

文章编号:1005-0523(2019)01-0018-07

基于停车视距的互通式立交减速车道流出角研究

王思琦,陈景雅,罗冬宇

(河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:为了减少车辆在驶入互通式立交出口时发生追尾、侧向刮擦等事故,通过解析不同设计速度下的停车视距对互通式立交减速车道流出角取值范围的影响机理,建立减速车道流出角的理论计算模型。利用 CarSim 软件建立车辆动力学仿真模型,模拟车辆驶入立交出口的过程,从车辆抗滑移、抗倾覆等角度出发分析车辆在行驶过程中的横向稳定性,验证流出角计算模型的合理性。

关键词:减速车道流出角;停车视距;CarSim;横向稳定性

中图分类号:U412.38

文献标志码:A

互通式立交出口是实现车辆变速、主线车流流出的重要区域,不合理的出口设计会阻碍车流畅通,影响车辆运行安全^[1],其中互通式立交减速车道流出角作为互通式立交出口处平面线形设计要素之一,应予以足够的重视。目前国内外学者对立交减速车道流出角的研究较少,寻找合理的流出角取值范围对立交出口的通行能力有着重大影响。为了保证道路线形连接圆滑,主线车辆能顺适、安全地驶入减速车道,《日本高速公路设计要领》^[2]对不同设计速度下的流出角进行了详细的规定,但并未给出具体的流出角计算公式;美国 AASHTO 出版的《公路与城市道路几何设计》^[3]提出流出角以 $2^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 为宜,但对何时取用何值没有进行更详细的规定;潘兵宏等^[4]通过研究流出角功能,从抗滑移、抗倾覆角度出发,建立了不同路况条件下设计速度与流出角关系的计算模型;纪连君^[5]通过分析几何图形,利用修正后的变速车道长度和支距,反推算出流出角计算公式;《互通式立体交叉设计原理和应用》^[6]中指出:直接式减速车道的流出角不宜过大,当流出角大于 10° 时将容易造成交通流紊乱;《公路路线设计规范》(JTG D20-2017)^[7]中规定:变速车道采用直接式时,流出角一般取 $1/20\sim 1/15$ 。现有对流出角取值范围的研究大部分都从车辆动力学出发,只考虑了车辆转弯行驶的侧向稳定性,未考虑前、后车之间的视距要求^[8]。事实上,在立体交叉出口处,由于车辆之间未保持一定的距离,当交通量较大时极易发生追尾等安全事故。由于夜间行驶车辆由主线车道进入减速车道时,存在无法看清前方车辆汽车尾灯问题,影响后车司机做出正确判断,因而存在安全隐患,故根据车辆驶入减速车道的行驶轨迹,利用停车视距得出运行速度与流出角关系的计算模型;通过 CarSim 车辆动力学仿真软件,导入计算模型中的流出角建立道路模型,模拟汽车驶入减速车道的过程,分析车辆在驶入减速车道过程中的横向稳定性情况,从而验证流出角计算模型的正确性。考虑到立交出口一般设置为主线为直线段或者是大曲率圆曲线处,所以本文主要研究流出角在直线段或大曲率圆曲线上的取值范围,为了方便计算,将大曲率圆曲线近似看成直线。

收稿日期:2018-06-12

作者简介:王思琦(1994—),女,硕士研究生,研究方向为道路路线设计线形安全。

通讯作者:陈景雅(1967—),女,教授,硕士,主要研究方向为道路设计与路面材料,交通管理与规划。

1 互通式立交减速车道流出角

互通式立交减速车道是在主线出口附近右侧增设的附加车道,其作用是让主线车辆在不影响主线交通情况下减速进入匝道,完成主线分流。减速车道一般采用直接式,因为与平行式变速车道相比,直接式减速车道的线形与转弯驶入匝道的车辆轨迹更吻合,降低了驾驶员的操作难度,利于行车^[9]。

车辆从主线流出,驶入减速车道会形成一定的角度,即为流出角,如图 1 所示。流出角角度过大易造成交通流紊乱,车辆容易发生侧滑或倾覆;角度过小则导致减速车道过长,不利于立交选址,同时也增加了工程造价^[10];因此,需要对流出角进行合理的设计。

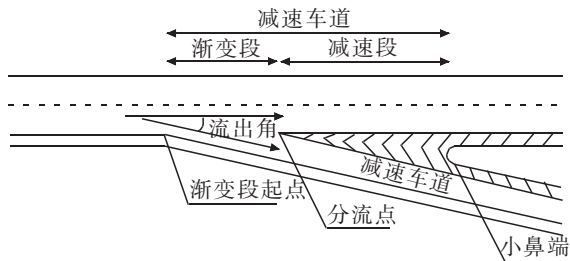


图 1 流出角示意图

Fig.1 Schematic diagram of the outflow angle

2 互通式立交减速车道流出角理论计算模型

2.1 车辆行驶轨迹

由于互通式立交减速车道流出角确定了车辆在立交出口处的行驶轨迹,为了合理建立流出角的计算模型,需找到车辆行驶轨迹与流出角的内在联系。如图 2 所示,车辆由主线右侧分流驶入减速车道,需要驾驶员操作方向盘完成一定的转向,当车辆偏移半个主线车道宽度时,可认为车辆已经完成转向工作,完全进入减速车道^[11]。

在互通式立交出口区域,车辆实际的行驶轨迹是复杂多变的,但考虑到这段距离较短,为了方便计算,将其简化成以 O 为原点、 R 为半径的圆弧,即图中曲线 AB 。

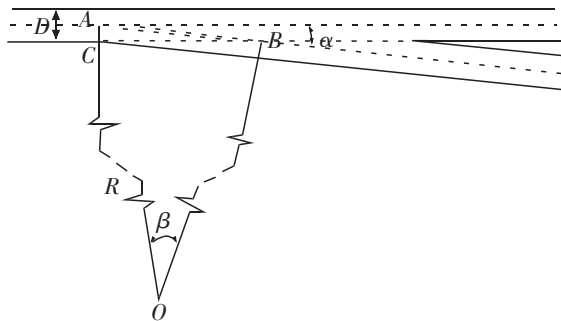


图 2 行车轨迹示意图

Fig.2 Schematic diagram of the track

分析图 2 的几何关系,流出角 α 同时也是弦切角,由弦切角定理可知,弦切角 α 等于它所夹弧所对的圆心角 β 的一半。同时, AO 段由 AC 和 CO 段两部分组成,其中 AO 段即为 R , AC 段为行车道宽度的一半, CO 段利用勾股定理可由 R 进行表示,整理后得

$$R = \frac{D}{2(1 - \cos\beta)} \tag{1}$$

式中: R 为车辆行驶轨迹半径,m; D 为主线行车道宽度,本文取 3.75 m。

2.2 车辆运行速度

车辆在行驶过程中,由于人、车、路等各种因素的综合影响,往往不是以设计速度行驶,为了提高公路的安全性,应当要考虑车辆实际的运行速度^[12]。通过对分流区车辆分流行为、运行状态的分析及对运行速度的数据采集,在渐变段内行驶的车辆基本上以分流点初速度进行匀速行驶^[13]。由于影响分流点运行速度的因素较多,需要结合我国互通立交的实际情况进行大量试验,找出其行驶速度的内在变化规律。根据陈泰忠^[14]学者的研究,在现阶段互通式立交的设计中,分流点的运行速度应尽量取高值,建议不小于主线设计速度的 70%。本文取分流点的行驶速度为主线设计车速的 70%,取值见表 1。

表 1 分流点初速度计算表
Tab.1 Calculation of initial speed at split point

主线设计速度/(km/h)	分流点初速度/(km/h)
120	85
100	70
80	55

2.3 停车视距

停车视距是指车辆从发现障碍物,采取制动到完全停止所需要的最短距离。停车视距包括3个部分:反应距离、制动距离和安全距离。其中反应距离是指驾驶员发现前方障碍物到采取刹车动作经过的距离,制动距离是指从刹车动作完成到实际停下所用的距离,其计算公式为

$$S = \frac{vt}{3.6} + \frac{v^2}{254(\varphi+i)} + S_0 \quad (2)$$

式中: S 为停车视距,m; v 为行驶速度,根据表1进行取值,km/h; t 为反应时间,其中包括感觉时间1.5 s,制动反应时间1.0 s,总时间为2.5 s; φ 为路面附着系数,这里取潮湿状态下沥青混凝土路面的 φ 值0.4; i 为路面纵坡,为了简化计算不考虑纵坡,取0; S_0 为安全距离,一般取5~10 m,本文取安全距离5 m。

2.4 横净距

立交出口区域按运行速度确定的最小轨迹半径要满足停车视距的要求,需利用最大横净距法对平曲线视距进行检查。最大横净距法分为两种情况:一是不设缓和曲线,二是设缓和曲线。因为本文将车辆由主线转向减速车道出口的行驶轨迹简化成圆弧,故只考虑情况一。对于不设缓和曲线的横净距计算,又分为圆曲线长度大于停车视距和圆曲线长度小于停车视距这两种不同的计算方法,考虑到由第一种情况计算得到的横净距最大,则最大横净距可以表示为

$$h = R \left(1 - \cos \frac{S}{2R} \right) \quad (3)$$

2.5 计算流出角

为了保证车辆从主线流向减速车道过程中,后方车辆能看到前方车辆的尾灯,当前方车辆遇到障碍被迫减速或停车时,后方车辆能立即采取措施,避免追尾等事故的发生,需要保证后方车辆在视距曲线与轨迹线之间的空间范围内通视。考虑最不利情况,即有车辆停靠在紧急停车带内,此时要求最大横净距 h 不应大于1/2的主线最外侧车道宽度 D ,如图3所示。

当最大横净距 h 等于主线车道宽度 D 的一半时,行车轨迹半径取最小值,即

$$R \left(1 - \cos \frac{S}{2R} \right) = \frac{D}{2} \quad (4)$$

考虑到三角函数计算过于复杂,将式(4)等号左边用泰勒公式展开,并省略四次方及以上的高阶微量,将停车视距 S 的表达式代入式(4),化简并整理后得

$$R = \frac{1}{4D} \left[\frac{vt}{3.6} + \frac{v^2}{254(\varphi+i)} + S_0 \right] \quad (5)$$

由式(1)最终解得互通式立交减速车道流出角理论计算模型为

$$\alpha = \frac{1}{2} \arccos \left\{ 1 - 2D^2 / \left[\frac{vt}{3.6} + \frac{v^2}{254(\varphi+i)} + S_0 \right]^2 \right\} \quad (6)$$

根据上述公式计算出在不同设计速度下流出角的大小,并将其与《规范》中规定的流出角数值进行对比,结果见表2。

表2 流出角计算值与《规范》规定值比较
Tab.2 Outflow angles of the calculated and the prescribed standard

设计速度/ (km/h)	运行速度/ (km/h)	轨迹半径/ m	流出角/ rad	《规范》/ rad
120	85	1 217.52	1/36	1/25
100	70	691.42	1/27	1/22.5
80	55	354.96	1/19.5	1/20

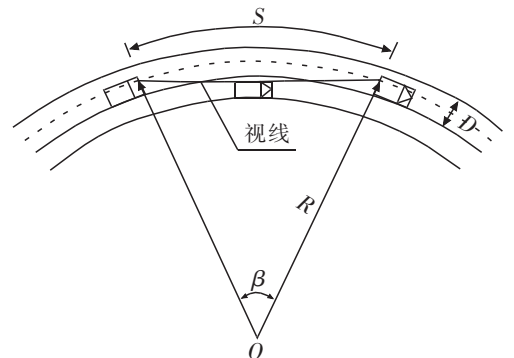


图3 车辆行驶轨迹半径与停车视距关系示意图
Fig.3 Relationship of vehicle track radius and stopping sight distance

从表 2 可知,与《规范》中流出角数值相比,基于停车视距计算出来的立交减速车道流出角要偏小,并且随着设计速度的减小,计算出来的流出角数值越来越接近《规范》中的规定值。这是因为《规范》仅仅考虑车辆自身行驶的安全性,未考虑前后车辆对其影响,而实际上,为满足停车视距所计算出来的转角半径要远大于维持转弯车辆横向稳定性所需要的半径,并且两者的差值会随着车速的降低而减小。

3 车辆动力学仿真模型

3.1 仿真模型的构建

CarSim 是一款专门针对车辆动力学的仿真软件,通过建立车辆模型、道路模型及驾驶员模型构成了人-车-路的完整体系,具有操作简单、仿真速度快、精度高等优点,已在交通仿真、车辆性能测试中被广泛应用^[15]。

考虑到目前互通式立交是以小汽车为主要交通组成部分,所以本文选择软件自带的小轿车模型作为典型车型来建立车辆模型,汽车等级为 D 级。驾驶员模型也采用软件自带的道路中线跟踪行驶模型,即不发生偏移,设定驾驶员预瞄时间为 1.5 s,方向盘最大转角和转速分别为 720 deg 和 1 200 deg/s。

根据计算模型得出的流出角及《规范》中的流出角,分别建立相应的道路模型。本文只研究主线最外侧车道上车辆驶入减速车道的情况,故直接取主线为单车道,其车道宽度为 3.75 m,考虑最不利情况,路面附着系数取潮湿状态下沥青混凝土路面的值 0.4。

车辆由主线流出进入减速车道的过程可以分成 3 段:主线段、转至减速车道入口段、减速车道直行段,如图 4 所示。为了避免车辆由于刚开始仿真的不稳定性降低仿真精度,在仿真车辆开始转入渐变段之前,先让车辆在主线上行驶一段距离,时间设定为 3 s。根据车辆行驶速度及转弯半径的大小,可以计算出车辆从主线转至减速车道入口所需要的时间,从而确定第 2 阶段的仿真时间。不同立交减速车道流出角下道路仿真参数见表 3。

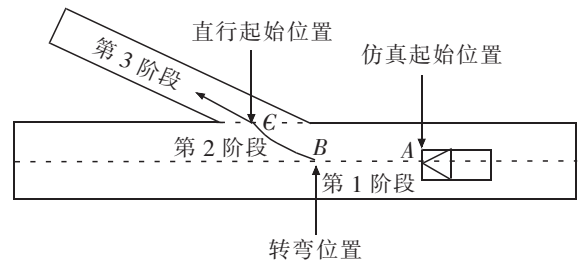


图 4 仿真方案示意图

Fig.4 Schematic diagram of simulation scheme

表 3 道路模型仿真参数

Tab.3 Simulation parameters of road model

计算值/规范值 /rad	仿真阶段	运行状态	运行速度/ (km/h)	轨迹半径/m	仿真时间/s
(1/35)/(1/26)	第 1 阶段	直行	120		3.0
	第 2 阶段	右转	85	1 218/586	2.9/2.0
	第 3 阶段	直行	120		3.0
(1/27)/(1/22.5)	第 1 阶段	直行	100		3.0
	第 2 阶段	右转	70	692/474	2.7/2.2
	第 3 阶段	直行	100		3.0
(1/19.5)/(1/20)	第 1 阶段	直行	80		3.0
	第 2 阶段	右转	55	355/375	2.4/2.5
	第 3 阶段	直行	80		3.0

3.2 仿真模型评价

3.2.1 评价指标的选取

车辆操纵稳定性是指在驾驶员具有良好心理素质且未发生疲劳驾驶的情况下,车辆能正确响应驾驶员转向指令的能力;当遇到外部干扰时,车辆能自行保持或迅速恢复原驾驶状态的能力。车辆操纵稳定性是评价车辆安全行驶的重要指标。

近年来,众多学者都对操纵稳定性进行了深入研究,并且采取了不同的评价指标。本文通过分析既有研究成果,最终采用轨道跟随误差指标、侧翻危险性指标、侧滑危险性指标作为汽车操纵稳定性的评价指标^[6]。其中,轨道跟随误差是指车辆在行驶过程中偏离道路中心线的横向距离。根据相关学者所提出的关于车辆稳定性的理论可知,轨道跟随误差阈值为 0.3 m。当车辆发生侧翻时,一侧轮胎会抬高离开路面,并以另一侧为转轴进行翻转,此时,这一侧轮胎受垂直反力的大小为 0。所以本文采用轮胎垂直反力 F_z 反映抗侧翻能力, F_z 越趋于 0,车辆越容易发生侧翻。侧滑也是汽车失稳的常见形式之一,本文采用侧向加速度作为抗侧滑能力的评价指标。根据国家标准,对于小汽车而言,侧向加速度阈值为 0.4 m/s²。

3.2.2 仿真结果分析

根据不同的立交减速车道流出角建立仿真模型,并分别按各自的运行速度进行仿真模拟,利用 CarSim 软件中自带的后处理模块,绘制出相应指标与时间的关系曲线。

1) 轨道跟随误差指标。图 5 是模拟车辆在行驶过程中偏离道路中心线距离的变化图。从图中可以看出,前 3 s 车辆在主线上沿直线行驶,几乎未发生偏移,3 s 后车辆由主线转入渐变段,由于离心力的作用开始逐渐偏离道路中心线,当快要驶入减速车道入口时,车辆的横向偏移距离达到峰值,最后 3 s 车辆在减速车道上行驶,开始渐渐回归道路中心线。当设计速度为 120 km/h 和 100 km/h 时,车辆在按流出角计算值建立的道路模型上行驶的横向偏移距离的峰值要小于在按规范值建立的道路模型上行驶的横向偏移距离的峰值,尤其是在 120 km/h 的设计速度下,按流出角规范值行驶的车辆,其横向偏移距离已明显大于阈值 0.3 m,当设计速度为 100 km/h 时,其峰值虽未超出 0.3 m,但也已经很接近阈值。当设计速度为 80 km/h 时,由于流出角的计算值与规范值相差不大,两条关系曲线近似重合。由此可以得出,在相同设计速度下,车辆在按流出角计算值建立的道路模型上行驶时,车辆跟随状态要优于在按流出角规范值建立的道路模型上行驶,并且当设计速度较高时,考虑到雨雪天气导致路面较滑,车辆横向偏移距离增大,按流出角规范值建立的道路或许不能满足道路的安全性要求。

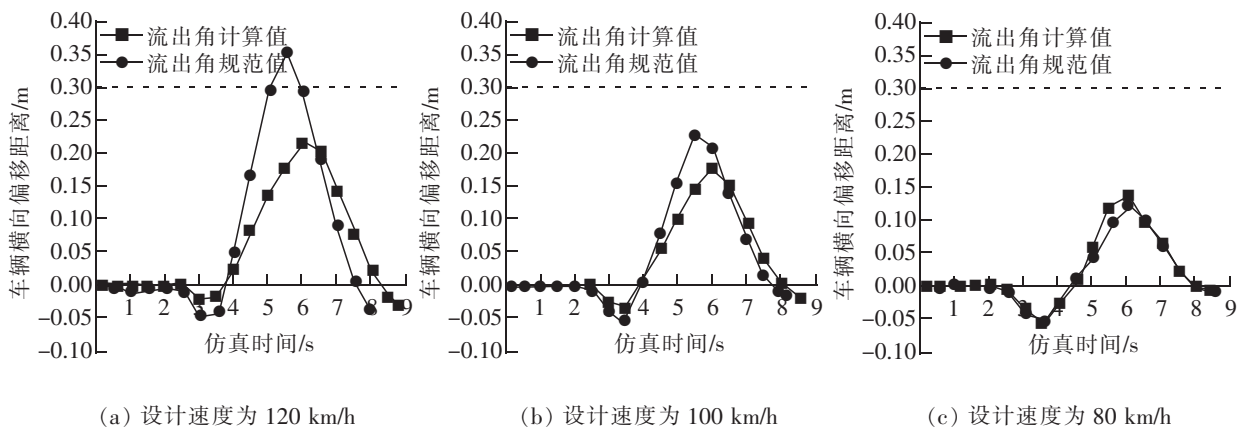


图 5 车辆横向偏移距离
Fig.5 Lateral offset distance of vehicle

2) 侧翻危险性指标。图 6 是模拟车辆在行驶过程中 4 个轮胎各自的垂直反力的变化图。从图中可以看出,前侧轮胎 L1、R1 所受的垂直反力要远大于后侧轮胎 L2、R2,这是因为汽车发动机在车身前部使得汽车重心在前轮附近,并且在车辆转至减速车道入口的过程中,由于离心力的存在,车辆质量中心发生转移,导致外侧轮胎 L1、L2 在竖直方向的受力大于内侧轮胎 R1、R2,并且内外侧轮胎所受的垂直反力成负相关,即一侧受力增加,另一侧必定减少。总体上,车辆在按流出角计算值建立的道路上行驶比在按规范值建立的道路上行驶受到轮胎垂直反力要小,但是无论车辆在哪种道路上行驶,4 个轮胎受到的垂直反力都远大于阈值 0 N。由此可以得出,车辆在模拟路段上并未发生侧翻现象,在相同设计速度下,车辆在按流出角计算值建立的道路模型上行驶发生侧翻的可能性要低于在按流出角规范值建立的道路上行驶。

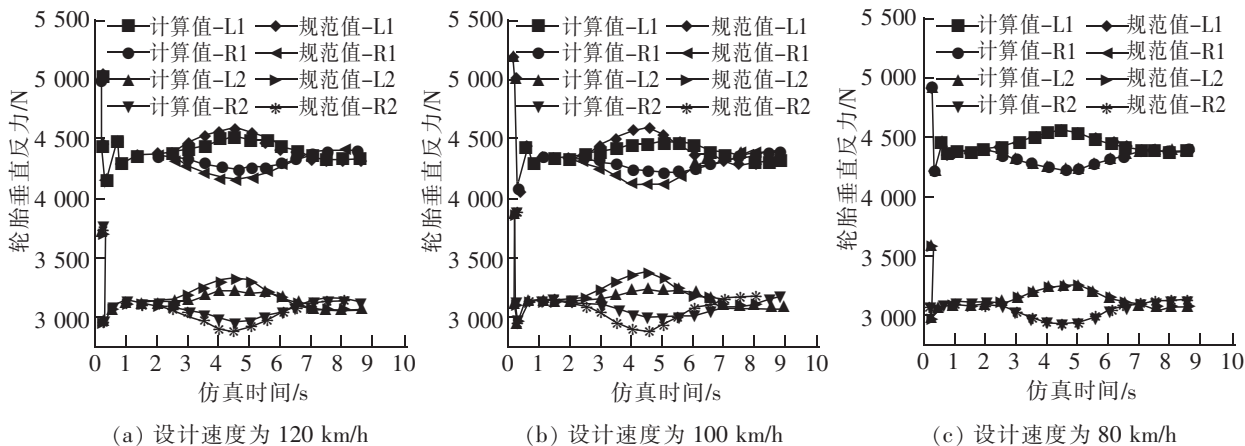


图 6 车辆轮胎垂直反力

Fig.6 Vertical counterforce of vehicle tires

3) 侧滑危险性指标。图 7 是模拟车辆在行驶过程中产生的侧向加速度的变化图。根据图中车辆侧向加速度曲线的变化趋势分析可得,前 3 s 车辆在主线上直行,侧向加速度几乎为 0,3 s 后车辆开始转弯进入渐变段,由于离心力的存在,无论是在按流出角计算值还是按规范值建立的道路上行驶,车辆的侧向加速度都在逐渐增加,并在车辆行驶到渐变段中间位置处达到峰值。虽然图中侧向加速度的峰值均未高于阈值 0.4 m/s^2 ,但是按流出角规范值行驶的车辆的侧向加速度的速率增加全程都高于按流出角计算值行驶的车辆的速率增加,其峰值也是如此,这是因为按流出角计算值建立的道路的转弯半径要大于按流出角规范值建立的的道路转弯半径。由此可以得出,车辆在行驶过程中没有发生侧滑现象,驾驶员依旧可以较好地控制车辆,在相同设计速度下,按流出角计算值建立的道路模型的稳定度要高于按流出角规范值建立的道路模型。

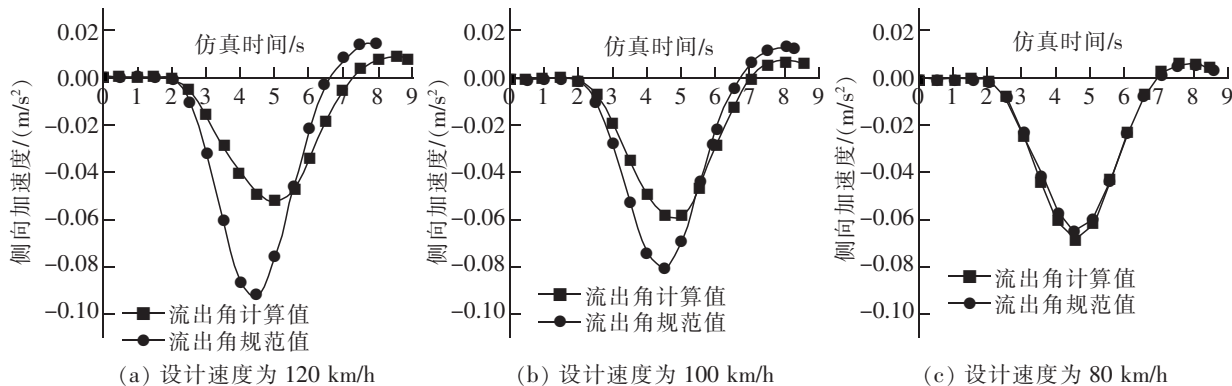


图 7 车辆侧向加速度

Fig.7 Lateral acceleration of vehicle

4 总结

基于停车视距理论,根据车辆驶入减速车道的运动轨迹,建立互通式立交减速车道流出角的理论计算模型。利用 CarSim 车辆动力学仿真软件将按流出角计算值建立的道路模型与按流出角规范值建立的道路模型进行仿真对比,从车辆稳定性角度验证计算模型的可靠性。仿真结果表明:计算出来的流出角要小于规范值,并且两者的差值随着设计速度的降低而减小;车辆在按流出角计算值建立的道路上行驶的操作稳定性要高于在按流出角规范值建立的道路上行驶,当设计速度较高时,《规范》规定的流出角虽不会导致车辆产生滑移、倾覆现象,但可能不满足轨道跟随要求。流出角的取值不仅要考虑车辆自身的稳定性要求,还应考虑车辆间的视距要求,只有同时满足这两方面条件的流出角才是安全可靠的。

参考文献:

- [1] 彭庆艳. 城市部分互通立交增设转向匝道方法研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(3): 29-34.
- [2] 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: 325-328.
- [3] ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. A policy on geometric design of highway and streets[S]. Washington D C: AASHTO, 2011.
- [4] 潘兵宏, 董爱强, 田曦. 立交减速车道流出角的研究[J]. 中外公路, 2014, 34(1): 328-333.
- [5] 纪连君. 简化互通式立体交叉设计流程在变速车道设计中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2013(20): 40-41.
- [6] 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: 283-284.
- [7] 中华人民共和国交通运输部. JTG D20-2017 公路路线设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [8] 莫阳. 城市快速路匝道及变速车道控制参数研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(5): 111-120.
- [9] 史静, 沈穗娜. 互通式立交变速车道长度研究[J]. 中外公路, 2011, 31(4): 309-314.
- [10] 邓亚娟, 梁康, 张旭, 等. 基于 ADAMS/Car 的紧急避险车道入口安全研究[J]. 公路, 2016, 61(9): 201-207.
- [11] 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: 79-80.
- [12] 李正一. 车辆运行速度在公路路线优化设计实践[J]. 黑龙江交通科技, 2018, 41(4): 179-180.
- [13] 王海君, 杨少伟. 高速公路互通式立交单车道减速车道长度研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(3): 124-128.
- [14] 陈泰忠. 互通式立交分流点曲率半径的设计探讨[J]. 中外公路, 2004, 24(1): 58-59.
- [15] 赵承成, 张乾. 考虑车辆特性的交通跟驰模型仿真与改进[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(3): 6-11.
- [16] 刘晨. 基于 Carsim 仿真软件的公路线形安全评价方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2014: 49-50.

Study on Outflow Angle of Deceleration Lane of Interchange Based on Stopping Sight Distance

Wang Siqi, Chen Jingya, Luo Dongyu

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to reduce such accidents as the rear-end collision and side scraping when vehicles enter the exit of interchange, a theoretical calculation model of the outflow angle of deceleration lane was established to analyze the influence of stopping sight distance on the outflow angle range of interchange deceleration lane at different design speed. Furthermore, the vehicle dynamics simulation model was set up by using CarSim to simulate the process of vehicles entering the exit of interchange. Finally, from the perspective of anti-sliding and anti-overturning of the vehicle, the lateral stability of the vehicle during driving was analyzed so as to verify the rationality of the calculation model of the outflow angle.

Key words: outflow angle of deceleration lane; stopping sight distance; CarSim; lateral stability