

# 车辆行驶行为的负性刺激对乘员预期的影响

蒙昊蓝<sup>1</sup>, 陈君毅<sup>1</sup>, 王 斌<sup>2</sup>, 余卓平<sup>1,3</sup>

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 上海汽车集团股份有限公司 技术中心, 上海 201804;

3. 上海智能新能源汽车科创功能平台有限公司, 上海 201804)

**摘要:** 以车辆极限行驶工况为负性刺激, 通过评价量表和现场访谈获取了 12 名受试者作为前排乘员在实车试验中的主观感受, 并运用生理多导仪记录了皮肤电活动数据; 通过对比经历刺激前后的数据并结合假设检验, 分析了主观评价的变化。结果表明: 在经历极限行驶工况刺激后, 乘员对车辆控制能力的预期有显著提高, 但对车辆决策意图不确定性的担忧加剧; 将皮肤电导水平数据与试验过程中的事件信息相结合, 能够反映乘员预期的变化。

**关键词:** 汽车工程; 自动驾驶汽车; 乘员预期; 主观评价; 负性刺激; 舒适性

**中图分类号:** U469. 79

**文献标志码:** A

## Effect of Negative Stimulus Caused by Vehicle Maneuver on Passenger's Expectation

MENG Haolan<sup>1</sup>, CHEN Junyi<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>2</sup>, YU Zhuoping<sup>1,3</sup>

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Technology Center, SAIC Motor Co., Ltd., Shanghai 201804, China; 3. Shanghai AI NEV Innovative Platform Co., Ltd., Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Taking the extreme driving conditions as negative stimulus, the subjective feelings of 12 subjects as front-seat passenger were obtained in the process of real-vehicle testing by means of evaluation scale and interview, and the skin electrical activity data were recorded by the physical polygraph. On this basis, the change of the passengers' subjective evaluation was studied by comparing the data before and after experiencing the unintended vehicle maneuver and using the hypothesis testing method. The results show that the negative stimulus improves the passengers' expectation of vehicle control ability, but increases their anxiety about the uncertainty of vehicle decision-making

intention. In addition, the combination of the data of skin conductance level and the data of the event during the test can reflect the change of passenger's expectation.

**Key words:** automotive engineering; autonomous car; passenger's expectation; subjective evaluation; negative stimulus; riding comfort

自动驾驶技术在世界范围内已得到广泛的推广。随着研究的深入, 研究重点将逐渐由可靠性、安全性<sup>[1]</sup>等技术可行性问题向乘员的乘坐感受问题转变<sup>[2]</sup>。乘员的乘坐感受需要结合工程学、物理学、心理学及生理学等多方面学科知识进行主观评价<sup>[3]</sup>, 在传统汽车上主要受温度、噪声、振动等因素的影响, 已形成成熟的 NVH(noise, vibration, harshness)、热舒适等舒适性评价理论和方法。然而, 传统汽车完全由人类驾驶员控制, 现有研究并未对车辆行驶行为引起的乘员舒适性问题给予重视。

由于自动驾驶汽车具备自主行驶能力, 并且有条件具备相较人类驾驶员更出色的运动控制和车间协同能力, 因此自动驾驶汽车行驶行为有别于乘员基于传统汽车驾乘的经验。例如, 异于人类驾驶习惯的轨迹规划和运动控制所带来的较小的障碍物间距和频繁的加速度变化<sup>[4]</sup>会使乘员不适甚至紧张, 进而引起恐惧等消极情绪, 给乘坐感受带来负面影响。此类舒适性评价研究主要采用主观评价<sup>[5]</sup>, 可运用主观评测法中的主观量表进行记录, 评价结果与外部感觉信息相关, 同时受到内部预期<sup>[6]</sup>的影响。预期指根据已有经验和当下环境等信息来源预测未来要发生的事情<sup>[7]</sup>。在神经心理学中, 预期使相应的大脑结构提前做好准备<sup>[8]</sup>。对事件的预期过高或者过低, 都会导致个体强烈的情绪反应<sup>[9]</sup>, 进而影响

收稿日期: 2021-06-16

基金项目: 上海汽车工业科技发展基金(2114); 国家重点研发计划(2021YFB2501205)

第一作者: 蒙昊蓝(1993—), 男, 博士生, 主要研究方向为智能驾驶测试评价技术。E-mail: hmeng@tongji.edu.cn

通信作者: 陈君毅(1980—), 女, 讲师, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能驾驶测试评价技术。

E-mail: chenjunyi@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

个体的评价结果<sup>[10]</sup>。研究认为,人对事件的感受取决于预期和事件结果的关系。决策影响理论认为,人的感受来自于结果与预期的比较,当预期与结果一致时负性事件的负性体验被削弱<sup>[11]</sup>;一致性理论则认为,个体体验只受到结果是否能被预料的影响,与结果的好坏无关<sup>[12]</sup>。关于对事件做出怎样的预期会有益于情绪感受和行为反应,Shepperd等<sup>[13]</sup>认为负性预期是有益的,可产生积极的影响并削弱消极的影响,但Golub等<sup>[14]</sup>发现负性预期并不能减低事后个体的负向情绪反应,并且会增强预期阶段的不舒适感。因此,乘员预期是指乘员基于驾乘经验和车辆行驶行为、外界环境对未来事件的预测。在评价车辆行驶行为时,为保证评价结果的组间可比性,需要控制乘员预期,并对控制效果进行定量评估。

鉴于生理活动是精神活动的基础<sup>[15]</sup>,引入生理指标作为预期的辅助度量,可避免预期难以通过主观评价表述的问题<sup>[16]</sup>。学者们运用人体生理信号开展了汽车驾驶员人因研究<sup>[17]</sup>,在自动驾驶领域也取得了较好的效果<sup>[18]</sup>。在众多生理指标中,皮肤电导水平(skin conductivity level, SCL)可反映人的警觉程度、精神压力等信息<sup>[19]</sup>,当乘员处于不舒适状态时, SCL的增加与警觉性的升高成正比,并且SCL采样周期、变化显著性和变化时效均满足本研究的要求<sup>[20]</sup>。

综上,现阶段缺少对于由车辆行驶行为引起的乘员舒适性的关注,缺乏乘员预期对评价结果影响的研究。因此,将以视觉信息为主的车辆极限行驶工况作为负性刺激,基于自然驾驶数据和危险工况数据设计试验工况,结合主观量表、SCL数据和现场访谈信息,分析受试乘员受到负性刺激前后的主观评价变化,研究预期对评价结果的影响和预期的表征方法,为自动驾驶汽车舒适性评价研究积累经验。

## 1 试验设计

### 1.1 场景设计与试验流程

在设计实车试验场景时,需考虑刺激的有效性和可操作性。在车辆极限行驶工况下,通过视觉信息使受试者获得负性刺激,然后对比刺激前后的主观感受变化。选择实车试验,主要是为了避免驾驶模拟器中存在的试验干扰<sup>[21-22]</sup>。同时,为了保证试验安全性,由专业试车员根据预设工况在封闭测试区内完成试验。

平衡觉刺激易诱发晕动症导致的头晕、恶心等

症状群,使得受试者无法准确体验试验过程和描述主观感受,因此应尽量避免平衡觉刺激产生。由自然驾驶数据和危险工况数据可知,行驶过程中驾乘人员负性情绪对相对距离、相对速度敏感。参考真实交通流中前车或障碍物突然出现时的紧急工况,以及激进型驾驶员通过在纵向上刻意逼近前车以获取临车道的侧向变道空间的驾驶习惯,在行驶过程中产生较强负性情绪的有效途径之一是将视觉刺激最大化,即尽可能逼近障碍物使碰撞时间( $t_{TTC}$ )尽量小。减小 $t_{TTC}$ 的方式是减小相对距离,或是增加相对速度。由于试验场地已限制了最大车速,因此相对速度一定时,在现有试验条件下实现相对距离减小的方式有2种:一是设置车辆稳定操纵前提下的变道距离参考点,至参考点变道避障;二是设置较大减速速度时的制动距离参考点,至参考点后减速停车避障。

由计算可知,制动方案下前庭产生3 s左右的加速度刺激,该加速度持续为峰值,车辆在制动参考点时的最小 $t_{TTC}$ 约为1.5 s。变道方案下前庭产生1 s左右的横摆角速度刺激,存在2次瞬时峰值,车辆在变道参考点时的最小 $t_{TTC}$ 约为0.5 s。因此,变道方案下平衡觉刺激更小、更短,视觉冲击更强烈。

经预试验实践,制动方案下受试者易产生生理不适感,进而影响过程体验和受访质量;视觉刺激明显小于生理刺激,受试者的试后评价多以生理不适的感受为主;受试者反馈眩晕感并影响后续试验实施。变道方案下前庭觉峰值刺激瞬时,刺激持续时间短;最小 $t_{TTC}$ 小,视觉冲击大,试验后评价以视觉刺激诱发的紧张情绪为主;无受试者反映眩晕情况,对后续试验实施无影响。据此,前者适用于关于行驶行为诱发晕动症的研究,后者更适用于对由行驶策略诱发消极情绪的研究。因此,基于变道方案设计试验场景。

如图1所示,试验在封闭测试区的一条笔直的双向四车道上进行。图1中, $O$ 点为试验段起始位置, $C$ 点为障碍物位置, $A$ 点为远离障碍物的变道位置, $B$ 点为靠近障碍物的变道位置,2个位置均通过预试验确定。 $B$ 点的选取遵循以下原则:在试验车辆性能足以稳定实施安全变道的前提下,在变道距离小于日常驾乘习惯的区间内,尽可能缩短 $t_{TTC}$ ,使视觉刺激尽可能大。乘员认知到一定的碰撞风险继而产生心理不适感,从而形成负性刺激。试验最终确定的 $BC$ 段距离为8 m,接近安全变道距离的极小值; $AC$ 段距离为50 m,该距离下的变道策略保守,

与BC段相比可形成较明显反差。试验时,车辆提前加速至 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 后保持匀速行驶,在O点从最右侧

车道驶入试验段,途中向左变换车道,经C驶离试验段后减速停车。

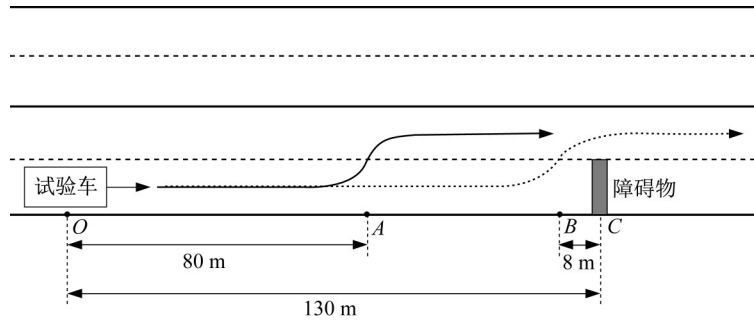


图1 试验场景示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test scenario

如图2所示,共设计了2种行驶轨迹的场景,图2中车辆经过O点时记为0s时刻。场景1与场景2的差异在于变道时车辆与障碍物之间的距离不同、变道时车辆横摆角速度不同。在真实性和安全性的前提下,对于场景2选取比较激进的工况,同时满足负性刺激的有效性和试验实施过程最小干扰性的需求,以明显偏离受试者驾乘经验的非预期行为对受试者施加有效的负性刺激。2种场景设置如表1所示。

表1 试验场景设置

Tab. 1 Test scenario setting

项目	场景1	场景2
试验段	OC段	OC段
试验段车速/ $(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	60	60
向左侧变道起始点	A点	B点
变道过程耗时/s	2.45	1.29
变道时车辆横摆角速度/ $(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	$\pm 0.15$	$\pm 0.55$
变道起始点与障碍物距离/m	50	8

由于是对比受试者受到刺激前后的主观感受变化,因此工况命名借鉴了对照试验中对照组和试验组的概念,将用于对照分析数据采集的第1、3次试

验分别命名为对照工况和测试工况,将给予受试者负性刺激的第2次试验命名为干扰工况。各工况设置如表2所示。

表2 试验工况设置

Tab. 2 Test condition setting

项目	对照工况	干扰工况	测试工况
试验序号	1	2	3
试验次数	1次	1次	1次
试验场景	场景1	场景2	场景1
与对照工况的对比作用		验证刺激的有效性	分析刺激前后的主观评价变化

在试验过程中受试者乘坐在试验车辆的副驾驶位,并佩戴生理多导仪。每次试验后,由乘坐于试验车辆后排的记录员通过评价量表和访谈记录受试者在当次试验中的主观感受。

## 1.2 试验设备

为了采集受试者生理指标,选用了BioRadio (BR)生理多导仪采集皮肤电信号,皮肤导电水平数据通过粘贴于手掌内侧的电极片测量。此外,使用Intelligent Test Terminal (iTt)高精度定位测试仪同步记录车辆运动状态、位姿数据和车内视频数据。

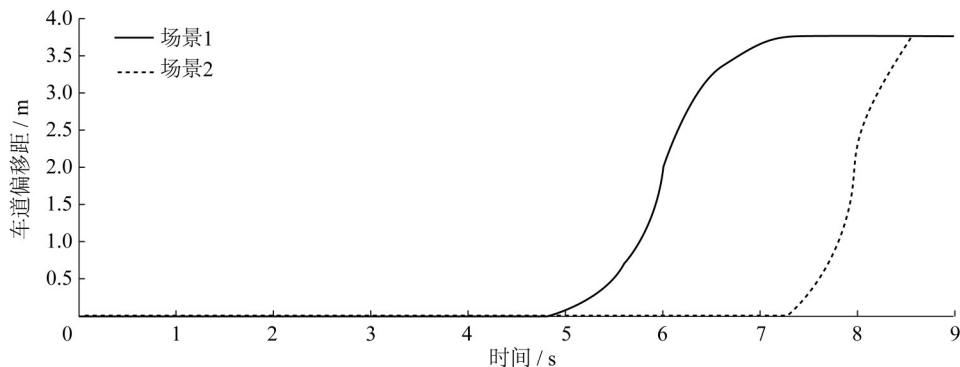


图2 车辆行驶轨迹

Fig. 2 Trajectories of vehicle



试验过程中各设备独立采集和记录数据,试验结果分析时通过协调世界时(coordinated universal time, UTC)进行不同设备间的数据同步。

### 1.3 受试者情况

共招募了12名受试者,年龄分布在21岁至28岁之间。所有受试者均持有有效的机动车驾驶证,近半年内至少有每周1~3次及以上频率的乘车出行经历。为避免数据采集误差,受试者均未有在体格检查时因佩戴生理监测设备造成生理指标异常的记录。试验前仅对受试者进行了必要的安全告知,以避免对试验完全未知或获知过量信息而干扰试验结果。

## 2 试验结果

### 2.1 假设检验

由于样本含量较小,因此采用 $t$ 检验中的配对检验来验证指标变化的统计学意义。通过 $t$ 分布理论来推论差异发生的概率,从而比较2个平均数的差异是否显著,计算式如下所示:

$$t = \frac{\bar{d} - \mu_0}{s_d / \sqrt{n}} \quad (1)$$

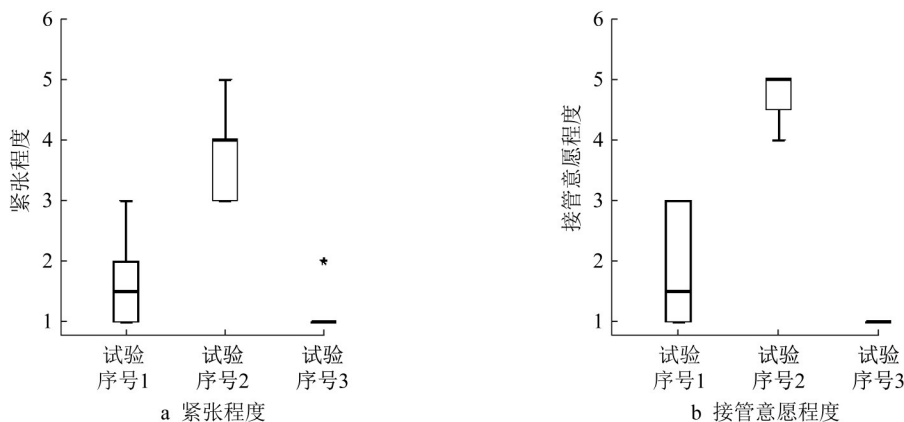


图3 主观量表统计结果

Fig. 3 Statistical results of subjective scale

根据 $t$ 检验,对于紧张程度,试验序号2( $3.83 \pm 0.72$ )较试验序号1( $1.67 \pm 0.78$ )表现为显著上升( $t=8.990, P=0.000$ );对于接管意愿程度,试验序号2( $4.75 \pm 0.45$ )较试验序号1( $1.92 \pm 1.00$ )也表现为显著上升( $t=10.470, P=0.000$ )。由此判断,试验序号2的极限行驶工况对受试者的刺激是有效的。

为了体现受试者的主观感受在经受刺激前后的

式中: $\bar{d}$ 为配对样本差值 $d_i$ 的平均数, $\bar{d} = (\sum_{i=1}^n d_i) / n, i=1, \dots, n$ ;  $s_d$ 为配对样本差值 $d_i$ 的标准差, $s_d = (\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2) / (n-1)$ ;  $\mu_0$ 为配对样本差值 $d_i$ 的期望值; $n$ 为配对样本数。

### 2.2 主观感受量表

借鉴李克特量表对主观感受量表进行设计,记录了试验车辆逼近障碍物过程中受试者感受到的紧张程度以及假设车辆处于自动驾驶状态时受试者对该行驶行为的接管意愿程度。各以1~5等级进行主观判断,两极分别代表完全不存在该项感受、非常具有该项感受,分数说明受试者的态度或状态强弱。通过访谈获取了受试者在试验开始时的心理状态。

图3是主观量表统计结果。在试验序号1中,大部分受试者处于较舒适状态,而且在车辆行驶过程中几乎不存在接管意愿;在试验序号2中,大部分受试者处于不舒适状态,而且对车辆的极限行驶行为表现出极强的接管意愿;在试验序号3中,除1位受试者报告了轻微紧张外其余受试者对各项舒适性主观感受都给予了最低分值,表示完全不存在该项感受,而且所有受试者认为车辆行为不需要被接管。该结果表明受试者的接管意愿与紧张程度有一定相关性。

变化情况,将全部受试者的试验序号3与试验序号1的主观量表结果进行对比。如图4所示,对于紧张程度,试验序号3( $1.08 \pm 0.29$ )较试验序号1( $1.67 \pm 0.78$ )明显下降( $t=-2.548, P=0.027$ );对于接管意愿程度,试验序号3( $1.00 \pm 0.00$ )较试验序号1( $1.92 \pm 1.00$ )也明显下降( $t=-3.188, P=0.009$ )。由此推断,在经历试验序号2的极限行驶工况后,受试者对车辆应付复杂环境的预期发生了

积极变化。

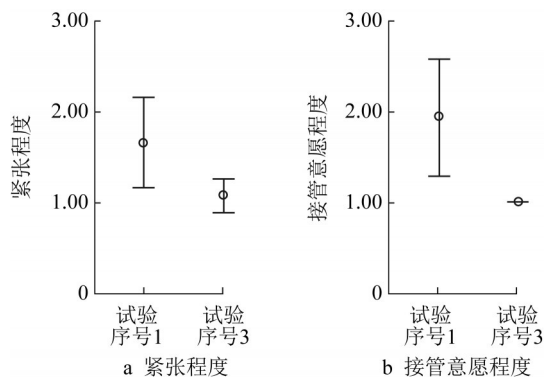


图4 主观量表结果的95%置信区间

Fig. 4 95% confidence intervals for subjective scale

通过访谈获悉,在试验序号1中部分受试者因不确定试验内容,并且车辆未在符合其日常驾驶习惯的距离避让障碍物,担心试验车会与障碍物发生碰撞,因而存在一定的紧张情绪和接管意愿;试验序号3中有受试者认为当次试验会在试验序号2的基础上发生更激烈的行驶行为,因此未处于完全不紧张状态。

表3为全部受试者在试验开始前心理状态的询问记录统计结果。在试验序号1开始时,部分受试者猜测试验内容包含碰撞行为,因此存在紧张情绪;在试验序号2开始时,绝大部分受试者处于放松状态;在试验序号3开始时,所有受试者在经历试验序号2中的刺激后出现了较强的戒备心理,处于紧张状态。由此推断,在经历试验序号2的极限行驶工况后,受试者对试验过程的预期发生了消极的变化。

表3 试验开始前调查问卷统计结果

Tab. 3 Statistical results of questionnaire before test

存在紧张情绪受试者人数百分比/%		
试验序号1	试验序号2	试验序号3
25.0	8.3	100.0

### 2.3 生理数据结果

为了更好地掌握受试者在试验过程中心理感受的连续变化,根据研究团队关于实车环境下乘员不舒适感客观表征方法的已有研究结果<sup>[20]</sup>,选用了SCL来反映受试者的精神压力和警觉程度。由BR生理多导仪采集的皮肤电反射值得到了SCL数据。为了分析受试者的SCL变化与车辆行驶行为的关系,绘制SCL-距离关系图进行定性观察。

以12号受试者在3次试验过程中的原始SCL

数据为例。如图5所示, $x$ 轴为车辆与试验起始位置 $O$ 的距离,试验序号1、3的变道位置 $A$ 点和障碍物位置 $C$ 点分别位于80 m和130 m处。在试验车辆启动后逼近障碍物的过程中,受试者的SCL明显上升,并出现峰值,这一现象在所有受试者的数据中均存在。为此,对全部受试者的数据进行统计分析。

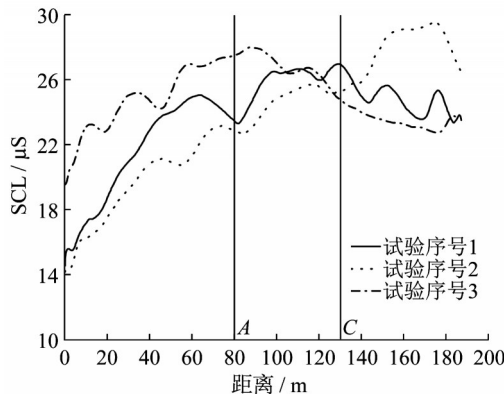


图5 SCL-距离曲线

Fig. 5 SCL-distance curve

根据全部受试者的统计数据,试验序号2的峰值( $28.06 \pm 9.19$ )  $\mu S$ 较试验序号1的峰值( $20.84 \pm 9.04$ )  $\mu S$ 表现为明显上升( $t=3.386, P=0.007$ ),证实了试验序号2的极限行驶工况对受试者刺激的有效性。

每位受试者在试验序号1、3中的SCL变化均存在差异,表明受试者在经历试验序号2的极限行驶工况后心理状态发生改变。因此,对全部受试者提取2次试验中的SCL进行对比。

#### (1)变化程度

SCL变化程度为试验中峰值和试验前平静值之差与平静值的比值,体现了受试者在整个试验过程中的精神压力变化。如图6所示,在试验序号1、3中全部受试者的SCL变化程度分别为 $1.45 \pm 0.60$ 和 $1.79 \pm 0.98$ ,变化不明显,经 $t$ 检验尚不能认为受试者在试验序号2的经历对该指标存在影响( $t=1.368, P=0.201$ )。结果表明,从生理反应的角度看,受试者在试验全过程中承受的最大精神压力基本相同,未因经历试验序号2的极限行驶工况而发生明显变化。

该结果与主观量表统计结果存在差异,因此可认为SCL变化表现了受试者对风险的知觉性判断,而紧张程度主观评价体现了受试者对风险的认知性判断。

#### (2)峰值位置

SCL峰值位置是指试验过程中受试者SCL达

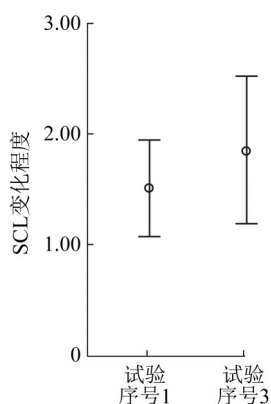


图6 SCL变化程度的95%置信区间

Fig. 6 95% confidence interval of SCL variation

到峰值时对应的车辆位置与试验起始位置之间的距离。如图7所示,在试验序号1、3中全部受试者的SCL峰值位置分别为 $(136.26 \pm 44.70)$  m和 $(86.87 \pm 50.05)$  m,距离明显提前( $t = -2.876, P = 0.018$ )。该现象与受试者在主观感受表述中当试验序号3开始时处于戒备心理的描述一致,印证了在经历试验序号2的极限行驶工况后,受试者对试验过程的预期发生了消极的变化。

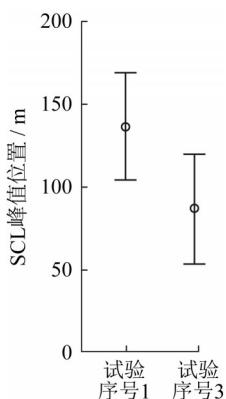


图7 SCL峰值位置的95%置信区间

Fig. 7 95% confidence interval for SCL peak position

### 3 分析与讨论

#### 3.1 负性刺激对乘员预期的影响

根据试验结果,试验序号2中的车辆极限行驶行为对受试者的主观感受产生了积极影响。虽然在受到短期刺激惊吓后,SCL峰值表现出受试者在感觉层面仍对车辆行驶行为可能诱发的潜在危险持保留态度,这是由于人的条件反射在短时间内难以被改变<sup>[23]</sup>。然而,从主观量表可知,受试者在知觉层面

已对车辆应付复杂环境的预期有了积极的变化,即当车辆行为具有确定性时受试者对车辆应付突发情况的信任度有所提高,即使在车辆未按其日常驾驶习惯避障的情况下也愿意将控制权交给车辆,进而影响了受试者对紧张与否的主观评价。这也说明,通过做最坏的打算,可以在事件发生时削弱负性情绪并增强正性情绪<sup>[24]</sup>。因此,通过合理的工况设计进行车辆行驶能力的展示,可改变用户在传统汽车驾乘经历中积累的经验,并接受自动驾驶汽车可能存在的独特行驶行为,是在面向接受度的自动驾驶技术推广中值得采用的方法。

另一方面,受试者对试验过程的预期发生了消极变化,即在相同环境下当车辆行为存在不确定性时处于较高的精神压力状态,是类似于靴子落地<sup>[25]</sup>的现象。这是因为试验中车辆有意迫近障碍物,使受试者认为试验车辆的避障决策具有高度不确定性,因此在无法明确判断车辆意图的情况下,受试者处于由戒备引起的紧张情绪中。这印证了当个体被暗示没有能力预测时,会产生消极体验<sup>[26]</sup>。若日常乘车时车辆行为多次偏离用户预期,则对用户满意度造成负面影响,甚至影响其接受度。这种现象与通过稳定的车辆行为提高受试者对自动驾驶汽车的接受程度<sup>[27]</sup>形成对立,在自动驾驶汽车的开发过程中应避免,在开展舒适性主观评价时也要控制这种消极变化对评价结果的影响。

#### 3.2 乘员预期的生理表征

本研究中选用的SCL能较好地反映受试者的精神压力,其变化程度体现了受试者在整个试验过程中的精神压力变化,但试验序号1、3中该指标并无明显差异,而且该指标本身缺少与试验中事件的关联。若将SCL与试验过程相结合,则具备对乘员预期进行表征的能力。

由于人体神经系统存在延迟和不期效应,生理指标的变化存在一定的滞后,由外界刺激引起的生理反应明显滞后于源于自身的情绪变化<sup>[28]</sup>。例如,在试验序号2中,全部受试者SCL的峰值时刻与车辆完成紧急变道时刻之间长达 $(3.95 \pm 1.45)$  s。由于预期引起的精神压力变化是内在发生的,结合试验过程中与障碍物的相对位置关系,可以辨别当前精神压力的产生原因。如图8所示,在试验序号1中全部受试者的SCL峰值出现时车辆位于距试验起始位置O点 $(136.26 \pm 44.70)$  m处,排除个体差异,该位置位于障碍物附近,与当受试者完全确认不再与障碍物有碰撞风险后逐渐放松的信息一致;在



试验序号2中,SCL峰值出现时车辆位于距起始位置 $O$ 点( $186.50 \pm 2.28$ ) m处,体现了人体由外界刺激引起的生理变化的延迟;在试验序号3中,SCL峰值位置为( $86.87 \pm 50.05$ ) m,排除个体差异,该位置

位于车辆变道点附近。这与大部分受试者在试验序号1中于障碍物附近判断无碰撞风险后逐渐放松,以及在试验序号3的试验初期处于戒备状态直至车辆由转向行为表现出变道意图的访谈记录吻合。

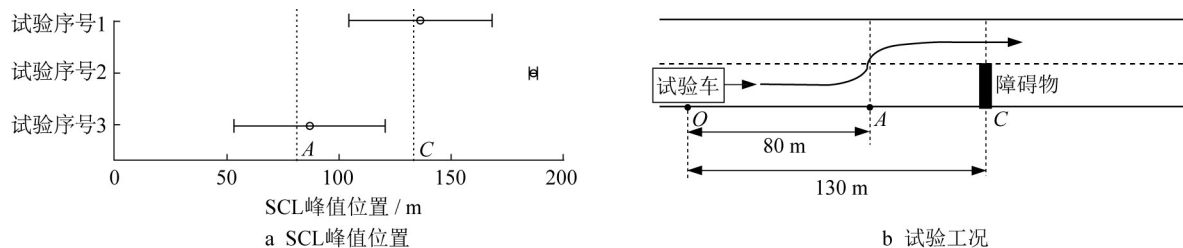


图8 SCL峰值位置

Fig. 8 SCL peak position

试验序号1、3中SCL峰值位置范围大,而试验序号2中SCL峰值位置非常集中。这说明,与极限行驶工况下对刺激事件的风险认知结果高度一致相比,常规行驶过程中受试者对风险的认知存在一定程度的个体差异,并在不同时刻(位置)判断风险极值或风险解除。这与个人的风险接受度、驾乘经历等内在因素有关。试验序号1、3的SCL峰值范围接近,说明了该范围在同一组受试群体中是相对固定的,即存在一个可被统计的共性区间。另外,试验序号2中极限变道后车辆快速回正,存在较大的横摆角速度和侧向加速度直至170 m处,这一过程应视为极限行驶工况的一部分。

此外,对同一个体而言,SCL的数值在短期内相对稳定,可通过绝对值对比精神压力程度。通过SCL数据采集,并将SCL数据与试验过程中的事件信息相结合,才能够反映预期的变化。

## 4 结语

(1)在经历过车辆极限行驶工况后,受试者对车辆控制能力的预期获得了提高,进而接受车辆行为,突破其自身驾驶习惯的约束,该预期对紧张与否的主观评价产生了积极影响。进一步分析发现,负性刺激对受试者由知觉引起的主观感受产生了影响,未对由感觉引起的条件反射产生影响。

(2)车辆极限行驶工况也对受试者的预期产生了消极影响,表现为在获知车辆决策存在高度不确定性后,无法明确判断车辆意图的情况下,处于由戒备引起的紧张情绪所带来的较高精神压力之下。

(3)通过将受试者的SCL数据与试验过程中车辆行为和环境信息相结合,能够辨别由负性刺激诱

发的高度精神压力事件,并反映乘员预期变化。

(4)对于受试者的紧张程度主观评价结果显著下降时SCL变化程度无明显变化的现象,可认为SCL表现了受试者对风险的知觉性判断结果,而紧张程度主观评价体现了受试者对风险的认知性判断结果。

(5)常规行驶过程中,不同受试者SCL峰值位置范围大但存在一个基本一致的区间,因此可认为受试者的风险认知存在个体差异,与个人的风险接受度、驾乘经历等内在因素有关,并且存在一个可被统计的共性区间。

此外,外界刺激对乘员预期的短期和长期影响差异、基于生理指标的乘员预期量化评价方法、风险认知舒适性外界因素的量化关系、影响受试者风险认知的个人内在因素等,是未来应该考虑的问题,有待进一步研究。

## 作者贡献声明:

蒙昊蓝:研究命题的提出及设计,样本数据分析,论文撰写及修订。

陈君毅:试验设计,样本数据采集,论文修订。

王 斌:试验数据采集。

余卓平:最终版本的修订。

## 参考文献:

- [1] 蒙昊蓝,陈君毅,左任婧,等. 智能汽车自主泊车系统测试方法[J]. 中国公路学报, 2019,32(6):158.  
MENG Haolan, CHEN Junyi, ZUO Renjing, *et al.* Study on test method of automated valet parking system for intelligent vehicle [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019,32(6):158.
- [2] BELLEM H, THIEL B, SCHRAUF M, *et al.* Comfort in

- automated driving: an analysis of preferences for different automated driving styles and their dependence on personality traits [J]. *Transportation Research, Part F: Traffic Psychology & Behaviour*, 2018, 55: 90.
- [3] 王宏雁, 陈君毅. 汽车车身设计基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2009.
- WANG Hongyan, CHEN Junyi. Design foundation of automotive body[M]. Beijing: Peking University Press, 2009.
- [4] HOBERT L, FESTAG A, LLATSER I, *et al.* Enhancements of V2X communication in support of cooperative autonomous driving [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(12): 64.
- [5] SARAWUT L, ALBERT A, SASCHA O. Subjective evaluation and modeling of human ride comfort of electric vehicle using tools based on artificial neural networks [C]// *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*. Berlin: Springer, 2013: 1777-1785.
- [6] 张丹. 基于稳态诱发电位的多通道选择性注意研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- ZHANG Dan. Studies on multimodal selective attention based on steady-state evoked potentials [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [7] TRYON W. W. Encyclopedia of human behavior [M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [8] REQUIN J, BRENER J, RING C. Handbook of cognitive psychophysiology: central and autonomic nervous system approaches[M]. Amsterdam: Elsevier, 1991.
- [9] COUGHLAN R, CONNOLLY T. Predicting affective responses to unexpected outcomes[J]. *Organizational Behavior & Human Decision Processes*, 2001, 85(2): 211.
- [10] LINDER PELZ S. Social psychological determinants of patient satisfaction: a test of five hypotheses [J]. *Social Science & Medicine*, 1982, 16(5): 583.
- [11] MELLERS B A, SCHWARTZ A, RITOV H I. Decision affect theory: emotional reactions to the outcomes of risky options[J]. *Psychological Science*, 1997, 8(6): 423.
- [12] ARONSON E. The theory of cognitive dissonance: a current perspective [J]. *Advances in Experimental Social Psychology*, 1969, 4: 1.
- [13] SHEPPERD J A, OUELLETTE J A, FERNANDEZ J K. Abandoning unrealistic optimism: performance estimates and the temporal proximity of self-relevant feedback [J]. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1996, 70(4): 844.
- [14] GOLUB S A, GILBERT D T, WILSON T D. Anticipating one's troubles: the costs and benefits of negative expectations [J]. *Emotion*, 2009, 9(2): 277.
- [15] MARINESCU A C, SHARPLES S, RITCHIE A C, *et al.* Physiological parameter response to variation of mental workload [J]. *Human Factors*, 2018, 60(1): 31.
- [16] 马英, 姜媛. 情绪预测研究进展[J]. 首都师范大学学报(社会科学版), 2010(1): 132.
- MA Ying, JIANG Yuan. Research progress on emotion prediction [J]. *Journal of Capital Normal University (Social Sciences Edition)*, 2010(1): 132.
- [17] WANG X, LIU Y, WANG F, *et al.* Feature extraction and dynamic identification of drivers' emotions [J]. *Transportation Research, Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 62(3): 175.
- [18] BEGGIATO M, HARTWICH F, KREMS J. Physiological correlates of discomfort in automated driving [J]. *Transportation Research, Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 66(7): 445.
- [19] COWLEY B, FILETTI M, LUKANDER K, *et al.* The psychophysiology primer: a guide to methods and a broad review with a focus on human-computer interaction [J]. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, 2016, 9(3): 151.
- [20] 蒙昊蓝, 陈君毅, 邢星宇, 等. 汽车乘员不舒适感的客观表征研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(S1): 60.
- MENG Haolan, CHEN Junyi, XING Xingyu, *et al.* Study on objective representation of passenger discomfort [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(S1): 60.
- [21] DIELS C, PARKES A M. Matching speed production in real and simulated driving environments [M]. Wokingham: Transport Research Laboratory, 2010.
- [22] GUO Y, SUN Q, SU Y, *et al.* Can driving condition prompt systems improve passenger comfort of intelligent vehicles? A driving simulator study [J]. *Transportation Research, Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2021, 81(11): 240.
- [23] PASLEY B N, MAYES L C, SCHULTZ R T. Subcortical discrimination of unperceived objects during binocular rivalry [J]. *Neuron*, 2004, 42(1): 163.
- [24] TAYLOR K M, SHEPPERD J A. Bracing for the worst: severity, testing, and feedback timing as moderators of the optimistic bias [J]. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 1998, 24(9): 915.
- [25] 朱静芳. 恐惧关联特征对恐惧泛化及恐惧消退过程的影响 [D]. 成都: 西南大学, 2013.
- ZHU Jingfang. How fear relevance intensity affects the fear generalization and fear extinction process [D]. Chengdu: Southwest University, 2013.
- [26] SWANN W B, Jr. Motivation and cognition: foundations of social behavior [M]. New York: Guilford Press, 1990.
- [27] XU Z, ZHANG K, MIN H, *et al.* What drives people to accept automated vehicles? Findings from a field experiment [J]. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2018, 95: 320.
- [28] FAREH S, CHRISTINE V, STANLEY N. Importance of refractoriness heterogeneity in the enhanced vulnerability to atrial fibrillation induction caused by tachycardia-induced atrial electrical remodeling [J]. *Circulation*, 1998, 98: 2202.