

智能汽车中基于信任的接管系统交互设计

由芳^{1,2}, 张景卉¹, 张俊^{1,3}, 邓惠君¹, 刘雨佳^{1,3}

(1.同济大学 艺术与传媒学院, 上海 201804; 2.中山大学 深圳研究院, 深圳 518057;
3.同济大学 设计创意学院, 上海 200092)

摘要: **目的** 以 Level 3 级别自动驾驶汽车的接管系统作为主要研究对象, 探究 HMI 设计对驾驶员在典型接管场景下的驾驶信任度的影响。 **方法** 采取了文献查阅、案例研究、理论分析、用户研究、系统设计、实验评估等研究方法, 基于驾驶信任度的理论模型, 设计典型驾驶场景下的人机交互界面, 增加驾驶员对接管系统的信任度, 提高使用 Level 3 自动驾驶的安全性和舒适性。对 HMI 设计方案制作了关键原型和效果图, 并在模拟驾驶器上进行了设计验证。 **结果** 对方向盘进行灯带变化设计和中控信息基于信任的透明度设计, 有效提高了接管场景下人对自动化系统的信任度, 并提高了接管效率和用户满意度。 **结论** 信任度是在用户与产品交互的过程中不断发展变化的, HMI 设计应该考虑在交互过程中人机信任的因素。

关键词: 汽车 HMI 设计; Level 3 自动驾驶; 信任度; 接管系统

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)06-0020-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.06.004

Interaction Design for Trust-based Takeover Systems in Smart Cars

YOU Fang^{1,2}, ZHANG Jing-hui¹, ZHANG Jun^{1,3}, DENG Hui-jun¹, LIU Yu-jia^{1,3}

(1.College of Art and Media, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2.Shenzhen Research Institute, Zhongshan University, Shenzhen 518057, China;

3.College of Design and Innovation, Tongji University, Shanghai 200092, China)

ABSTRACT: Using the takeover system of Level 3 autonomous vehicles as the main research object, the paper investigates the effect of HMI design on driver's driving trust in typical takeover scenarios. Research methods such as literature review, case study, theoretical analysis, user study, system design, and experimental evaluation were adopted to design the human-computer interaction interface under typical driving scenarios based on the theoretical model of driving trust, to increase the driver's trust in the takeover system, and to improve the safety and comfort of using Level 3 autonomous driving. Key prototypes and effect drawings were produced for the HMI design solution, and the design was verified on the simulated driver. The light-band change design for the steering wheel and the trust-based transparency design for the central control information effectively improve human trust in the automation system in the takeover scenario, and increase the takeover efficiency and user satisfaction. Trust is an important dimension to consider in HMI design, and the interaction design of future self-driving cars should focus on this.

KEY WORDS: automotive HMI design; Level 3 autonomous driving; trust; takeover system

收稿日期: 2021-02-03

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB1004903)、国家社科基金后期资助项目 (19FYSB04); 百度 Apollo (wz0060020192097); 上海汽车工业科技发展基金 (1717); 同济大学第十二期精品实验项目(0600104086); 2020 年同济大学研究生教育研究与改革项目 (2020JC35); 深圳市协同创新科技计划-国际科技合作项目 (GJHZ20190823164803756)

作者简介: 由芳 (1974—), 女, 新疆人, 博士, 同济大学艺术与传媒学院教授, 主要研究方向为汽车交互设计、用户行为分析、用户体验、数字媒体艺术。

通信作者: 张俊 (1979—), 男, 江苏人, 同济大学设计创意学院博士生, 主要研究方向为汽车 HMI、人机交互、人机协作。

汽车智能化发展使得高级驾驶辅助系统（Advanced Driver Assistant System, ADAS）正朝着完全自动驾驶（Fully Automated Driving, FAD）转变^[1]。伴随着自动驾驶功能的出现，车辆和人逐渐被视为一个联合的认知系统，这两个要素需要共同配合才能提供安全舒适的驾驶体验。同时，自动驾驶汽车智能度的提高，使得汽车从单纯的交通工具向智能化可移动的空间转变^[2]。

在与智能设备的交互中，人类对机器保持适当的信任度有利于工作效率的提高，同时也对安全性有正向影响。“接管”，作为自动驾驶中人机合作的一个重要场景，是自动驾驶人因工效学研究的重点。众多因素影响着接管的成功，如人口学因素、非驾驶任务、接管场景、接管时间、驾驶员认知等，其中人对自动化的信任度作为驾驶员认知的重要组成部分，对顺利接管起着重要的作用。信任会影响人对自动化系统的使用，过度信任和缺乏信任都会影响接管。根据汽车智能化程度不同可以进行分级，目前采用较多的为国际自动机工程师学会（SAE International）的 6 级分类：Level 0 无自动驾驶、Level 1 驾驶辅助、Level 2 部分自动驾驶、Level 3 有条件自动驾驶、Level 4 高度自动驾驶和 Level 5 完全自动驾驶^[3]。以 Level 3 自动驾驶为例，人要监督自动化系统的驾驶任务，并被作为后备力量随时准备接管控制权。驾驶员过度依赖自动化系统会导致过度依赖的心理模型，这会使得驾驶员关注道路的时间变少，而从事非驾驶任务的时间增多^[4]，一旦出现车辆需要驾驶员接管，但驾驶员无法迅速接管的情况，就会导致严重事故。同时，接管的成败体验也会反过来影响人对自动化的信任度^[5]。目前对于驾驶接管问题的研究多集中在驾驶员处于非驾驶任务时的接管表现造成的影响、驾驶员态势感知的恢复、不同驾驶场景接管请求的时间，以及对多模态的预警等。而在作为重要认知因素的驾驶信任度方面，还没有完整的探讨。

本文从驾驶信任的角度出发，基于 Level 3 自动驾驶中的典型接管场景，分析了信任的形成和动态变化的机理，着重探索了人机交互过程中影响信任变化的因素，并提出增强信任度的 HMI（Human Machine Interaction）设计方法，结合以人为中心的设计理念设计了以增强驾驶信任为目的接管系统 HMI 交互方案，并对方案从定性和定量的角度进行了评估。结果表明，设计方案有效地提高了用户的信任度、工作效率和体验度。

1 自动化信任与交互设计

1.1 自动驾驶信任理论基础

在人机交互领域，信任被认为是人机团队成功的重要因素^[6]。John D. Lee 等人关于信任的开创性论文

确定了人与自动化合作的两个基本组成部分：信任（trust）和透明度（transparency）^[7]。信任是一种心理现象，是人对于结果的期待或者是对未来事件发生所持有的主观概率^[8]。信任也可以被视为一种态度，它来自对于系统提供信息的印象和过往的使用经验。根据信息、印象和使用经验，用户将形成不同程度的信任，从而产生不同程度的系统依赖（dependence）。

在自动驾驶中，自适应的自动化可以代替操作人的感知能力并协助或代替决策和行动过程^[9-10]。一方面，如果没有信任，即使系统的自动驾驶性能很好，人们也可能不愿意使用而导致其被废弃；另一方面，过多的信任也会导致误用，即以非预期的方式使用系统。这些影响所造成的信任不足（under trust）或者过度信任（over trust）都会导致事故的发生^[11]。因此，校准信任（calibrated trust）可以使人保持“适当”的信任水平，它成为确保在团队成员之间最佳地分配功能，使人机团队之间进行协作的必要条件。

信任的形成是一个动态过程，来自对于系统提供信息的印象和过往的使用经验，并被多种变量影响。Marsh 和 Dibben 将自动化信任分为 3 个类别：倾向性信任（dispositional trust）、情境信任（situational trust）和习得信任（learned trust）^[12]。Hoff 和 Bashir 针对上述研究做了改进，将习得信任分为两种情况：一种是人与自动化交互之前的最初习得（initial learned），另一种是在交互过程中的动态习得（dynamic interaction）^[13]。最初习得是基于先前的经验，而动态习得则是在人与自动化系统交互过程中形成的信任和依赖状态。本文根据以上研究，结合接管中人机交互的过程绘制了接管交互前后信任模型，见改编自 Hoff 和 Bashir 的图 1。

因此为了增强用户对自动化系统的信任度，交互设计需要适应信任的形成和发展的整个过程。如图 1 所示，动态习得的信任受自动化系统表现影响，而自动化系统表现又依赖于适当的设计特征。Hoff 和 Bashir 总结出这样的特征大致包含外观、易于使用、交流方式、透明度和反馈以及控制级别等。

交互界面是人机交流的媒介，应包含以上特征。很多学者针对交互界面进行了更深入的研究，提出了相似的概念。在 HMI 设计方面，如 Fredrick Ekman 等人提出了一种在人机界面中实现信任相关因素的指导框架，包含使用阶段、自动驾驶相关事件、信任影响因素以及从信任角度解释每个事件的级别^[14]。Muir 提出了一种可以用于车辆自动化系统的信任度模型，该模型认定信任度分为 3 个因素，即可预测性、可靠性和忠诚度^[15]。可预测性是可靠性的基础和前提，可依赖性可以使人产生一定的忠诚度。Oliver Carsten 等人提出符合校准信任的 HMI 应该具有如下特征：（1）可观察性，当系统无法处理某个情况时，HMI 应该帮助人类理解这个情况，例如它没有接收到

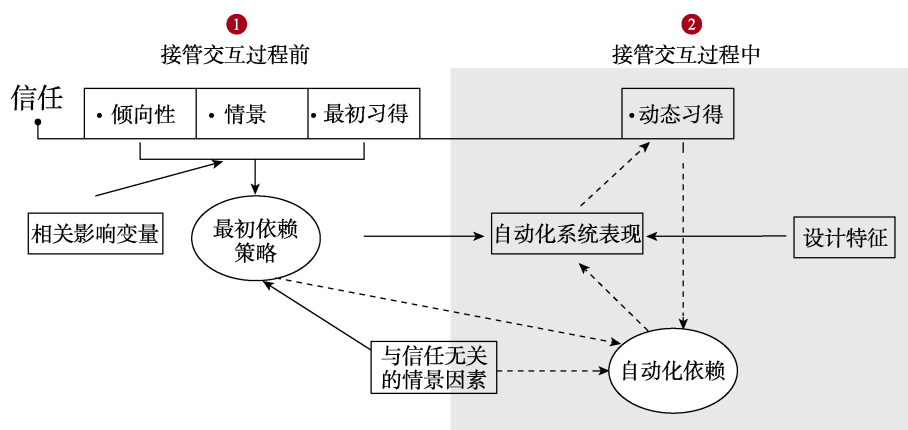


图 1 接管交互前后信任模型

Fig.1 Trust model before and after the takeover interaction

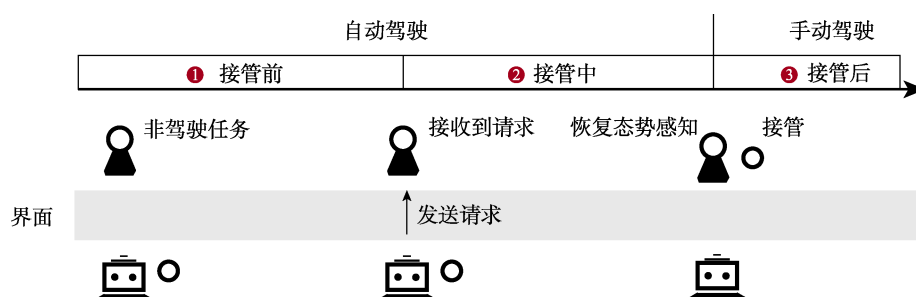


图 2 接管过程

Fig.2 Takeover process

关于存在道路标记的所需信息时,就需要通过信息让人发现这一情况;(2)可预测性,HMI应该允许人类在遇到情况时预先判断系统能否应付;(3)直接性,HMI应该能够直接影响用户,并受到用户的影响,以达到最佳的人机协作结果;(4)及时性,应尽早提供信息,以便驾驶员采取适当的行动^[16]。在HMI信任度测量方面,Yannick Forster等人针对语音交互在有条件的自动驾驶下的应用,在对驾驶员对系统的信任度、拟人化和可用性的评价的研究中,将以前的研究改编成了有20项问题的信任度问卷,针对有无语音提醒的两种设计方案进行评估,根据对自动化信任的理论理解,问卷分为了3个子量表,分别是性能(即自动化的功能),过程(即自动化的操作方式)和目的(即为什么要开发该自动化功能)^[17]。

综上所述,首先,针对改善人机系统信任度的交互设计需要考虑到完整的交互过程,交互前包含倾向性信任、情境信任和最初习得信任,交互中包含动态习得信任。其次,对于人机交互设计需要考虑到对系统透明度的准确表达,可观察性、可预测性和信息反馈的及时性与直接性等。最后,对于自动化信任度的测量根据系统功能的不同具有不同的测量维度,目前常用的是以性能、过程和目的三维度为主的信任度量化评估。本文在对Level 3自动驾驶接管系统的驾驶员信任度进行评估时,也采用这3个维度进行评估。

1.2 接管

在有条件的自动驾驶Level 3级别中,自动驾驶系统承担着驱动车辆保持在运行设计域中的作用。但是,当车辆发生故障,如车辆自动驾驶系统故障,或超出运行设计域时,自动化系统就会发出接管请求,要求驾驶员对车辆进行接管,这种唤醒驾驶员认知和行为的过程称为接管(Takeover)^[3]。

接管的过程分为接管前、接管中、接管后3个组成部分。接管前,自动驾驶负责驾驶任务,而驾驶员负责监控,但也可以从事一些非驾驶任务,如阅读、打电话、娱乐等。一旦自动化系统发出接管请求则进入接管流程,接管中要求驾驶员恢复驾驶认知,及时地获取驾驶情境信息从而快速恢复态势感知,并形成一系列操作计划,选择出最优方式进行接管操作^[18]。接管后,则进入手动驾驶阶段。

因此,接管场景有着明确的交互前(接管前)交互中(接管中)的完整用户体验过程。可使用前文对信任度的分析进行交互设计。

2 基于信任的接管系统HMI设计

2.1 接管场景分析

在本研究中,将驾驶场景主要分为3个阶段:一是自动驾驶阶段(接管前);二是从系统发出接管提

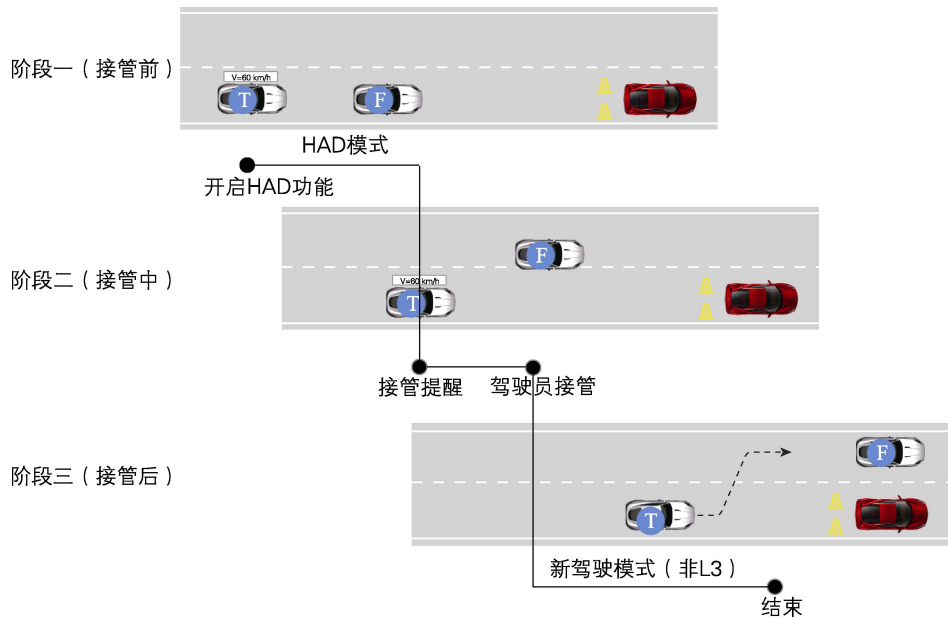


图 3 接管前、中、后三个阶段
Fig.3 Three stages before, during and after taking over

醒到驾驶员做出接管行为（接管中）；三是非 Level 3 级自动驾驶阶段（接管后），见图 3。首先对典型接管场景下的驾驶任务进行分解：本车进入 Level 3 自动驾驶，因道路前方有施工区，故前车向左变道，本车提醒驾驶员进行接管，驾驶员对车辆进行了接管，变道至左边车道行驶。

2.2 接管系统交互设计

2.2.1 信息架构与承载界面

本文分别从两个维度分析接管系统典型应用场景下的车内信息架构设计，分别为时间轴和动态信息。时间轴分为 3 个阶段，第一个阶段为接管前，即进入 HAD 驾驶模式后，驾驶员从事非驾驶任务；第二阶段为接管中，车辆识别到前方障碍区后显示前方障碍区并发出接管提醒——驾驶员进行驾驶接管；第三阶段为接管后，系统提示当下的驾驶模式，驾驶员在新的模式下进行驾驶，避开障碍区。动态信息分为车外动态信息和车内动态信息，车外动态信息主要包括环境信息，例如周边车辆状态、前方障碍区等；车内动态信息主要为 HAD 可用提醒、接管提醒、新模式提醒等信息以及驾驶员的设置操作。

HMI 广义上包含驾驶员和车辆之间显式和隐式通信的全部范围，因此不能将 HMI 仅仅看作是视觉或听觉显示，它也包括所有车辆控制，这些控件提供了供人为输入车辆和向驾驶员反馈车辆信息的通道。车辆反馈不仅包括对踏板和转向传递的传统输入，还可以包括车辆在特定环境下的动态变化以及附加的触觉元素（阻力、脉动、振动、物理指导）等，用于引导和帮助驾驶员。相关研究表明，模块化的视觉信息界面可以在一定程度上提升用户处理信息的准确



图 4 中控仪表界面信息显示
Fig.4 Interface information display of central control instrument

性和效率，并且可以节省用户的认知资源。车内各个设备独立但相互连接，组成了一个整体的生态系统，在进行车内各设备的具体设计时，需要根据各个设备的特点，分别考虑单个设备的信息架构，使得情境信息要素得以有效传达给用户。

本文的以上特点将承载界面定为仪表中控和方向盘。首先，仪表界面作为辅助驾驶的主要界面，与自动驾驶功能相关的视觉反馈多集中于仪表界面显示。根据接管场景的 3 个阶段分别显示当前所需传递给驾驶人的信息，见图 4。

另外，显示技术的发展使得呈现媒介可以扩展到内饰的各个部分，其中方向盘也可以成为未来驾驶环境中的显示载体。为了增加系统的透明度，增强驾驶员在自动驾驶期间进行次要驾驶任务时对当前车辆状态的认知，让其更加及时地意识到自动驾驶级别的改变；并且新的显示技术让驾驶员和乘客可以与车内环境进行身临其境的互动，营造和谐交流的交互氛围。出于以上两点原因，本文设计了方向盘灯带装置，以灯带颜色提示驾驶员当前所处的驾驶模式及警示状态，见图 5。

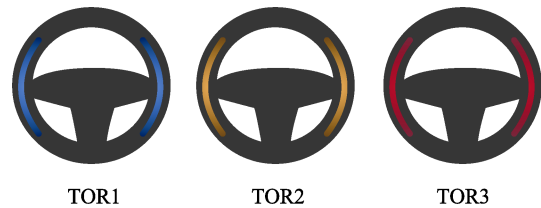


图 5 方向盘灯带设计
Fig.5 Steering wheel light strip design

表 1 接管三阶段界面信息需求调研结果
Tab.1 Results of the survey of interface information requirements in the three phases of the takeover

序号	第一阶段： 接管前	第二阶段： 接管中	第三阶段： 接管后
1	当前车速及限速	接管预提醒	当前驾驶模式提示
2	ACC 状态	接管方式提示	驾驶员责任范围提示
3	HAD 可用提醒	接管原因提示	当前车速及限速

2.2.2 信息需求分析

由于目前市面上 Level 3 自动驾驶量产车辆数量很少，有价值的调研对象也相对局限，为了探索接管 3 个阶段的界面信息需求，本文在模拟器环境下并配合深度访谈问卷进行了典型场景下驾驶员信息需求和信息优先级的调研，结果见表 1。

结果可见驾驶员在典型接管场景下的 3 个阶段对信息的需求有比较大的差别，这主要是由于接管前后驾驶模式发生了明显的变化，驾驶员的注意力和情境意识都有了比较明显的变化。在接管前，驾驶员希望显示较为详细的提示信息，以提升对 HAD 功能的可预测性。在接管中，接管提醒信息是驾驶员最为关注的信息，也是与驾驶安全、驾驶员接管效率直接相关的信息，需要具有较高的显示级别。接管原因提示涉及到系统的透明度表示，驾驶员此刻需要理解机器移交控制权的真实原因。而在接管后，驾驶员回归驾

驶主任务，驾驶模式发生变化，驾驶员需要对当前模式有一定认知，尤其对于新手驾驶员来说，在该情境下需要了解人车新的共驾关系。综上，在整个接管场景中，驾驶员对信息的需求随着情境和驾驶模式的切换而具有明显的改变，这些驾驶信息在干预性界面的设计中可以作为依据。

2.2.3 增强信任度的信息设计

从驾驶员认知方面来说，人机沟通不畅是驾驶员降低对自动驾驶系统信任度的主要原因，通过 HMI 设计让驾驶员对系统的行为和意图有所了解，明确各个情境下的人机责任，提升驾驶员的驾驶信任度是本文 HMI 设计主要的关注点和解决问题的方向。

在典型接管场景中，对接管前（HAD 功能可用提示、HAD 使用阶段），系统发出接管请求，驾驶员接管后进入非 HAD 驾驶模式阶段这四个具体阶段的影响因素权重进行了分析，见图 6，蓝色的颜色越深，表明在针对该细分场景对应的界面时，关注度应该更高。例如，在设计接管提醒界面时，可观察性、直接性和及时性相较于可预测性来说，是更为关键的考虑要素，而可预测性对于 HAD 功能可用提醒的界面设计来说，相对权重就应更高，在设计可用性相关要素的时候，应该考虑驾驶员是否对当前驾驶模式有准确的理解，并清楚地知道该模式能应付何种场景。本文主要针对中控和方向盘在接管过程中的信息变化进行 HMI 的设计，设计的部分效果见图 7—8。

其中中控显示界面设计包括：(1)基本状态信息，主要显示电量（油量）、里程、时间、天气等；(2)车速与限速信息，显示当前车速的动态变化；(3)动态信息 1，根据接管过程和自动化驾驶程度显示驾驶权分配和提醒类信息；(4)动态信息 2，根据自动驾驶或手动驾驶提供场景化显示，并在接管时提供接管提醒显示；(5)动态信息 3，提供功能类信息显示，如 CC、ACC、LKA 和 HAD 等，此类信息根据接管过程也会产生动态变化；(6)动态信息 4，在手动驾驶时候，提供挡位和驾驶模式信息显示，在自动驾驶

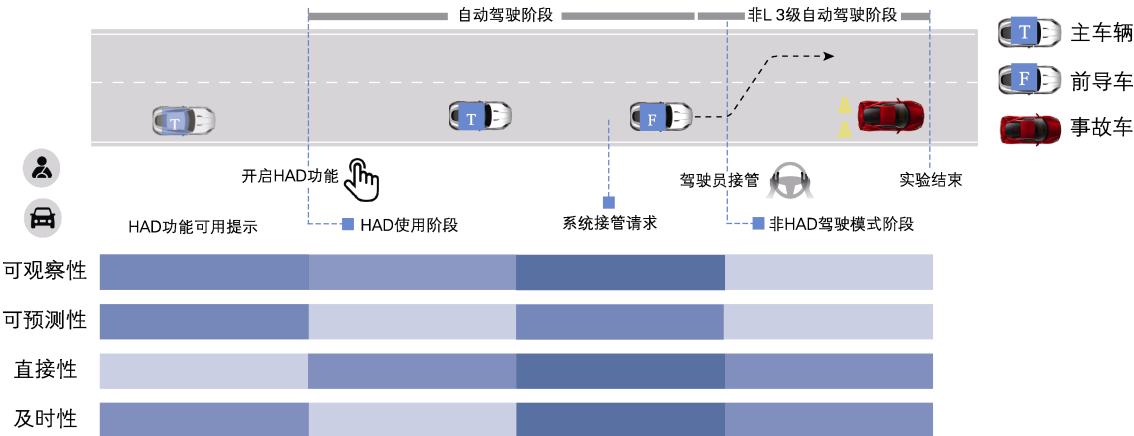


图 6 影响驾驶信任的 HMI 设计要素
Fig.6 HMI design elements influencing driving trust

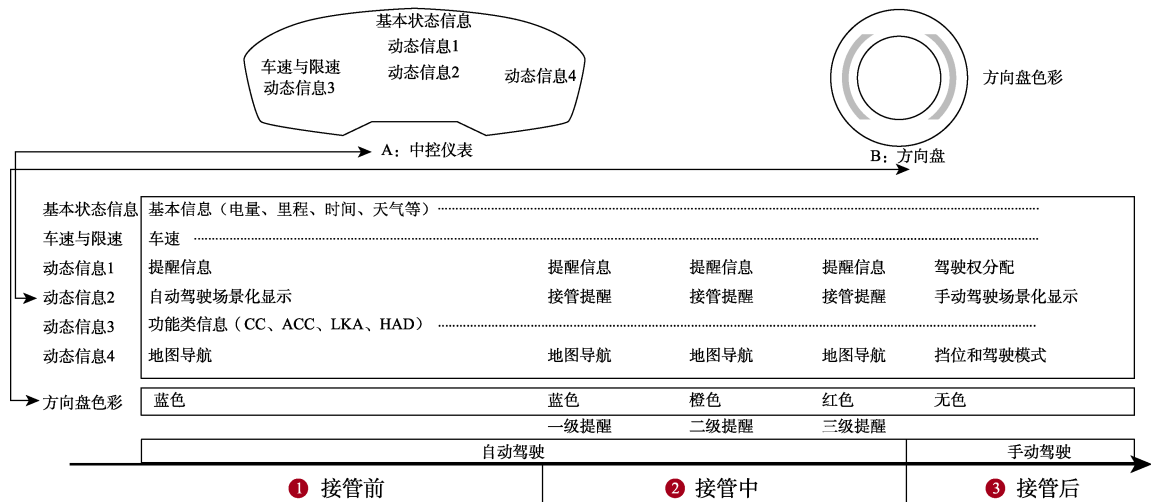


图 7 接管过程中动态信息变化
Fig.7 Dynamic information changes during the takeover process

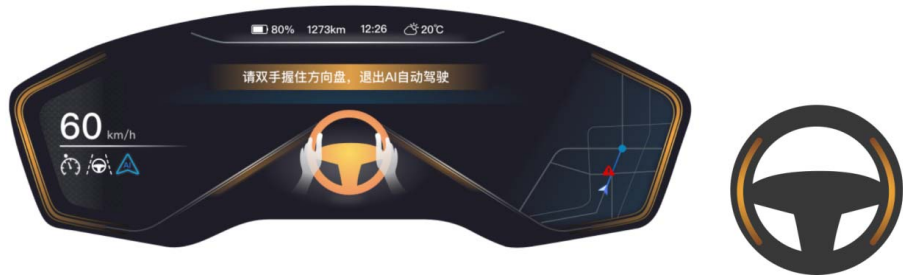


图 8 HMI 高仿真原型
Fig.8 HMI high simulation prototype

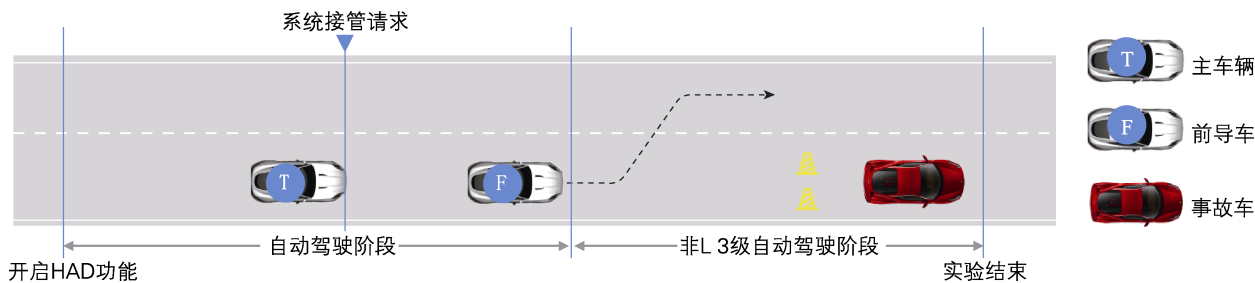


图 9 实验接管场景示意
Fig.9 Schematic diagram of the experimental takeover scenario

和接管过程中提供地图导航信息。

而方向盘界面则主要利用色彩变化来进行设计，在手动驾驶中不产生色彩变化，自动驾驶时变为蓝色。在接管提醒过程中分别根据接管提醒级别变为蓝色、橙色和红色。

3 模拟实验

本文在驾驶模拟器上测试典型驾驶接管场景中的 HMI 设计，评估 HMI 设计对驾驶员驾驶信任度的影响，以及对系统可用性的影响。实验中的自变量为 Level 3 自动驾驶下接管典型场景中接管系统 HMI 设计的两种不同交互方案：（1）有灯带方向盘；（2）无灯带方向盘。在保留仪表界面和提示音的基础下进

行测试。

基于模拟驾驶器的实验在一条单向双车道上进行，前导车 F 在右侧车道直线行驶，被试需要驾驶主测车 T 并自行开启高级自动驾驶模式行驶。在实验开始前，被试人员需要练习在模拟驾驶器环境下驾驶汽车，并了解不同等级的自动驾驶对应的不同的驾驶员责任范围。设置前导车是为了避免被试提前在无意间注意到前方的交通事故区，前导车起到在一定时间段内遮挡驾驶员视线的作用。当系统发出接管提醒时，前导车会切换至左侧车道内，规避交通事故区。被试人员进行接管实验，预警时距设置为 10 s（在系统开始发出接管预警时，车辆以当前车速行驶至事故地点所需的时间）。实验接管场景示意图见图 9。

表 2 组内实验任务顺序
Tab.2 Task sequence in group

测试顺序	HMI 设计方案 1 (仪表界面+提示音+ 方向盘灯带)	HMI 设计方案 2 (仪表界面+ 提示音)
组 1	1	2
组 2	2	1



图 10 测试环境
Fig.10 Test environment

3.1 实验方法

实验使用目前较为通用的信任度量表进行测量。采取组内实验设计，将两组结果作对比，以便测量不同 HMI 设计方案对驾驶信任度的影响，见表 2。同时在实验结束后，让驾驶员对 HMI 设计方案的设计元素进行评价，并对其可用性指标进行评分。另外，在测试的过程中也对被试在两种方案下的接管时间进行记录，分析信任度与接管效率之间的关系。

3.2 被试选择

实验共有 14 名被试，其中 5 名男性，9 名女性，视力正常（包含矫正视力）。被试年龄在 23~32 岁，驾龄在 1~5 年，对自动驾驶和接管系统都有一定的认知，是有相关背景知识和一定驾驶经验的可测试人群。

3.3 实验环境

实验在驾驶模拟器上完成，见图 10，驾驶模拟器提供了非常真实的驾驶环境，驾驶员可以通过方向

盘、脚踏完全实现对车辆的驾驶控制，并且在驾驶员按动方向盘上 HAD 功能按键后，可以达到模拟自动驾驶的效果。在 Unity 里对驾驶模拟器中的测试道路进行建模，以尽可能增加驾驶模拟中驾驶场景的真实性。在本文中，选取一条平坦路面上的直行单向双车道，模拟驾驶测试任务都在此道路上完成。车道宽度、车道线的尺寸以及车道线类别均为国家标准尺寸。

实验设备有 1 套 Fanatec 方向盘（见图 11）和三脚踏板，被试在完成驾驶任务的过程中，主要是通过这两部分对车辆进行控制，使用方向盘上提前设置好的按钮进行功能的开启和关闭，通过手握方向盘、踩踏板、按下方向盘按钮的方式进行驾驶介入，对车辆进行接管。有两个宇博智能 RFP-ZH11 薄膜压力传感器，固定于方向盘外围，左右两侧各一个，用于感应驾驶员是否手握方向盘，以及是单手还是双手握住，并将传感器的电阻信号通过 Unity 与模拟场景连接，实现对方方向盘接管行为的识别和反馈。还有 2 条灯带，分别固定于方向盘正面的左右两个位置，与 Unity 进行串口通信，以实现模拟智能表面提示当前驾驶模式的效果。最后还有 4 台显示器，驾驶员视野图像通过分屏器显示分别显示于 3 台显示器上，在另一台显示器使用 Unity 平台进行模拟器场景的设计和开发。

3.4 实验过程

首先请被试填写信息表，内容包括姓名、年龄、持有驾照的时间、驾驶频率和对高级自动驾驶和驾驶接管的了解。然后由测试者向被试讲解实验的目的及过程，并播放 HAD 及接管系统的相关功能视频及使用介绍，使被试对实验及接管系统有概述性了解。由测试者向被试介绍 HMI 界面上功能标识的不同显示状态，对提示类信息的颜色、内容和含义进行解释说明，使被试对界面反馈的相关内容有所了解。接下来邀请被试坐在驾驶模拟器座椅上，测试者重点向被试解释在驾驶模拟器上怎么进行开启 HAD 功能的操作，并让被试在模拟器上打开练习任务（为避免学习效应，练习时的驾驶场景不同于实际测试时的驾驶场景）。被试需要在提示 HAD 功能可用后，开启该功能，然后进行次要驾驶任务（即看中控屏播放的视频），在被试充分熟悉了汽车在 Level 3 模式下的状态后，正式开始实验。



图 11 方向盘灯带
Fig.11 Steering wheel light strip

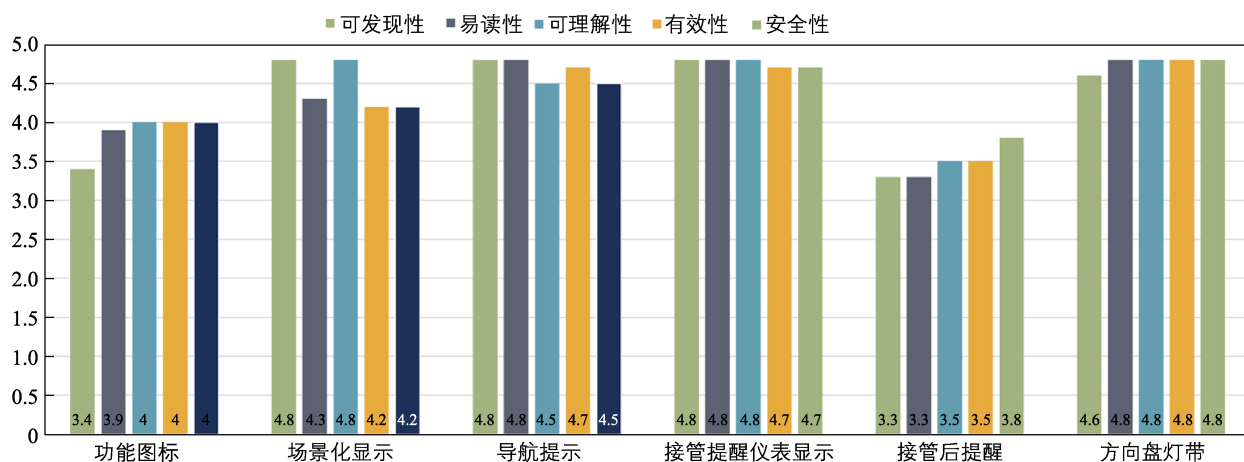


图 12 设计元素评分结果

Fig.12 Scoring results of design elements

被试在任务开始前，了解自己将会在 Level 3 的状态下行驶，并在接收到接管提醒后，需要对车辆进行接管，进入新的驾驶模式，但对何时出现接管提醒、因何路况而进行接管以及使用哪一种 HMI 设计并不知情。在被试准备好后，测试人员向被试发布任务说明。在任务正式开始之前，工作人员需要将手机固定在驾驶员左前方位置，确保能捕捉到驾驶员的全部操作行为，以便于实验后的观察和验证。

4 实验结果分析

4.1 设计元素评估结果

根据测试分析，14 名被试人员均对典型接管场景下的 HMI 设计表示肯定，他们认为该设计对功能及信息的呈现符合当前驾驶情境的需求，且不会对接管造成干扰，能够有效地协助驾驶任务，提高驾驶安全感，其中接管后的提示和场景化显示的部分仍需继续改进。测试评分结果由 14 名被试人员各项评分的平均值构成。从被试人员对各项指标的评分结果来看，6 个测试模块的各项指标都在 3.3 分以上，说明该设计方案有较高的可用性及较好的用户体验，设计元素评分结果见图 12。

4.2 信任度评估结果

在对信任度的评估中采用了国际常用的信任度评分量表，并根据本研究的使用场景进行了适应性修改，从性能、过程和目的 3 个层面对系统信任度进行了评价。其中性能项对应的问题主要是“自动化系统在做什么”，过程项对应的问题主要表达的是“自动化系统如何操作”，而目的项主要表达“为什么自动化系统会这样运行”的问题。实验对比了两个设计方案（有无方向盘智能灯带显示）驾驶员的信任度水平。

信任度评分统计结果见图 13，被试在分别进行完两套设计方案的测试后，使用信任度评估量表进行信任度评分，横坐标表示对系统性能、驾驶过程和系

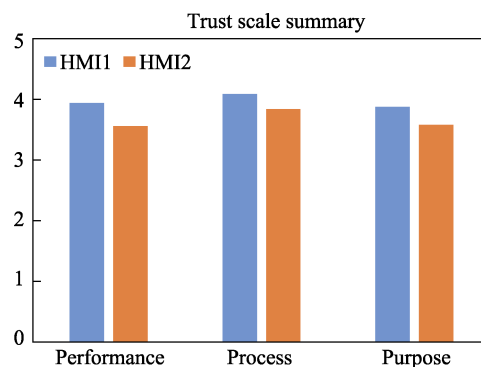


图 13 信任度评分统计结果

Fig.13 Statistical results of trust scores

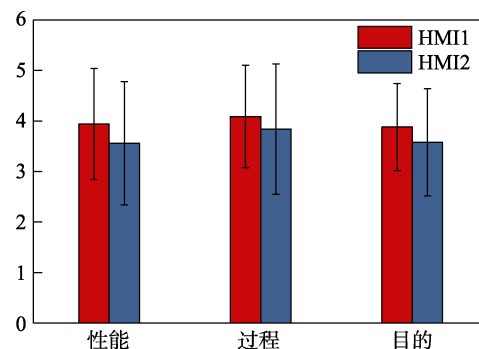


图 14 信任度评分统计

Fig.14 Statistics of trust scores

统目的的信任程度。14 名驾驶员的评分统计见图 14，综合每项评分来看，被试认为设计方案一，即在 HAD 模式下和接管提醒中使用方向盘智能灯带进行提醒的方案对于驾驶员对系统信任度的提升具有积极的影响。

4.3 信任度与接管效率结果

成功接管次数与接管时间是评估接管效率的因素，而 HMI 设计对接管效率起着关键性作用。在本实验中假设接管效率与驾驶员对系统的信任度在一定范围内呈现正相关性。经统计，参与本次实验的

14 名被试都能够在模拟驾驶场景中进行成功接管,从第一次接管提醒到驾驶员采取介入驾驶的接管行为进行接管这一段时间为接管时间,将两组设计方案对应的驾驶员平均接管时间数据进行独立样本 T 检验,给定显著水平 α 为 0.05,结果表明其显著性概率 (Sig.) 为 0.048, 小于 0.05, 在 95% 的置信区间内,方案一显著水平低于方案二,证明方向盘灯带的设计能够有效提高平均接管时间。综合信任度评估的实验结果可知,在一定的信任度范围值内,接管效率高的组对于系统的信任度也相对更高。

5 结语

本文主要研究了 Level 3 自动驾驶典型驾驶场景下基于信任的接管系统 HMI 设计,提出了从设计角度出发的驾驶场景分析方法,建立了基于驾驶员驾驶任务分析和驾驶信任分析的车内动态信息架构,并通过实验和访谈,验证了接管的交互行为逻辑,并对用户的需求进行了采集。基于此进行了设计实践和实验评估,通过评估驾驶员使用 HMI 设计方案时的驾驶信任度,衡量了此方法流程的有效性。本文的主要成果如下:(1)从信任产生和发展的过程匹配至接管过程,并提出 HMI 设计的相关重点因素;(2)提出了驾驶接管典型应用场景下的车内 HMI 动态信息架构设计,通过信息架构深入分析了典型接管场景下的设计点,对信息出现的种类、形式、位置和时间点做出合理安排;(3)形成了一套 Level 3 自动驾驶接管系统的 HMI 设计方案,提出仪表界面和方向盘智能灯带的创新设计;(4)通过对照实验对设计方案进行评估,从定性和定量两个角度评估了驾驶员使用两种方案在同一驾驶场景完成同样驾驶任务的驾驶信任度,并对两方案的平均接管时间进行了统计,结果说明了一定范围内,信任度和接管效率呈现出正相关性。

本文取得了初步的成果,但是受限于时间和资源,仍有许多有待进一步研究的工作。对于极端情况下的非典型接管场景应进一步探讨;可对被试人员进行跟踪实验,考察长时间使用后的对比结果;针对整个接管场景的多感官通道的设计可进一步探讨;可尝试寻找 HMI 提供给驾驶员的信息量、信息布局等与不同认知维度之间的相关性。

参考文献:

- [1] KYRIAKIDIS M, WEIJER C V D, AREM B V, et al. The Deployment of Advanced Driver Assistance Systems in Europe[C]. Bordeaux: TS World Congress 2015 Proceedings, 2015.
- [2] BRYANT W, JOAKIM S. Automated and Autonomous Driving: Regulation under Uncertainty[J]. Highway Safety, 2015, 21: 12-19.
- [3] SAE International. Automated Driving Levels of Driving Automation are Defined in New SAE International Standard[EB/OL]. (2014-03-21)[2020-12-31]. http://www.sae.org/misc/pdfs/automated_driving.pdf.
- [4] KORBER M, BASELER E, BENGLER K. Introduction Matters: Manipulating Trust in Automation and Reliance in Automated Driving[J]. Applied Ergonomics, 2018, 66: 18-31.
- [5] WINTERSBERGER P, SAWITZKY T, FRISON A K, et al. Traffic Augmentation as a Means to Increase Trust in Automated Driving Systems[C]. New York: Proceedings of the 12th Biannual Conference on Italian SIGCHI Chapter, 2017.
- [6] CHEN J Y, BARNES M J. Human-Agent Teaming for Multirobot Control: A Review of Human Factors Issues[J]. Human-Machine Systems, 2014, 44(1): 13-29.
- [7] LEE J D, SEE K A. Trust in Automation: Designing for Appropriate Reliance[J]. Hum Factors, 2004, 46(1): 50-80.
- [8] REMPEL J K, HOLMES J G, ZANNA M P. Trust in Close Relationships[J]. Journal of Personality and Social Psychology, 1985, 49: 95-112.
- [9] PARASURAMAN R, RILEY V. Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse Human Factors[J]. The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 1997, 39(2): 230-253.
- [10] WICKENS C D, GORDON S E, LIU Y. An Introduction to Human Factors Engineering[M]. New York: Addison-Wesley Educational Publishers Inc, 1997.
- [11] PARASURAMAN R, HANCOCK P A, OLOFINBOBA O. Alarm Effectiveness in Driver-centred Collision-warning Systems[J]. Ergonomics, 1997, 40(10): 390-399.
- [12] MIWA M, DIBBEN D, YAMADA T. High Accuracy Torque Calculation for a Rotating Machine Using Adaptive Meshing[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 40(2): 1001-1004.
- [13] HOFF K A, BASHIR M. Trust in Automation: Integrating Empirical Evidence on Factors That Influence Trust[J]. Human Factors, 2014, 57(3): 407-434.
- [14] EKMAN F, JOHANSSON M, SOCHOR J. Creating Appropriate Trust in Automated Vehicle Systems: A Framework for HMI Design[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2018, 48(1): 95-101.
- [15] MUIR B M. Trust in Automation: Part I. Theoretical Issues in the Study of Trust and Human Intervention in Automated Systems[J]. Ergonomics, 1994, 37(11): 1905-1922.
- [16] OLIVER C, MARTENS M H. How can Humans Understand their Automated Cars? HMI Principles, Problems and Solutions[J]. Cognition, Technology & Work, 2018, 21: 3-20.
- [17] FORSTER Y, NAUJOKS F, NEUKUM A. Increasing Anthropomorphism and Trust in Automated Driving Functions by Adding Speech Output[J]. Los Angeles: 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2017.
- [18] 张瑜. 基于用户体验的自动驾驶接管系统人机交互策略设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [19] ZHANG Yu. Design and Research on Human-computer Interaction Strategy of the Automatic Driving Takeover System Based on User Experience[D]. Guangzhou: South China University of technology, 2018.