

中文引用格式:陈莹,杜志刚. 规避效应下中央分隔设施对道路空间路权的影响[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(12):195-202.

英文引用格式:CHEN Ying, DU Zhigang. Impact of median strip facilities on spatial right of way of roads under shy away effects[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(12):195-202.

规避效应下中央分隔设施对道路空间路权的影响*

陈莹, 杜志刚** 教授

(武汉理工大学交通与物流工程学院, 湖北武汉 430063)

中图分类号: X951; U491

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.12.0209

基金项目: 国家自然科学基金资助(52072291)。

【摘要】 为寻求最佳的中央分隔设施布设方式, 通过驾驶仿真建立中国常见的4种中分带形式, 提取轨迹、速度相关数据; 以道路空间路权中的横向路权为基础, 选取道路利用率为指标, 分析实际路权与名义路权的差异特性。结果表明: 不同高度设施下的驾驶人轨迹整体波动范围具有显著性差异。由规避效应所触发的向右偏移中, 弹性交通柱场景 R_5 下的轨迹偏移达到最大, 其次是交通隔离栏 R_7 、突起路标 R_2 , 均大于未设置设施的双黄线场景 R_1 ; 虽然设施的增设触发驾驶人的规避效应, 但一定程度的横向偏移可以提高道路利用率, 最高可提升11.15%, 出现在 R_5 中; 同时, 设施的设置抑制驾驶人的行车速度, 可实现交通安全与交通设计的双向提高; 最终计算得出, 满足最大限度名义路权利用率的中分带宽度为0.844 m, 设施高度为138.62 cm。

【关键词】 规避效应; 中央分隔设施; 空间路权; 设施高度; 驾驶行为

Impact of median strip facilities on spatial right of way of roads under shy away effects

CHEN Ying, DU Zhigang

(School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430063, China)

Abstract: In order to seek the best way of laying median strip facilities, four typical forms of median strips in China were established through driving simulation, and trajectory and speed-related data were extracted. Based on the horizontal right of way in the road spatial right of way, the road utilisation rate was selected as an indicator to analyse the difference characteristics between the actual right of way and the nominal right of way. The results show that the overall range of fluctuations in driver trajectories at different height facilities is significantly different. Among the rightward offsets triggered by the shy away effect, the trajectory offset reaches the maximum in the reboundable traffic cylinders scenario R_5 , followed by the traffic separate railings R_7 and raised pavement markers R_2 , which are larger than that of the double yellow line scenario R_1 without the facility. While adding facilities triggers a shy away effect in drivers, a certain degree of lateral offset can improve road utilisation rate, up to 11.15%, which was found in R_5 . At the same time, the installation of the facility inhibits the speed of drivers, achieving a two-way improvement in

* 文章编号: 1003-3033(2024)12-0195-08; 收稿日期: 2024-08-17; 修稿日期: 2024-10-24

** 通信作者: 杜志刚(1977—), 男, 湖北武汉人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事驾驶人因与隧道立交等方面的研究。E-mail: zhig_du@163.com。

traffic safety and traffic design. Finally, the width of the median strip to satisfy the maximum nominal right-of-way utilisation was calculated to be 0.844 m and the facility's height to be 138.62 cm.

Keywords: shy away effect; median strip facility; spatial right of way; facility height; driving behaviour

0 引言

交通障碍改变了驾驶人主观风险感知,同时触发了保护与危险意识^[1]。主观风险感知提升时,驾驶人则做好了迎接更多风险的准备,表现出更高的速度和更激进的驾驶操作。而保护意识和危险意识提高时,会通过降低速度来限制他们与固定物体或其他车辆碰撞的风险^[2]。由此可知:路侧设施,相当于一种路侧障碍物,其设置对驾驶人因、驾驶任务的两面性影响,需要通过外界其他因素的协同控制,来达到设施设置的最优作用效果。因此,了解驾驶人在不同交通障碍物下的驾驶特性,并从道路空间路权的角度分析不同障碍物设置实质性的影响,从而判定出达到最优作用效果的设施设置状态,是现阶段交通设施安全研究所缺乏,也是亟待解决的问题。

狭义路侧指路面边线外缘,即路面边线开始到路权边界线。而广义路侧指行车道范围之外,路权限之内的区域^[3]。现有对于路侧研究,主要集中在狭义路侧范围(道路右侧),分为2大方面:①根据轨迹偏移与行驶速度,研究最优侧向净宽,实现以充足的路侧空间,减少车辆失控时事故发生或降低事故发生严重度,即道路“宽容性设计”;②考虑到城市道路空间的有限性,在限定的道路宽度中,通过压缩车道以实现行驶的稳定性成为主要研究方向。如魏文海^[4]指出,压缩车道宽度后,驾驶人产生的横向偏移更小,速度变化率更低;吴文川^[5]指出,通过压缩车道来解决中央分隔设施对道路侧向净宽的影响,减少碰撞事故。此外,在原有路面上利用交通标线施划缓冲带,或增设路侧交安设施也成为提升城市道路交通安全的方法之一。

广义的路侧范围中,常见的路侧交通设施包括双黄线、突起路标、弹性交通柱、交通隔离栏。在多数国家中,路侧分隔设施(突起路标、平面道钉贴、不同尺寸的柔性柱等非连续物理设施)的设置主要用于防止行人横穿马路,或作为行人与自行车的分隔渠化路径^[6]。而在中国,由于人口密度大、机动车保有量高、城市道路有效利用面积小,传统的中分带形式(较宽的交通标线或绿化带隔离)难以运用于在土地利用相对紧张的老城区或城市中心

区^[7]。因此,路侧设施广泛应用在中国城市道路的中央分隔带中,与标线搭配使用,起到分割道路空间环境,引导、警示驾驶人行驶的作用。但当城市道路中央出现一定高度的设施时,驾驶人对于道路整体空间路权的感知受到了影响,驾驶人的避障心理使得车辆在道路空间内的行驶稳定性降低。特别是现阶段,中央分隔设施的普遍利用与设施设置的随意性、不规范性的矛盾,导致不良设置状态加剧了城市主干道交通事故的发生概率^[8]。然而目前对于中央分隔设施的研究还不够完善,没有一个完整的体系来评估设施设置对驾驶人的影响,以及如何配置为最佳。

鉴于此,笔者以现有规范规定的最小中分带宽度与设施布设方式为基础,根据设施高度,对常见设施进行归类。从轨迹与速度特性中,分析设施对驾驶人的影响。并基于现阶段道路空间有限的前提,从道路的实际路权与名义路权的相对关系着手,发掘最佳的设施高度与中分带宽度,实现道路空间路权的有效利用,提高行车安全性。

1 规避效应基础概念

1.1 空间路权

在传统观念中,造成交通事故90%的因素来自于驾驶人,而现有研究证明,除驾驶人因外,驾驶任务与道路空间路权的影响也不容忽视^[9-10]。

空间路权包括横向路权与纵向路权^[11],横向路权主要与道路横向利用率有关,包括道路横断面、视区、侧向净距等;纵向路权主要与道路前方的可视距离有关,包括道路几何线形、视距等。文中提及的横向路权从侧向净距的角度,考虑设施设置对道路名义横向路权与实际横向路权的改变情况。道路横、纵向路权如图1所示。



图1 横、纵向路权

Fig. 1 Lateral and longitudinal rights of way

1.2 名义路权与实际路权

名义横向路权(简称名义路权)为道路通行路权,如图 2a 所示。实际横向路权(简称实际路权)为车辆在行驶过程中实际利用的道路范围,如图 2b 所示。

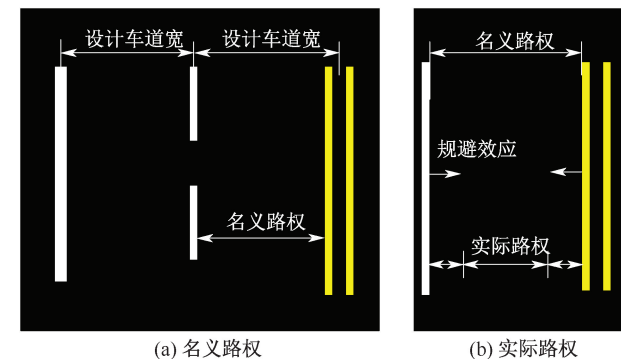


图 2 名义路权与实际路权

Fig. 2 Nominal and actual right of way

1.3 规避效应

隧道内侧墙效应触发驾驶人的危险感知能力,影响车辆的横向位置与速度^[12],通过设置侧墙设施以及多彩墙壁,吸引驾驶人的注意力,减少隧道内行车的驾驶疲劳,稳定驾驶行为^[13]。相同的心理与驾驶行为也发生在开放道路环境中。徐进等^[14]研究桥梁段驾驶行为指出,驾驶人倾向于向车道中间行驶,远离护栏一侧来确保行车安全性。

因此,陈莹等^[15]提出规避效应的概念,即驾驶人在行驶过程中遇到障碍物后主动偏离原始行驶路线的行为。由于人在遇到障碍物时会产生主动避险的自然现象(偏离标线、路权边界线),故实际路权必小于名义路权。由于实际路权为理论相对值,因此,规避效应对最终呈现出的轨迹的影响与不同驾驶人以及障碍物的类型有关。通过合理布设路侧设

施,利用驾驶人的规避效应可实现城市道路轨迹波动性的控制,同时有效抑制行驶速度。

2 仿真试验设计与数据准备

2.1 仿真试验场景

采用 UC-Winroad 搭建符合规范要求的试验场景,如图 3 所示。试验道路及设施参数见表 1。试验车型为小型汽车,车辆宽度取 1.8 m。

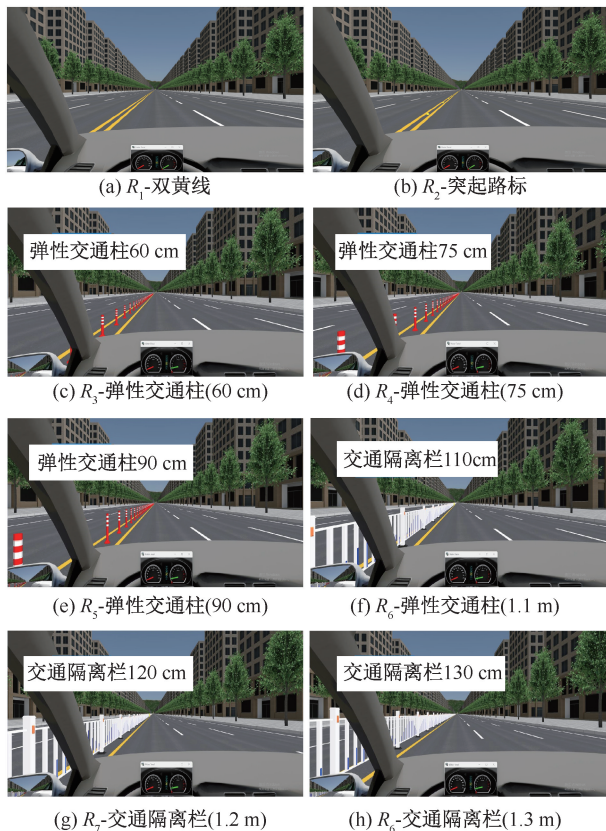


图 3 设施

Fig. 3 Facility

表 1 试验道路与设施参数

Table 1 Test road and facility parameters

路侧设施种类	编号	道路参数	设施参数
双黄线	R_1	双向六车道,车道宽 3.5 m,长 500 m,坡度 0°。限制速度 50 km/h	宽 0.15 m,两标线中间间隔 0.2 m
突起路标	R_2		高 25mm,间隔 8 m 布设一处,直径 0.15m,搭配双黄线
弹性交通柱	R_3		高 60 cm,柱体直径 0.22 m,间隔 2m,搭配双黄线
	R_4		高 75 cm,柱体直径 0.22 m,间隔 2m,搭配双黄线
	R_5		高 90 cm,柱体直径 0.22 m,间隔 2m,搭配双黄线
交通隔离栏	R_6		高 1.1 m,底座宽 0.38 m,搭配双黄线
	R_7		高 1.2 m,底座宽 0.38 m,搭配双黄线
	R_8		高 1.3 m,底座宽 0.38 m,搭配双黄线

注:障碍物参数及诱导设施参数,参照规范《公路交通安全设施设计规范》(JTG D81—2017)、《道路交通标志和标线第 3 部分:道路交通标线》(GB 5768.3—2009)、《城市道路交通隔离栏设置指南》(GA/T 1567—2019)、《弹性交通柱》(GB/T 24972—2010)。

2.2 试验对象

试验共招募驾驶人 50 名作为被试,其中,女性 17 人,年龄分布在 21~44 岁,平均年龄 30.82 岁,驾龄分布在 1~20 年,平均驾龄 9.71 年;男性 33 人,年龄分布在 24~49 岁,平均年龄 36.58 岁,驾龄分布在 2~30 年,平均驾龄 12.45 年。开车熟练度为以一个月为周期,开车的天数,据统计,每月开车 [0,10) 次的驾驶人占比为 28%, [10,20) 次的占比为 22%, [20,30) 次占比为 20%, [30,40) 次占比为 18%, 大于 40 次占比为 12%。

2.3 试验方案与数据采集

试验分为预试验和正式试验 2 个阶段。每名驾驶人参加 5 min 的预试验,在预试验期间,模拟器显示普通城市道路场景。预试验的目的是让被试适应驾驶模拟器的刹车与方向盘的控制,减少在正式试验中引起的不适。正式试验要求每位被试完成 8 个驾驶情境 ($R_1 \sim R_8$), 每个路段行驶 500 m。每种驾驶情景的选择都是随机的,每个被试行驶 3 次,确保每位被试在整个试验过程中都能体验到 3 种不同的场景组合情况。为防止驾驶疲劳,每次行驶后,驾驶人会休息 5 min。

采集速度、偏移(以行驶车道中心为基点,左偏时偏移量为负值,右偏为正),采集频率为 40 Hz。为避免场景过渡对驾驶人的影响,后续数据处理中剔除掉过渡段前后 100 m。

3 中央分隔设施影响分析

3.1 不同高度的同类设施对驾驶特性的影响

3.1.1 弹性交通柱

《弹性交通柱》(GB/T 24972—2010)规定,交通柱的高度为 30~125 cm,而《城市道路交通标志和标线设置规范》(GB51038—2015)指出,弹性交通柱高度控制在 60~100 cm。因此,选取 60、75、90 cm 这 3 个不同的高度,分别记为场景 R_3 、 R_4 、 R_5 。

采用 Origin 软件方差分析 (Analysis of Variance, ANOVA) 验证不同高度弹性交通柱下的轨迹横向偏移的差异性,检验结果见表 2。得到统计量 $F(147, 2) = 2.120$, 概率值 $P = 0.124$ 。不同高度对轨迹的影响没有显著性差异,但高度差超过 30 cm 的 R_3 与 R_5 间的差异逐渐显示出来。速度的差异性分析得到 $F(147, 2) = 0.539$, $P = 0.585$ 。弹性交通柱的高度对速度的影响不大。

表 2 不同高度的弹性交通柱 ANOVA 检验结果

Table 2 ANOVA results on different-height reboundable traffic cylinders

显著性		R_3	R_4	R_5
轨迹	R_3	—	0.201	0.044*
	R_4	0.201	—	0.453
速度	R_3	—	0.507	0.308
	R_4	0.507	—	0.721

注: * 为显著性水平小于 0.05。表 3、表 4 同。

3.1.2 交通隔离栏

《城市道路交通隔离栏设置指南》(GA/T 1567—2019)规定,设置在道路中央的交通隔离栏的高度不小于 1.1 m。因此,选取 1.1、1.2、1.3 m 这 3 个不同高度,记为场景 R_6 、 R_7 、 R_8 。

不同高度交通隔离栏下的轨迹横向偏移的差异性检验结果见表 3。得到 $F(147, 2) = 3.003$, $P = 0.053$ 。不同高度下的行驶轨迹没有显著性差异,但当高度差超过 20 cm 时,同类设施对轨迹影响的差异逐渐显示出来。同样,分析速度的差异性,得到 $F(147, 2) = 0.275$, $P = 0.760$, 不同高度交通隔离栏下的速度没有显著性差异。

表 3 不同高度的交通隔离栏 ANOVA 检验结果

Table 3 ANOVA results on different-height traffic separate railings

显著性		R_6	R_7	R_8
轨迹	R_6	—	0.553	0.020*
	R_7	0.553	—	0.080
速度	R_6	—	0.874	0.584
	R_7	0.874	—	0.481

同一类型的设施,在规范规定的高度范围内,所产生的高度差对驾驶人行驶速度的影响较小。而轨迹偏移量会随着高度差的增加而产生一定程度的变化。因此,进一步对比具有显著高度差的设施,寻求满足最佳控速能力与最优道路利用率的设施设置方式。根据实地调研,弹性交通柱设置的普遍高度为 0.9 m,交通隔离栏为 1.2 m,因此,后续研究以场景 R_5 、 R_7 为代表,对比不同类型设施对驾驶特性的影响。

3.2 不同设施下的横向偏移差异性

检验不同场景下轨迹横向偏移的差异性,得到 $F(47\ 603, 3) = 1\ 450.587$, $P = 0.000$, 不同场景下轨迹横向偏移具有显著性差异。提取轨迹横向偏移的 5th 与 95th 作为实际路权的利用边界范围,5th 代表驾驶人向左偏移时对于实际路权的利用边界线,95th 则代表右偏,50th 则为平均轨迹偏移量。分析

不同场景间的轨迹横向偏移边界范围特征,5th 的轨迹偏移值的 ANOVA 结果为 $F(196,3)=19.613, P=0.000$;95th 的轨迹偏移值的 $F(196,3)=9.722, P=0.000$;50th 的轨迹偏移值的 $F(196,3)=16.467, P=0.000$ 。

根据事后检验的多重比较结果,表 4 中,不同场景轨迹偏移量的 5th,除场景 R_1 与场景 R_7 ,其他场景间均存在差异性。交通隔离栏的设置对驾驶人向左最大偏移的影响与不设置设施场景的差异不显著。而 95th 的差异性分析中, R_1 与 R_2, R_2 与 R_7 的差异性不显著,设置突起路标与不设置设施或设置交通隔离栏对驾驶人右偏的最大影响差异不大。从平均值的差异性分析中可见: R_1 与 R_2 无显著性差异。

突起路标的设置对驾驶人左偏影响显著,但轨迹整体波动的范围以及对驾驶人右偏的影响与未设置交通设施的场景没有显著差异;在设置弹性交通柱的场景中,驾驶人表现出的左右最大化偏移特征以及整体的波动范围与其他场景有着显著性差异;交通隔离栏的设置对于驾驶人左偏的边界范围影响不大,但右偏以及整体波动范围有着显著性影响。超过一定高度的中分带设施会引起驾驶人一定程度的右偏(远离中分带设施),规避效应在此时对驾驶人产生影响。

表 4 不同场景下的偏移量的差异性 ANOVA 检验结果

Table 4 Offsets ANOVA results across scenarios

分位数	场景	R_1	R_2	R_5	R_7
所有数据	R_1	—	0.537	0.000*	0.000*
	R_2	0.537	—	0.000*	0.000*
	R_5	0.000*	0.000*	—	0.000*
5 th	R_1	—	0.001*	0.000*	0.104
	R_2	0.001*	—	0.000*	0.000*
	R_5	0.000*	0.000*	—	0.009*
95 th	R_1	—	0.149	0.000*	0.023*
	R_2	0.149	—	0.000*	0.399
	R_5	0.000*	0.000*	—	0.004*
50 th	R_1	—	0.787	0.000*	0.002*
	R_2	0.787	—	0.000*	0.005*
	R_5	0.000*	0.000*	—	0.003*

3.3 不同设施下的行驶速度差异性

采用 ANOVA 分析法检验不同场景下驾驶人的速度差异性,检验结果见表 5。得到 $F(47\ 603,3)=952.313, P=0.000$,不同场景下的整体速度具有显著性差异。不同场景下平均速度的差异性, $F(192,3)=51.338, P=0.000$ 。 R_1 场景与 R_2, R_5, R_7 的平均速度具有显著差异, R_2 与 R_5 有一定差异。是否

设置设施对驾驶人平均速度的影响是显著的,而驾驶人在设置设施的场景中行驶时,所呈现的平均速度并没有较强的显著性差异。

表 5 不同场景下速度的 ANOVA 检验结果

Table 5 Speed ANOVA results across scenarios

分位数	场景	R_1	R_2	R_5	R_7
所有数据	R_1	—	0.000*	0.000*	0.000*
	R_2	0.000*	—	0.000*	0.000*
	R_5	0.000*	0.000*	—	0.000*
50 th	R_1	—	0.000*	0.000*	0.000*
	R_2	0.000*	—	0.033*	0.823
	R_5	0.000*	0.033*	—	0.056

速度与轨迹的相关性见表 6。得到 R_1, R_2, R_7 场景下速度与轨迹偏移正相关。 R_5 场景下速度与轨迹偏移负相关,即弹性交通柱的设置下的速度越大,偏移越小,越靠近中分带设施。

表 6 速度与轨迹的相关性

Table 6 Correlation between velocity and offset

场景	R_1	R_2	R_5	R_7
相关性	0.164**	0.045**	-0.108**	0.358**
显著性	0.000	0.000	0.000	0.000

注:**在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

3.4 道路利用率

提取轨迹偏移的 5th 与 95th,作为驾驶人对于道路实际路权的利用范围,如图 4 所示。由于车宽 1.8 m,名义路权完全利用时的轨迹偏移为左右各偏移 0.85 m,图 4 中灰色方框的区域即为名义路权利用率 100%时的车辆偏移范围。驾驶人会存在侵占右侧车道的现象,而对于设置设施的场景中,车辆超出名义路权范围,侵占中分带区域的现象存在于突起路标的场景内。

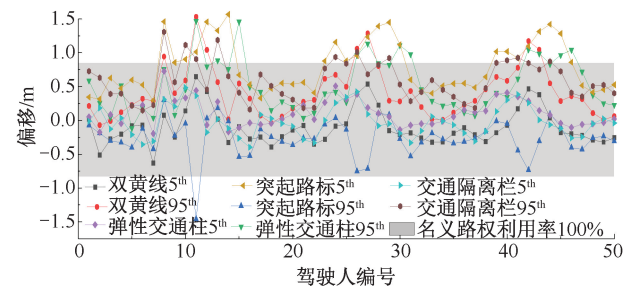


图 4 轨迹偏移 5th 与 95th 分布范围

Fig. 4 Distribution range of 5th and 95th trajectory offset

道路利用率的计算方式如下式,不同场景下的名义路权与实际路权平均值见表 7,未设置设施的场景道路利用率最低 66.358%,设置弹性交通柱的场景中,道路利用率最高 70.508%,其次为突起路

标 69.857%、交通隔离栏 68.785%。

$$A_{i,j} = \left(|L_{i,j}(5^{\text{th}})| + \frac{1}{2}W_V \right) + \left(|L_{i,j}(95^{\text{th}})| + \frac{1}{2}W_V \right) \quad (1)$$

$$L_{i,j}(5^{\text{th}}) < 0; L_{i,j}(95^{\text{th}}) > 0$$

$$A_{i,j} = \left(|L_{i,j}(5^{\text{th}})| + \frac{1}{2}W_V \right) + \left(\frac{1}{2}W_V - |L_{i,j}(95^{\text{th}})| \right) \quad (2)$$

$$L_{i,j}(5^{\text{th}}) < 0; L_{i,j}(95^{\text{th}}) < 0$$

$$A_{i,j} = \left(\frac{1}{2}W_V - L_{i,j}(5^{\text{th}}) \right) + \left(L_{i,j}(95^{\text{th}}) + \frac{1}{2}W_V \right) \quad (3)$$

$$L_{i,j}(5^{\text{th}}) > 0; L_{i,j}(95^{\text{th}}) > 0$$

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{A_{i,j}}{N_{i,j}} \times 100\% \right) \quad (4)$$

式中: U 为道路利用率, %; N 为名义路权, m; A 为实际路权, m; W_V 为车辆宽度, m; L 为收集到的轨迹偏移值, m; i 为第 i 个场景; j 为第 j 个驾驶人。

表 7 名义路权与实际路权平均值

Table 7 Average of nominal and actual right of way

场景	双黄线	突起路标	弹性交通柱	交通隔离栏
侧向净距/m	0.250	0.400	0.400	0.400
中间带宽/m	0.500	0.950	1.020	1.180
设施高度/cm	0.000	2.500	90.000	120.000
名义路权/m	3.500			
实际路权/m	2.323	2.445	2.468	2.407
道路利用率/%	66.358	69.857	70.508	68.785

4 最佳设施高度与中分带宽度

取所有驾驶人轨迹偏移的 5^{th} 以及 95^{th} 的平均值, 4 个场景下的轨迹偏移 5^{th} 平均值分别为 $-0.101 (R_1)$ 、 $-0.260 (R_2)$ 、 $0.109 (R_5)$ 、 $-0.021 (R_7)$ 。轨迹偏移 95^{th} 平均值分别为 $0.421 (R_1)$ 、 $0.526 (R_2)$ 、 $0.798 (R_5)$ 、 $0.587 (R_7)$ 。虽然设施的增设触发了驾驶人的规避效应, 轨迹偏移值 95^{th} 为 $R_5 > R_7 > R_2 > R_1$, 向远离设施的道路右侧偏移, 但设置了设施的场景中道路利用率比没设置时的大, 道路利用率为 $R_5 > R_2 > R_7 > R_1$, 实际路权变大, 有效提高了道路名义路权的利用率。

各场景的最大速度分别为 $87.15 (R_1)$ 、 $96.31 (R_2)$ 、 $73.12 (R_5)$ 、 $73.77 \text{ km/h} (R_7)$, 由于道路限速 50 km/h , 因此, 各场景最大超速的比例分别为 42.63% 、 48.09% 、 31.62% 、 32.22% , 即一定高度的

设施, 可起到明显的控速目的。特别是弹性交通柱的场景 (R_5), 速度与轨迹偏移呈现出负相关性 (表 6), 且最大超速比例是 4 个场景中的最低值, 即弹性交通柱触发了驾驶人规避效应, 同时也触发了驾驶人的控速意识, 虽然向右的偏移量增加, 但速度与未设置设施相比处于较低水平。因此, 适当使用中央分隔设施可使驾驶人以低于常规的速度向右发生一定程度的偏移, 提高道路利用率, 实现交通安全与交通设计的双向提升。

《城市道路工程设计规范(2016年版)》^[16]中规定, 当设计速度小于 60 km/h 时, 侧向净宽不应小于 0.5 m ; 当路基段的缘石高度大于 25 cm 时, 对行驶的车辆而言为路侧障碍物, 应该增加侧向宽度值。文中所提及的路侧设施, 弹性柱与交通隔离栏的底座相当于一个 25 cm 高的路缘石, 因此, 符合规范道路场景应为名义路权不变的情况下, 道路的侧向净距增加。EL ESAWEY 等^[17]研究得出, 增加路侧设施至道路边缘的横向距离比增加设施间距更能降低路侧事故频率。因此, 通过增加中分带宽度以提高路侧交通安全是可行的。

以道路宽 3.5 m , 限速 50 km/h 为例, 在不侵占中分带以及右侧相邻车道的前提下, 达到最大限度的名义路权利用范围的轨迹偏移分布范围为 $(-0.85 \text{ m}, 0.85 \text{ m})$ 。提取轨迹偏移与现有中分带宽度、设施高度间的相关关系拟合方程式如下式。拟合出的方程 R^2 介于 $0.39 \sim 0.71$ 。

$$y_{11} = -46.411x_1^3 + 123.52x_1^2 - 103.74x_1 + 26.623 \quad (5)$$

$$y_{12} = -36.447x_1^3 + 96.085x_1^2 - 79.748x_1 + 20.759 \quad (6)$$

$$y_{21} = -4 \cdot 10^{-6}x_2^3 + 0.0007x_2^2 - 0.0306x_2 - 0.1659 \quad (7)$$

$$y_{22} = 4 \cdot 10^{-6}x_2^3 - 0.0008x_2^2 + 0.0486x_2 + 0.3502 \quad (8)$$

式中: x_1 为中分带的宽度, m; y_{11} 为 x_1 宽度下的偏移量 5^{th} , m; y_{12} 为 x_1 宽度下的偏移量 95^{th} , m; x_2 为设施高度, cm; y_{21} 为 x_2 宽度下的偏移量 5^{th} , m; y_{22} 为 x_2 宽度下的偏移量 95^{th} , m。

根据式(5)一式(6), 由于轨迹偏移满足最大限度的名义路权利用范围为 $(-0.85 \text{ m}, 0.85 \text{ m})$, 因此, 在期望得到的中分带宽度下, 应使得驾驶人的轨迹偏移介于 $(-0.85 \text{ m}, 0.85 \text{ m})$ 。最佳中分带宽度以及设施高度的判断, 在满足 $-0.85 < y < 0.85$ 的数值

区域内,满足规范规定的宽度以及高度内,某一点 x_1 、 x_2 代入的 5^{th} 与 95^{th} 拟合曲线所得到的 y_{11} 与 y_{12} 、 y_{21} 与 y_{22} 的绝对值的和最佳,即达到可以充分利用的最大空间范围。式(5)得到 $y_{11} > -0.85 \text{ m}$ 的 x_1 取值范围为 $x_1 < 0.556 \text{ m}$ 或 $0.843 \text{ m} < x_1 < 1.262 \text{ m}$;式(6)得到的 $y_{12} < 0.85 \text{ m}$ 的取值范围为 $x_1 > 0.461 \text{ m}$ 。由于标准规定^[16],当设计速度小于 60 km/h 时,侧向净宽不应小于 0.5 m 。因此,最终确定的最佳中分带宽度应为 0.844 m ,此时的道路利用率达到 75.22% 。同样,根据式(7)、式(8),最终得到满足最大限度的名义路权利用范围的设施高度应为 138.62 cm ,此时的道路利用率达到 93.30% 。

其中,中分带宽度为 0.844 m 时,偏移的 5^{th} 为 -0.849 m , 95^{th} 为 -0.016 m ,驾驶人整体左偏,规避效应被削弱,因此,采用合适的中分带宽度可有效减少驾驶人过量规避效应而带来的安全隐患与车道宽度浪费。

当设施的高度为 138.62 cm 时,偏移的 5^{th} 为 -0.616 m , 95^{th} 为 0.849 m ,合理的设施高度使得驾驶人产生适量的规避,驾驶人的轨迹波动范围在安全区间内,既保障行车安全又提高道路利用率。

整体而言,合适的中分带宽度结合一定高度的中央分隔设施,可避免中分带宽度与设施高度搭配不合理而产生过量的规避效应,将驾驶人的行驶轨迹控制在理想的范围内,既可保障车辆与中央分隔设施的安全横向距离,又能够保障与同向行驶的临近车道其他车辆的安全横向距离,提高名义路权利用率的同时,保障行车安全性。

5 结 论

1) 不同高度设施下,驾驶人的轨迹偏移呈现出多样化的状态。突起路标设置场景下的驾驶人更倾向于左偏,交通隔离栏设置场景下则倾向于右偏。而弹性交通柱则触发了驾驶人更多形态的驾驶偏移行为。这些轨迹偏移特征反应出当中央分隔设施超过一定高度时,会引起驾驶人的规避效应。

2) 虽然设施的增设触发了驾驶人的规避效应,向远离设施的道路右侧偏移,但设置设施的场景其平均道路利用率比没设置设施的场景高,且行驶速度也有所降低。因此,通过合理设置设施,利用设施带来的适量规避效应,提高道路名义路权利用率的同时,唤醒驾驶人的控速意识,有助于交通安全与交通设计的双向提升。

3) 现阶段城市主干道中央分隔设施的使用随意性较大。合理利用驾驶人规避效应所触发的驾驶偏移以及对于行驶速度的控制,布设满足驾驶人因与空间路权需求的中央分隔设施,是一种简单、高效、低成本的道路安全改善方法。故提出满足最大限度名义路权利用率的中分带宽度与设施高度的计算方法与建议值。

4) 研究主要围绕不同类型中央分隔设施对驾驶人产生的影响而触发的道路空间路权的变化,而其中部分设施在道路环境中不同的位置可能对驾驶人又会产生不同的作用效果,同时,优化后的设施在真实的场景中应用后是否可以达到理想效果,将是下一步研究的重点。

参 考 文 献

- [1] LIOI A, HAZOOR A, CASTRO M, et al. Impact on driver behaviour of guardrails of different height in horizontal-vertical coordinated road scenarios with a limited available sight distance[J]. Transportation Research Part F-Traffic Psychology and Behaviour, 2022, 84:287-300.
- [2] TAY R, CHURCHILL A. Effect of different median barriers on traffic speed[J]. Canadian Journal of Transportation, 2007, 1(1):56-66.
- [3] AASHO-2011, Roadside design guide[S].
- [4] 魏文海. 多因素交互作用下缩减车道对驾驶行为的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2020, 40(4):117-126.
WEI Wenhai. Influence of lane reduction on driving behavior characteristics under multi-factor interaction[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2020, 40(4):117-128.
- [5] 吴文川. 城市道路增设中央隔离护栏相关问题及解决措施[J]. 福建建设科技, 2021(4):80-81, 117.
WU Wenchuan. The related problems and solutions of adding central isolation guardrail on urban roads[J]. Fujian Construction Science & Technology, 2021(4): 80-81, 117.

- [6] 陶盼盼, 李元, 王益川. 北京市道路交通隔离设施精细化设置思路探讨[J]. 市政技术, 2022, 40(10):57-62.
TAO Panpan, LI Yuan, WANG Yichuan. Discussion on refined setting of traffic barricade in Beijing[J]. Journal of Municipal Technology, 2022, 40(10):57-62.
- [7] 张宁, 陈恺, 何铁军, 等. 城市道路中间分隔带对比分析及设计[J]. 城市交通, 2007, 5(3):86-91.
ZHANG Ning, CHEN Kai, HE Tiejun, et al. Comparative study and design of urban street median[J]. Urban Transport of China, 2007, 5(3):86-91.
- [8] ROQUE C, LOURENÇO CARDOSO J, CONNELL T, et al. Topic analysis of road safety inspections using latent dirichlet allocation: a case study of roadside safety in Irish main roads[J]. Accident Analysis and Prevention, 2019, 131: 336-349.
- [9] 程瑞, 盘焯, 代军吉, 等. 公路路侧事故风险评估与路侧安全设计研究综述[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(9): 214-226.
CHENG Rui, PAN Ye, DAI Junji, et al. Research overview of roadside accident risk assessment and roadside safety design[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(9):214-226.
- [10] 郑号染, 杜志刚, 王首硕, 等. 基于线性诱导的高速公路隧道交通安全优化设计[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(8): 134-141.
ZHENG Haoran, DU Zhigang, WANG Shoushuo, et al. Design of traffic safety optimization for expressway tunnel based on linear guidance[J]. China Safety Science Journal,2023,33(8):134-141.
- [11] 王首硕. 高速公路隧道视线诱导信息组合理论及应用研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2023.
WANG Shoushuo. Study on theory and application of combining the visual guiding information in freeway tunnels[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2023.
- [12] CHEN Ying, DU Zhigang, JIANG Zehao, et al. Driver's shy away effect in urban extra-long underwater tunnel[J]. Promet-Traffic & Transportation, 2023, 35(4):552-566.
- [13] 杨理波, 杜志刚, 徐弯弯, 等. 隧道内不同组合信息条件下驾驶员视错觉研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(1): 32-37.
YANG Libo, DU Zhigang, XU Wanwan, et al. Research on drivers' visual illusion in tunnels under different combined visual information conditions[J]. China Safety Science Journal,2018, 28(1):32-37.
- [14] 徐进, 张玉, 戴振华, 等. 人类自然驾驶状态下车辆轨迹摆动特性与车道宽度[J]. 汽车安全与节能学报, 2022, 13(4):718-728.
XU Jin, ZHANG Yu, DAI Zhenhua, et al. Vehicle trajectory oscillation characteristics and lane width control under human natural driving conditions[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2022, 13(4):718-728.
- [15] 陈莹, 杜志刚, 许富强, 等. 基于规避行为的城市水下特长隧道驾驶负荷评价[J]. 公路, 2023, 68(12): 206-214.
CHEN Ying, DU Zhigang, XU Fuqiang, et al. Driving load evaluation of urban underwater extra-long tunnel based on evasive behavior[J]. Highway, 2023, 68(12): 206-214.
- [16] CJJ37—2012, 城市道路工程设计规范(2016年版) [S].
CJJ37-2012, Design specification for urban road engineering (2016 Edition) [S].
- [17] EL ESAWEY M, SAYED T. Evaluating safety risk of locating above ground utility structures in the highway right-of-way[J]. Accident Analysis and Prevention, 2012, 49:419-428.



作者简介: 陈莹 (1996—),女,安徽合肥人,博士研究生,研究方向为道路交通安全、驾驶行为等。Email: yingchen1108@qq.com。