

驾驶人危险感知影响因素建模与试验

杨京帅,李秀丽,任书杭,王 婷,高 扬

(长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为了分析驾驶人危险感知的影响因素,对驾驶人危险感知的影响因素进行演绎推理与试验分析。采用事故树分析建模与试验测试相结合的方式,剖析了驾驶人危险感知的影响因素并验证了影响因素的有效性。研究表明:驾驶人危险感知的影响因素来自于 2 个方面,一是危险与背景交通情境的特征,二是驾驶人的视觉搜索效率与认知水平;潜在危险与实际危险在识别率、发现速度和注视时间上有显著性差异($p<0.01$);动态危险的发现速度高于静态危险($p<0.01$)且受到的注视时间更长($p<0.01$);熟练驾驶人相比非熟练驾驶人能够发现更多的危险信息($p<0.01$),能够更加快速地发现危险($p<0.01$),对危险的注视时间更长($p<0.01$);熟练驾驶人对于交通情境的演变预测与判别更准确($p<0.01$),并具有更高的自信程度($p<0.01$)。

关键词:交通工程;道路交通安全;事故树分析;驾驶人;危险感知

中图分类号:U491

文献标志码:A

Modeling and experimental of influencing factors of drivers' hazard perception

YANG Jing-shuai, LI Xiu-li, REN Shu-hang, WANG Ting, GAO Yang

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to search for the influencing factors of drivers' hazard perception, this paper adopted methods of deductive reasoning and experimental test to analyze drivers' hazard perception. Based on the integration of fault tree analysis (FTA) model and experimental test, the influencing factors of drivers' hazard perception was studied and the validity was verified. The results indicate that influencing factors of drivers' hazard perception come from two aspects. One is about the characteristics of hazards and background traffic situations. The other is about drivers' visual searching efficiency and situation cognition level. There is significant difference between latent hazards and factual hazards in hazards recognition efficiency, detection speed and fixation duration ($p<0.01$). Dynamic hazards are found faster than static hazards ($p<0.01$), and are fixated more time ($p<0.01$). Experienced drivers can find more dangerous information ($p<0.01$), can find them faster ($p<0.01$), and fixate on hazards more time than novice drivers ($p<0.01$). Experienced drivers show higher accuracy in forecasting and judging traffic situation

收稿日期:2015-05-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51108040,51208052);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310822151022,2014G1221014);
国家科技支撑计划项目(2014BAH23F01-1)

作者简介:杨京帅(1978-),男,山东招远人,副教授,工学博士,E-mail:jshyang@chd.edu.cn。

evolution ($p < 0.01$) and have higher confidence ($p < 0.01$). 5 tabs, 5 figs, 16 refs.

Key words: traffic engineering; road traffic safety; fault tree analysis; driver; hazard perception

0 引言

由人-车-路-环境组成的道路交通安全系统极其复杂,国内外学者在识别道路交通安全的影响因素,量化各因素之间的相互作用与演化以及如何预防道路交通事故方面做了大量的研究工作。虽然车辆、道路与环境因素的研究占据了不小的比例,但是关于驾驶人因素的研究依然占据主流。究其原因,一方面源于驾驶人是道路交通事故致因的主要因素;另一方面,随着新技术在道路交通安全系统中的逐步应用,驾驶人将成为系统中最不可靠的因素,驾驶人在导致交通事故中的比例将会进一步增大。

驾驶人行为研究主要是围绕驾驶人感知-判断-决策的信息处理模式展开的,即驾驶人个体在驾驶过程中实时感知周边交通情境信息并采取相应的驾驶行为以维持安全状态的可靠性及其原因^[1-2]。随着驾驶行为研究的深入开展,对于危险感知(hazard perception)的研究日益引起关注。国外甚至有学者指出,在驾驶相关的所有技能中,只有危险感知是与交通事故密切相关的^[3]。相关统计资料表明,由驾驶人的危险感知错误导致的交通事故约占事故总数的40%~45%,与驾驶人感知错误和判断错误有关的交通事故占整个事故总数的80%~85%^[4],这一统计结果在一定程度上支持了该论断。英国及澳大利亚因此将危险感知测试作为获取驾照的必考科目^[5]。危险感知被认为是驾驶人对道路交通情境的读取能力,即识别、预测和评估危险情境的能力,或者说是驾驶人的危险情境意识水平^[6-8]。行车过程中驾驶人不仅要及时感知发现交通情境中的各种可能危险,而且要准确判断该危险能否导致交通事故,从而做出相应的驾驶操作,危险感知是一项相当复杂的驾驶技能^[9]。

国内外关于危险感知的研究,传统方式大多采用驾驶人行为问卷(driver behavior questionnaire, DBQ)的方法,研究事故记录、驾驶里程、人格特质、驾驶态度、驾照持有时间、违规记录等因素对驾驶人危险感知的影响^[4,10],是一种间接的危险感知分析方法。该类方法因其相对于其他方法的低成本以及可以获得大样本数据进行统计分析的优势而被广泛应用,但是因为问卷获取的行为数据很难证明与实际行为数据的一致性,问卷的可靠性与有效性一直

备受争议^[11]。随着计算机仿真与眼动测试仪器等新技术手段的应用,近年来普遍采用虚拟驾驶仿真技术开发危险交通情境或者采用实际驾驶测试的方式,基于驾驶车辆的行为表现,指出不同组别驾驶人在速度控制、操作行为与视觉行为等方面的差异^[12-13]。模拟仿真方式的局限性体现在两方面:一是开发的危险交通情境与现实情境有差异;二是驾驶人在模拟情境下测试的动机、目的、期望等因素与自然状态下也是有差异的,这两方面的差异导致模拟仿真情境下的测试结果有效性值得商榷。现场测试的最大优势是可以获取接近驾驶人自然状态下的行为数据,实施的难点在于成本高、样本量受限,不同驾驶人测试时很难获取完全一致的交通情境,后期处理要剔除大量干扰数据。

基于此,本文考虑以上测试分析的特点,在试验设计与测试分析时,在不同的环节分别采用了现场测试、模拟测试与问卷测试的内容。危险交通情境采用从驾驶人视角截取的真实交通情境,尽可能摒弃模拟交通情境的局限;为了改善现场测试多维因素的干扰,提高测试目的的针对性,对驾驶人、危险类别与交通情境进行了分类测试,尽可能消除测试目的以外的其他干扰因素的影响;在危险感知影响因素的设计上,采用事故树分析的方式,推理驾驶人危险感知的所有可能影响因素,然后对可能的影响因素进行测试分析,检验危险感知影响因素的显著性程度。

1 危险感知影响因素事故树分析

事故树分析,又称故障树分析(fault tree analysis, FTA),是美国贝尔研究所在20世纪60年代初提出和发展起来的一门技术,用于解决复杂系统的可靠性问题。事故树分析是一种演绎的系统安全分析方法,是从结果推断可能原因的思维方法。从特定的“事故”或“故障”开始,层层分析其发生原因,一直分析到不能再分解为止;将特定的事故与各层原因(危险因素)之间用逻辑门符号连接起来,得到形象、简洁地表达其逻辑关系(因果关系)的逻辑树图形,即事故树。然后对初步建成的事故树进行整理和化简,再进行定性、定量分析。事故树分析方法现在已广泛应用于各类系统的可靠性及安全性分析、各种生产实践的安全管理可靠性分析和伤亡事故

分析^[14]。

知的研究基础之上,建立了危险感知失败的事故树分析图(图 1),图中的各种符号及其含义见表 1。

遵循 FTA 编制的有关原则,在驾驶人危险感

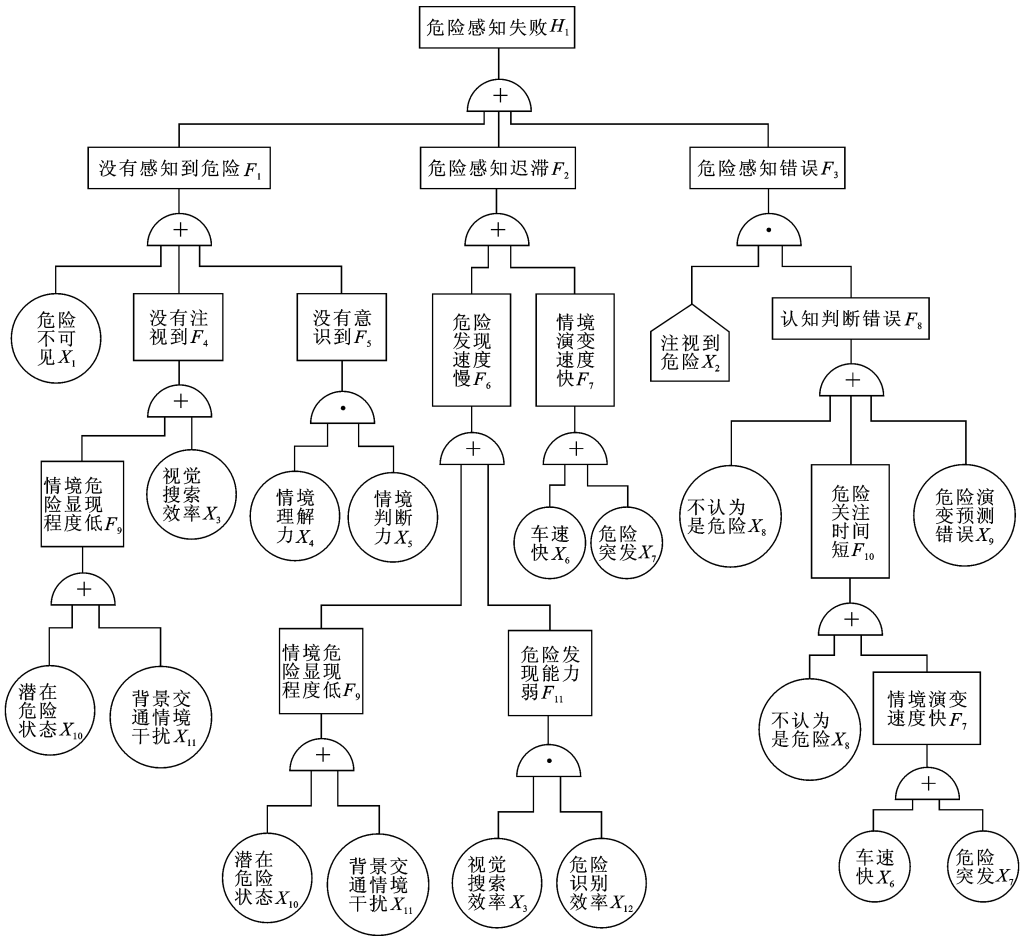


图 1 驾驶人危险感知失败事故树

Fig. 1 Fault tree of drivers' hazard perception failure

表 1 事故树中的符号及其含义

Tab. 1 Symbols and their meaning in fault tree

符号	含义
	顶上事件、中间事件符号,需要进一步往下分析的事件。
	基本事件符号,不用再往下分析的事件。
	正常事件符号,正常情况下存在的事件。
	或门,表示“或门”底端的任一事件发生(输入)，“或门”顶端的事件都将发生(输出)。
	与门,表示“与门”底端的所有事件必须同时发生(输入)，“与门”顶端的事件才能发生(输出)。

对于事故树(图 1),进行布尔代数运算,可得

$$H_1 = F_1 + F_2 + F_3 = (X_1 + F_4 + F_5) + (F_6 + F_7) + (X_2 \cdot F_8) = [X_1 + (F_9 + X_3) + X_4 \cdot X_5] + [(F_9 + F_{11}) + (X_6 + X_7)] + [X_2 \cdot (X_8 + F_{10} + X_9)] = \{X_1 + [(X_{10} + X_{11}) + X_3 + X_4 \cdot X_5]\} + \{(X_{10} + X_{11}) + X_3 \cdot X_{12} + (X_6 + X_7)\} + \{X_2 \cdot [X_8 + (X_8 + (X_6 + X_7)) + X_9]\}$$

$$X_3 \cdot X_{12} + (X_6 + X_7)]\} + \{X_2 \cdot [X_8 + (X_8 + (X_6 + X_7)) + X_9]\} = \{X_1 + [(X_{10} + X_{11}) + X_3 + X_4 \cdot X_5]\} + \{(X_{10} + X_{11}) + X_3 \cdot X_{12} + (X_6 + X_7)\} + \{X_2 \cdot [X_8 + (X_8 + (X_6 + X_7)) + X_9]\} \quad (1)$$

根据布尔代数运算规则(下页表 2),对式(1)进行简化,可得到式(2)

$$H_1 = (X_1 + X_{10} + X_{11} + X_3 + X_4 \cdot X_5) + (X_{10} + X_{11} + X_3 \cdot X_{12} + X_6 + X_7) + (X_2 \cdot X_8 + X_2 \cdot X_6 + X_2 \cdot X_7 + X_2 \cdot X_9) = X_1 + X_{10} + X_{11} + X_3 + X_4 \cdot X_5 + X_6 + X_7 + X_2 \cdot X_8 + X_2 \cdot X_9 = (X_1 + X_6 + X_7 + X_{10} + X_{11}) + X_3 + X_4 \cdot X_5 + (X_2 \cdot X_8 + X_2 \cdot X_9) \quad (2)$$

由式(2)可知,影响因素 X_1 、 X_6 、 X_7 、 X_{10} 、 X_{11} 是有关危险与交通情境因素的; X_3 是驾驶人视觉搜索效率,影响驾驶人能否快速注视到危险; $X_4 \cdot X_5$ 与视觉行为没有关系,纯粹是驾驶人的情境认知能力;

影响因素 $X_2 \cdot X_8$ 、 $X_2 \cdot X_9$ 既有驾驶人的视觉行为因素,也有驾驶人情境认知判断方面的影响因素,二者互为依托,相互作用。一种可能是驾驶人先注视到危险,然后感知判断到危险的存在;另一种可能是驾驶人基于自己的情境认知判断能力,认为情境中哪个区域可能有危险,从而主动去关注该区域。

表 2 布尔代数运算规则
Tab. 2 Algorithms of Boolean algebra

运算名称	运算规则
结合律	$(A+B)+C=A+(B+C)$
	$(A \cdot B) \cdot C=A \cdot (B \cdot C)$
交换律	$A+B=B+A$
	$A \cdot B=B \cdot A$
分配律	$A \cdot (B+C)=(A \cdot B)+(A \cdot C)$
	$A+(B \cdot C)=(A+B) \cdot (A+C)$
等幂律	$A+A=A$
	$A \cdot A=A$
吸收律	$A+A \cdot B=A$
	$A \cdot (A+B)=A$
互补律	$A+A'=1$
	$A \cdot A'=0$
对合律	$(A')'=A$
德·莫根律	$(A+B)'=A' \cdot B'$
	$(A \cdot B)'=A'+B'$

由危险感知影响因素事故树分析结果可知,驾驶人的危险感知水平受两方面因素的影响。客观方面:危险与交通情境的客观特征;主观方面:(1)驾驶人的视觉搜索行为特征;(2)驾驶人的情境认知判断能力;(3)驾驶人视觉行为与认知能力的相互作用。

2 危险感知影响因素测试分析

基于事故树分析结果,针对影响驾驶人危险感知的危险特征因素、交通情境因素、视觉行为因素、情境认知判断因素进行试验设计,测试以上因素对驾驶人危险感知影响的显著性,以此验证危险感知影响因素的有效性。

2.1 被试

试验选取了被试驾驶人 40 名,其中 20 名熟练驾驶人(experienced drivers,EDS),驾驶里程 5×10^4 km 以上,平均年龄 41.9 岁;20 名非熟练驾驶人(novice drivers,NDS),驾驶里程 5×10^4 km 以内,平均年龄 33.1 岁。所有被试驾驶人都视力正常或矫正视力正常。

试验分别测试了驾驶人感知到交通场景中潜在危险区域(潜在危险)及危险目标物(实际危险)的时

间与准确性,以及不同驾驶人群体对于交通情境演变预测的认知准确性。

2.2 试验材料和仪器

交通情境是从驾驶人视角截取的真实驾驶交通情境片段,共选取了 30 个交通情境进行测试。交通情境划分为 3 类:第 1 类是静态交通情境(static traffic situations,STS),例如路边停靠车辆后面可能走出的行人,前方支路可能出现的车辆等;第 2 类为动态交通情境(dynamic traffic situations,DTS),路边启动的车辆,辅路驶入主路的车辆,换道和转弯车辆,行人穿越马路等;第 3 类是动静态混合交通情境(mixed traffic situations,MTS)。危险目标物在交通情境中可能出现的区域被定义为潜在危险区域,危险目标物是实际可能造成碰撞的车辆、行人等。驾驶人注视到潜在危险区域和危险目标物被认为感知到潜在危险(latent hazard,LH)和实际危险(factual hazard,FH)。试验采用 Eyelink II 型眼动仪,由眼动仪记录被试驾驶人眼动数据,采样频率为 250 Hz。交通场景由戴尔 48 cm(19 英寸)纯平显示器呈现,被试驾驶人坐在距离显示器为 70 cm 左右的位置。

2.3 试验程序

在正式测试之前,为每名驾驶人进行眼动仪佩戴测试,以便能提取到眼动数据。被试驾驶人的任务就是观看交通情境,当发现交通情境中有潜在危险和实际危险的时候,分别敲击键盘的空格键和回车键。潜在危险显示时间为潜在危险区域在画面开始出现到实际危险出现为止,实际危险显示时间为实际危险开始出现到车辆驶过实际危险为止。

正式测试之前先进行 6 个交通情境的预测试。正式测试完毕后,从测试的交通情境中选取 30 个画面,进行交通情境演变预测的问卷调查。整个测试约 50 min,每个被试驾驶人生成一个数据文件。试验结束后,用 Eyelink II 提供的数据分析软件将数据导出,然后对数据进行统计分析。

2.4 结果分析

根据测试数据,进行了 3 项内容的分析:不同驾驶人群体是否注视到了潜在危险区域及危险目标物(是否发现危险),注视到潜在危险区域与危险目标物的快慢程度(发现危险的速度)以及注视潜在危险区域与危险目标物的时间(注视危险的时间)。

(1)对所有交通情境中的潜在危险区域与危险目标物是否被注视进行统计,危险目标物被注视的比例为 83.2%,而潜在危险区域被注视的比例为

58.9%(表 3),驾驶人更容易发现看得见的危险($F(1,38)=108.7, p<0.01$),表明模型中的因素 X_1 、 X_{10} 是危险感知的重要影响因素,危险的显现程度的确对驾驶人的危险感知水平有显著影响,这种影响主要源于危险的类别特征不同。熟练驾驶人相比非熟练驾驶人发现了更多的潜在危险和实际危险($F(1,38)=9.7, p<0.01$),表明熟练驾驶人显示出更高的危险感知水平(图 2),这与已有的研究结论是一致的^[15-16]。该测试分析的内容无法解释熟练驾驶人与非熟练驾驶人危险识别能力差异的原因,需要进一步的试验分析。

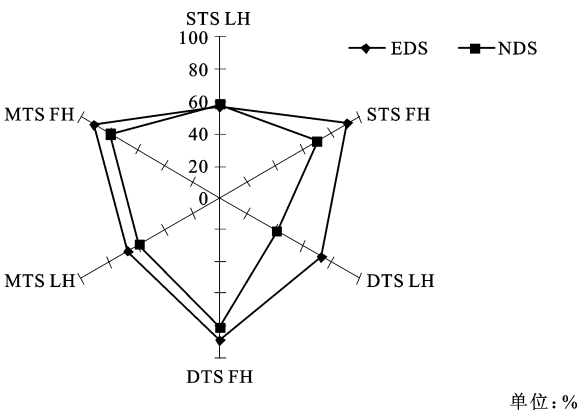


图 2 驾驶人在不同交通情境的危险识别率
Fig.2 Drivers' hazard recognition percentage in different traffic situations

(2)驾驶人注视到潜在危险区域与危险目标物的快慢程度用百分率表示,即驾驶人第 1 次注视到危险的时刻在该危险画面总持续时间的百分比位置。显然数值越小,表明驾驶人越早注视到该危险。方差分析表明,不同交通情境的危险发现速度有显著差异($F(2,76)=12.6, p<0.01$)。驾驶人对静态交通情境的危险发现速度(52.7%)与混合交通情境的危险发现速度(51.8%)相当。动态交通情境的危

险发现速度(44.9%)比静态交通情境的危险发现速度快的多($F(1,38)=21.1, p<0.01$),表明背景交通情境的动态特征有助于驾驶人更快地发现危险,即模型中的因素 X_{11} 、 X_7 对危险感知的影响显著性是可信并存在的;实际危险的发现速度(35.8%)比潜在危险的发现速度(63.8%)要快的多($F(1,38)=192.5, p<0.01$),再次确认了因素 X_1 、 X_{10} 对危险感知的影响;熟练驾驶人比非熟练驾驶人能够更快速地发现危险,发现的速度分别为 39.2%与 60.4%, $F(1,38)=16.9, p<0.01$,如表 4 所示。借助眼动仪记录驾驶人的注视点数据以及驾驶人的敲击键盘行为,表明熟练驾驶人相对于非熟练驾驶人能够更快速准确地注视到危险(因素 X_2 、 X_3)并确认危险(因素 X_8 、 X_9),熟练驾驶人显示出了更高的视觉搜索效率和危险演变预测水平,即事故树分析中的因素 X_2 、 X_3 、 X_8 、 X_9 对危险感知的影响是存在且显著的。测试数据分析无法解释视觉行为与情境认知行为的作用机理,是高效的视觉行为首先注视到危险然后确认危险,还是高水平的情境认知能力驱使驾驶人根据情境特点,预测哪里有危险从而主动去注视相应的区域。

(3)驾驶人注视潜在危险区域与危险目标物的时间用注视该危险的累积时间与该危险画面总持续时间的百分比表示。数值越大,表明驾驶人注视该危险的时间越长。方差分析表明,驾驶人对不同交通情境的危险注视时间有显著差异($F(2,76)=11.3, p<0.01$)。驾驶人对动态交通情境的危险注视时间(28.8%)明显比静态交通情境的危险注视时间(22.0%)长, $F(1,38)=26.3, p<0.01$ (下页表 5)。驾驶人对实际危险的注视时间(35.4%)为潜在危险的注视时间(15.7%)的 2 倍左右, $F(1,38)=196.8, p<0.01$ (下页图 3)。熟练驾驶人对危险的

表 3 潜在危险与实际危险的识别率

危险类别	静态交通情境		动态交通情境		混合交通情境		汇总
	熟练驾驶人	非熟练驾驶人	熟练驾驶人	非熟练驾驶人	熟练驾驶人	非熟练驾驶人	
潜在危险	56.2	58.4	72.7	41.1	66.8	58.3	58.9
实际危险	91.7	69.4	89.3	80.6	89.7	78.3	83.2

表 4 驾驶人在不同交通情境的危险发现速度

驾驶人类别	静态交通情境		动态交通情境		混合交通情境		汇总
	潜在危险	实际危险	潜在危险	实际危险	潜在危险	实际危险	
熟练驾驶人	65.6	23.7	41.3	22.2	57.1	25.5	39.2
非熟练驾驶人	73.3	48.2	74.4	41.8	71.3	53.4	60.4

表 5 驾驶人在不同交通情境的危险注视时间

Tab. 5 Drivers' hazard fixation time in different traffic situations

类别	静态交通情境		动态交通情境		混合交通情境		汇总
	潜在危险	实际危险	潜在危险	实际危险	潜在危险	实际危险	
熟练驾驶人	16.2	38.7	30.4	47.6	19.2	44.6	32.8
非熟练驾驶人	9.8	23.1	8.3	28.7	10.1	29.7	18.3
汇总	13.0	30.9	19.4	38.2	14.7	37.2	
	22.0		28.8		26.0		

注视时间(32.8%)远远长于非熟练驾驶人的注视时间(18.3%), $F(1,38)=39.5,p<0.01$ (图 4)。此项测试表明,驾驶人对于不同交通情境、不同危险类别倾注的注意力是不同的,显现程度愈高,愈容易演变成事故的交通情境与危险类别,驾驶人倾注的注意力越多。该注视行为的差异更多地源于驾驶人对交通情境理解力与判断力(因素 X_4 、 X_5)的差异,以及危险演变预测的能力差异(因素 X_8 、 X_9),而非驾驶人视觉行为的原因。

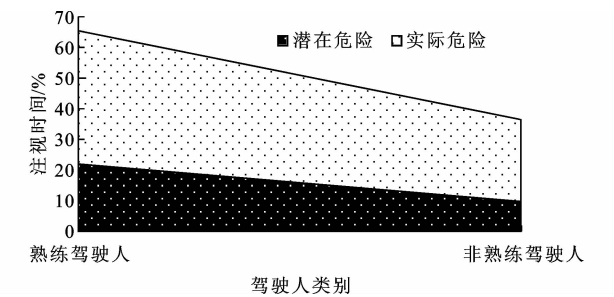


图 3 潜在危险与实际危险的注视时间

Fig. 3 Fixation time of latent hazard and factual hazard

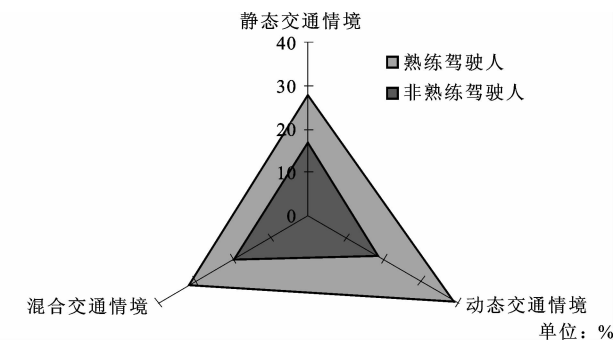


图 4 熟练驾驶人与非熟练驾驶人的危险注视时间

Fig. 4 Hazard fixation time of experienced drivers and novice drivers

(4)对驾驶人进行交通情境演变预测的问卷测评,对交通情境的演变预测完全正确为 10 分,熟练驾驶人与非熟练驾驶人的理解力分值分别为 8.87 和 7.85,熟练驾驶人显示了更好的交通情境的阅读理解能力, $F(1,38)=20.4,p<0.01$ 。对所回答问题是否正确的自信程度进行打分(满分 10 分),熟练

驾驶人(自信分值 7.96)相比非熟练驾驶人(自信分值 7.07)的自信程度更高, $F(1,38)=14.1,p<0.01$ (图 5)。该问卷测评进一步确认了模型中因素 X_4 、 X_5 、 X_8 、 X_9 对危险感知有显著影响,可能也是熟练驾驶人显示出更高危险感知水平的深层次原因。

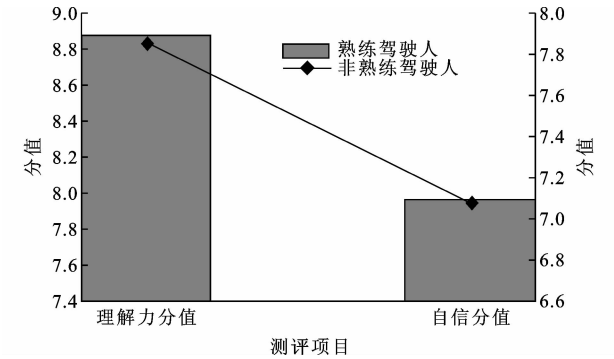


图 5 驾驶人对交通情境的理解与自信测试

Fig. 5 Drivers' comprehension and confidence test in traffic situations

3 结 语

(1)由危险感知事故树分析结果可知,驾驶人危险感知的影响因素,客观方面来自于危险与背景交通情境的特征;主观方面来自于驾驶人的视觉行为与认知行为。除了影响因素 X_6 由于试验设计的原因没有得到验证,其他影响因素都得到了有效验证,表明借助事故树分析驾驶人危险感知的影响因素是可信有效的。

(2)试验测试分析结果验证了危险感知影响因素的显著性。不同类别的危险与背景交通情境对危险的识别率、发现速度、注视时间有显著影响。交通情境中的潜在危险相比看得见的危险更加不易被发现($p<0.01$)。在危险的发现速度方面,驾驶人对于动态危险的发现速度高于静态危险($p<0.01$);对实际危险的发现速度比潜在危险要快的多($p<0.01$);在危险的注视时间方面,驾驶人对不同交通情境的危险注视时间有显著差异($p<0.01$);驾驶人对动态交通情境的危险注视时间明显比静态交通情境的危险注视时间长($p<0.01$);驾驶人对实际

危险的注视时间为潜在危险的注视时间的 2 倍左右。熟练驾驶人相比非熟练驾驶人能够发现更多的危险信息($p < 0.01$),体现了熟练驾驶人具有更高的视觉搜索效率;熟练驾驶人比非熟练驾驶人能够更快速地发现危险($p < 0.01$)。熟练驾驶人对危险的注视时间远远长于非熟练驾驶人的注视时间($p < 0.01$)。熟练驾驶人对于交通情境的演变预测与判别更准确($p < 0.01$),并具有更高的自信程度($p < 0.01$)。

(3)试验设计与测试时,对于危险程度较低的交通情境中的危险,即使驾驶人注视到危险,也没有进行危险确认。导致这一现象并不是驾驶人危险识别的原因,而是因为危险的程度驾驶人主观可以接受。在下一步的研究中,除了对驾驶人、交通情境与危险类别进行分类,还应该考虑交通情境的危险程度、驾驶人的危险感受认知负荷等因素,以便能够更深入地探究危险感知的影响因素及其作用机理。

参考文献:

References:

- [1] 冯忠祥,袁华智,刘 静,等. 驾驶人个人特征对行车速度的影响[J]. 交通运输工程学报,2012,12(6): 89-96.
FENG Zhong-xiang, YUAN Hua-zhi, LIU Jing, et al. Influence of driver personal characteristics on vehicle velocity[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(6): 89-96. (in Chinese)
- [2] Elvik R. Why some road safety problems are more difficult to solve than others[J]. Accident Analysis and Prevention, 2010, 42(4): 1089-1096.
- [3] Mcknight A J, Mcknight A S. Young novice drivers; careless or clueless[J]. Accident Analysis and Prevention, 2003, 35(6): 921-925.
- [4] 郑东鹏. 驾驶人危险感知及影响因素研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
ZHENG Dong-peng. Study of driver hazard perception and its influencing factors[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [5] Scialfa C T, Deschênes M C, Ference J, et al. A hazard perception test for novice drivers[J]. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43(1): 204-208.
- [6] Borowsky A, Gilad T O, Meir A, et al. Drivers' perception of vulnerable road users; a hazard perception approach[J]. Accident Analysis and Prevention, 2012, 44(1): 160-166.
- [7] Crundall D, Chapman P, Trawley S, et al. Some hazards are more attractive than others; drivers of varying experience respond differently to different types of hazard[J]. Accident Analysis and Prevention, 2012, 45(1): 600-609.
- [8] Scialfa C T, Borkenhagen D, Lyon J, et al. A comparison of static and dynamic hazard perception tests[J]. Accident Analysis and Prevention, 2013, 51(1): 268-273.
- [9] Wetton M A, Horswill M S, Hatherly C, et al. The development and validation of two complementary measures of drivers' hazard perception ability[J]. Accident Analysis and Prevention, 2010, 42(4): 1232-1239.
- [10] 庄明科, 白海峰, 谢晓非. 驾驶人员风险驾驶行为分析及相关因素研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(3): 475-482.
ZHUANG Ming-ke, BAI Hai-feng, XIE Xiao-fei. A study on risky driving behavior and related factors[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44(3): 475-482. (in Chinese)
- [11] Yannis G, Kanellopoulou A, Aggeloussi K, et al. Modeling driver choices towards accident risk reduction[J]. Safety Science, 2005, 43(3): 173-186.
- [12] Geoffrey U, Athy N, Jean U. Driving experience and situation awareness in hazard detection[J]. Safety Science, 2013, 56(1): 29-35.
- [13] Das S, Sun X, Wang F, et al. Estimating likelihood of future crashes for crash-prone drivers[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2015, 2(3): 145-157.
- [14] 卜全民, 王涌涛, 汪德耀. 事故树分析法的应用研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(4): 141-144.
BU Quan-min, WANG Yong-tao, WANG De-guan. The application of fault tree analysis[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(4): 141-144. (in Chinese)
- [15] Pollatsek A, Narayanaan V, Pradhan A, et al. Using eye movements to evaluate a PC-based risk awareness and perception training program on a driving simulator[J]. Human Factors, 2006, 48(3): 447-464.
- [16] Underwood G, Phelps N, Wright C, et al. Eye fixations scan paths of younger and older drivers in a hazard perception task[J]. Ophthalmic and Physiological Optics, 2005, 25(4): 346-356.