

文章编号:1671-1637(2018)06-0131-11

# 人机共驾智能汽车的控制权切换与 安全性综述

吴超仲<sup>1,2</sup>, 吴浩然<sup>1,2,3</sup>, 吕能超<sup>1,2</sup>

(1. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063; 2. 武汉理工大学 水路公路交通安全控制与  
装备教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430063; 3. 武汉理工大学 汽车工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘 要:**根据智能汽车技术发展特点和趋势提出了人机共驾的概念;从切换的发起者、强制性与计划性三方面论述了人机共驾智能汽车控制权切换的分类方法,分析了广义和狭义 2 种分类的特点和应用范围;从驾驶人的认知、驾驶负荷、反应力等方面剖析了人机共驾中人因的特性及其对控制权切换安全性的影响,总结了控制权切换的试验研究方法和人机交互形式,指出了控制权切换安全性研究存在的问题和未来发展方向。分析结果表明:人机共驾智能汽车的应用范围是 L2~L3 级自动驾驶,特点是人与系统彼此协同完成动态的驾驶任务;由系统主动发起、驾驶人被动接管的控制权切换情形与安全性更被业内关注;驾驶人能有效地对当前驾驶状态进行认知和评估,进而接管车辆操作,并最终规避风险,是保证控制权切换安全性的关键;人因是影响控制权安全平稳切换的重要因素,主要表现为认知水平偏低,切换前后驾驶负荷阶跃式突变,次任务的影响机理不明确,反应力随切换场景的不同而差异显著等;该领域的主要研究还包括接管绩效的评价,切换时机与人机交互方式的优化以及试验手段的提升等。

**关键词:**智能交通;交通安全;人机共驾;控制权切换;驾驶行为;人因

**中图分类号:**U471.1 **文献标志码:**A

## Review of control switch and safety of human-computer driving intelligent vehicle

WU Chao-zhong<sup>1,2</sup>, WU Hao-ran<sup>1,2,3</sup>, LYU Neng-chao<sup>1,2</sup>

(1. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 2. Engineering Research Center for Transportation Safety of Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 3. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

**Abstract:** On the basis of the features and tendencies of intelligent vehicle technology, the concept of human-computer driving was proposed. The taxonomy methods of the control switch of intelligent vehicles were analyzed in terms of the initiator, urgency, and schedule. The features and applications of two taxonomy methods were discussed in a generalized and narrow sense. The characteristics of human factors in the field of human-computer driving and its influence on the safety of control switch were analyzed in terms of the driver awareness, workload, and response. The experimental methods and human-machine interaction forms of control switch were

收稿日期:2018-07-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51775396, U1664262, 51678460, U1764262);湖北省自然科学基金计划项目(ZRMS2017001571);武汉市科技计划项目(2017050304010268, 2018010402011175)

作者简介:吴超仲(1972-),男,湖北天门人,武汉理工大学教授,工学博士,从事交通安全与驾驶行为研究。

通讯作者:吕能超(1982-),男,湖北黄冈人,武汉理工大学副教授,工学博士。

summarized, and the problems and further developments of the safety were pointed. Analysis result indicates that the application scope of human-computer driving intelligent vehicle is L2-L3 automated driving, and the characteristic is the cooperation of human and computer to complete the dynamic driving tasks. The safety of the control switch situations, which is initiated by the system and passively taken over by the driver, has been given special attention. The key to ensure the safety of control switch is that the driver can effectively recognize and evaluate the current driving state, take over the vehicle operation, and finally avoid the potential hazard. Human factors have a severe impact on the safety and stability of the control switch, mainly manifested as the loss of situation awareness, sudden change of workload before and after handover, uncertainty of the influence of secondary tasks, and significant differences of driver response in different scenarios. The main research in this field also include the evaluation of taking over performance, optimization of switching timing and human-machine interaction, and the improvement of experimental methods. 2 tabs, 7 figs, 53 refs.

**Key words:** intelligent transportation; traffic safety; human-computer driving; control switch; driver behavior; human factor

**Author resumes:** WU Chao-zhong(1972-), male, professor, PhD, wucz@whut.edu.cn; LYU Neng-chao(1982-), male, associate professor, PhD, lnc@whut.edu.cn.

## 0 引 言

汽车自动驾驶技术近年来发展迅速。在谷歌、特斯拉等公司率先推出自动驾驶系统之后,宝马、梅赛德斯和奥迪等传统汽车厂商也相继发布了功能相似的自动驾驶系统,并在一定范围内开展了道路测试<sup>[1]</sup>。英国、美国、日本等发达国家也相继制定了完全自动驾驶汽车的发展规划,明确指出了其在减少道路交通事故方面的重要作用<sup>[2]</sup>。近几年,无论是感知、决策和控制的理论研究,还是以企业为主导的实车项目,都有了全面推进。

然而,自动驾驶技术在驾驶人接受度和行驶安全性方面,还存在许多亟待解决的问题。据谷歌统计报告显示,在从2014年9月至2015年11月共15个月的测试中,智能汽车在自动驾驶时主动脱离自动驾驶状态有272次,驾驶人选择取消自动驾驶状态有69次<sup>[3]</sup>,说明该系统仍离不开人工干预。密歇根大学交通研究所在2015年发布的北美地区自动驾驶汽车交通事故统计报告中指出,自动驾驶汽车在每百万英里的事故数、每百万英里的受伤人数以及单次事故平均受伤人数等指标上均高于传统汽车<sup>[4]</sup>,见图1、2。密歇根大学的另一项针对中国、印度、日本、美国、英国和澳大利亚驾驶人的调查报告<sup>[5]</sup>显示,大多数驾驶人都对自动驾驶的安全性表示担心。由此可见,完全自动驾驶汽车的大规模应用还需要经历较长的过渡阶段,即手动驾驶与自动驾驶协作

的人机共驾阶段。这也将带来更多新的挑战。

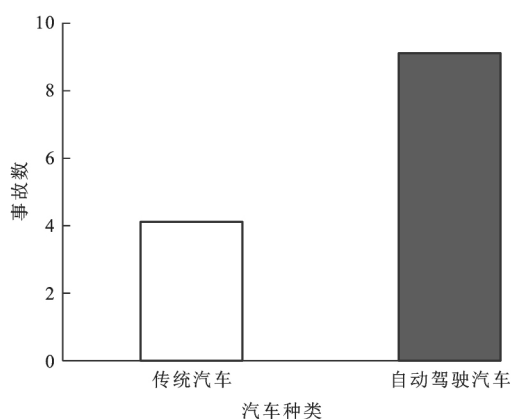


图1 每百万英里事故数

Fig. 1 Crashes per million miles

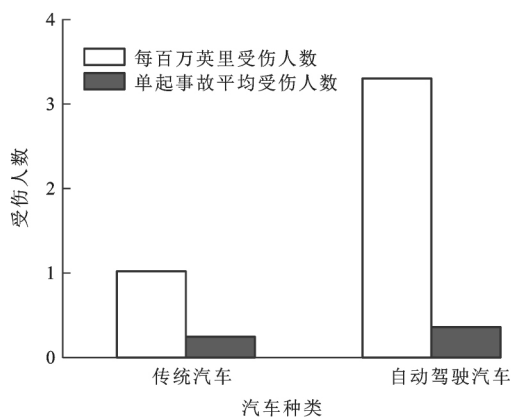


图2 受伤人数

Fig. 2 Number of injuries

人机共驾是指非完全自动驾驶的条件下,驾驶人和智能汽车控制系统都可以对自动驾驶汽车进行控制的阶段,这意味着机器和驾驶人共同享有对汽车的决策和控制权。人机共驾环境下,动态驾驶任务由传统的连续过程转变为自动驾驶、手动驾驶交替变换的离散过程,存在如下 2 个关键问题。

(1)在由机驾到人驾的控制权切换过程中,驾驶人能否有效的对当前驾驶状态进行认知和评估,进而接管车辆操作,并最终规避风险,是保证人机共驾行驶安全,降低自动驾驶事故率的关键。

(2)如何对控制权切换过程进行合理的绩效评价、选择恰当的切换请求时机,以及对人机交互的有效性进行优化等,也是人机共驾智能汽车发展过程中必须要解决的重要问题。

针对上述关键问题,本文阐述了人机共驾的概念及控制权切换的分类,分析了影响控制权切换安全性的主要因素、试验方法与人机交互方式,并在此基础上对该领域的未来研究方向进行了展望。

## 1 人机共驾的概念与控制权切换分类

### 1.1 人机共驾的概念

德国联邦公路研究所(Bundesanstalt für Straßenwesen, BASt)<sup>[6]</sup>、美国国家公路交通安全管理局(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)<sup>[7]</sup>、美国汽车工程师学会(Society of Automotive Engineers, SAE)<sup>[8]</sup>等 3 家机构曾先后对自动驾驶级别进行了定义。2016 年 9 月,随着 NHTSA 首次在联邦自动驾驶汽车政策<sup>[9]</sup>中采用了 SAE 的分级标准,SAE 的 J3016 标准<sup>[8]</sup>逐渐成为世界通用的自动驾驶汽车分级标准。该标准根据车辆不同自动化水平的功能描述、驾驶操作的执行者、驾驶环境的监测者、驾驶任务失败后的接管者,以及自动驾驶系统的能力范围等将自动驾驶车辆划分为 6 个级别(L0~L5),为智能汽车渐进的研究和发展提供指导,见表 1。

按照该标准,目前全世界绝大部分已量产的智能汽车都处于 L0 或 L1 级,最新的特斯拉 Model-S/X、沃尔沃 XC90、奥迪 A8 等尚介于 L2 与 L3 级之间。

根据表 1,L2~L3 级所对应的“操作执行者”是自动系统,而“最终接管者”是驾驶人,二者协同参与驾驶,便引出了人机共驾的概念。人机共驾是指当自动驾驶处于 L2~L3 级时,车辆虽然具有了一定的自动驾驶能力,但遇到系统不能处理的动态驾驶任务时,需要驾驶人对车辆进行有效的接管,人与系统彼

此协同完成动态驾驶任务的自动驾驶过渡阶段。

表 1 SAE J3016 标准中自动驾驶级别

Tab. 1 Automated driving levels in SAE J3016 standard

等级	名称	操作执行者	环境监测者	最终接管者	系统能力
L0	无自动化	人	人	人	无
L1	驾驶辅助	人和系统	人	人	部分工况
L2	部分自动化	系统	人	人	部分工况
L3	有条件自动化	系统	系统	人	部分工况
L4	高度自动化	系统	系统	系统	部分工况
L5	完全自动化	系统	系统	系统	全工况

### 1.2 控制权切换的分类

控制权的切换对于车辆行驶速度和轨迹有直接影响,直接关系到行驶安全。合理分类有助于认清切换过程中驾驶任务的需求以及人与系统之间的关系。一般根据切换的发起者、强制性,以及计划性等方面对控制权的切换进行分类。

对于广义的控制权切换,根据切换的发起者和强制性,可分为以下 3 类<sup>[10]</sup>。

(1)人发起的可选择切换,即人和系统都具备驾驶能力,由人在非紧急状态下主动关闭或者打开自动系统所产生的切换。

(2)人发起的强制性切换,即当人发现系统无法胜任驾驶任务而主动接管控制,或者人发现自身因生理或心理的原因无法胜任驾驶时所发起的切换。

(3)系统发起的强制性切换,即当系统发现自身无法胜任驾驶任务而请求人接管控制,或者系统发现正在驾驶的人无法胜任驾驶任务而主动发起的切换。

SAE J3016 标准在对 L3 级自动驾驶下人和系统的角色描述中指出,人应当在收到请求后的一定时间内接管控制,系统只有在发出请求并且等人安全接管之后才能失效<sup>[8]</sup>,因此,人机共驾环境下的控制权切换更多特指由系统到人的切换,即狭义的切换。其涉及到的场景非常多,对驾乘人状态、接管能力也要求较高,是控制权切换的难点。

由系统到人的切换根据切换的计划性和发起者,可分为以下 5 种情形<sup>[11]</sup>:系统发起的计划性切换,例如在即将进入一个已知的不适宜自动驾驶的路段(如驶入匝道、施工区域)之前,系统在适当的时机发出接管请求;系统发起的非计划切换,例如道路状况突然发生变化(如车道线消失),或者驾驶环境过于复杂,超出了系统功能范围,系统临时请求接管;人发起的非计划切换,例如人为了体验驾驶操作乐趣,或者对系统不信任而主动接管;人紧急发起的非计划切换,人发现了系统没有发现的紧急情况,主

动接管;系统紧急发起的非计划切换,系统内部功能出错或模块失效,告知驾驶人紧急接管控制。

切换通常是指系统将全部控制权移交给人的全过程,而接管则通常是指人获得车辆控制权同时系统释放控制权这一时刻的动作<sup>[12]</sup>,见图 3。

上述切换情形,有的由驾驶人掌控,例如情形(3)、(4),驾驶人占据主动;有的不被驾驶人掌控,例如情形(1)、(2)、(5),若驾驶人不能及时处理,可能导致事故的发生,因此,驾驶人被动接管情形的安全性更被业内关注<sup>[13]</sup>。

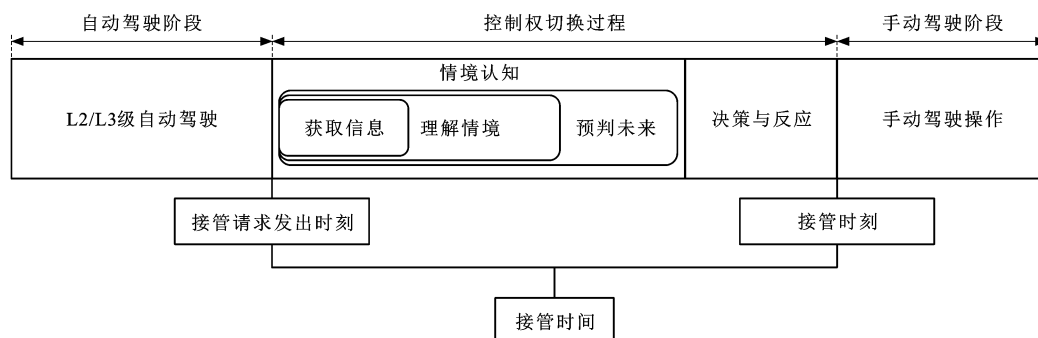


图3 控制权切换过程

Fig. 3 Process of control switch

## 2 控制权切换中的人因研究

研究发现,在车辆执行自动驾驶的过程中,自动驾驶级别越高,驾驶人集中在环境监视和系统操作上的注意力就越少,接管驾驶的能力也越差<sup>[14]</sup>。自动系统在减轻人类操作负荷、提高操作精度的同时,也在人因方面带来了新的安全隐患,例如自满、技能退化、脑力负荷不足(自动系统工作时)、脑力负荷过大(突然被要求接管驾驶时)、情境认知降低等。有学者也指出,更危险的不是最高级别的自动驾驶,反而是需要驾驶人监视自动系统运行的中间级别,因为人无法在足够长的时间内保持警惕<sup>[15]</sup>。人因问题在受到广泛关注的同时,也成为实现控制权安全、平稳切换的重要指导依据。在控制权切换中的驾驶人认知特性、驾驶负荷特性和反应力特性涉及到行车安全,也成为研究的重点。

### 2.1 认知特性

认识和理解当前所处的交通环境是驾驶人实现安全驾驶的先决条件,情境认知也被认为是实现驾驶安全的最重要的人因之一。Golestan 等在其构建的驾驶人认知机理模型中,将驾驶人的情境认知分为3个阶段:获取信息、理解情境、预判未来<sup>[16]</sup>,见图3。获取信息是对驾驶环境中的多种对象的状态进行感知,包括大小、颜色、位置和速度等;理解情境是根据前一阶段获取的信息理解其中的意义和内在联系;预判未来则是在前两阶段的基础上对未来环境的条件和条件进行预测。其中,获取信息是认知的前提,直接关系到任务的绩效,并且需要一定的时

间和空间。在控制权切换过程中通过人机交互增强驾驶人对所处环境的理解,有助于缩短认知过程,提高接管绩效。

人机共驾环境下驾驶人的认知特性主要表现为注意力水平偏低、注视缺乏,并且在控制权切换之前没有充足的时间,驾驶人的信息获取有限,并导致情景理解速度滞后;问卷调查显示,感知和认知的信任度和感知安全性会影响到智能汽车驾驶人的行为,也是影响自动驾驶汽车使用的因素<sup>[17]</sup>;Carsten 等在试验中对24个未参与次任务的驾驶人的眼动行为进行分析,发现自动驾驶时驾驶人只有53%的时间在注视道路中间,而手动驾驶时的注视时间则为72%<sup>[18]</sup>;Merat 等将驾驶接管分为操作和认知两部分进行研究,发现驾驶人能在1~2 s内恢复操作能力,但却需要6 s甚至超过10 s才能恢复认知能力<sup>[19]</sup>。

与传统驾驶相比,人机共驾增加了一个全新的驾驶任务,即配置、维护和监视自动系统的运行。这要求驾驶人不仅要理解系统的功能、运行边界,还要关注系统状态、导航、周围车辆运动状态等信息。驾驶人经常处于双任务或多任务的工况下,使驾驶人承受的信息处理负荷增加,其注意力可能从环境感知、汽车操纵等与驾驶任务直接相关的任务中脱离。许多先进的汽车自动化技术及驾驶人辅助技术,例如自适应巡航,虽然能够释放或部分释放驾驶人的操纵行为,在很大程度上减轻驾驶负担,但由于驾驶人长期处在低负荷水平的状态,很容易脱离控制环路导致无法对紧急情况迅速做出反应。根据

Yerkes-Dodson 定律,当驾驶人处在较高的脑力负荷水平时,极易出现紧张感和压力感,引发交通事故的发生;但若长时间处于较低的负荷认知水平下,驾驶人也容易出现困倦或注意力不集中等不利于正常驾驶的现象<sup>[20]</sup>,因此,相比传统驾驶环境和完全自动驾驶环境,人机共驾环境下的认知特性有很大区别。通过研究驾驶人认知变化规律,使人机共驾的切换控制更加符合驾驶人的驾驶行为,是人机共驾系统研究中亟待解决的问题。

## 2.2 驾驶负荷特性

人机共驾环境下的驾驶负荷与传统手动驾驶相比存在较大的差异,主要表现在负荷不足(自动系统工作时)和负荷过大(突然被要求接管驾驶时)两方面。机驾时,人被允许不对车外环境进行实时监测,脑力和认知负荷处在较低水平;而在突发或复杂情况下,当人突然被要求接管车辆控制时,脑力和认知负荷需求激增,这种从极低到极高程度跳跃的驾驶负荷特性对切换过程的安全性有直接影响。

对于负荷不足的情况,Nilsson 等在模拟器试验中采用脑力负荷量表(Rating Scale Mental Effort, RSME)对自动驾驶和手动驾驶状态下的用脑负荷进行了比较,结果表明:在 0~150 分的量程范围内,自动驾驶下的脑力负荷平均为 12 分,远低于手动驾驶下的平均分 37 分<sup>[21]</sup>;Rizzo 等采用任务负荷指数(NASA Task Load Index, NASA-TLX)量表对各等级自动驾驶下驾驶人的驾驶负荷进行了多维度的评估与量化,结果表明:在高度自动驾驶下驾驶人的整体工作负荷为 12%,低于自动转向系统下的 41%以及 ACC 系统下的 44%,远低于手动驾驶下 57%的整体工作负荷<sup>[22]</sup>。而对于负荷过大的情况,Bibby 等将它形容为“高度自动化系统会引起 99%的无聊和 1%的突然恐慌”<sup>[23]</sup>;Hancock 等针对自动驾驶系统对驾驶负荷降低和提升的两面性进一步研究提出,自动驾驶能使常规驾驶任务变得更容易,却使非常规驾驶任务对人来说变的更难操作<sup>[24]</sup>;Wiener 等从驾驶负荷的时变特性角度开展了研究,指出自动驾驶下驾驶负荷的不均匀分布甚至比驾驶负荷单纯的提高或降低影响更大<sup>[25]</sup>。不难看出,国内外学者已经关注自动驾驶及其切换过程中的驾驶负荷及安全性。

上述负荷特性与驾驶人的任务变化密切相关。人机共驾环境下,当驾驶人不再需要承担驾驶和监控任务时,他们更愿意从事其他的任务,如果可能的话,甚至会推迟对车辆的接管<sup>[26]</sup>,这是非常危险的。

根据注意力资源可塑性理论<sup>[27]</sup>,人可支配的注意力资源与当前的任务需求是相适应的,自动驾驶在降低驾驶负荷的同时也降低了驾驶人可支配的注意力资源上限,当需要人接管时,人的注意力资源已不能满足任务需求,从而使接管绩效变差。

一些学者开始研究次任务对接管绩效的影响,希望借助次任务的负荷需求提升驾驶人的可支配注意力资源,从而改善接管绩效。其中,次任务主要包括对驾驶人的脑、眼、耳、口、手等生理或心理资源进行占用的非驾驶相关任务,例如:电话问答、听广播、看视频、文本输入、n-back 任务、SuRT (Surrogate Reference Task)任务等,见图 4。研究结果包括两方面,一方面,与手动驾驶时相比,从事次任务可能使驾驶人的情境认知能力减弱从而降低驾驶绩效,Louw 等通过模拟驾驶试验发现,自动驾驶状态下从事次任务时会比手动驾驶状态发生更严重的险情<sup>[28]</sup>;另一方面,同在自动驾驶下比较,次任务能使驾驶人保持一定的用脑负荷,在改善接管绩效方面有着积极的影响,Neubauer 等的模拟驾驶试验结果表明,在自动驾驶状态下,正在使用手机的被试者在面对紧急情况时比不从事次任务的被试者反应更快<sup>[29]</sup>。但是,次任务产生的不同级别的负荷需求对接管绩效的具体影响目前尚未明确,不同种类(占用不同生理或心理资源)的次任务在对接管绩效的影响方面有何不同也需要进一步研究,次任务与接管需求耦合下的驾驶负荷及接管绩效研究更是少有涉及。在研究方法上,还要注意将人工设定的标准化的的次任务与驾驶人自发的次任务相结合进行研究。

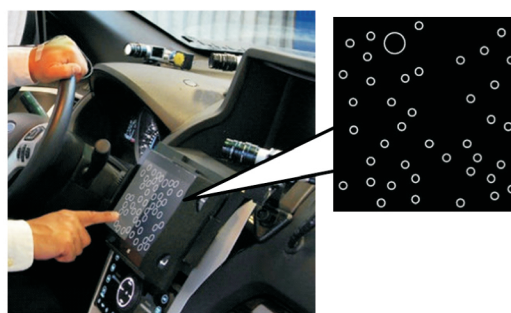


图4 典型的 SuRT 次任务——在屏幕上点击最大的圆圈图案

Fig. 4 Typical SuRT subtask—click on the largest circle on the screen

## 2.3 反应力特性与接管时间提前量

当控制权发生切换时,驾驶人的反应力是指驾驶人在接到系统发出的接管请求后,能及时恢复注视前方,并对车辆进行操作的能力。反应力主要通过多种反应时间(如从系统发出接管请求到驾驶人

第一次注视前方或接触方向盘的时间)和接管时间(从系统发出接管请求到驾驶人操作方向盘或踏板实现手动驾驶的时间)来量化。

驾驶人的反应力与认知能力息息相关,较低的认识水平意味着较长的反应时间和接管时间。Piccinini 等通过模拟器试验对自动驾驶状态下驾驶人面对紧急情况反应进行了研究,结果表明:自动驾驶状态下驾驶人的反应比手动驾驶明显滞后,特别是当驾驶人正从事需要用眼的次任务时反应滞后尤为明显<sup>[30]</sup>;Gold 等对接管驾驶时驾驶人的反应时间进行了量化,结果表明注视反应时间平均为 0.5 s,将手放回方向盘的反应时间平均为 1.5 s,环顾后视镜的反应时间平均为 3 s,另外,在接管驾驶时离障碍物的时距越近,驾驶人对制动和转向的输入就越冒失<sup>[31]</sup>;Naujoks 等发现,在自动驾驶时,将手一直放在方向盘上并不能使驾驶人面对紧急情况的制动反应时间和接管安全性得到显著改善<sup>[32]</sup>;Merat 等发现驾驶人虽然只需要 7~9 s 便可接管控制,但是却需要 35~40 s 才能使车辆横向控制保持稳定<sup>[19]</sup>。

驾驶人反应力特性目前还没有统一的标准,因为其影响因素是多样化的,不仅和接管事件类型有关,还与驾驶人所处的环境(道路类型、交通流密度、

天气等)以及驾驶人状态(从事的次任务、眼动行为等)密切相关。

作为反应时间和接管时间的计时起点,接管请求的发送时机也是决定控制权能否安全平稳切换的一个重要因素。研究人员一般将接管请求发送时机称为接管时间预算(Time Budget)或接管时间提前量(Lead Time),指的是若驾驶人不接管控制,从系统发出接管请求(Take-Over Request, TOR)到关键事件发生(如碰撞或系统失效)的时间。一些学者研究了接管时间提前量对接管绩效的影响,Samuel 等通过模拟器试验对 4、6、8、12 s 的接管时间提前量进行了对比,发现被试者需要至少 8 s 的时间提前量来察觉潜在的危险<sup>[33]</sup>;Gold 等对 5 s 和 7 s 的接管时间提前量进行对比,发现 5 s 提前量的驾驶人介入控制的时间(平均 2.1 s)比 7 s 下(平均 2.9 s)更快,但是 5 s 下驾驶人对后视镜的观察更少,行车稳定性也更差<sup>[31]</sup>,见图 5;Zeeb 等也得出了相似的结论,即接管时间提前量相对较长时,与前车发生碰撞的事故率也更低<sup>[34]</sup>。上述都是在紧急事件场景下对有时间压力的接管进行的研究,Eriksson 等针对没有时间压力的非紧急场景进行接管试验,发现根据驾驶人所从事的次任务的不同,虽然接管时

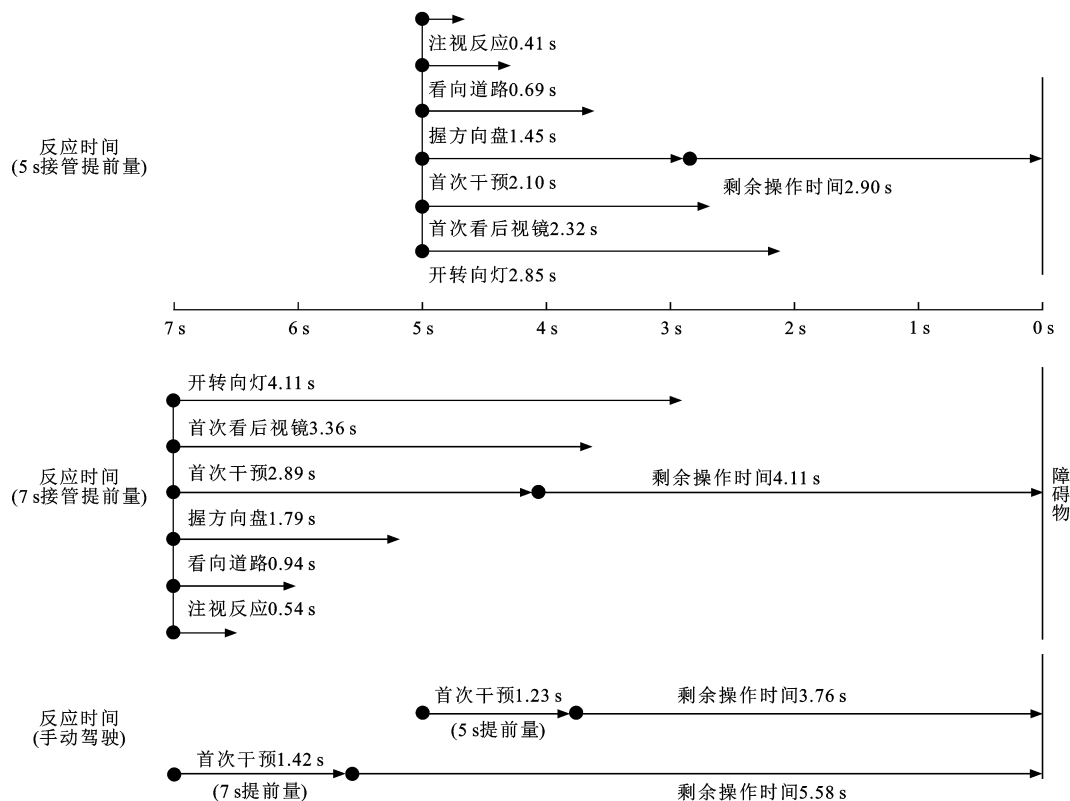


图 5 多项接管反应时间量化结果

Fig. 5 Quantitative results of various take over reaction times



间均值为 4.5~6.0 s,但是实际值范围为 1.9~25.7 s<sup>[35]</sup>,因此,建议汽车设计者不能只关注接管时间的平均值,而应当尽可能的把大范围用户的接管时间考虑进去。

虽然较长的接管时间提前量意味着更稳定的接管绩效和更低的故事率,但是如果在没有视觉反馈的情况下过早的发出提醒,也可能被认为是虚警,对于敏感驾驶人甚至会引发不适当的刹车反应,最终导致人对系统不再信任,引发更危险的后果,因此,在未来的研究中应根据驾驶人反应力特性,充分考虑驾驶人所处的环境和驾驶人的任务状态,设计出更为科学的动态接管时间提前量模型。此外,接管前通过人机交互的辅助提示和增强现实诱导也是重要的研究方向。

### 3 控制权切换的试验方法与人机交互

#### 3.1 主要试验方法

目前,除了斯坦福大学<sup>[36]</sup>等少量机构开展了实车试验(图 6)之外,控制权切换研究的主要手段是模拟器驾驶试验,见图 7。虽然实车试验更接近真实场景,但由于人机共驾试验需要的自动驾驶级别较高,目前该技术在实车上的应用并不成熟,且成本较高,因此,模拟器试验被广泛采用。模拟器试验在人机共驾研究领域有如下优势:试验场景更丰富,可



图 6 人机共驾试验车

Fig. 6 Test vehicle of human-computer driving



图 7 人机共驾驾驶模拟器

Fig. 7 Driving simulator of human-computer driving

实现更高级别的自动驾驶以及现实中难以实现的特殊交通场景;试验环境更安全,可以对极端风险事件进行测试,同时也便于对次任务进行研究<sup>[37]</sup>;试验过程、条件、自变量更可控,可以实现更复杂的对照组试验,同时外部干扰因素更少;可获得的数据更丰富,不受实车传感器的限制。从目前的研究来看,通过模拟驾驶进行人机共驾控制切换的研究是主要手段,并且其模拟驾驶工况也向复杂化、真实化、实用化方向发展。

许多模拟器驾驶试验均选择超过 90 min 的场景进行测试<sup>[19,38]</sup>,一些研究虽然单场景的时间较短,但也要经过反复的测试,试验时间也可达 40 min 以上<sup>[39]</sup>。试验通常应得到相应伦理委员会的批准。被试者通常选择驾龄较长(例如 10 年以上)、年均行驶里程较高<sup>[13]</sup>、具有驾驶模拟器操作经验<sup>[31]</sup>、能像正常开车一样使用模拟器的驾驶人。

大多数研究都有着相似的试验过程。一般来说,被试者首先应阅读试验须知,明确他们的首要任务是保证驾驶安全,任何接管行为都应当在他们认为安全的前提下进行。接下来会经过一段时间的自动驾驶练习,熟悉试验环境。试验过程中将经历至少一次由车到人的控制权切换过程,研究驾驶人对一个或多个关键事件的反应情况。其中关键事件可包括通过施工区域,通过十字路口,通过障碍物,车道线模糊,行人横穿马路等,见表 2。在许多研究中,切换过程都出现在驾驶场景即将结束的时候<sup>[13-16]</sup>。

表 2 控制权切换试验中的典型关键事件

Tab. 2 Typical key events in experiments of control switch

事件类型	描述	参考文献
系统纵向功能受限	本车道前方静止障碍物	[19]、[31]、[33]
	道路施工区域需换道	[34]、[36]
	由大雾引起的能见度降低	[28]
	行人闯入	[38]
	从邻车道切入的车辆	[39]
系统横向功能受限	车道线模糊或出现临时车道线	[40]
	车道线消失	[40]
	高曲率弯道路段	[35]、[40]
系统失效	子系统或整个系统失效	[21]

试验的自变量主要包括控制权切换的场景、事件、自动驾驶级别、次任务、接管时间提前量、人机交互的方式等,因变量主要包括时间指标(多种反应时间和接管时间)、稳定性指标(加速度、最大加减速速度、横摆角速度、横向偏移量、方向盘反向操作频率、碰撞发生次数等)、眼动、多种形式的问卷结果等。

每组试验还应当包含一组相同条件下的纯手动驾驶试验,以形成对比。

### 3.2 人机交互形式与优化

人机共驾切换过程中的人机交互时机及其形式,显著影响着驾驶人反应时间和接管绩效<sup>[40-47]</sup>;寻找优化的预警时机及其模型,是智能汽车人机交互的研究重点。控制权切换的人机交互研究主要集中在视觉、听觉、触觉等交互方式的协同机理以及接管请求的发送方式等方面。在视觉交互方面,Naujoks 等设计了一款支持人机共驾的车辆仪表盘,利用仪表盘上的图标或区域的点亮来发出接管请求<sup>[40]</sup>;Manca 等基于抬头显示(Head up Display, HUD)技术设计了一款人机交互系统,手动驾驶时,该系统将信息显示在仪表盘上,自动驾驶及控制权切换时,将信息显示在 HUD 屏幕上,提高了驾驶人在非驾驶状态下获取信息的效率<sup>[41]</sup>;Löcken 等设计了一款人机交互系统,通过环绕的 LED 氛围灯带发出接管请求,使分心状态的驾驶人更容易察觉<sup>[42]</sup>。

目前在人机共驾领域应用最多的是基于听觉的交互,Nees 等设计的人机交互系统采用蜂鸣警报发出接管请求<sup>[43]</sup>;Politis 等设计的人机交互系统则通过语音信息提醒驾驶人接管车辆<sup>[44]</sup>;Bazilinskyy 等针对人机共驾系统中接管提醒语音的性别问题开展了在线调查,结果表明女性的语音得到了强烈的支持<sup>[45]</sup>;Naujoks 等通过试验对警报和语音的提醒效果进行了比较,指出在执行复杂任务时,警报声比语音更能使驾驶人做出快速反应,因为语音信息时间更长且驾驶人总倾向于听完全部语音信息之后再执行操作<sup>[40]</sup>。

触觉交互方面,Petermeijer 等总结了触觉交互的特点,认为其优点在于不占用驾驶人的眼睛且能够进行私人化提醒,缺点在于能传递的信息量较小<sup>[46]</sup>;Schwalk 等针对高度自动驾驶下触觉交互的特点展开研究,指出在高度自动驾驶下驾驶人很可能将双手离开方向盘,因此,触觉提醒的载体可选择座椅、靠背或安全带<sup>[47, 48]</sup>。

试验证明,多种方式的协同交互(视觉、听觉和触觉的组合)比单一的交互方式在发出提醒时更具紧迫感<sup>[49]</sup>。一项针对人机共驾环境下接管请求发送方式的问卷调查结果显示,人们更倾向于接受多种交互方式联合发出的接管请求,并认为其有助于驾驶人更快的做出反应<sup>[50]</sup>。此外,还有一些研究在接管请求中加入了更多的信息,如方向指示和情境描述,以帮助驾驶人更快的恢复认知能力。Gray 等

将振动提醒的振幅和频率与相对车速信息相关联,作为预警信号<sup>[51]</sup>;Nukarinen 等在座椅振动和具有视觉指示功能的眼镜中分别加入了向左或向右的方向指示信息,经过对比,带有方向信息的振动交互比视觉交互更能使人快速反应<sup>[52]</sup>;Petermeijer 等则指出,带有方向指示的音频和振动提醒对于未经培训过的驾驶人来说并无作用,而在语义上更加明确的指令信息或许在控制权切换过程中更加有效<sup>[53]</sup>。

在人机共驾控制权切换过程中,根据接管场景的复杂程度和驾驶人状态,在合适的时机给出合适的切换预警,研究进展较多;然而,若能通过增强现实手段,对切换作出指向性的提示,则能使驾驶人更快地认知环境,提高切换反应速度和切换绩效。

## 4 存在的问题和未来研究方向

(1)控制权切换绩效的评价目前尚无统一的方法。SAE J3016 标准中对控制权切换的要求是:“及时、安全、正确的在动态交通场景中完成接管”,但是在研究中仅凭这一句描述是不够的。目前的接管绩效评价参数主要集中在时间指标(多种反应时间和接管时间)、稳定性指标(最大加/减速度、横摆角速度、横向偏移量、方向盘反向操作频率、碰撞发生次数等),其中时间指标并不能反映接管后的车辆操作情况,而稳定性指标虽然能反映接管后的操作,但是一定程度上受到试验场景的约束,因此,在深刻理解 SAE 标准要求的基础上,形成一套能得到广泛认可和应用的控制权切换绩效评价方法是人机共驾领域的一个重要研究内容。

(2)在人机共驾过程中,次任务对驾驶负荷、反应力及认知能力影响的具体方式和机理还不明确。一方面,从事次任务可能使驾驶人的认知能力减弱从而降低接管绩效;另一方面,从事次任务可以使驾驶人保持一定的用脑负荷,从而缓解因自动驾驶导致的用脑负荷过低所带来的负面影响。应当如何选择次任务的“类”,以及如何把握次任务的“度”,都值得进一步开展研究。

(3)人机交互如何帮助驾驶人尽快恢复认知能力尚待研究。认知可分为获取信息、理解情境、预判未来三阶段,如果能在人机交互中蕴含更多的信息,则可帮助驾驶人尽快度过“获取信息”甚至“预判未来”这些阶段,从而更快的恢复认知能力。这些信息包括对环境、事件、状态的描述,以及对下一步操作的提示信息等。哪些信息对驾驶人有帮助,采用何种方式进行交互易于被驾驶人理解和接受,还需要



进行深入的研究。

(4)控制权切换过程中驾驶人接管能力的评价尚停留在探索阶段。驾驶人能否安全、可靠的接管驾驶,是智能汽车人机共驾阶段的重要研究内容,接管能力主要包括车辆操作和环境认知等方面的内容,目前的研究对于切换过程中的接管能力的体系框架还没有完全构建,对于影响接管能力的评价指标集研究还不够系统,需要针对切换过程的接管能力评价,通过大量试验手段,进行更加细致、深入的探索。

(5)人机共驾控制权切换的应用场景范围及条件还需要进一步明确。要实现在任何复杂场景下都能安全平稳的完成控制权切换,是很困难的。一方面,可以从环境感知技术角度进行提升,尽量为驾驶人争取更多的接管时间提前量,并且在人机交互方面进行优化,提高驾驶人的接管效率;另一方面,也需要在系统设计之初定义好控制权切换的应用场景及条件。这要求研究人员对尽可能多的切换场景进行研究和评价,总结出一个能够最大限度实现控制权安全平稳切换的应用场景范围,并制订出一套合理有效的车辆使用规则及道路设施标准,这将成为人机共驾智能汽车得到推广和应用的重要前提。

## 5 结 语

(1)当自动驾驶处于L2~L3级,车辆虽然具有了一定的自动驾驶能力,但遇到系统不能处理的动态驾驶任务时,需要驾驶人对车辆进行有效的接管,这种人与系统彼此协同完成动态驾驶任务的阶段即人机共驾阶段。

(2)人机共驾环境下的控制权切换更多特指由系统到人的切换,其中系统发起的计划性切换、系统发起的非计划切换和系统紧急发起的非计划切换这3类情形由于驾驶人是被动接管,且系统需要对失效状态进行决策并适时、高效地发出接管请求,因此,其安全性更被业内关注。

(3)在控制权切换的过程中,驾驶人是否能有效的对当前驾驶状态进行认知和评估,进而接管车辆操作,并最终规避风险,是保证人机共驾行驶安全,降低自动驾驶事故率的关键。

(4)近年来,人因问题在人机共驾领域受到广泛关注,脑力负荷、次任务、反应能力、认知能力等因素对驾驶控制权的安全、平稳切换具有直接影响。该领域的主要研究还包括接管绩效的评价、人机交互方式的优化以及试验手段的提升等,均产生了一定

成果,但是仍有许多关键性问题需要进一步解决。

(5)在未来的研究中,明确人机共驾过程中驾驶任务的新特性、把握好次任务的“类”与“度”、建立接管能力的评价体系、完善人机交互机理,以及进一步通过更多的实车试验对成果进行巩固和验证,将成为保证人机共驾环境下控制权安全、稳定切换的关键。

## 参考文献:

## References:

- [1] VAN BRUMMELEN J, O'BRIEN M, GRUYER D, et al. Autonomous vehicle perception: the technology of today and tomorrow[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 89: 384-406.
- [2] BECKER F, AXHAUSEN K W. Literature review on surveys investigating the acceptance of automated vehicles [J]. Transportation, 2017, 44(6): 1293-1306.
- [3] Google. Google self-driving car testing report on disengagements of autonomous mode[R]. Mountain View: Google, 2016.
- [4] SCHOETTLE B, SIVAK M. A preliminary analysis of real-world crashes involving self-driving vehicles[R]. Ann Arbor: University of Michigan Transportation Research Institute, 2015.
- [5] SCHOETTLE B, SIVAK M. Public opinion about self-driving vehicles in China, India, Japan, the U. S., the U. K., and Australia[R]. Ann Arbor: University of Michigan Transportation Research Institute, 2014.
- [6] GASSER T M, WESTHOFF D. BAST-study: definitions of automation and legal issues in Germany[R]. Bergisch Gladbach: Federal Highway Research Institute, 2012.
- [7] National Highway Traffic Safety Administration. Preliminary statement of policy concerning automated vehicles[R]. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2013.
- [8] SAE International. Surface vehicle information report: taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems[R]. New York: SAE International, 2014.
- [9] National Highway Traffic Safety Administration. Federal automated vehicles policy: accelerating the next revolution in roadway safety[R]. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2016.
- [10] LU Zhen-ji, HAPPEE R, CABRALL C D D, et al. Human factors of transitions in automated driving: a general framework and literature survey [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2016, 43: 183-198.
- [11] MCCALL R, MCGEE F, MESCHTSCHERJAKOV A, et al. Towards a taxonomy of autonomous vehicle handover situations[C]//ACM. 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. New York: ACM, 2016: 193-200.

- [12] MERAT N, DE WAARD D. Human factors implications of vehicle automation: current understanding and future directions[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2014, 27: 193-195.
- [13] DE WINTER J C F, HAPPEE R, MARTENS M H, et al. Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: a review of the empirical evidence [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2014, 27: 196-217.
- [14] ONNASCH L, WICKENS C D, LI Hui-yang, et al. Human performance consequences of stages and levels of automation: an integrated meta-analysis[J]. *Human Factors*, 2014, 56(3): 476-488.
- [15] CASNER S M, HUTCHINS E L, NORMAN D. The challenges of partially automated driving [J]. *Communications of the ACM*, 2016, 59(5): 70-77.
- [16] GOLESTAN K, SOUA R, KARRAY F, et al. Situation awareness within the context of connected cars: a comprehensive review and recent trends[J]. *Information Fusion*, 2016, 29: 68-83.
- [17] XU Zhi-gang, ZHANG Kai-fan, MIN Hai-gen, et al. What drives people to accept autonomous vehicles? findings from a field experiment [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technology*, 2018, 95: 320-334.
- [18] CARSTEN O, LAI F C H, BARNARD Y, et al. Control task substitution in semiautomated driving: does it matter what aspects are automated? [J]. *Human Factors*, 2012, 54(5): 747-761.
- [19] MERAT N, JAMSON A H, LAI F C, et al. Transition to manual: Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2014, 27: 274-282.
- [20] YERKES R M, DODSON J D. The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation[J]. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 1908, 18(5): 459-482.
- [21] NILSSON J, STRAND N, FALCONE P, et al. Driver performance in the presence of adaptive cruise control related failures: implications for safety analysis and fault tolerance[C]//IEEE. 2013 43rd Annual IEEE/IFIP Conference on Dependable Systems and Networks Workshop. New York: IEEE, 2013: 1-10.
- [22] RIZZO L, DONDIO P, DELANY S J, et al. Modeling mental workload via rule-based expert system: a comparison with NASA-TLX and workload profile[C]//Springer. 12th IFIP WG 12.5 International Conference and Workshops on Artificial Intelligence Applications and Innovations. Berlin: Springer, 2016: 215-229.
- [23] BIBBY K S, MARGULIES F, RIJNSDORP J E, et al. Man's role in control systems [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 1975, 8(1): 664-683.
- [24] HANCOCK P A, KRUEGER G P. Hours of boredom, moments of terror: temporal desynchrony in military and security force operations [R]. Washington DC: National Defense University, 2010.
- [25] WIENER E L. Human factors of advanced technology (glass cockpit) transport aircraft [R]. Washington DC: NASA, 1989.
- [26] TRIMBLE T E, BISHOP T, MORGAN J F. Human factors evaluation of level 2 and level 3 automated driving concepts[R]. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2014.
- [27] YOUNG M S, STANTON N A. Malleable attentional resources theory: a new explanation for the effects of mental underload on performance[J]. *Human Factors*, 2002, 44(3): 365-375.
- [28] LOUW T, MERAT N. Are you in the loop? using gaze dispersion to understand driver visual attention during vehicle automation[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 76: 35-50.
- [29] NEUBAUER C, MATTHEWS G, SAXBY D. The effects of cell phone use and automation on driver performance and subjective state in simulated driving[C]//HFES. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 56th Annual Meeting. New York: HFES, 2012: 1987-1991.
- [30] PICCININI G F B, RODRIGUES C M, LEITAO M, et al. Reaction to a critical situation during driving with adaptive cruise control for users and non-users of the system [J]. *Safety Science*, 2015, 72: 116-126.
- [31] GOLD C, DAMBCK D, LORENZ L, et al. "Take over!" how long does it take to get the driver back into the loop? [C]//HFES. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 57th Annual Meeting. New York: HFES, 2013: 1938-1942.
- [32] NAUJOKS F, PURUCKER C, NEUKUM A, et al. Controllability of partially automated driving functions-does it matter whether drivers are allowed to take their hands off the steering wheel? [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2015, 35: 185-198.
- [33] SAMUEL S, BOROWSKY A, ZILBERSTEIN S, et al. Minimum time to situation awareness in scenarios involving transfer of control from an automated driving suite [J]. *Transportation Research Board*, 2016(2602): 115-120.
- [34] ZEEB K, BUCHNER A, SCHRAUF M. What determines the take-over time? an integrated model approach of driver take-over after automated driving[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2015, 78: 212-221.
- [35] ERIKSSON A, STANTON N A. Takeover time in highly automated vehicles: noncritical transitions to and from manual control[J]. *Human Factors*, 2017, 59(4): 689-705.
- [36] RUSSELL H E B, HARBOTT L K, NISKY I, et al. Motor learning affects car-to-driver handover in automated vehicles[J]. *Science Robotics*, 2016, 1: 1-9.
- [37] 闫学东, 李晓梦. 基于驾驶模拟实验的层级式驾驶行为安全模型研究综述[J]. *交通信息与安全*, 2014, 32(5): 1-6.
- YAN Xue-dong, LI Xiao-meng. A hierarchical driving performance

- assessment model for driving simulator-based studies[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2014, 32(5): 1-6. (in Chinese)
- [38] XIONG Zhi-tao, OLSTAM J. Orchestration of driving simulator scenarios based on dynamic actor preparation and automated action planning [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 56: 120-131.
- [39] NEUBAUER C, MATTHEWS G, LANGHEIM L, et al. Fatigue and voluntary utilization of automation in simulated driving[J]. *Human Factors*, 2012, 54(5): 734-746.
- [40] NAUJOKS F, MAI C, NEUKUM A. The effect of urgency of take-over requests during highly automated driving under distraction conditions[C]// AHRAM T, KARWOWSKI W, MAREK T. *Proceedings of the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics AHFE 2014*. Las Vegas; AHFE, 2014: 431-439.
- [41] MANCA L, DE WINTER J C F, HAPPEE R. Visual displays for automated driving: a survey[C]// ACM. *Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. New York; ACM, 2015: 1-5.
- [42] LÖCKEN A, HEUTEN W, BOLL S. Supporting lane change decisions with ambient light[C]// ACM. *Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. New York; ACM, 2015: 204-211.
- [43] NEES M A, WALKER B N. Auditory displays for in-vehicle technologies[J]. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, 2011, 7: 58-99.
- [44] POLITIS I, BREWSTER S, POLLICK F. To beep or not to beep? comparing abstract versus language-based multimodal driver displays[C]// ACM. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York; ACM, 2015: 3971-3980.
- [45] BAZILINSKY P, DE WINTER J. Auditory interfaces in automated driving: an international survey[J]. *Peer J Computer Science*, 2015, 2015(8): 1-32.
- [46] PETERMEIJER S M, DE WINTER J C F, BENGLER K J. Vibrotactile displays: a survey with a view on highly automated driving [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(4): 897-907.
- [47] SCHWALK M, KALOGERAKIS N, MAIER T. Driver support by a vibrotactile seat matrix—recognition, adequacy and workload of tactile patterns in take-over scenarios during automated driving[J]. *Procedia Manufacturing*, 2015, 3: 2466-2473.
- [48] TELPAZ A, RHINDRESS B, ZELMAN I, et al. Haptic seat for automated driving: preparing the driver to take control effectively[C]// ACM. *Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. New York; ACM, 2015: 23-30.
- [49] VAN ERP J B F, TOET A, JANSSEN J B. Uni-, bi- and tri-modal warning signals: Effects of temporal parameters and sensory modality on perceived urgency[J]. *Safety Science*, 2015, 72: 1-8.
- [50] BAZILINSKY P, KYRIAKIDIS M, DE WINTER J. An international crowdsourcing study into people's statements on fully automated driving[J]. *Procedia Manufacturing*, 2015, 3: 2534-2542.
- [51] GRAY R, HO C, SPENCE C. A comparison of different informative vibrotactile forward collision warnings: Does the warning need to be linked to the collision event?[J]. *Plos One*, 2014, 9(1): 1-8.
- [52] NUKARINEN T, RANTALA J, FAROOQ A, et al. Delivering directional haptic cues through eyeglasses and a seat[C]// IEEE. *10th IEEE World Haptics Conference*. New York; IEEE, 2015: 345-350.
- [53] PETERMEIJER S, BAZILINSKY P, BENGLER K, et al. Take-over again: Investigating multimodal and directional TORs to get the driver back into the loop[J]. *Applied Ergonomics*, 2017, 62: 204-215.