

基于驾驶模拟的紧急避险车道断面宽度设置

宋灿灿, 郭忠印

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 在紧急避险车道断面宽度为 4.5, 7.7, 9.0 和 12.2 m 条件下, 利用 UCWin Road Ver. 9 驾驶模拟仿真平台测试了 5 名驾驶员 48 次驶入紧急避险车道的几何运动参数. 选取方向盘转速、方向盘转角、横向偏移率指标分别对车辆驶入紧急避险车道的最小转向半径、方向调整时间、转向角幅值、转向角频率和起弯点指标进行提取, 采用多因素方差分析, 检验断面宽度、驶入速度、断面宽度与驶入速度的交互作用对 5 个指标影响的显著性, 通过多重分析检验不同断面宽度下各指标差异的显著性. 研究结果表明: 断面宽度 4.5 m 时最小转向半径、转向角频率、转向角幅值与其他 3 组存在显著性差异, 失控车速 $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时车辆即面临侧滑风险, 车辆驶入紧急避险车道的难度大, 驾驶员心理紧张程度高. 仅断面宽度 12.2 m 时起弯点位于渐变点之后, 其起弯点与渐变段起点的差值与其他 3 组存在显著性差异. 断面宽度对方向调整时间影响显著且不同断面间的方向调整时间存在显著差异, 方向调整时间与断面宽度呈幂函数关系. 综合分析, 紧急避险车道的设置宽度不宜低于 7.7 m.

关键词: 道路工程; 紧急避险车道; 驾驶模拟; 断面宽度; 引道设置

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

Width of Cross Section on Truck Escape Ramp Based on Driving Simulation

SONG Cancan, GUO Zhongyin

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Under the circumstance that the cross section width of truck escape ramps is 4.5 meters, 7.7 meters, 9.0 meters, and 12.2 meters, forty-eight groups of motion parameters of motor vehicle driven onto truck escape ramp by 5 drivers were obtained by driving simulation UCWin Road Ver. 9. Then, the minimum turning radius, adjusting time, steering angle amplitude, steering angular frequency, and the

bending position were extracted using steering velocity index, steering wheel angle, and lateral migration rate. The correlation between the above five indexes and cross section width, operating speed and interaction of cross section width, and operating speed were analyzed by using two-ways ANOVA. After that, the significant test of the five indexes at different cross section widths were analyzed by multiple comparison. The research result indicates that the minimum turning radius, steering angle amplitude and steering angular frequency of 4.5 meter cross section widths are significantly different from the other three groups. Errant vehicles are in sideslip risks when their operating speed just reaches $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ at the 4.5 m cross section width. At the same time errant it is difficult for the driver to drive the vehicle into the truck escape ramp successfully and the driver suffer from severe psychological tension. The bending position is prior to the starting point of the transition segment only when the cross section width is 12.2 meters. And the difference between bending position and transition starting point is more significant compared with the other three groups. The cross section width has a significant effect on adjusting time which has a significant differences at different widths. There exists a power function relation between adjusting time and cross section width. Comprehensive analysis shows that the cross section width of truck escape ramp should not be less than 7.7 m.

Key words: road engineering; truck escape ramp; driving simulation; cross section width; approach road

自 1956 年美国加利福尼亚州修建第一条避险车道以来, 避险车道的建设数量增长迅速. 我国自 1998 年在北京八达岭高速设置了第一条避险车道, 至今为止, 已投入使用的避险车道数量达到 400 多条^[1].

收稿日期: 2015-12-29

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2014BAG01B01); 贵州省科技厅科技项目(2014-122-011); 山西省科技厅科技项目(2014-1-18); 同济大学国际合作培养基金(2016XKJC-007)

第一作者: 宋灿灿(1988—), 博士生, 主要研究方向为道路安全与环境. E-mail: 77conshir@tongji.edu.cn

通讯作者: 郭忠印(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路安全与环境. E-mail: zhongyin@tongji.edu.cn

美国 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)规定避险车道的最小宽度应达到 7.9 m^[2]. ITE(Institute of Transportation Engineers)建设规则^[3]和加利福尼亚州紧急避险车道设计指南^[4]提出同样的设计标准.新西兰国家公路几何设计手册^[5](State Highway Geometric Design Manual)规定避险车道制动床的设计宽度为 6 m.

JTGD 20—2006《公路路线设计规范》^[6]规定“避险车道宽度应不小于 4.5 m”.《新理念公路设计指南》(2005 版)^[7]规定“避险车道宽度应足以容纳一辆以上失控车辆和一辆服务车辆,制动路床和服务车道总宽度不宜小于 8 m”.陈竞飞^[8]指出,为节省工程造价,避险车道宽度的设计一般可只考虑一辆车辆驶入避险车道的情形,建议避险车道宽度为 10 m,即 0.75 m(路肩)+5 m(制动坡床)+3.5 m(服务车道)+0.75 m(路肩).郭永谊^[9]根据设计车辆外廓尺寸、行车道宽度并考虑失控车辆操控不易性,建议避险车道宽度为 12 m,即 0.75 m(路肩)+7 m(制动坡床)+3.5 m(服务车道)+0.75 m(路肩).

通过对我国 50 条紧急避险车道断面宽度统计发现,紧急避险车道断面宽度设置范围为 4.5~15.0 m.16%的紧急避险车道断面宽度在 5.5 m 以内,84%的紧急避险车道设置宽度在 8.0 m 及以上.在紧急避险车道实体工程建设中,断面宽度普遍高于规范建议值,采用规范建议值的紧急避险车道不足 20%.

国内外对紧急避险车道的最小断面宽度均做了明确的要求,但各国之间紧急避险车道断面宽度的设置标准存在很大差异.本文从交通安全的角度出发,运用驾驶模拟仿真技术,针对主线为直线、流出角度为 5°的紧急避险车道,研究紧急避险车道断面宽度分别为 4.5,7.7,9.0,12.2 m 时车辆的运行特性,从而为我国紧急避险车道断面宽度的设置提供参考.

1 试验方案

1.1 试验路段

仿真试验公路主线长 4 km,紧急避险车道设置于 3.5 km 处.平面线形除 2.0 km 处设置半径 2 000 m、长 500 m 的圆曲线外其余路段为直线.主线纵坡 -2%.横断面采用宽 24.5 m 的标准横断面设置形式,即 2.5 m(硬路肩)+3.75 m(行车道)×2+0.75

m(路缘带)+3.0 m(中央分隔带)+0.75 m(路缘带)+3.75 m(行车道)×2+2.5 m(硬路肩),并设置 2%的双向横坡.

紧急避险车道的平面线形按照图 1 所示设置,流出角度设置为 5°^[4,10].横断面按照图 2 所示设置.纵断面线形中引道段和渐变段为平坡段,制动床纵坡为 8%,竖曲线半径为 600 m.由于不研究车辆驶入避险车道时的驾驶行为,因此,不对防撞砂袋进行细部设计.

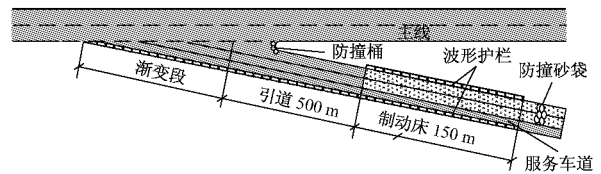


图 1 避险车道试验平面模型
Fig.1 Horizontal layout for truck escape ramp experiment

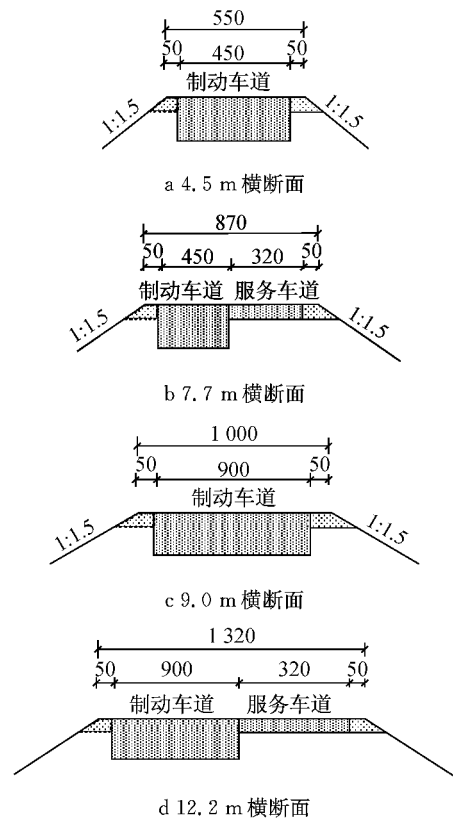


图 2 避险车道试验横断面模型(单位:cm)
Fig.2 Cross layouts for truck escape ramp experiment (unit: cm)

1.2 被试驾驶员

为尽量减少驾驶员驾龄与驾驶经验对试验结果的影响,试验中共选取了 5 名男性熟练货车驾驶员进行重复试验,5 名驾驶员均未有驶入紧急避险车道

的经验. 由于招募的驾驶员之前都没有驾驶过模拟器的经验, 因此, 认为所有驾驶员对路段的熟悉程度与驾驶模拟器的熟悉程度基本相当.

1.3 试验方法

试验采用由日本 Forum 8 公司开发的 UCWin Road 驾驶模拟场景软件, 该软件主要提供了地形、道路构造、模型、交通流及自然环境的模拟, 并能够连接多种性能与规模的驾驶模拟控制设备, 进行车辆驾驶的模拟并利用专用程序进行驾驶车辆及周边交通流的数据采集^[11-12].

为了使被试驾驶员熟悉模拟器, 被试驾驶员首先驾驶模拟器自带场景, 累计行驶 20 km, 然后驾驶试验场景. 试验车型选用 6 轴半挂车, 驾驶员正常启动车辆并加速至 90, 100, 110 和 120 km · h⁻¹ 保持匀速行驶, 直至驶入紧急避险车道, 当车辆调整为驾驶员认为可顺利驶入制动床的方位或至制动床时试验停止.

1.4 数据初步处理

根据驾驶模拟器输出的数据, 可用于驾驶员驶入紧急避险车道位置判定的参数有横摆角、横摆角速度、 x 方向加速度、方向盘转角和方向盘转速 5 个指标, 由于方向盘转速在渐变段和引导段具有最大的突变性, 且该指标是横摆角和 x 方向加速度、方向盘转角发生变化的原因, 因此, 选用该指标判定驾驶员驶入紧急避险车道的位置. 判定标准为当方向盘转速为相邻数据采集点转速的 10 倍以上时, 该点确定为驾驶员方向调整区的起点或者终点.

试验中将车辆驶出圆曲线, 即主线 2.5 km 处至渐变段起点之间的车速进行离散度分析, 选取车速变异系数作为指标将车速变异系数大于 0.02 的数据进行剔除. 48 组试验数据均能满足车速离散度的要求.

2 失控车辆行驶稳定性分析

失控车辆驶入紧急避险车道的转向半径反映了车辆行驶稳定性, 车辆转向过程中转向半径是连续变化的, 因此, 车辆稳定性最差的位置位于转向半径最小的位置.

由图 3 可知, 断面宽度 4.5 m 时最小转向半径的均值、方差均小于其他断面宽度的对应值, 表明断面宽度窄时车辆最小转向半径集中, 对速度敏感性低. 随着断面宽度增大, 最小转向半径均值和离散度均增大, 最小转向半径的增大对于车辆行驶安全性,

但过大的离散度导致不同车辆之间安全性的差异增大.

根据车辆侧滑与侧翻行驶稳定性计算车辆侧滑和侧翻临界半径, 并与实测最小转向半径对比, 如图 4 所示. 断面宽度 4.5 m、驶入速度 90 km · h⁻¹ 时车辆存在侧滑风险, 即使设置超高仍然无法避免车辆侧滑. 断面宽度 12.2 m、驶入速度 110 km · h⁻¹ 时车辆存在侧滑风险. 断面宽度 4.5 m、驶入速度 120 km · h⁻¹、车辆重心高度过大时, 车辆易发生侧翻事故.

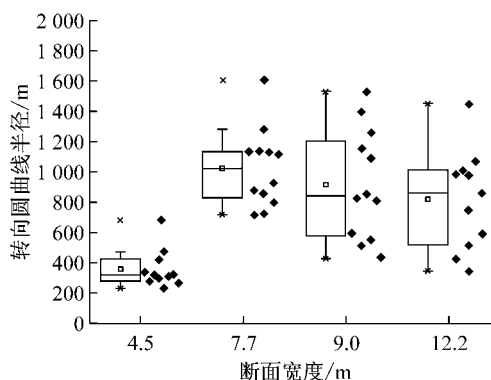


图 3 不同断面宽度下最小转向半径箱形图

Fig. 3 Box diagram of the minimum turning radius under different cross section width

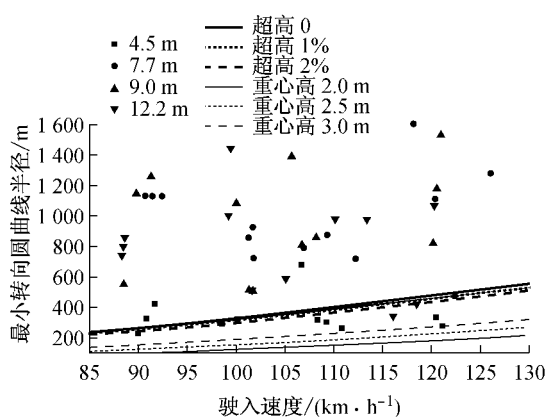


图 4 最小转向半径与临界半径关系图

Fig. 4 Minimum turning radius versus critical radius

根据试验设计, 驶入速度与断面宽度均可能对车辆行驶稳定性产生影响, 因此采用两因素方差分析. 球形假设检验 $P=0.146 > 0.05$, 即样本协方差服从球形假设. 样本方差齐性检验发现 4 种水平下 P 值均大于 0.05, 样本的总体方差齐.

使用 SPSS 软件进行两因素方差分析, 断面宽度对最小转向半径存在显著性影响 ($P=1.505 \times 10^{-7} < 0.05$), 驶入速度对最小转向半径不存在显著影响 ($P=0.781 > 0.05$), 断面宽度和驶入速度的交互作

用对最小转向半径存在显著性影响 ($P=0.0298 < 0.05$). 通过多重比较, 断面宽度 4.5 m 的最小转向半径与其他 3 组存在显著差异, 断面宽度 7.7 m 的最小转向半径与 4.5 m 和 12.2 m 均存在差异.

3 失控车辆起弯点分析

车辆驶入紧急避险车道的横向偏移量是行驶距离的连续函数. 起弯点为车辆变换车道驶入紧急避险车道的起点. 车辆横向偏移量与行驶距离的导数定义为横向偏移率, 根据起弯点的定义, 横向偏移率的突变点即为起弯点.

图 5 中 4 条横线由上到下分别为断面宽度 4.5, 7.7, 9.0, 12.2 m 时紧急避险车道渐变段的起点位置, 断面宽度 4.5 m 与 7.7 m 时起弯点在渐变段起点前, 断面宽度 9.0 m 时起弯点在渐变段起点处浮动, 断面宽度 12.2 m 时起弯点在渐变段起点后.

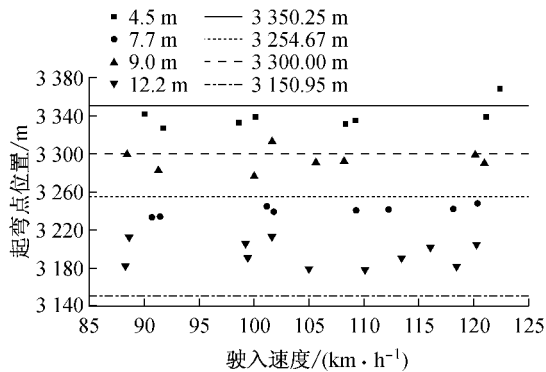


图 5 起弯点位置与驶入速度关系图

Fig.5 Bending positions versus operating speeds

采用两因素方差分析, 球形检验 $P=0.742 > 0.05$, 样本协方差服从球形假设. 样本方差齐性检验发现 4 种水平下 P 值均小于 0.05, 样本的总体方差不齐. 因方差之比小于 3, 方差分析的结果仍然是可信的.

分析结果表明断面宽度对渐变段起点与起弯点的差值存在显著影响 ($P < 0.01$), 驶入速度、断面宽度和驶入速度的交互作用对渐变段起点与起弯点的差值不存在显著影响 ($P=0.077 > 0.05, P=0.737 > 0.05$). 通过多重比较发现, 断面宽度 12.2 m 的渐变段起点与起弯点的差值与其他 3 组存在显著差异, 表明断面宽度过宽时车辆的转向特性或驾驶员心理特征发生了变化.

4 操控行为特征分析

车辆行驶中驾驶员对方向盘的操控水平反映了驾驶员对车辆运行方向的操控能力. 通过方向盘转角散点图 6 可知, 方向盘转角变化规律类似于有阻尼的波动, 而阻尼为车辆距离车道中心线的距离. 因此, 反映驾驶员对车辆操控行为特征的因素包括幅值、频率两个方面.

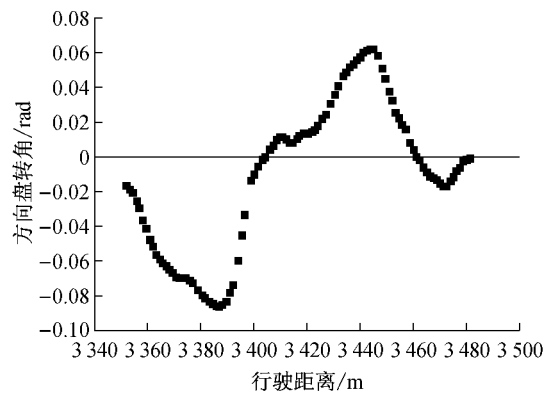


图 6 方向盘转角沿桩号的分布规律图

Fig.6 Distribution of steering wheel angle along the pile number

4.1 转向角幅值

转向角幅值定义为车辆转入紧急避险车道过程中的最大转向角与最小转向角的差值, 反映了驾驶员驶入紧急避险车道的难易程度.

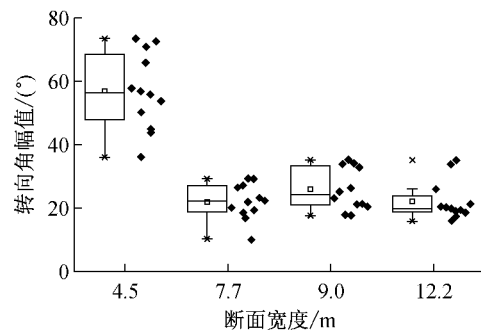


图 7 转向角幅值箱型图

Fig.7 Box diagram of steering angle amplitude

由图 7 可知, 随着断面宽度的增大转向角幅值的平均值与离散度均降低. 断面宽度 4.5 m 的转向角幅值最小值高于其他 3 组转向角幅值的最大值. 入口宽度 7.7, 9.0 和 12.2 m 的转向角幅值差值小.

采用两因素方差分析, 球形假设检验 $P=0.353$

>0.05,即样本协方差服从球形假设.方差齐性检验发现4种水平下P值均大于0.05,样本的总体方差齐.

分析结果表明,断面宽度对转向角幅值存在显著性影响($P<0.001$),驶入速度、断面宽度和驶入速度的交互作用对转向角幅值不存在显著性影响($P=0.743>0.05, P=0.16<0.05$).多重比较发现,断面宽度4.5m的转向角幅值与其他3组存在显著差异,说明断面宽度较窄时车辆驶入紧急避险车道的难度最大,而当断面宽度为7.7m及以上时,车辆驶入紧急避险车道的难度降低.

4.2 转向角频率

驾驶员驶入紧急避险车道过程中转向角幅值与相应的时间差的比值定义为转向角频率,反映驾驶员在驶入紧急避险车道过程中的紧张程度,计算公式如下:

$$F = \frac{a_{max} - a_{min}}{t} \quad (1)$$

式中:F为转向角频率; a_{max}, a_{min} 分别为驾驶员驶入紧急避险车道过程中最大、最小转向角;t为驾驶员从最大(最小)转向角变化为最小(最大)转向角所用时间.

根据式(1)计算车辆的转向角频率并作箱型图,如图8所示.驶入宽度4.5m的转向角频率每秒最大值超过 300° ,通过改进的格拉布斯准则进行异常值的检验, $G_{max}=2.57>G(12, 0.01)=2.55$,驶入宽度为9.0m时 $G_{max}=2.63>2.55$,因此,剔除4.5m与9.0m的转向角频率最大值.随着断面宽度的增大,转向角频率的均值与离散度逐渐减小,驾驶员驶入紧急避险车道的紧张程度逐渐降低.

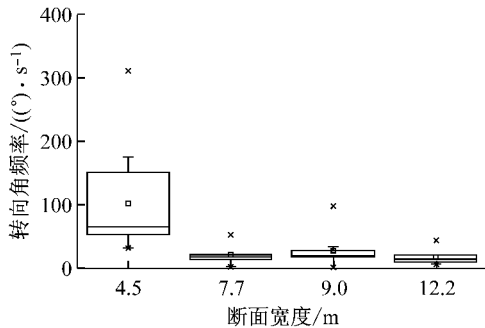


图8 转向角频率分布图

Fig.8 Distribution of steering angle frequency

采用两因素方差分析.球形假设检验 $P=0.001<0.01$,即样本协方差不服从球形假设.方差齐性检验发现4种水平下P值均大于0.05,样本的总体方差齐.

因为样本协方差不服从球形假设,因此,采用Greenhouse-Geisser Epsilon校正检验结果,断面宽度对转向角频率存在显著性影响($P<0.01$),驶入速度、断面宽度和驶入速度的交互作用对转向角频率不存在显著性影响($P=0.539>0.05, P=0.46>0.05$).多重比较发现断面宽度4.5m的转向角频率与其他3组存在显著差异,表明断面宽度4.5m时驾驶员驶入紧急避险车道的难度大,断面宽度7.7m及以上时,车辆驶入紧急避险车道的难度降低,且随断面宽度的增大驾驶员驶入紧急避险车道的难度变化不大.

5 方向调整段时间分析

方向调整时间为驾驶员驶经方向调整段时所需要的时间.调整段长度是指驾驶员自驶入紧急避险车道渐变段起,至车辆方向调整至驾驶员认为可顺利驶入制动床止或制动床位置处止.

将驾驶员在转向过程中需要进行方向调整的时间进行统计,作不同断面宽度下方向调整时间的箱形图,如图9所示.随着断面宽度的增大,车辆驶入紧急避险车道方向调整时间的平均值与离散度均明显减小,方向调整时间受断面宽度的影响较大.

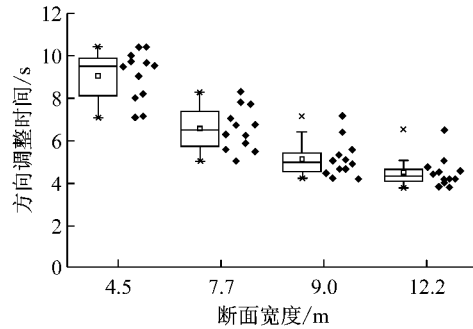


图9 方向调整时间分布图

Fig.9 Box diagram of adjusting time

采用两因素方差分析,球形假设检验 $P=0.871>0.05$,即样本协方差服从球形假设.方差齐性检验发现4种水平下P值均大于0.05,样本的总体方差齐.

方差分析结果表明,断面宽度对方向调整时间有显著影响($P<0.001$),驶入速度对方向调整时间不存在显著性影响($P=0.932>0.05$),断面宽度和驶入速度的交互作用对方向调整时间存在显著性影响($P=0.047>0.05$).多重比较发现不同断面宽度的转向时间存在显著差异,在试验宽度范围内,随着

断面宽度的增大,方向调整时间减小。

变换车道过程中驾驶员对方向盘的操作可分解为3个步骤:①转动方向盘,车辆驶离当前车道;②方向盘反方向转动,确保车辆不驶出目标车道;③方向盘小角度调整,确保变换车道后车辆在目标车道上稳定行驶。由于①和②的驾驶操作对车辆行驶安全性影响大,因此国内外根据各类假设行驶轨迹模型计算①和②的驾驶操作时间约为 $2\sim 3\text{ s}^{[13-15]}$,考虑到紧急避险车道处换道车辆为失控货车,因此换道时间取 3 s ,即无论紧急避险车道断面宽度设计值取多大,转向行驶的最小时间均为 3 s 。根据车辆转向驶入紧急避险车道物理意义,选择幂函数形式进行数据拟合,如图10所示。

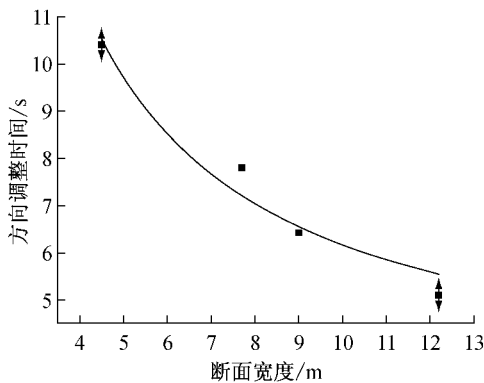


图10 方向调整时间与断面宽度拟合图

Fig.10 Adjusting time versus cross section width

卡方拟合优度检验幂函数拟合方向调整时间随断面宽度的变化规律是显著的,校正决定系数 $R^2 = 0.942\ 69$,拟合效果好。拟合函数模型为: $y = 38.914x^{-1.089\ 3} + 3$ 。通过对比,不同断面宽度方向调整时间差值大,断面宽度 4.5 m 的方向调整时间约为断面宽 12.2 m 的2倍,因此,在引道的设计中,紧急避险车道的横断面宽度作为不可忽视的因素必须考虑其中。对比国内外采用设计行程时间进行引道设置的研究,对于断面宽度 4.5 m 的引道设计行程偏短,对于断面宽度 12.2 m 的引道设计行程偏长。因此,本文提出根据断面设置宽度不同进行引道的设计,断面宽度 12.2 m 根据 3σ 原则采用 6 s 设计行程,不同于该断面宽度时采用回归方程的差值与 6 s 行程之和并向上取整的原则进行设计。

6 结论

通过对失控车辆行驶稳定性分析、起弯点、方向调整时间与操控行为特征分析,断面宽度对5项指

标的影响显著,驶入速度对5项指标的影响不显著,二者的交互作用对最小转向半径、方向调整时间影响显著。

对比组间的差异性,断面宽度 4.5 m 时最小转向半径、转向角幅值、转向角频率与断面宽度 $7.7, 9.0, 12.2\text{ m}$ 存在显著差异, 4.5 m 断面宽度时车辆行驶稳定性差,即使失控车辆的速度仅达到 $90\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 车辆也面临侧滑行驶风险。同时,车辆驶入紧急避险车道的难度与驾驶员心理的紧张程度明显高于其他3组。不同断面宽度的方向调整时间存在显著性差异,通过非线性拟合分析,方向调整时间与断面宽度之间呈幂函数关系,且断面宽度对方向调整时间的影响不可忽视,采用设计行程指标进行引道长度设计时必须考虑断面宽度因素。从车辆行驶稳定性、车辆操控行为特征、驾驶员心理特征以及必须的方向调整时间角度,紧急避险车道断面宽度至少为 7.7 m 。断面宽度 12.2 m 时起弯点位于渐变段起点之后,另外3组均位于起弯点之前, 12.2 m 断面宽度的起弯点与渐变段起点的差值与 $4.5, 7.7, 9.0\text{ m}$ 存在显著性差异,表明断面宽度较大时,渐变段的渐变率可适当增大,可进一步细化研究。

综合以上分析,紧急避险车道横断面宽度不宜低于 7.7 m 。

参考文献:

- [1] 梁志林. 河北省山区高速公路避险车道关键技术研究[R]. 石家庄: 河北省交通运输厅, 2010.
LIANG Zhilin. Research on key technology of truck escape ramp of mountainous expressway in Hebei province [R]. Shijiazhuang: Hebei Transportation Department, 2010.
- [2] AASHTO. A policy on geometric design of highways and streets (green book) [S]. Washington D C: American Association of State Highway Transportation, 2001.
- [3] Hayden R L. MT vernon canyon runaway truck escape ramp [R]. Denver: Colorado Department of Highways, Division of Transportation Planning, 1982.
- [4] Tye E J. Design guide for truck escape ramps [S]. Madera: California Department of Transportation, 1986.
- [5] NZ Transport Agency. State highway geometric design manual (draft) [R]. Wellington: NZ Transport Agency, 2000.
- [6] 中华人民共和国交通运输部. JTG D20—2006 公路路线设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D20 — 2006 Design specification for highway alignment[S]. Beijing: China Communication Press, 2006.
- [7] 交通部公路司. 新理念公路设计指南[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
Ministry of Communications. Highway design guidelines under

- flexibility[S]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [8] 陈竞飞. 避险车道的设计探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2008(1): 19.
CHEN Jingfei. Study on the design of truck escape ramp [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2008(1): 19.
- [9] 郭永道. 避险车道设计及存在问题的分析[J]. 工程建设与设计, 2013(11): 104.
GUO Yongyi. Emergency lane design and problems analysis [J]. Construction & Design for Project, 2013(11): 104.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. 公路路线设计细则(总校稿)[Z]. 西安: 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 2008.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design detailed regulations for highway alignment (overall proofread) [Z]. Xi'an: China Communications Construction First Highway Consultants Co Ltd, 2008.
- [11] 金淳, 舒宏. 保税港区运作系统规划的 VR 仿真建模与实现[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(4): 1042.
JIN Chun, SHU Hong. Modeling and realization of virtual reality simulation system for operation system planning of free-trade port area [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(4): 1042.
- [12] 冯志慧. 基于驾驶员认知特征和视觉特性的高速公路景观设计方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
FENG Zhihui. Study on freeway landscape design method based on drivers' cognitive and visual characteristics [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [13] 郑弘, 荣建, 任福田. 基于效用选择的换车道模型[J]. 公路交通科技, 2004, 21(5): 88.
ZHENG Hong, RONG Jian, REN Futian. A lane changing model based on random utility theory[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(5): 88.
- [14] 蒋锐, 郭忠印, 李振楠. 恶劣天气条件下车辆换车道的安全模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(4): 529.
JIANG Rui, GUO Zhongyin, LI Zhenan. Lane-changing safety model for deteriorative weather [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(4): 529.
- [15] FHWA. Development and testing of INTRAS, a microscopic freeway simulation model[R]. [S. l.]: FHWA, 1981.
-
- (上接第 45 页)
- ZHANG Haijun, YANG Xiaoguang, ZHANG Jue. Review of freeway on-ramp metering methodologies [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(8): 1051.
- [2] Blonk J, Westerman M. DACCORD-Development and application of coordinated control of corridors [R]. Netherlands: Community Research and Development Information Service (CORDIS), 1998.
- [3] Wattleworth J A. Peak period control of a freeway system—some theoretical investigations [J]. Highway Research Record, 1965, 89: 1.
- [4] Papageorgiou M, Habib H S, Blosseville J M. ALINEA: A local feedback control law for on ramp metering [J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 1991, 1320: 58.
- [5] 陆克丽霞, 杜豫川, 孙立军. 基于 ALINEA 控制的上海快速路入口匝道控制方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(2): 207.
LU Kelixia, DU Yuchuan, SUN Lijun. ALINEA algorithm-based on-ramp control for expressways in Shanghai [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(2): 207.
- [6] Papageorgiou M, Blosseville J M, Habib H S. Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of boulevard périphérique in paris — Part II: Coordinated on-ramp metering[J]. Transportation Research Part A: General, 1990, 24(5): 361.
- [7] ZHANG Guohui, WANG Yinhan. Optimizing coordinated ramp metering: A preemptive hierarchical control approach [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2013, 28: 22.
- [8] 高磊. 高速公路多匝道协调控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
GAO Lei. Study on freeway multi-ramp collaborative control [M]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [9] 涂辉招, 孙立军, 高子翔. 基于风险评估技术的城市快速路多匝道协调控制时机研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(7): 86.
TU Huizhao, SUN Lijun, GAO Zixiang. Study on control timing of coordinated multi-ramp for urban freeway corridors based on risk assessment technique [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(7): 86.
- [10] 杨兆升, 保丽霞, 刘新杰, 等. 城市快速路匝道调节与动态速度引导的协同策略[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(增 1): 144.
YANG Zhaosheng, BAO Lixia, LIU Xinjie, et al. Study on coordination of ramp metering and dynamic speed guidance for urban expressway [J]. Journal of Jilin University: Engineering Science, 2006, 36(Suppl. 1): 144.
- [11] TU Huizhao, LI Hao, WANG Yibing, et al. When to control the ramps on freeway corridors? A novel stability-and-MFD-based approach [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(6): 2572.
- [12] Vrancken J L M, WANG Yubin, Van Schuppen J H. QHM: The quantitative hierarchical model for network-level traffic management[C]// 2013 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems-(ITSC). Hague: IEEE, 2013: 223-230.
- [13] Daganzo C F. Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches[J]. Transportation Research Part B—Methodological, 2007, 41(1): 49.
- [14] 美国交通研究委员会. 道路通行能力手册[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
The Transportation Research Board. Traffic capacity manual [S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [15] 徐家钰. 城市道路设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
XU Jiayu. Urban road design [M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.