

地下道路横断面对驾驶行为的影响

刘 硕, 王俊骅, 方守恩

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 基于 8 自由度的驾驶模拟器研究了地下道路车道宽度、车道位置、侧向净宽对驾驶行为的影响。受试者在一条单向三车道的地下道路场景中进行了试验。试验结果表明车道宽度和侧向净宽对车速、偏移及主观感知都有影响, 而车道宽度的影响更为显著。不同车道上, 驾驶行为表现出与驾驶员的主观感知不一致。基于横向偏移状态分析了不同条件下的行车安全性, 并为地下道路设计车速、车道宽度、限速、车道组合等方面提出了建议。

关键词: 地下道路; 车道宽度; 车道位置; 侧向净宽; 驾驶行为

中图分类号: U491.31

文献标志码: A

Effect of Cross-sectional Design on Driving Behavior in Urban Underground Road

LIU Shuo, WANG Junhua, FANG Shouen

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

Abstract: Based on an 8-DOF (degree of freedom) driving simulator, a study was made of the effects of lane width, lane position and lateral clearance on driving behavior in urban underground road. A driving simulation was carried out in a separating one-way three-lane of underground road. The data about the speed, lane deviation and subjective perception were collected. The result shows that the lane width and lateral clearance have significant effects on objective and subjective measures. The effect of lane width is greater than lateral clearance. An interesting finding is that the inconsistency of the driving behavior measures with subjective perception of the lane position. These findings provides support for amending the current design specifications of urban underground road, such as relationship between design speed and lane width, speed limit, combination form of lanes.

Key words: urban underground road; lane width; lane position; lateral clearance; driving behavior

随着城市路网的发展与交通密度的提高, 城市交通地下化开始成为适应现代城市高密度和高强度开发需要的一个发展方向。地下道路作为城市道路在地下的延伸, 其作用在于引导长距离交通与地区性交通的分离, 采取与常规交通分离的办法疏散城市交通密集地区的交通, 使城市各部分建立起快速直接的交通联系^[1]。由于地下道路环境的特殊性, 不能简单地将现有的地上道路建设的规范和经验套用在地下道路上。国内外对城市地下道路的研究尚不多, 为了保障驾驶的安全性和舒适性, 有必要对城市地下道路进行有针对性的研究。

良好的道路设计应该是以道路使用者为中心, 有效地降低危险行为产生的风险。而道路线形设计是影响驾驶行为的主要因素之一。车道宽度, 侧向净宽, 道路平纵线形都是影响驾驶行为的重要因素^[2]。如何综合研究这些因素对驾驶行为的影响就显得十分必要。驾驶模拟器能够快捷地改变道路条件及环境, 获取大量驾驶人的驾驶信息, 模拟各种危险的驾驶情况, 拓宽了驾驶行为研究的范围, 可以有效地解决这一问题^[3]。国内外已有很多学者验证了利用驾驶模拟器研究城市隧道驾驶行为的有效性^[4-5]。

车道及道路宽度的增加, 车辆有充足的行驶空间, 行驶速度和横向偏移也会增大。而车辆速度和横向偏移的增大也会提高行车的风险。Wilde 发现驾驶人存在目标风险水平, 通过改变驾驶操作来缩小主观风险感受和目标水平之间的差距^[6]。较宽的车道会降低主观风险感受水平, 因此驾驶人会采用更具风险性的操作, 例如加快速度和增大偏移量。由于城市地下道路的环境较为单一, 超速现象越来越严重, 由此导致了大量的交通事故。因此, 合理的设置地下道路车道宽度成为控制车速, 提高行车安全性的有效方法之一。

收稿日期: 2012-12-08

基金项目: 上海市自然科学基金(12ZR1434100); 国家自然科学基金(51078270)

第一作者: 刘 硕(1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为道路交通安全。E-mail: avensonliu@163.com

通讯作者: 方守恩(1961—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为道路交通安全。E-mail: fangsek@tongji.edu.cn

侧向净宽为路缘带与安全带宽度和,其作用包括提供侧向余宽、增加行车舒适感、改善弯道处视距、提高行车安全等.城市地下道路受地形、周边建筑等限制,无法设置较大的侧向净宽.侧向净宽小易引起车辆擦碰侧墙事故,增加驾驶人工作负荷^[7];另一方面,会使驾驶人降低车速,注意力集中而降低风险^[8].

车辆在不同车道上行驶,驾驶行为也存在差异.有研究者发现地下道路中,左侧和右侧车道的车辆距离侧墙的距离不同,而侧墙对右侧车道车辆的影响大于左侧车道^[1].

以往对于道路横断面的研究大都是针对城市地上道路或公路隧道而进行的,而针对道路条件和交通环境较为特殊的城市地下道路却不多.一方面,以

往的研究多是考虑某单一因素对驾驶行为的影响,未能将各个因素之间的共同作用综合考虑;另一方面,由于研究手段的局限,以往的研究未能将变量参数进行很好的控制.本研究通过模拟驾驶的方法,综合研究以上三个因素对地下道路驾驶行为的影响.

1 试验方法

试验共招募了20位持有驾照的受试者(男性12名,女性8名),平均年龄34岁(23~51岁,标准偏差 S_D 为2.4).14人有使用驾驶模拟器的经验.试验者在同一场景中试验两次,样本量40.实验仪器采用同济大学交通行为与交通安全模拟实验平台,具有8自由度运动系统,平台概况如图1—4所示.



图1 舱体及运动系统

Fig.1 Simulator's movement system



图2 试验车辆及投影幕布

Fig.2 The car body and the screen

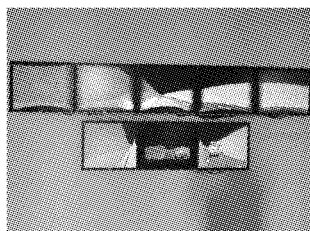


图3 控制面板图

Fig.3 The operating panel



图4 驾驶人视角

Fig.4 Driver view

道路模型采用上海某地下道路的实际线形.隧道模型长度3.6 km,单向三车道.主线设计车速 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,平曲线最小半径148 m,竖曲线最小半径1 200 m,最大纵坡5%.车辆模型为常用五座小客车,车身长5 m,宽1.8 m.在试验车辆行驶车道上不添加其他仿真车辆,以避免其对试验者控制车速及轨迹产生影响^[9].为模拟真实的道路环境,获取有效的试验数据,在另两条车道添加自由流交通流.

试验包括三个自变量,车道宽度,侧向净宽,车

辆位置.变量取值主要参考了我国《城市道路工程设计规范》(CJJ37—2012)和法国CETU(Centre d'étude des tunnels)中的相关规定.变量取值及试验场景见表1.每个场景包括左、中、右车道三组试验.图5列举了不同变量组合下,同一位置的驾驶人视角场景.

系统连续采集车辆行驶速度和横向偏移等信息,采集频率为10 Hz.横向偏移为车辆中心与车道中心线之间的距离.偏移值为0,表明车辆在车道中

表1 11个试验场景

Tab.1 Combination of independent measures for eleven scenario

试验场景	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
车道宽度/m	2.85	2.85	2.85	3.00	3.00	3.00	3.25	3.25	3.25	3.50	3.75
侧向净宽/m	0.50	0.75	1.00	0.50	0.75	1.00	0.50	0.75	1.00	0.75	0.75

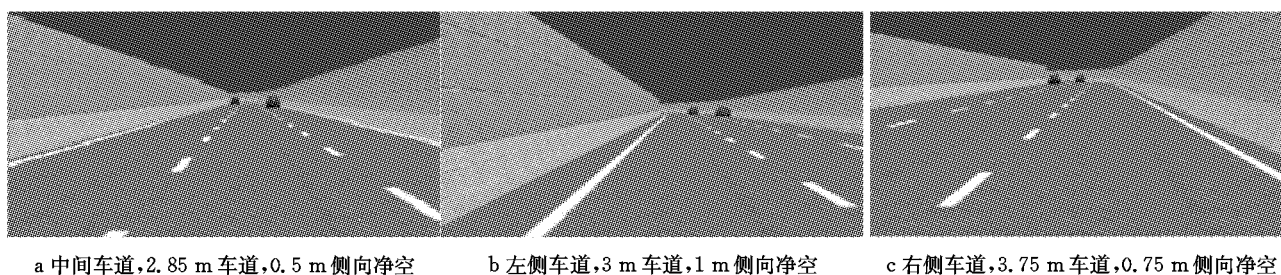


图5 不同组合下的驾驶人视角

Fig.5 Examples of road projected from driver view

心线上行驶;车辆中心位于车道中心线左侧,偏移值为正值,反之为负. 试验结束受试者填写问卷,问卷内容包括驾驶人基础信息、主观影响评价等. 按照主观感知影响程度大小,评价标准分为三级:1分—影响较小;2分—有一定影响;3分—很大影响.

试验包括4个阶段:试验指示,试驾15 min,模拟驾驶试验,填写问卷. 其中,试驾练习一方面帮助驾驶人熟悉驾驶模拟器的各项操作,一方面能有效消除不具有模拟器驾驶经验的受试者与其他受试者的差别. 受试者被要求根据道路环境条件,保持安全、合理、舒适的速度驾驶,尽可能不变道. 为消除学习效应的影响,11个场景随机排序. 每一场景结束时安排短暂休息,保证驾驶人不会由于长时间试验疲劳驾驶.

2 试验结果分析

2.1 车速

2.1.1 车道宽度对速度的影响

单因素方差分析(one-way analysis of variance)结果显示车道宽度对平均车速有显著性影响(F 检验: $F=1\,234.369$,显著性水平 $P<0.01$). 如图6所示,通过箱型图比较不同车道宽度下平均车速的变化趋势,车道宽度不超过3.75 m时,车速与车道宽度呈正相关. 随着车道宽度的增加,平均车速、最高车速及85位车速均不断增大. 车道宽度3.75 m时,平均车速最大,达到 $88\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. 车道宽度2.85 m时,平均车速最小,为 $60.01\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

2.1.2 车道位置对车速的影响

车辆在不同车道上的行驶速度存在差异,而在不同车道宽度下这种差异的显著性也表现出不同. 以侧向净宽0.75 m为例,车道宽度较小时,车道位置对平均车速有显著性影响;车道宽度较大时,左中右三条车道上的平均车速差别不大. 方差分析(ANOVA)结果分别为2.85 m($F=211.67$, $P<$

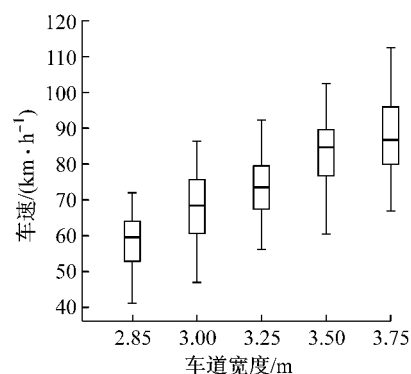


图6 车速分布箱型图

Fig.6 Box-plot of speed distribution

0.01), 3 m($F=169.78$, $P<0.01$), 3.25 m($F=12.30$, $P<0.01$), 3.5 m($F=0.90$, $P=0.41$), 3.75 m($F=2.53$, $P=0.11$). 从图7可以看出,大部分情况下,左侧车道的平均车速最高,中间车道的平均车速最低. 尤其当车道宽度为2.85 m和3 m时,不同车道的平均车速差异性很明显. 随着车道宽度增加,这种差异性逐渐降低. 通过综合对比分析车速和横向偏移,可以发现当车道较窄时,两侧车道的驾驶人会借用侧向净宽中的安全带进行驾驶,而中间车道的车辆受两侧车道的限制,有效行车空间相对较小,因而车速较慢. 当车道变宽,两侧车道的驾驶人倾向于按车道标线行驶,越线行为减少,此时,

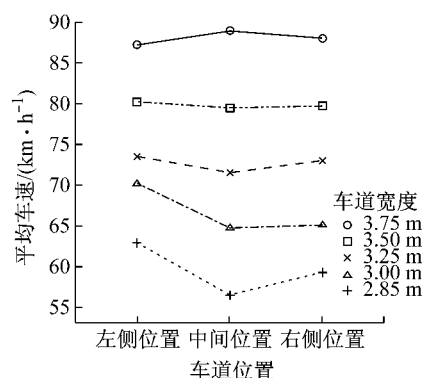


图7 三个车道的平均车速

Fig.7 Effect of lane position on average speed

三个车道的有效行车空间基本相同,因而车速的差异较小。

2.1.3 侧向净宽对车速的影响

侧向净宽对中间车道的平均车速无显著性影响 ($F=1.17, P=0.35$),而对左侧车道 ($F=242.32, P<0.01$)和右侧车道 ($F=387.15, P<0.01$)的车速存在显著性影响。图8显示了各侧向净宽下两侧车道的平均车速。可以看出,驾驶人在较宽的侧向净宽下会保持较高的行驶速度,这一现象类似于车道宽度对车速的影响。而观测数据表明,当车道和侧向净宽增加相同的宽度时,车道宽度对车速影响更加明显。

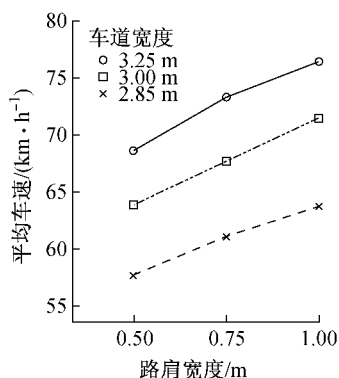


图8 不同侧向净宽下的平均车速

Fig.8 Effect of lateral clearance on average speed

2.2 横向偏移

2.2.1 车道宽度对横向偏移的影响

ANOVA 结果显示车道宽度对车辆的横向偏移有显著性影响 ($F=96.93, P<0.01$). 根据上述横向偏移的定义,偏移值超过车道宽度的一半则表明车辆驶入了相邻车道。如图9所示,车辆在横向上的位置分布服从正态分布,横向偏移范围随车道宽度的增加不断增大。

2.2.2 车道位置对横向偏移的影响

不同车道上车辆的横向偏移有显著性的差异 ($F=216.17, P<0.01$). 在大部分情况下,左侧车道和中间车道的横向偏移值为负,即驾驶人倾向于沿着车道中心线偏右的位置行驶。而右侧车道的横向偏移值为正,即驾驶人更倾向于沿着车道中心线偏左的位置行驶。因此,横向位置的分布并不是以车道中心线为中心,原因包括:第一,道路线形的影响。通常情况下,左弯处,车辆位于车道中心线右侧,偏移值为负,相反,右弯处偏移值为正。当左弯与右弯的数量或长度不同时,车辆横向偏移的均值不为0;第二,侧墙的影响。当侧向净宽较小时,受试者倾向于

远离侧墙行驶;第三,驾驶座位于车辆的左侧,驾驶人对左侧环境的判断相对于右侧更加准确,因此会更靠近左侧的标线或障碍物行驶。观测结果同时显示当车道宽度较窄时,在两侧车道行驶的车辆会远离侧墙行驶,随着车道宽度的增加,车辆的横向分布会更加均匀,横向偏移的均值逐渐接近0。又如图10所示,中间车道的横向偏移范围最大,而右侧车道横向偏移范围最小。

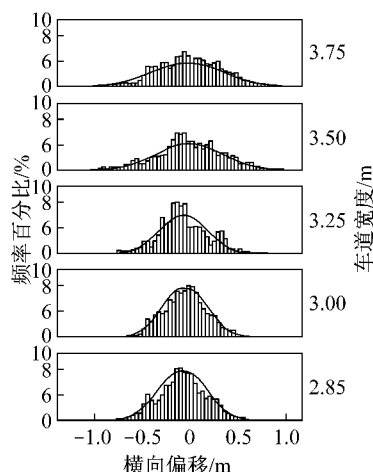


图9 车辆横向位置分布图

Fig.9 Effect of lane width on lane deviation

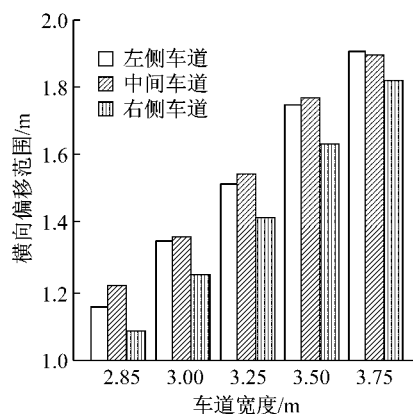


图10 车道宽度与横向偏移范围

Fig.10 Effect of lane width on lane deviation range

2.2.3 侧向净宽对横向偏移的影响

ANOVA 结果显示侧向净宽对中间车道的横向偏移没有显著性影响 ($F=2.17, P=0.12$),但对左侧车道 ($F=66.17, P<0.01$)和右侧车道 ($F=45.31, P<0.01$)有较为显著的影响。随着侧向净宽的增大,两侧车道车辆的横向偏移范围会增大(图11),分布也会更加均匀。此现象跟车道宽度的影响相似,但影响程度较小。

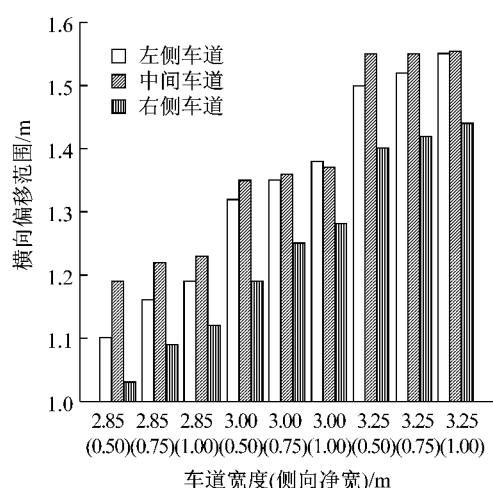


图 11 侧向净宽与横向偏移范围

Fig.11 Effect of lateral clearance on lane deviation range

2.3 主观客观评价

2.3.1 主观评价

主观问卷结果显示,所有受试者均认为车道宽度对主观安全感知有很大影响.车道宽度影响程度平均得分 2.85 分(满分 3 分).有四分之三受试者认为侧向净宽会影响他们进行速度和轨迹的决策,影

响程度平均得分 2.25 分.然而,只有不超过 20% 的驾驶人认为在不同车道上行驶会对他们的驾驶行为产生影响,平均得分只有 1.3 分.然而,将上述车速及横向偏移的分析结果和对驾驶人主观感知进行对比,可以看出驾驶行为有时与驾驶人的主观感知并不一致.

2.3.2 客观评价

根据车辆与标线相对的位置关系,将车辆横向运行状态分为三种情况:车道内正常行驶,压线行驶,跨线行驶.分类标准见表 2.表中, l_d 为横向偏移, m; l_w 为车道宽度, m; v_w 为车辆宽度, m, 取 1.8 m; m_w 为标线宽度, m, 取 0.15 m.

各场景中,驾驶人压线行为和越线行为所占的比例如图 12 所示.阴影部分为压线行驶,方格部分为越线行驶.由图 12a 可知,车道宽度越宽,驾驶人压线和越线行为越少,当车道宽度为 3.75 m,几乎没有越线行为的发生.由图 12b 所示,侧向净宽增大,也会降低越线行为发生的比例,但对压线行为的影响则不大.由图 12c 可知,中间车道压线行为所占比例最高,但越线行驶的比例却最低.两侧车道相比,右侧车道发生压线和越线行为的比例更低.

表 2 横向偏移状态

Tab.2 Three levels of lane deviation

行驶状态	横向偏移 l_d /m	说明
正常行驶	$ l_d < (l_w - v_w - m_w)/2$	在一个车道内行驶,其他车辆影响最小
压线行驶	$(l_w - v_w - m_w)/2 \leq l_d \leq (l_w - v_w + m_w)/2$	压线行驶,对两侧车辆有影响
跨线行驶	$ l_d > (l_w - v_w + m_w)/2$	跨两车道行驶,对其他车辆影响最为严重

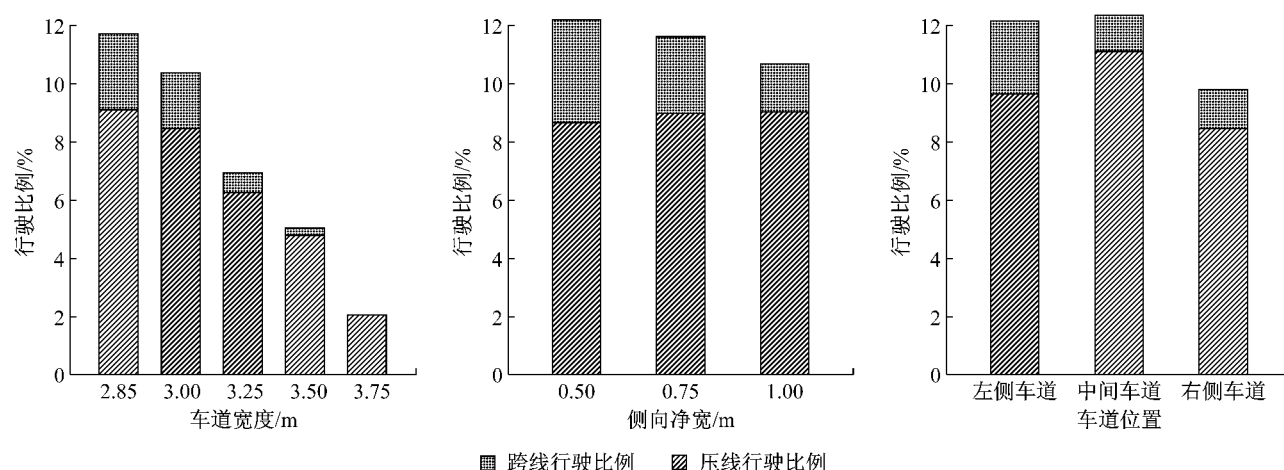


图 12 各条件下横向偏移行为的比例

Fig.12 Effects on lateral behavior, for lane width, lateral clearance and lane position

3 讨论与结语

本试验旨在研究地下道路横断面设计中三个要

素(车道宽度,车道位置,侧向净宽)对驾驶行为的影响.为综合考虑这些因素的作用,本研究采用多因素完全随机实验法,在 11 个场景进行了模拟驾驶试验.

试验结果表明车道宽度、车道位置、侧向净宽对车辆速度和横向偏移均产生影响。车道变宽时,驾驶人有着充足的横向空间,更安全的主观感知;同时车速增加,横向偏移范围扩大,行车风险提高。当车道宽度为3 m时,平均车速超过 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。此结果与现实地下道路环境中行车速度较为吻合。我国现行《城市道路工程设计规范》(CJJ37—2012)中规定一条机动车车道最小宽度为3.25 m。针对目前地下道路频发的超速行驶的现象,合理地选择车道宽度、提高设计车速、完善道路安全设施就显得十分重要。侧向净宽对两侧车道的行车特征影响较大。侧向净宽较窄时,驾驶人倾向于远离侧墙行驶,甚至驶入中间车道。随着侧向净宽变宽,车辆平均行驶轨迹逐渐接近车道中心线,横向偏移危险行为的比例降低,驾驶人有更安全的主观感受;同时,驾驶人保持较快的车速和较大的横向偏移范围。两者的影响趋势相似,但车道宽度比侧向净宽对驾驶行为的影响更为显著。这说明地下道路中,驾驶人优先依靠识别道路标线的位置进行行车轨迹的决策,其次才是依据侧墙和车辆之间的距离。研究还发现驾驶人主观感知与其驾驶行为存在不一致的现象。尽管不同车道上,车辆的运行特征差异性显著,但仅有少数驾驶人认为车道位置对行车有影响。试验结果表明不同车道存在一定的速度差,这一结论为地下道路车道组合提供了依据。一方面可以通过分车道限速或适当降低左侧车道限速来确保行车安全,也可以适当增加中间车道的宽度来减小其与两侧车道的速度差。另一方面,可以通过设计合理的路侧环境及设置震荡标线等安全设施,有效地平衡各车道的车速。

下一阶段的研究中,将综合考虑道路线形、车辆类型、驾驶人车道选择、换道及跟驰行为等因素的影响,进一步研究城市地下道路中驾驶行为的特性。

综上所述,本文研究了城市地下道路横断面设计对驾驶人速度选择及行车轨迹决策的影响,并为城市地下道路横断面设计提出了建议,为地下道路设计规范相关内容的完善提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 郑仕文. 地下快速路车辆运行特征分析及其基于视觉计算的机理解析[D]. 上海:同济大学交通运输工程学院, 2011.
ZHENG Shiwen. Underground expressway vehicles running characteristics study and analysis of mechanism based on visual computing [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2011.
- [2] Ben-Bassata T, Shinar D. Effect of shoulder width, guardrail and roadway geometry on driver perception and behavior[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2011, 43: 2142.
- [3] Akihiro Shimajo, Hideki Takagi, Hidetsugu Onuma. A simulation study of driving performance in long tunnel[C]// 1995 Vehicle Navigation and Information Systems Conference Proceedings. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995: 96-103.
- [4] Jan Tornros. Driving behavior in a real and a simulated road tunnel of a validation study [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 1998, 30(4): 497.
- [5] Nilsson D, Johansson M, Frantzich H. Evacuation experiment in a road tunnel: a study of human behavior and technical installations[J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44: 458.
- [6] Gerald J S W. The theory of RHT: implications for safety and health[J]. *Risk Analysis*, 1982, 2: 209.
- [7] Matthew K, Forrest C, Donald R. Association of median width and highway accident rates[J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 1993, 1401: 70.
- [8] Summala H. Accident risk and driver behavior [J]. *Safety Science*, 1996, 22 (1/3): 103.
- [9] Lewis-Evans B, Charlton G S. Explicit and implicit processes in behavioural adaptation to road width[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2006, 38: 610.