

# 有条件自动驾驶下驾驶人接管行为综述

陈发城<sup>1</sup>, 鲁光泉<sup>2</sup>, 林庆峰<sup>2</sup>, 张浩东<sup>3</sup>, 马社强<sup>1</sup>, 刘德志<sup>4</sup>, 宋会军<sup>4</sup>

(1. 中国人民公安大学 交通管理学院, 北京 100038; 2. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191; 3. 清华大学 车辆与运载学院, 北京 100084; 4. 新奥能源物流有限公司, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**从影响机理和提升方法两个层面总结了驾驶人接管行为领域的研究现状。在接管行为影响机理层面, 将影响驾驶人接管行为的因素系统地分为自动驾驶系统因素、交通因素和驾驶人因素, 并且更加细致地总结了驾驶人因素的影响机理; 在接管行为提升方法层面, 结合接管行为影响机理研究结论, 从人机交互优化设计、接管行为建模预测、驾驶人接管培训等方面总结了改善驾驶人接管行为的一系列方法; 最后, 从研究机理和提升方法两个层面, 提出了当前存在的问题和未来研究方向。

**关键词:**交通运输系统工程; 有条件自动驾驶; 接管行为; 影响机理; 提升方法

**中图分类号:** U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)02-0419-15

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231033

## Review of drivers' takeover behavior in conditional automated driving

CHEN Fa-cheng<sup>1</sup>, LU Guang-quan<sup>2</sup>, LIN Qing-feng<sup>2</sup>, ZHANG Hao-dong<sup>3</sup>,  
MA She-qiang<sup>1</sup>, LIU De-zhi<sup>4</sup>, SONG Hui-jun<sup>4</sup>

(1. School of Traffic Management, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China; 2. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. ENN Energy Logistics Limited, Langfang 065000, China)

**Abstract:** The current research status in the field of takeover behavior was summarized from two aspects: impact mechanism and improvement methods. In terms of the influence mechanism of takeover behavior, the influence factors were systematically divided into automated driving system factors, traffic factors and driver factors, and more carefully summarizes the influence mechanism of driver factors. With respect to the methods for improving takeover behavior, based on the conclusions on the impact mechanism of takeover behavior, a series of methods were summarized from aspects such as optimization design for human-machine interaction, takeover behavior modeling and prediction, and driver training for takeover. Finally, the current problems and future research directions were proposed from the perspectives of influence mechanisms and improvement methods.

**Key words:** engineering of communications and transportation system; conditional automated driving; takeover behavior; influence mechanism; improvement methods

收稿日期: 2023-09-27.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4302702); 中央高校基本科研业务费新任教师科研启动基金项目(2023JKF02ZK05).

作者简介: 陈发城(1992-), 男, 讲师, 博士. 研究方向: 驾驶行为, 交通安全. E-mail: chenfcengzc@126.com

通信作者: 马社强(1973-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 道路交通安全. E-mail: masheqiang@163.com

## 0 引言

自动驾驶技术被认为是改善道路交通安全、提高通行效率的有效途径之一<sup>[1]</sup>。为指导自动驾驶技术的发展,国内外众多机构和组织制定了一系列发展规划和框架,我国工业和信息化部于2020年3月9日也发布了《汽车驾驶自动化分级》<sup>[2]</sup>,将自动驾驶水平分为6个等级,即应急辅助(L0)、部分驾驶辅助(L1)、组合驾驶辅助(L2)、有条件自动驾驶(L3)、高度自动驾驶(L4)和完全自动驾驶(L5)。其中,L1、L2和L3车辆自动化系统均要求驾驶人履行动态驾驶任务接管职责。

动态驾驶任务接管,也被简称为接管,即当自动驾驶系统达到功能极限或者出现故障时,驾驶人需要接管车辆的控制权,保障车辆的运行安全<sup>[3]</sup>。L1和L2级自动驾驶要求驾驶人监督车辆运行,而L3自动驾驶模式下驾驶人可以不履行车辆监督责任,即驾驶人可以执行非驾驶任务。此时驾驶人处于完全的“非驾驶在环”状态,其工作负荷接近为0,而当系统发出接管请求时,他们要从非驾驶状态切换到接管状态,其工作负荷会激增。根据Yerkes—Dodson定律<sup>[4]</sup>,驾驶人的工作负荷从极低区间越过最优负荷区间直接跨入极高负荷区间,此时驾驶人会出现精神高度紧张状态,驾驶绩效也会相应大幅度下降,可能引发交通事故。因此,有效的接管已经成为限制L3自动驾驶技术落地的一大挑战。

针对L3自动驾驶接管难题,国内外学者开展了广泛研究。由于驾驶人是动态驾驶任务接管的第一责任人,因此,当前大多数相关研究均秉承“以人为本”原则,探究驾驶人在面对各种突发事件时的接管行为特征,揭示驾驶人接管行为的影响机理。目前,国内外学者针对驾驶人接管行为影响机理这一主题已持续研究十余年,产出了大量科研成果,进一步深刻认识了自动驾驶接管。

近年来,国内外学者开始探寻提升驾驶人接管行为的方法,主要研究聚焦在3个方向:①优化L3自动驾驶汽车的人机交互设计,辅助驾驶人制定合理的接管操作决策;②对驾驶人的接管行为进行建模与预测,为最低风险控制介入时机提供依据;③对驾驶人进行接管培训,提升其接管能力。

综上,本文将首先介绍L3自动驾驶条件下的驾驶人接管过程及接管行为评价。随后,从驾驶人接管行为影响机理和驾驶人接管行为提升两个

角度全面总结十余年来国内外关于L3自动驾驶接管行为的相关研究成果,并针对当前研究存在的问题和未来研究方向提出一些建议。通过对以往研究进行总结,本文可为L3自动驾驶系统的设计、面向L3自动驾驶的交通安全管理等方面提供参考依据。

## 1 有条件自动驾驶接管概述

### 1.1 接管过程简述

驾驶人的接管过程实际上是驾驶人从非驾驶状态或半驾驶状态向全驾驶状态转换的过程,也是驾驶人恢复情景意识和车辆横纵向操控的过程<sup>[5]</sup>。通常,基于接管事件的紧迫度和危险度,可将自动驾驶接管分为紧急接管和非紧急接管两种情况。

在非紧急接管情况下,驾驶人可以根据自己的意愿,自由选择何时、以何种操作方式去接管车辆控制权,基本上无安全风险<sup>[6]</sup>。在未来,随着车路协同技术的广泛应用,驾驶人可提前较长时间获取超传感器检测范围的道路交通信息,实现非紧急接管。

在紧急接管情况下,驾驶人则需及时响应系统发出的接管请求,快速恢复情景意识,且所选择的接管操作方式也必须以保障安全为前提。驾驶人能否安全处理紧急接管事件的关键是能否在有限的时间内保质保量完成情景意识恢复、决策制定和操作执行<sup>[7]</sup>。这3个安全接管必备任务涉及驾驶人的视觉、认知、躯体运动等方面<sup>[8]</sup>,对驾驶人来说是不小的考验。

### 1.2 接管行为评价指标

接管行为评价指标是开展L3自动驾驶接管研究的基础。接管时间和接管质量是学者们最常考虑的两个维度<sup>[7]</sup>。接管时间维度常包括接管时间和接管反应时间,接管质量维度常包括驾驶安全性、操纵稳定性和驾驶人生理状态。

参考以往的研究,接管时间通常被定义为系统发出接管请求时刻到驾驶人首次做出有效驾驶操作之间的时间<sup>[7]</sup>。所谓“有效驾驶操作”通常是指驾驶人转动方向盘超过2度或踩下制动踏板超过总行程的10%<sup>[9,10]</sup>。当驾驶人做出有效驾驶操纵时,通常其已经完成了情景意识的恢复和操作决策的制定。

除了接管时间外,部分学者还更加细致地关

注到了接管反应时间。和接管时间不同,接管反应时间体现的是驾驶人单纯的反应特性,如视觉反应时间(从系统发出接管请求到驾驶人将视线转移到前方道路所消耗的时间)<sup>[11,12]</sup>、转向/制动反应时间(从系统发出接管请求到驾驶人将手/脚重新放到方向盘/制动踏板上所消耗的时间)<sup>[12,13]</sup>。此外,针对使用按键接管方式的自动驾驶系统,学者们还会使用自动化脱离时间(从系统发出接管请求到驾驶人按下接管按键所消耗的时间)<sup>[3,14]</sup>表征驾驶人的接管反应特性。需要注意的是,接管反应更快并不意味着驾驶人的接管更安全,因此,接管反应时间不能作为接管质量评价的关键指标<sup>[15]</sup>。

对于接管质量的评价,学者们通常聚焦于接管后的驾驶安全性和操纵稳定性两个方面。常用的安全性评价指标包括接管过程中的最小碰撞时间<sup>[16,17]</sup>和平均/最小车头时距<sup>[18]</sup>,稳定性评价指标包括接管过程中的最大/平均纵向减速度<sup>[16,17]</sup>、最大/平均横向加速度<sup>[16,17]</sup>、平均/最大车道位置标准差<sup>[19,20]</sup>等。近年来,有研究人员也将驾驶人在接管中的生理状态作为接管质量的评价指标<sup>[21,22]</sup>,主要包括心率、RR间期等心理与生理特性指标<sup>[23,24]</sup>和瞳孔直径、眨眼频率等眼动特性指标<sup>[25]</sup>。

## 2 有条件自动驾驶接管行为影响机理

道路交通主要是由人、车、路三要素组成,影响驾驶人接管行为的因素也可相应地分为系统因素、交通因素和驾驶人因素,本文将从这三方面详细总结国内外学者在接管行为影响机理研究领域的成果。

### 2.1 系统因素对驾驶人接管行为的影响机理

系统因素指的是自动驾驶系统设计制造层面的相关属性,包括系统的接管时间预算设置、系统允许执行的非驾驶任务类别、系统的接管请求预警方式等,见表1。

#### 2.1.1 接管时间预算的影响

驾驶人在接管车辆控制权时,需要一段时间来调整和准备,以恢复情景意识和驾驶能力<sup>[8]</sup>。因此,自动驾驶系统应该预留给驾驶人多长时间才能保证其可以恢复驾驶能力,是当前的研究热点之一。系统预留的这段时间也被称为接管时间

表1 驾驶人接管行为影响因素分类

Table 1 Classification of influence factors of drivers' takeover behavior

系统因素	交通因素	驾驶人因素
接管时间预算	交通状况	驾驶人个体特性
非驾驶任务类别	道路条件	驾驶人状态
接管请求预警方式	天气状况	驾驶人习惯

预算,通常被定义为系统发出接管请求时,自车距离前方突发事件的碰撞时间<sup>[6,16]</sup>。多项研究表明:驾驶人至少需要7 s接管时间预算才能安全完成接管任务<sup>[26,27]</sup>。

针对接管行为影响方面的研究发现,接管时间预算会显著影响驾驶人的接管时间。驾驶人在较大的接管时间预算条件下也会表现出较长的接管时间<sup>[9,28]</sup>。Gold等<sup>[9]</sup>在对以往文献进行梳理后发现,接管时间预算在5~7.8 s范围内每增加1 s,驾驶人的接管时间就会延长0.33 s。当接管时间预算范围扩大到7.8 s以上时,每增加1 s的时间预算,接管时间就会增加0.27 s。Zhang等<sup>[28]</sup>通过对129项自动驾驶接管相关研究进行元分析,也发现了接管时间预算与接管时间之间的正相关关系。

此外,研究发现,随着接管时间预算的降低,驾驶人在接管后会表现出更差的接管质量,具体表现为更小的接管后最小TTC、更大的纵向减速度和横向加速度<sup>[3,16]</sup>、更高的碰撞率<sup>[16,29]</sup>。同时,接管时间预算还会显著影响驾驶人接管后的避障策略选择(制动、转向或制动转向组合),在较低的接管时间预算条件下驾驶人往往会首先采取制动操作<sup>[9]</sup>。

#### 2.1.2 非驾驶任务的影响

L3级自动驾驶汽车允许驾驶人执行非驾驶任务,但大量研究表明,非驾驶任务会对驾驶人的接管行为产生负面影响。具体而言,执行非驾驶任务会延长驾驶人的接管时间<sup>[28,30]</sup>,并恶化其接管质量<sup>[3,16]</sup>,接管质量的下降主要体现在更小的接管后最小TTC、更大的纵向减速度和横向加速度等方面<sup>[3,16]</sup>。

通过对文献进行分析后发现,非驾驶任务产生的负面影响主要是由其带来的额外负荷所导致。非驾驶任务可以分为非视觉任务(听音乐、聊天、打蓝牙电话等)和视觉任务(看视频、玩游戏、写邮件等)。在L3自动驾驶系统运行时,非视觉任务会给驾驶人施加额外的认知负荷,而视觉任务除了认知负荷外,还会进一步施加视觉和身体

运动等额外负荷。这就可以解释为何视觉任务相比于非视觉任务,对驾驶人接管行为产生的负面影响更大<sup>[19,31]</sup>。

视觉任务又包括手持式和固定式。以往研究表明:相比于固定式任务,手持式任务会延长驾驶人的接管时间<sup>[28,30]</sup>,并降低他们的接管稳定性<sup>[12]</sup>。手持式任务会给驾驶人带来更多的额外负荷,是产生这种现象的主要原因。当L3自动驾驶系统发出接管请求时,如果驾驶人在手持设备执行视觉非驾驶任务,那么相比于操作位置固定的视觉非驾驶任务,其会增加搜寻设备安放位置所需的视觉运动负荷和放下设备所需的肌肉运动负荷<sup>[14,32]</sup>等。

虽然非驾驶任务带来的额外负荷会给接管带来负面影响,但如果其带来的额外认知负荷适度,则会对驾驶人的接管行为产生一定的积极作用。Lu等<sup>[33]</sup>发现适度的认知非驾驶任务(非视觉)会降低驾驶人接管后的纵向碰撞风险。他们认为产生这种现象的原因可能是:在自动驾驶系统运行时,驾驶人的工作负荷较低,根据Yerkes-Dodson定律<sup>[4]</sup>,这时候驾驶人的接管能力也会相应较弱,而适度的认知非驾驶任务会将驾驶人的工作负荷提升到一个更优区间,从而使驾驶人做出更安全的接管行为。

### 2.1.3 接管预警方式的影响

接管预警方式,也被称为接管请求方式,是指自动驾驶系统用于向驾驶人发出接管请求的警告方式<sup>[7]</sup>。相关研究已经探索了听觉、视觉、振动触觉、多方式组合预警等方式对接管行为的影响。

通过文献调研发现,视觉+听觉组合是最常用的接管预警方式<sup>[34,35]</sup>。当前,大多数搭载自动化系统的汽车采用这种视听组合的预警方式。除了视听组合预警方式外,单听觉预警方式<sup>[17,36]</sup>也很常见。Petermeijer等<sup>[13]</sup>的研究表明:与单模式预警方式相比,多模式组合预警方式下驾驶人的接管时间缩短了0.2 s。Politis等<sup>[37]</sup>也得出了类似的结论,同时,他们还发现与单听觉和多模式组合预警方式相比,单视觉预警和单振动触觉预警会显著延长驾驶人的接管时间。此外,Naujoks等<sup>[38]</sup>发现接管预警方式对驾驶人接管后的车辆操控也有显著影响。与视觉+听觉组合预警方式相比,在单视觉预警条件下,驾驶人的车道保持能力更差。

## 2.2 交通因素对驾驶人接管行为的影响机理

交通因素指的是在接管过程中自动驾驶车辆周围的交通状况、道路条件和天气状况等。在自动驾驶接管试验设计中,交通因素是驾驶场景的关键组成部分。为了尽可能和现实驾驶场景相似,研究人员在设计和构建驾驶场景时通常会考虑较多的交通因素。通过文献调研发现,在众多交通因素中,国内外学者关注度最高的是交通状况,而道路条件和天气状况通常只是场景构建要素,直接探究这些因素对接管行为的影响的文献相对较少。

### 2.2.1 交通状况的影响

学者们主要聚焦交通流密度和可用避险路径两个方面关注交通状况对驾驶人接管行为的影响。交通流密度是单位长度路段上,一个车道或一个方向上某一瞬时的车辆数。可用避险路径是指驾驶人在接管避撞过程中可以选择的行驶路径<sup>[7]</sup>。

多项研究表明:交通流密度和可用避险路径的数量会显著影响驾驶人的接管行为。随着交通流密度的增加<sup>[32,39]</sup>或可用避险路径的减少<sup>[28]</sup>,驾驶人的接管时间会显著延长。Gold等<sup>[9]</sup>进一步研究发现,以15.7辆/km为中心的二次曲线可较好地描述交通流密度对接管时间的影响,当交通流密度逐渐高于或逐渐低于15.7辆/km时,驾驶人的接管时间均会随着缩短。他们认为造成这种现象的原因是:15.7辆/km的交通流密度会将驾驶人置身于一个“进退两难”的困境,在这种情况下换道和制动均是可行的操作选择,因此,驾驶人可能会出现犹豫不决的现象;而在交通流密度较低或较高的情况下,驾驶人可能会很快判断出换道或制动哪个是更优的避险操作。

随着交通流密度的增加或可用避险路径的减少,驾驶人的接管质量也随之下降。主要体现在较低的最小TTC,较高的碰撞率<sup>[39,40]</sup>和较高的纵向减速度和横向加速度<sup>[40]</sup>等方面。随着交通流密度的增加或可用避险路径的减少,接管场景的复杂程度也会上升,驾驶人的注视和搜索任务也相应变得更加复杂,这会导致驾驶人的认知负荷大幅升高<sup>[41]</sup>,心率也会上升到一个较高的水平(比低交通流密度环境下高出23%左右)<sup>[42]</sup>。根据Yerkes-Dodson定律<sup>[4]</sup>,以上也许是驾驶人的接管质量出现下降现象的原因。

### 2.2.2 道路条件的影响

以道路类型和道路几何特征为代表的道路条件往往只是自动驾驶场景的构建要素,直接探究这些因素对接管行为的影响的文献相对较少。

在道路条件对驾驶人接管行为的影响方面, Li 等<sup>[43]</sup>的研究发现,道路类型会显著影响驾驶人的接管行为,与高速公路条件相比,驾驶人在城市道路条件下会表现出更快的接管反应和更高接管稳定性。除了道路类型,道路几何特征也会显著影响驾驶人的接管行为<sup>[38,44]</sup>。研究表明:当 L3 级自动驾驶系统运行时,相比于直道条件,驾驶人在弯道条件下的接管反应会更快,但其接管后的车道保持能力会更差<sup>[38]</sup>。

### 2.2.3 天气状况的影响

目前,探究天气状况对驾驶人接管行为的影响的相关文献较少,且受制于驾驶模拟器的仿真程度和自由度,研究人员在考虑天气状况时仅仅从能见度(雾天)角度入手,而同样比较关键的雨雪天气等因素则无人探究。

在能见度较低的情况下,驾驶人的接管时间会显著延长<sup>[43,45]</sup>。Louw 和 Merat<sup>[35]</sup>的研究还发现,在能见度更低的浓雾条件下,驾驶人的视线主要集中在道路和仪表盘上,而在能见度相对更高的薄雾条件下,他们更倾向于观察道路。此外,较低的能见度还会显著降低驾驶人的接管质量,具体体现在降低了驾驶人接管后的最小 TTC,增加

了碰撞或临界碰撞次数,增大了方向盘转角标准差、横向偏移、合成加速度等<sup>[43,45]</sup>。

### 2.3 驾驶人因素对驾驶人接管行为的影响机理

驾驶人因素指的是和驾驶人相关的影响因素,如年龄、性别、驾驶经验、信任度、困倦、驾驶风格等。在影响自动驾驶接管行为的诸多因素中,上文提到的系统因素和交通因素属于外部影响因素,而驾驶人因素则属于内部影响因素。外部因素与内部因素相互作用,共同影响着驾驶人的接管行为。Eriksson 等<sup>[6]</sup>的研究表明:驾驶人个体在接管过程中表现出了较大的行为差异性。在相同的外部影响因素作用下,驾驶人个体表现出行为多样化的主要原因是内部影响因素(即“驾驶人因素”)的作用<sup>[46]</sup>。而当前 L3 自动驾驶技术的落地之所以存在较大困难,其主要原因之一也是驾驶人因素的作用难以控制。因此,近年来驾驶人因素是国内外学者的研究重点。通过文献调研发现,学者们广泛关注的驾驶人因素大致可分为驾驶人个体特性和驾驶人状态两个方面。

#### 2.3.1 驾驶人个体特性的影响

驾驶人个体特性是驾驶人个体层面的固有特性,在以往的研究中,国内外学者针对年龄、性别、手动驾驶经验、手动驾驶习惯、车辆自动化技术使用经验、严重交通事故经历等驾驶人个体特性因素进行了一系列探究,如表 2 所示。

表 2 驾驶人个体特性对接管行为的影响

Table 2 Influence of drivers' individual characteristics on takeover behavior

驾驶人个体特性	作者	结论
年龄	Clark 和 Feng <sup>[20]</sup> 、Körber 等 <sup>[39]</sup> 、Wu 等 <sup>[47]</sup>	年龄对驾驶人接管时间无显著影响
	Li 等 <sup>[48]</sup> 、So 等 <sup>[49]</sup>	老年驾驶人的接管时间更长
	Körber 等 <sup>[39]</sup>	老年驾驶人的接管安全性更好
	Li 等 <sup>[48]</sup>	老年驾驶人的接管安全性更差
性别	Clark 和 Feng <sup>[20]</sup> 、Körber 等 <sup>[39]</sup>	老年驾驶人的纵向接管稳定性更差
	赵晓华等 <sup>[50]</sup>	男性驾驶人对自动驾驶更加适应
	So 等 <sup>[49]</sup>	男性驾驶人的接管时间更短
手动驾驶经验	Loeb 等 <sup>[51]</sup>	男性驾驶人的接管碰撞率略小
	Wright 等 <sup>[36]</sup>	新手驾驶人接管时对潜在风险的识别能力较弱
	Lu 等 <sup>[27]</sup>	新手驾驶人接管时对车速和距离的估计较差
自动化使用经验	Chen 等 <sup>[3]</sup> 、王琳岩等 <sup>[53]</sup>	新手驾驶人接管操纵稳定性较差
	Jin 等 <sup>[54]</sup> 、Hergeth 等 <sup>[34]</sup>	自动化使用经验会延长驾驶人的接管时间,但对接管质量无显著影响
创伤应激障碍症状	Weigl 等 <sup>[55]</sup>	严重道路交通事故产生的创伤应激障碍症状对驾驶人接管行为影响较弱
手动驾驶习惯	鲁光泉等 <sup>[46]</sup>	具有低跟车风险接受习惯的驾驶人在监控自动驾驶条件下,接管后的纵向碰撞风险更小
	Chen 等 <sup>[56]</sup>	具有激进操纵习惯的驾驶人接管操纵反而更加稳定

在这些驾驶人个体特性因素中,年龄因素受到的关注度最高。然而,学者们针对年龄因素的研究结果并不统一。在接管时间方面,Körber等<sup>[39]</sup>对年轻驾驶人和老年驾驶人进行对比研究时并未发现年龄对接管时间的显著影响。Clark和Feng<sup>[20]</sup>也发现年轻驾驶人和老年驾驶人的接管时间无显著差异。Wu等<sup>[47]</sup>通过对比年轻驾驶人、中年驾驶人和老年驾驶人的接管时间,进一步支持了Körber等的结论。然而,Li等<sup>[48]</sup>和So等<sup>[49]</sup>的研究却表明:老年驾驶人的接管时间相对更久;在接管质量方面,学者的研究一致表明:老年驾驶人在接管时的纵向控制稳定性较差<sup>[20,39]</sup>。但是,在接管安全性方面,学者们的研究并不一致,Körber等<sup>[39]</sup>的研究表明:与年轻驾驶人相比,老年驾驶人接管后的最小TTC更大,碰撞次数也更少,即有更安全的接管行为。然而,Li等<sup>[48]</sup>的研究却显示:老年驾驶人的接管安全性更差,具体体现在更小的最小TTC和更多的碰撞方面。试验场景、驾驶模拟器、被试国籍等存在差异也许是造成研究结果出现分歧的主要原因。

性别方面,男性驾驶人对自动驾驶的适应性显著高于女性驾驶人<sup>[50]</sup>,且男性驾驶人的接管时间<sup>[49]</sup>和接管碰撞率<sup>[51]</sup>略小于女性驾驶人;手动驾驶经验方面,相比于经验驾驶人,新手驾驶人在接管时对潜在风险的识别能力较弱<sup>[52]</sup>,在车速和距离估计上表现更差<sup>[27]</sup>,且接管操纵稳定性较差<sup>[3,53]</sup>;关于自动化技术使用经验,Jin等<sup>[54]</sup>发现驾驶人的这种经验会帮助他们在接管车辆控制权时有更快的反应,但未观察到这种经验对驾驶人接管质量产生的显著影响。Hergeth等<sup>[34]</sup>的研究结果也表明:试验前的自动化技术使用经验似乎并没有显著影响到驾驶人接管后的车辆操控;Weigl等<sup>[55]</sup>还探究了严重道路交通事故经历对驾驶人

接管行为的影响,他们发现尽管经历严重道路交通事故所产生的创伤应激障碍症状可能会影响驾驶人的心理健康,但事故经历对驾驶人接管行为的影响却比较微弱。

手动驾驶习惯方面,接管实际上是一种手动驾驶操作,因此,可能会受到驾驶人驾驶习惯的影响。McDonald等<sup>[7]</sup>通过大量的文献调研也发现,驾驶人在自动驾驶紧急情况下的反应与其在手动驾驶紧急情况下的反应有相似之处。探究驾驶习惯对驾驶人接管行为的影响,可为个性化自动驾驶系统的设计提供理论依据。但当前,仅有少数研究人员关注到了驾驶习惯对接管行为的潜在影响。鲁光泉等<sup>[46]</sup>探究了驾驶人跟车风险接受习惯对其接管行为的影响,发现日常驾驶中具有低跟车风险接受习惯的驾驶人接管反应更快,并且在监控自动驾驶条件下,表现出更低的接管后纵向碰撞风险。Chen等<sup>[56]</sup>探究了驾驶操纵习惯对驾驶人接管行为的影响,发现在日常跟车驾驶中驾驶操纵比较激进的驾驶人反而有更稳定的接管操纵表现。他们分析造成这种现象的原因是激进驾驶人在日常驾驶中经历和处理的突发或危险事件更多,更丰富的经验帮助他们在应对接管事件时更加得心应手。

### 2.3.2 驾驶人状态的影响

驾驶人状态主要指驾驶人在自动驾驶系统运行时表现出来的心理、精神和身体状态。以往的文献关注到了信任度、疲劳、睡眠、情绪、饮酒等驾驶人状态因素,如表3所示。

在自动驾驶领域,信任度是指驾驶人对车辆自动化系统各方面的相信程度<sup>[7]</sup>。信任度的测量方法通常包括主观测量和客观测量,主观测量的主要方式是问卷调查<sup>[17,54]</sup>,客观测量主要通过采集眼动参数来实现,常用的眼动参数包括道路注

表 3 驾驶人状态对接管行为的影响

Table 3 Influence of drivers' state on takeover behavior

驾驶人状态	作者	结论
信任度	Jin等 <sup>[54]</sup> 、Payre等 <sup>[57]</sup>	信任度升高会导致驾驶人的接管时间增加
	Körber等 <sup>[17]</sup>	信任度升高会导致驾驶人的接管稳定性和安全性下降
	Jin等 <sup>[54]</sup>	信任度对驾驶人的接管质量无显著影响
困倦或精神疲劳	Vogelpohl等 <sup>[60]</sup> 、Jarosch等 <sup>[62]</sup>	困倦或精神疲劳会延长驾驶人的接管时间和反应时间
	Gonçalves等 <sup>[63]</sup>	困倦或精神疲劳会损害驾驶人的横向接管操纵稳定性
睡眠	Wörle等 <sup>[66]</sup>	睡眠后,驾驶人的接管时间延长
	Wörle等 <sup>[67]</sup>	睡眠后,驾驶人的接管质量变差
情绪	Sanghavi等 <sup>[70]</sup>	愤怒情绪对驾驶人的接管时间无显著影响
	Du等 <sup>[71]</sup>	情绪平静的驾驶人接管安全性和稳定性更好
饮酒	Wiedemann等 <sup>[72]</sup>	饮酒会显著延长驾驶人的接管时间,并恶化其接管稳定性

视持续时间和道路注视频率<sup>[17,54]</sup>等。在车辆自动驾驶中,驾驶人更多地关注道路环境意味着其客观信任度更低。研究发现,主观和客观信任度的增加均会导致接管时间的增加<sup>[54,57]</sup>;但在接管质量方面,学者们的研究结论并不一致,Körber等<sup>[17]</sup>发现信任度的升高会导致驾驶人在接管后出现较差的稳定性和安全性,而Jin等<sup>[54]</sup>的研究却表明信任度对接管质量无显著影响。虽然信任度的增加会导致驾驶人接管时间的延长,但在Jin等<sup>[54]</sup>的试验中,接管时间预算的设置相对更大,因此,接管时间的延长并没有过度压缩驾驶人操纵车辆规避风险的时间,这也许是他们发现信任度的升高没有恶化接管质量的原因。

疲劳主要分为身体疲劳、困倦和精神疲劳<sup>[58]</sup>3种状态。身体疲劳是一种暂时性的体力下降<sup>[58]</sup>。困倦是一种主观上的睡眠欲望<sup>[59]</sup>。精神疲劳是一种主观上不愿继续执行当前任务的倾向,可进一步分为单调环境引起的被动任务疲劳和长时间高负荷驾驶引起的主动任务疲劳<sup>[59]</sup>。自动驾驶系统的运行可以将驾驶人从驾驶任务中解放出来,因此,驾驶人在自动驾驶中基本不会出现身体疲劳和主动任务精神疲劳现象,而更容易出现困倦和被动任务精神疲劳现象<sup>[60,61]</sup>。与正常状态驾驶人相比,困倦或精神疲劳驾驶人的接管反应时间和接管时间均会延长<sup>[60,62]</sup>。在接管质量方面,Goncalves等<sup>[63]</sup>发现虽然困倦驾驶人的纵向接管稳定性没有恶化,但其横向接管稳定性却显著变差。多项研究表明:非驾驶任务可以减轻驾驶人的困倦或精神疲劳<sup>[61,64]</sup>现象,进而提高驾驶人的接管质量。

如果困倦状态持续下去,驾驶人就极易进入睡眠状态。研究表明:从睡眠到清醒状态需要30 min的过渡时间<sup>[65]</sup>。这就意味着在突发事件出现时,即使自动驾驶系统可以通过较高强度的接管预警将驾驶人唤醒,但此时驾驶人可能仍无法安全稳定地接管车辆控制权。Wörle等<sup>[66]</sup>针对睡眠问题展开了深入研究,他们发现与清醒状态相比,睡眠后驾驶人的接管时间延长了3 s;在睡醒后的前15 s内驾驶人表现出了更差的接管质量,并导致了更多的驾驶错误<sup>[67]</sup>;此外,在睡醒后,驾驶人至少需要3 min的时间来恢复车道保持能力,至少需要10 min的时间来恢复速度稳定性<sup>[67]</sup>;在情绪方面,多项研究表明愤怒情绪会损害驾驶人的判断力和驾驶表现<sup>[68,69]</sup>。虽然研究表

明愤怒情绪对接管时间无显著影响<sup>[70]</sup>,但在愤怒情绪的影响下,驾驶人接管后的驾驶会更加激进<sup>[70,71]</sup>,这可能会引发交通事故。相反,情绪平静的驾驶人会表现出更高的接管安全性和稳定性<sup>[71]</sup>;此外,Wiedemann等<sup>[72]</sup>还探究了饮酒对驾驶人接管行为的影响,他们发现饮酒会显著延长驾驶人的接管时间,并恶化其接管稳定性。

### 3 驾驶人接管行为改善研究

接管行为影响机理研究使人们深刻认识到L3自动驾驶接管给驾驶人带来的巨大挑战。为促进L3自动驾驶技术的落地应用,近年来国内外学者开始寻找办法来改善驾驶人的接管行为。这部分的研究大致分为3个方向:人机交互优化设计、接管行为建模与预测、驾驶人接管培训。本文将从这三方面详细总结国内外学者的相关研究成果。

#### 3.1 人机交互优化设计

通过接管行为影响机理分析,可以认识到复杂接管环境、驾驶分心、特殊驾驶人团体等均是导致驾驶人接管行为恶化的关键原因。针对这些接管行为恶化致因,研究人员创新和优化L3自动驾驶汽车人机交互设计,有效改善了驾驶人的接管行为。

在驾驶人面对的接管环境比较复杂时,其恢复情景意识、作出正确接管决策所需的时间会更长。因此,研究人员尝试在驾驶人接管时为其提供突发情况描述(见图1(a)<sup>[73]</sup>)和接管指导(见图1(b)<sup>[74]</sup>),以帮助其缩短接管准备时间。研究结果表明:在系统发出接管请求的同时,通过视觉或听觉方式简单地向驾驶人描述突发事件情况可显著缩短驾驶人的接管时间,并提高其接管安全性<sup>[36,73]</sup>;提供接管避障方向或行进轨迹指引也可以显著缩短驾驶人的接管时间,并提升其接管质量<sup>[74,75]</sup>。然而,给驾驶人提供更加丰富的人机交互信息也可能对其产生负面影响,Walch等<sup>[76]</sup>发现当呈现信息的视觉界面阻碍了驾驶人对前方道路环境的观察时,驾驶人的接管时间反而会增加。并且,如果呈现的内容比较冗长,驾驶人的接管时间也会延长<sup>[7]</sup>。

在L3自动驾驶中,驾驶人的手、脚和眼全部被解放,因而驾驶人常处于分心状态。视觉分心或高度认知分心都会导致驾驶人接管时间显著延长。针对该问题,研究人员尝试改进接管预警方式,以



图 1 人机交互优化设计示例

Fig. 1 Example of human-machine interaction optimization design

帮助驾驶人更快地响应接管请求。Hong等<sup>[77]</sup>在A柱上加装预警小灯(见图1(c)),验证实验表明该方式可以显著提升驾驶人的接管反应速度;考虑到驾驶人在L3自动驾驶中常操作手机,Heo等<sup>[78]</sup>通过智能手机直接发出接管预警(见图1(d)),显著缩短了驾驶人的接管时间;此外,Ma等<sup>[79]</sup>提出了两阶段预警,在第一阶段,系统提前10s告知被试“请注意”,

在第二阶段,系统提前7s发出“请接管”请求,实验表明:相比于单阶段预警,两阶段预警显著缩短了驾驶人的接管时间,并提升了驾驶人的接管质量。

老年驾驶人认知衰退、运动能力下降,是典型的特殊驾驶人。Li等<sup>[80]</sup>首先对老年驾驶人代表进行半结构化访谈,获取了他们对自动驾驶汽车人机交互设计的建议。随后,他们设计了年龄友好型人机交互系统,验证实验表明:该人机交互系统可以显著改善老年驾驶人的接管行为<sup>[73]</sup>。

### 3.2 接管行为建模与预测

2023年11月17日,工业和信息化部、公安部、住房和城乡建设部、交通运输部发布了关于开展智能网联汽车准入和上路通行试点工作的通知,在《智能网联汽车准入和上路通行试点实施指南(试行)》<sup>[81]</sup>中明确要求:对于需要安全员接管的自动驾驶系统,应具备安全员接管能力监测功能,应对安全员是否具备执行动态驾驶任务接管的能力进行识别,并在安全员能力不满足要求时,发出警告信号。判断安全员是否具备执行动态驾驶任务接管的能力需要对其接管行为进行建模与预测。如前文所述,接管行为的评价主要从接管时间和接管质量两个角度开展,因此,接管行为建模与预测也相应包括这个方面。

#### 3.2.1 接管时间建模与预测

在接管时间建模与预测方面,回归模型是研究人员常用的方法。Gold等<sup>[9]</sup>统筹了所在团队此前的6项研究,建立了一个包含753个接管案例的数据集,运用非线性回归建立了接管时间模型,模型的变量包括接管时间预算、交通流密度、年龄等,模型的调整后可决系数(调整后 $R^2$ )为0.43,均方根误差(Root mean squared error, RMSE)为0.81;Wu等<sup>[82]</sup>基于道路注视百分比、小幅度扫视、中等幅度扫视、大幅度扫视和平均扫视速度5个眼动指标建立了预测接管时间的多元线性回归模型,模型的调整后 $R^2$ 为0.40。

为提高模型精度,机器学习方法也逐渐被应用于接管时间建模与预测。Ayoub等<sup>[83]</sup>基于一项元分析<sup>[28]</sup>建立的数据集,首先使用SHAP确定了预测模型使用的7个变量,包括接管时间预算、年龄、非驾驶任务是否为固定式、接管预警是否为视觉方式等,随后基于XGBoost建立了接管时间预测模型,结果表明:相比于之前的研究,基于XGBoost的接管时间预测模型效果更好, RMSE为

0.806,调整后 $R^2$ 为0.573;Pakdamanian等<sup>[84]</sup>提出了一种基于深度神经网络的新框架DeepTake,基于车辆运行、驾驶人生理特征和主观测量等数据对驾驶人执行非驾驶任务时的接管时间进行了预测,预测准确度可达93%。

### 3.2.2 接管质量建模与预测

在接管质量建模与预测方面,回归模型和机器学习模型也是研究人员常用的手段。接管质量回归模型方面,Gold等<sup>[9]</sup>分别基于非线性回归和广义估计方程建立了接管后TTC模型(RMSE=1.07;调整后 $R^2$ =0.63)和碰撞率模型(AUC=0.91);林庆峰等<sup>[85]</sup>以接管后最小TTC=1s为阈值,设定小于或等于该阈值为危险接管组,大于1s为安全接管组,并以该分组作为因变量,基于二元Logistics回归建立了自动驾驶接管安全评价模型,该模型的安全评价准确率可达85.5%;Li等<sup>[86]</sup>针对视觉分心条件下的接管设计并开展了驾驶模拟试验,基于多元线性回归建立了接管时刻TTC与接管时间预算、面部朝向占注意力分散区的百分比之间的关系,模型的调整后 $R^2$ 为0.748。

接管质量机器学习模型方面,Pakdamanian等<sup>[84]</sup>基于DeepTake,对驾驶人执行非驾驶任务时的接管质量进行了预测,预测准确度可达83%;Du等<sup>[87]</sup>将驾驶人在接管前的生理和眼动数据、接管场景类型、交通流密度、接管时间预算等作为模型输入,综合考虑接管后最小TTC、最大合成加速度等接管质量指标将驾驶人的接管质量划分为好与差两种,作为模型输出。基于随机森林、支持向量机、K邻近、朴素贝叶斯等6种机器学习方法分别建立了接管质量预测模型,通过对比发现随机森林方法的预测效果最好,准确率可达84.3%,能够较为准确地预测驾驶人的接管质量。

### 3.3 驾驶人接管培训

智能汽车在操作逻辑和人机任务分工等方面与传统汽车存在较大差异,决定了对传统汽车的驾驶能力不能直接迁移至智能汽车,必须通过一定的驾驶培训<sup>[88]</sup>。近年来,自动驾驶接管培训逐渐受到重视,但目前相关研究较少。研究人员在针对L3自动驾驶接管培训开展研究时,通常考虑两个方面:培训内容和使用的媒介。

培训内容方面,美国、日本等国要求应包括自动驾驶系统的功能和局限、驾驶人的义务和责任、

车辆控制权的切换、人机交互内容和方式、紧急情况或异常状态下的车辆反应、应对突发情况的知识和技能等<sup>[88]</sup>。研究人员通过对具体内容的呈现形式进行改进,取得了不错的效果。Zhou等<sup>[89,90]</sup>研究发现对培训内容解释得越详细,驾驶人的接管质量越高。Krampell等<sup>[91]</sup>开发的培训方案包括14个错误学习场景,通过不同场景突出了各类系统的局限性,经过验证,该方案促进了驾驶人对自动驾驶系统的理解。Feinauer等<sup>[92]</sup>将自动驾驶培训内容游戏化,经过对比验证实验发现,培训内容游戏化更能调动驾驶人的积极性,促进他们对培训内容的掌握和运用。

在使用媒介方面,口头、书面材料、视频和驾驶实践是研究人员常用的方式。Ebali等<sup>[93]</sup>使用视频和模拟驾驶两种方式对驾驶人进行培训,他们发现两种方式均可以提升驾驶人的接管质量,并且模拟驾驶培训在提升驾驶人接管决策准确性方面效果更好。Sahai等<sup>[94]</sup>对比了书面材料、视频和驾驶实践3种培训方式对驾驶人接管行为的影响,研究表明:经历驾驶实践培训的驾驶人在紧急情况下具有更快的接管速度。驾驶实践培训具有较好的可交互性,这也许是该培训方式效果更佳的主要原因<sup>[93,94]</sup>。Feinauer等<sup>[92]</sup>将自动驾驶培训内容游戏化的方法实际上也是提高培训内容可交互性的一种体现。

## 4 存在的问题和未来研究方向

(1)未来需开展恶劣、复杂交通因素下的驾驶人接管行为研究

交通因素对驾驶人的接管行为影响较大,虽然学者们针对交通因素进行了一些探索,但雨雪天气、结冰路面等恶劣驾驶环境和隧道、山区公路等复杂道路条件下的驾驶人接管行为研究目前仍未得到关注。需要特别注意的是,这些恶劣、复杂环境正是导致自动驾驶系统故障或达到功能极限的主要原因之一。开展相关研究需要使用高仿真驾驶模拟器,以使驾驶人较为真实地体验到恶劣、复杂环境引起的颠簸、侧倾、打滑等现象。而这种驾驶模拟器的造价往往十分昂贵,使用过程也十分烦琐,这也许是复杂、恶劣环境下接管行为研究较少的主要原因。

(2)未来需进一步针对特殊驾驶人开展

## 接管行为研究

接管实际上是难度较高的手动驾驶操作,对驾驶人的驾驶能力要求比较高。以老年驾驶人、新手驾驶人等为代表的特殊驾驶人群体驾驶能力较弱,可能难以胜任接管任务。而当前,相关研究绝大多数针对国外驾驶人群体开展。种族、地域、文化、生活等各方面的巨大差异导致这些针对国外驾驶人群体的研究成果无法直接应用于中国。因此,亟须面向中国的特殊驾驶人群体进一步开展接管行为研究。开展相关研究也可主动适应我国老年驾驶人数量逐年增加、新手驾驶人数量庞大等现状,促进L3自动驾驶技术的落地。

(3)未来需进一步开展驾驶人驾驶习惯对接管行为的影响研究

接管实际上是一种手动驾驶操作,可能会受到驾驶人在日常驾驶中所形成的手动驾驶习惯的影响。探究驾驶人驾驶习惯对接管行为的影响,可为L3自动驾驶汽车的个性化设计提供建议,研发人员可根据驾驶人的手动驾驶数据挖掘出其手动驾驶习惯,进而结合接管条件有针对性地进行系统参数设置。而目前相关研究较少,仅仅探究了驾驶人跟车时的风险接受和驾驶操纵两种习惯对接管行为的影响,而其他诸如变道习惯等对接管行为也可能有重要影响。

(4)人机交互创新设计方面,未来应始终坚持及时、清晰、易懂等基本原则

对于L3自动驾驶汽车驾驶人而言,良好的人机交互设计可以提高接管反应速度,促进情景意识恢复,提升接管决策的合理性。然而,当前部分人机交互的创新设计不仅未能起到积极作用,反而恶化了驾驶人的接管行为。典型的不合理人机交互设计包括延迟发出的接管预警和信息提示、冗长繁杂的信息描述、阻碍驾驶人观察的视觉界面等。因此,在创新设计L3自动驾驶汽车的人机交互时,研究人员要充分把握及时、清晰、易懂等基本要求。

(5)接管行为建模与预测方面,未来应重点考虑驾驶人因素

对驾驶人接管行为建模与预测可为判定驾驶人是否具备执行动态驾驶任务接管的能力提供支撑。当前虽然学者们已经建立了多种接管行为模型,但这些模型未充分考虑驾驶人因素,具体为有

的模型未考虑驾驶人状态,有的模型忽略了驾驶人群体差异,尚未有模型关注驾驶人的驾驶习惯等。而接管行为影响机理研究已经充分明确了驾驶人因素在接管中的重要作用。因此,未来的接管行为建模预测应囊括更多的驾驶人因素,这样才能满足驾驶人差异化的接管需求,提高L3自动驾驶系统的适应性。

(6)驾驶人接管培训方面,未来应关注驾驶人接管能力的成长进程

接管培训近年来逐渐受到关注。在驾驶人驾驶L3自动驾驶汽车前,对其进行接管培训,是改善其接管行为的有效措施,也可间接促进L3自动驾驶技术的落地应用。当前,学者的研究专注于培训内容和媒介两个方面,也取得了一定的进展,而驾驶人接管能力的成长过程却仍未被关注。探究不同培训方案下驾驶人接管能力的成长规律,揭示不同驾驶人群体的接管能力成长差异,既可为接管培训方案的完善提供支撑,也可主动适应驾驶人群体的基础能力差异。

## 5 结 论

(1)L3自动驾驶下的驾驶人接管实际上是驾驶人从非驾驶状态向驾驶状态转换的过程。在这个过程中,驾驶人通常需要在有限时间内完成情景意识的恢复、接管决策的制定和避险操作的执行,这些对驾驶人来说是不小的考验。因此,接管已经成为限制L3自动驾驶技术落地的一大挑战。

(2)在驾驶人接管行为研究领域,国内外学者首先全面探究了自动驾驶系统因素、交通因素和驾驶人因素对驾驶人接管行为的影响机理。基于影响机理研究,学者们从人机交互优化设计、接管行为建模预测、驾驶人接管培训等方面探索了改善驾驶人接管行为的一系列举措。

(3)当前驾驶人接管行为研究领域仍存在一些亟须深入探索的方面。在影响机理层面,复杂恶劣环境、特殊驾驶人群体、驾驶人驾驶习惯的影响仍需要进一步探究。接管行为改善层面,人机交互创新设计应坚持基本原则,接管行为建模预测应重点考虑驾驶人因素,接管培训应重视能力成长研究。

(4)在驾驶人接管行为影响机理研究的指导下,通过接管行为建模与预测判定驾驶人是否具

备接管车辆控制权的能力,通过人机交互设计协助驾驶人更好地完成接管准备工作,同时通过开展接管培训提升驾驶人的接管能力。以上举措从车和人两个角度共同发力,将会促进L3自动驾驶技术更快地落地应用。

#### 参考文献:

- [1] Chen F, Lu G, Tan H, et al. Effects of assignments of dedicated automated vehicle lanes and inter-vehicle distances of automated vehicle platoons on car-following performance of nearby manual vehicle drivers[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2022, 177: 106826.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部科技司.《汽车驾驶自动化分级》推荐性国家标准报批公示[EB/OL]. [2020-03-09]. [https://www.miit.gov.cn/jgsj/kjs/jscx/bzgf/art/2020/art\\_205898e525fe4959946e49af229d928f.html](https://www.miit.gov.cn/jgsj/kjs/jscx/bzgf/art/2020/art_205898e525fe4959946e49af229d928f.html).
- [3] Chen F, Lu G, Lin Q, et al. Are novice drivers competent to take over control from level 3 automated vehicles? A comparative study with experienced drivers[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2021, 81: 65-81.
- [4] Coughlin J F, Reimer B, Mehler B. Driver wellness, safety & the development of an awarecar[J]. *AgeLab*, 2009, 15: 20100676.
- [5] 严利鑫,冯进培,郭军华,等.不同险态情景下共驾型智能车辆接管行为特征分析[J].*吉林大学学报:工学版*, 2024, 54(3): 683-691.  
Yan Li-xin, Feng Jin-pei, Guo Jun-hua, et al. Analysis of characteristics of the takeover behavior of co-driving intelligent vehicles under different dangerous scenarios[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2024, 54(3): 683-691.
- [6] 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.
- [7] McDonald A D, Alambeigi H, Engström J, et al. Toward computational simulations of behavior during automated driving takeovers: a review of the empirical and modeling literatures[J]. *Human Factors*, 2019, 61(4): 642-688.
- [8] 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 & Prevention*, 2015, 78: 212-221.
- [9] Gold C, Happee R, Bengler K. Modeling take-over performance in level 3 conditionally automated vehicles [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2018, 116: 3-13.
- [10] Louw T, Markkula G, Boer E, et al. Coming back into the loop: drivers' perceptual-motor performance in critical events after automated driving[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2017, 108: 9-18.
- [11] Eriksson A, Petermeijer S M, Zimmermann M, et al. Rolling out the red (and green) carpet: supporting driver decision making in automation-to-manual transitions[J]. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2018, 49(1): 20-31.
- [12] Zeeb K, Härtel M, Buchner A, et al. Why is steering not the same as braking? The impact of non-driving related tasks on lateral and longitudinal driver interventions during conditionally automated driving[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2017, 50: 65-79.
- [13] Petermeijer S, Bazilinskyy 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.
- [14] Vogelpohl T, Kühn M, Hummel T, et al. Transitioning to manual driving requires additional time after automation deactivation[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2018, 55: 464-482.
- [15] Wu H, Wu C, Lyu N, et al. Does a faster takeover necessarily mean it is better? A study on the influence of urgency and takeover-request lead time on takeover performance and safety[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2022, 171: 106647.
- [16] Wan J, Wu C. The effects of lead time of take-over request and nondriving tasks on taking-over control of automated vehicles[J]. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2018, 48(6): 582-591.
- [17] Körber M, Baseler E, Bengler K. Introduction matters: manipulating trust in automation and reliance in automated driving[J]. *Applied Ergonomics*, 2018, 66: 18-31.
- [18] Strand N, Nilsson J, Karlsson I C M A, et al. Semi-automated versus highly automated driving in critical situations caused by automation failures[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2014, 27: 218-228.
- [19] Ko S M, Ji Y G. How we can measure the non-driving-task engagement in automated driving: comparing flow experience and workload[J]. *Applied Ergonomics*

- ics, 2018, 67: 237-245.
- [20] Clark H, Feng J. Age differences in the takeover of vehicle control and engagement in non-driving-related activities in simulated driving with conditional automation[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2017, 106: 468-479.
- [21] Alrefaie M T, Summerskill S, Jackson T W. In a heart beat: using driver's physiological changes to determine the quality of a takeover in highly automated vehicles[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 131: 180-190.
- [22] Yi B, Cao H, Song X, et al. How to identify the take-over criticality in conditionally automated driving? An examination using drivers' physiological parameters and situational factors[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2022, 85: 161-178.
- [23] Radhakrishnan V, Merat N, Louw T, et al. Physiological indicators of driver workload during car-following scenarios and takeovers in highly automated driving[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2022, 87: 149-163.
- [24] 翟俊达, 鲁光泉, 陈发城. 自动驾驶水平对驾驶行为稳定时间的影响分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2024, 50(11): 3477-3483.  
Zhai Jun-da, Lu Guang-quan, Chen Fa-cheng. Effect analysis of automation levels on stabilization time of driving behaviors[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 50(11): 3477-3483.
- [25] Xu L, Guo L, Ge P, et al. Effect of multiple monitoring requests on vigilance and readiness by measuring eye movement and takeover performance[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2022, 91: 179-190.
- [26] Merat N, Jamson A H, Lai F C H, 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.
- [27] Lu Z, Coster X, Winter J. How much time do drivers need to obtain situation awareness? A laboratory-based study of automated driving[J]. *Applied Ergonomics*, 2017, 60: 293-304.
- [28] Zhang B, Winter J, Varotto S, et al. Determinants of take-over time from automated driving: a meta-analysis of 129 studies[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 64: 285-307.
- [29] 林庆峰, 王兆杰, 鲁光泉. 城市道路环境下自动驾驶车辆接管行为分析[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(6): 240-247.  
Lin Qing-feng, Wang Zhao-jie, Lu Guang-quan. Analysis of take-over performance for automated vehicles in urban road environments[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(6): 240-247.
- [30] Wandtner B, Schömig N, Schmidt G. Effects of non-driving related task modalities on takeover performance in highly automated driving[J]. *Human Factors*, 2018, 60(6): 870-881.
- [31] Guo L, Xu L, Ge P, et al. How resource demands of nondriving-related tasks and engagement time affect drivers' physiological response and takeover performance in conditional automated driving[J]. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2023, 53(3): 600-609.
- [32] Dogan E, Rahal M C, Deborne R, et al. Transition of control in a partially automated vehicle: effects of anticipation and non-driving-related task involvement [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2017, 46: 205-215.
- [33] Lu G, Zhai J, Li P, et al. Measuring drivers' takeover performance in varying levels of automation: Considering the influence of cognitive secondary task[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2021, 82: 96-110.
- [34] Hergeth S, Lorenz L, Krems J F. Prior familiarization with takeover requests affects drivers' takeover performance and automation trust[J]. *Human Factors*, 2017, 59(3): 457-470.
- [35] 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.
- [36] Wright T J, Agrawal R, Samuel S, et al. Effective cues for accelerating young drivers' time to transfer control following a period of conditional automation[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2018, 116: 14-20.
- [37] Politis I, Brewster S, Pollick F. Using multimodal displays to signify critical handovers of control to distracted autonomous car drivers[J]. *International Journal of Mobile Human Computer Interaction*, 2017, 9(3): 1-16.
- [38] Naujoks F, Mai C, Neukum A. The effect of urgency of take-over requests during highly automated driving under distraction conditions[J]. *Advances in Human Aspects of Transportation*, 2014, 7: 100646.

- [39] Körber M, Gold C, Lechner D, et al. The influence of age on the take-over of vehicle control in highly automated driving[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2016, 39: 19-32.
- [40] Gold C, Körber M, Lechner D, et al. Taking over control from highly automated vehicles in complex traffic situations: the role of traffic density[J]. *Human Factors*, 2016, 58(4): 642-652.
- [41] Du N, Kim J, Zhou F, et al. Evaluating effects of cognitive load, takeover request lead time, and traffic density on drivers' takeover performance in conditionally automated driving[C]//12th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, New York, USA, 2020: 66-73.
- [42] Du N, Yang X J, Zhou F. Psychophysiological responses to takeover requests in conditionally automated driving[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2020, 148: 105804.
- [43] Li S, Blythe P, Guo W, et al. Investigation of older driver's takeover performance in highly automated vehicles in adverse weather conditions[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2018, 12(9): 1157-1165.
- [44] Brandenburg S, Chuang L. Take-over requests during highly automated driving: how should they be presented and under what conditions?[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 66: 214-225.
- [45] Gong J, Guo X, Qi C, et al. Measuring takeover performance in different driving scenarios: considering the influence of non-driving-related tasks and takeover request lead time[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2023, 97: 411-421.
- [46] 鲁光泉, 陈发城, 李鹏辉, 等. 驾驶人跟车风险接受水平对其接管行为的影响[J]. *汽车工程*, 2021, 43(6): 808-814.  
Lu Guang-quan, Chen Fa-cheng, Li Peng-hui, et al. Effect of drivers' acceptance level of car-following risk on the takeover performance[J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(6): 808-814.
- [47] Wu Y, Kihara K, Hasegawa K, et al. Age-related differences in effects of non-driving related tasks on takeover performance in automated driving[J]. *Journal of Safety Research*, 2020, 72: 231-238.
- [48] Li S, Blythe P, Guo W, et al. Investigating the effects of age and disengagement in driving on driver's takeover control performance in highly automated vehicles[J]. *Transportation Planning and Technology*, 2019, 42(5): 470-497.
- [49] So J J, Park S, Kim J, et al. Investigating the impacts of road traffic conditions and driver's characteristics on automated vehicle takeover time and quality using a driving simulator[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 2021: 1-13.
- [50] 赵晓华, 陈浩林, 李振龙, 等. 不同情景下自动驾驶接管行为的影响特征[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(9): 195-214.  
Zhao Xiao-hua, Chen Hao-lin, Li Zhen-long, et al. Influence characteristics of automated driving takeover behavior in different scenarios[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(9): 195-214.
- [51] Loeb H, Belwadi A, Maheshwari J, et al. Age and gender differences in emergency takeover from automated to manual driving on simulator[J]. *Traffic Injury Prevention*, 2019, 20(s2): 163-165.
- [52] Wright T J, Samuel S, Borowsky A, et al. Experienced drivers are quicker to achieve situation awareness than inexperienced drivers in situations of transfer of control within a level 3 autonomous environment [J]. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2016, 60(1): 270-273.
- [53] 王琳岩, 张慧珺, 胡宏宇. 驾驶经验对 L3 级自动驾驶接管绩效的影响[J]. *汽车工程*, 2022, 44(10): 1521-1526.  
Wang Lin-yan, Zhang Hui-jun, Hu Hong-yu. Effect of driving experience on take-over performance of L3 automatic driving[J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(10): 1521-1526.
- [54] Jin M, Lu G, Chen F, et al. Modeling takeover behavior in level 3 automated driving via a structural equation model: considering the mediating role of trust[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2021, 157: No. 106156.
- [55] Weigl K, Schartmüller C, Wintersberger P, et al. The influence of experienced severe road traffic accidents on take-over reactions and non-driving-related tasks in an automated driving simulator study[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2021, 162: 106408.
- [56] Chen F, Lu G, Zhai J, et al. Investigating the impact of driving style on the take-over performance in level 3 automation[C]//International Conference on Transportation and Development, Reston, USA, 2020: 146-156.
- [57] Payre W, Cestac J, Delhomme P. Fully automated driving: impact of trust and practice on manual control recovery[J]. *Human Factors*, 2016, 58(2): 229-241.

- [58] Brown I D. Driver fatigue[J]. *Human Factors*, 1994, 36(2): 298-314.
- [59] May J F, Baldwin C L. Driver fatigue: the importance of identifying causal factors of fatigue when considering detection and countermeasure technologies[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2009, 12(3): 218-224.
- [60] Vogelpohl T, Kühn M, Hummel T, et al. Asleep at the automated wheel—sleepiness and fatigue during highly automated driving[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 126: 70-84.
- [61] Jamson A H, Merat N, Carsten O M J, et al. Behavioural changes in drivers experiencing highly-automated vehicle control in varying traffic conditions[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 30: 116-125.
- [62] Jarosch O, Bellem H, Bengler K. Effects of task-induced fatigue in prolonged conditional automated driving[J]. *Human Factors*, 2019, 61(7): 1186-1199.
- [63] Gonçalves J, Happee R, Bengler K. Drowsiness in conditional automation: proneness, diagnosis and driving performance effects[C]//2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Rio de Janeiro, Brazil, 2016: 873-878.
- [64] Neubauer C, Matthews G, Saxby D. Fatigue in the automated vehicle: do games and conversation distract or energize the driver?[J]. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2014, 58(1): 2053-2057.
- [65] Tassi P, Muzet A. Sleep inertia[J]. *Sleep Medicine Reviews*, 2000, 4(4): 341-353.
- [66] Wörle J, Metz B, Othersen I, et al. Sleep in highly automated driving: takeover performance after waking up[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2020, 144: 105617.
- [67] Wörle J, Metz B, Baumann M. Sleep inertia in automated driving: post-sleep take-over and driving performance[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2021, 150: No. 105918.
- [68] Jeon M, Walker B N, Yim J B. Effects of specific emotions on subjective judgment, driving performance, and perceived workload[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2014, 24: 197-209.
- [69] Jallais C, Gabaude C, Paire-Ficout L. When emotions disturb the localization of road elements: effects of anger and sadness[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2014, 23: 125-132.
- [70] Sanghavi H K. Exploring the influence of anger on takeover performance in semi-automated vehicles[D]. Blacksburg: Virginia Tech, 2020.
- [71] Du N, Ayoub J, Zhou F, et al. Examining the impacts of drivers' emotions on takeover readiness and performance in highly automated driving[J]. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2019, 63(1): 2076-2077.
- [72] Wiedemann K, Naujoks F, Wörle J, et al. Effect of different alcohol levels on take-over performance in conditionally automated driving[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2018, 115: 89-97.
- [73] Li S, Blythe P, Guo W, et al. Evaluation of the effects of age-friendly human-machine interfaces on the driver's takeover performance in highly automated vehicles[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 67: 78-100.
- [74] Ono S, Sasaki H, Kumon H, et al. Improvement of driver active interventions during automated driving by displaying trajectory pointers—a driving simulator study[J]. *Traffic Injury Prevention*, 2019, 20(s1): 152-156.
- [75] Cohen L G, Katzman N, Borowsky A, et al. Directional tactile alerts for take-over requests in highly-automated driving[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 65: 217-226.
- [76] Walch M, Lange K, Baumann M, et al. Autonomous driving: investigating the feasibility of car-driver handover assistance[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, New York, USA, 2015: 11-18.
- [77] Hong S, Yang J H. Effect of multimodal takeover request issued through A-pillar LED light, earcon, speech message, and haptic seat in conditionally automated driving[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2022, 89: 488-500.
- [78] Heo J, Lee H, Yoon S, et al. Responses to takeover request in autonomous vehicles: effects of environmental conditions and cues[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(12): 23573-23582.
- [79] Ma S, Zhang W, Yang Z, et al. Take over gradually in conditional automated driving: the effect of two-stage warning systems on situation awareness, driv-

- ing stress, takeover performance, and acceptance[J]. *International Journal of Human - Computer Interaction*, 2021, 37(4): 352-362.
- [80] Li S, Blythe P, Guo W, et al. Investigation of older drivers' requirements of the human-machine interaction in highly automated vehicles[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 62: 546-563.
- [81] 工业和信息化部 公安部 住房和城乡建设部 交通运输部. 关于开展智能网联汽车准入和上路通行试点工作的通知[EB/OL]. [2023-09-27]. [https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art\\_be04a39345354b1ba4624262f86e7cfc.html](https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art_be04a39345354b1ba4624262f86e7cfc.html).
- [82] Wu Y, Kihara K, Takeda Y, et al. Eye movements predict driver reaction time to takeover request in automated driving: a real-vehicle study[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2021, 81: 355-363.
- [83] Ayoub J, Du N, Yang X J, et al. Predicting driver takeover time in conditionally automated driving[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(7): 9580-9589.
- [84] Pakdamanian E, Sheng S, Bae S, et al. DeepTake: prediction of driver takeover behavior using multimodal data[C]//*Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, USA, 2021: 1-14.
- [85] 林庆峰, 王兆杰, 鲁光泉. L3级自动驾驶汽车的接管安全性评价模型[J]. *汽车工程*, 2019, 41(11): 1258-1264.  
Lin Qing-feng, Wang Zhao-jie, Lu Guang-quan. Takeover safety evaluation model for level 3 automated vehicles[J]. *Automotive Engineering*, 2019, 41(11): 1258-1264.
- [86] Li Q, Hou L, Wang Z, et al. Drivers' visual-distracted take-over performance model and its application on adaptive adjustment of time budget[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2021, 154: 106099.
- [87] Du N, Zhou F, Pulver E M, et al. Predicting driver takeover performance in conditionally automated driving[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2020, 148: 105748.
- [88] 王秋鸿. 面向交通安全的智能汽车安全驾驶管理对策研究[J]. *道路交通管理*, 2022, 2022(2): 34-37.  
Wang Qiu-hong. Research on safety driving management countermeasures of intelligent vehicles oriented to traffic safety[J]. *Road Traffic Management*, 2022, 2022(2): 34-37.
- [89] Zhou H, Itoh M, Kitazaki S. How does explanation-based knowledge influence driver take-over in conditional driving automation? [J]. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2021, 51(3): 188-197.
- [90] Zhou H, Kamijo K, Itoh M, et al. Effects of explanation-based knowledge regarding system functions and driver's roles on driver takeover during conditionally automated driving: a test track study[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2021, 77: 1-9.
- [91] Krampell M, Solis M I, Hjalmdahl M. Driving automation state-of-mind: using training to instigate rapid mental model development[J]. *Applied Ergonomics*, 2020, 83:No. 102986.
- [92] Feinauer S, Schuller L, Groh I, et al. The potential of gamification for user education in partial and conditional driving automation: a driving simulator study [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2022, 90: 252-268.
- [93] Ebnali M, Hulme K, Ebnali H A, et al. How does training effect users' attitudes and skills needed for highly automated driving? [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 66: 184-195.
- [94] Sahai A, Barré J, Bueno M. Urgent and non-urgent takeovers during conditional automated driving on public roads: the impact of different training programmes[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2021, 81: 130-143.