

文章编号:1674-599X(2022)04-0124-09

高ETC车辆比例下引导标志优化功效研究

向往,孙金灿,龙科军,何艳杰,王超伦,刘雪梅

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要:本研究讨论在高速公路ETC车辆大幅增加的情况下优化车辆引导标志的问题,先开展了三种收费站车道引导标志方案(未优化的传统方案、箭头+MTC引导方案和语音+MTC引导方案)的功效试验,采集驾驶员在这三个方案下的换道行为等数据指标,再利用单因素方差分析法,比较在不同预告引导标志方案下驾驶员换道行为的差异性。研究结果发现:优化后的引导标志系统可以明显缩短响应时间,引导司机提前做出变道决策,减少MTC车辆与主线ETC车辆在收费站前的拥堵,使驾驶员的换道过程更平稳和安全。

关键词:ETC,引导标志,高速公路收费站,驾驶模拟,变道决策,换道过程

中图分类号:U491

文献标志码:A

Study on optimization effect of guidance signs under high ETC vehicle proportion

XIANG Wang, SUN Jincan, LONG Kejun, HE Yanjie, WANG Chaolun, LIU Xuemei

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Sciences & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to study optimization of vehicle guidance signs after the significant increase of the ETC vehicles on highway, the efficacy experimental on three toll station lane guidance sign schemes (the unoptimized traditional scheme, arrow and the MTC guidance scheme, and voice and the MTC guidance scheme) was carried out in this study. The data indicators of drivers' lane changing behavior was collected. The differences of drivers' lane changing behaviors under different proactive notice guidance sign schemes were compared using single factor analysis of variance. The experimental results show that the response time can be reduced significantly using the optimized guidance sign. The lane change decision will be guided to make in advance, reducing the conflict between MTC vehicles and mainline ETC vehicles in front of the toll station. Therefore, the lane change process will be done steady and safely.

Key words: ETC; guide sign; highway toll station; driving simulation; lane change decision; lane change process

近年来,在交通部的大力推动下,安装不停车电子收费系统(electronic toll collection, 简称为ETC)的车辆逐渐增加。截止2020年底,安装了该收费系统的车辆比例已经超过65.98%^[1]。高速公路管理方也重新调整了ETC车道与半自动车道收费系统(manual toll collection, 简称为MTC)车道的比例。

这些措施改变了驾驶员在高速公路收费站处对两种车道的选择行为和习惯。因此,在高速公路ETC车辆大幅增多的情况下,针对性地优化车道引导标志牌就显得尤为重要。

人们对高速公路收费站引导标志设计进行了大量研究。这些研究大多通过优化和设计引导标

收稿日期:2021-09-28

基金项目:国家自然科学基金(71701023, 71931003),湖南省自然科学基金(2019JJ50656)

作者简介:向往(1988—),男,长沙理工大学讲师,博士。

志牌的箭头和文字,更好地引导驾驶员在通过高速公路收费站时能正确地找到合适的收费通道。QIAO等人^[2]基于驾驶模拟试验和问卷调查,发现在出口标志中添加箭头,有助于驾驶员理解出口信息。马连霞^[3]分析和评价了收费站5种不同指示标志的有效性,分析结果显示,同时包含位置信息和文字信息的标志组合的指示效果最好。ABDELATY等人^[4]对收费站前的动态信息标志(dynamic message sign,简称为DMS)内容进行了优化,使其标志含义更容易被驾驶员理解,方便驾驶员更安全地通过收费站。SAAD等人^[5]发现在收费站前的标志牌中添加箭头指引,可以减少收费站前的突然换道行为,能更安全地引导驾驶员进行换道。

在引导标志功效测试方面,由于实地测试的权限和安全问题,虚拟现实技术成为试验测试的重要手段。虚拟现实技术能够模拟车辆行驶过程中的环境,将驾驶感受精准地传递给驾驶人。高车速带来的高风险也使高速公路标志功效测试试验以虚拟仿真试验(即驾驶模拟器)为主。国内外已有大量基于驾驶模拟器的引导标志牌的研究。赵妮娜等人^[6]通过驾驶模拟器进行了寻路试验,获取了微观驾驶行为数据,并以此为基础,研究了不同形式出口标志的效用。GUO等人^[7]考虑了行车安全要求及驾驶员的信息接收能力,针对高速公路出口指路标志的信息容量,设计了驾驶模拟试验,通过测试优化确定了出口指路标志的位置。黄利华^[8]通过驾驶模拟试验,研究了三级预告标志、立交桥型指路标志和城市快速路立交桥出口指路标志对驾驶人操控行为和车辆运行状态的影响。通过驾驶模拟器研究标志方案是一种合理、有效的试验方法。

传统高速公路收费站车道提示标志的内容主要是提示ETC车辆需提前靠左换道进入收费站左侧的ETC车道。但当ETC车辆更多时,车辆可不需换道、直接进入ETC车道。因此,为了避免在收费站广场发生拥挤和碰撞,前置标志提示内容应改为提示MTC车辆提前靠右变道行驶。为简化标志内容、提升标志诱导效果,本研究参考了符号学理论^[9]的部分内容。在符号学理论中,箭头是交通引导标志中导向性最强的图形符号,指示明确、直接^[10]。孟娟^[11]指出,箭头具有很好的视觉识别功能,能让人在很短的时间内,即使隔着一定距离也能清晰地

接收到其所要表达的交通导向信息。张坤等人^[12]研究了注视点数(fixation count,简称为FC)。观察区域内的FC越大,该区域越重要,越能引起注意。对比试验发现:箭头的三角设计形式吸引司机注视的效果最好。因此,本研究采用长沙理工大学驾驶模拟器和眼动仪,对高速公路收费站预告引导标志做两个方面的创新设计;①将原有标志的部分文字变成箭头,增强提示信息的可读性,并通过分析驾驶模拟试验的数据,验证引导标志牌优化的有效性;②在站前2.2 km处增加语音警告,通过分析驾驶模拟试验结果,验证语音警告是否能引导驾驶员更早地做出变道决策。

1 试验设计

1.1 试验人员

本次参与试验的人员为42名均持有有效驾驶证的中国籍驾驶员,其中,32名男性,10名女性;年龄范围为18~53岁,年龄均值为34.07岁,方差为8.7;获得驾照时间范围为1~17 a,均值为7.1 a,方差为4.5;实际驾龄范围为1~17 a,均值为4.3 a,方差为3.5。他们均有开车经过高速公路收费站的经验,具体数据见表1。每个参与者都被邀请参加两个试验环节:驾驶模拟器的熟悉试验环节和正式测试环节。

表1 参与者的驾驶经验特征

Table 1 Characteristics of participants' driving experience

驾驶员特性	区间	人数/人	比例/%
年平均通过收费站次数	0次	9	21.4
	1~6次	10	23.9
	7~12次	9	21.4
	>12次	14	33.3
年平均驾驶里程	<5×10 ³ km	7	16.7
	5×10 ³ ~10×10 ³ km	8	19.1
	11×10 ³ ~30×10 ³ km	16	38.0
	>30×10 ³ km	11	26.2

1.2 试验设备

本试验采用了长沙理工大学的驾驶模拟器,该模拟器具有360°环视野。在试验过程中,该模拟器以60 Hz的频率自动记录包括减速、换道等驾驶行为在内的动态驾驶数据,以及包括速度、方向盘转角和油门踏板角度在内的车辆运行数据。

1.3 试验场景设计

我国现行的交通规范没有规定ETC车道的具体比例,罗梓铭^[13]通过仿真试验发现,当ETC车辆比例较高时,收费站的通行能力会随着ETC车道数的增加呈先增加后平稳的趋势,当ETC车道数增加到9条时,通行能力达到稳定。本试验模拟了一个有代表性的高速公路收费站。它由9条ETC通道和4条MTC通道组成,其中,ETC车道的使用率超过69%。本试验在无自由交通流的情况下进行,参试者分别以ETC和MTC两种不同车辆驾驶员的身份驶入高速公路收费站。

HUANG等人^[14]指出,高速公路出口前500 m范围内的区域是车辆换道行为发生的主要路段,因此,出口预告标志牌主要集中安放在距离出口1 000、500、300和0 m处。本试验依据引导标志牌设计的少数、指引和提前的原则,采取控制变量法,

设计3种高速公路主线收费站预告牌的组合方案。

试验设置一个现状组a1,即传统标志牌组合方案,研究现有方案是否能满足高比例ETC车辆的通行。方案a2在现状组a1的基础上,遵循引导少数MTC车辆的原则,将收费站前1 000、500、300和0 m处的引导标志内容更改为“MTC靠右指引”,进一步提前引导MTC车辆,标志牌上部除收费站收费通道的提醒,还增加了收费通道位置的提醒,以期更好地指引少数MTC车辆进行提前换道,减少其在收费站附近对主线ETC车辆的影响。方案a3在方案a2的基础上,在收费站前2.2 km处添加了“前方到达道仁收费站,请提前选择车道”的语音提醒,提示MTC驾驶员注意引导标志,更早地提前变换至目标车道。3种预告引导标志组合方案如图1所示,试验设计分组见表2。

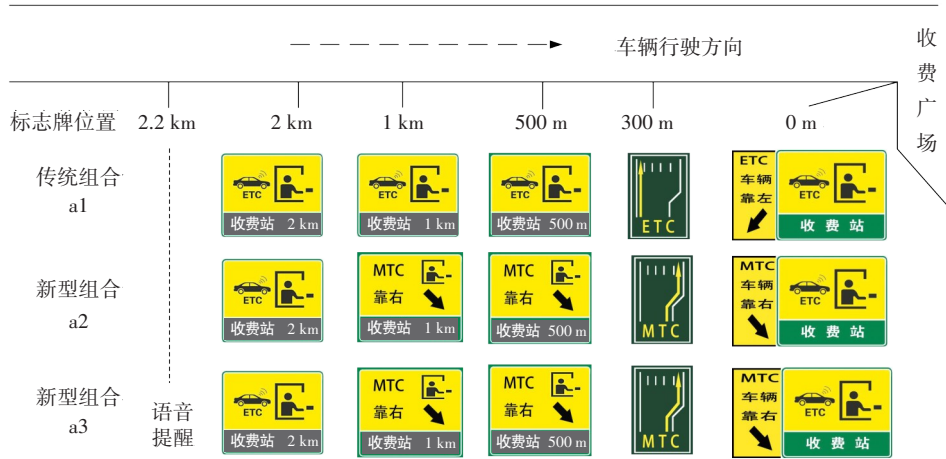


图1 预告引导标志组合方案

Fig. 1 Combination scheme of advance notice guidance signs

表2 试验设计分组

Table 2 The design of experimental grouping

试验方案	组合型引导标志
传统组合 a1	2 km、1 km、500 m、300 m(ETC)、0 m
新型组合 a2	2 km、1 km(新型)、500 m(新型)、300 m(MTC)、0 m(新型)
新型组合 a3	2.2 km 语音播报、2 km、1 km(新型)、500 m(新型)、300 m(MTC)、0 m(新型)

1.4 试验流程

1) 预试验阶段。参试者自行调整座椅至合适位置,熟悉模拟驾驶车辆的油门、刹车和转向等设备,体验模拟场景,确认身体是否有不适现象。

2) 试验准备阶段。工作人员为参试者说明试

验注意事项,校正驾驶模拟器和眼动仪。

3) 正式试验阶段。由一名工作人员操作驾驶模拟软件,另一名工作人员操作眼动仪软件。驾驶模拟器将自动采集车辆的试验数据,眼动仪将录制参试者的眼动视频。

4) 整个试验共3个场景,分3次完成,为消除驾驶顺序效应带来的数据误差,每个试验场景随机产生。每次试验中参试者均以不同指定身份(ETC或MTC用户)进行试验,每次试验结束后休息20 min。

5) 试验结束后,保存试验数据。参试者根据驾驶时的主观感受,填写组合型预告标志的有效性评价问卷和驾驶模拟器真实度主观评测表。

1.5 数据整理

驾驶模拟器记录的车辆的运行时间、速度、加

速度和坐标等试验数据见表3。对42名驾驶员的换道行为数据进行筛选和整理后,获得研究范围内每个数据点的换道行为指标值。同时,本试验通过iView X™HED 平台记录参试者的动态眼动注视过程。

表3 试验原始数据变量
Table 3 Experimental raw data variables

数据类型	数据变量	试验参数
车辆行驶参数	时间变量	瞬时时刻
	位置变量	换道起始点、终点的坐标
	速度变量	瞬时速度、瞬时加速度
其他参数	驾驶员基本信息	性别、年龄、驾龄、年平均通过收费站次数和驾驶里程
	场景设计参数	车道宽度、试验场景长度、预告标志牌位置

本次驾驶模拟试验主要分析MTC 驾驶员的换

道行为,研究参数包括响应时间、换道开始位置、换道持续距离、换道过程中的加速度和平均速度。各指标具体示意图如图2所示。具体指标含义描述如下:

- 1) 响应时间:参试者开始换道与到达2.2 km 最末端的预告标志处的时间差,即参试者辨认整套组合型预告引导标志的时间。
- 2) 换道开始位置:参试者开始变换车道的地点距0 m 预告标志的相对位置。
- 3) 换道持续距离:参试者换道开始时刻的位置与换道结束时刻的位置间的距离。
- 4) 换道过程中的加速度:车辆在换道开始时刻与换道结束时刻之间行驶的平均加速度。
- 5) 平均速度:车辆在换道行为开始与换道结束之间的平均速度。

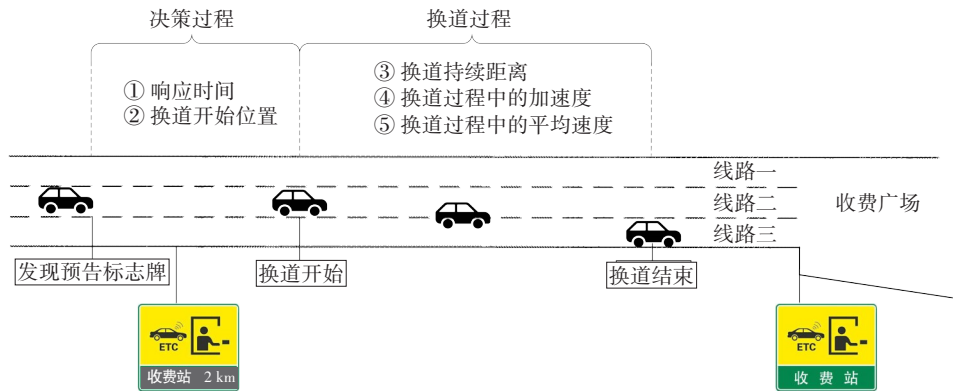


图2 决策和换道过程各指标示意图

Fig. 2 Schematic diagram of indicators in decision-making and lane changing process

2 试验结果

本研究运用SPSS 软件,采用单因素方差分析方法,分析不同方案下参试者的性别、年平均高速驾驶里程和年龄特性对响应时间和换道位置的影响。

每名参试者都参与了3个方案的试验。本研究共进行126次试验,其中:108次试验参试者都进行了提前换道。以下假设检验均基于0.05 的显著性水平。各项换道行为指标见表4。换道开始位置在三种不同标志方案下的均值见图3 所示。

表4 决策过程中各变量的描述性统计和方差分析结果

Table 4 Descriptive statistics and analysis of variance results of variables in the decision-making process

变量	分类	样本量	响应时间			换道开始位置		
			均值/s	F	p	均值/m	F	p
年龄	18~25 岁	23	37.52	1.728	0.166	1 201.37	3.007	0.034
	26~35 岁	39	48.40			851.92		
	36~50 岁	35	49.85			914.16		
	>50 岁	11	43.90			791.49		
性别	男	77	47.51	1.130	0.290	884.72	3.388	0.068
	女	31	42.56			1 078.55		
驾龄	1~3 a	18	34.56	3.124	0.048	1246.11	5.940	0.004
	4~10 a	63	48.12			821.23		
	>10 a	27	49.06			1 014.48		

表4(续)
Table 4(continued)

变量	分类	样本量	响应时间			换道开始位置		
			均值/s	<i>F</i>	<i>p</i>	均值/m	<i>F</i>	<i>p</i>
年平均通过收费站次数	0次	23	35.88	2.715	0.049	1 250.90	7.432	0.001
	1~6次	25	49.64			740.62		
	7~12次	19	53.43			676.91		
	>12次	41	46.26			1 010.03		
年平均高速驾驶里程	<5×10 ³ km	17	39.67	0.597	0.618	1 217.62	3.159	0.028
	5×10 ³ ~10×10 ³ km	19	47.69			723.84		
	11×10 ³ ~30×10 ³ km	46	47.71			915.08		
	>30×10 ³ km	26	46.26			962.02		
标志方案	a1	24	55.09	2.895	0.060	667.98	4.914	0.009
	a2	42	45.03			1 026.35		
	a3	42	42.01			1 010.02		

注: $p<0.05$ 表明存在显著性差异。

2.1 决策过程

由表4可知,引导标志方案对换道开始位置有显著影响($F=4.914, p=0.009$)。从图3可看出,在原始方案a1下的参试者的换道开始位置距0 m标志牌最近,为667.98 m。在新方案a2和a3中,参试者的换道开始位置则更远,分别为1 026.35 m和1 010.02 m。这说明提前引导可使MTC车辆更早地变换至目标车道。

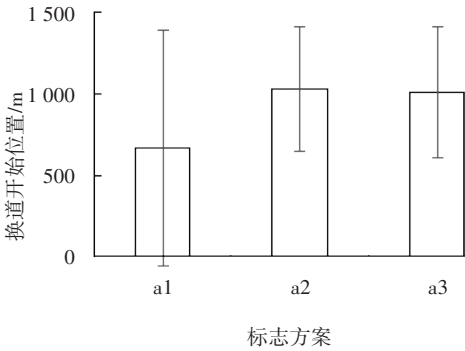
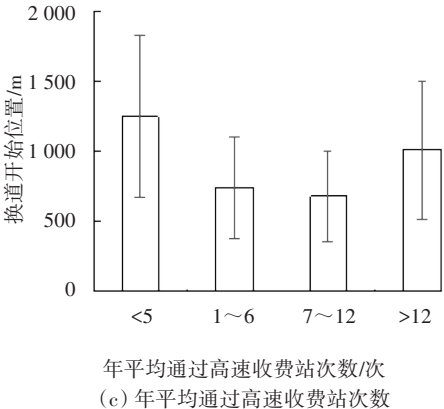
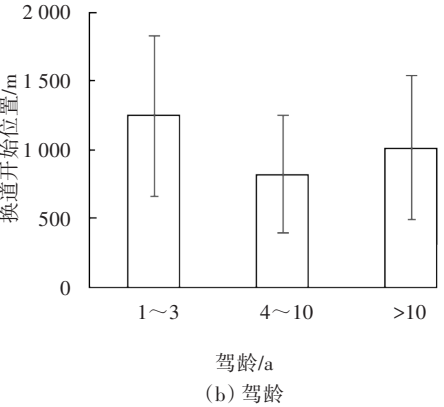
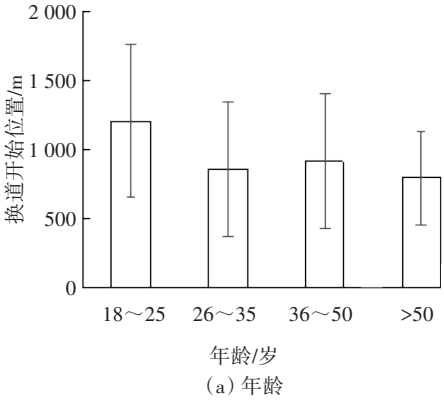


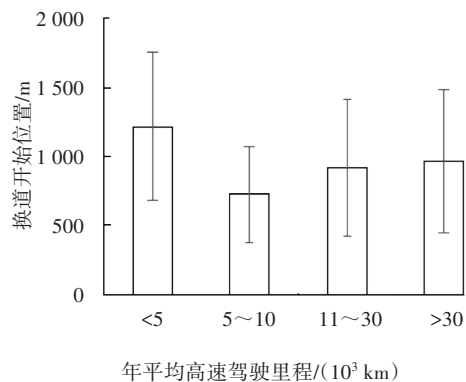
图3 换道开始位置在三种不同标志方案下的均值

Fig. 3 Mean value of lane change start position under three different sign schemes

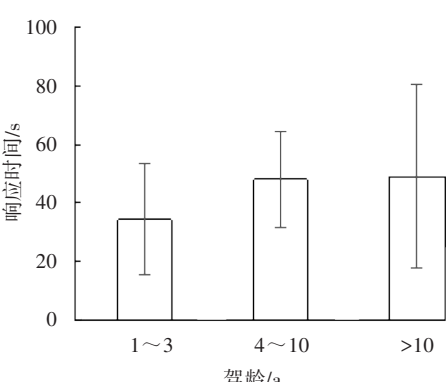
驾龄($F=5.940, p=0.004$)、年平均通过收费站次数($F=7.432, p=0.001$)和年平均高速驾驶里程($F=3.159, p=0.028$)这3个因素与换道开始位置的关系分别如图4所示。它们都与换道开始位置之间呈显著相关关系。18~25岁年龄段参试者的换道开始位置明显比其他年龄段驾驶员的更提前。这说明驾驶经验较少的参试者的换道开始位置更提前。这可能是他们缺乏驾驶经验,驾驶心理更谨慎导致的。随着高速公路驾驶经验的增加,参试者的换道开始位置也在往后移。



年平均通过高速收费站次数/次
(c) 年平均通过高速收费站次数



(d) 年平均高速驾驶里程

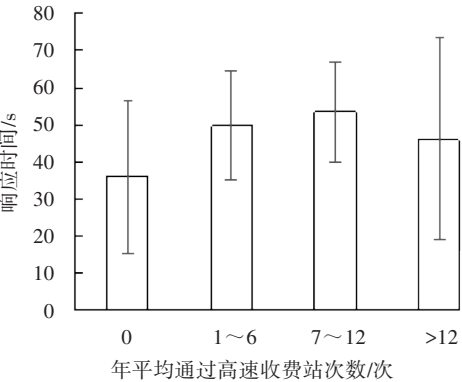


(a) 驾龄

图4 4个因素对换道开始位置均值的影响

Fig. 4 The influence of four factors on mean value of starting position of lane change

驾龄($F=3.124, p=0.048$)和年平均通过收费站次数($F=2.715, p=0.049$)这两个因素都对响应时间有显著影响,具体如图5所示。从图5(a)可知,短驾龄(1~3 a)参试者的响应时间最少,中长驾龄(4~10 a)和长驾龄(>10 a)参试者的响应时间逐渐增加。这说明驾驶年限越长的驾驶员,换道决策过程越安全。从图5(b)可看出,从未经过高速收费站的参试者的响应时间最低,有一定高速驾驶经验的参试者的响应时间更长。



(b) 年平均通过高速收费站次数

图5 驾龄与年平均通过高速收费站次数对响应时间均值的影响

Fig. 5 The influence of driving age and average annual times toll station on mean value of response time

表5 换道过程中各变量的描述性统计和方差分析结果

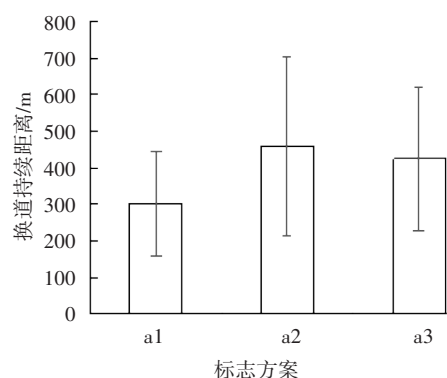
Table 5 Descriptive statistics and analysis of variance results of variables in lane changing process

变量	区间	样本量	换道持续距离			加速度			平均速度		
			均值/m	<i>F</i>	<i>p</i>	均值/(m·s ⁻²)	<i>F</i>	<i>p</i>	均值/(km·h ⁻¹)	<i>F</i>	<i>p</i>
年龄	18~25岁	23	450.85	1.208	0.311	0.14	1.811	0.150	79.17	3.194	0.027
	26~35岁	39	373.99			0.26			77.42		
	36~50岁	35	444.13			0.33			75.70		
	>50岁	11	353.42			0.39			89.74		
性别	男	77	439.17	4.820	0.030	0.31	3.917	0.050	78.79	0.126	0.723
	女	31	341.01			0.17			77.75		
驾龄	1~3 a	18	421.70	1.269	0.285	0.30	0.241	0.787	82.17	0.836	0.436
	4~10 a	63	385.65			0.28			77.40		
	>10 a	27	463.00			0.23			78.58		
年平均通过收费站次数	0次	23	377.67	1.394	0.249	0.15	1.256	0.293	79.93	0.926	0.431
	1~6次	25	410.65			0.29			81.23		
	7~12次	19	349.54			0.35			74.69		
	>12次	41	458.37			0.29			77.78		
年平均高速驾驶里程	<5×10 ³ km	17	436.28	0.744	0.528	0.10	3.116	0.029	77.02	2.208	0.092
	5×10 ³ ~10×10 ³ km	19	352.88			0.45			84.91		
	11×10 ³ ~30×10 ³ km	46	407.35			0.27			78.61		
	>30×10 ³ km	26	443.37			0.24			74.56		
标志方案	a1	24	302.43	4.508	0.013	0.59	15.661	0.001	66.69	14.856	0.001
	a2	42	458.72			0.19			83.37		
	a3	42	425.30			0.17			80.36		

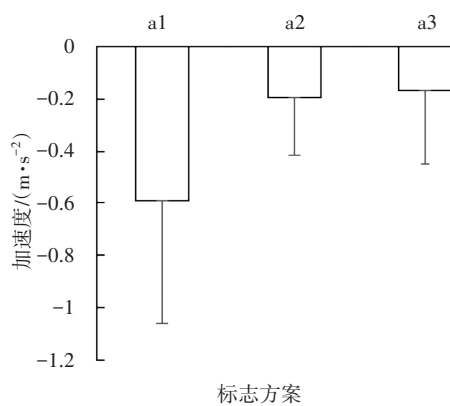
2.2 换道过程

换道过程数据的方差分析结果见表5。

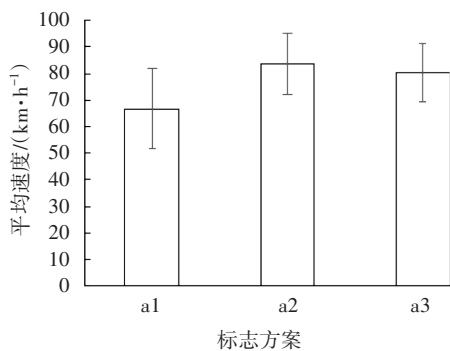
由表5可知,标志方案因素($F=4.508, p=0.013$)、加速度($F=15.661, p=0.001$)和平均速度($F=14.856, p<0.001$)这三者对换道持续距离均有显著影响。标志方案的影响见图6所示。由图6(a)、图6(b)可知,新方案a2和方案a3的换道持续距离和平均速度均明显高于原始方案a1的。由图6(c)可知,原始方案a1的加速度最大,优化导向标志方案的加速度随着变道时导向强度的增加而明显降低。这说明改进后的新型方案可以使驾驶员的换道过程更平稳。



(a) 标志方案对换道持续距离的影响



(b) 标志方案对加速度的影响

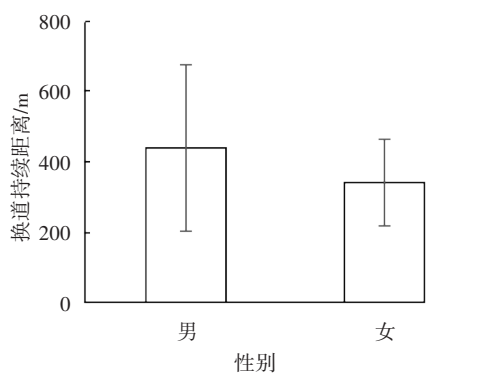


(c) 标志方案对平均速度的影响

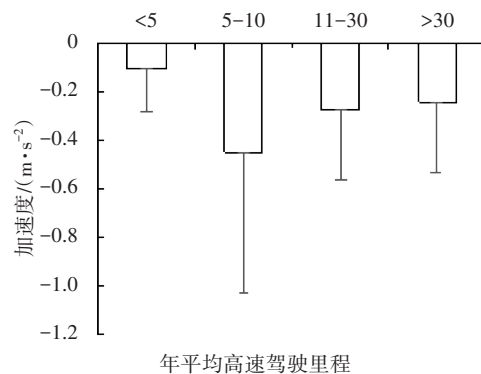
图6 不同标志方案对车辆行驶指标的影响

Fig. 6 Influence of different sign schemes on vehicle driving index

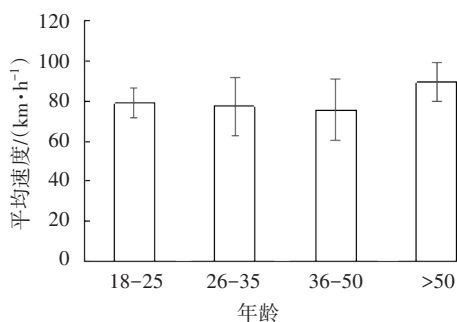
性别因素对换道持续距离的影响,年平均驾驶里程对加速度的影响和年龄对平均速度这三者对换道过程的影响如图7所示。参试者在换道过程中,性别因素($F=4.820, p=0.030$)对换道持续距离有显著影响。由图7(a)可知,男性参试者的换道持续距离明显长于女性参试者的。年平均驾驶里程因素($F=3.116, p=0.029$)对加速度有显著影响。由图7(b)可知,驾驶里程大于50 000 km的参试者的加速度明显高于驾驶里程不超过50 000 km的参试者的。年龄($F=3.194, p=0.027$)对平均速度有显著影响。由图7(c)可知,年龄超过50岁的参试者的平均速度最大,年龄在18岁到50岁之间的驾驶者,随着年龄的增加,其平均速度不断降低。



(a) 性别对换道持续距离的影响



(b) 年平均高速驾驶里程对加速度的影响



(c) 年龄对平均速度的影响

图7 参试者的不同特征对驾驶参数的影响

Fig. 7 Influence of different characteristics of participants on driving indicators

3 讨论

本研究参考符号学理论,研究和比较了在较高ETC车辆比例情况下,高速公路收费站前的预告标志组合方案。研究结果表明:不同预告引导标志组合方案对不同参试者的换道行为产生了不同的影响。

参试者的性别、驾驶经验和年龄等特征对车辆换道过程具有不同程度的影响。女性驾驶员的换道持续距离明显短于男性驾驶员的,这意味着女性驾驶员可能进行更危险的换道操作,这与之前的研究一致^[15]。其次,丰富的驾驶经验对于换道过程有着积极的影响,拥有更长驾龄、更多年平均通过收费站次数和更长年平均高速里程的参试者,其换道开始位置更靠前,换道过程中的加速度更小,换道行为更稳健、安全。这是拥有较丰富经验的参试者更谨慎、具有更强的安全意识导致的。该结论支持了之前的研究成果^[15-16]。

不同标志方案下的换道行为的差异很大。原始方案a1和方案a2之间存在一定的差异。与原始方案a1相比,方案a2将收费站预告标志牌的方向指示改为“MTC靠右指引”的提示,同时增加收费通道位置的提醒,调整后的各项换道行为指标都得到了明显的提升。方案a2的换道初始位置相较于方案a1的提前了54%,换道持续距离延长了52%。车流中占少数的MTC车辆的换道初始位置越提前,就越能减少和避免危险换道行为的发生^[17]。改进后方案a2的比方案a1的平均速度提高了25%,加速度下降了68%。这些结果表明,指引更明确的预告引导标志可以鼓励参试者更早地根据需求换道,也促使换道速度变化更为缓和,这些结论与之前的研究一致^[18]。

虽然有研究表明,明确的方向语音提醒可以提高驾驶室员的注意力^[19],缩短驾驶员的反应时间^[20]。但在本试验中,添加语音的方案a3和无语音提示的方案a2相比,各项指标间没有显著性差异。方案a3添加了“前方到达道仁收费站,请提前选择车道”的语音提示,其作用相当于在收费站前2.2 km位置处增加了一块引导标志。HUANG等人^[14]指出

站前2 km处的预告引导标志对改善换道行为没有显著影响。本试验是在无自由交通流的情况下进行的,方案a2的标志方案已经能满足车辆的换道需求。但如果在存在自由交通流的情况下,增添语音提醒的方案a3可能会起到更好的作用。

4 结论

本研究通过驾驶模拟试验,研究在高ETC车辆比例背景下高速公路收费站前不同引导标志组合对MTC驾驶员换道行为的影响。试验结果表明:改进后的方案a2和方案a3对驾驶员的换道行为产生了积极的影响,缩短了驾驶员的响应时间,使驾驶员的换道初始位置更提前,换道过程更安全,换道过程中的速度变化更加均匀,能更好地避免MTC车辆在收费站广场前与主线ETC车辆的冲突,提高收费站的通行能力。在方案a2基础上添加语音提醒的方案a3的最终效果与方案a2的差异不大,这可能是本研究是在无自由交通流下进行所导致的。高速收费站前的车辆引导是一个系统工程,涉及到ETC收费通道数量优化、引导系统优化等多方面的内容,需要一系列的驾驶模拟试验来测试。由于试验场景的复杂性和可操作性问题,本研究的驾驶模拟试验只做了引导标志优化方案方面的功效测试。在后续研究中会开展改变收费站环境和交通环境的试验测试。

参考文献

- [1] 彭瑶. 中华人民共和国交通运输部:全国高速公路ETC使用率超65.98% 收费站缓行拥堵缓解[N/OL]. 中国新闻网, [2020-10-28]. http://news.china.com.cn/txt/2020-10/28/content_76852695.htm. (PENG Yao. Ministry of Transport of the People's Republic of China: the national ETC usage rate exceeded 65% [N/OL]. China News Network. 2020-10-28. http://news.china.com.cn/txt/2020-10/28/content_76852695.htm. (in Chinese))
- [2] QIAO F X, LIU X Y, YU L. Using driving simulator for advance placement of Guide sign design for exits along highways, 2007.
- [3] 马连霞. 高速公路收费站无人值守指示标志有效性评价[D]. 北京:北京工业大学, 2015. (MA Lianxia. Valid evaluation on the sign of duty-off in toll gate [D].

- Beijing: Beijing University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [4] CARROLL K. Evaluation of real world toll plazas using driving simulation. 2016(in Chinese))
- [5] SAAD M, ABDEL-ATY M, LEE J. Analysis of driving behavior at expressway toll plazas [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2019(61):163-177.
- [6] 赵妮娜,赵晓华,林展州,等. 基于驾驶行为的高速公路出口标志形式研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(4): 137-145. (ZHAO Nina, ZHAO Xiaohua, LIN Zhanzhou, et al. Exit gore sign forms for freeway based on driving behavior [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(4): 137-145. (in Chinese))
- [7] GUO Z Y, WEI Z M, WANG H C. The expressway traffic sign information volume threshold and AGS position based on driving behaviour [J]. Transportation Research Procedia, 2016(14):3801-3810. (in Chinese))
- [8] 黄利华. 城市快速路立交桥出口指路标志影响分析及效用评估研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015. (HUANG Lihua. Research on influence analysis and effectiveness evaluation of interchange exit Guide signs in urban expressway [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [9] ZHOU X Y, QI W, OVUR S E, et al. A novel muscle-computer interface for hand gesture recognition using depth vision [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2020, 11(11):5569-5580.
- [10] SU H, OVUR S E, ZHOU X Y, et al. Depth vision guided hand gesture recognition using electromyographic signals[J]. Advanced Robotics, 2020, 34(15):985-997.
- [11] 孟娟. 中德城市公共道路交通导向设计比较研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2010. (MENG Juan. A comparative study on signs design of public urban road traffic between China and Germany [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2010. (in Chinese))
- [12] 张坤,崔彩彩,牛国庆,等. 安全标志边框形状及颜色的视觉注意特征研究[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(6): 18-22. (ZHANG Kun, CUI Caicai, NIU Guoqing, et al. Research on the visual attention and identification features of the shapes and colors of the safety signs [J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(6): 18-22. (in Chinese))
- [13] 罗梓铭. 高速公路混合收费站通行能力及车道配置研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2019. (LUO Ziming. Study on the capacity and ETC lane configuration of expressway toll station [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2019. (in Chinese))
- [14] HUANG L H, ZHAO X H, LI Y, et al. Optimal design alternatives of advance Guide signs of closely spaced exit ramps on urban expressways [J]. Accident Analysis & Prevention, 2020(138):105465.
- [15] 房曰荣. 不同类别驾驶员的驾驶行为特性差异实验研究[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(5):204-208. (FANG Yuerong. Experimental study on differences of driving behavior characteristics for different types of drivers [J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(5): 204-208. (in Chinese))
- [16] 梁健健,李晨新,魏田正,等. 公路改、扩建施工区设施与减速特征关系研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 93-97. (LIANG Jianjian, LI Chenxin, WEI Tianzheng, et al. Research on deceleration behavior of highway reconstruction and extension work zone [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1):93-97. (in Chinese))
- [17] LYU N C, CAO Y, WU C Z, et al. The effect of gender, occupation and experience on behavior while driving on a freeway deceleration lane based on field operational test data [J]. Accident Analysis & Prevention, 2018, 121: 82-93.
- [18] YAO X L, ZHAO X H, LIU H, et al. An approach for evaluating the effectiveness of traffic Guide signs at intersections [J]. Accident Analysis & Prevention, 2019(129):7-20.
- [19] HO C, SPENCE C. Assessing the effectiveness of various auditory cues in capturing a driver's visual attention [J]. Journal of Experimental Psychology Applied, 2005, 11(3):157-174.
- [20] ROSWARSKI T E, PROCTOR R W. Auditory stimulus-response compatibility: Is there a contribution of stimulus-hand correspondence [J]. Psychological Research, 2000, 63(2):148-158.
- (责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:陈璐)