lane-change model

PAN Bing-hong¹, ZHANG Ze-long¹, ZHOU Qian², MA Chao-hui³, WANG Chao¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Hunan Provincial

Communications Planning, Survey & Design Institute Co. Ltd., Changsha 410219, Hunan, China;

3. Poly Changda Engineering Co. Ltd., Guangzhou 511400, Guangdong, China)

Abstract: To solve the problem that the existing ramp continuous diversion spacing regulations do not take into account the design speed of the ramp and the urgency of vehicle lane change, resulting in insufficient spacing between adjacent exits when the design speed of the ramp is high, causing emergency vehicle lane change, continuous diversion spacing of ramp was studied. First, based on the vehicle operation characteristics and considering the safety of lane change, the

收稿日期:2023-08-12

基金项目:湖南省交通运输厅科技项目(202007)

作者简介:潘兵宏(1974-),男,湖北黄陂人,副教授,工学博士,E-mail:panbh@chd.edu.cn。

operation process of drivers in the continuous diversion area of the ramp was divided into four stages, deceleration, sign recognition, waiting and lane-change stage. Second, based on the measured vehicle trajectories, a sigmoid lane change trajectory model considering the urgency of lane change was proposed, and the applicability of the model to the continuous diversion area of the ramp was proved by the fit test. Finally, the values of the parameters in the spacing model were analyzed, and the recommended minimum spacing values for continuous ramp diversion were proposed. The results show that the sigmoid lane change model has a good fit accuracy of 97.83% and 96.63% for the left lane change and right lane change of vehicles in the ramp, respectively, which can accurately describe the lane change behavior in the continuous diversion area of the ramp. The proposed spacing calculation model is consistent with the vehicle driving characteristics and fits well with the trajectory. When the ramp design speed is less than 60 km/h and more than 60 km/h, the minimum spacing of continuous ramp diversion is controlled by the mainline design speed and the ramp design speed, and the spacing required for the ramp with higher design speed is significantly longer. When the design speed of the ramp is less than 60 km/h, the recommended spacing is similar to the specified value of *Specifications for Highway Geometric Design* (JTG D20—2017) and *Guidelines for design of highway grade-separated intersections* (JTG/T D21—2014). When the design speed of the ramp is greater than 60 km/h, the specified value is small. The recommended value of minimum spacing proposed can provide reference for designers to design this index flexibly. 9 tabs, 9 figs, 29 refs.

Key words: road engineering; minimum spacing; lane-change behavior; ramp continuous diversion; trajectory model

0 引言

互通式立交因其出入口处车辆的分合流行为一直是高速公路事故的高发地点。根据事故统计报告,2014~2016 年江苏省高速公路事故地点分布中,互通区及附近占比 34.5%^[1]。美国学者基于事故数据,统计得出与互通式立交相关的致命事故占高速公路致命事故的 21.8%^[2]。高速公路出入口处的车辆分流、合流、交织和换道等行为,会引起车辆速度降低,扰乱交通流。从主线驶出的车辆,在双车道匝道上很快又面临第二次分流方向的选择,驾驶人既要认读地点标志,也要选择合适的车道,进行换道操作。若匝道连续分流间距不足,不符合驾驶人认读标志和换道操作需求的距离,易导致驾驶人在第二次分流的位置强行换道,进而诱发事故,事故不仅影响匝道的通行,而且匝道上因事故引发的交通拥堵也会影响到主线的正常通行。因此匝道连续分流间距研究(以下简称间距)具有重要意义。

《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)^[3](以下简称《规范》)和《公路立体交叉设计细则》(JTG/T D21—2014)^[4](以下简称《细则》)中规定了匝道连续分流最小间距,规定中将主线设计速度作为匝

道上连续分流最小间距的控制条件,规定值未考虑匝道设计速度及匝道车道数量的影响,也并未给出其相应的计算原理。美国《*A policy on geometric design of highways and streets*》^[5]中对匝道连续分流最小间距做出了相关规定,并指出高速公路相邻匝道端部之间存在间距较小的问题,对匝道连续出口和连续入口最小间距给出了推荐值,但是此推荐值并不适用于苜蓿叶环式匝道,同时未考虑车道数的影响;推荐值的确定也是根据工程经验所得,并没有给出推荐值确定原理和依据。《日本高速公路设计要领》^[6]中对匝道连续分合流最小间距没有区分连续分流和连续合流的情况,也没有给出规定值确定原理和依据。因此国内外相关规范中匝道连续分流最小间距的来源缺乏分析和解释。

2014 年,高建平等结合现场调研,以标志识别距离、换道距离和减速距离,提出了适用于山地城市的匝道连续分流间距推荐值,但换道距离未考虑具体换道轨迹以及换道紧急程度^[7]。2016 年邵阳等对连续分流最小间距进行了相关研究,研究主要考虑了标志的认读以及车辆换道,但未对换道行为深入研究,同时没有充分考虑车辆于匝道连续区上的行驶特点及驾驶人的心理反应^[8]。陈瑾研究认为匝

道连续分流最小间距由标志认读距离、判断距离、换道距离、减速距离、渐变段长度、分流三角区长度构成,其考虑了驾驶人在匝道上分流时的驾驶行为,但未考虑具体换道轨迹和换道紧急程度,且将分流三角区作为连续分流最小间距^[9]。2018年蒋飞对匝道侧连续出入口间距进行了研究,得出了匝道侧连续出入口最小间距建议值^[10]。

国外对匝道连续分流最小间距研究较少,主要侧重于车辆行为与立交各组成部分。Bared等在收集并统计了华盛顿州与加利福尼亚州的事故数据后,建立了立交净距和事故频率之间的关系模型^[11]。Iwasaki基于事故统计回归分析,研究了互通式立交范围内事故率与出、入口匝道净距之间的关系^[12]。Vermijs等利用公路运行仿真程序FO-SIM对匝道及合流区通行能力进行了模拟计算,结果显示车辆换道行为大多集中于距合流区中心约200 m位置处^[13]。

换道行为作为影响匝道连续分流间距的重要因素,因其过程复杂,且数据采集与处理技术于近几年才开始成熟,以往对车辆微观换道轨迹的研究并未深入。换道轨迹的研究最早从国外开始,1977年Caywood等提出可通过圆曲线、正弦余弦曲线、多项式回归描述车辆换道轨迹^[14]。2002年Salvucci等研究表明,换道过程中车辆纵向速度几乎保持不变,换道轨迹可通过正弦曲线或余弦曲线进行描述^[15]。2017年Zhou等从驾驶人视觉角度出发,提出了基于参考角的换道轨迹模型^[16]。杨志刚等以换道轨迹起终点曲率和横向加速度特点为控制条件,建立了匀速横移余弦换道模型^[17]。张新峰等以行驶过程中的避障需求,提出了基于贝塞尔曲线的换道模型^[18]。Augustin等建立了基于b样条曲线的自动驾驶车辆换道轨迹预测模型^[19]。赵树恩等基于六次多项式建立了换道轨迹预测模型,并从安全、舒适、经济等方面评价了模型的优劣^[20]。牛国臣等考虑车辆避障需要,将车辆换道轨迹规划分为2个五次多项式规划过程,建立了双五次多项式的换道轨迹规划模型^[21]。

根据上述分析,中国《规范》与《细则》中对匝道连续分流间距的规定未考虑匝道设计速度,同时也并未给出其相应的计算原理。匝道设计速度会影响车辆在匝道上的运行速度,若匝道设计速度较高,间距较短,将会导致驾驶人出现紧急换道行为,降低行车安全性。紧急换道行为作为影响匝道连续分流区行车安全的重要因素,应尽量避

免。已有匝道连续分流间距的研究中,对换道距离的计算往往通过横移速度1 m/s确定换道时间3.5或3.75 s,未考虑换道轨迹与换道距离间的关系及换道过程紧急程度。此外,目前提出的换道轨迹模型,大多数模型参数与驾驶行为相关性较小,参数无实际意义。

为此,本文将从车辆行驶特点和驾驶人心理反应出发,考虑匝道设计速度,研究匝道连续分流最小间距计算原理,根据连续分流区驾驶人操作过程和特点,将车辆在匝道连续分流区的行驶划分为4个过程:减速过程、标志认读过程、等待过程和换道过程;其中换道模型采用一种考虑驾驶人换道过程中紧急程度的sigmoid换道轨迹模型,并通过实测换道轨迹数据验证其适用性,然后建立匝道连续分流最小间距计算模型,并对模型中的关键参数进行分析研究,最后提出间距推荐值。

1 匝道连续分流区驾驶行为分析

1.1 匝道连续分流区范围界定

《细则》中规定匝道连续分流最小间距为主线 and 匝道上相邻分流鼻端之间的里程差,并认为其由标志识读距离、反应决策距离、车辆换道距离与匝道相互分流斑马线三角区长度组成。匝道连续分流间距范围应在车辆彻底从主线分流后开始计算,在此之前减速车道上的车辆依然可以返回主线,这也是分流鼻位置主线和匝道均要设置偏置的原因,因此匝道连续分流间距起点位置应为主线减速车道终点位置(即主线分流鼻处);对于间距终点,依据《道路交通标志和标线》(GB 5768—2022)的规定,分流三角区的交通标线为实线,且根据交通规则,斑马线三角区为实线,禁止车辆跨越行驶,故在实际情况下,驾驶人应在匝道相互分流斑马线三角区前完成主线分流后的二次分流行为,因此匝道连续分流间距不应考虑匝道相互分流斑马线三角区长度,间距终点宜取匝道相互分流斑马线三角区划线起点处。换言之,宜以主线分流鼻至匝道相互分流斑马线三角区划线起点之间的里程差为匝道连续分流间距,见图1。

1.2 匝道连续分流最小间距计算模型

匝道连续分流区根据其车道数,可分为单车道匝道连续分流区和双车道匝道连续分流区,因单车道匝道的连续分流不存在换道情况,只需满足标志认读距离即可;而双车道匝道还存在换道过程,所需间距较大,因此本文只研究双车道匝道连续分流最

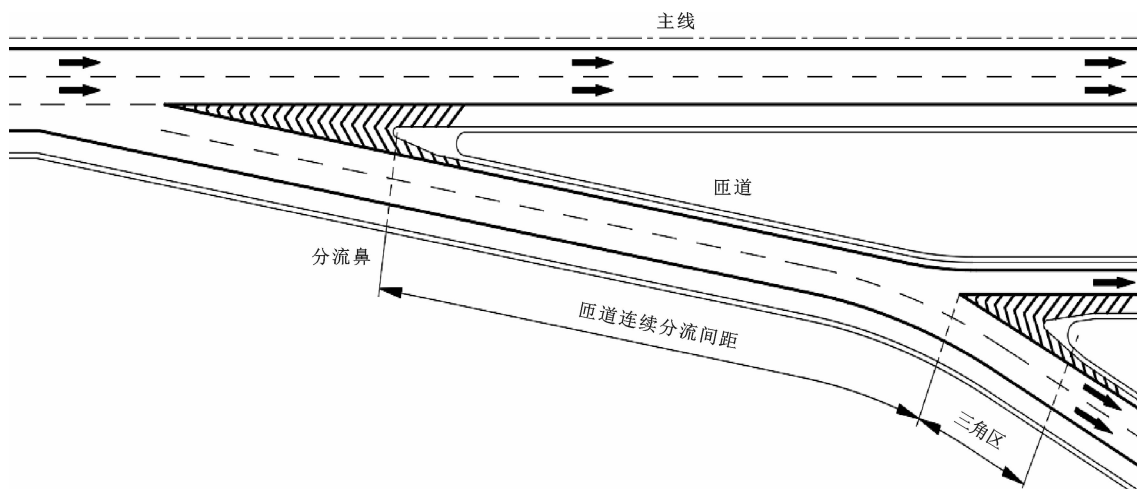


图1 匝道连续分流区范围界定

Fig. 1 Dimension of continuous diversion spacing of two-lane

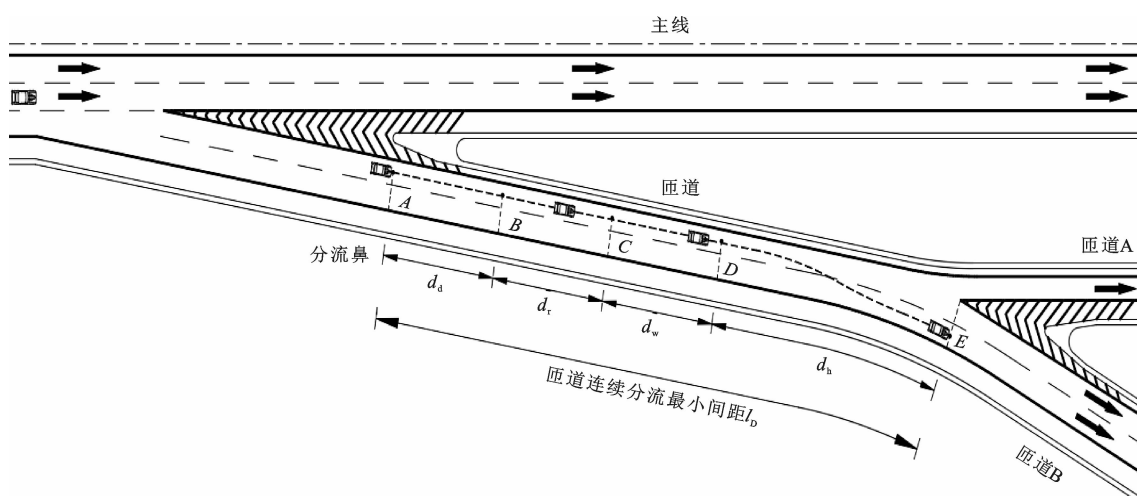


图2 双车道连续分流驾驶过程

Fig. 2 Driving process in continuous diversion area of two-lane

小间距。

匝道连续分流区应有足够的长度,以保证给驾驶人提供充足的标志认读时间,并顺利完成车道选择而安全分流。车辆经主线的减速车道减速后进入匝道时,其通过分流鼻端的速度往往大于匝道设计速度(基于此,《细则》规定在分流鼻后应设置运行速度过渡段),一般情况下车辆从分流鼻端经过后仍需进一步减速;减速完成后,驾驶人发现前方指路标志牌,经认读决策后,选择车辆行驶方向,并决定是否进行换道。若需要换道,驾驶人将以接近匀速状态等待可插入间隙后,再进行换道;换道完成后可安全驶离匝道连续分流区。

根据上述车辆在第2次分流区的行驶过程特点,可将双车道匝道上连续分流的驾驶响应过程分为减速过程、标志认读过程、等待过程和换道过程,4

个过程中车辆行驶的距离对应为减速距离、认读距离、等待距离、换道距离。

分析车辆的行驶过程,考虑最不利情况,即匝道左侧车道上行驶车辆欲分流至匝道B上(或匝道右侧车道上行驶车辆分流至匝道A上),其行驶过程为:驾驶人通过分流鼻端A后,开始减速至匝道设计速度至B点,该段车辆的减速距离为 d_d ;驾驶人在B点看见指路标志后,进行信息读取,于C点完成认读决策,选择好行车方向,此间车辆行驶的距离为认读距离 d_r ;C点与D点之间为换道前的等待可插入间隙行驶的距离,等待距离为 d_w ;于D点开始进行换道操作,于E点完成换道,换道距离为 d_b 。因此,匝道连续分流间距应保证车辆能从容完成上述行驶过程,其计算模型如下

$$l_D = d_d + d_r + d_w + d_b \quad (1)$$

式(1)中换道距离 d_h 对间距影响较大,为此先分析换道模型。

2 匝道连续分流最小间距计算模型中的换道模型

2.1 sigmoid 换道模型

目前国内外学者建立的换道轨迹模型主要有以下几种:等速横移模型、圆曲线-直线模型、缓和曲线模型、正弦余弦曲线模型及多项式回归模型等^[14-17]。上述模型或存在曲率不连续,在起终点横向加速度不符合实际情况等问题,同时这些换道模型中的参数大都无实际意义,与驾驶人驾驶行为相关性较小。针对上述模型的不足,本文以 sigmoid 函数为基础,基于车辆轨迹数据,提出考虑车辆换道紧急程度的 sigmoid 换道轨迹模型。sigmoid 函数的表达式如下

$$\text{sigm}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2)$$

将 sigmoid 函数记作 $\text{sigm}(x)$, sigmoid 的反函数记作 $\text{arsigm}(x)$, sigmoid 换道轨迹模型表达式如下

$$y = W \text{sigm}\left(\beta\left(t - \frac{d_h}{2v}\right)\right) - \frac{W}{2} \quad (3)$$

$$W = \begin{cases} |x_0| + |x_T| & \text{左换道} \\ -|x_0| + |x_T| & \text{右换道} \end{cases} \quad (4)$$

式中: W 为车辆换道横移总宽度(m),取匝道宽度; y 为车辆相对于参考车道线的横向距离,为纵向换道距离(m); t 为时间(s); v 为车辆换道过程中沿道路方向的平均行驶速度(m/s); β 为换道紧急系数, β 值越大表示换道过程越紧急; x_0 和 x_T 分别为起点和终点相对参考车道线的横向坐标值。

实际驾驶中,换道过程具有明显的起点和终点,而 sigmoid 函数是一条无限长的曲线, sigmoid 换道模型的表达范围不能覆盖整个 sigmoid 函数,因此在换道结束时刻, sigmoid 换道模型拟合换道宽度总是略小于实际换道宽度(图 3),这也导致在数据拟合时,拟合的换道轨迹在起点和终点附近会出现向内靠拢的情况,这与实际情况并不相符。

基于此情况,需要对模型进行修正,在原换道模型基础上,引入宽度误差系数 α ,宽度误差系数为拟合换道宽度与实际换道宽度的比值。模型改进后的拟合效果如图 4 所示,模型改进后 sigmoid 换道轨迹模型表达式如下

$$y = \frac{W}{\alpha} \text{sigm}\left(\beta\left(t - \frac{d_h}{2v}\right)\right) - \frac{W}{2\alpha} \quad (5)$$

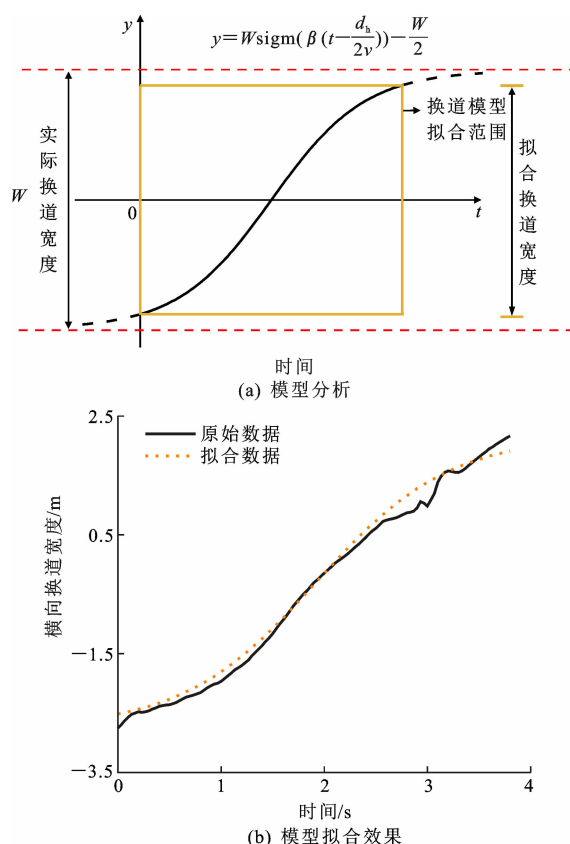


图3 sigmoid 换道轨迹模型

Fig. 3 sigmoid lane-change trajectory model

2.2 sigmoid 换道模型中参数的敏感性分析

对 sigmoid 换道模型中参数 β 进行敏感性分析,将模型中各参数进行赋值,其中 $\alpha = 0.95$, $W = 3.75$ m, $d_h = 120$ m, $v = 80$ km/h,分别取 β 值为 1.25、1.5、1.75,其理想换道轨迹的横向位置、横向速度、横向加速度变化如图 5 所示。

从图 5 可看出,在相同换道时间、换道宽度的条件下,参数 β 对换道轨迹的影响较小,但对换道过程中横向速度、横向加速度的影响较大, β 值越大,其横向速度最大值和横向加速度最大值越大,由此可见,参数 β 可在一定程度上表征换道过程中的紧急程度,该值与驾驶人驾驶行为与线形条件相关。车辆在不同线形上进行换道时的明显差异体现在横向加速度上,故 sigmoid 换道模型可通过调整参数 β 去描述不同线形条件下的车辆换道轨迹。

2.3 sigmoid 换道模型的适用性验证

目前中国设置匝道连续分流的路段线形指标均较高,为验证 sigmoid 换道轨迹模型在匝道连续分流区的适用性,选择具有代表性线形的大半径曲线

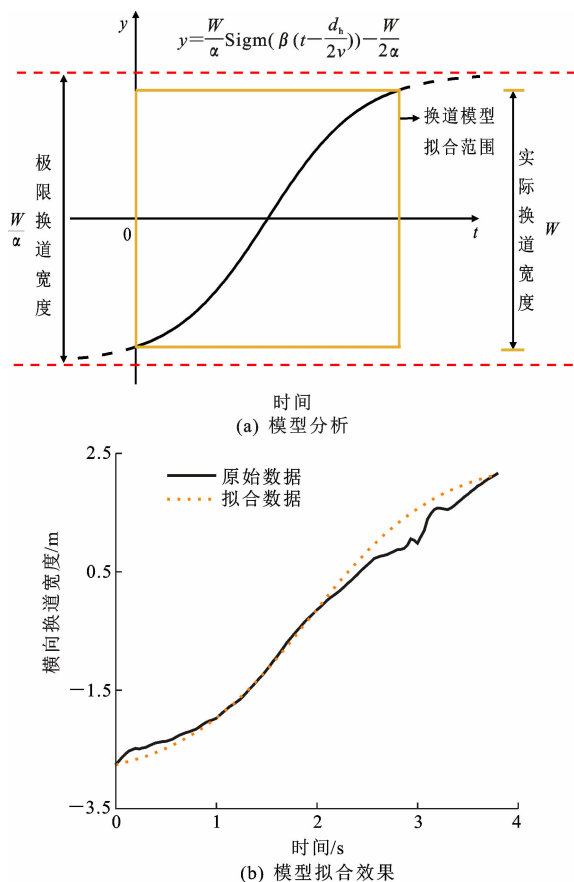


图4 换道模型修正

Fig. 4 Lane change model correction

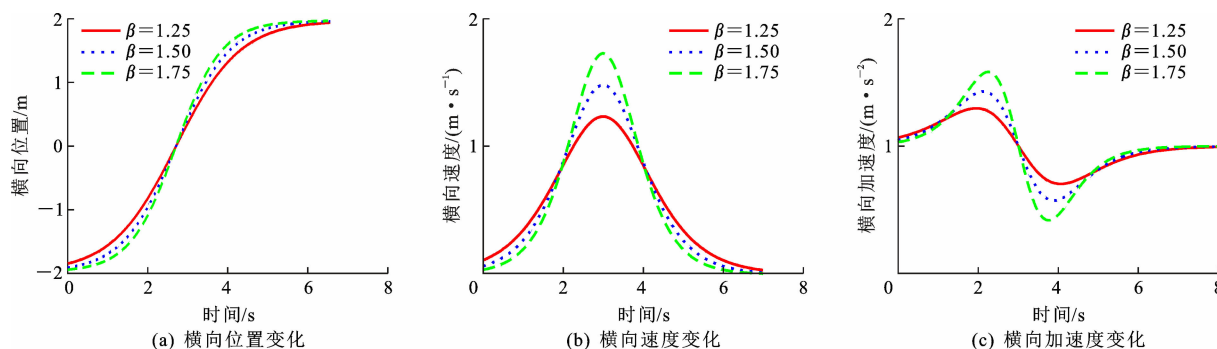


图5 参数敏感性分析

Fig. 5 Parameters sensitivity analysis

表1 车辆换道轨迹样本

Tab. 1 Lane-changing trajectory samples

样本编号	换道方向	换道宽度/m	换道距离/m	拟合精度
1	LLC	2.37	81	0.985 8
2	LLC	3.55	91	0.986 2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
76	LLC	3.41	123	0.977 6
77	RLC	2.62	157	0.954 1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
97	RLC	4.24	125	0.993 4
98	RLC	2.94	141	0.957 2

注: LLC 表示左换道; RLC 表示右换道。

路段($R=1\ 600\text{ m}$)进行换道数据采集。调查地点位于连霍(连云港—霍尔果斯)高速西吴立交的双车道匝道连续分流区,采用带有超高清摄像头的无人机对调查地点进行了视频数据采集。无人机航拍位置为匝道上空高度约 270 m,视频画面实际长度为 350 m,数据采集期间无不良天气状况,路面干燥,无拥堵现象;拍摄路段车道宽度 3.75 m;无人机拍摄视频显示帧率为 30 帧/s。

利用 YOLOv3 目标追踪技术提取车辆轨迹数据,得到每辆车在视频画面中的世界坐标,经坐标转换后得到换道车辆轨迹在视频画面中任意时刻的横向位置、纵向位置、横向速度、纵向速度等数据,经程序识别及人工核验共得到 98 组换道轨迹数据,数据统计中包括换道距离、换道宽度以及拟合精度,且区分了换道方向。得到的换道轨迹数据统计如表 1 所示。下文根据实测数据进行换道特性分析。

(1) 换道距离

实测数据的换道距离分布如图 6 所示。因驾驶人特性与驾驶环境不同,驾驶人完成换道所需换道距离也不同。换道距离分布呈正态分布,98 组车辆换道距离在 40~180 m 浮动,平均换道距离为 105 m。

(2) 换道宽度

由图 6 可知,换道宽度分布同样呈正态分布。由车辆换道轨迹数据统计可看出,98 组换道车辆的换道宽度在 1~5 m 浮动,平均换道宽度 3.1 m,换道宽度主要集中于 2~4 m。

(3) 换道速度

由图 7 可知,车辆在进行换道时的行驶速度同样呈现正态分布。同时由于调查地点线形条件较好,部分车辆存在行驶车速较高(超过匝道设计速度 80 km/h)的情况。由车辆换道轨迹数据统计可看

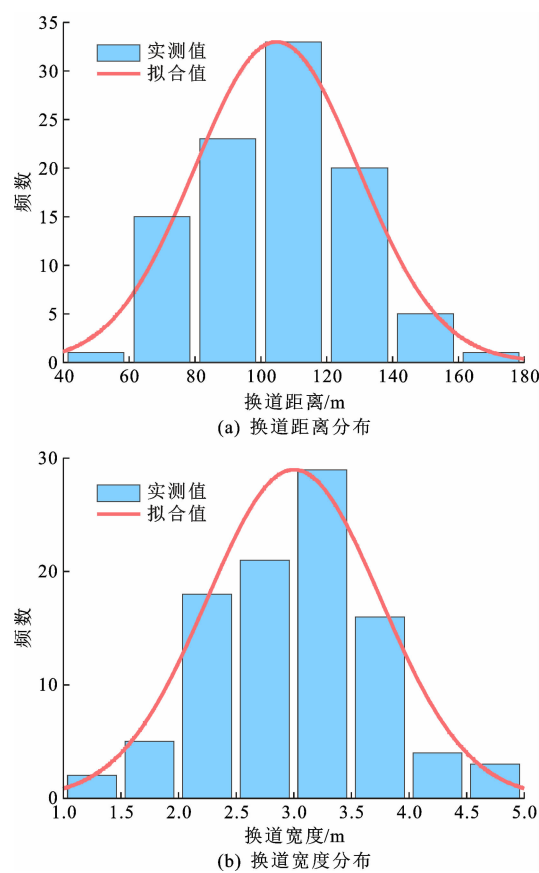


图 6 换道特性分布

Fig. 6 Lane-changing characteristic distributions

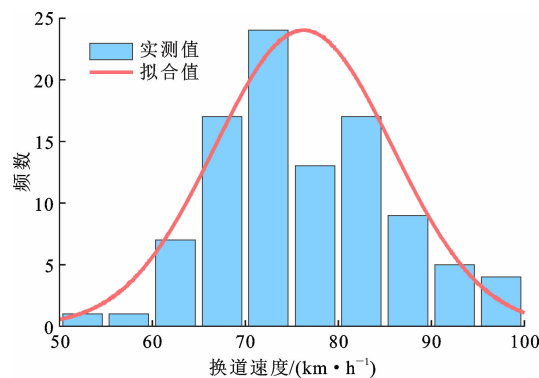


图 7 换道速度分布

Fig. 7 Lane-changing speed distributions

出,98 组换道车辆的换道行驶速度主要集中于 60~85 km/h,平均行驶速度为 77 km/h。

(4)模型拟合优度

由统计结果可知,换道距离与换道宽度均服从正态分布,具有统计学意义。利用 Python 工具绘制换道车辆轨迹(图 8),并计算模型拟合优度,结果表明,左换道平均拟合优度 97.83%,右换道平均拟合优度 96.63%。同时统计得到了车辆在 50~100 km/h(因线形指标较高,部分车辆存在超速现象)行

驶速度时各速度区间的拟合优度(表 2),从表 2 可以看出,在各行驶速度区间中 sigmoid 换道模型的换道轨迹拟合优度均较高。sigmoid 换道轨迹模型对于匝道连续分流区的换道车辆驾驶轨迹具有良好的拟合效果,模型适用性较高。

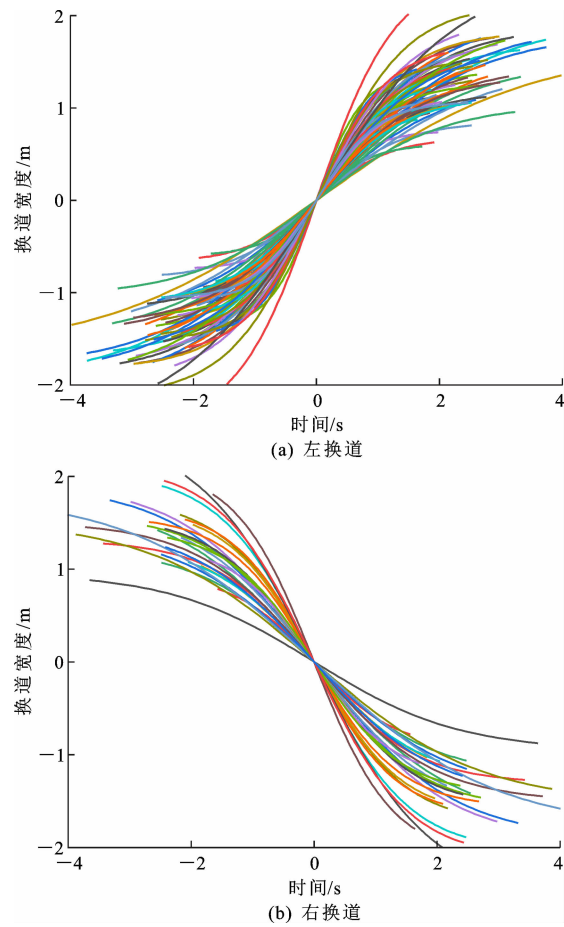


图 8 轨迹拟合

Fig. 8 Trajectories fitting

表 2 车辆各行驶速度区间的拟合优度

Tab. 2 Goodness of fit for each travel speed interval

车辆行驶速度区间/ (km·h ⁻¹)	[50,60)	[60,70)	[70,80)	[80,90)	[90,100]
平均拟合优度/%	96.8	97.8	97.2	96.7	97.3

3 间距计算模型中参数的确定

3.1 考虑舒适性的换道距离

匝道连续分流区应充分考虑驾驶人的换道行为,保证足够换道距离,以避免紧急换道等危险驾驶操作,换道模型采用 sigmoid 换道模型,对式(5)关于时间 t 进行二阶求导,可得加速度 a 如下

$$a=\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}=\frac{W\beta^2}{\alpha}\left[2\mathrm{sigm}^3\left(\beta t-\frac{\beta}{2}\right)-3\mathrm{sigm}^2\left(\beta t-\frac{\beta}{2}\right)+\mathrm{sigm}\left(\beta t-\frac{\beta}{2}\right)\right]$$

(6)

式(6)表明车辆在换道起终点的横向加速度值最小,且横向加速度变化连续,这与实际驾驶情况相符。利用 mathematica 数学分析软件对 $2\text{sigm}^3(\beta t - \beta/2) - 3\text{sigm}^2(\beta t - \beta/2) + \text{sigm}(\beta t - \beta/2)$ 求得极大值为 0.096 2。因此在车辆行驶过程中,为了保证驾驶人的舒适度,最大加速度 a_{\max} 应满足

$$\frac{d^2 y}{dt^2} \leq \frac{0.096 2}{\alpha} W \beta^2 \leq a_{\max} \quad (7)$$

式(7)说明换道紧急系数 β 可通过横向加速度来反映换道过程中的紧急系数。反算式(7)可得

$$\beta \leq \sqrt{\frac{\alpha a_{\max}}{0.096 2 W}} \quad (8)$$

换道过程中车辆会受到横向力作用,而各等级道路路面中设置有路拱,在正向路拱上行驶会减少一部分横向力,在反向横坡上行驶时,会增大横向力。由经典点质量刚体模型^[22]对行驶车辆进行受力分析可以得到

$$a_{\max} = (\mu \pm i_h) g \quad (9)$$

式中: μ 为横向力系数; i_h 为路拱横坡,正超高取“+”,反超高取“-”; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。

横向加速度越小,所需换道距离越长。因此考虑最不利情况,取反超高的情况。

对式(5)进行反算,可知在换道终点时,存在如下关系

$$\frac{W}{2} = \frac{W}{\alpha} \text{sigm}\left(\beta\left(\frac{d_h}{v} - \frac{d_h}{2v}\right)\right) - \frac{W}{2\alpha} \quad (10)$$

表 3 换道距离参数取值及计算结果

Tab. 3 Values of lane-change distance parameter and calculation results

参数		不同匝道设计速度($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)下的参数值						
		30	35	40	50	60	70	80
横向力系数		0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.14	0.13
匝道宽度/m		3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.75	3.75
满足最大换道紧急系数的 最小换道距离/m	横坡 2% 时	32.4	37.8	44.8	56.1	67.3	84.5	100.9
	横坡 3% 时	33.6	39.2	46.6	58.3	70.0	88.3	105.8
	横坡 4% 时	35.0	40.8	48.8	60.9	73.1	92.6	111.6
	横坡 5% 时	36.6	42.7	51.1	63.9	76.7	97.6	118.3
	横坡 6% 时	38.3	44.7	53.9	67.4	80.8	103.5	126.5
	最大值	38.3	44.7	53.9	67.4	80.8	103.5	126.5

3.2 减速距离

车辆经减速车道减速进入匝道后,当匝道设计速度与线形指标较高时,车辆一般不会减速,此时间距可不考虑减速过程;但当匝道设计速度与线形指标较低时,调查结果显示,车辆在经过主线分流鼻时,实际运行速度大于匝道设计速度,因此

$$d_h = \frac{2v}{\beta} \text{arsigm}\left(\frac{1+\alpha}{2}\right) \quad (11)$$

因此换道距离满足

$$d_h \geq \frac{2v}{\beta_{\max}} \text{arsigm}\left(\frac{1+\alpha}{2}\right) = 2v \cdot \text{arsigm}\left(\frac{1+\alpha}{2}\right) \sqrt{\frac{0.096 2 W}{\alpha(\mu - i_h) g}} \quad (12)$$

基于本次调查采集数据,宽度误差系数 α 的分布如图 9 所示。由图 9 调查数据可得,宽度误差系数最大为 0.986,最小为 0.764,平均宽度误差系数为 0.910。宽度误差系数取 85% 位分布值 0.958。根据《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)^[23],将保证三级舒适度的横向力系数的取值、横向加速度的计算值、最大紧急系数代入式(12),可计算得到最小换道距离,见表 3。

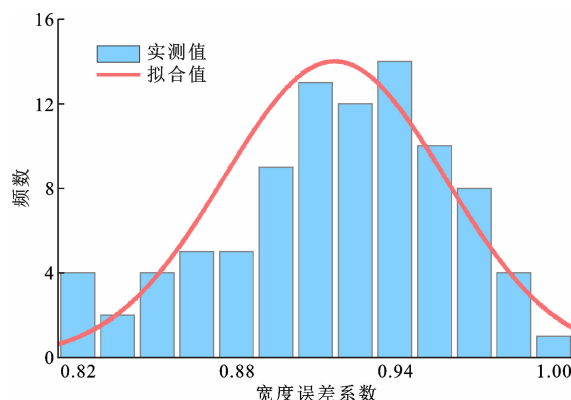


图 9 宽度误差系数分布

Fig. 9 Width correction factors distributions

《细则》中规定了出口匝道应按运行速度过渡段设计,且规定了运行速度过渡段的曲率半径^[3]。车辆经过主线分流鼻后仍需继续减速,根据观测资料^[24],车辆经过分流鼻的运行速度与主线设计速度相关,见表 4。

中国学者^[25-26]分别通过理论受力分析与驾驶

表 4 分流鼻运行速度

Tab. 4 Passing speed at exit ramp terminals km · h⁻¹

主线设计速度		60	80	100	120
分流鼻运行速度	最小值	45	55	60	65
	一般值	55	60	65	70

注:分流鼻运行速度不应小于匝道基本路段的设计速度。

数据采集,得到了车辆经过分流鼻后的减速度区间分别为 1.55~1.97 和 0.408~1.774 m/s²。此外,还有学者基于舒适度与实测数据,划分了车辆行驶纵向减速度舒适性阈值,认为当减速度小于 1.3 m/s²时,为乘客较为舒适的减速度^[27]。考虑行车舒适性,认为最小间距中减速距离应至少能满足驾驶人舒适行驶的匀减速驾驶行为,因此本文取车辆经过分流鼻后的减速度为 1.3 m/s²,减速距离 d_d 计算如下

$$d_d = \frac{v_b^2 - v_r^2}{25.92a_e} \tag{13}$$

式中: v_b 为分流鼻通过速度(km/h); v_r 为匝道设计速度(km/h); a_e 为减速度,取 1.3 m/s²。

计算得到的减速距离如表 5 所示。

表 5 减速距离

Tab. 5 Deceleration distance

主线设计速度/(km · h ⁻¹)	120	100	80	60
分流鼻段通过速度/(km · h ⁻¹)	70	65	60	55
不同匝道设计速度 (km · h ⁻¹)下的减 速距离/m	80	0	0	
	70	0	0	0
	60	38.6	18.5	0
	50	71.2	51.2	32.6
	40	97.9	77.9	59.4
	35	109.1	89.1	70.5
	30	118.7	98.7	80.1
				63.1

3.3 标志认读距离

标志认读距离是指驾驶人看见指路标志后,完整读取信息,辨明行车方向时车辆行驶的距离。在此期间,驾驶人注意力集中于指路标志上,车辆行驶状态近似于匀速状态。标志认读时间与指路标志的地名数量相关^[8]见表 6,匝道连续分流区指路标志上的地名一般为 2 个,考虑最不利情况 6 个地名,再考虑识别汉字的基础上,加上 0.3 s 的适应时间,所以标志认读总时间取 3 s,标志认读距离见表 3 可用下式计算

$$d_r = \frac{v}{3.6} t_r \tag{14}$$

式中: t_r 为驾驶人完成标志认读过程的时间(s),取 3 s。

3.4 等待距离

等待距离即驾驶人在换道前等待目标车道出现

表 6 地名数与认读时间试验数据

Tab. 6 Test data of place names and recognition time

地名数	2	3	4	5	6
认读时间/s	1.32	1.55	1.63	2.07	2.72

表 7 认读距离

Tab. 7 Recognition distance

匝道设计速度/(km · h ⁻¹)	30	35	40	50	60	70	80
认读距离/m	25.0	29.2	33.3	41.7	50.0	58.3	66.7

安全换道条件时行驶的距离。在此等待过程中,因驾驶人注意力集中于观察侧向车道,一般也不会采取加速减速措施,故也可认为等待过程中车辆也保持匀速行驶状态,所以等待距离 d_w 由下式计算

$$d_w = \frac{v}{3.6} t_w \tag{15}$$

式中: t_w 为等待时间(s)。

t_w 取决于双车道匝道上的车头时距分布。根据相关研究,对于分流区,单车道交通量在(0,500]、(500,1 000]、(1 000,2 000] pcu/h 时,其车头时距分布分别近似于一阶、二阶及三阶爱尔朗分布^[28-29]。故根据匝道四级服务水平时单车道最大服务交通量,匝道连续分流区的车头时距分布宜采用二阶和三阶爱尔朗分布。在实际情况中,车辆之间的车头时距至少为车身长度加上一定安全间距,车头时距在客观上存在一个最小值,因此将爱尔朗分布曲线向右移动一定距离。移位 l 阶爱尔朗分布车头时距的概率 $P(\cdot)$ 为

$$P(h \geq t) = \sum_{i=0}^{l-1} [\lambda(t-\tau)]^i \frac{e^{-\lambda(t-\tau)}}{i!} \tag{16}$$

式中: h 为车头时距(s); λ 为单位时间内的车辆平均到达率,采用 $\lambda = Q/3\ 600$ 计算, Q 为匝道四级服务水平下的单车道最大服务交通量; τ 为车头时距的最小间隔,一般取 1~1.5 s,本文取 1.5 s。

移位 l 阶爱尔朗分布的概率密度 $f(t)$ 为

$$f(t) = \begin{cases} 4\lambda^2(t-\tau)e^{-2\lambda(t-\tau)} & l=2 \\ 13.5\lambda^3(t-\tau)^2e^{-3\lambda(t-\tau)} & l=3 \end{cases} \tag{17}$$

车辆在获得可插入间隙前,必然拒绝了 n 个不可插入间隙,被拒绝的平均车头时距长度 h_n 为

$$h_n = \frac{\int_{\tau}^{t_c} t f(t) dt}{1 - P(h \geq t_c)} \tag{18}$$

式中: t_c 为一次换道所需的最小车头时距,取 3.5 s。

平均拒绝次数 n ,平均等待时间 t_w 采用下式计算

$$n = \frac{1 - P(h \geq t_c)}{P(h \geq t_c)} \tag{19}$$

$$t_w = h_n n = \begin{cases} \{ (1 + \lambda \tau) - [2\lambda^2 t_c^2 + (2\lambda - 2\lambda^2 \tau) t_c + (1 - \lambda \tau)] e^{-2\lambda(t_c - \tau)} \} \cdot \\ \quad [\lambda(2\lambda(t_c - \tau) + 1) e^{-2\lambda(t_c - \tau)}]^{-1} & l=2 \\ \{ 2(1 + \lambda \tau) - [9\lambda^3 t_c^3 + 9(1 - 2\lambda \tau)\lambda^2 t_c^2 + 3(3\lambda^2 \tau^2 - 4\lambda \tau + 2)\lambda t_c + 3\lambda^2 \tau^2 - 4\lambda \tau + 2] e^{-3\lambda(t_c - \tau)} \} \cdot \\ \quad [2\lambda[4.5\lambda^2(t_c - \tau)^2 + 3\lambda(t_c - \tau) + 1] e^{-3\lambda(t_c - \tau)}]^{-1} & l=3 \end{cases} \quad (20)$$

根据式(15)计算等待距离时各参数取值及计算结果见表 8。

表 8 等待距离参数取值及计算结果

Tab. 8 Values of waiting distance parameter and calculation results

匝道设计速度/(km · h ⁻¹)	30	35	40	50	60	70	80
设计通行能力/ (pcu · h ⁻¹)	1 300	1 500	1 700	2 000	2 300	2 600	2 900
等待时间/s	1.00	1.00	1.00	1.19	1.49	2.31	3.05
等待距离/m	8.3	9.7	11.1	16.5	24.8	44.9	67.8

注:通行能力取四级服务水平下双车道匝道通行能力;等待时间小于 1 s 时,行驶距离较小,对间距影响小,因此本文取 1 s。

4 匝道连续分流最小间距推荐值

将减速距离、标志认读距离、等待距离和换道距离代入式(1),可计算得到双车道匝道连续分流最小间距推荐值如表 9 所示(结果向上取整 5 m)。

表 9 双车道匝道连续分流最小间距推荐值

Tab. 9 Recommended values of minimum continuous diversion spacing on two-lane ramp

主线设计速度/(km · h ⁻¹)		120	100	80	60
不同匝道设计速度 (km · h ⁻¹)下的推荐值/m	80	265	265		
	70	210	210	210	
	60	200	180	160	
	50	200	180	160	145
	40	200	180	160	145
	35	195	175	155	140
	30	195	175	155	135
规范值/m		240	210	190	170

从研究结果来看,本文一定程度上论证了《规范》与《细则》中规定最小间距与主线设计速度的相关性,这主要是因为主线设计速度越高,匝道设计速度越低时,车辆通过主线分流鼻时的速度越高,在匝道上二次分流前所需减速距离越长。但在设计速度较高(大于 60 km/h)的匝道上,因车辆进入匝道后基本不需要减速,始终保持高速行驶状态,所需减速距离短,所需认读距离、等待距离和换道距离长,此时匝道设计速度是最小间距的主要影响因素。因此匝道连续分流最小间距不仅与主线设计速度相关,而且与匝道设计速度相关。

在匝道设计速度介于 30~60 km/h 时,《细则》中规定的匝道连续分流最小间距比推荐值增加

30~50 m。考虑《细则》的规定值包含了分流端部斑马线三角区长度,因而可以认为匝道设计速度较低时,《细则》的规定值总体上与推荐值相近。但因为界定范围的不同,《细则》的规定值仍可能存在间距偏小的问题(不同分流端部的几何设计会导致分流端部斑马线三角区长度有较大的差异),而在匝道设计速度较高时,尤其当设计速度为 80 km/h 时,《细则》中的规定值明显偏小,存在间距不足的问题,不利于驾驶人安全舒适的完成匝道上的二次分流过程。

5 结 语

(1)基于车辆在匝道连续分流区内的行驶轨迹特点,研究匝道连续分流最小间距。首先从驾驶人行驶特征和换道安全性考虑,以主线与匝道间分流鼻为起点,以匝道相互分流斑马线三角区划线起点为终点,重新界定了匝道连续分流间距范围。界定范围与《细则》相比,更符合驾驶人行驶特点和交通安全法规。将匝道连续分流间距分为减速距离、认读距离、等待距离和换道距离 4 个部分,建立了基于舒适换道的最小间距计算模型,并对其中的关键参数,特别是换道模型进行了深入研究,最后提出了最小间距推荐值。结果表明:当匝道设计速度在 30~60 km/h 时,最小间距主要受主线设计速度控制;当设计速度在 70、80 km/h 时,匝道设计速度对最小间距有显著影响,设计速度较高的匝道所需间距明显更长。当匝道设计速度较高时,《细则》中对匝道连续分流间距的规定偏小。

(2)提出了考虑具体换道轨迹的匝道连续分流间距计算模型,弥补了《细则》中忽略匝道设计速度影响的不足,并对其中的参数取值进行了调查分析论证,明晰了最小间距计算原理。

(3)提出了 sigmoid 换道轨迹模型,考虑了驾驶人在换道过程中的换道紧急程度。通过无人机采集到的换道时空数据对换道轨迹模型进行了拟合优度计算,平均拟合优度可达 97.50%,sigmoid 换道轨迹模型能够准确描述匝道连续分流区的换道行为。

(4)本文计算最小间距推荐值时,起点速度即分流鼻端通过速度的选取根据以往的研究成果,后续研究中,应采集分流鼻端运行速度,验证本文研究成

果;且本文未考虑纵坡对最小间距的影响,在后续研究中,可考虑纵坡对最小间距的影响,并提出相应的纵坡修正系数。

参考文献:

References:

- [1] 胡江碧,何禄诚,王荣华.高速公路互通立交安全性评价研究综述[J].中国公路学报,2020,33(7):17-28.
HU Jiang-bi, HE Lu-cheng, WANG Rong-hua. Review of safety evaluation of freeway interchange[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7):17-28.
- [2] TORBIC D J, HARWOOD D W, GILMORE D K, et al. Safety analysis of interchanges[J]. Transportation Research Record, 2009(2092):39-47.
- [3] JTG D20—2017,公路路线设计规范[S].
JTG D20—2017, Design specification for highway alignment[S].
- [4] JTG/T D21—2014,公路立体交叉设计细则[S].
JTG/T D21—2014, Guidelines for design of highway grade-separated intersections[S].
- [5] AASHTO. A policy on geometric design of highways and streets[M]. 7th ed. Washington DC: AASHTO, 2018.
- [6] 日本道路公团.日本高速公路设计要领[M].西安:陕西旅游出版社,1991.
Japan Highway Public Corporation. Essentials of express way design in Japan[M]. Xi'an: Shaanxi Tourism Press, 1991.
- [7] 高建平,廖丽.互通式立交匝道连续分流点最小间距研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2014,33(2):103-107.
GAO Jian-ping, LIAO Li. Minimum spacing between successive exits terminals in interchange ramps[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2014, 33(2):103-107.
- [8] 邵阳,潘兵宏,王云泽.高速公路互通式立交连续出口和入口间距研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(8):1642-1651.
SHAO Yang, PAN Bing-hong, WANG Yun-ze. Study on adjacent exit and entrance distance of freeway interchanges[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(8):1642-1651.
- [9] 陈瑾.高速公路互通式立交出口和入口设置相关技术指标研究[D].西安:长安大学,2016.
CHEN Jin. Study on the relative setting technical indicator of highway interchange entrance and exit[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [10] 蒋飞.互通式交叉匝道连续出入口最小间距研究[D].西安:长安大学,2018.
JIANG Fei. Research on minimum spacing ramp successive exit and entrance[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [11] BARED J, EDARA P, KIM T. Safety impact of interchange spacing on urban freeways[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2006.
- [12] IWASAKI M. A traffic accident analysis at merging/diverging sections of the metropolitan expressway in Japan[J]. Proceedings of Infrastructure Planning, 1992, 15:311-316.
- [13] VERMIJS R, SCHUURMAN H. Evaluating capacity of freeway weaving sections and on-ramps using the microscopic simulation model FOSIM: International symposium on highway capacity[C]//ARRB. Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity, Volume 2, Washington DC: ARRB, 1994:65-70.
- [14] CAYWOOD W, DONNELLY H L, RUBINSTEIN N. Guideline for ride-quality specifications based on transpo'72 test data[R]. Washington DC: Washington Urban Mass Transportation Administration, 1997.
- [15] SALVUCCI D D, LIU A. The time course of a lane change: Driver control and eye-movement behavior[J]. Transportation Research Part F, 2002, 5(2):123-132.
- [16] ZHOU B, WANG Y P, YU G Z, et al. A lane-change trajectory model from drivers' vision view[J]. Transportation Research Part C, 2017, 85:609-627.
- [17] 杨志刚,戚志锦,黄燕.智能车辆自由换道轨迹规划研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2013,32(3):520-524.
YANG Zhi-gang, QI Zhi-jin, HUANG Yan. Trajectory planning of lane changing for intelligent vehicles[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2013, 32(3):520-524.
- [18] 张新锋,陈建伟,左思.基于贝塞尔曲线的智能商用车换道避障轨迹规划[J].科学技术与工程,2020,20(29):12150-12157.
ZHANG Xin-feng, CHEN Jian-wei, ZUO Si. Trajectory planning for intelligent commercial vehicle obstacle avoidance based on quartic B'ezier curve[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(29):12150-12157.
- [19] AUGUSTIN D, HOFMANN M, KONIGORSKI U.

- Prediction of highway lane changes based on prototype trajectories[J]. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2019, 83(2): 149-161.
- [20] 赵树恩, 王金祥, 李玉玲. 基于多目标优化的智能车辆换道轨迹规划[J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(2): 232-242.
- ZHAO Shu-en, WANG Jin-xiang, LI Yu-ling. Lane changing trajectory planning of intelligent vehicle based on multiple objective optimization[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 21(2): 232-242.
- [21] 牛国臣, 李文帅, 魏洪旭. 基于双五次多项式的智能汽车换道轨迹规划[J]. *汽车工程*, 2021, 43(7): 978-986, 1004.
- NIU Guo-chen, LI Wen-shuai, WEI Hong-xu. Intelligent vehicle lane changing trajectory planning based on double quintic polynomials[J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(7): 978-986, 1004.
- [22] 潘兵宏, 周锡滨, 田秋玥. 小客车专用匝道超高设计研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(3): 120-129.
- PAN Bing-hong, ZHOU Xi-zhen, TIAN Qiu-yue. Superelevation design of dedicated ramp for passenger car[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2022, 41(3): 120-129.
- [23] JTG B01—2014, 公路工程技术标准[S].
- JTG B01—2014, Technical standard of highway engineering[S].
- [24] 刘子剑. 互通式立体交叉设计原理与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- LIU Zi-jian. Interchange design principle and application[M]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [25] 潘兵宏, 倪旭, 唐力焦, 等. B型喇叭式立交环圈出口匝道运行速度过渡段长度研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(3): 32-37.
- PAN Bing-hong, NI Xu, TANG Li-jiao, et al. Research on the operating speed transition section length at ring off-ramp of B-type trumpet interchange[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2019, 38(3): 32-37.
- [26] 张玉, 刘俊, 林伟, 等. 互通立交迂回式匝道纵向加速度特性[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(26): 11411-11418.
- ZHANG Yu, LIU Jun, LIN Wei, et al. Longitudinal acceleration characteristics of round about ramps of interchange[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(26): 11411-11418.
- [27] 徐进, 周佳, 汪旭, 等. 山区复杂线形公路小客车纵向加速度特性[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(4): 115-126.
- XU Jin, ZHOU Jia, WANG Xu, et al. Longitudinal acceleration performance of passenger cars on complex mountain highways[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(4): 115-126.
- [28] 廖丽. 山地城市互通式立交匝道连续分流点合理间距研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- LIAO Li. Research on reasonable spacing between successive exit terminals of interchange ramps in mountain city [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [29] 孔令臣. 多车道高速公路互通式立交加减速车道长度及最小净距研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- KONG Ling-chen. Research on the length of speed-change lane and minimum net distance between interchanges on multi-lane expressway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.