

智能汽车变道盲区影像对驾驶员认知负荷与安全性的影响

岳李圣飒, 潘昱蓉, 孙 剑, 朱奕昕, 崔晓辉, 李奕劼

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 智能汽车变道盲区影像在为驾驶员提供更多环境信息的同时也可能增加驾驶员的认知负荷。针对这一问题, 提出改进 AttenD 算法, 建立认知负荷与驾驶员注视点分布的关系模型, 对 3 种智能汽车品牌车辆开展实车路测实验, 分析多种外部条件下驾驶员与不同变道盲区影像交互过程中注视特征、驾驶行为特征以及认知负荷的差异。结果表明, 增大盲区影像面积、提高盲区影像面积占中控屏面积的比例、减少扫视路径冗余能降低变道过程中的认知负荷。

关键词: 智能汽车; 变道盲区影像; 认知负荷; 变道安全; AttenD 算法

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

Effects of Blind Area Display of Intelligent Vehicles on Drivers' Cognitive Load and Safety During Lane Change

YUE Lishengsa, PAN Yurong, SUN Jian, ZHU Yixin, CUI Xiaoye, LI Yijie

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

Abstract: While providing more environmental information to drivers, the blind area display of intelligent vehicles during lane changes may also increase the driver's cognitive load. To address this issue, this paper presents an improved AttenD algorithm, which establishes a relationship model between the cognitive load and distribution of drivers' fixation points. Field tests were conducted on three intelligent brand cars, and differences in drivers' gaze characteristics, driving behavior characteristics, and cognitive load during the interaction between the driver and lane-changing blind area display were analyzed. Results show

that increasing the size of the blind area display, increasing the blind area's ratio on the center control panel, and minimizing unnecessary scanning movements can reduce the cognitive load and improve the safety during lane changes.

Keywords: intelligent vehicle; lane-changing blind area display; cognitive load; lane change safety; AttenD algorithm

相关数据表明, 车辆变道相关的严重事故约占总事故的 17.0%, 高于超速 (12.8%) 和追尾 (11.2%) 造成的事故率^[1]。因此, 变道过程的安全问题得到了广泛关注。研究显示, 变道过程中车辆盲区对驾驶安全有着较大影响, 由于车辆出现在汽车的盲区而导致的碰撞事故约占总变道事故的 20%^[2]。驾驶员通过车辆后视镜对盲区车辆和交通态势的关注与理解, 显著影响了变道决策。在变道过程中, 驾驶员需要扫视汽车周围区域, 盲区的存在加剧了注意力分散的可能, 增大了驾驶风险^[3]。盲区会给驾驶员造成一种安全的假象, 增加变道时刮蹭与碰撞的风险^[4]。变道事故的数量取决于驾驶员在变道时查看盲区的比例和频率以及驾驶员在变道前查看后视镜的比例^[5], 仅仅依靠后视镜进行变道可能导致与其他车辆碰撞^[6]。

较早期的汽车安全防护系统对变道盲区危险进行了针对性设计。盲区监控系统能在其他车辆处于驾驶员的盲区时发出视觉警报并通知驾驶员, 安装了盲区监测的车辆卷入变道事故的概率比无盲区监测的车辆低 14%^[7]。随着智能汽车人机交互技术的飞速发展, 智能座舱能为驾驶员提供更多的环境感

收稿日期: 2024-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(52125208); 上海市软科学项目(23692123300)

第一作者: 岳李圣飒, 助教, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能网联车人机交互与协同。

E-mail: 2014yuelishengsa@tongji.edu.cn

通信作者: 孙 剑, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通流理论与交通仿真、自动驾驶与车路协同。

E-mail: sunjian@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

知信息^[8]。智能汽车变道盲区影像被认为能够有力补充后视镜视野,已成为智能汽车的人机交互设计之一。变道盲区影像改变了驾驶员的注视模式,由以往的前方视野-后视镜视觉搜索变为前方视野-后视镜-盲区影像视觉搜索。然而,由于变道盲区影像设计缺乏相应规范,不同品牌车辆的变道盲区影像存在较大差异,随着变道盲区影像方案在各大智能汽车品牌上的大量采用,用户关于变道盲区影像加重认知负荷的负面评价开始集中体现^[9],因此亟需评估智能汽车变道盲区影像对驾驶员认知负荷与变道安全的影响,优化相关设计。

驾驶员注视模式、驾驶行为与认知负荷之间存在密切关联性。由于认知负荷无法被直接检测,因此需建立与驾驶员行为特征与生理指标的关联,而注视特征常被用于认知负荷评价。研究表明,通过分析驾驶员的注视特征及瞳孔相关指标可以较好地反映驾驶员的认知负荷变化。Palinko等^[10]发现,认知负荷与瞳孔扩张之间存在密切联系。Gao等^[11]的研究表明,微眼跳率会随着认知负荷的增加而降低,并且其变化与任务难度有关。Prabhakar等^[12]提出了眼动指标衡量认知负荷的方法,发现眼测量指标能够用于与任务困难相对应的不同认知状态区分,其中瞳孔直径扩张标准差(STDP)与注视率可以较好地反映实车实验驾驶员负荷变化。与此同时,一些研究者提出了驾驶员注视模式与认知负荷之间的解析式评估模型。Kircher等^[13]根据缓冲值概念设计了AttenD算法,建立了认知负荷与驾驶员视线落点的关系模型。Seppelt等^[14]利用缓冲值大小量化认知负荷,根据实际情况改变部分参数,并评估听觉-声音任务交互中存在的认知负荷。

高认知负荷下驾驶员注视模式与驾驶行为会发生改变。Xu等^[15]将变道过程中驾驶员视觉注意不匹配与碰撞风险建立联系,通过分析变道时驾驶员视线模式的显著性差异计算安全关键时刻,并研究了变道时驾驶员认知负荷与行车安全的相关性。Chong等^[16]的研究表明,变道测试下认知负荷越高,驾驶员的驾驶表现越差,反应时间也越长。Redenbo等^[17]研究了认知负荷对驾驶策略和注意力的影响,实验证明认知负荷对于驾驶过程中的视觉搜索具有负面影响。Recarte等^[18]讨论了认知负荷对视觉搜索和决策的影响,在高认知负荷下驾驶员的道路扫视范围缩小,对后视镜的注视频率也减少。Li等^[19]通过模拟器研究发现,认知负荷的增加会使驾驶员的微转向活动和集中注视增加。Merat等^[20]认为,当

驾驶员认知负荷增大时,驾驶员眨眼频率增加,速度、纵横向加速度等车辆运行参数均明显变化。彭丹丹等^[21]通过模拟器实验研究了手机导航对驾驶行为的影响,使用导航时驾驶员认知负荷增大,车辆纵向速度标准差更加集中、方向盘转角熵值增大。

为了分析智能汽车变道盲区影像对驾驶员认知负荷的影响,通过评估驾驶员与不同变道盲区影像交互过程中注视特征、驾驶行为特征以及认知负荷的差异,提出了变道盲区影像优化建议,力图减少对变道安全的不利影响。首先,通过改进AttenD算法建立认知负荷与驾驶员注视点分布的关系模型,量化变道过程中的认知负荷;其次,开展不同环境下的实车路测实验以采集相关数据;接着,将路测数据代入改进AttenD算法计算认知负荷,与瞳孔直径扩张标准差共同评估认知负荷强度;最后,综合对比不同变道盲区影像设计下的驾驶员注视特征、驾驶行为特征以及认知负荷的变化规律,进一步评价不同变道盲区影像设计的安全性,并提出优化建议。

1 改进 AttenD 算法

AttenD是一种基于眼动数据检测驾驶员认知负荷的算法,基本假设为人的注意力与注视行为密切相关。驾驶员的视线频繁远离驾驶相关区域(FRD),表示驾驶员认知负荷增加,引入时间缓冲概念以反映认知负荷^[14]。时间缓冲值的最大值为2 s。当视线离开FRD时时间缓冲值减小,视线回到FRD后时间缓冲值增加;当时间缓冲值减小到零时,表示驾驶员存在分心且认知负荷大。

一般认为基础AttenD算法的FRD是固定不变的。Kircher等^[13]将FRD定义为90°视锥与车窗交叉点之间所包括的区域,但实际情况下FRD会随着交通情况等的变化而变化。为了更加精确地反映认知负荷,FRD的大小、位置等也应当随着实际情况变动。本文对AttenD算法进行改进,动态改变FRD的范围,从而更加准确地计算驾驶员的认知负荷。注视点数据分析结果表明,驾驶员在进行左右变道操作时,关注的区域不同,对应的FRD也不同。左变道时FRD的范围主要在左侧道路和前方区域,右变道时FRD的范围主要在右侧道路和前方区域。依据实际情况调整具体的坐标范围,从而提高变道过程中认知负荷计算的准确程度。

以变道过程中的注视点坐标和对应时间戳为输入,判断注视点位置是否在FRD内,进而计算时间

缓冲值,输出反映认知负荷的时间缓冲值以及对应时间戳。时间缓冲值越小,说明驾驶员对道路注意力越低,进而反映出认知负荷的增加。改进 AttenD 算法中,注视点持续在 FRD 内时时间缓冲值不变,除驾驶前方区域(FRD)以外,适度观察后视镜、车内中控屏等区域可以保证驾驶安全,不被认为是分心,

因此设定 1 s 的阈值;当注视后视镜、中控屏时长超过阈值后或注视其他非 FRD,认为驾驶员的注意力分散,时间缓冲值以每秒 1 个单位的速率降低;当注视点回到 FRD 时,经 0.1 s 的生理反应延迟后,缓冲值以每秒 1 个单位的速率增加,直至上限 2 s。算法流程如图 1 所示。

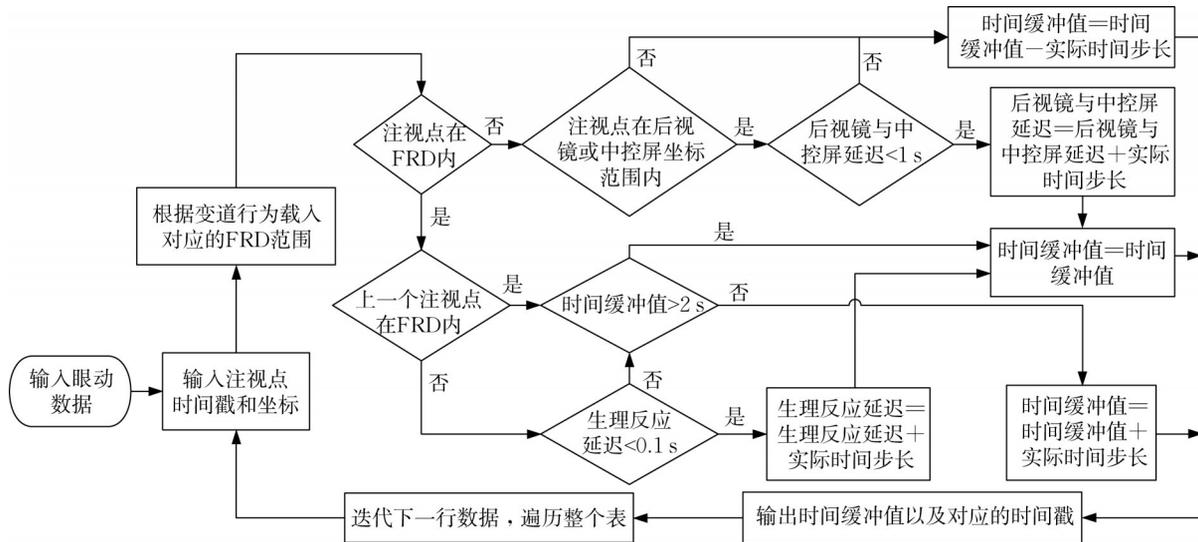


图 1 改进 AttenD 算法流程

Fig.1 Flow chart of improved AttenD algorithm

对于不同车型,分别确定后视镜和中控屏的坐标范围,并依据左右变道时的注视点坐标分布及注视点热力图,分别确定左右变道时的 FRD 坐标范围。时间缓冲值初始值及最大值均为 2 s,对每个输入的注视点坐标,判断其及上一个注视点是否在 FRD 内,若均在 FRD 内且时间缓冲值小于 2 s,则时间缓冲值以每秒 1 个单位的速率增加;若上一个注视点不在 FRD 内,则判断时间缓冲值大小以及生理反应延迟大小,若生理反应延迟大于 0.1 s,则时间缓冲值以每秒 1 个单位的速率增加;若注视点在 FRD 外,则判断注视点是否位于后视镜和中控屏坐标范围内:若位于后视镜和中控屏坐标范围外则时间缓冲值直接以每秒 1 个单位的速率降低,若位于后视镜和中控屏坐标范围内则判断是否超过 1 s 阈值,若超过则时间缓冲值以每秒 1 个单位的速率降低。输出变道过程中每个注视点坐标对应的时间缓

冲值,最终计算整个过程时间缓冲值的平均值及标准差以反映认知负荷。

2 实车实验

与驾驶模拟器实验相比,真实道路交互情景多样、不确定性强,能更真实地体现变道过程中驾驶员的驾驶行为与认知负荷。因此,采用真实道路交通场景下的实车路测实验进行数据采集,探究变道时不同车型的变道盲区影像对驾驶负荷的影响。

2.1 实验设备与采集指标

根据试驾时各种品牌车型变道盲区影像的显示特征,选择市场上销量较高的 3 种品牌智能汽车作为实验车辆。3 种品牌车辆的变道盲区影像设计在位置、大小上均存在较大差异,中控屏面积、盲区面积与位置如表 1、图 2 所示。

表 1 3 种品牌车辆中控屏与盲区影像面积对比

Tab.1 Comparison of center control panel and blind area sizes between three models

车型	中控屏面积/cm ²	盲区影像面积/cm ²	盲区影像面积占中控屏面积比例	变道盲区影像距方向盘中心横向距离/cm
品牌 1	521.0	87.8	0.17	38.0
品牌 2	685.2	73.2	0.11	21.2
品牌 3	717.2	左:98.1/右:144.0	左:0.14/右:0.20	左:14.5/右:32.4



图2 3种品牌车辆变道盲区影像设计

Fig.2 Lane-changing blind area display design of three models

采集了驾驶员与变道盲区交互的行为特征以及车辆运动特征等多项数据,实验设备与相应采集指标如图3所示。采用SmartEye Pro眼动仪系统采集驾驶员与变道盲区影像交互的视觉行为,通过4个视线跟踪摄像头捕捉驾驶员视线,1个前景摄像头录制驾驶前景;系统配套的 Human Research Tool(HRT)软件将前景视频与驾驶员视线合成,经

分析处理得到驾驶员注视点在视频中的位置坐标、驾驶员瞳孔直径等数据。采用佳明 eTrex221x 手持GPS导航仪采集车辆纵向运动特征,包括车辆位置信息和实时速度。采用MVN Awinda系统采集车辆横向运动特征,将无线传感器固定在方向盘上捕捉方向盘转动数据,最后通过系统配套的软件解析得到方向盘转角数据。

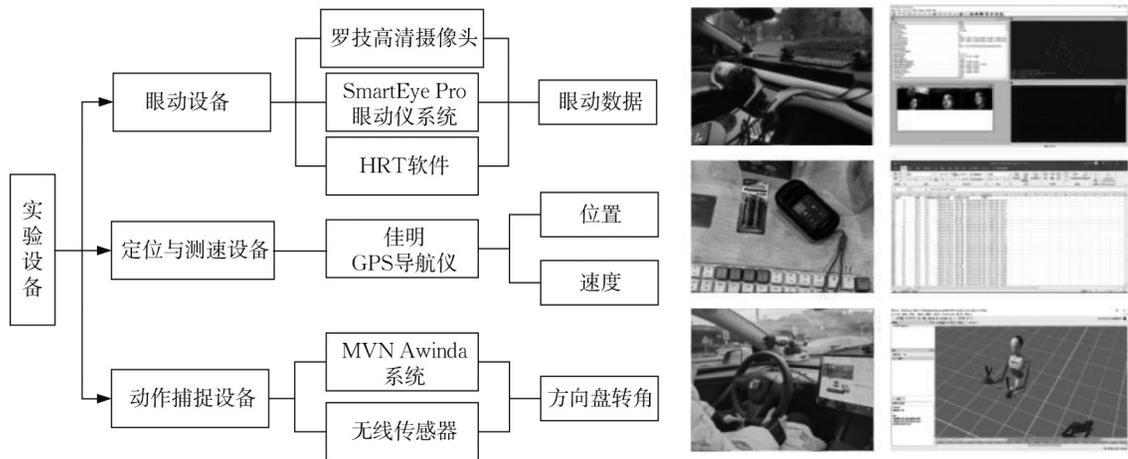


图3 实验设备和指标

Fig.3 Setup and indicators

2.2 实验对象

招募了15位具有智能汽车驾驶经验和变道盲区影像功能使用经历的驾驶员,驾驶员平均年龄为30岁。将15位驾驶员分为3组,每组采集1种品牌车辆的数据。实验对象总数满足3个独立样本非参数检验最小样本量的要求。实验前参与者被告知了实验流程及要求,并签订了知情同意书和驾驶协议。

2.3 实验方案

在早高峰(07:00—09:00)、晚高峰(17:00—19:00)及平峰时段(13:00—15:00)分别进行测试,覆盖不同交通流情况。实验路线全程约38.5 km,单次测试时长约90 min。如图4所示,实验路线包含约9 km的地面道路长时间直行路段及约16 km的高速及高架直行路段,在交叉口设计了不同的转弯方向,

便于驾驶员进行变道操作。驾驶员通过接收变道任务指令或自主判断完成变道操作,并实现与变道盲区影像的交互。

3 数据分析

以驾驶员完成开启转向灯-变道-关闭转向灯为一次变道事件,以开启转向灯为变道事件起始点,以变道后关闭转向灯为事件结束点。若变道完成后长时间未关闭转向灯,则以车身完成变道为事件结束点。通过视频分析结合实验时的打点数据,截取变道时与其他车辆存在强交互的特征时间段作为研究对象,以道路类型(城市道路、快速路)、变道方向(向左、向右)、交通流(大、中、小)为外部变量,分析驾驶



图4 实验路线

Fig.4 Experimental route

行为、驾驶员注视特征及认知负荷相关指标。根据前方车流情况判断交通流大小,不同交通流大小对变道的影响程度不同。前方一定距离内没有车辆或有一两辆车但距离较远,则认为交通流小,对于变道的影响小;前方一定距离内有两三辆车,则认为交通流中等,交通流对变道产生一定影响,变道时需要关注周围情况;前方一定距离内有四五辆车及以上,且距离本车较近,则认为交通流大,交通流对变道产生较大影响,变道时需更多地关注周围环境。

3.1 驾驶行为与安全性

速度作为车辆纵向运动特征,其多个特征指标都可以反映安全性;加速度反映了速度的变化情况,急加速或急减速行为被认为是较为不安全的驾驶行为^[22],加速度的波动越大,驾驶的风险越大。因此,选择加速度标准差作为衡量安全性的指标。方向盘转角作为车辆横向运动特征,其变化率可以反映驾驶员对于方向盘操纵的平顺性及稳定性,不稳定的操作将增大驾驶风险。因此,还选择方向盘转角变化率标准差作为衡量安全性的指标^[23]。

为了探究3种品牌车辆变道时的加速度标准差和方向盘转角变化率标准差是否存在显著性差异,经柯尔莫戈洛夫-斯米诺夫检验,加速度标准差和方向盘转角变化率标准差数据不服从正态分布($p < 0.001$),故采用Kruskal-Wallis非参数检验。结果表明,3种品牌车辆加速度标准差在城市道路($p = 0.002$)、左变道($p = 0.041$)下存在显著性差异,转角变化率标准差在快速路($p = 0.008$)、左变道($p = 0.023$)、右变道($p = 0.043$)和高交通流($p = 0.005$)下存在显著性差异。

在数据分布存在显著性差异的外部变量下进一步对比2种驾驶行为指标在3种品牌车辆之间的差

异。对3种品牌车辆加速度标准差进行两两比较。城市道路下,加速度标准差的差异主要在品牌1与品牌2($p = 0.001$)之间,品牌1的加速度标准差平均值($1.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)大于品牌2($0.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$);在左变道情况下,加速度标准差的差异同样在品牌1与品牌2之间($p = 0.035$),品牌1加速度标准差的平均值($1.55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)大于品牌2($0.83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)。对3种品牌车辆的车辆横向运动特征数据进行两两比较,如图5所示。图中,***表示 p 值小于0.001,**表示 p 值小于0.05,*表示 p 值小于0.01,n.s表示无显著性差异。在快速路、左变道、右变道和高交通流情况下品牌2车辆方向盘转角变化率标准差均大于品牌1和品牌3。

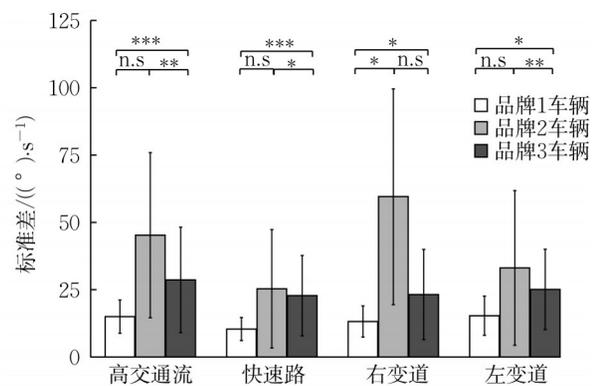


图5 方向盘转角变化率标准差显著性水平

Fig.5 Standard deviation significance level of steering wheel angle change rate

3.2 驾驶员注视特征

为了更好地分析驾驶员在变道过程中的注视特征及变道盲区影像对驾驶员注视分布的影响,将驾驶员注视范围分为7个区域,即左后视镜、左前方、正前方、右前方、右后视镜、盲区影像区域、中控屏,如图6所示。

图中, px 表示像素, 是视频里对应的注视点坐标。

计算驾驶员 7 个区域的注视频率和注视时长占比, 分析不同变道盲区影像设计对驾驶员注视频率、注视时长占比的显著性差异。基于 Kruskal-Wallis 非参数检验, 3 种品牌车辆驾驶员注视频率、注视时长占比在道路类型、变道方向、交通流高低几个变量下均存在显著性差异(见图 7)。在城市道路下 3 种品牌车辆驾驶员注视频率存在差异 ($p < 0.001$), 对其进行两两检验。注视频率的主要差异在于品牌 3 与品牌 2 车辆 ($p = 0.024$) 之间, 品牌 3 车辆驾驶员注视频率 ($12.95 \text{ 次} \cdot \text{s}^{-1}$) 高于品牌 2 ($10.52 \text{ 次} \cdot \text{s}^{-1}$)。在左变道情况下, 注视频率的差异主要在品牌 3 与品牌 2 ($p = 0.011$) 之间、品牌 3 与品牌 1 ($p = 0.006$) 之间, 品牌 3 车辆驾驶员注视频率比品牌 2 高

76.4%, 比品牌 1 高 28.2%。3 种品牌车辆驾驶员不同区域注视时长占比在城市道路下存在显著性差异 ($p = 0.024$), 差异主要存在于品牌 3 与品牌 2 ($p = 0.019$) 之间, 品牌 3 车辆驾驶员注视时长占比 (16.11%) 高于品牌 2 (11.34%)。在高交通流下, 注视频率差异主要在品牌 3 与品牌 2 ($p = 0.002$) 之间, 品牌 3 车辆驾驶员注视频率 ($14.3 \text{ 次} \cdot \text{s}^{-1}$) 高于品牌 2 ($3.96 \text{ 次} \cdot \text{s}^{-1}$); 注视时长占比差异主要在品牌 3 与品牌 1 ($p = 0.002$) 之间, 品牌 3 车辆驾驶员注视时长占比 (13.76%) 略高于品牌 1 (13.14%)。对比 3 种品牌车辆驾驶员注视频率及注视时长占比, 品牌 3 均大于品牌 2 和品牌 1。

3.3 瞳孔直径扩张标准差

已有研究表明, 瞳孔直径与认知负荷密切相关。

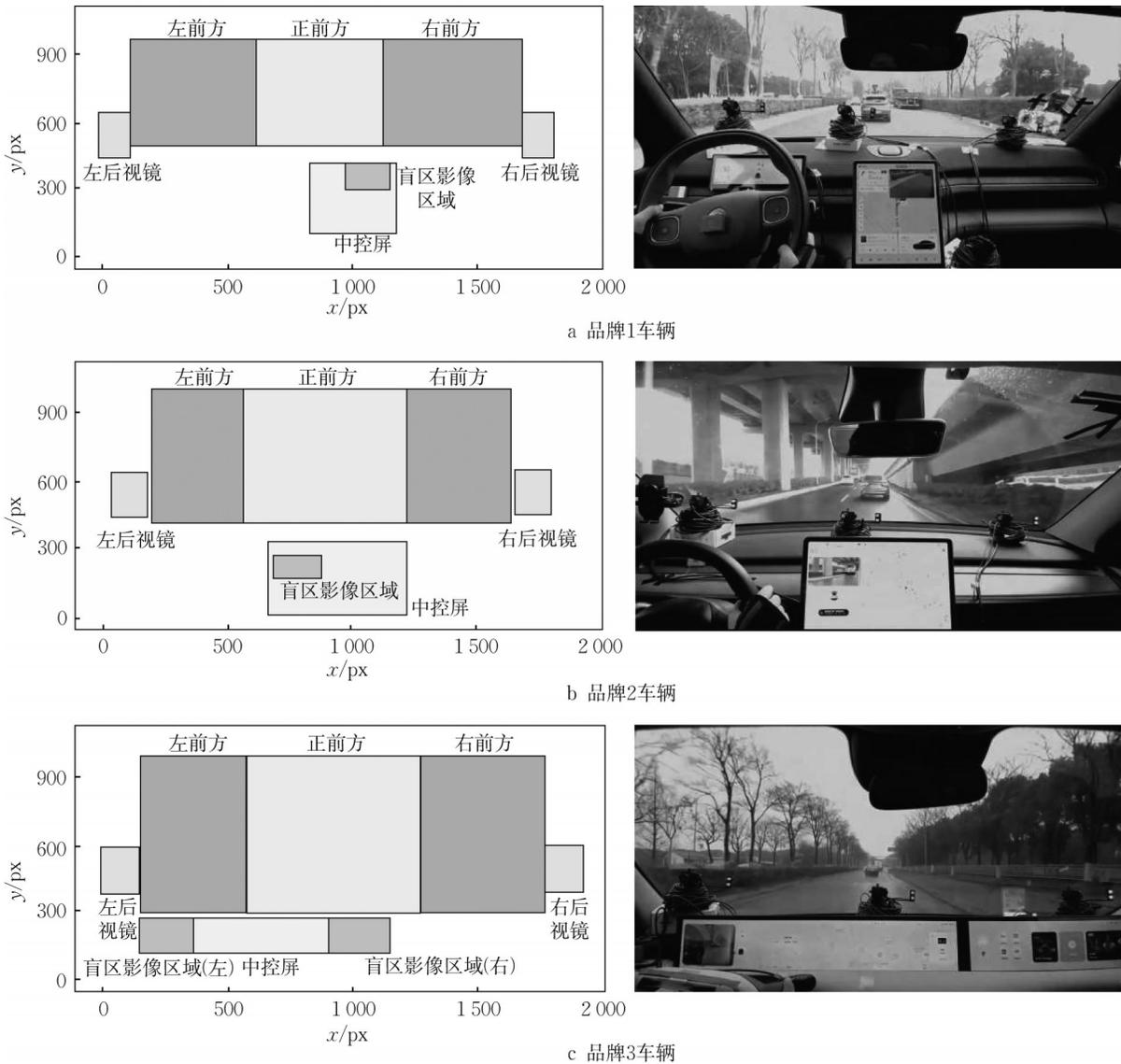


图 6 注视区域划分

Fig.6 Division of focus areas

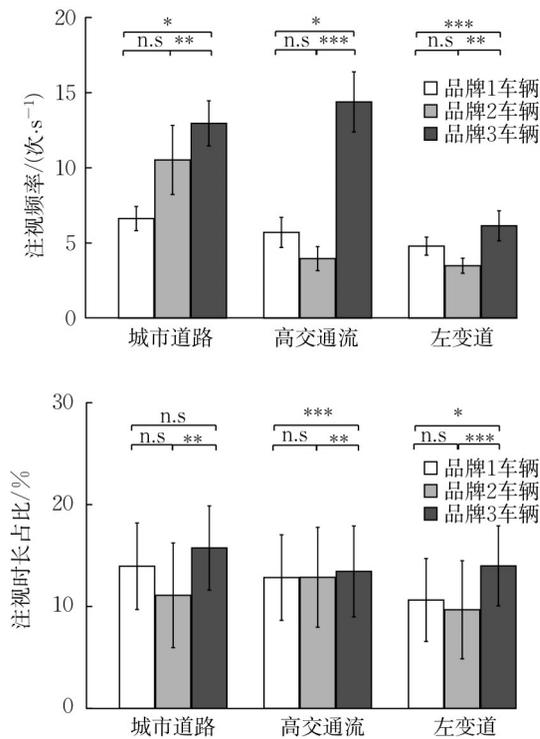


图7 3种品牌车辆注视频率及注视时长占比对比

Fig.7 Comparison of gaze frequency and gaze duration ratio between three models

在高认知负荷情况下,瞳孔直径通常会扩张,以增加光线进入眼睛的量,帮助驾驶员更好地感知和处理信息^[24]。通过监测瞳孔直径变化,可以反映驾驶员在驾驶过程中的认知负荷水平。Prabhakar等^[12]在晴天、阴天和多云等多种光线条件下收集数据,研究驾驶员在驾驶真实汽车时进行次要任务和与自然驾驶情况下驾驶时视觉指标值的差异,证明提出的基于瞳孔的指标在对真实汽车驾驶员的认知状态进行分类时有效。

本文采用Prabhakar等^[12]提出的方法,计算变道时间窗口下的瞳孔直径扩张标准差,并使用高斯加权移动平均滤波器对数据进行平滑处理以去除高频噪声,去除噪声后的数据波动减小,数据更加稳定;采用去除高频噪声后的瞳孔直径扩张标准差反映认知负荷,瞳孔直径扩张标准差的值与认知负荷成正相关^[12]。变道盲区影像出现前后,瞳孔直径扩张标准差变化率平均值为37.26%,在变道盲区影像出现过程中指标产生了明显的波峰(见图8),说明变道盲区影像的出现会在一定程度上增加驾驶员的认知负荷。

为了探究3种品牌车辆变道时驾驶员瞳孔直径扩张标准差是否存在显著性差异,进行Kruskal-Wallis非参数检验。结果表明,3种品牌车辆驾驶员瞳孔直径扩张标准差在左变道($p=0.027$)、高交通

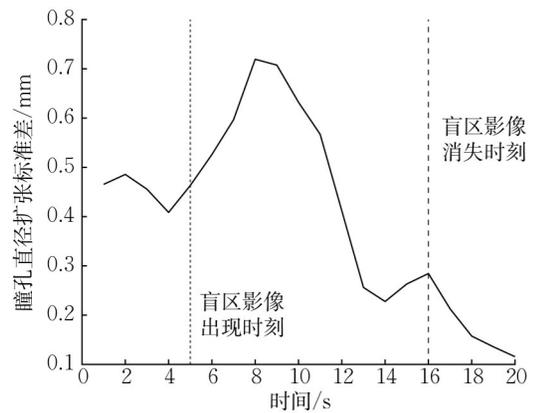


图8 变道盲区影像出现前后瞳孔直径扩张标准差变化

Fig.8 Change of STDP with and without lane-changing blind area display

流($p=0.03$)情况下存在显著性差异。对样本进行两两检验,左变道情况下瞳孔直径扩张标准差的差异主要在品牌1与品牌3($p=0.025$)之间以及品牌1与品牌2($p=0.033$)之间,品牌1驾驶员瞳孔直径扩张标准差大于品牌3和品牌2;高交通流情况下,瞳孔直径扩张标准差的差异主要在品牌1与品牌2($p=0.009$)之间,品牌1驾驶员瞳孔直径扩张标准差大于品牌2。对比3种品牌车辆驾驶员瞳孔直径扩张标准差平均值,品牌1车辆驾驶员在所有情况下的瞳孔直径扩张标准差均较大,表明品牌1车辆驾驶员在变道过程中的认知负荷较大。左变道时,品牌1与品牌3($p=0.025$)之间的瞳孔直径扩张标准差存在显著性差异,品牌3车辆驾驶员瞳孔直径扩张标准差比品牌1小25.86%。

3.4 改进AttenD算法结果

改进AttenD算法计算出的时间缓冲值和瞳孔直径扩张标准差均可以反映认知负荷,但是瞳孔直径扩张标准差只能通过比较大小描述认知负荷的大小关系,无法具体量化认知负荷,而且瞳孔直径扩张标准差无法反映注视点在不同兴趣区之间的分布规律,因此以由改进AttenD算法计算出的时间缓冲值为生理数据瞳孔直径扩张标准差的补充,与瞳孔直径扩张标准差共同反映认知负荷。

根据视线在各个区域的分布绘制时间缓冲值变化热力图,以反映注视不同区域带来的负荷变化。图9展示了3种品牌车辆在一次实验中变道的时间缓冲值变化,图中每一个点代表变道过程中的注视点和其对应的时间缓冲值。时间缓冲值越小认知负荷越大,注视点颜色越深。由图9可知,变道盲区影像附近分布着更多缓冲值较小的点,说明驾驶员在

获取盲区信息时,其认知负荷与正常驾驶时相比有一定增加。

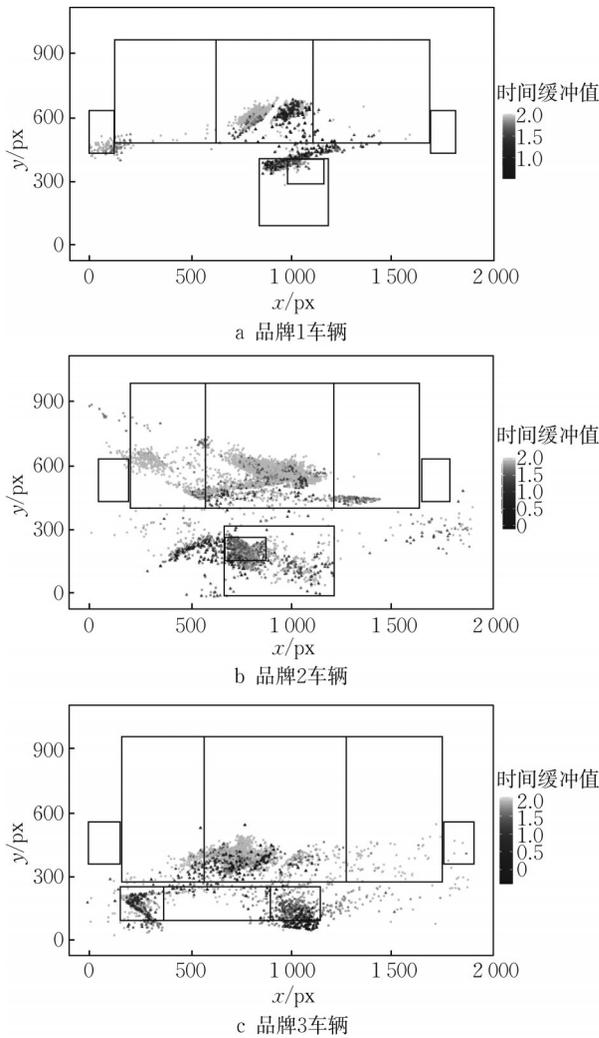


图9 时间缓冲值热力图
Fig.9 Time buffer heat map

计算3种品牌车辆变道过程中的时间缓冲值平均值,对其进行Kruskal-Wallis非参数检验。结果表明:中交通流环境下3种品牌车辆的时间缓冲值存在显著性差异($p=0.014$),且差异主要在品牌1与品牌3($p=0.012$)之间及品牌1与品牌2($p=0.031$)之间;品牌1的时间缓冲值均值为1.19 s,远小于品牌3的1.77 s和品牌2的1.54 s,即品牌1车辆驾驶员在变道时的认知负荷较大。道路类型与车型、变道方向与车型的交互效应分析结果如图10所示。道路类型与车型之间存在交互效应,品牌1车辆在快速路的时间缓冲值有明显的增大,而其他品牌车辆在城市道路和快速路的时间缓冲值相近;变道方向与不同品牌车辆之间存在一定交互效应,3种品牌车辆左变道的时间缓冲值均大于右变道,左变道认

知负荷相对较小,但品牌2左变道较右变道时间缓冲值的增大幅度大于其他品牌。在快速路环境下,3种品牌车辆的时间缓冲值存在显著性差异($p=0.026$),差异主要在品牌3与品牌2($p=0.034$)之间,品牌2的时间缓冲值均值(1.52 s)小于品牌3的时间缓冲值均值(1.83 s),即品牌2车辆驾驶员的认知负荷较大。交通流大小与不同品牌车辆、变道方向与不同品牌车辆的交互效应分析结果表明:交通流与不同品牌车辆之间存在交互效应,不同品牌车辆在不同交通流下对AttenD时间缓冲值的影响不同。品牌1和品牌2在不同交通流下的时间缓冲值相近,而品牌3在高交通流下的时间缓冲值较中低交通流下有大幅降低,在高交通流下的认知负荷较大。经数据分析可以发现,改进AttenD算法得出的3种品牌车辆认知负荷大小的对比与分析瞳孔直径扩张标准差得出的结论基本一致。

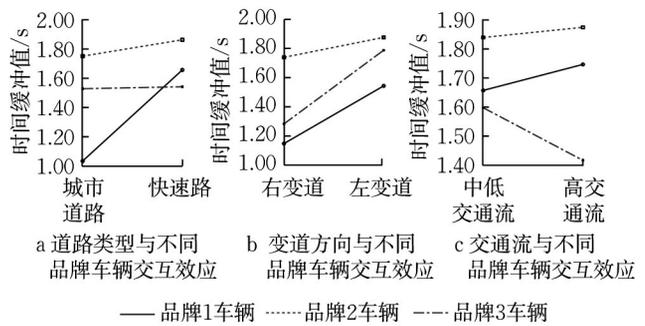


图10 不同变量组合下AttenD时间缓冲值轮廓
Fig.10 Outline of AttenD time buffer value under different variable combinations

4 不同品牌车辆变道盲区影像设计安全性综合分析

综合对比3种品牌车辆在城市道路、快速路、左变道、右变道、高交通流、中交通流6个环境变量下的注视特征、驾驶行为特征以及认知负荷相关指标,分析不同品牌车辆变道盲区影像设计对变道安全性的影响。

品牌1车辆的变道盲区影像设计在中控屏的右上角,距离方向盘中心最远,盲区影像面积及占中控屏面积的比例较品牌2更大;品牌2车辆的变道盲区影像默认位置在中控屏的左上角,盲区影像面积最小,而且中控屏面积较大,盲区影像面积占中控屏面积的比例最小;品牌3车辆左右变道时的变道盲区影像分别在前方长屏的最左侧和最右侧,盲区影像面积最大,占整个中控屏面积的比例较大,左变道时

变道盲区影像距离方向盘中心最近。

在城市道路下,品牌3车辆驾驶员对盲区影像信息的注视频率比其他车型更高(平均比品牌1高62.82%,比品牌2高18.67%)、注视时长占比更高(品牌1为14.27%,品牌2为11.35%,品牌3为16.11%),品牌3驾驶员对盲区信息进行了更充分的观察。同时,品牌3加速度标准差较品牌1小26%,即品牌3车辆驾驶员在注视盲区信息的同时进行了更为稳定的车辆操控。3种品牌车辆在快速路下注视频率和注视时长占比数据差异与城市道路下相比较小,原因可能是:城市道路场景复杂多变,在城市道路变道时有更加充分的时间注视不同区域,而快速路情况相对单一、变道时间较短,视线在各个区域的停留时间均较少。在快速路下,品牌3车辆在AttenD算法下的时间缓冲值平均值更大(品牌1为1.71 s,品牌2为1.52 s,品牌3为1.83 s),品牌3车辆驾驶员变道时认知负荷较品牌2更小;品牌2车辆盲区影像面积小、在整个中控屏中占比小,视觉效果较差;品牌3盲区影像面积及占比均较大,推断增大盲区影像设计面积、提高盲区影像面积占中控屏面积的比例可以有效降低认知负荷,提高行车安全性。在城市道路下,3种品牌车辆时间缓冲值无显著性差异,推测可能是:在城市道路变道时速度较慢,而在快速路上行车速度快,变道决策时间更短,驾驶员在紧迫的时间里扫视盲区、前方和后视镜,更容易导致认知负荷的增加。

在左变道时,品牌3车辆方向盘转角变化率标准差的平均值比品牌2低24.18%;品牌3车辆驾驶员注视时长占比均高于品牌2和品牌1;在负荷相关指标上,品牌3车辆驾驶员平均瞳孔直径扩张标准差(0.43 mm)低于品牌1(0.58 mm)和品牌2(0.62 mm),品牌3车辆在左变道过程中注视盲区更多、驾驶操作更加平顺且驾驶负荷更小,安全性更高。品牌2车辆的负荷指标较品牌3高,方向盘转角变化率标准差较品牌3大,与彭丹丹等^[21]的实验结果一致,即驾驶员心理负担增大时,方向盘转角熵值增大;品牌1和品牌2车辆负荷指标较大、注视频率及注视时长占比较低,与Redenbo等^[17]和Recarte等^[18]的研究结果一致,即认知负荷对视觉搜索有负面影响,减小了扫视范围和前方以外区域的注视频率。在右变道时,3种品牌车辆方向盘转角变化率标准差以及加速度标准差、注视时长占比、认知负荷相关数据无显著性差异。与右变道场景相比,3种品牌车辆的车辆操纵、驾驶员视觉行为以及认知负荷相关指标在左变

道场景下有更明显的差异。3种品牌车辆的变道盲区影像设计差异在右变道时较左变道时小,品牌3左变道盲区影像位于宽屏的最左侧区域,距离驾驶员眼睛距离最短,且更靠近左后视镜与左前方,这有利于驾驶员左变道时在左后视镜、盲区以及左前方之间扫视,便于驾驶员获取盲区信息。

在高交通流下,品牌2车辆的方向盘转角变化率标准差较品牌3高47.22%,较品牌1高66.87%,品牌2在变道过程中的操作平顺性和稳定性更差;3种品牌车辆驾驶员注视时长占比无显著性差异,品牌3注视频率(14.38次·s⁻¹)高于品牌1(5.71次·s⁻¹)与品牌2(3.96次·s⁻¹),品牌3盲区信息得到了更充分的观察;在负荷相关指标上,品牌1车辆驾驶员瞳孔直径扩张标准差均值较品牌3高31.58%、较品牌2高38.89%,品牌1的负荷更大。在中交通流下,3种品牌车辆方向盘转角变化率标准差无显著性差异,驾驶员注视时长占比无显著性差异;在负荷相关指标上,品牌1车辆时间缓冲值(1.19 s)小于品牌3(1.77 s)和品牌2(1.53 s),品牌1车辆驾驶员的认知负荷更大。在中高交通流下,品牌1车辆变道过程中的负荷均高于其他品牌,品牌1车辆与其他品牌车辆变道盲区影像设计的差异主要在于:品牌1车辆变道盲区影像位置距驾驶员最远且面积较小,在交通流较高、完成变道操作需要大量环境信息时,视觉搜索较为困难,导致驾驶员认知负荷增加,存在风险隐患。

综合分析3种品牌车辆相同变量下的注视特征、驾驶行为特征及认知负荷相关指标,并比较盲区影像面积、盲区影像面积占中控屏面积比例及变道盲区影像距方向盘中心距离与认知负荷的关系(见图11~13)。研究显示,盲区影像面积较小且占中控屏面积比例小、距方向盘中心距离远的变道盲区影像设计会使盲区信息不易搜索,减少驾驶员对盲区信息的注视频率,并且增加驾驶员在前方-盲区-后视镜之间的扫视距离,从而增大了驾驶员认知负荷。以变道盲区影像设计参数及环境变量为自变量,进行随机森林回归分析,分析变道盲区影像设计参数对时间缓冲值的影响程度,结果如图14所示。盲区影像面积、盲区影像面积占中控屏面积比例以及盲区影像距方向盘中心距离对时间缓冲值均产生了一定的影响,特征重要性均在0.1左右,盲区影像面积的影响(0.13)略大于盲区影像面积占中控屏面积比例(0.11)以及盲区影像距方向盘中心距离(0.10)。

在车辆中控屏设计允许的情况下,分别设置左

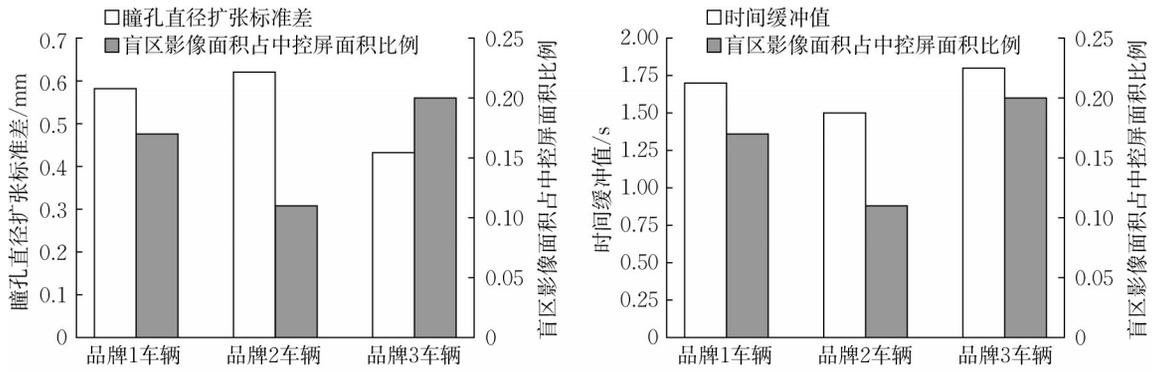


图 11 3 种品牌车辆认知负荷与盲区影像面积占中控屏面积比例比较

Fig.11 Comparison of cognitive load and blind area in center control panel between three models

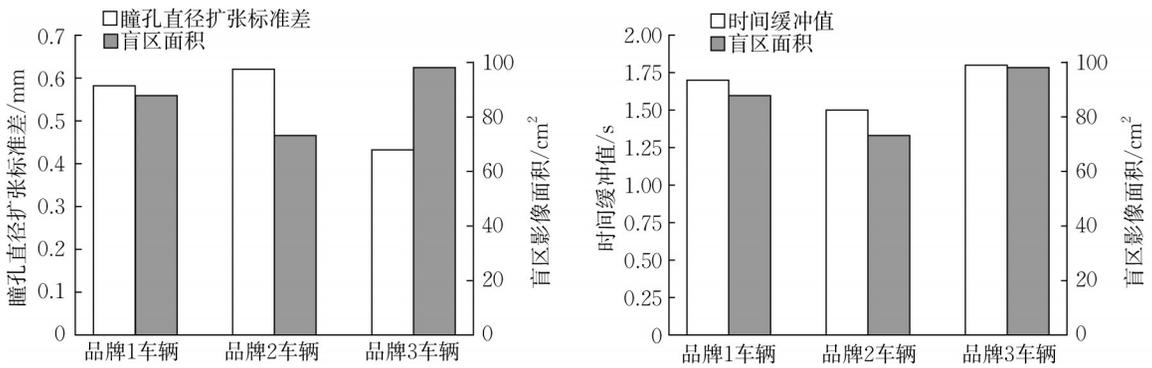


图 12 3 种品牌车辆认知负荷与盲区影像面积比较

Fig.12 Comparison of cognitive load and blind area between three models

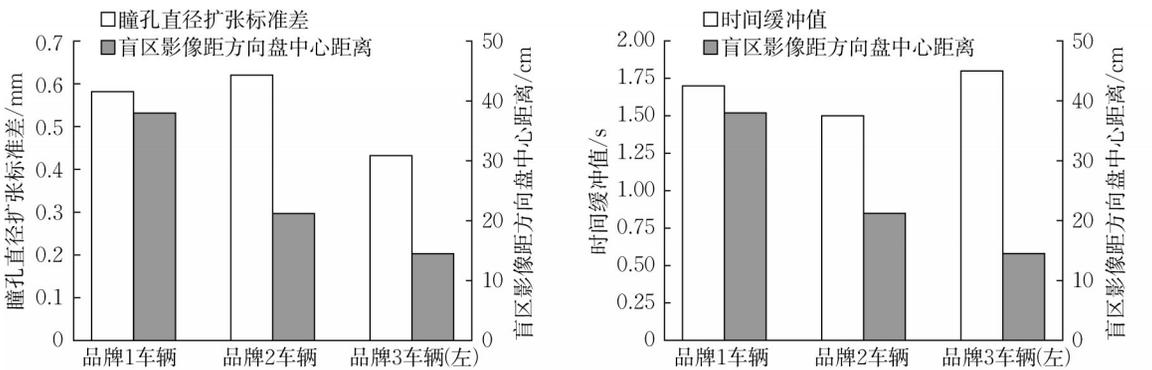


图 13 3 种品牌车辆认知负荷与盲区影像距方向盘中心距离比较

Fig.13 Comparison of cognitive load and distance between blind area and steering wheel center between three models

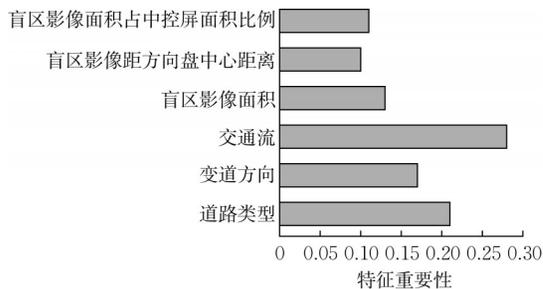


图 14 影响因素特征重要性排序结果

Fig.14 Ranking results of the feature importance of factors

右变道盲区影像位置,将左变道盲区影像设置在左侧靠近后视镜的区域,如品牌3车辆左变道时的变道盲区影像在前方长屏的最左侧,将大幅减小变道盲区影像距方向盘中心距离,减少变道过程中的扫视距离,同时设计较大的盲区影像面积及盲区影像面积占中控屏面积的比例,可有效降低驾驶员认知负荷、提高安全性。在受中控屏位置限制、变道盲区影像在车辆中部中控屏上的情况下,左右变道盲区影像位于同一位置时距离方向盘更近的设计(如品

牌2车辆变道盲区影像位置)、盲区影像面积及占中控屏面积比例较大的设计(如品牌3、品牌1车辆盲区影像面积)能降低驾驶员的认知负荷。

5 结语

鉴于智能汽车变道盲区影像功能对驾驶员认知负荷的影响,结合实车实验对比了驾驶行为、驾驶员注视模式及认知负荷相关指标在不同变道盲区影像设计下的差异。采用AttenD算法,并结合左右变道情况对算法中FRD进行动态改进,计算了变道过程中的时间缓冲值以反映认知负荷,补充瞳孔直径扩张标准差无法具体量化认知负荷的不足,并将认知负荷与注视分布特征相联系。结果表明,增大盲区影像面积、提高盲区影像面积占中控屏面积的比例、减少扫视路径冗余能使驾驶员更加容易地观察到盲区影像并从中获取有效信息,以降低变道过程中的认知负荷。3项设计参数对时间缓冲值影响的特征重要性均在0.1左右,盲区影像面积的影响略大于盲区影像面积占中控屏面积比例及盲区影像距方向盘中心距离。本项目的研究成果有助于车企优化智能汽车变道盲区影像设计,增加驾驶安全性,并建立相关设计标准。同时,本文认知负荷计算方法可应用于更多人机交互场景,帮助车企测评人机交互安全性和开发实时驾驶员注意力监测系统。

作者贡献声明:

岳李圣飒:研究构思,论文修改,学术指导,项目支持。
潘昱蓉:实验参与,数据分析,论文撰写。
孙 剑:论文修改,学术指导,项目支持。
朱奕昕:研究构思,实验参与。
崔晓烨:实验参与,数据处理。
李奕劼:实验参与,数据处理。

参考文献:

- [1] SHAWKY M. Factors affecting lane change crashes [J]. IATSS Research, 2020, 44(2): 155.
- [2] PICCINI G F, SIMÕES A, RODRIGUES C M. Focusing on drivers' opinions and road safety impact of Blind Spot Information System (BLIS) [M]. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [3] CHUN J, LEE I, PARK G, *et al.* Efficacy of haptic blind spot warnings applied through a steering wheel or a seatbelt [J]. Transportation Research, Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2013, 21: 231.
- [4] 彭建德. 视野盲区对汽车驾驶员安全驾驶的影响[J]. 内燃机与配件, 2020(4): 252.
- [5] PENG Jiande. Influence of visual blind area on safe driving of automobile drivers [J]. Internal Combustion Engine and Accessories, 2020(4): 252.
- [6] BULUMULLE G, BÖLÖNI L. A study of the automobile blind-spots' spatial dimensions and angle of orientation on side-sweep accidents[C]//2016 Symposium on Theory of Modeling and Simulation (TMS-DEVS). Piscataway: IEEE, 2016: 1-6.
- [7] SHARADQEH A A, ALHEYASAT O, ABU-EIN A A-K. Computer simulation to detect the blind spots in automobiles [J]. Journal of Computer Science Issues, 2013, 10(1): 453.
- [8] CICCHINO J B. Effects of blind spot monitoring systems on police-reported lane-change crashes [J]. Traffic Injury Prevention, 2018, 19(6): 615.
- [9] POWER J D. 2023年智能座舱十大前瞻趋势[J]. 汽车与配件, 2023(24): 26.
- [10] POWER J D. Ten future trends of smart cockpit in 2023 [J]. Automotive and Parts, 2023(24): 26.
- [11] Model Y车友圈. 特斯拉的转向影像位置能不能换个地方? [EB/OL]. [2024-03-18]. <https://www.dongchedi.com/ugc/article/1730629077936136? cityName=%E6%88%90%E9%83%BD>.
- [12] Model Y car friends circle. Can the steering image of the Tesla be repositioned? [EB/OL]. [2024-03-18]. <https://www.dongchedi.com/ugc/article/1730629077936136? cityName=%E6%88%90%E9%83%BD>.
- [13] PALINKO O, KUN A L, SHYROKOV A, *et al.* Estimating cognitive load using remote eye tracking in a driving simulator [C]//Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-tracking Research & Applications. New York: Association for Computing Machinery, 2010: 141-144.
- [14] GAO X, YAN H, SUN H J. Modulation of microsaccade rate by task difficulty revealed through between- and within-trial comparisons[J]. Journal of Vision, 2015, 15(3): 3.
- [15] PRABHAKAR G, MUKHOPADHYAY A, MURTHY L, *et al.* Cognitive load estimation using ocular parameters in automotive[J]. Transportation Engineering, 2020, 2: 100008.
- [16] KIRCHER K, AHLSTRÖM C. The driver distraction detection algorithm AttenD [M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [17] SEPPELT B, SEAMAN S, ANGELL L, *et al.* Differentiating cognitive load using a modified version of AttenD [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. New York: Association for Computing Machinery, 2017: 114-122.
- [18] XU J, QIAN C, HAN S, *et al.* Detecting critical mismatched driver visual attention during lane change: an embedding kernel algorithm [J/OL]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024 [2023-12-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10400979>.