

互通式立交出口匝道分流鼻端平纵组合指标研究

张弛^{1,2} 张宏¹ 齐晨¹ 白浩晨² 高建荣³ 侯宇迪¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室, 陕西 西安 710075;

3. 山西省交通规划勘察设计院, 山西 太原 030000)

摘要: 为研究不同平纵线形指标条件下的互通式立交出口匝道分流鼻端行车安全性, 采用小客车行车动力学仿真的方法, 建立人、车、路仿真模型. 通过改变分流鼻端的圆曲线半径、纵坡坡度, 模拟不同条件下的行驶工况, 分别对分流鼻端进行了平面线形和纵断面线形研究, 得出不同工况条件下的车辆侧向加速度的响应输出, 分析不同线形指标参数对分流鼻端行车安全的影响. 研究结果表明: 在匝道出口分流鼻端处, 长缓和曲线 + 小半径圆曲线线形组合安全性优于短缓和曲线 + 大半径圆曲线线形组合. 当主线设计速度为 120 km/h (分流鼻端的设计速度为 70 km/h), 纵坡为 -5% 时, 车辆的侧向加速度最大值为 0.58g, 此时车辆侧滑危险性较大, 建议设计中分流鼻端纵坡小于等于 -4%. 为保障分流鼻端行车安全, 主线设计速度为 120 km/h 时, 分流鼻端圆曲线半径为 350 m, 则纵坡应小于 -3.5%; 当圆曲线半径为 300 m, 则纵坡应小于 -3%. 主线设计速度为 100 km/h 时, 分流鼻端圆曲线半径为 300 m, 则纵坡应小于 -4%; 圆曲线半径为 250 m, 则纵坡应小于 -3.5%.

关键词: 公路工程; 安全工程; 计算机仿真; 立交出口

中图分类号: U412

doi: 10.3969/j.issn.1000-565X.2018.09.014

高速公路互通式立交出口匝道分流鼻端, 因其行车环境的复杂性, 往往成为事故黑点存在的地点之一. 在互通式立交主线的分流鼻端之前, 驾驶人员通过制动来使车辆从较高的速度减至匝道设计速度, 并且车辆需要转动方向盘来改变车辆行驶轨迹, 若车辆减速不及时或转向不及时, 很容易发生车辆追尾、冲撞护栏、冲出路基等危险状况, 车辆会在路面上留下大量刹车轨迹且可能会发生事故. 为使车辆能够安全地通过分流鼻端驶出主线, 分流鼻端的

线形条件必须满足车辆运行速度变化的要求. 根据已有统计, 虽然互通式立交出口匝道分流端行车距离较短, 但是发生的事故约占立交范围内总事故的 3/5^[1]. 保障分流端部的行车安全性对车辆安全运营具有重要意义.

针对立交出口路段的安全问题, 国内外学者开展了众多研究. Hunter 等^[2] 通过调查发现, 匝道上车辆的运行速度总是高于其设计速度, 极易导致事故的发生, 因此他们对规范中的匝道设计速度重新

收稿日期: 2018-01-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0803906); 中国博士后科学基金资助项目(2016M590915); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(310821172002, 310821172201); 山西省交通运输厅科技项目(20416-1-11); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(S2017-ZRJ-MS-0603)

Foundation items: Supported by the National Key R & D Project(2017YFC0803906), the Postdoctoral Fund of Ministry of Education of China (2016M590915) and the Shaanxi Natural Science Basic Research Project (S2017-ZRJ-MS-0603)

作者简介: 张弛(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事道路安全与仿真研究. E-mail: zhangchi@chd.edu.cn

进行了评估. Hassan 等^[3]应用模拟仿真试验,建立驾驶员行为特性、道路现形这两者与行车视距间的关系,并从行车视距角度研究了道路平纵取值. Bared 等^[4]基于统计学分析方法,对变速车道发生的事故进行研究,结果表明,变速车道的长短与事故率存在负相关性,即变速车道越短,事故率越高,反之亦然. Hassan 等^[5]以期望事故率为基础数据,建立变速车道长度计算模型,并给出了变速车道长度的合理建议值. 李嘉等^[6]从交通安全的角度,根据目前变速车道、匝道存在的安全性问题进行了分析,并提出了应注意的问题,为道路设计人员提供参考. 苏世毅^[7]对立交分流鼻端的车辆运行速度进行了分析与研究,其研究结果为出口匝道的的设计提供了一定的借鉴. 沈强儒等^[8]为确定菱形互通式立交分流区域主线线形指标,建立了菱形立交区域主线平面及纵断面指标和识别视距关系模型,对分流鼻端平曲线视距与竖曲线视距进行了分析研究,提供了可参考的视距值. 陈泰忠^[9]从立交分流鼻端行车安全角度出发,分析了车辆在曲线路段的受力及危险工况,给出了匝道的曲率半径的推荐值. 孟巧娟等^[10]基于现行规范中对分流点回旋线参数、半径的取值进行研究,发现适当提高线形参数对行车安全更有利. 我国现行《公路立体交叉设计细则》(JTG/T D21—2014)中对分流鼻端处出口匝道平曲线的最小曲率半径值给出了规定^[11],当主线设计速度为120 km/h时,分流鼻端的设计速度为70 km/h,匝道最小半径为300 m.

已有研究大多针对平面线形进行研究,且分流鼻端处出口匝道平曲线的最小曲率半径的规范值也仅对平面线形参数进行了规定,缺乏对纵断面线形参数及平纵组合的研究,规范也没有给出相关纵坡值及平纵组合具体规定,较难指导设计人员进行端部的安全设计,而事故的发生往往是由于道路平纵线形共同作用的,并且互通式立交分流鼻端部事故发生的次数要高于互通式立交主线及匝道等路段. 本研究从互通式立交出口匝道分流鼻端运行速度过渡段出发,以保障小客车侧向滑移安全性为研究目的,建立了基于行车动力学的仿真模型. 首先分析不同工况下的车辆行车动力学响应,分别分析了运行速度过渡段的平纵线形指标下车辆的行车安全性,进而分析了现行规范值对于行车安全性的影响,给出了设计中平纵组合应采取的最小值.

1 匝道分流阶段运行速度变化状态分析

在车辆驶离主线进入减速车道之前,是以主线设计速度为目标速度进行行驶的,驾驶人首先接受标志上的建议进行减速,然后观察减速车道和匝道的几何条件,以便评估驶出主线时最合适的速度. 在进入减速车道之后,驾驶人将根据前方匝道的几何条件和车辆分布情况调整车速,一般情况下驾驶人都倾向于开得尽可能快,直到车辆进入匝道后不得不减速^[12];此区域往往是事故的高发区. 故鼻端附近的匝道设计速度不应采用与基本路段相同的设计速度,而应以鼻端通过速度作为确定鼻端附近匝道线形指标和控制几何设计的重要依据.

驶出车辆速度的减小首先在减速车道上进行,此外驶过分流鼻端时车辆仍然存在减速过程,此路段被称为运行速度过渡段. 运行速度过渡段上任一点曲率半径 R 随着距分流鼻端距离 L 的不同不断变化,如图1所示. 在此路段的行车过程中车辆完成进入匝道之前的减速及转向,因而此路段的平纵线形参数选择与组合对车辆的行驶安全性有重要作用.

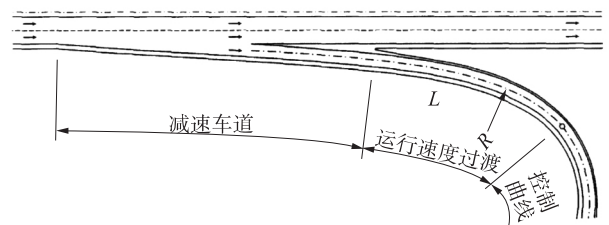


图1 出口匝道运行速度过渡段示意图

Fig. 1 Schematic diagram of speed transition section of the ramp operation

为获取立交出口位置处小客车实时的运行数据,本研究采用了链式开普勒雷达测速仪,将该链式雷达放置于减速车道前90 m处,并将50 ms作为该仪器记录车辆实际运行状态的时间间隔. 另外因为链式雷达的前部检测范围是一个扇形区域,所以现场测试时该仪器被放置在硬路肩上且距主线外侧车道外边缘1.0~2.5 m,距出口上游距离 L_0 为40 m至80 m,见图2. 采用这样的布置方式来记录出口处车辆的运行状态,可以减少仪器对驾驶人员驾驶行为的干扰,另外在实际测试中,尽量保证链式雷达头水平且平行于主线行车方向. 因为此处使用的链式雷达测试范围较广,数据较多,为减少无用数据的数量,将其检测范围设定到小鼻点后20 m的区域. 实

际测试时,将链式雷达与电脑相连接,并在其配套的DR3_TMC configurator 软件中输入基本的信息.比如:仪器中心距外侧车道边缘距离、仪器架设高度、车道宽度等,以此来保证车辆在软件中的行驶方向大致沿着车道中心线进行.

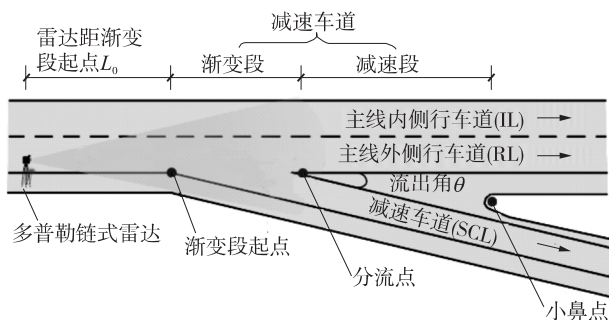


图2 分流鼻端示意图

Fig. 2 Schematic diagram of diverting nasal tip

通过提取雷达采集到的车辆的运行速度、行驶坐标等,得到了133辆驶入减速车道的小客车的数数据.利用所得数据进行统计分析,可以得出不同主线设计速度下的小客车不同位置处的测定速度的第85百分位行驶速度 v_{85} .现场采集仪器见图3,统计速度见图4.



图3 雷达测速器

Fig. 3 Acquisition instrument

通过分析得出,车辆从主线开始运行到匝道控制曲线起点,共经历3个过程:①在渐变段上用发动机制动减速;②在减速段上用制动器减速;③在运行速度过渡段上再次用制动器减速.在这3个过程中,车辆的运行速度变化为:

(1) 从渐变段行驶到减速车道一个车道宽度处,速度从主线的平均速度降低至初始速度 v_0 ;

(2) 从减速段行驶到分流鼻端处,从初始速度降低至鼻端通过速度 v_1 ;

(3) 从鼻端行驶到匝道控制曲线起点处,运行速

度从鼻端通过速度降低至匝道控制曲线起点速度 v_2 .

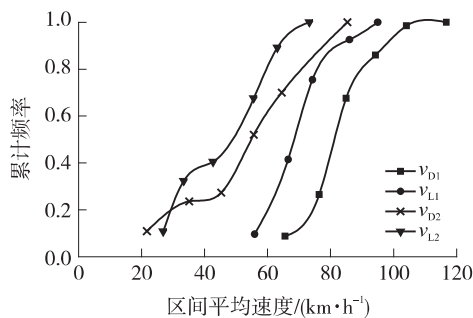


图4 分流鼻端区域行车速度

Fig. 4 Driving speed at deceleration lane

从图4可分析得出,当主线设计速度为120 km/h、100 km/h时互通式立交主线右侧(匝道设计速度为50 km/h)分流端附近的小客车运行速度 v_D 分别为92 km/h、75 km/h,小鼻端附近小客车运行速度 v_L 分别为77 km/h、63 km/h.

车辆在过渡段的减速一般采用制动器减速,减速度 a 为

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{g}{1 + \varepsilon} \left(\mu + f + \frac{\gamma A}{W} v^2 \right) \quad (1)$$

式中: g 为重力加速度; ε 为加速阻尼比; μ 为滚动摩擦系数; f 为制动阻力系数; γ 为空气阻力系数; A 为迎风面积; W 为车辆重量; v 为车辆行驶速度; t 表示车辆在过渡段减速行驶的时间.

当车辆行驶在分流鼻端附近的平曲线路段时,由于转向行驶而产生离心力及侧向加速度,进而导致了车辆的荷载转移,车辆的横摆角速度瞬间会发生较大的变化,导致车辆不再按照预计轨迹进行转向行驶,此时极易出现车辆的侧向滑移,可能出现车辆失控、碰撞同行车辆、碰撞道路护栏、冲出路基等危险状况,严重危及行车安全^[13],如图5所示.

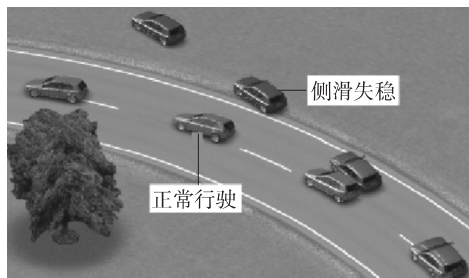


图5 正常行驶与侧滑失稳视景

Fig. 5 Scene of normal moving and sideslip

由于立交出口行车的复杂性以及实车试验的危险性,本研究采用基于行车动力学的仿真试验进行.本研究仿真所采取的分流鼻端行车速度是基于现场

调研的分流端运行速度和小鼻端运行速度,并且在仿真中考虑车辆在过渡段的制动器减速过程,仿真试验流程如图6所示.具体应用见仿真实验.

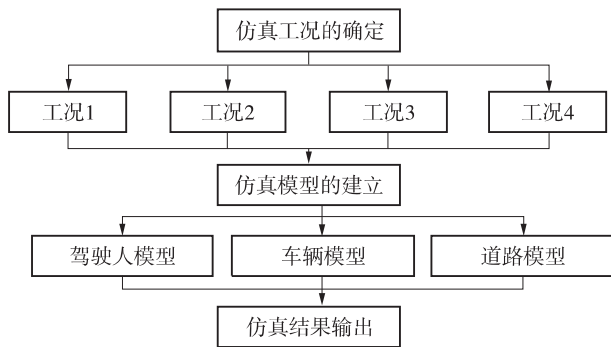


图6 仿真试验流程

Fig.6 Simulation test flow

2 仿真模型的建立

行车动力学软件 CARSIM 是由美国的 THOMAS 等使用 LISP 语言编写而成的^[14]. 可根据用户需求输入车辆参数、道路参数、驾驶人参数,经由软件内部强大的动力学模型及相应的计算机程序处理,就能够输出车辆动力学特性,以及根据外界环境和驾驶人操作做出的及时反馈.国内外学者均应用此软件进行了研究^[15-17].本研究也借助 CARSIM 进行行车动力学仿真研究,以期在可操作的范围内对立交分流鼻端出口线形的安全性进行仿真分析.

2.1 驾驶人模型

在仿真过程中,由驾驶人进行转向、速度的控制.软件内部模型根据驾驶人反应进行车辆的动力学输出.在本研究的仿真过程中,设定为驾驶员使用预瞄轨迹模型对道路线形条件进行识别,并且将预瞄轨迹设定为道路的中心线.由于本研究不设定制动工况,故驾驶人模型不设置进行制动行为^[18-19].

2.2 道路模型

本研究探讨的是出口匝道分流鼻端平曲线路段小客车的行驶安全性,需要分析道路平曲线、纵坡对车辆安全性的影响,所以应构建合理的道路模型. CARSIM 中可以根据仿真需求对道路进行建模.道路模型的建立可由平、纵、横三方面进行.通过输入道路线形坐标对道路进行平面设置.通过输入高程进行纵断面、横断面设置^[20].基于本研究方法,道路模型设置为单车道.道路参数根据不同工况进行设置.

为研究立交出口匝道线形参数与安全性的关系,本研究选取山西省某高速路上的立交出口匝道参数

进行仿真.匝道示意图如图7所示.部分出口匝道端部线形参数如表1所示.其中: V 表示匝道设计速度; L_s 表示缓和曲线长度; $R_{\text{平}}$ 表示圆曲线半径; $R_{\text{竖}}$ 表示竖曲线半径; i_1 表示分流鼻端竖曲线前坡坡度; i_2 表示竖曲线后坡坡度;“—”表示分流鼻为直坡段,没有竖曲线,只有一个纵坡.工况1为半直连式匝道,其缓和曲线长度选取较长;工况2为直连式匝道,其采用的缓和曲线长度较短,圆曲线半径较大;工况3为环圈匝道,其设计速度较低,圆曲线半径为60m;工况4为直连式匝道,采用较长的缓和曲线与半径较大的圆曲线.运行速度过渡段上任一点的平曲线最小曲率半径 R 如图8所示.图中 L 表示运行速度过渡段上任一点至分流鼻端距离.

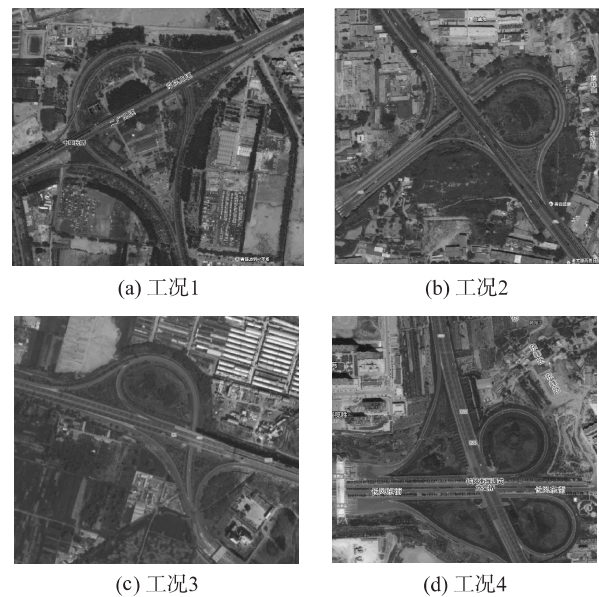


图7 不同工况示意图

Fig.7 Schematic diagram of different working conditions

表1 不同工况线形参数

Table 1 Linear parameters of different working conditions

工 况	匝 道 形 式	$V/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	L_s/m	$R_{\text{平}}/m$	$i_1/%$	$i_2/%$	$R_{\text{竖}}/m$
1	半直连式	40	110	120	—	-1.43	—
2	直连式	40	120	300	-0.30	-2.53	5600
3	环圈	40	138	60	-0.52	-3.84	1350
4	直连式	40	50	425	0.50	0.85	22280

从图8可以得出,在互通式立交的以上各工况中,运行速度过渡段上任一点至分流鼻端的距离均大于规范值的要求,设计均满足要求.以上4种工况运行速度段缓和曲线接半径较小的圆曲线,其曲率半径终点即为圆曲线半径120、300、60、425m.

道路的路面摩阻影响车辆的横向滑移,本研究

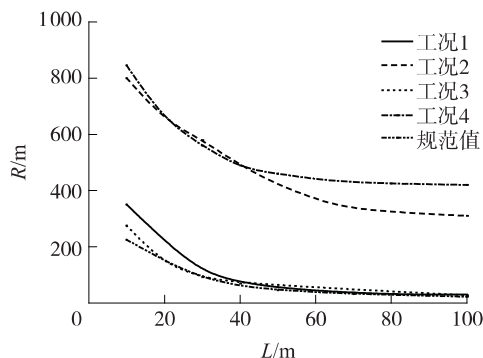


图8 不同工况曲率半径对比

Fig. 8 Contrast of curvature radius in different working conditions

道路路面设置为干燥的沥青路面,参考已有研究,其摩擦系数取0.75^[21].

2.3 车辆模型

CARSIM 中为用户提供了生活中几乎所有常用的车型,并且用户可以根据自己的需求进行参数的设置与修改.本研究车辆模型基于C型小客车进行参数的设置,表2为一些关键的车辆参数,参数设置见图9.

3 车辆行驶安全性分析

3.1 分流鼻端平面线形对安全性的影响

当车辆以不同的速度行驶在不同的平曲线路段上时,由于车辆轨迹不同,进而产生不同的侧向加速度.已有研究表明,侧向加速度 a_y 与汽车横向稳定

表2 车辆模型部分参数	
Table 2 Partial parameters of vehicle model	
参数	参数值
质量/kg	1530
质心高度/mm	540
车辆尺寸/mm	4350 × 1795 × 1481
轮距/mm	1481
轴距/mm	2776
后倾拖距/mm	8
前轮制动力/(N·m·MPa ⁻¹)	800
后轮制动力/(N·m·MPa ⁻¹)	200
制动防抱死系统(ABS)启动时滑移率	0.2
ABS失效时速度/(km·h ⁻¹)	7.5
主销内倾角/(°)	10
主销后倾角/(°)	3
车辆X轴转动惯量/(kg·m ²)	708
车辆Y轴转动惯量/(kg·m ²)	4520
车辆Z轴转动惯量/(kg·m ²)	4607

性密切相关.因此,通过 a_y 可以深入研究驾驶人曲线行驶时的轨迹-速度选取行为,从而研究立交出口匝道端部车辆行驶安全性,得出有利于车辆安全的线形组合,可为公路的设计做出参考与指导.根据文献[12],本研究对最不利气候条件下的小客车行车安全性进行分析,当以侧向加速度为行车安全性评价标准时,易发生侧滑危险的阈值为5.0.

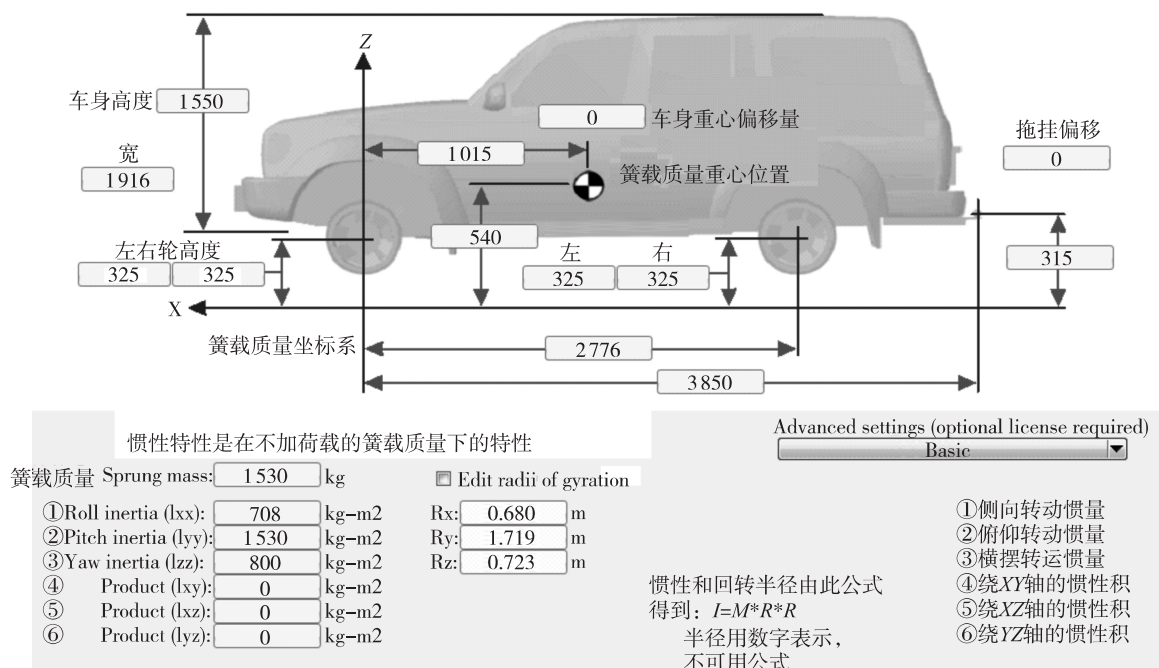


图9 车辆参数设置(单位: mm)

Fig. 9 Vehicle parameter setting (Unit: mm)

本次研究选取了4种典型匝道出口端部线形工况,出口匝道分别为直接式、半直接式、环圈匝道.为研究匝道分流鼻端平面线形参数对车辆安全性的影响,在仿真过程中,对其纵断面线形参数进行统一设置.仿真工况如表3所示,结果如图10所示.

表3 不同平面线形仿真参数

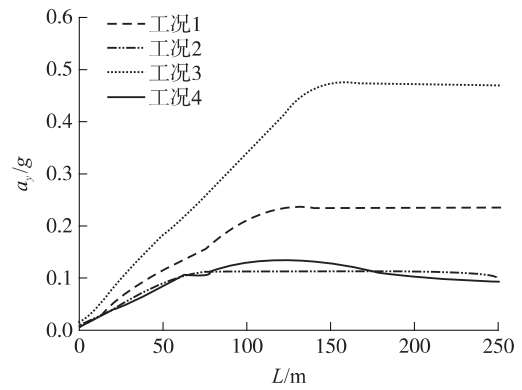
Table 3 Simulation parameters of different plane alignment

工况	匝道形式	$v/(km \cdot h^{-1})$	L_s/m	$R_{平}/m$	$i_1/\%$	$i_2/\%$	$R_{竖}/m$
1	半直连式	40	110	120			
2	直连式	40	120	300			
3	环圈	40	138	60	—	-1.43	—
4	直连式	40	50	425			

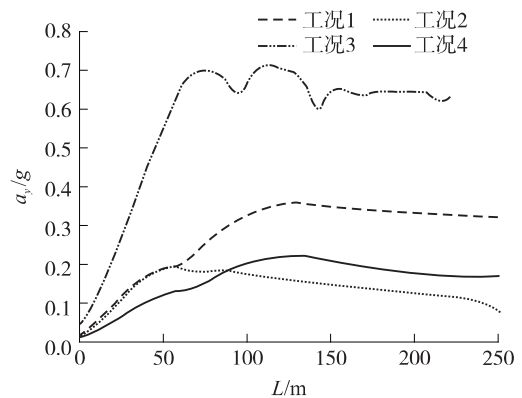
从以上仿真结果可以分析得出,在互通式立交出口匝道分流鼻端附近,随着车辆行驶距离的增加,车辆的侧向加速度呈现上升趋势.在车辆减速驶离主线的过程中,车辆首先由直线转向行驶至减速车道,进而进入匝道,而在进入匝道之前的线形往往是由缓和曲线相连接的,在这一段线形上车辆完成减速与转向过程,实现车辆由主线至匝道的转换行驶,这一路段即运行速度过渡段.车辆在缓和曲线路段行驶时,速度逐渐减小,方向盘转角逐渐增大,进而车辆的侧向加速度不断增加^[22-23].当车辆完成减速过程进入匝道控制性圆曲线路段行驶时,车辆的侧向加速度逐渐趋于稳定.

工况3的圆曲线半径最小,接近了规范的一般最小值;从图10(a)中可以看出,车辆在运行速度过渡段上行驶时,侧向加速度呈明显上升的趋势,最终稳定后约为0.48g,接近了车辆侧滑的危险值.从图10(b)中可以看出当车辆在主线设计速度为120 km/h的高速公路上行驶时,在70 m后,其 a_y 最大值约为0.7g,车辆具有侧滑危险.且 a_y 在较短的行程内出现了较为频繁的变化,即车辆在行程中已经出现了稳定性不足的危险.当主线设计速度为100 km/h时,车辆在工况1路段上行驶时,最大的侧向加速度为0.22g,当主线设计速度为120 km/h时,车辆最大侧向加速度为0.34g,能够保证车辆在出口匝道分流鼻端的行车安全性.

工况4与工况2相比较,工况4缓和曲线长度较短,而圆曲线半径较大.当车辆在主线设计速度为100 km/h的公路上由主线驶入匝道时,车辆速度在不断减小,车辆行驶轨迹曲率也在不断减小,此时车



(a) $v=100\text{ km/h}$



(b) $v=120\text{ km/h}$

图10 不同工况行车动力学响应

Fig. 10 Dynamic response of driving in different working conditions

辆的侧向加速度不断增加;当车辆行驶速度减小至匝道设计速度时,虽然车辆行驶轨迹的曲率半径呈现不变的趋势,此时车辆的侧向加速度较前一段行程相比呈减小趋势.从图10(a)、(b)中可以分析得出,在车辆的前一段行程中,工况4的 a_y 小于工况2的 a_y ,原因是此时车辆在缓和曲线上行驶,曲率半径小于工况2,车辆行车危险较低;在车辆的后一段行程中,工况4的侧向加速度大于工况2,原因是虽然工况4圆曲线半径较大,但是其缓和曲线长度较短,车辆的行驶速度要高于工况2,其侧滑危险也高于工况2.由此可得,在一定情况下,在匝道出口分流鼻端处,长缓和曲线+小半径圆曲线线形组合安全性优于短缓和曲线+大半径圆曲线线形组合.

3.2 分流鼻端纵断面线形分析

为研究出口匝道分流鼻端纵断面线形对行车安全的影响,对不同工况纵断面坡度参数进行仿真,仿真采用工况1的平面线形,而纵坡分别为-2%、-3%、-4%、-5%.横断面采用单车道减速车道形式.仿真结果如图11所示.

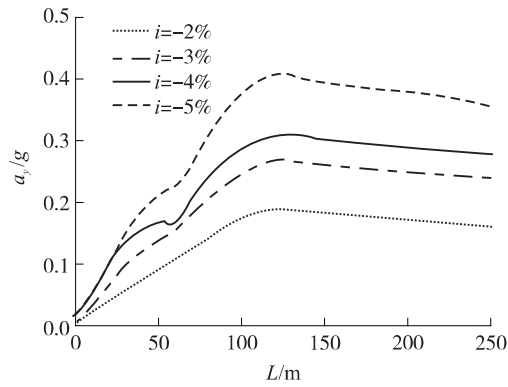
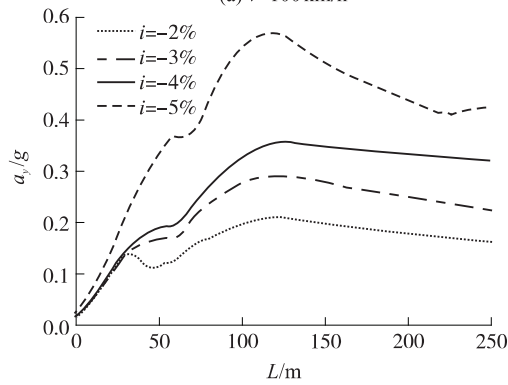
(a) $v=100$ km/h(b) $v=120$ km/h

图 11 不同纵坡行车动力学响应

Fig. 11 Dynamic response of different longitudinal slopes

从图 11 中可以看出,随着主线车速度的增加,车辆侧向加速度逐渐增加,增加至匝道控制圆曲线处,呈现不变或者减小趋势,这是由于车速度的减小与曲率半径的逐渐增加共同作用的结果.在桩号 130 m 之前,车辆处于减速过程,曲率半径逐渐增大,但其速度一直较高,曲率半径较小,故其侧向加速度虽然较小但呈增加趋势;在桩号 130 m 之后,车辆速度趋于平稳,曲率半径也趋于平稳,故其侧向加速度呈现不变或者减小趋势.

分析可得,随着匝道纵坡的增加,车辆侧向加速度明显增加,当纵坡为 -5% 时,车辆的侧向加速度最大值分别 $0.4 g$ 和 $0.58 g$.立交细则规定,当匝道设计速度为 40 km/h 时,出口匝道下坡路段最大纵坡值为 4% ,当地形困难或者用地紧张时,最大纵坡可为 5% .对分流鼻端附近最大纵坡值并没有规定.由仿真结果分析可得,由于分流鼻端车辆行驶速度高于匝道设计速度,且车辆需转向改变行驶方向,纵坡过大不利于车辆的减速,如果分流鼻端附近纵坡设计采用 5% ,此时车辆侧滑危险性较大.

3.3 分流鼻端组合线形仿真分析

图 12 示出了基于现行规范的不同平纵组合行

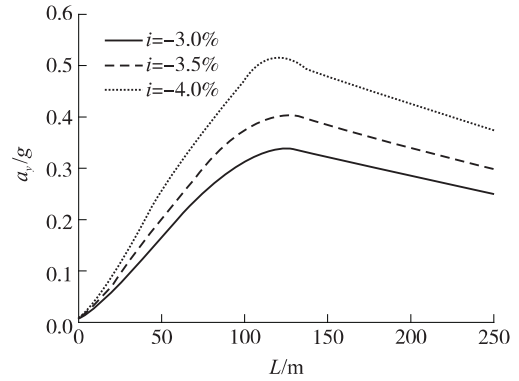
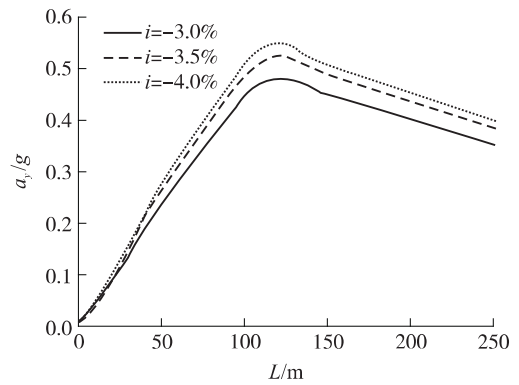
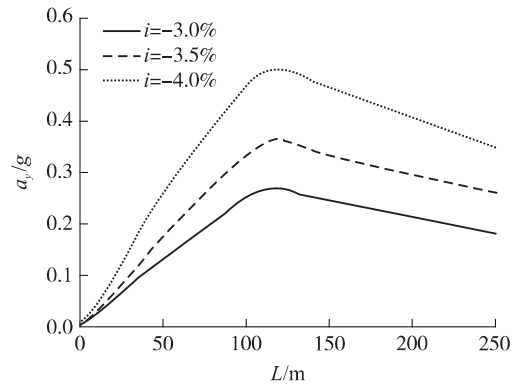
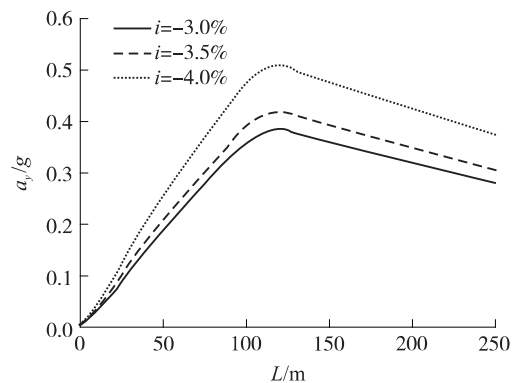
(a) $v=120$ km/h, $R=350$ m(b) $v=120$ km/h, $R=300$ m(c) $v=100$ km/h, $R=250$ m(d) $v=100$ km/h, $R=200$ m

图 12 不同平纵组合行车动力学响应

Fig. 12 Dynamic response of different horizontal and longitudinal combinations

车的动力学响应. 规范只规定了匝道出口端部平面线形最小值, 并没有与匝道纵断面进行组合分析, 为研究匝道出口端部线形组合的安全性, 就需要对不同主线行车速度情况下出口匝道分流鼻端部线形组合的安全性进行研究.

表4即为不同情况下的仿真结果最大值, 分析可知, 在设计速度为120 km/h的立交主线上, 如果出口匝道分流鼻端曲率半径值取规范值的极限最小半径300 m, 则车辆的侧向加速度最大值为0.55 g, 大于安全阈值, 行车具有侧滑危险; 在设计速度为100 km/h的立交主线上, 如果出口匝道分流鼻端曲率半径值取规范值的极限最小值250 m, 则车辆的侧向加速度最大值为0.53 g, 大于侧滑安全阈值, 车辆具有侧滑危险. 从图12中可分析得出, 随着曲率半径的减小, 车辆侧向加速度增加较明显, 侧滑危险也越大, 这就要求设计者在进行出口匝道分流鼻端线形参数选取时, 慎重选用极限值.

表4 不同平纵线形组合仿真结果

Table 4 Simulation results of different horizontal and vertical alignment

v	R/m	a_y/g		
		$i = -3.0\%$	$i = -3.5\%$	$i = -4.0\%$
120 km/h (分流鼻处的设计 速度为70 km/h)	350	0.32	0.39	0.52
	300	0.46	0.52	0.55
100 km/h	300	0.25	0.36	0.50
	250	0.37	0.41	0.53

对出口匝道分流鼻端平纵组合线形进行分析可知, 当主线设计速度为120 km/h, 分流鼻端处最小曲率半径选取一般最小值350 m, 纵坡选用一般最小值-4.0%时, a_y 最大值为0.52 g, 车辆行驶时具有侧翻危险; 当主线设计速度为100 km/h时, 分流鼻端处最小曲率半径选取一般最小值300 m时, 纵坡选用一般最小值-4.0%时, a_y 最大值为0.50 g, 此时车辆也存在侧翻危险. 分析可得, 虽然某种工况下平曲线最小曲率半径取一般最小值时行车安全, 但是当纵坡也取一般最小值时行驶车辆的侧向加速度大于阈值, 即车辆存在侧滑危险. 而规范只给出了分流鼻端处出口匝道平曲线的最小曲率半径与出口匝道最大纵坡, 并没有给出组合线形参数的取值. 本研究以防止车辆发生侧滑现象为目的, 给出了出口匝道分流鼻端处组合线形参数建议最小值. 当主线设计速度为120 km/h时(分流鼻处的设计速度为

70 km/h), 分流鼻端圆曲线半径为350 m时, 纵坡应小于-3.5%; 圆曲线半径为300 m, 则纵坡应小于-3%; 主线设计速度为100 km/h, 分流鼻端圆曲线半径为300 m时, 纵坡应小于-4%; 圆曲线半径为250 m时, 纵坡应小于-3.5%.

4 结论

通过行车动力学仿真, 对互通式立交出口匝道分流鼻端车辆行驶特性进行了分析, 对现有立交设计规范分流鼻端平纵线形参数及组合线形进行了补充研究, 同时从安全角度强调了设计阶段的保障作用. 结论如下:

(1) 工况4与工况2相比较, 工况4缓和曲线长度较短, 而圆曲线半径较大. 在车辆的后一段行驶过程中, 工况4的侧向加速度大于工况2, 其侧滑危险也高于工况2. 因此, 在匝道出口分流鼻端处, 长缓和曲线+小半径圆曲线线形组合安全性优于短缓和曲线+大半径圆曲线线形组合.

(2) 随着匝道纵坡的增加, 车辆侧向加速度明显增加, 当主线设计速度为120 km/h(分流鼻处的设计速度为70 km/h), 纵坡为-5%时, 车辆的侧向加速度最大值为0.58 g, 此时车辆侧滑危险性较大, 建议设计中分流鼻端纵坡小于等于-4%.

(3) 主线设计速度大于等于100 km/h时, 当分流鼻端曲率半径值取规范中一般最小值或极限最小值, 匝道纵坡取-4%时, a_y 最大值分别为0.52 g、0.55 g、0.50 g、0.53 g, 均存在车辆侧滑危险.

(4) 为保障车辆在分流鼻端的安全, 当主线设计速度为120 km/h(分流鼻处的设计速度为70 km/h)和100 km/h时, 分流鼻端圆曲线半径为350 m和300 m(规范要求的分流鼻端处匝道平曲线曲率半径一般值)时, 其纵坡应分别小于-3.5%和-4%; 分流鼻端圆曲线半径分别为300 m和250 m(规范要求的分流鼻端处匝道平曲线曲率半径最小值)时, 纵坡应分别小于-3%和-3.5%.

参考文献:

- [1] 李新伟. 高速公路事故预测模型及应用研究 [D]. 上海: 同济大学, 2013.
- [2] HUNTER M, MACHEMEHL R B, TSYGANOV A. Re-evaluation of ramp design speed criteria: summary report [J]. General Information, 1999, 29(1): 799-805.
- [3] HASSAN Y, SAYED T, TABERNERO V. Establishing practical approach for design consistency evaluation [J].

- Journal of Transportation Engineering, 2001, 127 (4): 295-302.
- [4] BARED J, GIERING G L, WARREN D L. Safety evaluation of acceleration and deceleration lane lengths [J]. ITE Journal, 1999, 69(5): 50-54.
- [5] HASSAN Y, OMAR A E H A, SARHAN M. Design of freeway speed change lanes: safety-explicit approach [C]//Proceedings of Transportation Research Board 85th Annual Meeting. Washington: the National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, 2006.
- [6] 李嘉, 方霞. 高速公路出入口设计与安全性研究 [J]. 中南公路工程, 2003, 28(2): 31-34.
LI Jia, FANG Xia. Study on design and safety freeway exit and entrance [J]. Control South Highway Engineering, 2003, 28(2): 31-34.
- [7] 苏世毅. 基于运行速度设计方法的互通立交出口匝道设计 [J]. 北方交通, 2010(7): 42-44.
SU Shiyi. Interchange off-ramp design based on design method of running speed [J]. Northern Communications, 2010(7): 42-44.
- [8] 沈强儒, 杨少伟, 赵一飞, 等. 菱形立交分流区主线线形指标分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(9): 90-94.
SHEN Qiangru, YANG Shaowei, ZHAO Yifei, et al. Analysis on mainline alignment index in diamond interchange diverging areas [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(9): 90-94.
- [9] 陈泰忠. 互通式立交分流点曲率半径的设计探讨 [J]. 广西交通科技, 2003, 28(4): 84-86.
CHEN Tai-zhong. The investigations on the design of curvature radius at interchange diverting point [J]. Guangxi Communication Science & Technology, 2003, 28(4): 84-86.
- [10] 孟巧娟, 孙家骊, 杨森顺. 立交出口匝道安全性判断的探讨 [J]. 公路交通技术, 2006(6): 127-129.
MENG Qiaojuan, SUN Jiasi, YANG Senshun. Discussion on judgment of safety at exit of interchange [J]. Technology of Highway and Transport, 2006(6): 127-129.
- [11] 中国公路工程咨询集团有限公司. 公路立体交叉设计细则: JTG/T D21—2014 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014.
- [12] 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.
WANG Haijun, YANG Shaowei. Research of length of deceleration lane at expressway interchange [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(3): 124-128.
- [13] 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): 104-108.
LIU Yafei, YANG Shaowei, PAN Binghong. Research on expressway off-ramp accident causes based on traffic psychology [J]. Highway, 2011(11): 104-108.
- [14] 李志魁. 基于 CarSim 的整车动力学建模与操纵稳定性仿真分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [15] 徐进, 杨奎, 罗庆, 等. 公路客车横向加速度实验研究 [J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(3): 536-545.
XU Jin, YANG Kui, LUO Qing, et al. Field measurement of automobiles' lateral accelerations [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(3): 536-545.
- [16] 游克思, 孙璐, 顾文钧. 公路平曲线半径可靠性设计理论与方法 [J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(6): 1-6.
YOU Kesi, SUN Lu, GU Wenjun. Reliability design theory and method of highway horizontal curve radius [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(6): 1-6.
- [17] 张弛, 邵东建, 张敏. 基于小客车侧滑微观仿真曲线路段行车风险分析 [J]. 系统仿真学报, 2015, 27(7): 1609-1616.
ZHANG Chi, SHAO Dongjian, ZHANG Min. Risk analysis of passenger car moving on curved sections based on sideslip microscopic simulation [J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(7): 1609-1616.
- [18] 孙璐, 游克思. 基于多失效模式可靠度的曲线路段行车风险分析 [J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 36-42.
SUN Lu, YOU Kesi. Reliability-based risk analysis of vehicle moving on curved sections considering multiple failure modes [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4): 36-42.
- [19] 杨少伟, 许金良, 李伟, 等. 路线设计中车辆行驶速度预测模型 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(3): 53-55.
YANG Shao-wei, XU Jin-liang, LI Wei, et al. Prediction model of vehicle speed for highway route design [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2003, 23(3): 53-55.
- [20] 孙川, 吴超仲, 褚端峰. 弯道安全车速计算改进模型研究 [J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 101-108.
SUN Chuan, WU Chaozhong, CHU Duanfeng. Improved model study of safety speed calculation in curves [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 101-108.
- [21] 胡朋, 潘晓东. 不同状态下路面摩擦系数现场试验研究 [J]. 公路, 2011(2): 20-24.

- HU Peng, PAN Xiaodong. Field experiment and study on pavement friction coefficient under different conditions [J]. Highway 2011(2): 20-24.
- [22] ALMANSA J, SALVAT-PUJOL F, DIAZ-LONDONO G, et al. PENGEO—a general-purpose geometry package for Monte Carlo simulation of radiation transport in material systems defined by quadric surfaces [J]. Computer Physics Communications 2016, 199(2): 102-113.
- [23] 汪双杰, 张驰, 金龙. 基于模糊综合评判的山区危险性急弯路段辅助决策方法 [J]. 中国公路学报 2015, 28(12): 120-127.
- WANG Shuangjie, ZHANG Chi, JIN Long. Auxiliary decision-making method on risky sharp turn section in mountain area based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. China Journal of Highway and Transport 2015, 28(12): 120-127.

Study of the Horizontal and Vertical Combination of the Split-End of the Exit Ramp

ZHANG Chi^{1,2} ZHANG Hong¹ QI Chen¹ BAI Haochen² GAO Jianrong³ HOU Yudi¹

- (1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Road Engineering Safety and Health in Cold and High-Altitude Regions, CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 3. The Communications Planning Surveying and Designing Institute of Shanxi Province, Taiyuan 030000, Shanxi, China)

Abstract: In order to study the safety of diverting ramp shunting nose end of interconnected interchange under the conditions of different vertical and longitudinal lines. The dynamic simulation analysis of the passenger car is made. The vehicle model, the road model and the driver's preview trajectory model are established. By changing the radius of the circular curve and the longitudinal gradient of the diverting nose and simulating the driving conditions under different conditions, the horizontal alignment and longitudinal profile of the diverting nose were investigated respectively. The response output of the lateral acceleration of vehicles under different working conditions is obtained, and the influence of different linear parameters on the safety of the diverting nose end is analyzed. The research results show that, at ramp outlet, the safety of long transition curve with small radius circular curve combination is superior to that of short transition curve with large radius circular curve combination. When the design speed of the main line is 120 km/h (the speed of the diverted nose is 70 km/h) and the longitudinal slope is -5%, the maximum lateral acceleration of the vehicle is 0.58g, and the vehicle side slip is more dangerous at this time. It is suggested that the longitudinal slope of the diverted nose is less than -4% in the design. In order to ensure the safety of the shunting nose end, the radius of the circular curved nose round curve is 350m, and the longitudinal slope should be less than -3.5% when the design speed of the main line is 120 km/h. And the radius of the circular curve is 300 m, and the longitudinal slope should be less than -3%. When the design speed of the main line is 100 km/h, the radius of the circular curved nose round curve is 300 m, the longitudinal slope should be less than -4%, and the radius of the circular curve is 250 m, then the longitudinal slope should be less than -3.5%.

Key words: highway engineering; safety engineering; computer simulation; interchange exit

检索工具	EI Compendex 数据库	查证日期	2019年04月10日
收录作者	张驰 张宏	署各单位	长安大学
查证单位	长安大学图书馆	地址	西安市长安大学图书馆信息部 029-82334377
检索人	陈晓平	审核人	徐芳

Study of the Horizontal and Vertical Combination of the Split-End of the Exit Ramp

Accession number: 20191006588968

Authors: Zhang, Chi (1, 2); Zhang, Hong (1); Qi, Chen (1); Bai, Haochen (2); Gao, Jianrong (3); Hou, Yudi (1)

Author affiliation: (1) Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an; Shaanxi; 710064, China; (2) State Key Laboratory of Road Engineering Safety and Health in Cold and High-Altitude Regions, CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an; Shaanxi; 710075, China; (3) The Communications Planning Surveying and Designing Institute of Shanxi Province, Taiyuan; Shanxi; 030000, China

Source title: Huanan Ligong Daxue Xuebao/Journal of South China University of Technology (Natural Science)

Abbreviated source title: Huanan Ligong Daxue Xuebao

Volume: 46

Issue: 9

Issue date: September 1, 2018

Publication year: 2018

Pages: 99-108

Language: Chinese

ISSN: 1000565X

CODEN: HLDKEZ

Document type: Journal article (JA)

Publisher: South China University of Technology

Abstract: In order to study the safety of diverting ramp shunting nose end of interconnected interchange under the conditions of different vertical and longitudinal lines. The dynamic simulation analysis of the passenger car is made. The vehicle model, the road model and the driver's preview trajectory model are established. By changing the radius of the circular curve and the longitudinal gradient of the diverting nose and simulating the driving conditions under different conditions, the horizontal alignment and longitudinal profile of the diverting nose were investigated respectively. The response output of the lateral acceleration of vehicles under different working conditions is obtained, and the influence of different linear parameters on the safety of the diverting nose end is analyzed. The research results show that, at ramp outlet, the safety of long transition curve with small radius circular curve combination is superior to that of short transition curve with large radius circular curve combination. When the design speed of the main line is 120km/h (the speed of the diverted nose is 70km/h) and the longitudinal slope is -5%, the maximum lateral acceleration of the vehicle is 0.58g, and the vehicle side slip is more dangerous at this time. It is suggested that the longitudinal slope of the diverted nose is less than -4% in the design. In order to ensure the safety of the shunting nose end, the radius of the circular curved nose round curve is 350m, and the longitudinal slope should be less than -3.5% when the design speed of the main line is 120km/h. And the radius of the circular curve is 300m, and the longitudinal slope should be less than -3%. When the design speed of the main line is 100km/h, the radius of the circular curved nose round curve is 300m, the longitudinal slope should be less than -4%, and the radius of the circular curve is 250m, then the longitudinal slope should be less than -3.5%. © 2018, Editorial Department, Journal of South China University of Technology. All right reserved.

Number of references: 23 **Main heading:** Curves (road)

Controlled terms: Computer simulation - Highway engineering - Interchanges - Safety engineering - Vehicles

Uncontrolled terms: Driving conditions - Dynamic simulation analysis - Horizontal alignment - Lateral acceleration - Linear parameters - Longitudinal gradients - Longitudinal profile - Trajectory modeling

Classification code: 406.1 Highway Systems - 406.2 Roads and Streets - 723.5 Computer Applications - 914 Safety Engineering

Numerical data indexing: Mass 5.80e-04kg, Percentage -3.00e+00%, Percentage -3.50e+00%, Percentage -4.00e+00%, Percentage -5.00e+00%, Size 2.50e+02m, Size 3.00e+02m, Size 3.50e+02m, Velocity 1.94e+01m/s, Velocity 2.78e+01m/s, Velocity 3.33e+01m/s

DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2018.09.014

Funding text: Supported by the National Key R & D Project(2017YFC0803906), the Postdoctoral Fund of Ministry of Education of China (2016M590915)and the Shaanxi Natural Science Basic Research Project (S2017-ZRJ-MS-0603).

Compendex references: YES **Database:** Compendex

Compilation and indexing terms, Copyright 2019 Elsevier Inc.

Data Provider: Engineering Village