

【特别策划】

# 智能汽车交互界面用户体验评估方法体系综述

谭浩, 唐诗妍

(湖南大学 设计艺术学院, 长沙 410082)

**摘要:** **目的** 对智能汽车人机界面的相关研究进行综述, 以总结归纳用户体验评估对象、评估指标和评估方法, 从学术的角度建立智能汽车交互界面用户体验评估方法体系。**方法** 通过系统文献综述, 对纳入系统综述的文献进行信息提取, 从而得到基础数据; 通过总结归纳的方式, 进行数据分析。**结果** 分析了汽车数字化、智能化的发展趋势对汽车交互界面用户体验设计与评估的影响, 从评估对象、评估指标、评估方法三个方面总结智能汽车领域用户体验研究进展。提出产品类型以及构成产品的产品要素(物理特征和虚拟要素)两个评估对象维度, 基于人机系统优化层次重点阐述了安全、效能、感性体验三类评估指标, 基于研究对象、方法属性和质量效率构建三个评估方法维度, 为评估方法选择提供参考, 并详细分析了不同研究中评估工具的应用。最后总结评估对象、评估指标以及评估方法, 形成该领域的方法体系。**结论** 在智能汽车时代下, 技术发展使汽车人机交互界面日趋复杂, 用户体验评估被证明有利于提供反馈, 以帮助开发者设计和改进产品并完成产品迭代。通过这种方法, 可以为车辆开发人员提供有关如何进行成功的用户体验评估所需的理论知识和实践参考。

**关键词:** 智能汽车; 人机交互; 人机界面; 用户体验评估

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)06-0012-13

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.06.002

## User Experience Evaluation Methodology of Interactive Interface in Intelligent Vehicle

TAN Hao, TANG Shi-yan

(School of Design, Hunan University, Changsha 410082, China)

**ABSTRACT:** The work aims to conduct systematic review of literature on human-machine interface (HMI) of intelligent vehicles, summarize the objects, metrics, and methods for evaluation of user experience (UX) to develop a methodology for UX of HMI in intelligent vehicles. System literature review (SLR) was conducted and information was extracted from literature included in the systematic review to obtain basic data and conduct analysis. The effects of the development trend of intelligent vehicles on UX design and evaluation of vehicle HMI were analyzed and the research progress of UX was summarized from three aspects, which included evaluation objects, evaluation metrics and evaluation methods. It put forward two dimensions of evaluation objects: product types and product elements (including physical characteristics and virtual elements), and emphatically elaborated three types of evaluation metrics (namely safety, performance, and experience), based on the optimization layer of human-machine system. Three evaluation method dimensions were constructed based on the attributes of the evaluation methods, which included research objects, the method attributes, and the quality-efficiency, providing reference for the selection of evaluation methods. Besides, the application of evaluation tools in different studies was analyzed in detail. Finally, the objects, metrics and methods of evaluation were summarized. In the era of intelligent vehicles, the development of technology has increased the complexity of HMI. UX evaluation has been proved to be beneficial to provide feedback to help developers design and improve products and complete product iterations. This method can provide vehicle developers with theoretical knowledge and practical reference on how to conduct UX evaluation successfully.

**KEY WORDS:** intelligent vehicle; human-machine interaction; human-machine interface; user experience evaluation

收稿日期: 2022-11-10

作者简介: 谭浩(1976—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为工业设计、交互设计、用户体验设计、用户研究、汽车设计。

智能汽车正越来越多地渗透到人们的日常生活中。然而, 先进的技术使汽车领域的交互变得越来越复杂。积极的用户体验对用户接受智能汽车至关重要, 可能会促进智能车辆的使用并加快其社会中的普及, 应该被视为汽车开发过程的关键部分。在此背景下, 智能汽车人机界面的用户体验设计与评估已经成为国内外学术界与产业关注的重点。

## 1 智能汽车交互界面与用户体验

### 1.1 智能汽车概述

国家发改委《智能汽车创新发展战略》对智能汽车的定义为: 智能汽车是指通过搭载先进传感器等装置, 运用人工智能等新技术, 具有自动驾驶功能, 逐步成为智能移动空间和应用终端的新一代汽车。智能汽车通常被称为自动驾驶汽车 (Autonomous Vehicle, AV)、智能网联汽车 (Intelligent and Connected Vehicle, ICV) 等。自动驾驶汽车的历史与相关概念可以追溯到 20 世纪 30 年代后期<sup>[1]</sup>, 可以通过避免致命的碰撞、为以老年人及残障人士为代表的特殊用户群体提升驾乘体验<sup>[2]</sup>、增加道路容量、节省燃料和降低排放来从根本上改变交通系统<sup>[3]</sup>。自动驾驶汽车的性能和安全性可通过网联技术提升。智能网联汽车是新一代车辆, 融合自动驾驶汽车与网联式汽车 (Connected Vehicle, CV) 的技术优势<sup>[4]</sup>, 配备先进的车载传感器、控制器、执行器等设备, 集成现代通信和网络技术, 实现车辆与人、车、路、背景等之间的智能信息交换和共享<sup>[5]</sup>。自动驾驶技术和网联技术的结合共同推动汽车向智能化方向发展。

技术进步为多年来限制车辆发展的各种技术问题提供了强大的解决方案, 这些技术解决方案使汽车的交互模式和人机界面功能产生重大变化<sup>[6]</sup>。智能与网络技术背景下的人车交互, 包含了人类移动情境下的一种身体超越, 其未来具有巨大的潜力<sup>[7]</sup>。从整体效益的角度来看, 智能汽车除了具有提升道路安全性、提高人员货物流动质量及效率等明显的优势外, 还将通过降低油耗、高效利用互联网、减少人员等手段带来更多的经济收益<sup>[8]</sup>。智能汽车通过加深人车融合交互的方式重塑交通和出行模式, 为交通系统和人类驾驶带来革命性的变化。

### 1.2 智能汽车交互界面

汽车的交互式服务 (如车内支付、联网音乐、远程汽车访问), 增加了汽车交互设计的复杂性<sup>[9]</sup>。人机交互界面 (Human-Machine Interface, HMI) 是自动驾驶汽车与乘客、其他道路使用者等人机之间通信的硬件和软件系统的集合, 包含 2 种主要类型, 即汽车用户界面 (User Interface, UI) 和外部人机界面 (External Human-Machine Interface, eHMI), 分别与车内用户和外部道路使用者进行通信<sup>[10]</sup>。

传统的汽车用户界面包括中央控制物理操作界面和功能集成的触摸屏界面, 它们在很多汽车中都可以使用<sup>[11]</sup>。根据显示的模式特性, 此类用户界面也被称为俯视显示器 (Head-down Display, HDD)<sup>[12]</sup>。各项先进交互技术在汽车人机交互领域的应用, 推动了基于多通道用户界面的多感官交互的发展, 催生了更多新型的汽车用户界面, 如平视显示器 (Head-up Display, HUD)、增强现实 (Augmented Reality, AR) 平视显示器、流媒体后视镜等。

外部人机界面是车辆的外部显示设备, 通常采用文本等信息方式, 将其呈现在车辆外部的不同位置<sup>[13]</sup>或投射在地面上<sup>[14]</sup>, 或使用音频及口语将信息传达给其他道路使用者<sup>[15]</sup>, 通过多种感官方法向外部道路使用者反馈信息, 解决自动驾驶汽车与其他道路使用者进行通信和交互的知识差距问题, 对确保交通使用者安全、提高交通运输效率、减少拥堵具有重要意义<sup>[16]</sup>。

智能汽车交互界面设计空间, 见图 1。

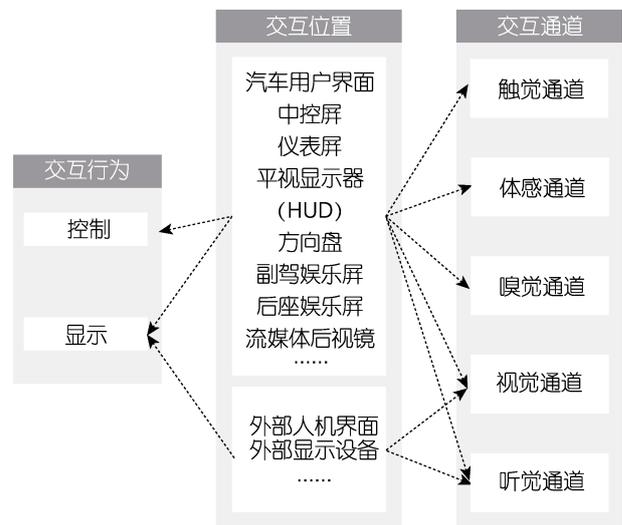


图 1 智能汽车交互界面设计空间  
Fig.1 Design space of human-machine interface in intelligent vehicles

对于交互界面用户体验的关注, 激发了该领域的许多研究, 重点关注优化设计以改善性能及体验。一些研究集中在人车交互显控关系的属性方面<sup>[17-18]</sup>, 提出未来智能汽车界面的设计建议, 有助于在汽车交互界面开发初期解决设计问题。另一项研究对中控屏位置进行了深入分析, 结果发现不同的显示位置和用户界面显著影响驾驶员的舒适度<sup>[19]</sup>。此外, 多通道与自然交互也是人们一直关注的重点<sup>[20-21]</sup>。这种对交互界面的关注可以解释为人们对于智能汽车安全性和操作便利性的兴趣日益浓厚<sup>[11]</sup>。

交互界面作为驾驶员与汽车通信的媒介, 会影响驾驶员车辆控制、接收信息、监控系统的能力。智能汽车的交互界面必须正确显示自动驾驶系统的运行状态, 在特定条件下需要驾驶员执行动态驾驶任务时, 具备识别驾驶员执行动态驾驶任务能力的功能, 并能

合理地与车外道路者进行交互。为了安全高效地与智能车辆进行交互,积极的用户体验至关重要。

### 1.3 用户体验视角下的交互界面评估现状

20世纪80年代末到90年代初,计算机图形界面的兴起带动了互联网行业的发展。交互设计领域发展缓慢,设计中的质量观念已经从可用性支持下用户性能的工程重点扩大为用户体验<sup>[22]</sup>。早在20世纪80年代,心理学家和工程师就致力于研究让用户满意的设计,从营销的角度看待人与产品的交互关系,但此时尚未提出明确的用户体验定义。更广为人知的也许是Nielsen提出的广泛用于交互界面评估的启发式设计原则,以及Norman在20世纪90年代提出的用户体验(User Experience, UX)概念,以涵盖苹果公司在人类交互性研究和应用的一些关键方面<sup>[23]</sup>。Berni等<sup>[24]</sup>根据在文献中发现的两种基本方法,提出强调情感体验的享乐/非工具方法<sup>[25]</sup>,以及强调可用性的实用/工具方法<sup>[26]</sup>。尽管产业界及学术界存在大量针对用户体验的研究,用户体验仍然是一个无法明确定义的概念。综合大多数用户体验的定义,人机交互的人体工程学国际标准ISO 9241-11对用户体验的定义如下:用户因使用或预期使用系统、产品、服务而产生的感知和反应<sup>[27]</sup>,涵盖大多数用户体验研究中的关键要素:主体(用户)、客体(被使用的系统、产品或服务)、交互发生的时间(使用或预期使用过程)、涉及人类的变量(感知和反应)。用户体验对产品的成功而言至关重要,从用户那里获取信息并非易事。继用户体验概念提出后,人们开始讨论通过用户体验评估改善产品质量,且在不同领域已有大量商业案例(如谷歌HEART模型、GSM模型、阿里巴巴UES模型)被广泛使用。然而,大多数度量模型建立于互联网产业中,不完全适用于汽车产业。目前,汽车智能化的发展趋势使汽车设计从聚焦汽车本身的设计转向注重汽车用户体验的设计<sup>[28]</sup>,汽车企业传统的技术性评估难以在交互体验领域进行应用,难以符合汽车供应商及用户的实际期望。

用户体验不仅可以提升品牌资产<sup>[29]</sup>,支持客户的购买决策过程,还可以支持制造商开发和优化新的、现有的解决方案<sup>[30]</sup>。为了实现这一目的,需要准确地对交互行为进行理解和评估<sup>[31]</sup>。用户体验的概念在智能汽车领域意义重大,但缺少整合用户体验和智能汽车两个主题的系统文献综述。因此,本文通过系统文献综述(System Literature Review, SLR),以全面、简洁地总结该主题的现有文献。可为在智能汽车开发过程中考虑用户体验视角的用户体验研究人员和车辆开发人员提供参考。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 研究方法

当前在汽车领域存在一些系统文献综述,其中一

些文献关注人机交互领域,但在现有的文献中,尚未有专注于智能汽车用户体验评估的文献综述。基于本研究的目标,制定了三个研究问题(RQ<sub>i</sub>),如下所示:

RQ1: 评估对象,关于智能汽车交互界面评估了什么?

RQ2: 评估指标,智能汽车交互界面的评估涉及哪些方面的内容?

RQ3: 评估方法,在智能车辆人机交互中评估用户体验的方法有哪些?

如果研究符合以下标准,则纳入系统综述:

- 1) 研究以论文的形式呈现。
- 2) 研究讨论了智能汽车交互界面的内容。
- 3) 研究描述了评估智能车辆用户体验的方法。
- 4) 该研究是在过去10年内发表的。

如果研究出现以下情况,则排除:

- 1) 全文不可用。
- 2) 非英文。
- 3) 专注于智能车辆交互以外领域的用户体验。

### 2.2 数据来源

在五个主要数据库(IEEE Xplore、ACM Digital Library、Springer、ScienceDirect、Web of Science)中进行了文献检索,所选数据库已被广泛用于人工智能领域的二次研究。

检索过程旨在检索尽可能多的与主题相关的研究。检索字符串中包含了两个关键词:“user experience”和“intelligent vehicle”。术语“user experience”也被称为“UX”。网联汽车与自动驾驶汽车都属于智能汽车的范畴。因此,这些关键字被包含在检索字符串中。运用布尔运算符构建检索词:“AND”用于连接术语,“OR”用于替代术语,以此制定了检索字符串: (“user experience”OR“UX”) AND (“intelligent vehicle”OR“connected vehicle”OR“automated vehicle”)。

研究选择过程通过流程图表示,见图2。在初始

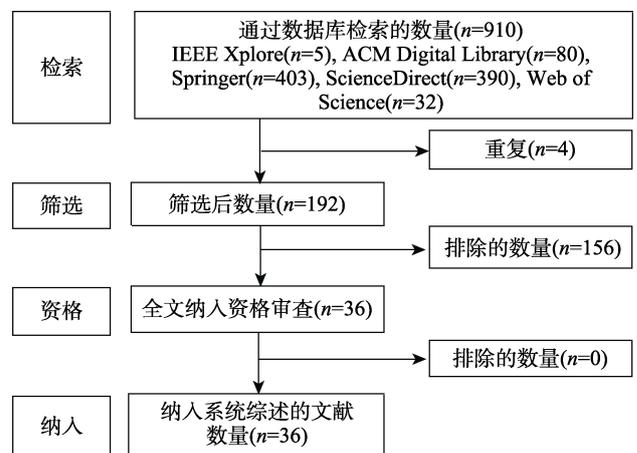


图2 研究选择过程的流程图  
Fig.2 Flow diagram of study selection process

检索过程阶段, 共检索了 910 项研究 (IEEE Xplore (n=5)、ACM Digital Library (n=80)、Springer (n=403)、Science Direct (n=390)、Web of Science (n=32))。排除 4 项重复的研究, 在审查这些研究的标题和摘要后, 排除 714 项不适合本系统综述的研究。根据纳入/排除标准评估其摘要, 排除 156 项研究, 余下的 36 项研究进入资格阶段。这些研究的全文均适用纳入/排除标准, 最终 36 项研究被纳入本系统综述。

### 3 用户体验评估方法体系

基于系统综述获得的评估方法, 总结了智能汽车交互界面用户体验评估方法体系的框架, 其目标如下:

1) 使用常见的用户体验评估指标和评估方法衡量用户对智能汽车交互界面的体验。

2) 提供全面的评估工具, 可以与同类产品进行比较。

3) 衡量用户体验的实现情况。

4) 根据收集到的反馈不断优化设计, 提升产品质量。

该框架包括以下几个组件:

1) 用户体验评估对象: 作为评估目标的主体 (不同类型的交互界面以及构成交互界面的产品要素)。

2) 用户体验评估指标: 用户体验测量的内容 (指标所属维度、属性)。

3) 用户体验评估方法: 获取数据的手段 (评估方法的选择指的是哪种类型的测量手段和用户体验评估对象、评估指标是合适的)。

在选择评估方法时, 需要考虑的是评估对象的特性、评估指标、设备、时间、成本。智能汽车交互界面用户体验评估方法体系的设计, 见图 3。

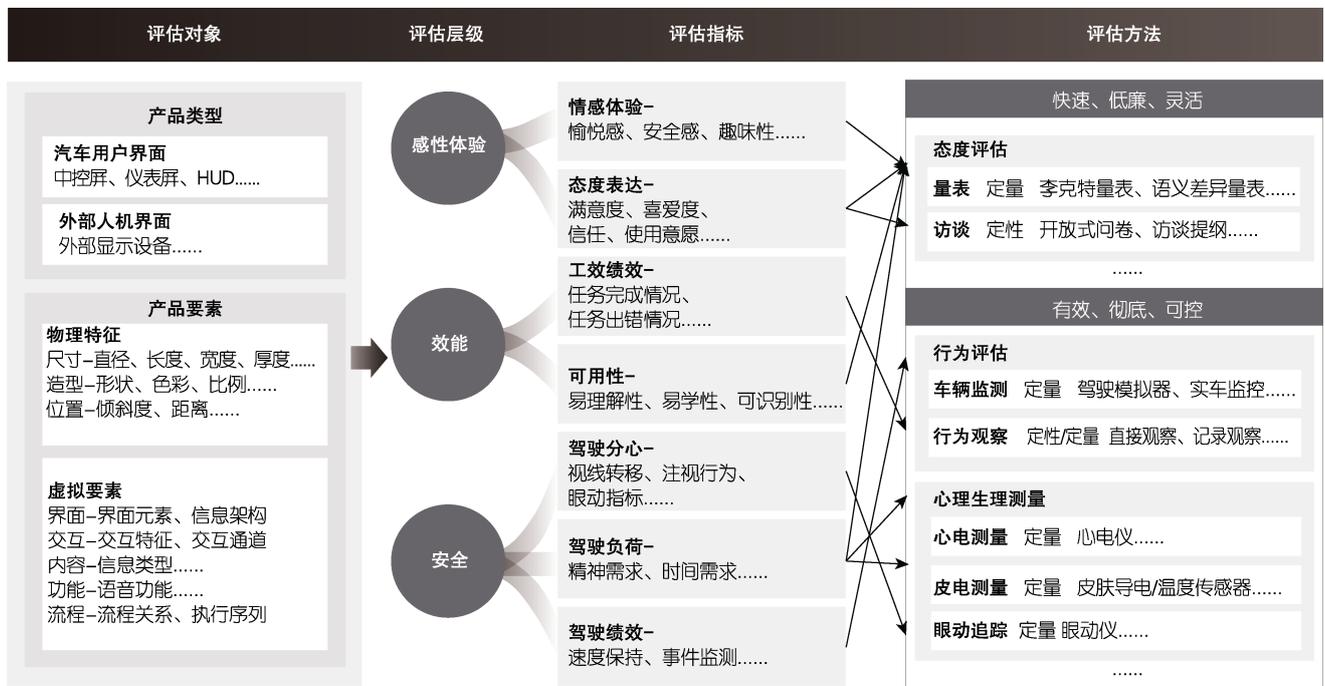


图 3 智能汽车交互界面用户体验评估方法体系  
 Fig.3 UX evaluation methodology of human-machine interface in intelligent vehicles

#### 3.1 评估对象

智能汽车交互界面的评估对象, 包括产品类型以及构成产品的产品要素 (物理特征、虚拟要素)。

##### 3.1.1 产品类型

汽车显示技术的快速发展促成信息显示方式和位置的多样化, 平视显示、增强现实、激光投影、各种屏幕显示 (液晶屏、柔性屏、异形屏、曲面屏等) 等不同的显示设备和显示方式不断进入智能汽车的内部空间<sup>[32]</sup>。正确放置车载功能并找到信息分布的最有利位置可提高可见度以保障安全驾驶, 例如, 汽车开发商将汽车状态信息放置在离驾驶员更近的仪表

屏上, 而将娱乐信息放置在副驾娱乐屏上。针对驾驶或非驾驶相关信息的显示设备和显示方式, 已在一些文献中进行了详细研究。Li 等<sup>[33]</sup>探讨了非驾驶相关任务显示设备对接管绩效的影响, 相较于移动设备, 平视显示器是一种更好的显示器, 可以提高驾驶员在道路上的注意力。Detjen 等<sup>[34]</sup>通过平视显示器或增强现实平视显示器将车辆的动作传达给用户, 并对其进行了评估。两种可视化都提高了自动驾驶系统的用户体验和信任度, 增强现实技术实现了更佳的用户体验和更快更准确的驾驶接管。

##### 3.1.2 产品要素

上文已经确定了智能汽车交互界面的类型及部

分交互属性,但对构成产品的要素未进行深入探讨。构成计算机系统的产品要素可以分为物理要素和虚拟要素。在物理特征中,尺寸、位置、造型共同构成交互界面的硬件。在虚拟要素中,界面、交互、流程、功能、内容等共同构成交互界面的软件。评估对象的物理特征及虚拟要素,见表1—2。

表1 评估对象物理特征  
Tab.1 Physical characteristics of evaluation objects

物理要素	描述性说明	评估内容
尺寸	沿某一方向、某一轴向或围径测量的值	直径、长度、宽度、厚度等
造型	产品的外在表现形象	形状 <sup>[35]</sup> 、色彩、比例等
位置	某一时刻在空间中的分布	倾斜度 <sup>[19]</sup> 、距离 <sup>[19]</sup> 等

表2 评估对象虚拟要素  
Tab.2 Virtual elements of evaluation objects

虚拟要素	描述性说明	评估内容
界面	用户与系统进行输入输出或其他交互活动的媒介	界面元素 <sup>[36-42]</sup> 、信息架构 <sup>[43]</sup>
交互	用户与系统通过显示器和控制器进行信息交换	交互特征(主动交互 <sup>[44-46]</sup> 、拟人化 <sup>[47-48]</sup> )、交互通道 <sup>[49-54]</sup>
内容	系统中用于传递特定消息的数据集,包括文本,图像和其他元素,以及这些元素的可视化组合和动态呈现	信息类型 <sup>[55-56]</sup> 等
功能	系统能够满足用户相关需求和潜在需求的属性	语音功能 <sup>[57-58]</sup> 等
流程	用户为实现目标,经过多个环节,按顺序操作的完整过程	流程关系、执行序列

交互界面可以看成是形状、大小、色彩、位置等多种设计特征的集合,这些设计特征共同构成产品的物理特征,其差异会给用户带来不同的体验,因此需要确定适应用户的物理特征。在人机交互过程中,合理的产品形式可以让用户获得更佳的使用体验和享乐体验。在交互界面的设计中,需要兼顾美学、人机工程学的要求。Yang等<sup>[35]</sup>研究了智能汽车人机界面设计特征与系统可用性的关系,根据4个设计特征确定了36种类型的面板系统,并收集了眼球运动和主观偏好数据以量化用户体验。Zhang等<sup>[19]</sup>对中控屏位置进行了研究,以确定显示屏位置对汽车行驶性能的影响。

针对界面的评估,主要指的是对界面元素及信息架构的探索。一方面是对车内交互界面设计的研究,

旨在提高驾驶员绩效。在一项对自适应巡航控制和车道保持辅助符号设计的研究中,研究人员通过焦点小组的方法,邀请驾驶员设计自己的符号并讨论当前使用的符号<sup>[36]</sup>。对这些符号的评估表明,以用户为中心的设计可以确保用户理解和接受系统中的符号。Weidner等<sup>[37]</sup>评估了智能立体3D仪表盘可视化的潜力。结果表明,参与者考虑了智能接管请求,可以进行更安全的接管。另一方面,外部汽车信息显示也是界面设计的一项重要内容。车外信息显示设计可以减少行人的决策时间<sup>[38]</sup>,有助于用户产生更积极的感觉<sup>[39]</sup>。界面设计要做的全部事情就是选择正确的界面元素<sup>[59]</sup>。精心设计的符号可以通过增加系统的直观性来提升系统的可用性<sup>[60]</sup>。由于车辆自动化水平及用户需求存在差异,开发人员应合理选择信息分布<sup>[43]</sup>。

根据交互发生的主体可以将交互行为分为人的控制行为和智能汽车的显示行为,两种交互行为以人机界面为媒介进行。交互特征是交互领域的一个重要研究内容,大量文献对系统的主动交互和拟人化特征进行了探究。Xu等<sup>[45]</sup>考虑主动交互反馈在社区环境中的应用和体验效果,验证了交互行为的关联紧密性对人类智能机器人交互过程中的用户体验至关重要。Large等<sup>[47]</sup>探讨了拟人化的对话对用户信任自动驾驶汽车的影响。结果表明,与其他界面相比,拟人化获得了最高的信任评级。但在Aremyr等<sup>[48]</sup>的研究中,未能发现拟人化特征与用户对自动驾驶汽车的信任之间的联系。

交互通道是交互领域的另一项重要研究内容。新型交互技术的发展,扩展了目前交互界面的概念,智能环境中的自然交互和多通道交互逐渐成为智能汽车交互界面的发展趋势。为了寻找更符合自然习惯的人机交互方式,有必要对交互通道进行评估以提高交互的工作效率。Yan等<sup>[51]</sup>针对3级自动驾驶汽车进行研究,旨在了解用户对接管警告模式的偏好。他们提供了视觉接管警告、听觉接管警告、触觉接管警告和多模式接管预警4种不同的警告模式,研究发现视觉、触觉接管警告是最好的警告方法。Eimontaite等<sup>[49]</sup>在自动驾驶情境下,为老年人提供了不同的人机界面反馈模式,研究结果表明声音或多模态反馈提升了操作的便利性和旅程体验。

信息将发送者与接收者结合起来,信息所指的内容传达了信息发送者的意图。与智能汽车进行的交互类似人类之间的交流,不恰当的沟通可能带来严重的后果。已有研究对采用何种信息类型传达何种意图进行了探讨。为了解什么样的通信方式可以给用户带来更好的体验,Ji等<sup>[55]</sup>调查了用户对自动驾驶汽车信息类型的偏好,结果表明,使用第一人称与用户沟通更能获取信任。在另一项调查行人对自动驾驶汽车信息需求的研究中,结果显示与仅传达状态信息相比,有关车辆意图的额外信息会实现用户体验、感知智能和

透明度的改进<sup>[56]</sup>。

对功能的评估主要围绕是否满足用户需求或潜在需求以及能否带来额外效益展开。语音技术的迅速发展, 带动了车载语音助手的兴起, 人们开始关注语音用户界面是否能带来额外效益。对语音功能的研究表明, 语音用户界面有助于减轻挫败感<sup>[57]</sup>, 提高驾驶员的情境意识并减少接管时间<sup>[58]</sup>。

总结上述涉及的评估对象, 评估对象选择范畴见图 4。

### 3.2 评估指标

在进行用户体验评估之前, 需明确用户体验的目标。Maslow<sup>[61]</sup>构建了人类需求的五级模型, 从下至上, 分别是生理、安全、社交需要、尊重、自我实现。人机工程学旨在提高人与产品交互过程中的舒适

性、安全性、效率和满意度, 这些元素可以帮助设计人员了解如何改进系统以更好地满足用户的需求<sup>[62]</sup>。基于人机系统的优化层次, 总结出智能汽车交互界面评估指标的三个类别: 安全、效能、感性体验。驾驶是一项高度复杂的任务, 针对汽车的交互界面设计必须在确保安全和效能的前提下, 提升用户体验<sup>[63]</sup>。研究中评估指标的所属维度, 见表 3。

#### 3.2.1 安全层级

对驾驶风险进行识别、分析及评估是对风险进行管理的有效对策, 明确由人为因素(即驾驶人个体特征及驾驶行为)所带来的驾驶风险并对驾驶人进行安全管理尤为重要<sup>[71]</sup>。驾驶安全包括两个方面: 减少事故和避免人为错误。对安全的评估可以围绕驾驶分心、驾驶负荷和驾驶绩效三个方面展开。



图 4 评估对象选择范畴

Fig.4 Selection scope of evaluation objects

表 3 研究中评估指标的所属维度

Tab.3 Dimensions of evaluation metrics used in the study

评估层级	评估维度	评估指标
安全	驾驶分心	注视行为(注视次数 <sup>[35,37]</sup> 、平均注视持续时间 <sup>[35,37]</sup> 、第一次注视道路的时间 <sup>[37]</sup> 、停留时间 <sup>[50]</sup> )、眼动指标(眨眼频率 <sup>[33,52,58]</sup> 、瞳孔直径 <sup>[33,35,58]</sup> 、眨眼持续时间 <sup>[58]</sup> )、视线转移(扫视持续时间 <sup>[58]</sup> 、扫视频率 <sup>[58]</sup> )、表情识别(表情变化 <sup>[64]</sup> )、头部移动 <sup>[64]</sup>
	驾驶负荷	精神需求 <sup>[46,50,58,65-66]</sup> 、身体需求 <sup>[46,50,58,65-66]</sup> 、时间需求 <sup>[46,50,58,65-66]</sup> 、性能 <sup>[46,50,58,65-66]</sup> 、努力 <sup>[46,50,58,65-66]</sup> 、挫折感 <sup>[46,50,58,65-66]</sup> 、容忍级别 <sup>[52]</sup> 、困倦程度 <sup>[55]</sup>
	驾驶绩效	速度保持(纵向速度 <sup>[11]</sup> 、车速 <sup>[38,46,64,66]</sup> 、车速标准差 <sup>[42]</sup> 、加速度 <sup>[46]</sup> 、纵向加速度 <sup>[64]</sup> 、横向加速度 <sup>[64]</sup> )、事件监测(接管成功的数量 <sup>[37]</sup> 、反应时间 <sup>[37,46]</sup> 、接管成功率 <sup>[46]</sup> 、响应时间 <sup>[11,58]</sup> 、激活时间 <sup>[52]</sup> )、跟车行为(车辆位置 <sup>[38]</sup> 、行人到车辆的距离 <sup>[38]</sup> )
效能	工效绩效	任务完成情况(任务完成时间 <sup>[11]</sup> 、任务响应时间 <sup>[42]</sup> 、任务完成速度 <sup>[67]</sup> )、任务出错情况(错误率 <sup>[50]</sup> )
	可用性	有效性 <sup>[11,53]</sup> 、易学性 <sup>[11,53]</sup> 、可识别性 <sup>[38]</sup> 、易理解性 <sup>[38]</sup> 、感知易用性 <sup>[48]</sup> 、有用性 <sup>[54,66]</sup>
感性体验	情感体验	美观性 <sup>[11,38]</sup> 、安全感 <sup>[39,44,56,68-69]</sup> 、吸引力 <sup>[40-41]</sup> 、刺激 <sup>[41]</sup> 、新颖性 <sup>[41]</sup> 、熟悉度 <sup>[49]</sup> 、愉悦感 <sup>[51]</sup> 、趣味性 <sup>[51]</sup> 、舒适度 <sup>[42,51,69]</sup> 、感知拟人化 <sup>[48]</sup> 、感知智能 <sup>[56]</sup> 、亲和力 <sup>[57]</sup>
	态度表达	个人偏好 <sup>[35,38,45,51]</sup> 、满意度 <sup>[19,42,44,51,53,66,70]</sup> 、信任 <sup>[34,38,41,48-49,51,56]</sup> 、接受度 <sup>[57]</sup> 、使用意愿 <sup>[69]</sup>

驾驶分心涉及驾驶过程的注意力分配问题。追踪驾驶员眼动行为是常用的评估方法,用于评估的指标包括视线转移(如扫视次数、扫视频率<sup>[58]</sup>)、注视行为(如注视次数<sup>[35,37]</sup>、平均注视持续时间<sup>[35,37]</sup>、第一次注视道路的时间<sup>[37]</sup>)、眼动指标(如眨眼频率<sup>[33,52,58]</sup>、眨眼持续时间<sup>[58]</sup>)、表情识别(如表情变化<sup>[64]</sup>)、头部移动<sup>[64]</sup>等指标也可用于驾驶分心的测量。

对驾驶负荷的度量是对驾驶员在驾驶任务时的工作量的度量。美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)任务负荷指数(Task Load Index, TLX)<sup>[72]</sup>是衡量主观工作量的标准化可用性问卷,已被广泛应用于多个领域<sup>[46,50,58,65-66]</sup>。NASA-TLX量表涉及六项指标:精神需求、身体需求、时间需求、性能、努力、挫折感,通过计算子项的加权平均值,可以获得衡量驾驶安全的整体工作量分数。也有研究开发其他主观评估指标用以测量驾驶员工作量<sup>[52]</sup>。这些主观评估指标可以直接获得驾驶员的感受,但易受参与者主观倾向的影响。基于生理信号的客观指标已被证实在认知负荷评估中具有有效性<sup>[73]</sup>。

驾驶绩效主要评估的是驾驶员对车辆的控制行为。对驾驶绩效的评估可以通过让用户保持车速在车道内行驶以及应对突发事件的能力来测量,用于评估的指标包括对车辆的控制,如速度保持(车速<sup>[38,46,64,66]</sup>、纵向加速度<sup>[64]</sup>、横向加速度<sup>[64]</sup>),跟车行为(车辆位置<sup>[38]</sup>、行人到车辆的距离<sup>[38]</sup>),以及事件监测(如反应时间<sup>[37,46]</sup>、接管成功率<sup>[46]</sup>、响应时间<sup>[11,58]</sup>)。

### 3.2.2 效能层级

效能是智能汽车交互界面评估的另一个重要内容。对效能的评估可以通过测量工效绩效来进行。任务完成情况(如任务完成时间<sup>[11]</sup>、任务响应时间<sup>[42]</sup>、任务完成速度<sup>[67]</sup>)、任务出错情况(如错误率<sup>[50]</sup>)等指标很好地反映了系统的性能。可用性评估也被用于

智能汽车驾驶效能的评估。研究者使用系统可用量表(System Usability Scale, SUS)对具有视觉和听觉界面的驾驶模拟器的可用性进行了评估<sup>[53]</sup>。SUS量表分为有效性/易学性、使用效率/可用性、满意度三个子量表,每个子量表包含3~4个问题。SUS量表作为标准化的可用性问卷被广泛应用于其他研究以测量系统的性能<sup>[66,70]</sup>。Jahani等<sup>[54]</sup>旨在设计适合智能车辆界面的手势。为了实现这一目标,他们针对主要车辆和次要任务开发了18个空中手势,对于每个手势,要求参与者使用从1(非常有用)到5(完全没有用)的五点李克特量表对一系列任务手势可用性进行排名。结果表明,使用空中手势可将驾驶错误减少50%左右。

### 3.2.3 感性体验层级

近年来,人的心理因素受到广泛重视。感性体验是心理和情感层面上的目标,在系统中感知到的个性会影响用户的感知,从而影响他们对系统的理解和相关判断<sup>[74]</sup>。通过“感性体验”来描述用户在使用和感知系统时的感受,并特别关注他们的情感状态和态度。情感体验包括所有的情感反应和享乐方面,例如安全感<sup>[39,44,56,68-69]</sup>、吸引力<sup>[40-41]</sup>、趣味性<sup>[51]</sup>、舒适度<sup>[42,51,69]</sup>。态度是指人对特定对象的稳定心理倾向,包括用户参与感(如个人偏好<sup>[35,38,45,51]</sup>、满意度<sup>[19,42,44,51,53,66,70]</sup>、信任<sup>[34,38,41,48-49,51,56]</sup>)。

总结研究中采用的评估指标,见图5,为用户体验评估指标的选择提供了参考。

## 3.3 评估方法

用户体验领域存在多种评估方法。在选择评估方法时,需要考虑数据类型、评估阶段、所需资源、评估执行者、评估对象和任务以及使用环境<sup>[11]</sup>。由于用户体验的复杂性,确定合适且可行的方法、工具并不是一项简单的任务。已有多项研究对评估方法的属性及特征进行了探讨。



图5 用户体验评估指标模型  
Fig.5 Model of UX evaluation metric

用户体验评估方法可以分为实证性方法和分析性方法<sup>[75]</sup>。实证性方法通过对使用过程进行观察,从用户身上获取表现数据。分析性方法围绕设计内在属性开展。部分评估方法兼具实证性和分析性方法的特点。

Vermeeren 等<sup>[76]</sup>从学术界和工业界收集了 96 种用户体验评估方法,并按不同的标准进行分析:可用性、信息来源、使用场合、产品开发阶段、用户体验阶段、收集的数据类型、应用、时间需求、其他需求、方法来源。分析结果揭示了用户体验评估方法的开发需求。

为了更好地理解何时使用哪种方法, Rohrer<sup>[77]</sup>提出了一个三维框架,该框架将评估方法分为三个维度:态度与行为、定性与定量、使用情境,同时提出在选择评估方法时需要考虑产品开发阶段及其相关目标。

基于上述讨论,给出一种获得评估方法的参考,在确定方法时可以从三个维度进行选择 and 衡量:

1) 研究对象: 态度研究与行为研究。态度和行为可以通过对比“人们所说的”和“人们所做的”来概括。态度研究的目的通常是理解或衡量人们所陈述的信念,这就是为什么态度研究在营销部门中被大量使用的原因<sup>[77]</sup>。聚焦行为的研究方法则旨在了解人们使用相关产品或服务“做什么”。在人机工程学领域,对人的研究涉及人的行为表现、心理状态以及心理状态对生理状态的影响<sup>[78]</sup>。人的心理生理状态应当纳入广义的行为研究范畴。

2) 方法属性: 定性方法与定量方法。定性方法更适合回答有关为什么或如何解决的问题,而定量方法在回答有多少的问题方面做得更好。

3) 质量效率: 该维度与评估质量及效率的权衡有关。不考虑成本,为获取更有效、更彻底的反馈,可以选择基于实验室或自然使用情境的评估方法。此类评估在受控的环境中进行,获取的反馈更为深入。用户体验评估也可以更快、更灵活、成本更低,例如选择设计走查作为收集早期阶段反馈的手段。在实践中,评估方法是考虑评估需求并衡量评估质量及效率后决定的。

根据对应的目的,每一维度都提供了选择评估方法的途径,见图 6。

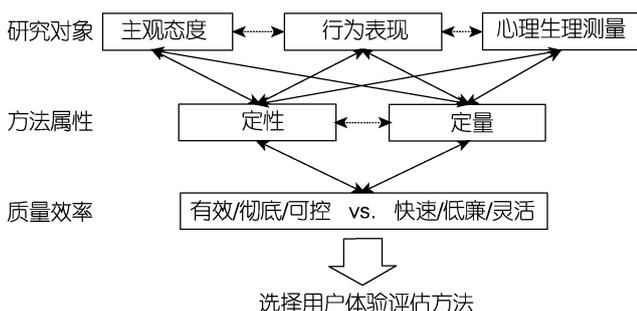


图 6 选择用户体验评估方法  
Fig.6 Selection of UX evaluation method

在智能汽车交互体验的评估中,定量行为数据一般源于实验室或真实环境的测量。专家或用户根据设定的任务在驾驶模拟器<sup>[33,37-38]</sup>等环境中进行测试,并记录被试者在测试过程中的表现、行为和车辆参数的变化。在真实道路上驾驶时,驾驶员会更加警觉,因为他们知道放松可能会使他们面临危险,因此在现实世界的交通环境中收集的数据更加准确。但模拟器提供了一些优点,如行程复制的便利性、可控的环境。一些研究使用驾驶模拟器实验室替代真车环境,以测量车辆运动<sup>[79]</sup>。

关于定性的行为评估,行为观察被用以从特定任务期间的人机交互中收集数据。行为观察包括直接观察和记录观察。直接观察是指研究人员对用户与车辆之间的交互进行监控并记录观察结果。在记录观察中,研究人员不在会议中,通过视频记录的方式对观察进行捕捉。有时将两种技术结合进行使用。例如,专家根据对实际情况的了解(如面部表情的细微变化、头部移动或视线在前方道路和镜子之间切换、对打开收音机或接听电话等请求的反应或其他指示性反应)进行评估,同时通过视频回放检查评估数据以分析专家判断是否正确<sup>[64]</sup>。

定量态度数据通常使用量表来获取。研究人员在测试后使用量表来获取参与者的定量主观态度,以避免在驾驶过程中因使用它们而导致驾驶员分心。通用标准化量表是可以重复使用的问卷,具有科学的普适性。当前应用最广泛的标准化量表有:系统可用性(SUS)问卷、整体评估可用性问卷(Post-study System Usability Questionnaire, PSSUQ)、用户体验问卷(User Experience Questionnaire, UEQ)等。

为了获取定性态度数据,访谈是广泛使用的评估方法。由于量表等定量评价方法获得的数据受评价者的主观影响较大,在实际研究中,通常结合定性评价方法,深入探讨评价者的原因、观点、需求和想法。访谈可以提供通过标准化方法无法获得的见解。

为了进行成功的用户体验评估,智能汽车开发人员或用户体验研究人员应该针对特定领域选择合适的用户体验评估方法<sup>[80]</sup>。在大多数情况下,仅使用一种方法来评估智能汽车的交互体验并不全面。研究人员结合主观心理评估和客观生理评估等方法以获得更客观的用户体验<sup>[81]</sup>,例如同时使用基于实验室和自我报告的评估方法<sup>[33,42]</sup>。

研究中使用的评估方法见表 4。

## 4 讨论

智能汽车提高了道路运输系统的安全性、效率和舒适性。智能汽车交互体验的评估围绕用户的安全需求、效能需求和感性体验需求进行。针对不同的用户需求,应选择不同的评估内容侧重点。行车安全与驾驶员的注意力密切相关,超载或欠载是导致驾驶性

表4 研究中使用的评估方法  
Tab.4 Evaluation methods used in the study

研究对象	方法属性	质量效率	评估方法	评估工具
态度评估	定量	有效、彻底、可控	量表	李克特量表 <sup>[19,34-36,38-42,46,48-49,51-54,56-58,65-69,70,82]</sup> 、语义差异量表 <sup>[47,56-57,66]</sup> 、形容词词性表 <sup>[57]</sup>
	定性	快速、低廉、灵活	访谈	开放式问卷 <sup>[45]</sup> 、访谈提纲 <sup>[39,42,44-45,47-48,51,56,67]</sup>
行为评估	定量	有效、彻底、可控	车辆监测	驾驶模拟器 <sup>[33-34,37-38,42,46,50,56,58,66]</sup>
	定量/定性	有效、彻底、可控 快速、低廉、灵活	行为观察	直接观察 <sup>[37,50,64]</sup> 、记录观察 <sup>[64]</sup>
心理生理测量	定量	有效、彻底、可控	心电测量	心电仪 <sup>[49,64]</sup>
	定量	有效、彻底、可控	皮电测量	温度传感器 <sup>[49]</sup> 、皮肤导电 <sup>[64]</sup>
	定量	有效、彻底、可控	眼动追踪	眼动仪 <sup>[35,37,58]</sup>

能不佳和事故风险高的主要原因,可以通过对驾驶员性能和车辆性能的评估来衡量系统的有效性。自动驾驶系统的主要目标之一是通过减少驾驶任务带来的驾驶需求来提高驾驶员的舒适度,用户体验已成为影响用户购买决策的重要因素。

负面的用户体验可能会导致不良后果,如负面信任或消极的使用意愿。为了让智能汽车为人类带来长期价值,积极的用户体验是必需的。实现积极的用户体验需要智能系统的设计和迭代评估。用户体验评估可以对设计和开发过程中的每一个步骤进行概述,并在开发早期协助处理可能的错误或缺陷。早期的评估侧重于寻找用户体验问题的定性数据,定量数据主要在之后的交付和迭代中使用。评估数据可以是定性的或定量的,也可以根据研究对象分为态度评价或行为评价。这两个维度可以分成四类评估方法:定性态度评估(如用户访谈)、定量态度评估(如量表和问卷)、定性行为评估(如关键事件识别)和定量行为评估(例如基于实验室或真实环境的测试)。选择评估方法需要考虑质量和效率。主观态度评估是用户体验最常用的方法,其操作简单,成本低,但可能存在主观偏差。随着人工智能和大数据的发展,用户体验评估方法正向着量化方向扩展。

本研究的结果(见图3)表明用于智能汽车用户体验评估的技术类似于传统的用户体验评估技术。虽然在目前的文献中鼓励运用其他领域(如互联网产业)的现有实践、技术和方法,但需要针对智能汽车的特点进行调整。在选择和定制适当的用户体验评估技术时,应考虑实际的项目需求。

## 5 结语

本文旨在初步介绍智能汽车交互界面的用户体验评估方法体系。本文从研究中提取数据对结果进行分析和解释,以此回答以下研究问题:(1)评估对象,关于智能汽车交互界面评估了什么;(2)评估指标,智能汽车交互界面的评估涉及哪些方面的内

容;(3)评估方法,在智能车辆人机交互中评估用户体验的方法有哪些。在方法上,本文主要通过系统文献综述,总结该领域的现有文献。制定检索字符串用于之前提到的数据库,以获得相关结果。根据纳入和排除标准对初步结果进行筛选,最终选择了36篇与本研究相关的文献纳入系统文献综述。需要说明的是,纳入的研究只是有关该主题的现有研究的一部分,还有很多特殊情境的研究方法并没有涉及。例如群体情境意识下的评测方法等在本文中就没有涉及<sup>[83]</sup>。这也是本文的局限之处。

正如本研究中所讨论的,对于智能汽车,强调积极的用户体验的必要性非常重要。在智能汽车开发的早期阶段评估用户体验有利于立即采取行动、修改设计,以节省时间和费用。目前,已有多种方法用以评估智能汽车交互界面的用户体验。根据用户体验目标选择的最佳方法,可以将过程引导至预期的质量和方向。

## 参考文献:

- [1] SHLADOVER S E. Connected and Automated Vehicle Systems: Introduction and Overview[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2018, 22(3): 190-200.
- [2] 钱晓松,杨建明,孙远波.通用设计视角下的全自动驾驶汽车用户体验要素探析[J].装饰,2020(11):29-34. QIAN Xiao-song, YANG Jian-ming, SUN Yuan-bo. Universal Design in Fully Autonomous Vehicles: The New Elements of User Experience[J]. Zhuangshi, 2020(11): 29-34.
- [3] FAGNANT D J, KOCKELMAN K. Preparing a Nation for Autonomous Vehicles: Opportunities, Barriers and Policy Recommendations[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2015, 76: 111-180.
- [4] 李志强,戴一凡,李升波,等.智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势[J].汽车安全与节能学报,2017,8(1):1-14. LI Ke-qiang, DAI Yi-fan, LI Sheng-bo, et al. State-of-the-Art and Technical Trends of Intelligent and Con-

- nected Vehicles[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2017, 8(1): 1-14.
- [5] 中国汽车工程协会. 节能与新能源汽车技术路线图[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.  
China Society of Automotive Engineers. *Technology Roadmap for Energy Saving and New Energy Vehicles*[M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [6] YANG Z, ZENG J, HUANG X, et al. Research on Man-Machine Interface Design Based on Intelligent Vehicle[C]. *International Conference on Human-Computer Interaction*, 2022.
- [7] 谭浩, 孙家豪, 关岱松, 等. 智能汽车人机交互发展趋势研究[J]. *包装工程*, 2019, 40(20): 32-42.  
TAN Hao, SUN Jia-hao, GUAN Dai-song, et al. Development Trend of Human-Computer Interaction in Intelligent Vehicles[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(20): 32-42.
- [8] BISHOP R. Intelligent Vehicle Applications Worldwide[J]. *IEEE Intelligent Systems and Their Applications*, 2000, 15(1): 77-80.
- [9] PETTERSSON I, JU W. Design Techniques for Exploring Automotive Interaction in the Drive Towards Automation[C]. *Proceedings of the 2017 conference on designing interactive systems*, 2017.
- [10] ZHANG J, SHU Y, YU H. Human-Machine Interaction for Autonomous Vehicles: a Review[C]. *International Conference on Human-Computer Interaction*, 2021.
- [11] SU Y, TAN Z, DAI N. Changes in Usability Evaluation of Human-Machine Interfaces from the Perspective of Automated Vehicles[C]. *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, 2021.
- [12] 支锦亦, 杜洋, 冯纾. 车载信息系统界面图文设计及其视认知特性研究综述[J]. *包装工程*, 2020, 41(10): 62-68.  
ZHI Jin-yi, DU Yang, FENG Shu. Review on the Graphic Design and Perceptual Characteristics of Automobile System Interface[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(10): 62-68.
- [13] LAU M, JIPP M, OEHL M. One Solution Fits All? Evaluating Different Communication Strategies of a Light-Based External Human-Machine Interface for Differently Sized Automated Vehicles from a Pedestrian's Perspective[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2022, 169: 106641.
- [14] DEY D, HABIBOVIC A, LÖCKEN A, et al. Taming the Ehmi Jungle: a Classification Taxonomy to Guide, Compare, and Assess the Design Principles of Automated Vehicles' External Human-Machine Interfaces[J]. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2020, 7: 100174.
- [15] DEB S, STRAWDERMAN L J, CARRUTH D W. Investigating Pedestrian Suggestions for External Features on Fully Autonomous Vehicles: a Virtual Reality Experiment[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and behaviour*, 2018, 59: 135-149.
- [16] 胡宏宇, 刁小桔, 高菲, 等. 自动驾驶汽车-行人交互研究综述[J]. *汽车技术*, 2021, 552(9):1-9.  
HU Hong-yu, DIAO Xiao-ju, GAO Fei, et al. Review of Interaction Between Autonomous Vehicles and Pedestrians[J]. *Automobile Technology*, 2021, 552(9):1-9.
- [17] 王瑞, 董石羽, 肖江浩. 智能汽车界面设计的人机自然交互研究[J]. *机械设计*, 2019, 36(2): 132-136.  
WANG Rui, DONG Shi-yu, XIAO Jiang-hao. Research on Human-Machine Natural Interaction of Intelligent Vehicle Interface Design[J]. *Journal Of Machine Design*, 2019, 36(2): 132-136.
- [18] 闫云豪, 周荣刚, 于孟利. 智能驾驶汽车界面的布局设计研究[J]. *工业工程*, 2018, 21(1): 96.  
YAN Yun-hao, ZHOU Rong-gang, YU Meng-li. Intelligent Driving Interface Layout and Design Research[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2018, 21(1): 96.
- [19] ZHANG R, QIN H, LI J T, et al. Influence of Position and Interface for Central Control Screen on Driving Performance of Electric Vehicle[C]. *International Conference on Human-Computer Interaction*, 2020.
- [20] 张茫茫. 基于汽车的多主体多通道交互模型研究[J]. *包装工程*, 2017, 38(20): 7-12.  
ZHANG Mang-mang. Multi-Agent & Multi-Channel Interaction Design Based on Vehicle[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(20): 7-12.
- [21] 谭征宇, 杨文灵. 面向自然交互的声音通感设计研究[J]. *包装工程*, 2018, 39(8): 67-72.  
TAN Zheng-yu, YANG Wen-ling. Sound Synaesthesia Design Based on the Natural Interactions[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(8): 67-72.
- [22] HARTSON R, PYLA P S. *The Ux Book: Agile Ux Design for a Quality User Experience*[M]. Morgan Kaufmann, 2019.
- [23] NORMAN D, MILLER J, HENDERSON A. What You See, some of What's in the Future, and how we Go about doing It: HI at Apple Computer[C]. *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems*, 1995.
- [24] BERNI A, BORGIANI Y. Making Order in User Experience Research to Support Its Application in Design and beyond[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(15): 6981.
- [25] ORTIZ NICOLAS J C, AURISICCHIO M. The Scenario of User Experience[C]. *DS 67-7: Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11)*, 2011.
- [26] ALBEN L. Quality of Experience: Defining the Criteria for Effective Interaction Design[J]. *Interactions*, 1996, 3(3): 11-15.
- [27] ISO. Ergonomics of Human-System Interaction—Part 11: Usability: Definitions and Concepts[EB/OL]. (2023-

- 01-07)[2023-11-07]. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9241:-11:ed-2:v1:en>.
- [28] 李勇, 郝瑞敏, 林晓鹏. 用户体验视角下的人车交互设计研究[J]. 美术学报, 2022(6): 132-138.
- LI Yong, HAO Rui-min, LIN Xiao-peng. Research on Human-Vehicle Interaction Design from the Perspective of User Experience[J]. Art Journal, 2022(6):132-138.
- [29] 杨一翁, 丁梦悦, 纪雪洪. 用户体验因素和类型影响品牌资产机理探讨——来自“用户企业”蔚来汽车用户体验数据的实证研究[J]. 中央财经大学学报, 2021(7): 116-128.
- YANG Yi-weng, DING Meng-yue, JI Xue-hong. The Research on Influencing Mechanism of Factors and Types of User Experience on Brand Equity: An Empirical Study of User Experience Data from the "User Enterprise" NIO[J]. Journal of Central University of Finance & Economics, 2021(7): 116-128.
- [30] LUDWIG R, BACHMANN A, BUCHHOLZ S, et al. How to Measure UX and Usability in Today's Connected Vehicles[C]. Human Interaction, Emerging Technologies and Future Applications III: Proceedings of the 3rd International Conference on Human Interaction and Emerging Technologies: Future Applications (IHET 2020), 2021.
- [31] LIU Y, HANSEN J H L. A Review of UTDrive Studies: Learning Driver Behavior from Naturalistic Driving Data[J]. IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems, 2021, 2: 338-346.
- [32] LIU A, TAN H. Research on the Trend of Automotive User Experience[C]. International Conference on Human-Computer Interaction, 2022.
- [33] LI X, SCHROETER R, RAKOTONIRAINY A, et al. Effects of Different Non-Driving-Related-Task Display Modes on Drivers' Eye-Movement Patterns during Take-over in an Automated Vehicle[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2020, 70: 135-148.
- [34] DETJEN H, SALINI M, KRONENBERGER J, et al. Towards Transparent Behavior of Automated Vehicles: Design and Evaluation of HUD Concepts to Support System Predictability through Motion Intent Communication[C]. Proceedings of the 23rd International Conference on Mobile Human-Computer Interaction, 2021.
- [35] YANG H, ZHANG J, WANG Y, et al. Exploring Relationships between Design Features and System Usability of Intelligent Car Human-Machine Interface[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2021, 143: 103829.
- [36] PERRIER M J R, LOUW T L, CARSTEN O. User-Centred Design Evaluation of Symbols for Adaptive Cruise Control (ACC) and Lane-Keeping Assistance (LKA)[J]. Cognition, Technology & Work, 2021, 23(4): 685-703.
- [37] WEIDNER F, BROLL W. Smart 3D TOR: Intelligent Warnings on Large Stereoscopic 3D Dashboards during Take-Overs[C]. Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Pervasive Displays, 2019.
- [38] HOLLÄNDER K, COLLEY A, MAI C, et al. Investigating the Influence of External Car Displays on Pedestrians' Crossing Behavior in Virtual Reality[C]. Proceedings of the 21st International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, 2019.
- [39] LÖCKEN A, GOLLING C, RIENER A. How should Automated Vehicles Interact with Pedestrians?: A Comparative Analysis of Interaction Concepts in Virtual Reality[C]. Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, 2019.
- [40] MUTHUMANI A, DIEDERICHS F, GALLE M, et al. How Visual Cues on Steering Wheel Improve Users' Trust, Experience, and Acceptance in Automated Vehicles[C]. International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, 2020.
- [41] LÖCKEN A, FRISON A K, FAHN V, et al. Increasing User Experience and Trust in Automated Vehicles via an Ambient Light Display[C]. MobileHCI '20: 22nd International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, 2020.
- [42] You F, Li Y, Hansen P, et al. Interface Color Design of Intelligent Vehicle Central Console[C]. International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, 2021.
- [43] RIEGLER A, WINTERSBERGER P, RIENER A, et al. Investigating User Preferences for Windshield Displays in Automated Vehicles[C]. Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Pervasive Displays, 2018.
- [44] MEYER R, GRAF VON SPEE R, ALTENDORF E, et al. Gesture-Based Vehicle Control in Partially and Highly Automated Driving for Impaired and Non-impaired Vehicle Operators: A Pilot Study[C]. International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction, 2018.
- [45] XU J, CHEN J, LIU Z. Research on Active Interaction and User Experience of Community Intelligent Vehicle System[C]. 2021 International Symposium on Artificial Intelligence and its Application on Media (ISAAM), 2021.
- [46] SANGHAVI H, JEON M, NADRI C, et al. Multimodal Takeover Request Displays for Semi-automated Vehicles: Focused on Spatiality and Lead Time[C]. International Conference on Human-Computer Interaction, 2021.
- [47] LARGE D R, HARRINGTON K, BURNETT G, et al. To Please in a Pod: Employing an Anthropomorphic Agent-

- Interlocutor to Enhance Trust and User Experience in an Autonomous, Self-Driving Vehicle[C]. Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, 2019.
- [48] AREMYR E, JÖNSSON M, STRÖMBERG H. Anthropomorphism: An Investigation of Its Effect on Trust in Human-Machine Interfaces for Highly Automated Vehicles[C]. Congress of the International Ergonomics Association, 2019.
- [49] EIMONTAITE I, VOINESCU A, ALFORD C, et al. The Impact of Different Human-Machine Interface Feedback Modalities on Older Participants' User Experience of CAVs in a Simulator Environment[C]. International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, 2020.
- [50] RIEGLER A, AKSOY B, RIENER A, et al. Gaze-Based Interaction with Windshield Displays for Automated Driving: Impact of Dwell Time and Feedback Design on Task Performance and Subjective Workload[C]. AutomotiveUI '20: 12th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, 2020.
- [51] YAN Q, WANG Y, CHEN J. The Study of the User Preferences of the Request Channel on Taking Over During Level-3 Automated Vehicles' Driving Process[C]. International Conference on Human-Computer Interaction, 2021.
- [52] BETANCUR J A, GÓMEZ N, CASTRO M, et al. User Experience Comparison among Touchless, Haptic and Voice Head-up Displays Interfaces in Automobiles[J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 2018, 12(4): 1469-1479.
- [53] GARCÍA-DÍAZ J M, GARCÍA-RUIZ M A, AQUINO-SANTOS R, et al. Evaluation of a Driving Simulator with a Visual and Auditory Interface[C]. Latin American Conference on Human Computer Interaction, 2013.
- [54] JAHANI H, ALYAMANI H J, KAVAKLI M, et al. User Evaluation of Hand Gestures for Designing an Intelligent In-Vehicle Interface[C]. International Conference on Design Science Research in Information System and Technology, 2017.
- [55] JI W, LIU R, LEE S H. Do Drivers Prefer Female Voice for Guidance? An Interaction Design About Information Type and Speaker Gender for Autonomous Driving Car[C]. International Conference on Human-Computer Interaction, 2019.
- [56] FAAS S M, MATHIS L A, BAUMANN M. External HMI for Self-Driving Vehicles: Which Information shall be Displayed?[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2020, 68: 171-186.
- [57] KRÜGER S, BOSCH E, IHME K, et al. In-Vehicle Frustration Mitigation via Voice-User Interfaces—A Simulator Study[C]. International Conference on Human-Computer Interaction, 2021.
- [58] MAHAJAN K, LARGE D R, BURNETT G, et al. Exploring the Benefits of Conversing with a Digital Voice Assistant during Automated Driving: A Parametric Duration Model of Takeover Time[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2021, 80: 104-126.
- [59] Garrett J J. The elements of user experience—centered design for the web and beyond[M]. Berkeley: New Riders, 2011.
- [60] GUDUR R, BLACKLER A, POPOVIC V, et al. Redundancy in Interface Design and Its Impact on Intuitive Use of a Product in Older Users[C]. International Association of Societies of Design Research 2009 Proceedings: Design Rigor and Relevance, 2009.
- [61] MASLOW A H. A Theory of Human Motivation[J]. Psychological review, 1943, 50(4): 370.
- [62] ZUNJIC A. A New Definition of Ergonomics[J]. IETI Transactions on Ergonomics and Safety, 2017, 1(1): 1-6.
- [63] 谭浩, 谭征宇, 景春晖. 汽车人机交互界面设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- TAN Hao, TAN Zheng-yu, JING Chun-hui. Automotive Human Machine Interface Design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- [64] XIE Y, MURPHEY Y L, KOCHHAR D S. Personalized Driver Workload Estimation Using Deep Neural Network Learning from Physiological and Vehicle Signals[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2020, 5(3): 439-448.
- [65] ZHAO R, LIU Y, LI T, et al. A Preliminary Evaluation of Driver's Workload in Partially Automated Vehicles[C]. International Conference on Human-Computer Interaction, 2022.
- [66] VAEZIPOUR A, RAKOTONIRAINY A, HAWORTH N, et al. A Simulator Evaluation of In-Vehicle Human Machine Interfaces for Eco-Safe Driving[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, 118: 696-713.
- [67] Liu Y, Zhang J, Li Y, et al. Human-Computer Collaborative Interaction Design of Intelligent Vehicle—A Case Study of HMI of Adaptive Cruise Control[C]. International Conference on Human-Computer Interaction, 2021.
- [68] Cao J, Lin L, Zhang J, et al. The Development and Validation of the Perceived Safety of Intelligent Connected Vehicles Scale[J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 154: 106092.
- [69] Liu P, Jiang Z, Li T, et al. User Experience and Usability when the Automated Driving System Fails: Findings from a Field Experiment[J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 161: 106383.

- [70] VOINESCU A, MORGAN P L, ALFORD C, et al. The Utility of Psychological Measures in Evaluating Perceived Usability of Automated Vehicle Interfaces—a Study with Older Adults[J]. *Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour*, 2020, 72: 244-263.
- [71] 张旭欣, 王雪松, 马勇, 等. 驾驶行为与驾驶风险国际研究进展[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(6): 1-17.  
ZHANG Xu-xin, WANG Xue-song, MA Yong, et al. International Research Progress on Driving Behavior and Driving Risks[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(6): 1-17.
- [72] NASA. NASA TLX: Task Load Index[EB/OL]. (2020-12-15) [2022-11-07]. <https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/tlx/index.php>.
- [73] 高振海, 段立飞, 赵会, 等. 基于生理信号的多任务下驾驶员认知负荷的评定[J]. *汽车工程*, 2015, 37(1): 33-37.  
GAO Zhen-hai, DUAN Li-fei, ZHAO Hui, et al. Assessment of Driver's Cognitive Workload under Multi-task Based on Physiological Signals[J]. *Automotive Engineering*, 2015, 37(1): 33-37.
- [74] CRILLY N, MOULTRIE J, CLARKSON P J. Seeing Things: Consumer Response to the Visual Domain in Product Design[J]. *Design Studies*, 2004, 25(6): 547-577.
- [75] HARTSON H R, ANDRE T S, WILLIGES R C. Criteria for Evaluating Usability Evaluation Methods[J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2001, 13(4): 373-410.
- [76] VERMEEREN A P O S, LAW E L C, ROTO V, et al. User Experience Evaluation Methods: Current State and Development Needs[C]. *Proceedings of the 6th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Extending Boundaries*, 2010.
- [77] ROHRER C. When to Use Which User-Experience Research Methods[J]. Nielsen Norman Group, 2014, 12: 21.
- [78] 赵江洪. 人机工程学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
ZHAO Jiang-hong. *Human Engineering*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [79] DARZI A, GAWEESH S M, AHMED M M, et al. Identifying the Causes of Drivers' Hazardous States Using Driver Characteristics, Vehicle Kinematics, and Physiological Measurements[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2018, 12: 568.
- [80] HASSENZAHN M. User Experience and Experience Design[J]. *The Encyclopedia of Human-computer Interaction*, 2013, 2: 1-14.
- [81] 唐帮备, 郭钢, 王凯, 等. 联合眼动和脑电的汽车工业设计用户体验评选[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(6): 1449-1459.  
TANG Bang-bei, GUO Gang, WANG Kai, et al. User Experience Evaluation and Selection of Automobile Industry Design with Eye Movement and Electroencephalogram[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(6): 1449-1459.
- [82] FORSTER Y, HERGETH S, NAUJOKS F, et al. Self-Report Measures for the Assessment of Human-Machine Interfaces in Automated Driving[J]. *Cognition, Technology & Work*, 2020, 22(4): 703-720.
- [83] 由芳, 谢雨锷, 岳天阳, 等. 基于团队态势感知的汽车 HMI 评测与设计方法[J]. *图学学报*, 2021, 42(6): 1027-1034.  
YOU Fang, XIE Yu-kun, YUE Tian-yang, et al. A Team Situation Awareness-Based Approach to Automotive HMI Evaluation and Design[J]. *Journal of Graphics*, 2021, 42(6): 1027-1034.

责任编辑: 马梦遥