含作者信息的标题页

外部人机界面总是有帮助吗？探究外部人机界面如何干扰多车道街道上的行人行为：一项眼动追踪虚拟现实实验

Yun Ye[1,2,3], Zexuan Li[1,2], Panagiotis Angeloudis[3], S.C. Wong[4], Jian Sun[5], Haoyang Liang[5†]

[1] 宁波大学海事与交通学院，宁波，中国[2] 现代城市交通技术协同创新中心，东南大学，南京，中国[3] 交通工程与建模中心，土木与环境工程系，伦敦帝国理工学院，伦敦，英国[4] 土木工程系，香港大学，香港，中国[5] 交通运输工程学院及教育部道路与交通工程重点实验室，同济大学，上海，中国

† **通信作者**：lianghy@connect.hku.hk

致谢： 本研究得到浙江省自然科学基金（项目编号： LQN25E080011）、宁波市自然科学基金（项目编号：2024J440）、国家“111”海桥安全与智能运营中心（项目编号：D21013）以及中国香港特别行政区研究资助局（项目编号：T32-707/22-N）的资助。第五位作者还获得了Francis S Y Bong工程学教授职位的支持。 实验由同济大学TransCAVE实验室协助完成（http://202.120.189.178:5021/#/serviceSystem，账户/密码：guest/tjutju01）。资助方未参与研究设计、数据收集与处理、稿件撰写或发表决定。

作者贡献声明

Yun Ye： 概念化、形式分析、调查、方法论、经费获取、监督、撰写初稿。**Zexuan Li：**形式分析、软件、数据整理、调查、方法论、可视化、撰写初稿。**Panagiotis Angeloudis：**验证、审阅与编辑。**S.C. Wong：**审阅与编辑、经费获取。**Jian Sun：**审阅与编辑、资源。**Haoyang Liang：**概念化、项目管理、资源、审阅与编辑。

利益冲突声明

作者声明，他们不存在已知的竞争性财务利益或个人关系，可能会对本文所报告的工作产生影响。

外部人机界面总是有帮助吗？眼动追踪虚拟现实实验：探究外部人机界面如何干扰多车道街道上的行人行为

摘要

适当的通信对于行人与自动驾驶车辆之间实现高效、安全的交互至关重要。自动驾驶车辆上的外部人机界面可分为他我中心型（显示与车辆运动相关的信息）或自我中心型（引导行人行为），被认为是一种颇具前景的解决方案。尽管外部人机界面的有效性已得到广泛研究，但在无信号灯多车道街道等复杂环境中，其对行人过街行为造成干扰的可能性仍未得到充分探讨。因此，本研究开展了一项基于虚拟现实的实验，以考察自动驾驶车辆上显示的不同类型外部人机界面如何影响行人在多车道街道环境中的过街行为， 重点关注行人过街时的注视模式。结果表明，外部人机界面的存在显著增加了行人的认知负荷和分心可能性；在多车道街道上涉及多辆自动驾驶车辆的情况下，甚至会误导行人。值得注意的是，与自我中心型外部人机界面相比，他我中心型外部人机界面会使行人产生更高的认知负荷和更严重的分心。这主要表现为行人注视交互车辆上外部人机界面的时间更长、注意力分配比例更高，同时注视范围也更广，会关注非交互车道上的车辆。然而，误导行为主要是由非交互车道上让行车辆发出的外部人机界面信号引发的。在这种非对称信号配置下，自我中心型外部人机界面的误判率高于他我中心型外部人机界面。这些发现凸显了改进外部人机界面设计的重要性，以平衡不同视角下所显示信息的清晰度和一致性，尤其是在复杂的多车道交通场景中。本研究为未来自动驾驶车辆外部人机界面系统的应用与标准化提供了有价值的见解。

关键词：eHMI；行人与自动驾驶车辆交互；多车道行人过街；虚拟现实；眼动追踪数据分析

1. 引言

尽管步行仍是许多个体日常出行的基本方式，但行人一直是道路交通系统中较为脆弱的参与者。根据《2023年全球道路安全状况报告》（世界卫生组织，2023年），行人占全球交通死亡事故总数的21%，在所有道路使用者群体中位居第三。在导致行人伤害和死亡的主要因素中，分心或感知能力受损尤为重要（Wang 等人，2020）。这凸显了研究行人行为对于提升车辆–行人交互安全的重要性。

在传统道路系统中，车辆–行人之间的互动通常依赖明确的沟通方式，例如交通信号灯和人行横道，以分配通行权并确定安全过街机会。然而，在没有交通信号灯或人行横道的区域，车辆速度和距离的认知、眼神接触及肢体动作等隐性沟通方式，成为行人与车辆协商通行权的主要手段。近年来，自动驾驶技术迅速发展，自动驾驶车辆（AVs）在道路系统中的数量不断增加；在缺少交通信号灯和人行横道的情况下，这使隐性沟通变得更具挑战性（Guo et al., 2022）。根据自动驾驶车辆分级标准，4/5级自动驾驶车辆在动态监控或驾驶任务中无需驾驶员承担责任，这可能降低人类驾驶员与行人互动所带来的风险（Betz et al., 2022）。然而，自动驾驶车辆的设计与传统车辆有显著不同，这可能与行人长期以来在和传统车辆互动过程中形成的习惯相冲突，并可能影响他们的过街决策。

在自动驾驶车辆上安装外部人–机界面（外部人机界面），以传递车辆状态信息和行为提示，已成为自动驾驶车辆与行人通信的必要手段。人们提出了多种外部人机界面设计，包括拟人化显示器、面部表情、文本、灯带和投影（Chang等，2018年）。根据信息是从车辆还是行人的视角传达，现有外部人机界面可分为两类：自我中心型外部人机界面和他我中心型外部人机界面(图1）。自我中心型外部人机界面从行人的

视角提供建议信息，例如“通行”或“停止”，而他我中心型外部人机界面则从车辆视角提供参照性建议，例如“行驶中”或“制动中”。作为一种新型的车辆–行人交互方式，外部人机界面展现出提升交通效率、增强行人过马路时安全感的潜力。然而，迄今为止，大多数研究都聚焦于行人与单辆自动驾驶车辆之间的交互（Tran等，2021年）。 当多辆自动驾驶车辆都配备外部人机界面时，行人可能会接收到冲突信息（Song等，2023年）。这种情况可能会妨碍行人理解每辆车的意图，使其过街决策更加复杂，甚至可能误导其过街行为。

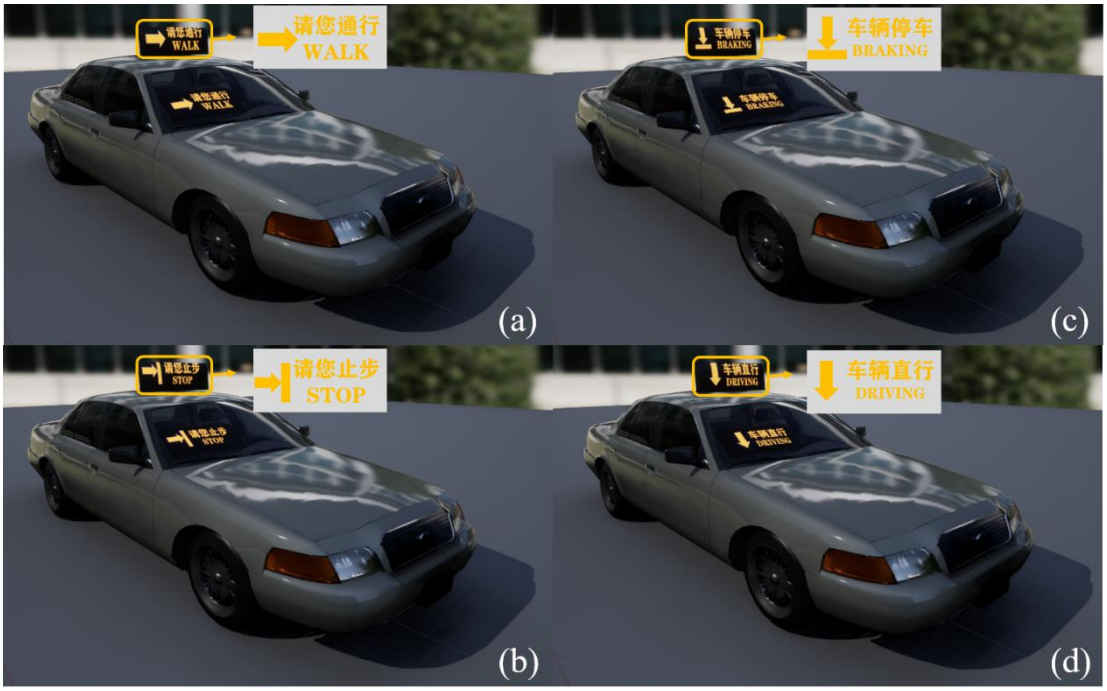


图1。 基于沟通视角的 外部人机界面类型：自我中心型外部人机界面：(a) 通行；(b) 停止；他我中心型外部人机界面：(c) 制动；(d) 行驶。

因此，本研究考察了多车辆情境下行人与自我中心型及他我中心型外部人机界面的交互，以评估外部人机界面如何影响认知负荷、造成分心并误导行人，以及这些因素如何影响行人的过街风险。为此，我们开发了一个配备眼动追踪设备的交互式虚拟现实（VR）平台，用于捕捉行人的注视模式。实验涵盖三种面向行人的通信形式——无 eHMI、他我中心型外部人机界面和自我中心型外部人机界面——以及两种自动驾驶车辆交互策略，即让行和不让行；这一框架能够全面分析影响行人认知负荷、分心和误导的关键

因素。具体而言，本研究旨在探讨以下问题：

- 多车道环境中，自动驾驶车辆显示多个外部人机界面时的行人认知负荷；
- 人行横道处，相邻车道上自动驾驶车辆的外部人机界面信息所造成的分心；
- 多车道环境中，不同自动驾驶车辆上的多个外部人机界面所引发的误导性通信；
- 多车道环境中，不同自动驾驶车辆上的多个外部人机界面所涉及的行人过街风险。

本文其余部分安排如下：第2节回顾人车交互中现有的外部人机界面应用。第3节概述本研究采用的实验设计和数据分析方法。第4节呈现结果。第5节讨论研究发现。最后，第6节总结全文。

2. 文献综述

2.1 外部人机界面研究

随着自动驾驶技术的快速发展，鉴于外部人机界面有助于行人识别车辆的状态和意图，其日益受到关注。迄今为止，研究人员已提出多种外部人机界面设计，包括灯光信号、文本显示、投影和拟人化特征（Chang 等人，2017年；Clamann 等人，2017年；Mührmann 等人，2019年；Ferenchak 等人，2022年）。这些不同的系统旨在弥补行人与人工驾驶车辆互动时传统上存在的非语言交流线索的缺失。Barendse 等人（2019年）依据两种截然不同的“视角”对外部人机界面进行了分类：自我中心通信和异我中心通信。自我中心型外部人机界面为行人提供直观指引，重点关注行人自身的行动，例如建议他们“通行”或“停止”；异我中心通信则向行人告知车辆当前的行为或状态，例如显示“制动”或“行驶”等信号。这一区别不仅体现了外部人机界面设计重点的差异，也会显著影响行人对环境风险的感知、注意力分配以及

过街决策。然而，关于这两种信息视角结合呈现的研究仍相对有限。

大量实证研究已证实，外部人机界面能够有效提升行人安全并增强决策信心。研究普遍认为，外部人机界面有助于提高行人的情境意识，减少他们在决策过程中的不确定性，并提高过街效率（Izquierdo 等人，2023年）。此外，多项研究指出，外部人机界面是弥合行人与自动驾驶车辆之间通信鸿沟的一种有前景的解决方案，尤其是在路权协商中，能够增强行人对自动驾驶车辆的信任（Habibovic 等人，2018年；Kooijman 等人，2019年；Dey 等人，2021年）。然而，外部人机界面并非在所有交通场景中都会带来积极效果。一些研究指出，在复杂的交通环境中使用外部人机界面可能存在安全隐患。例如，Eisma 等人（2019年）指出，投影或动态灯带等强烈视觉刺激可能会分散行人的注意力，降低他们对周围交通环境的感知。此外，过于指令性的外部人机界面信息可能促使行人过早过街，即使当时并不安全（Kaleefathullah 等人，2022年；Lee 等人，2024年）。此外，当行人误解外部人机界面信息，或仅凭车辆运动学线索便足以安全决策时，外部人机界面的存在可能导致认知混乱，加剧环境不确定性（Weber 等人，2019年；de Winter 等人，2022年）。

2.2 外部人机界面对行人过街行为的干扰

在信号交叉口，自动驾驶汽车与行人的交互具有清晰的结构。然而，在无信号或无优先通行权区域，行人与自动驾驶车辆之间的通信变得模糊不清（Rasouli 等，2019年）。这类环境会使行人受到干扰，进而损害其注意力、风险感知和决策能力。大多数研究关注行人在过街时感受到的分心和认知负荷。然而，在复杂的交通环境中，由这些因素导致的误导行为也构成了干扰机制的重要组成部分，例如，行人因外部人机界面信号含糊或相互冲突而误判安全过街机会。

关于误导行为的研究仍相对有限，尤其是在多智能体交互场景中。

分心效应是最常见的研究主题之一，主要指行人在过街过程中转移注意力的行为（Bungum 等人，2005年）。过街时转移注意力的因素会显著增加事故风险（Mohammed，2021年）。为更好地理解复杂环境中的行人行为及其相关风险，研究人员广泛探讨了在自动驾驶情境下，这些分心因素如何影响行人反应和决策。除了行人的主动行为外，周围环境的视觉复杂性也是导致注意力资源无意识分配不当的关键原因之一，尤其是在高度依赖视觉输入的任务中（Rosenholtz 等人，2007年）。Schwebel 等人（2024年）将行人分心分为“技术性”（如使用设备）和“社交性”（如交谈）两类。社交干扰（如群体互动）可能更加危险，因为这会导致行人忽略关键的交通线索。Hossain 等人（2024年）发现，所有类型的分心都会增加事故风险和伤害严重程度。分心行人会出现步态不稳、反应迟缓和违规横穿马路等行为（Wang 等人，2022年；Campisi 等人，2024年；Raoniar 和 Maurya，2024年）。观测结果显示，分心行人过街速度较慢，视觉注意较少，安全性也较低（O’Dell 等人，2023年；Krishna 等人，2024年）。

认知负荷是行人干扰中的另一个重要因素。在交通行为研究中，“认知负荷”指个体在道路系统中通行时处理信息所承受的心理负担（Dommes，2019年）。行人依赖认知能力处理视觉信息、评估风险，并在复杂环境中迅速做出决定（Stavrinos 等人，2018年）。信息过多或任务过于复杂会增加认知负荷，损害注意力、理解能力和决策能力。虚拟现实技术的出现使研究人员能够在受控实验条件下系统地考察行人行为（Ye等人，2020；Ye等人，2023）。虚拟现实干扰任务揭示了复杂环境如何影响过街行为和认知分配（Schneider，2019年；Tapiro 等人，2020；Tian 等人，2022年）。Weiss等人（2022年）在双任务实验范式中操控认知负荷水平，发现即使在高负荷条件下，行人理解外部人机界面通信的能力仍相对不受影响。不过，他们也指出，真实环境中的多源干扰仍可能削弱外部人机界面的有效性。

行人理解外部人机界面通信的能力仍相对不受影响。不过，他们也指出，真实环境中的多源干扰仍可能削弱外部人机界面的有效性。

尽管现有研究已充分证实行人分心会增加风险，但误导性信息是威胁行人安全的另一个关键因素，却往往被忽视。认知与社会心理学将误导性信息定义为因模糊性或欺骗而导致错误解读的刺激（Pillai and Fazio, 2021），它会削弱行人的风险感知和判断（Kaleefathullah, 2022）。在自动驾驶车辆–行人交互中，不明确或相互矛盾的外部人机界面信号可能误导行人（Holländer 等人, 2019）。目前鲜有研究探讨外部人机界面如何同时分散行人注意力并误导行人。在复杂的多车辆交通环境中，设计不当的外部人机界面不仅可能分散行人的注意力，还可能扭曲他们对路权协商或车辆让行意图的理解，从而加剧事故风险。

表1总结了与干扰对行人过街行为影响相关的文献。简而言之，尽管外部人机界面在优化自动驾驶车辆–行人交互和提升行人安全方面展现出巨大潜力，现有研究大多聚焦于特定设计或孤立情景。在多车道、多主体环境中，不同外部人机界面视角同时存在是否会无意间分散行人注意力或误导行人，仍有待系统探究。

表1。行人过街干扰因素研究综述 g.

类别		主要发现	作者
认知 load	虚拟现实认知干扰任务	高视觉杂乱会增加漏过街机会的情况，成年人和儿童均如此	Tapiro 等人 (2020)
		听觉—认知会增加发生不安全决策的概率；时间压力会导致更小的可接受间隙和风险更高的尝试穿越	Tian 等人 (2022年)
	双重任务实验	认知负荷的增加不会显著影响行人理解电子人机界面图标的速度或准确度	Weiss等人 (2022年)
		理解电子人机界面图标	
分心效应	注意力分心	分心行人可能需要更多过街时间，这会影响他们的安全	Mohammed (2021年)
	分心类型	不同分心类型的发生受到多种因素的影响，并表现出强情境依赖性	Schwebel 等人 (2024年)
	分心		

		不同类型的行人分心	Hossain 等人 (2024年)
		取决于具体情境，且与事故严重程度和地点显著相关	
		导致视觉和听觉分心的任务	Wang 等人 (2022年)
		显著损害行人反应并改变	
		脑激活模式，增加安全风险	
		分心行人通行速度较慢且无视	Campisi 等人 (2024年)
		标志	
	.....的影响	分心行人更有可能违反	Raoniar & Maurya (2024年)
		交通信号灯、通行速度较慢，并遭遇险些碰撞	
	分心	分心会增加发生不安全	
		交互的概率，而更快的步行速度会增加	Krishna 等人 (2024年)
		风险；视觉行为洞见对安全	
		干预至关重要	
		分心行人的安全行为较少，	O'Dell等人 (2023年)
		对交通的观察较少，且过马路所需时间更长	
误导效应	潜在误导效应	重复暴露于误导性信息	Holländer等人等人（2019年）
	外部人机界面的	增加对虚假信息的相信	

2.3 本研究的目的

本研究旨在探究行人在多车道街道上与自动驾驶车辆显示的多个外部人机界面交互时的过街行为及其潜在风险机制，重点关注四个关键维度：认知负荷、分心效应、误导行为和过街风险。具体而言，研究探讨了在复杂的多主体交通环境中，不同类型的外部人机界面信息如何通过这些干扰机制影响行人的注意力分配、风险感知和决策行为。研究通过主观问卷和虚拟现实实验收集数据，记录行人在多车道街道上与配备自我中心型和他我中心型外部人机界面的自动驾驶车辆交互期间的眼动、过街行为和自我报告反馈。研究采用广义线性混合模型（GLMM），分析多维因素对行人心理状态、行为反应和过街风险的影响。研究结果揭示了复杂自动驾驶车辆与行人交互场景中外部人机界面可能产生的干扰及其安全影响，并为优化外部人机界面设计和制定现实交通政策提供了理论见解与实践指导。

3. 方法论

实验设计包括VR场景开发和问卷设计。通过虚拟现实实验收集行人的客观行为和眼动数据，并通过问卷获取主观认知数据。随后，采用广义线性混合模型分析客观行为数据和主观认知数据，以评估在多车道街道环境中，外部人机界面如何通过认知负荷、分心效应、误导效应和过街风险影响行人行为。

图2展示了整体框架。

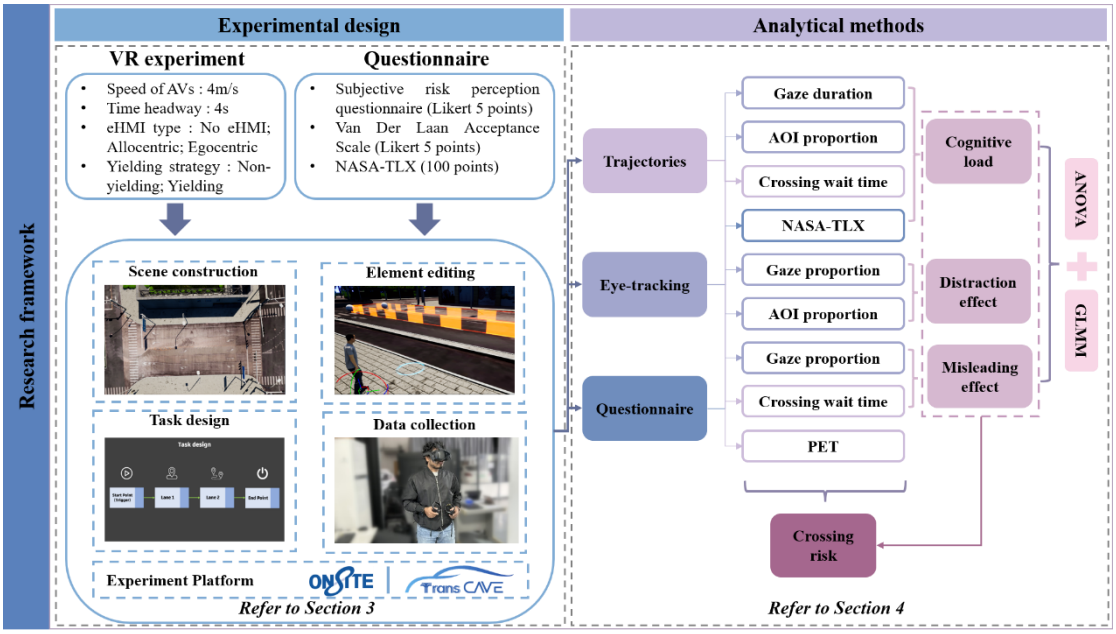


图2. 研究框架。

3.1 数据收集

3.1.1 参与者

共招募了45名参与者（31名男性和14名女性），年龄为20–28岁（均值= 23.29，标准差（SD）= 1.74），参与行人与自动驾驶车辆交互虚拟现实实验；该实验经大学伦理委员会批准。所有参与者均在实验开始前签署知情同意书，并在实验结束后获得报酬。 表2总结了参与者的人口统计信息。

表2. 参与者的人口统计学特征。

变量	频率	比例
性别		
女性	14	31.1%
Male	31	68.9%

持有驾照者		
Yes	41	91.1%
No	4	8.9%
实际驾驶经验		
<1 年	20	44.4%
1–3年	16	35.6%
3–5年	7	15.6%
>5 年	2	4.4%
教育程度		
本科生	4	8.9%
研究生	41	91.1%
交通运输领域的研究人员或从业者		
Yes	35	77.8%
No	10	22.2%

3.1.2 实验设备

为安全地采集自动驾驶车辆–行人在过街过程中的交互行为，我们使用功能强大的游戏开发引擎 Unreal 创建了一个虚拟双向四车道城市人行横道场景（图3）。参与者需要佩戴配备眼动追踪功能的 VIVE Focus 3 头戴式设备，并使用控制器操控虚拟角色，如图3所示。VIVE Focus 3 头戴式设备的分辨率为 4896×2448 像素（每只眼睛 2448× 2448 像素），刷新率为90 Hz。实验在宽敞的实验室中进行，参与者可以自由移动。场景启动后，车辆以4 m/s的恒定速度从左向右行驶。

为在整个实验期间准确追踪参与者的注视行为，并收集全面的眼动数据以供后续深入分析，我们在头戴式设备内部安装了眼动仪。该系统利用热力图和注视追踪功能测量参与者的注视时间和方向，从而全面分析车辆–行人交互行为。眼动仪以 120 Hz 的频率提供双眼注视数据，精度为 0.5°–1.1°。它采用九点校准法，兼容 Unity 和 Unreal 开发引擎，并可输出时间戳、注视起点和注视方向等数据。

实验在同济大学 OnSite 委员会（https://www.onsite.com.cn）拥有的 TransCAVE 平台上构建并开展。该实验平台提供高度定制化且沉浸感强的动态交互式虚拟现实环境，拥有丰富的交通场景库，并支持灵活构建涉及行人和交通系统的多种交互式测试环境。本研究利用该平台考察行人与自动驾驶车辆的交互行为。

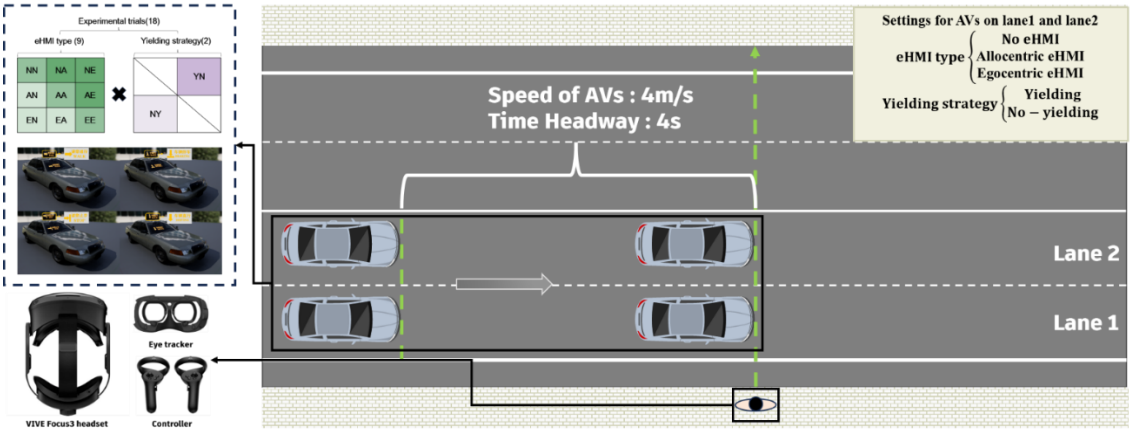


图3。 虚拟环境和实验设备概览（外部人机界面类型：无 eHMI（N）、他我中心型外部人机界面（A）和自我中心型外部人机界面（E）；让行策略：让行（Y）和不让行（N））。

3.1.3 实验设计

针对自动驾驶车辆，研究考虑了两个关键自变量：（1）基于视角的外部人机界面类型（即无外部人机界面、自我中心型外部人机界面和他我中心型外部人机界面）；（2）交互策略（即让行或不让行行为）。图3展示了实验场景和运动学参数。两股自动驾驶车辆车流同时出现在行人前方的两条车道上，每辆车均以恒定的 14.4 km/h 速度行驶，车头时距为 4 秒。自动驾驶车辆持续生成，以确保参与者在过街任务中必须与车辆互动。

在组合层面，三种类型的外部人机界面在两条车道上进行了系统配对，由此形成九种不同的电子人机界面组合。为准确呈现现实世界多智能体交互中车辆行为不一致的复杂性，同时限制试验总数并保持关键因素组合的代表性，本研究采用了部分因子设计（Tait 等人，2013）。具体而言，在

车辆交互策略方面，研究有选择地纳入了两条车道上的自动驾驶车辆表现出不同让行行为的情景，以提高多样性和生态效度。因此，共设置了18种实验条件，如图3所示，其中还展示了两种类型的外部人机界面在实验场景中的呈现方式。由于本研究侧重分析不同外部人机界面视角对行人的影响，因此外部人机界面主要显示文本消息。为消除颜色差异可能造成的干扰，本研究采用控制变量法，使所有外部人机界面均以统一颜色显示消息。

为考察参与者在不同 eHMI 组合下的过街行为，本研究考虑了多种自变量，包括人口统计因素、实验设计变量和主观测量指标，详见表3。

表3. 自变量描述。

人口统计变量	**解释**	**均值（标准差）**
性别	男性 = 0 (68.9%), 女性 = 1 (31.1%)	—
Age	行人年龄，范围为 20–28 岁	23.289 (1.730)
教育	本科生 = 0 (8.9%), 研究生 = 1 (91.1%)	—
从业者	否 = 0 (77.8%), 是 = 1 (22.2%)	—
持有驾照者	否 = 0 (8.9%), 是 = 1 (91.1%)	—
实际驾驶经验	<1 年 = 1 (44.4%), 1–3年 = 2 (35.6%), 3–5年 = 3 (15.6%), >5 年 = 4 （4.4%）	—
实验设计变量	**解释**	**均值（标准差）**
让行策略	不让行 = 0 (50.0%), 让行 = 1 (50.0%)	—
车道1外部人机界面类型	无 eHMI = 0 (33.3%),	—

车道2外部人机界面类型	异我中心 = 1 (33.3%), 自我中心 = 2 (33.3%) 无 eHMI = 0 (33.3%), 异我中心 = 1 (33.3%), 自我中心 = 2 (33.3%)	—
误导情境1	误导 = 1 (33.3%) 无误导 = 0 (66.7%)	—
误导场景2	误导 = 1 (33.3%) 无误导 = 0 (66.7%)	—

主观变量	解释	均值（标准差）
对自动驾驶车辆的理解	五点李克特量表	4.022 (0.174)
对自动驾驶车辆的信任	五点李克特量表	3.715 (0.305)
与风险感知相关的	五点李克特量表	2.271 (0.338)
至自动驾驶车辆		
对电子人机界面的理解	五点李克特量表	3.000 (0.097)
对外部人机界面的信任	五点李克特量表	3.844 (0.135)
过街关注度	五点李克特量表	3.517 (0.451)
过街遵从度	五点李克特量表	4.167 (0.083)
对他人的	五点李克特量表	4.341 (0.270)
态度		

因变量	解释	Mean	SD	Min	Max
车道1注视时间	对车道1的注视时间	7.516	4.511	0.225	40.450
AV	过街前的自动驾驶车辆				
注视比例	对……的注视比例	0.163	0.131	0	0.556
车道1电子人机界面	过街前车道1电子人机界面				
车道2的注视时间	过街 对车道2自动驾驶车辆的注视时间	0.262	0.155	0	0.791
AV	过街前自动驾驶车辆				
车道注视比例	对……的注视比例	0.126	0.172	0	1.000
2号车道电子人机界面	过街前的2号车道电子人机界面				
过街前等待时间	过街 过街前等待时间	11.450	5.254	2.622	41.814
误导行为1	误导 = 1 (22.5%) 无误导 = 0	—	—	—	—
误导行为2	(77.4%) 误导 = 1 (27.4%)	—	—	—	—

	无误导 = 0 (72.5%)				
	严重冲突 = 1 (49.2%)				
车道1冲突	非严重冲突 = 0 (50.7%)	—	—	—	—
	严重冲突 = 1 (48.3%)				
车道2冲突	非严重冲突 = 0 (51.6%)	—	—	—	—

3.1.4 问卷设计

（1）临场感测量

ITC临场感量表（ITC-SOPI）问卷由Lessiter等人（2001年）设计，用于测量参与者在虚拟现实环境中的主观临场感，涵盖四个维度：空间临场感、投入度、生态效度和负面影响。

- **空间临场感**通过“我觉得自己身处所呈现的环境中”和“我觉得那些人物和/或物体几乎要碰到我了”等陈述，评估参与者身处所展示环境中的感受。

- **投入度**通过“我觉得自己融入其中了”“我玩得很开心”和“我的体验很强烈”等陈述，评估体验过程中的心理投入和愉悦感。

- **生态效度**指环境的可信度和自然度，可通过“环境看起来非常自然”和“人物与物体看起来非常逼真”等陈述进行评估。

- **负面影响**根据“我感到头晕”“我感到恶心”和“我的眼睛感到疲劳”等陈述，衡量参与者可能出现的任何不良生理反应。

参与者需要在虚拟现实实验结束时填写 ITC-SOPI问卷。

（2）模拟器晕动症的测量

模拟器晕动症问卷（SSQ）广泛用于评估模拟器晕动症（Bouchard等，2007年）。该问卷量化由

虚拟环境诱发的症状，并评估其在三个主要症状群中的严重程度：

- **眼动症状**：眼疲劳、聚焦困难、视物模糊和头痛；
- **定向障碍**：头晕和眩晕；
- **恶心相关症状**：恶心、胃部不适、唾液分泌增加和打嗝。

每个症状类别均单独计分，以确保全面评估。参与者需在每完成四次虚拟现实实验试次后填写这份问卷，以确保准确评估模拟器晕动症。

（3）认知负荷的测量

美国国家航空航天局任务负荷指数（NASA-TLX）由美国国家航空航天局（NASA）开发，是评估主观心理负荷应用最广泛的工具之一。它的被试间变异性最小，并获得了用户的广泛接受度（Febiyani 等，2021年）。表 A1展示了其设计和评分标准。

NASA-TLX 问卷通过六个维度评估工作负荷，分别为心理需求（MD）、身体需求（PD）、时间需求（TD）、自身表现（OP）、努力程度（EF）和挫折程度（FR），每个维度均按 100 分制评分。完成主观评分后，参与者将六个维度进行两两组合比较，并在每对维度中选出更重要的一项，从而统计出各维度被选中的次数，汇总结果见 表A3。随后，使用 公式（1）计算加权得分：

$$F = \sum_{i=1}^{6} M_i \times \frac{P_i}{15} \tag{1}$$

其中，F 表示认知工作负荷总得分，M_i 表示参与者在第 i 个维度上的得分，而 P_i 表示第 i 个维度在权重比较表（表A3）中被选中的次数。

（4）态度测量

范德拉恩量表（Van Der Laan 等人，1997）广泛应用于涉及自动化系统、驾驶辅助系统和自动驾驶车辆的情景，帮助研究人员评估用户的情绪反应、接受度和期望

对新技术的态度。该量表包含四个维度，每个维度均采用李克特量表（例如，1–5 分）进行测量，以评估用户的态度和感知：

- **感知有用性**：用于评估用户是否认为某项技术或系统能够提升效率、舒适度或其他功能表现。
- **感知易用性**：用于衡量用户认为该技术的使用难易程度。
- **信任**：用于评估用户对该技术的信任程度，这是影响其接受度的关键因素。
- **满意度**：用于衡量用户的整体满意度，作为接受度的一项指标。

参与者需要在虚拟现实实验结束时完成这份问卷。

(5) 风险感知测量

本研究使用的主观风险感知问卷采用五点李克特量表，从九个维度评估参与者对自动驾驶车辆和外部人机界面的理解，以及其风险感知：人口统计背景、对自动驾驶车辆的理解（Li 等，2024年）、对自动驾驶车辆的信任、对自动驾驶车辆风险的感知（Deb 等，2017年）、对电子人机界面的理解、对外部人机界面的信任（Carmona 等，2021年）、参与者过街时自身的注意力水平、参与者对过街规范的遵守情况，以及参与者对其他道路使用者的态度（（Esmaili 等，2021年）。

参与者须在虚拟现实实验结束时完成这份问卷。

为测量风险感知，我们基于观测问卷条目得出的因子得分，通过验证性因子分析（CFA）估算潜变量得分。随后将这些潜在得分纳入分析模型。计算潜变量得分的主要步骤如下：

- 标准化因子载荷（）是针对每个观测变量使用偏最小二乘结构方程建模算法（Sarstedt 等，2022年）计算得出的。
- 随后，将每个观测变量转换为Z分数。Z分数是一种标准化得分，以标准差表示原始得分偏离均值的程度。其计算公式为公式（2）：

$$Z = \frac{(X - \mu)}{\sigma} \tag{2}$$

其中，X为原始得分，μ为均值，σ为标准差。最后，使用公式（3）计算潜变量得分：

$$\xi = \sum(\lambda \times Z) \tag{3}$$

其中ξ为潜变量得分，λ为因子载荷系数，Z为相应观测变量的Z分数。

3.1.5 实验流程

到达实验室后，首先要求参与者签署知情同意书，其中详细说明了潜在风险和不适感。该知情同意书解释说，参与者可能会体验到现实生活中接近车辆所引起的那种压力，但这种压力不会超过正常水平。如果感到任何不适，他们可以告知实验员并立即停止流程。此外，参与者可能会出现轻微疲劳或不适，并且可以随时休息或退出虚拟现实实验。

实验包括视频记录和问卷，所有收集的信息均严格保密。图4展示了总体实验流程，包括以下步骤：

步骤1. 实验介绍

实验员介绍了总体流程，并提供了关键的安全说明。参与者获知，他们将根据自己的安全判断决定何时过街，并应注意车辆车顶、挡风玻璃或侧面显示的任何信息，这些信息可能传达车辆状态或提供过街指导。他们需要结合具体情境理解这些信息，并安全过街。随后，实验员详细说明了虚拟现实设备和手持控制器的使用方法。

步骤 2. 眼动校准

参与者熟悉实验流程和设备操作后，在协助下佩戴虚拟现实头显。为确保数据收集准确，他们需要完成内置眼动追踪系统的校准流程。

步骤 3。预实验

在所有问题得到解答后，参与者完成了一项简短的预实验，以熟悉实验流程。在该情境中，车辆仅出现在单一车道内，且所有车辆均配备了外部人机界面，使参与者能够直观地识别不同的外部人机界面类型。预实验结束后，参与者完成了模拟器晕动症问卷，以评估其对虚拟现实环境的适应情况。预实验包括两次试验；如根据参与者的表现认为有必要，则会增加试验次数。

步骤4。正式实验

正式实验包括18个试次。每个试次结束后，根据NASA-TLX量表评估参与者因过街事件产生的主观认知负荷。为监测参与者的模拟器晕动症体验，每完成四个试次便施测一次模拟器晕动症问卷。

实验结束时，根据范德拉恩量表评估不同eHMI组合对参与者过街决策的影响；根据ITC-SOPI问卷评估参与者在虚拟现实环境中的主观临场感；并根据主观风险感知问卷测量参与者对自动驾驶车辆和外部人机界面的理解程度，以及其感知到的风险水平。

步骤5。实验结束

完成问卷后，参与者获得了金钱补偿，并被告知实验已结束。

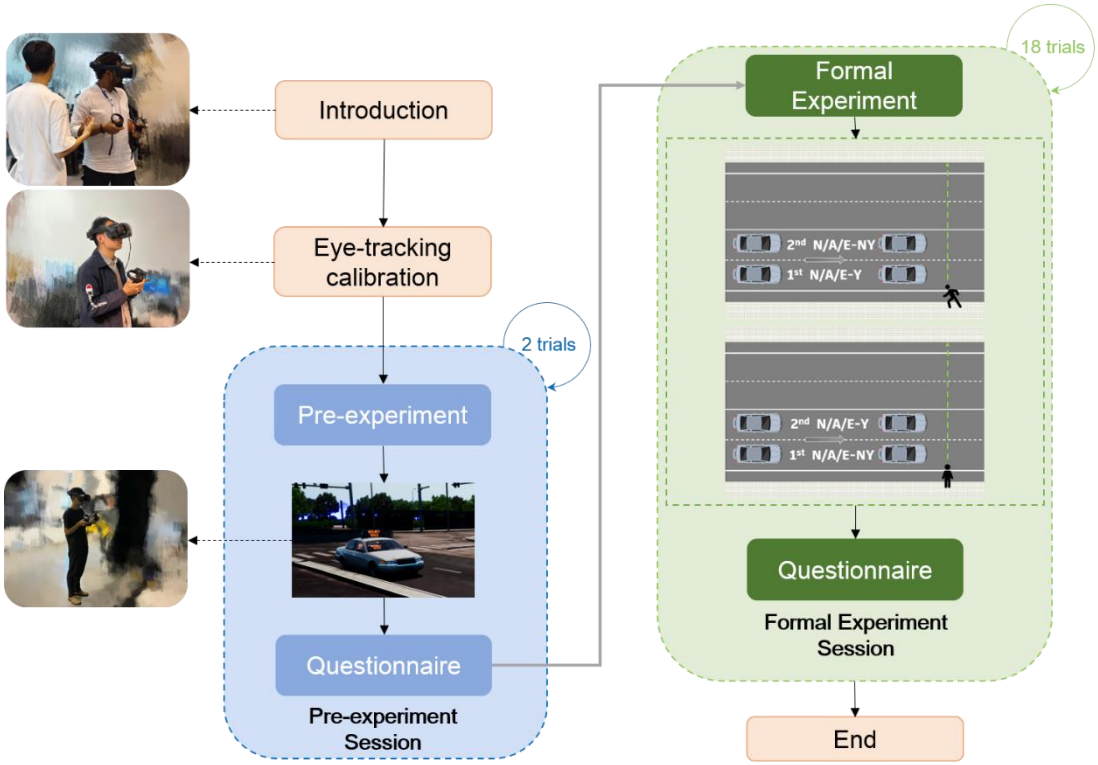


图4. 总体实验流程。

3.2 统计分析

3.2.1 认知负荷

认知负荷理论为理解行人如何轻松处理来自自动驾驶车辆的电子人机界面信息提供了一个重要视角。该理论由Sweller（2011）提出，认为人类工作记忆处理信息的能力有限，且学习与决策任务的复杂程度会影响认知负荷。随着任务复杂度增加，工作记忆的负担也会加重，这可能影响学习和决策过程。

在自动驾驶环境中，当行人面对来自多辆自动驾驶车辆的电子人机界面信息时，必须同时处理视觉、认知和情境信息；这可能增加认知负荷，进而影响行人的交互行为，例如注视时间和等待时间。图5(a)展示了热力图，用于呈现实验期间行人的注视模式。

认知负荷分析采用三个主要指标，衡量不同 eHMI组合对行人过街行为的影响：

- **车道1自动驾驶车辆注视时间：**过街前注视1号车道自动驾驶车辆的时间；

- **车道1电子人机界面注视比例：**过街前注视1号车道自动驾驶车辆上的电子人机界面的比例，定义见公式（4），示意见 图5(b)：

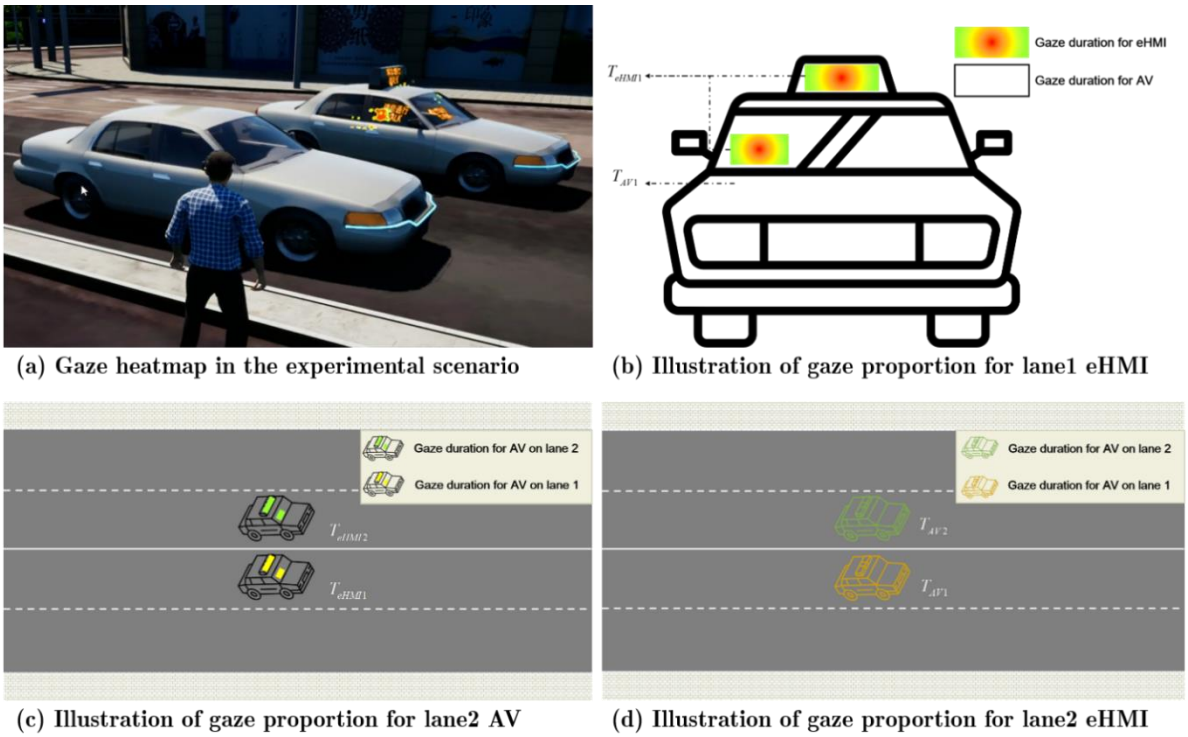
$$P_{eHMI1} = \frac{T_{eHMI1}}{T_{eHMI1} + T_{AV1}} \tag{4}$$

其中 表示1号车道自动驾驶车辆上电子人机界面的注视时间，而表示注视车道1自动驾驶车辆的时间；

T_{eHMI1} T_{AV1}

- **过街前等待时间：**行人过街前等待的时间；

- **NASA-TLX：**评估行人的主观认知负荷。



(a) Gaze heatmap in the experimental scenario

(b) Illustration of gaze proportion for lane1 eHMI

(c) Illustration of gaze proportion for lane2 AV

(d) Illustration of gaze proportion for lane2 eHMI

图5。认知负荷和分心效应的计算：(a) 注视实验期间的热力图；(b) 车道1电子人机界面的注视比例；(c) 2号车道自动驾驶车辆的注视比例；(d) 2号车道电子人机界面的注视比例。

3.2.2 分心效应

行人过街时，场景中过多的视觉对象可能导致主要依赖视觉输入的任务出现不当的注意力分配。由于行人过街时的主要决策过程通常

发生于过街前阶段，本节使用两个指标来衡量分心对行人过街决策的影响：

- **2号车道自动驾驶车辆注视比例：**过街前对2号车道自动驾驶车辆的注视比例，使用公式（5）计算，并如图5（c）所示：

$$P_{AV2} = \frac{T_{AV2}}{T_{AV1} + T_{AV2}} \tag{5}$$

其中 和 分别表示对第1和第2车道自动驾驶车辆的注视时间。

- **2号车道电子人机界面注视比例：**过街前对2号车道自动驾驶车辆上外部人机界面的注视比例，使用公式（6）计算，并如图5（d）所示：

$$P_{eHMI2} = \frac{T_{eHMI2}}{T_{eHMI1} + T_{eHMI2}} \tag{6}$$

其中 和分别表示对第1和第2车道自动驾驶车辆上外部人机界面的注视时间。

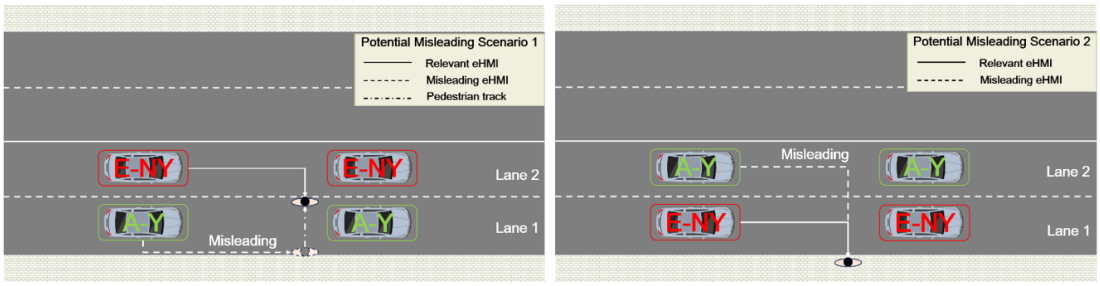
3.2.3 误导效应

在复杂的多车道交通环境中，多源外部人机界面信息不仅会导致分心，还可能传递含糊或相互冲突的信号，从而误导行人的过街决策。本研究重点关注与潜在风险相关的误导效应，并将其归纳为两种主要的潜在误导场景：

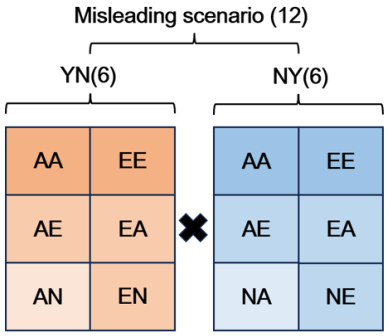
- **误导情境1：**车道1自动驾驶车辆的外部人机界面发出误导性信息，指示行人穿过马路，导致行人过度信任该外部人机界面。因此，行人可能不会充分注意第2车道的自动驾驶车辆，与这些车辆交互时也可能不会等待足够长的时间。

- **误导场景2：**来自2号车道自动驾驶车辆外部人机界面的误导性信息指示行人过街，导致行人过度依赖该外部人机界面。因此，行人过街前未能充分关注车道1上的自动驾驶车辆，并且在与这些车辆交互时等待的时间不够长。

这些潜在误导场景的典型示例见图6(a)和图6(b)，而图6(c)展示了误导场景的所有可能组合。



(a) Misleading scenario type 1　　(b) Misleading scenario type 2



(c) The combinations of misleading scenarios

图6。可能产生误导效应的多车道行人过街场景

效应：(a) **误导情境1**；(b) **误导场景2**；(c) 误导场景的组合（外部人机界面类型：无 eHMI（N）、他我中心型外部人机界面（A）和自我中心型外部人机界面（E）；让行策略：让行（Y）和不让行（N））。

关于上述两种误导场景，判断行人在过街过程中是否确实受到误导的标准如下：

- **误导行为1：**过街穿越车道2时，如果行人注视第2车道的自动驾驶车辆的时长和过街穿越车道2前的等待时间低于特定的最小阈值，则认为行人受到了误导情境1的误导。

- **误导行为2：**行人对车道1中车辆的注视时间和过街前等待时间低于某些最小阈值时，即认为行人受到了误导场景2的误导。

离群值检测是为关键指标设定阈值的常见方法。然而，基于传统离群值检测参数的技术，例如标准差、中位数绝对偏差和四分位距（IQR），高度依赖数据的统计特性。因此，这些方法往往容易受到极端离群值的影响，导致计算出的阈值出现偏差，并妨碍对真实离群值的准确识别。为提高阈值确定的稳健性，本文采用了 Yang 等人 （2019年）提出的两阶段阈值法（两阶段阈值法）。该方法基于传统四分位距法，通过减小极端值对阈值计算的影响，提高了离群值检测的准确性。

第一阶段，计算四分位距（IQR），以识别超出初步阈值的极端值，具体定义见公式（7）：

$$\text{Upperbound} = Q_3 + 1.5 \times IQR,\ \text{Lowerbound} = Q_1 - 1.5 \times IQR \tag{7}$$

所有落在此范围之外的观测值均被暂时排除。

第二阶段，基于清理后的数据集（已移除极端值）重新计算四分位距，并使用更新后的第一四分位数（Q1）和第三四分位数（Q3）确定最终阈值。这一两步流程可确保最终阈值较少受到极端离群值的影响，并更准确地反映主体数据的分布。

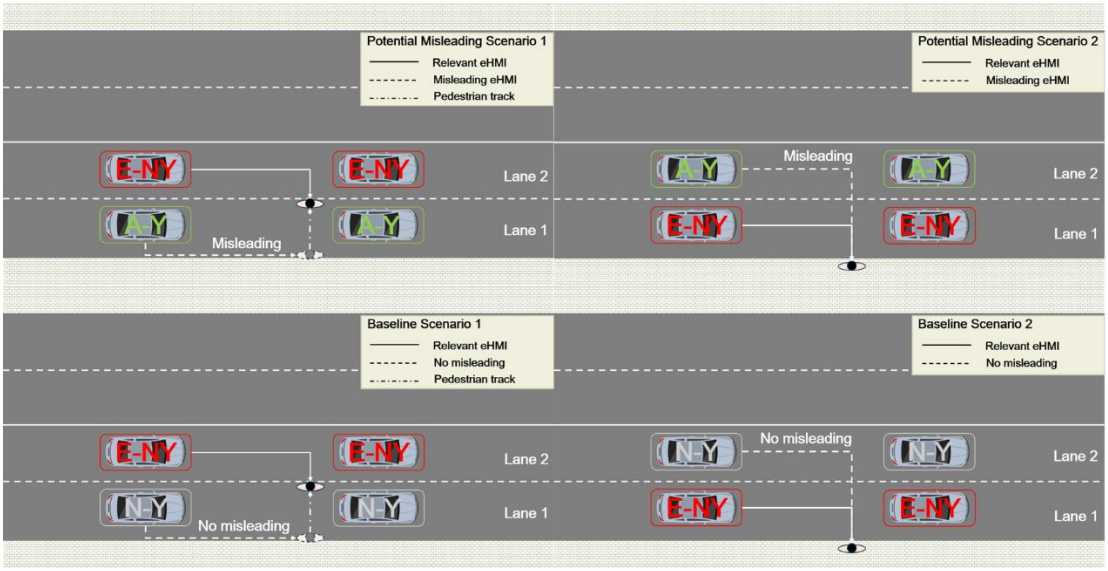
为确定识别潜在误导行为的合理阈值，首先选取不含误导条件的情景作为基线组。基于这些正常过街条件，使用两阶段阈值法（2T）确定行人未受误导时关键行为指标（如注视时间和等待时间）的典型分布范围。随后，将得出的阈值用作判定标准，以评估在涉及潜在误导因素的实验场景中，行人是否确实受到误导。

误导行为1涉及行人与车道2上未让行的车辆交互，并可能受到车道1上让行车辆所显示的外部人机界面信号的误导。因此，选取车道1自动驾驶车辆未配备外部人机界面的三个情景作为基线组（其中包括车道2自动驾驶车辆分别配备无 eHMI、自我中心型外部人机界面或他我中心型外部人机界面的组合），以构建参考阈值，如图7(a)所示。误导的发生由以下因素判定：

检验行人与车道2车辆交互期间的注视时间和等待时间是否低于阈值，具体表述见公式（8）：

$$\text{Mislead}_{\text{type1}} = \begin{cases} 1, \text{ if } T_{gaze_AV2} < \theta_{gaze}^{(1)} \text{ and } T_{wait_AV2} < \theta_{wait}^{(1)} \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \tag{8}$$

其中 表示朝向车道2车辆的注视持续时间， 表示与车道2车辆交互前的等待时间，且 和 分别表示从基线场景中得出的相应阈值；在这些场景中，车道1自动驾驶车辆上未配备外部人机界面。



(a) Comparison between misleading scenario type 1 and baseline scenario

(b) Comparison between misleading scenario type 2 and baseline scenario

图7。用于提取阈值的潜在误导场景与基线场景比较：(a) 误导情境1；(b) 误导场景2。

误导行为2涉及行人与车道1中不让行的车辆互动，并可能受到车道2中让行车辆提供的外部人机界面信息误导。因此，选取车道2自动驾驶车辆未配备外部人机界面的三种情景作为基线组（包括车道1自动驾驶车辆未配备外部人机界面、配备自我中心型外部人机界面或配备他我中心型外部人机界面的组合），如图7(b)所示。通过判断1号车道车辆的注视时间和等待时间是否低于各自设定的阈值，来确定是否发生误导，具体如公式（9）所示：

$$\text{Mislead}_{type2} = \begin{cases} 1, \text{ if } T_{gaze_AV1} < \theta_{gaze}^{(2)} \text{ and } T_{wait_AV1} < \theta_{wait}^{(2)} \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

其中 指注视车道1车辆的持续时间， 表示过街前的等待时间，且 和是从车道2自动驾驶车辆未配备外部人机界面的基线情景中得出的相应阈值。

3.2.4 过街风险

在本研究中，“过街风险”特指行人与车辆发生潜在碰撞的风险。该风险根据侵入后时间（PET）进行测量，其定义为行人离开潜在碰撞区域至车辆到达潜在碰撞点之间的时间间隔（Cooper, 1984; Howlader等人, 2024年）。PET 根据实验数据，使用公式（10）计算，其中表示行人离开潜在冲突区域的时间点，表示车辆到达潜在冲突区域的时间点。

$$PET = T_2 - T_1 \quad (10)$$

为对计算所得的风险等级进行分类，我们依据既定阈值将PET值划分为二元类别（Islam等人，2023年）。具体而言，PET小于1.5秒被定义为严重冲突（记为1），而PET大于或等于1.5秒则被定义为非严重冲突或安全交互（记为0）；这是因为1.5秒的PET阈值与碰撞事故和冲突之间的相关性最强（Zheng等人, 2016年; Islam等人，2023年）。随后，在广义线性混合模型分析中使用该二元风险指标，以考察导致自动驾驶车辆–行人交互处于高风险的因素。

3.2.4 广义线性混合效应模型

研究选择广义线性混合模型来分析不同因变量在参与者之间的变化，因为该模型不仅能够同时估计固定效应（例如不同eHMI组合对行人注视行为的影响）和随机效应（例如参与者之间的个体差异），还支持通过应用适当的连接函数，对具有不同分布（例如二项分布和泊松分布）的因变量进行建模，从而建立自变量与因变量之间的关系

变量。因此，它是一种高度灵活的方法，能够处理各种类型的因变量，并对具有层次结构的数据进行建模。广义线性混合模型定义见 公式 (11)：

$$g\left(\mathbb{E}\left[Y_{ij}\right]\right)=X_{ij}\beta+Z_{ij}u_{j} \tag{11}$$

其中 表示-个体在-随机效应组（例如，不同个体和不同实验组）中的第 次观测的因变量， 是链接函数，用于将期望 映射到线性预测空间。链接函数的具体形式取决于响应变量的分布。例如，对于二项分布，使用logit函数；对于泊松分布，则使用对数函数。此外， 是的期望； 是固定效应设计矩阵，其中包括固定效应变量的值，例如协变量；是固定效应系数（回归系数），表示自变量对响应变量的影响；是随机效应设计矩阵，用于描述随机效应变量；而 是随机效应项，用于捕捉与个体或实验组相关的随机变异，通常假设其服从正态分布。

Y_{ij} i j g $\mathbb{E}\left[Y_{ij}\right]$ Y_{ij} X_{ij} β Z_{ij} u_j $\left(0,\sigma^2_N\right)$

本研究将行为和生理指标作为因变量，将实验设计变量、人口统计变量和主观变量作为自变量。为考虑个体差异，将每位参与者建模为随机效应。

如果在任何广义线性混合模型中发现情境变量具有统计显著性，则进行事后分析，以进一步考察不同条件之间的差异。对不同实验组合进行两两比较，并采用 Bonferroni校正调整多重比较。事后检验得出的对比系数代表不同条件之间效应的估计差异，从而能够确定存在显著差异的具体组合。所有统计分析均在 95% 置信水平下进行（$\alpha = 0.05$）。

4. 结果

4.1 沉浸感与模拟器晕动症

为确保虚拟现实实验结果的可靠性，使用 ITC-SOPI量表测量参与者的沉浸感（Lessiter等人，2001年），得分范围为 1 至 5（表4）。

表4. ITC-SOPI分析结果。

ITC-SOPI 得分	不同方面的均值（标准差）得分			
	空间临场感	投入度	自然度	负面影响
	3.69（0.54）	3.56（0.47）	3.67 (0.65)	2.11 (0.74)

空间临场感、投入度和自然度的均值得分均高于 3.0，而负面影响的得分则低于 2.50。这些结果表明，参与者认为 VR模拟器环境具有较强的临场感。

此外，通过模拟器晕动症问卷评估了参与者在每次实验后的不适感。根据Bouchard等（2007年）所概述的症状分类，分类标准见表5。表6和图8总结了总体结果。

表5. 模拟器晕动症问卷症状分类。

得分	类别
0	无症状
<5	症状可忽略
5–10	症状极轻微
10–15	症状显著
15–20	相关症状
>20	问题模拟器

表6。 模拟器晕动症问卷 实验期间的记录。

模拟器晕动症问卷得分 (F统计量，*p*-值)	不同时间点的均值（标准差）得分（虚拟环境累计时间）				
	场景1–2（热身）	场景3–6	场景7–10	场景11–14	场景15–18
恶心	1.69 (5.49)	1.48 (4.53)	2.54 (8.48)	3.18 (8.87)	2.54 (7.44)
$(F = 0.42,\ p = 0.79)$					
眼动	3.71 (8.02)	4.55 (11.13)	7.92 (12.82)	6.91 (8.97)	8.59 (9.08)
$(F = 1.97,\ p = 0.10)$					
定向障碍	6.19 (18.19)	6.19 (16.67)	6.81 (16.95)	4.95 (9.46)	5.88 (10.49)
$(F = 0.09,\ p = 0.98)$					

总分	4.15 (10.43)	4.48 (10.92)	6.73 (12.39)	5.98 (7.71)	6.82 (7.58)
($F = 0.70$, $p = 0.59$)					

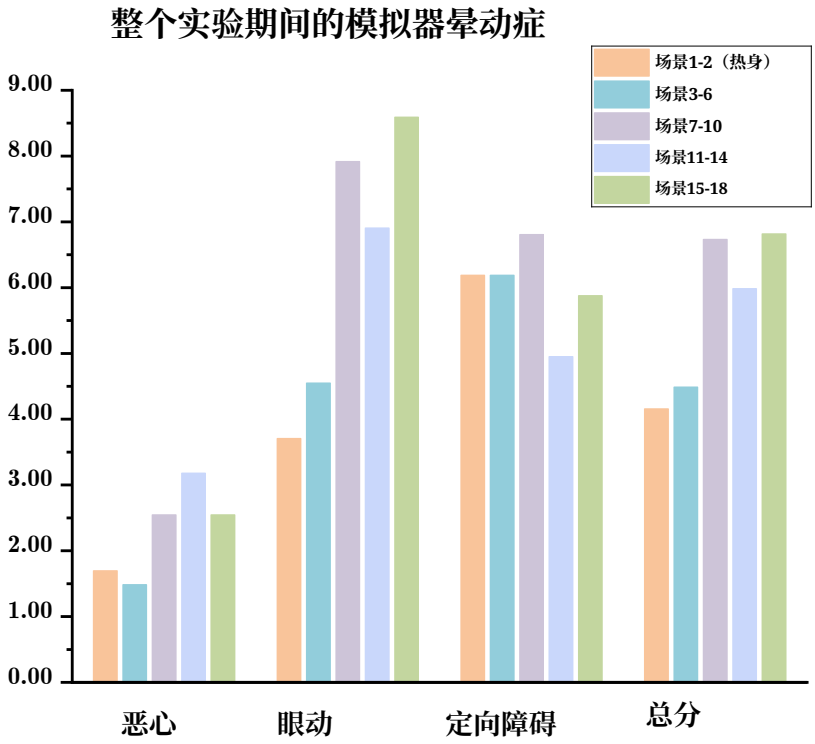


图8. 整个实验期间的模拟器晕动症。

所有参与者在虚拟现实中的模拟器晕动症问卷得分均低于10，表明症状轻微（见表6）。模拟器晕动症随时间略有增加（图8），但这一变化不具有统计显著性。在模拟器晕动症问卷结果的统计分析中，F统计量反映组间差异，而p值用于评估其统计显著性。通常认为，p值小于0.05表示具有统计显著性。在本实验中，所有维度的p值均远高于0.05，这表明不同阶段的模拟器晕动症问卷得分变化不具有统计显著性。总体而言，虚拟实验环境表现出较高的可用性，实验结果被认为是可靠的。

4.2 主观风险感知

4.2.1 参与者对自动驾驶车辆的态度

详细的主观问卷见 附录B。图9展示了参与者对自动驾驶车辆的态度观测值。“对自动驾驶汽车的理解”部分包含四个条目。平均而言，78%的参与者表示对自动驾驶汽车有较高的理解。“对自动驾驶汽车的信任”包含六个条目；81.5%的参与者

认为自动驾驶车辆能够提高安全性，并打算今后在出行时使用自动驾驶车辆（对自动驾驶汽车的信任第1和第2项）。

然而，就自动驾驶车辆运行期间的交互行为和安全性而言，只有36%的参与者表示完全信任自动驾驶车辆（“对自动驾驶汽车的信任”3和5）。在是否愿意向他人推荐自动驾驶车辆方面，45.5%的参与者表示非常同意。

“对自动驾驶汽车的风险感知”部分包括五个条目。82.5%的参与者不担心自动驾驶车辆发生故障或干扰人工驾驶车辆（“对自动驾驶汽车的风险感知”1–3）。然而，参与者对于自动驾驶车辆与行人或非机动车交互更加谨慎（“对自动驾驶汽车的风险感知”4和5）。42%的参与者不担心自动驾驶车辆与人类交互风险，而30%的参与者对此表示担心。

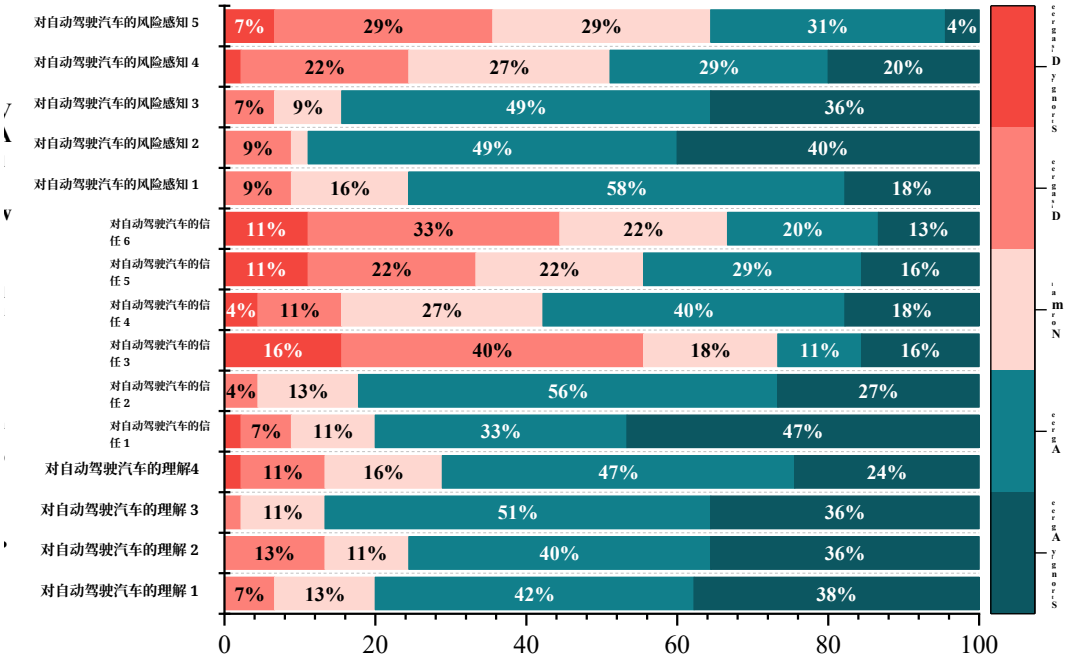


图9。 参与者对自动驾驶车辆的态度。

4.2.2 参与者对外部人机界面的态度

图10 展示了参与者对外部人机界面的态度。仅有38%的参与者表示了解外部人机界面或曾接触过。不过，72%的参与者信任外部人机界面对安全和减少事故所发挥的作用，表明他们有意愿在未来使用（“对外部人机界面的信任”1–4）。

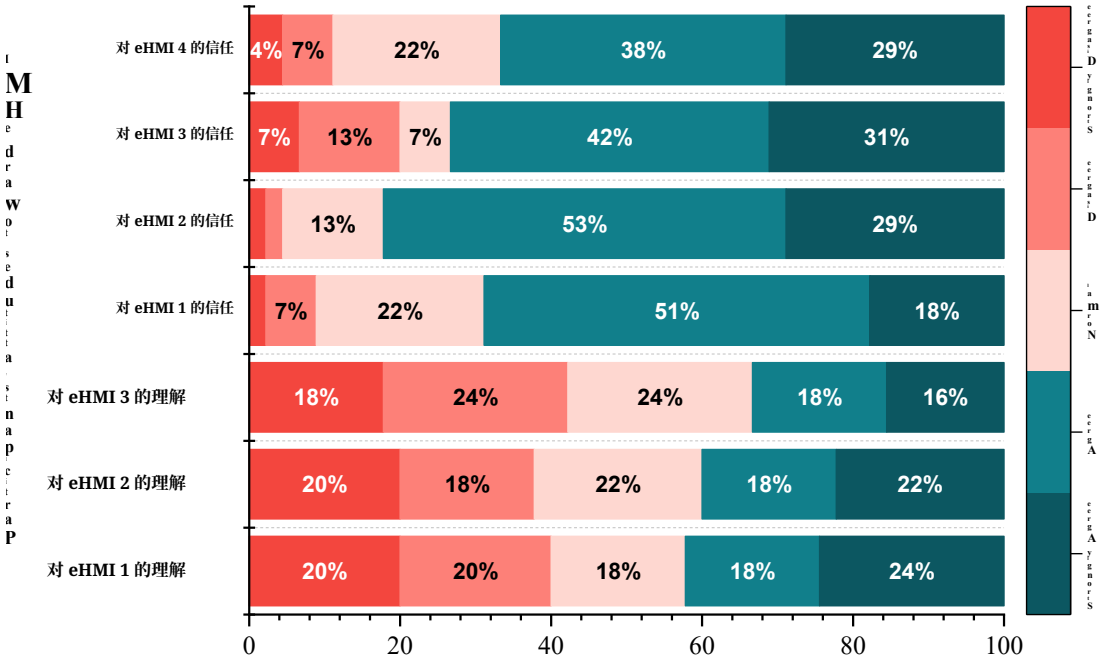


图10。 参与者对外部人机界面的态度。

4.2.3 参与者对其他道路使用者的态度

图11 展示了参与者对其他道路使用者的态度。在“过街关注度”（4个项目）方面，56%的参与者承认过街时会聊天或听音乐等分心，说明注意力不集中较为普遍。在“过街守规性”（6个项目）方面，78%的参与者表示会严格遵守交通规则。关于互动，87%的参与者表示态度积极（项目1–4），61.5%的参与者倾向于保守礼让（项目5–6）。

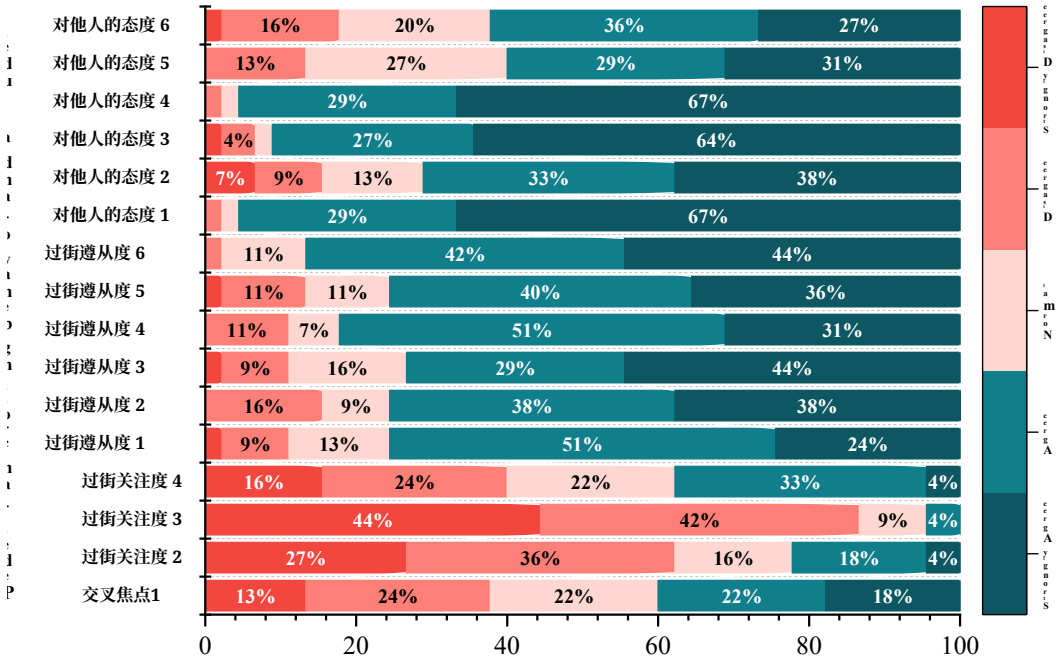


图11。 行人的过街行为和态度。

4.2.4 验证性因子分析

为了将主观变量作为因变量纳入广义线性混合模型，我们通过验证性因子分析计算了每个主观变量的潜在得分。图12展示了所有相关变量的因子载荷及其他统计指标。

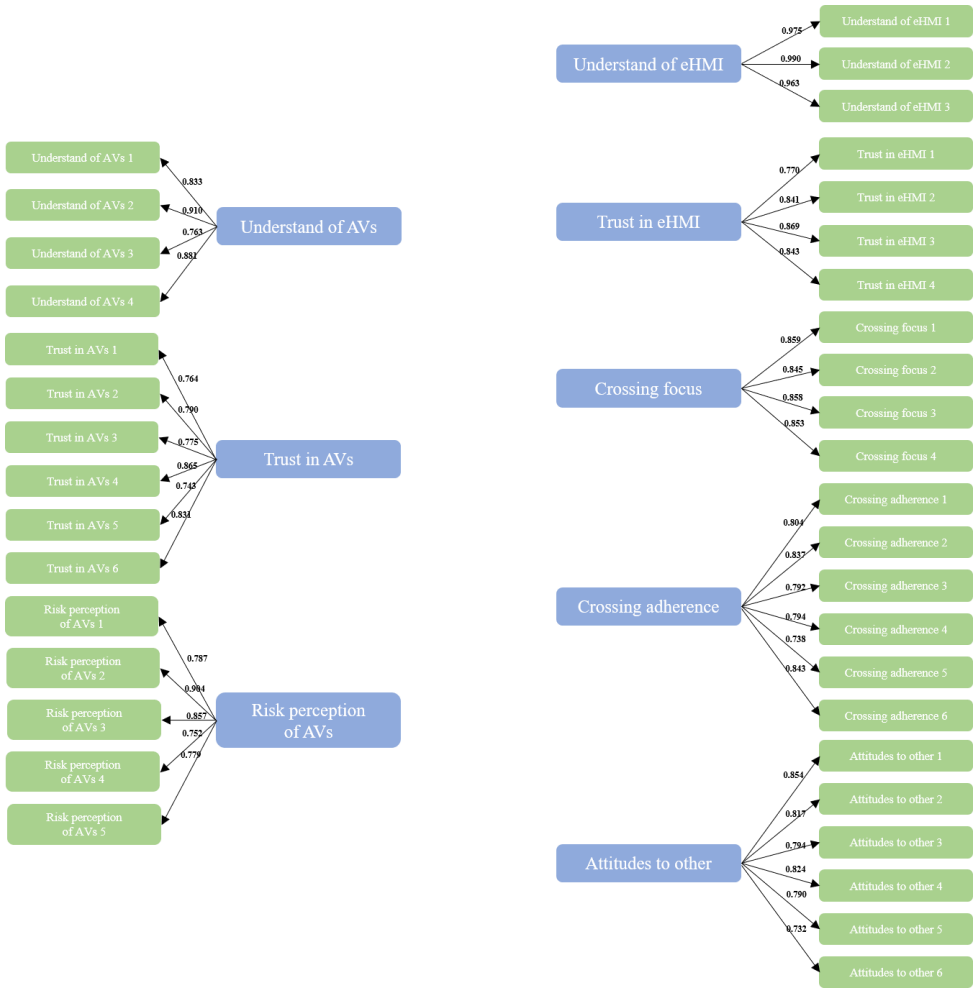


图12。主观构念的外部模型表示。

4.2.5 Van Der Laan 接受度量表

为评估参与者对两种外部人机界面类型的主观评价，我们比较了异我中心通信和自我中心通信情况下的 Van Der Laan 接受度量表得分。结果见 图13，表明参与者认为自我中心通信在有用性和满意度两方面都优于异我中心通信。

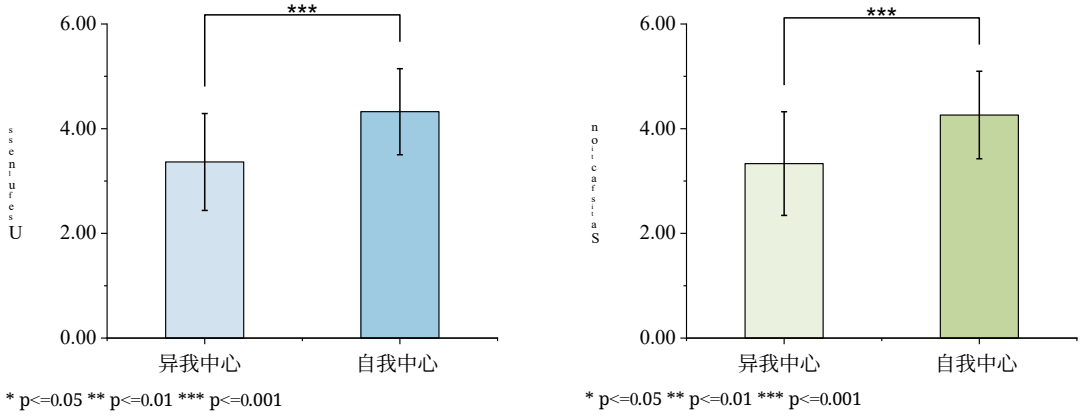


图13。 Van Der Laan 接受度量表得分，误差线表示标准误：(a) 有用性；(b) 满意度。

4.3 认知负荷

4.3.1 不同外部人机界面类型下的认知负荷

在虚拟现实实验中，眼动追踪的兴趣区域涵盖自动驾驶车辆及其外部人机界面。我们根据汇总的注视数据生成热力图，以评估不同外部人机界面类型对认知负荷的影响。如图14(a)和 14(b)所示，当只有车道1上的自动驾驶车辆配备外部人机界面时，他我中心型外部人机界面引发的注视强度高于自我中心型外部人机界面。这表明，异我中心通信可能会给行人带来更高的认知负荷。

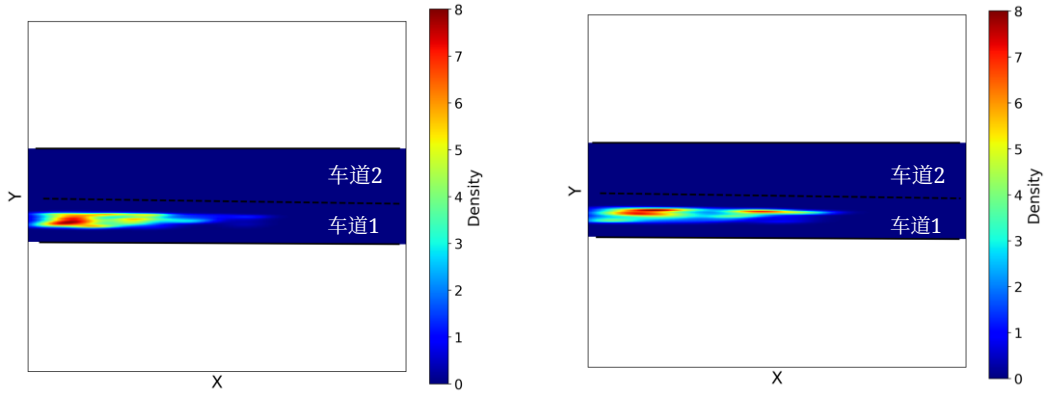


图14.不同情景下行人对外部人机界面的注视核密度热力图：(a) 车道1采用异我中心通信，车道2未配备外部人机界面；(b) 车道1采用自我中心通信，车道2未配备外部人机界面。

根据实验设计，第1和第2车道自动驾驶车辆上不同外部人机界面类型的组合形成了九种不同的情景。首先进行方差分析，以比较异我中心和自我中心

通信对认知负荷的影响。为排除车道2车辆分心造成的影响，选取了两组车道2自动驾驶车辆均无外部人机界面的情景，从而单独考察车道1自动驾驶车辆上外部人机界面的影响。结果如表7所示，外部人机界面类型对行人注视外部人机界面的比例有显著主效应（$(1, 179) = 5.818$, < 0.05, $= 0.032$）。采用最小显著差异检验进行事后比较（Williams和Abdi，2010），结果如图15(a)所示。当车道2自动驾驶车辆上没有外部人机界面时，车道1自动驾驶车辆发出的异我中心通信（$= 0.194$, $= 0.143$）造成的认知负荷高于自我中心通信（$= 0.144$, $= 0.130$）。这表明，与自我中心通信相比，行人可能更难理解异我中心通信。

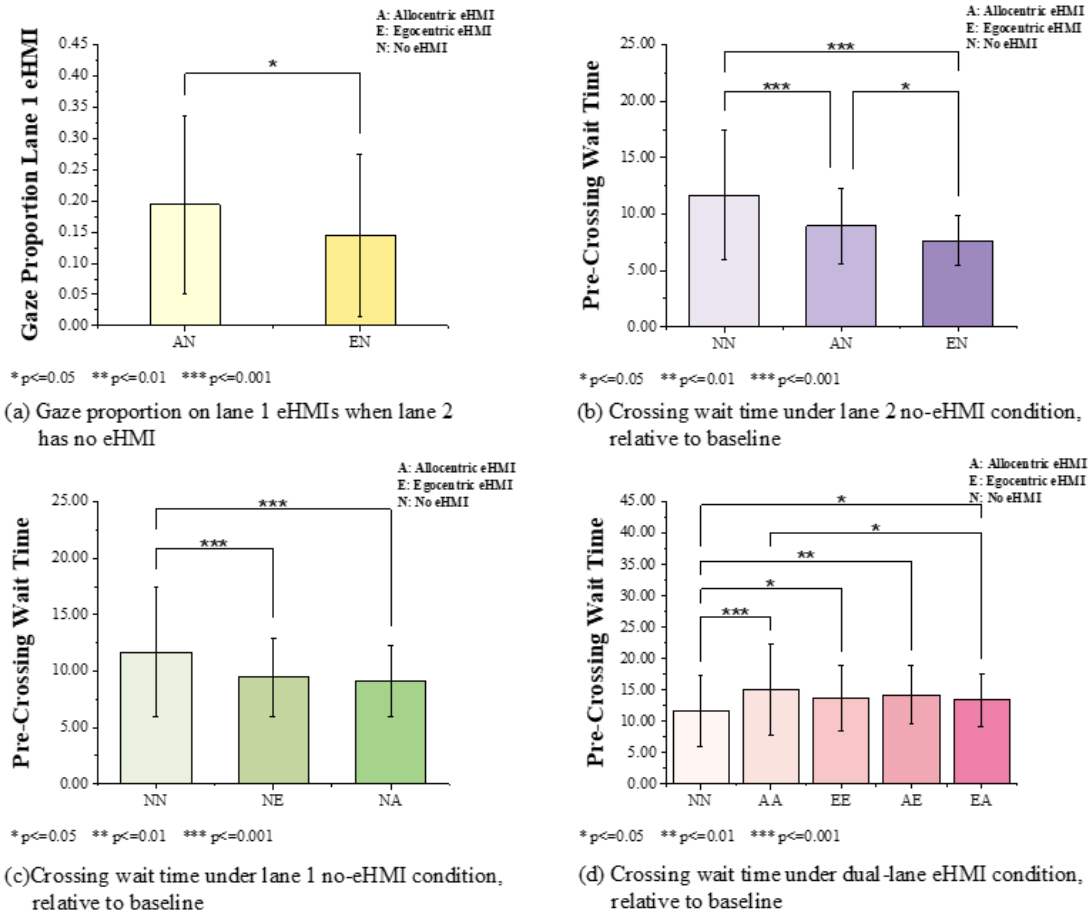
M SD

M SD

表7。当2号车道自动驾驶车辆上不存在外部人机界面时，外部人机界面类型对注视1号车道自动驾驶车辆上外部人机界面的比例的影响的方差分析结果。

变量	车道1电子人机界面 type	描述性统计 样本 size	Mean	SD	方差分析 df	F	p	ηp^2
车道注视比例	1	45	0.194	0.143	(1,179)	5.818	* 0.032	
车道1电子人机界面	2	45	0.144	0.130				

* p ≤ 0.05, ** p ≤ 0.01, *** p ≤ 0.001 注：对于 外部人机界面类型，“1” = 异我中心，“2” = 自我中心



(a) Gaze proportion on lane 1 eHMIs when lane 2 has no eHMI

(b) Crossing wait time under lane 2 no-eHMI condition, relative to baseline

(c)Crossing wait time under lane 1 no-eHMI condition, relative to baseline

(d) Crossing wait time under dual-lane eHMI condition, relative to baseline

图15。 认知负荷相关的方差分析结果，误差线表示标准误。

此外，还进行了方差分析，以比较不同情景下的行人等待时间，包括基线组（两条车道上的自动驾驶车辆均无外部人机界面）以及仅车道1配备了外部人机界面的自动驾驶车辆的两种情景。结果见 表8，显示外部人机界面类型对行人过街前等待时间有显著主效应（ $(2, 269) = 23.444,$ $< 0.001,$ $= 0.149$）。图15(b)展示了通过最小显著差异检验进行的事后比较结果。当车道2的自动驾驶车辆均未配备外部人机界面（ $= 11.669,$ $= 5.712$）时，车道1的自动驾驶车辆配备外部人机界面有助于行人更快地做出过街决策，这表明单个外部人机界面可以降低认知负荷。在外部人机界面类型方面，自我中心通信（ $= 7.630,$ $= 2.214$）带来的认知负荷低于异我中心通信（ $= 8.935,$ $= 3.376$）。

表8。 外部人机界面类型对车道1过街前等待时间影响的方差分析结果，与基线情景相比。

变量	描述性统计	方差分析

	车道1电子人机界面 type	样本 size	Mean	SD	df	F	p	ηp^2
过街前等待 time	0	45	11.669	5.712				
	1	45	8.935	3.376	(2,269)	23.444	***	0.149
	2	45	7.630	2.214				

* p ≤ 0.05，** p ≤ 0.01，*** p ≤ 0.001注：对于 外部人机界面类型，“0” = 表示无 eHMI，“1” = 表示异我中心，“2” = 表示自我中心

接下来，将基线组与仅车道2自动驾驶车辆配备外部人机界面的两种情景进行了比较。结果见 表9，表明外部人机界面类型对行人等待时间有显著主效应（$(2,\ 269) = 9.574,\quad < 0.001,\quad = 0.067$）。图15(c)展示了通过最小显著差异检验进行的事后比较结果。当车道1没有配备外部人机界面的自动驾驶车辆时，车道2的自动驾驶车辆配备外部人机界面缩短了行人的决策时间。然而，自我中心通信（$= 9.099,\quad = 3.149$）与异我中心通信（$= 9.452,\quad = 3.491$）之间未发现显著差异，这可能是因为行人在过街前更关注车道1上的自动驾驶车辆。

表9。 方差分析结果：与基线情景相比，外部人机界面类型对车道2过街前等待时间的影响。

变量	2号车道电子人机界面 type	描述性统计 样本 size	Mean	SD	方差分析 df	F	p	ηp^2
过街前等待时间 time	0	45	11.669	5.712				
	1	45	9.452	3.491	(2,269)	9.574	***	0.067
	2	45	9.099	3.149				

* p ≤ 0.05, ** p ≤ 0.01, *** p ≤ 0.001注：对于外部人机界面类型，“0” = 表示无 eHMI，“1” = 表示他我中心型，“2” = 表示自我中心型

最后，将基线组与五种两条车道均配备外部人机界面的自动驾驶车辆的情景进行了比较。表10展示了结果，表明外部人机界面类型对行人等待时间具有显著主效应（$(4,\ 449) = 4.566,\quad < 0.01,\quad = 0.039$）。通过最小显著差异检验进行的事后比较结果见图15(d)。当两条车道均有配备外部人机界面的自动驾驶车辆时，等待时间显著长于基线情景，这表明多个外部人机界面会增加认知负荷。当两条车道均有

配备他我中心型外部人机界面的自动驾驶车辆（$= 15.028,\ SD = 7.209$）。

表10。 与基线情景相比，双车道配备电子人机界面的自动驾驶车辆对过街前等待时间影响的方差分析结果。

变量	车道1 eHMI type	车道2 eHMI type	描述性统计			方差分析			
			样本量	Mean	SD	*df*	*F*	*p*	ηp^2
Pre-过街等待时间	0	0	45	11.669	5.712	(4,449)	4.566	**	0.039
	1	1	45	15.028	7.209				
	2	2	45	13.617	5.257				
	1	2	45	14.216	4.714				
	2	1	45	13.402	4.238				

* p ≤ 0.05, ** p ≤ 0.01, *** p ≤ 0.001注：对于 外部人机界面类型，“0” = 无eHMI，“1” = 异我中心，“2” = 自我中心

4.3.2 影响认知负荷的因素

参与者内的重复测量可能引入了个体内相关性。为评估eHMI组合对认知负荷的影响，同时考虑被试内相关性，我们采用了广义线性混合模型。认知负荷通过客观行为指标与主观自我报告测量相结合的方式进行评估。行为指标包括过街前对车道1车辆的注视时间、注视车道1自动驾驶车辆外部人机界面的比例，以及过街前等待时间。主观认知负荷感知采用NASA-TLX量表测量。上述指标均设为模型中的因变量。其中，过街前对车道1自动驾驶车辆的注视时间（偏度 = 2.238，峰度= 16.724）和过街前等待时间（偏度= 1.302，峰度= 6.037）均为非负且呈右偏的连续变量；因此，模型采用伽马分布（Berchialla等，2009）和对数链接函数。对车道1自动驾驶车辆外部人机界面的注视比例属于连续分布于0到1之间的比例数据；因此，模型采用贝塔分布和logit链接函数。NASA-TLX得分（偏度 = -0.045，峰度=2.380）符合正态分布，因此采用高斯分布和对数链接函数进行建模。为具体考察不同车道上的eHMI组合如何影响认知负荷，我们将双车道自动驾驶车辆外部人机界面之间的交互项纳入模型，如表11所示。结果显示，eHMI组合具有显著影响，认知负荷指标随eHMI参数的变化而变化。

首先，关于过街前行人对1号车道车辆的注视时间，研究将两条车道上的车辆均未显示外部人机界面的情况选作

参考情境。与此基线相比，两条车道车辆的外部人机界面类型显著影响了过街前行人注视1号车道车辆的时长。具体而言，相较于1号车道自动驾驶车辆未显示外部人机界面的情况，1号车道自动驾驶车辆显示他我中心型外部人机界面（ = -0.393, = -5.20, < 0.001）或自我中心型外部人机界面（ = -0.447, z = -5.91, < 0.001），均显著缩短了注视时间。类似地，2号车道自动驾驶车辆显示他我中心型外部人机界面（ = -0.493, = -6.50, < 0.001）或自我中心型外部人机界面（ = -0.598, z = -7.90, < 0.001）时，也观察到了注视时间缩短。就两条车道上外部人机界面组合的交互效应而言，四种双车道配置均显著延长了行人注视1号车道车辆的时长（ = 1.118, z = 10.43, < 0.001; = 1.121, z = 10.47, < 0.001; = 1.015, z = 9.44, < 0.001; = 1.258, z = 11.75, < 0.001）。此外，实验后问卷结果表明，年龄（ = -0.051, z = -2.64, < 0.01）和对外部人机界面的理解程度（ = -0.032, z = -2.39, < 0.05）对过街前行人注视1号车道自动驾驶车辆的时间有显著负向影响，而其他指标的影响均不显著。

其次，关于过街前对车道1自动驾驶车辆外部人机界面的注视比例，选择车道1自动驾驶车辆显示他我中心型外部人机界面、而车道2自动驾驶车辆没有外部人机界面的条件作为参考情境。相较于这一基线，车道1自动驾驶车辆配备自我中心型外部人机界面显著降低了对车道1自动驾驶车辆外部人机界面的注视比例（= -0.332, = -3.44, < 0.001）。然而，车道2自动驾驶车辆的外部人机界面类型，以及两条车道自动驾驶车辆的外部人机界面之间的交互作用，均未对过街前车道1自动驾驶车辆外部人机界面的注视比例产生显著影响。对实验后主观问卷数据的分析表明，年龄（ = 0.130, z = 1.99, < 0.05）对朝向车道1车辆外部人机界面的注视比例有显著正向影响

过街前。此外，车辆让行策略（ = -0.270, z = -0.090, < 0.01）对过街前行人注视车道1自动驾驶车辆外部人机界面的注视比例具有显著负向影响。其他指标的影响均不显著。

关于行人过街前等待时间，选择两条车道上的自动驾驶车辆均未显示外部人机界面的情形作为参考情境。

与此基线相比，两条车道上的自动驾驶车辆均显示两种类型的外部人机界面时，等待时间均显著缩短。具体而言，与车道1车辆未显示外部人机界面相比，显示异我中心型外部人机界面（ = -0.265, = -5.38, < 0.001）和自我中心型外部人机界面（ = -0.402, z = -8.18, < 0.001）均显著缩短了等待时间。车道2车辆显示异我中心型（ = -0.240, z = -4.89, < 0.001）和自我中心型外部人机界面（= -0.202, z = -4.11, < 0.001）时，也观察到类似的缩短效果。相比之下，双车道外部人机界面配置的四种组合均显著延长了等待时间（ = 0.771, z = 11.08, $<$ 0.001; = 0.697, z = 10.04, $<$ 0.001; = 0.812, z = 11.70, < 0.001; = 0.774, z = 11.15, $<$ 0.001）。此外，主观问卷的回答表明，年龄（ = 0.051, z = 2.79, < 0.01）对等待时间有显著的正向影响，而车辆让行策略（ = -0.154, z = -6.64, < 0.001）和过街遵从程度（ = -0.019, z = -2.09, < 0.05）则有显著的负向影响。其他指标的影响均不显著。

表11. 不同电子人机界面配置和个体因素对行人认知负荷的广义线性混合模型（GLMM）结果。

变量	1号车道自动驾驶车辆注视时间 (a)				车道1电子人机界面的注视比例 (b)				过街前等待时间 (a)			
	β	$\cdot_{SE}$	z	p	β	$\cdot_{SE}$	z	p	β	$\cdot_{SE}$	z	p
eHMI_AV1												
1	-0.393	0.076	-5.20	***	—	—	—	—	-0.265	0.049	-5.38	***
2	-0.447	0.076	-5.91	***	-0.332	0.096	-3.44	***	-0.402	0.049	-8.18	***
eHMI_AV2												
1	-0.493	0.076	-6.50	***	-0.075	0.083	-0.91	0.364	-0.240	0.049	-4.89	***
2	-0.598	0.076	-7.90	***	-0.128	0.086	-1.49	0.137	-0.202	0.049	-4.11	***
eHMI_AV1*外部人机界面_AV2												
1 1	1.118	0.107	10.43	***	—	—	—	—	0.771	0.070	11.08	***
1 2	1.121	0.107	10.47	***	—	—	—	—	0.697	0.069	10.04	***
2 1	1.015	0.107	9.44	***	0.059	0.140	0.42	0.675	0.812	0.069	11.70	***
2 2	1.258	0.107	11.75	***	0.238	0.136	1.75	0.080	0.774	0.069	11.15	***
性别	-0.021	0.062	-0.34	0.736	-0.200	0.146	-1.37	0.171	-0.016	0.058	-0.28	0.778
Age	-0.051	0.019	-2.64	**	0.064	0.043	1.49	0.135	0.051	0.018	2.79	**
驾驶执照	0.056	0.114	-0.49	0.623	0.306	0.283	1.08	0.281	0.024	0.106	0.23	0.818
驾驶经验	0.028	0.030	0.93	0.351	0.122	0.066	1.84	0.066	-0.038	0.027	-1.38	0.168
教育	0.243	0.104	2.34	*	-0.196	0.238	-0.82	0.410	-0.150	0.098	-1.54	0.124
从业者	0.026	0.081	0.32	0.746	0.075	0.194	0.39	0.697	-0.064	0.076	-0.84	0.404
让行策略	-0.041	0.036	-1.14	0.256	-0.224	0.056	-3.97	***	-0.154	0.023	-6.64	***
对自动驾驶汽车的理解	0.015	0.011	1.37	0.172	-0.015	0.026	-0.58	0.559	0.015	0.010	1.39	0.165
对自动驾驶汽车的信任	0.011	0.008	1.36	0.174	0.030	0.019	1.58	0.113	0.006	0.008	0.74	0.460

对自动驾驶汽车的风险感知	-0.015	0.009	-1.59	0.111	-0.039	0.022	-1.77	0.077	-0.004	0.009	-0.40	0.689
对电子人机界面的理解	-0.032	0.013	-2.39	*	0.008	0.031	0.27	0.788	-0.005	0.012	-0.36	0.716
对外部人机界面的信任	-0.001	0.011	-0.10	0.918	0.008	0.024	0.34	0.737	0.016	0.010	1.61	0.107
过街关注度	0.001	0.009	0.09	0.927	0.042	0.025	1.67	0.096	0.017	0.010	1.66	0.096
过街遵从度	-0.011	0.009	-1.14	0.254	-0.002	0.021	-0.09	0.931	-0.018	0.009	-2.09	*
对他人的态度	0.009	0.010	0.91	0.363	0.008	0.022	0.37	0.714	0.008	0.009	0.86	0.390
AIC	4296.253				-744.242				4427.897			
BIC	4418.376				-645.536				4550.020			
对数似然	-2122.126				395.121				-2187.949			

* p ≤ 0.05，** p ≤ 0.01，*** p ≤ 0.001 注：提供了标准化回归系数。(a) 的参考类别为两条车道均无外部人机界面，而 (b) 的参考类别为车道1配备他我中心型外部人机界面。“eHMI_AV1*eHMI_AV2”表示 eHMI1 与 eHMI2 之间的交互项。对于 外部人机界面类型，“0” = 表示无 eHMI，“1” = 表示他我中心型，“2” = 表示自我中心型。

1

表12 总结了基于 NASA-TLX 得分的广义线性混合模型分析结果。关于主观认知负荷，选取两条车道上的自动驾驶车辆均未显示外部人机界面的条件作为参考情境。与此基线相比，两条车道上车辆的外部人机界面类型显著影响了行人感知到的主观认知负荷。具体而言，与车道1自动驾驶车辆未显示外部人机界面的情况相比，在车道1自动驾驶车辆上显示他我中心型外部人机界面（ = -0.361， z = -6.51， < 0.001）和自我中心型外部人机界面（ = -0.442， z = -7.96， < 0.001）显著降低了主观工作负荷。车道2自动驾驶车辆上显示他我中心型外部人机界面（= -0.280， z = -5.05， < 0.001）和自我中心型外部人机界面（= -0.181， z = -3.28， < 0.001）时，也观察到类似的降低趋势。相反，两条车道上外部人机界面的全部四种组合均显著增加了主观认知负荷（= 0.775， z = 9.86， < 0.001；= 0.638， z = 8.13， < 0.001； = 0.849， z = 10.76， < 0.001； =0.769， z = 9.78， < 0.001）。

此外，实验后主观问卷的回答表明，自动驾驶车辆带来的感知风险越高，主观认知负荷显著越低（ = -0.034， z = -2.38， < 0.05），且车辆让行策略 = -0.061， z = -2.36， <0.05 ）对主观认知负荷有显著的负面影响。其他指标的影响均不显著。

表12。基于不同电子人机界面配置和个体因素的 NASA-TLX 得分的广义线性混合模型结果。

变量	NASA-TLX			
	β	◦	z	p
eHMI_AV1				
1	-0.361	0.055	-6.51	***
2	-0.442	0.055	-7.96	***
eHMI_AV2				
1	-0.280	0.055	-5.05	***
2	-0.181	0.055	-3.28	***
eHMI_AV1*外部人机界面_AV2				
1 1	0.775	0.079	9.86	***
1 2	0.638	0.079	8.13	***

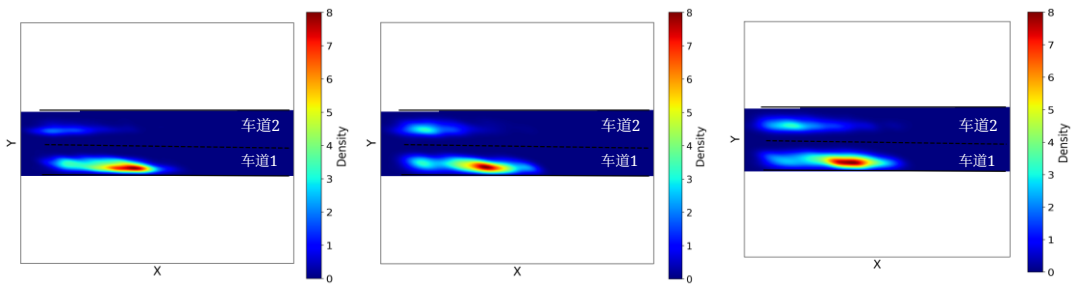
2 1	0.849	0.079	10.76	***
2 2	0.769	0.079	9.78	***
性别	0.066	0.093	0.71	0.478
Age	-0.033	0.029	-1.12	0.264
驾驶执照	0.291	0.170	1.71	0.088
驾驶经验	-0.011	0.044	-0.24	0.810
教育	-0.100	0.157	-0.63	0.526
从业者	-0.026	0.122	-0.21	0.833
让行策略	-0.061	0.026	-2.36	*
对自动驾驶汽车的理解	0.016	0.017	0.96	0.337
对自动驾驶汽车的信任	-0.009	0.013	-0.70	0.484
对自动驾驶汽车的风险感知	-0.034	0.014	-2.38	*
对电子人机界面的理解	0.022	0.020	1.07	0.283
对外部人机界面的信任	-0.030	0.016	-1.84	0.066
过街关注度	-0.003	0.017	-0.19	0.849
过街遵从度	0.011	0.014	0.77	0.444
对他人的态度	-0.004	0.014	-0.27	0.784
AIC		6685.132		
BIC		6807.255		
对数似然		-3316.566		

* p ≤ 0.05, ** p ≤ 0.01, *** p ≤ 0.001注：对于 外部人机界面类型，“1” = 异我中心和“2” = 自我中心 1

4.4 分心效应2

4.4.1 电子人机界面配置对分心的影响 3

研究使用热力图评估行人对非4交互车道中车辆的注视。这些基于汇总注视数据生成的热力图，有助于了解外部人机界面类型如何影响分心。如图16(a)所示，当两条6车道上都没有配备外部人机界面的自动驾驶车辆时，行人对7车道2中车辆的注视最少，这表明这些车辆不会显著分散8行人的注意力。9



(a) (b) (c)

10

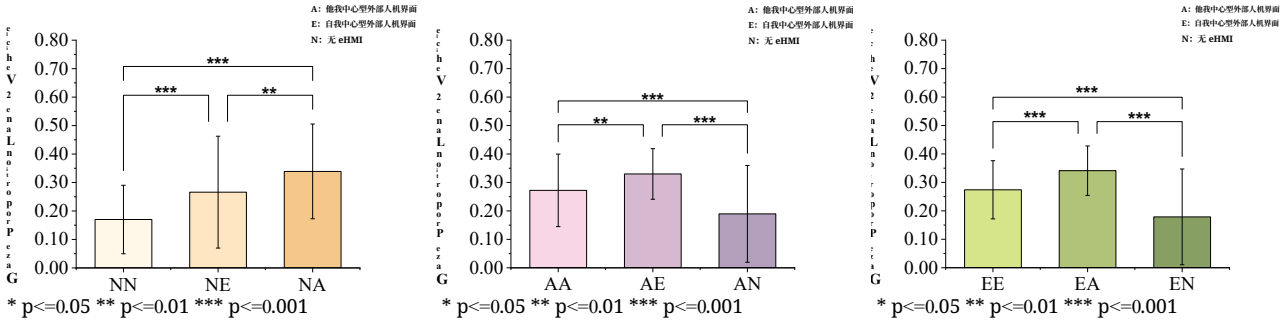
图16. 不同1情景下行人对车辆注视的核密度热力图：(a) 两条车道上的自动驾驶车辆均未配备外部人机界面；(b) 无外部人机界面 + 自我中心2外部人机界面；(c) 无外部人机界面 + 他我中心3外部人机界面。

相比之下，当2号车道自动驾驶车辆配备外部人机界面时，行人对这些车辆的注视密度显著增加，如45图16(b) 和16(c所示）；这表明2号车道自动驾驶车辆上的外部人机界面会6分散行人的注意力。此外，他我中心型外部人机界面的分心效应强于自我中心型外部人机界面。 8

9 首先进行了方差分析，以考察在车道1自动驾驶车辆配备相同类型外部人机
10 界面的情况下，车道2自动驾驶车辆上的不同外部人机界面类型如何影响参与者
11 的分心行为。首先比较了车道1自动驾驶车辆均未配备外部人机界面的三个组别。
12 结果见表13，表明车道2自动驾驶车辆上的不同外部人机界面类型对行人注视
13 车道2车辆的比例有显著主效应（$(2, 269) = 23.994$, < 0.001, $= 0.152$）。通过最小显著差异检验进行的事后比较（图 17(a)）显示，当车道1
14 自动驾驶车辆均未配备外部人机界面时，车道2自动驾驶车辆发出的异我中心通
15 信（ $= 0.339$, $SD = 0.166$）比自我中心通信（ $= 0.266$, $SD = 0.197$）
16 吸引了更高比例的行人注视。
17
18 M
19 M
20
21 **表13**。当1号车道车辆上未设置外部人机界面时，关于外部人机界面类型
22 对过街前行人注视2号车道车辆的比例相对于基线所产生影响的方差分析结果。
23

变量	车道2外部人机界面类型	描述性统计 样本量	均值	SD	方差分析 df	F	p	ηp^2
注视比例 车道2自动驾驶车辆	0	45	0.170	0.120	(2,269)	23.994	***	0.152
	1	45	0.339	0.166				
	2	45	0.266	0.197				

* p ≤ 0.05, ** p ≤ 0.01, *** p ≤ 0.001注：对于 外部人机界面类型，“0” = 无 eHMI，“1” = 异我中心，“2” = 自我中心



(a) 车道1下对车道2车辆的注视比例
无外部人机界面条件，相对于基线

(b) 车道1下对车道2车辆的注视比例
他我中心型外部人机界面

(c) 车道1下对车道2车辆的注视比例
自我中心型外部人机界面

图 17。 行人分心相关的方差分析结果，包含误差线

表示标准误。

接下来，对三组进行了比较，这三组中的车道1自动驾驶车辆始终采用他我中心型外部人机界面。结果见表 14，表明车道2自动驾驶车辆采用不同的外部人机界面类型，对行人注视车道2自动驾驶车辆的比例有显著主效应（$(2,269) = 25.319$, < 0.001, $= 0.159$）。通过最小显著差异检验进行的事后比较（图 17(b)）显示，当车道1自动驾驶车辆始终显示异我中心通信时，车道2自动驾驶车辆配备外部人机界面会比未配备外部人机界面引起更严重的行人分心（ $= 0.190$, $SD = 0.170$）。在车道2自动驾驶车辆采用的外部人机界面类型中，自我中心通信（ $= 0.330$, $SD = 0.089$）吸引的行人注视比例高于异我中心通信（ $= 0.272$, $= 0.127$）。

表 14。 当车道1车辆配备他我中心型外部人机界面时，相对于基线，外部人机界面类型对过街前车道2车辆注视比例影响的方差分析结果。

变量	车道2 外部人机界面类型	描述性统计 示例 size	Mean	SD	方差分析 *df*	*F*	*p*	ηp^2
注视比例 针对2号车道自动驾驶车辆	0	45	0.190	0.170	(2,269)	25.319	***	0.159
	1	45	0.272	0.127				
	2	45	0.330	0.089				

* p ≤ 0.05, ** p ≤ 0.01, *** p ≤ 0.001注：对于 外部人机界面，“0” = 表示无 eHMI，“1” = 表示异我中心，“2” = 表示自我中心

最后，我们对三组进行了比较，其中1号车道自动驾驶车辆始终采用自我中心型外部人机界面。结果见表15，表明2号车道自动驾驶车辆采用不同外部人机界面类型，对行人注视2号车道自动驾驶车辆的比例有显著主效应（ (2,

269）$= 38.789, p$ < 0.001 ηp^2 $= 0.225$）。通过最小显著差异检验进行的事后比较 1（图 17(c)）表明，当1号车道自动驾驶车辆 2始终显示自我中心通信时，2号车道自动驾驶车辆上存在外部人机界面会比没有外部人机界面时引发更严重的行人分心 3（4 $= 0.179,$ $= 0.168$）。在2号车道自动驾驶车辆采用的外部人机界面类型中，5异我中心通信（ $= 0.341,$ $= 0.087$）6比自我中心通信吸引了更高比例的行人注视（7 $= 0.274,$ $= 0.102$）。8 M SD M SD M SD

表15。 与外部人机界面类型对注视比例的影响相关的方差分析结果9对于2号车道中，过街前的车辆，10相较于基线，当车道上有配备自我中心型外部人机界面的自动驾驶车辆时。 11

变量	车道2 外部人机界面类型	描述性统计 样本 size	Mean	SD	方差分析 *df*	*F*	*p*	ηp^2
注视比例 对于2号车道自动驾驶车辆	0	45	0.179	0.168	(2,269)	38.789	***	0.225
	1	45	0.341	0.087				
	2	45	0.274	0.102				

* p ≤ 0.05，** p ≤ 0.01，*** p ≤ 0.001

注：对于 外部人机界面类型，“0” = 表示无 eHMI，“1” = 表示异我中心，“2” = 表示自我中心

12 *4.4.2* 影响行人分心的因素

13 通过测量过街前对车道2车辆及其外部人机界面的注视比例来评估分心。由于这
14 两个变量均为取值介于0和1之间的连续比例数据，因此模型采用了带有logit链
15 接函数的贝塔分布（Verkuilen和Smithson，2012）。模型纳入车道1与车道
16 2外部人机界面类型之间的交互项，以评估跨车道分心效应。结果见表16，表
明外部人机界面类型配置的差异会显著影响参与者的分心行为。

17

18

19

20

21 首先，考察了过街前对车道2车辆的注视比例。选择两条车道均没有配备外
22 部人机界面的自动驾驶车辆的情境作为参考情境。与此基线相比，车道2自动驾
驶车辆上外部人机界面的存在显著影响了

23

24

25 过街前行人对这些车辆的注视情况。具体而言，与没有外部人机界面相比，配
26 备他我中心型外部人机界面时（ $= 0.685,$ z $= 7.47,$ p p

< 0.001），以及配备自我中心型外部人机界面时（$= 0.478, p$ $_z$ $= 4.95,$ < 0.001），1号车道2号自动驾驶车辆的注视比例均显著增加。关于2个交互效应，当两条车道上的自动驾驶车辆均显示他我中心型外部人机界面时，参与者对车道4 2 $= -0.353,$ $_z$ 车辆的注视比例显著降低（$= -2.75,$ < 0.001）。此外，实验后主观问卷结果显示，年龄（ p 6 $\beta = 0.035$ $_z = 2.02,$ $., .$ < 0.05）和对自动驾驶车辆的信任（$= 0.023,$ $_z = 3.06,$ < 0.01）对过街前注视车道2车辆的比例具有显著正向影响。其他指标的影响均不显著。

接下来，研究了过街前注视车道2自动驾驶车辆外部人机界面的比例。将车道1自动驾驶车辆未配备外部人机界面、而车道2自动驾驶车辆配备他我中心型外部人机界面的条件选为参考情境。与此基线相比，车道2自动驾驶车辆配备自我中心型外部人机界面，显著降低了注视车道2自动驾驶车辆外部人机界面的比例（$= -0.653,$ $_z = -3.20,$ < 0.001）。车道1自动驾驶车辆上的外部人机界面类型也显著影响了对车道2自动驾驶车辆外部人机界面的注视行为。具体而言，车道1自动驾驶车辆配备他我中心型外部人机界面（18 $= -0.473$ $_z = -2.63$ < 0.01 $= -0.444$ $_z = .,.,.$）和自我中心型外部人机界面（.,-2.49, < 0.05）均显著降低了注视车道2自动驾驶车辆外部人机界面的比例。关于交互效应，将车道1自动驾驶车辆未配备外部人机界面、而车道2自动驾驶车辆配备他我中心型外部人机界面的条件选为参考情境。相较于此基线，两条车道上的自动驾驶车辆均显示自我中心型外部人机界面的配置，显著降低了注视车道2自动驾驶车辆外部人机界面的比例（$= -1.117,$ $_z = -4.11,$ < 0.001）。关于主观问卷回答，驾驶经验较丰富的行人（$= 0.221,$ $_z = 2.45,$ < 0.05）在过街前对车道2自动驾驶车辆的外部人机界面给予了更多关注，而其他与个体差异相关的变量均未表现出显著影响。

p

β p

β p

表16. 不同电子人机界面配置和个体因素下与行人分心相关的广义线性混合模型结果。

变量	2号车道自动驾驶车辆的注视比例 (a)				2号车道电子人机界面的注视比例 (b)			
	β	SE	z	p	β	SE	z	p
eHMI_AV1								
1	0.117	0.110	1.07	0.284	-0.473	0.180	-2.63	**
2	0.089	0.111	0.80	0.424	-0.444	0.178	-2.49	*
eHMI_AV2								
1	0.685	0.091	7.47	***	—	—	—	—
2	0.478	0.096	4.95	***	-0.653	0.204	-3.20	***
eHMI_AV1* 外部人机界面_AV2								
1 1	0.353	0.128	2.75	**	—	—	—	—
1 2	0.031	0.129	0.24	0.809	0.445	0.317	1.40	0.160
2 1	-0.117	0.126	-0.92	0.357	—	—	—	—
2 2	-0.118	0.133	-0.88	0.357	-1.117	0.272	-4.11	***
性别	-0.030	0.056	-0.53	0.594	0.054	0.174	0.31	0.756
Age	0.035	0.017	2.02	*	0.045	0.058	-0.78	0.433
驾驶执照	0.117	0.109	1.07	0.283	-0.205	0.351	-0.58	0.559
驾驶经验	0.013	0.027	0.48	0.628	0.221	0.090	2.45	*
教育	-0.171	0.094	-1.81	0.070	0.296	0.319	0.93	0.355
从业者	0.054	0.072	0.75	0.451	0.210	0.248	0.85	0.397
让行策略	-0.027	0.035	-0.79	0.430	-0.084	0.106	-0.79	0.429

对自动驾驶汽车的理解	-0.007	0.010	-0.71	0.480	-0.049	0.033	-1.47	0.141
对自动驾驶汽车的信任	0.023	0.007	3.06	**	0.011	0.024	0.47	0.639
对自动驾驶汽车的风险感知	-0.004	0.009	-0.45	0.656	0.009	0.025	0.36	0.717
对电子人机界面的理解	-0.003	0.012	-0.24	0.812	0.003	0.038	0.08	0.936
对外部人机界面的信任	-0.002	0.010	-0.18	0.859	0.004	0.029	0.12	0.902
过街关注度	-0.018	0.010	-1.76	0.079	0.049	0.032	1.57	0.118
过街遵从度	-0.001	0.009	-0.06	0.950	0.004	0.025	0.16	0.873
对他人的态度	0.003	0.009	0.40	0.691	0.010	0.025	0.38	0.706
AIC	-876.001				-371.254			
BIC	-753.879				-272.55			
对数似然	464.001				208.63			

* p ≤ 0.05，** p ≤ 0.01，*** p ≤ 0.001 注：此处提供标准化回归系数。(a) 的参考类别为两条车道均无外部人机界面，(b) 的参考类别为车道2配备他我中心型外部人机界面。对于 外部人机界面类型，“1” = 表示异我中心，“2” = 表示自我中心。

1

4.5 误导效应 1

4.5.1 误导行为的组间差异 2由于因变量是以比例表示的二元结果，3因此进行了比例 Z 检验，以确定在不同的潜在误导性外部人机界面4组合下，实际受到误导的行人5比例。该检验用于评估两个6比例之间的差异是否具有统计显著性。表17显示了描述性结果，7而图18展示了经 Bonferroni8校正的两两比较。 9

在误导行为1中，1号车道车辆上的外部人机界面类型对实际受到误导的行人比例有显著影响。具体而言，当2号车道自动驾驶车辆未配备外部人机界面时，与1号车道自动驾驶车辆配备他我中心型外部人机界面相比，配备自我中心型外部人机界面导致受到误导的行人比例显著更高（ = 42.2%）。同样，当2号车道自动驾驶车辆配备他我中心型外部人机界面时，1号车道自动驾驶车辆配备他我中心型外部人机界面所误导的行人比例（ = 28.9%）显著高于配备自我中心型外部人机界面时所误导的行人比例（ =4.4%）。当2号车道自动驾驶车辆配备自我中心型外部人机界面时，也观察到了这一模式。

在误导行为2条件下，车道2车辆上的外部人机界面类型显著影响了实际受到误导的行人比例。具体而言，当车道1自动驾驶车辆无 eHMI 时，车道2自动驾驶车辆采用自我中心型外部人机界面所导致的受误导行人比例（ = 53.3%）显著高于采用他我中心型外部人机界面时的比例（ =11.1%）。当车道1自动驾驶车辆采用他我中心型外部人机界面时，也观察到类似模式：车道2自动驾驶车辆采用自我中心型外部人机界面（ = 46.7%）时，误导的行人比例显著高于采用他我中心型外部人机界面时的比例（ = 11.1%）。

表17。 两种可能具有误导性的行为在不同情景下实际误导行人比例的描述性统计结果。

变量	电子人机界面组合	描述性统计		
		样本量	计数（n = 1）	频率
误导行为1	1 1	45	13	28.9%
	2 2	45	2	4.4%
	1 2	45	14	31.1%

	2 1	45	2	4.4%
	1 0	45	7	15.6%
	2 0	45	19	42.2%
误导行为2	1 1	45	3	6.7%
	2 2	45	21	46.7%
	1 2	45	4	8.9%
	2 1	45	5	11.1%
	0 2	45	24	53.3%
	0 1	45	5	11.1%

注：对于 外部人机界面类型，“0” = 无 eHMI，“1” = 异我中心，“2” = 自我中心 1

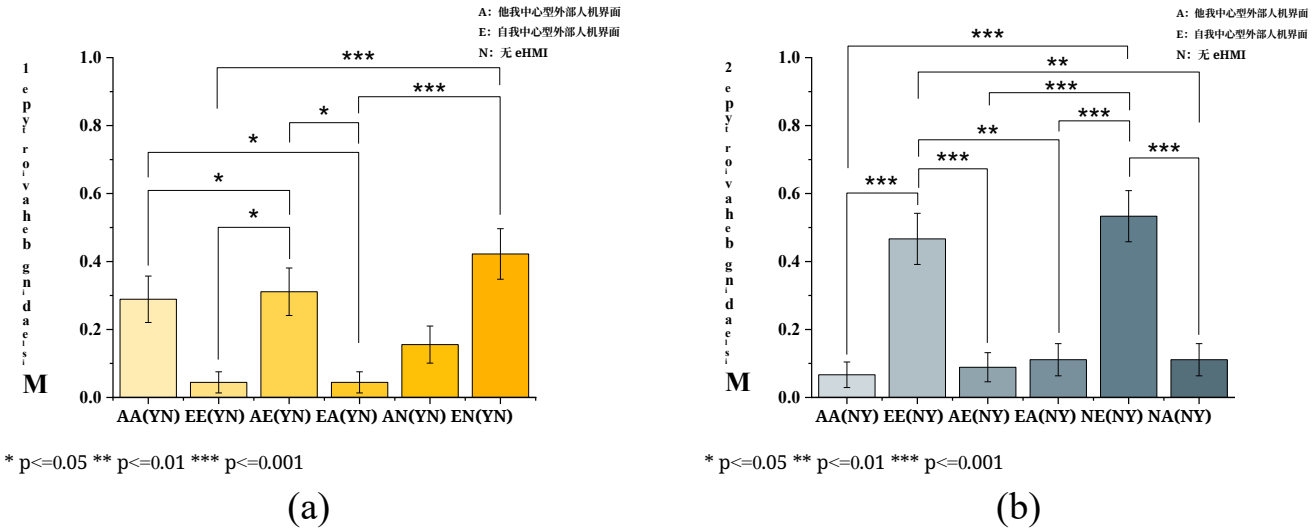


图18。 与两种可能产生误导的行为实际误导行人比例相关的比例 Z 检验结果：(a) 误导行为1；(b) 误导行为2。

4.5.2 影响误导效应的因素

由于误导效应的指标是二元变量，因此选择二元回归分析中最常用的链接函数logit函数，作为广义线性混合模型的链接函数。将误导行为1和误导行为2设为因变量，并将两个车道上车辆的外部人机界面类型、它们的交互项以及问卷指标设为自变量。结果见表18。

在误导行为1中，与车道1自动驾驶车辆使用他我中心型外部人机界面相比，使用自我中心型外部人机界面显著提高了实际受到误导的行人比例（ = 1.578， = 2.89， < 0.01）。具体而言，无论车道2自动驾驶车辆使用何种外部人机界面类型，两条车道上的自动驾驶车辆所使用的外部人机界面类型之间的交互效应均显著降低了误导行为1的发生率（ = –3.934， = –3.96，

< 0.001；$\beta = -4.056$，$z = -4.09$，$p < 0.001$）。在回归模型中纳入车道1和车道2自动驾驶车辆上的外部人机界面类型之间的1个交互项后，对每种交互组合的边际效应进行了估计，并开展了两两比较。此外，采用 Bonferroni 校正来调整多重比较。结果再次表明，当车道2自动驾驶车辆上没有外部人机界面时，与他我中心型外部人机界面相比，车道1自动驾驶车辆上的自我中心型外部人机界面显著提高了行人实际受到误导的可能性（$= 0.268$，$z = 3.14$，$p < 0.05$）。相比之下，当车道2车辆配备了外部人机界面时，无论是他我中心型（$= -0.244$，$z = 3.49$，$p < 0.01$）还是自我中心型（对比 $= -0.266$，$z = 3.75$，$p < 0.01$），车道2车辆上的外部人机界面在一定程度上降低了行人实际受到误导的可能性。此外，受到误导的男性行人比例显著较低（$= -0.949$，$z = -2.00$，$p < 0.05$），而年龄较大的行人更容易受到误导（$\beta = 0.34$，$z = 2.73$，$p < 0.05$）。其他个体层面变量均未表现出显著影响。在误导行为2中，与车道2自动驾驶车辆上的他我中心型外部人机界面相比，自我中心型外部人机界面显著提高了实际受到误导的行人比例（$= 2.375$，$\beta = 4.08$，$p < 0.001$）。相比之下，车道1自动驾驶车辆上的他我中心型外部人机界面显著减少了误导行为2的发生。具体而言，当车道1自动驾驶车辆配备他我中心型外部人机界面时，两条车道上自动驾驶车辆的外部人机界面类型之间的交互效应显著降低了行人受到误导的可能性（$= -2.054$，$z = -2.07$，$p < 0.05$）。再次采用边际效应分析方法进行了两两比较。结果表明，当车道1车辆均配备外部人机界面时，车道2车辆上的自我中心型外部人机界面显著提高了

β p

27行人实际上被误导的可能性，与异我中心28外部人机界面（29 对比 $= 0.422$，$z = 4.99$，$p < 0.001$）1.，.，。同样，当车道车辆均配备自我中心型外部人机界面时，车道 2 车辆上的自我中心型外部人机界面也导致行人被30误导的可能性显著更高，相较于异我中心型外部人机界面（31误导，相较于异我中心型外部人机界面（32 对比 $= 0.356$，$z = 4.20$，$p <$.，.，0.001）。然而，当车道 33

1 自动驾驶车辆配备了他我中心型外部人机界面。其他变量均未显示出显著1影响。2

表18。 不同电子人机界面配置和个体因素对误导效应的广义线性混合模型结果。

变量	误导行为1 (a)				误导行为2 (b)			
	β	·	z	*p*	β	◦	z	*p*
eHMI_AV1								
1	—	—	—	—	-0.578	0.775	-0.75	0.456
2	1.578	0.547	2.89	**	0.001	0.684	0.01	0.954
eHMI_AV2								
1	0.890	0.559	1.59	0.111	—	—	—	—
2	1.011	0.555	1.82	0.068	2.375	0.583	4.08	***
eHMI_AV1* 外部人机界面 _AV2								
1 1	—	—	—	—	—	—	—	—
1 2	—	—	—	—	-2.054	0.994	-2.07	*
2 1	-3.934	0.993	-3.96	***	—	—	—	—
2 2	-4.056	0.992	-4.09	***	-0.293	0.815	-0.36	0.720
性别	-0.949	0.475	-2.00	*	0.313	0.435	0.72	0.472
Age	0.302	0.129	2.34	*	-0.149	0.144	-1.03	0.303
驾驶执照	0.216	0.805	0.27	0.788	-1.103	0.769	-1.43	0.152
驾驶经验	-0.133	0.199	-0.67	0.504	0.104	0.229	0.46	0.649
教育	-1.288	0.683	-1.89	0.059	-0.072	0.747	-0.10	0.924
从业者	0.783	0.615	1.27	0.203	-0.493	0.564	-0.87	0.382

对自动驾驶汽车的理解	-0.083	0.081	-1.02	0.307	-0.030	0.077	-0.39	0.696
对自动驾驶汽车的信任	0.074	0.057	1.30	0.195	-0.029	0.059	-0.48	0.630
对自动驾驶汽车的风险感知	-0.048	0.064	-0.75	0.452	0.082	0.067	1.24	0.217
对电子人机界面的理解	0.073	0.095	0.77	0.440	0.131	0.097	1.34	0.179
对外部人机界面的信任	0.098	0.079	1.25	0.212	-0.051	0.077	-0.66	0.507
过街关注度	0.088	0.077	1.15	0.250	-0.115	0.078	-1.48	0.139
过街遵从度	-0.045	0.066	-0.68	0.499	0.115	0.072	1.60	0.110
对他人的态度	0.017	0.067	0.25	0.802	-0.115	0.068	-1.70	0.089
AIC		284.770				262.442		
BIC		349.542				334.411		
对数似然		-124.385				-111.221		

* $p \leq 0.05$，** $p \leq 0.01$，*** $p \leq 0.001$ 注：此处提供的是标准化回归系数。(a) 的参考类别为带有他我中心型外部人机界面的车道1，(b) 的参考类别为带有他我中心型外部人机界面的车道2。对于 外部人机界面类型，“0” = 表示无外部人机界面，“1” = 表示他我中心型，“2” = 表示自我中心

1

4.6 过街风险

4.6.1 过街风险的组间差异 采用方差分析评估不同 eHMI组合对车道1行人碰撞风险指标——侵入后时间（PET）的影响。首先，将基线组（两条车道上的车辆均未配备外部人机界面）与仅一条车道上的车辆配备外部人机界面的组合进行比较。表19所示结果表明，与两条车道上的车辆均未配备外部人机界面的情景相比，所有单车道外部人机界面组合均显著降低了行人穿越车道

$F(4, 449) = 5.284$, p 时的 PET 值（$p < 0.001$, $\eta p^2 = 0.045$）。采用最小显著差异检验进行的事后比较（图19）显示，车道 AV 上存在外部人机界面（$M = 1.675$, $SD = 1.317$）时的碰撞风险略高于车道 AV 上存在外部人机界面时（$M = 2.006$, $SD = 1.629$; $M = 1.932$, $SD = 1.592$）。

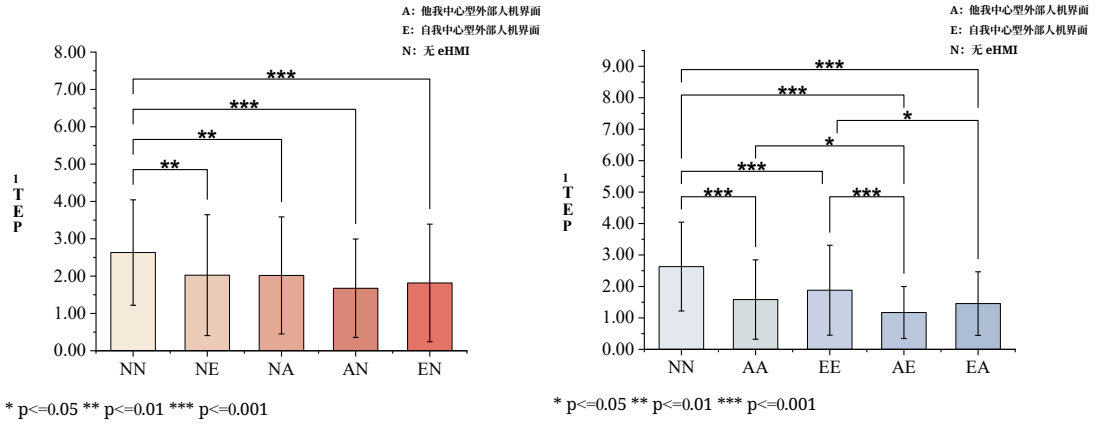
接下来，将基线组与两条车道上的自动驾驶车辆均配备外部人机界面的组合进行比较。结果见表19，表明两条车道上的车辆均配备外部人机界面也会显著降低行人过街车道1时的侵入后时间（$F(4, 449) = 18.910$, $p < 0.001$, $\eta p^2 = 0.145$）。通过最小显著差异检验进行事后比较（图19(b)）发现，混合组合（例如，车道1车辆采用异我中心通信，而车道2车辆采用自我中心通信（$M = 1.208$, $SD = 0.815$））比两条车道上的车辆均配备他我中心型外部人机界面的情景（$M = 1.611$, $SD = 1.254$）导致更高的碰撞风险。同样，车道1自动驾驶车辆采用自我中心通信、车道2自动驾驶车辆采用异我中心通信（$M = 1.422$, $SD = 1.017$）时，与两条车道上的车辆均采用自我中心通信相比，碰撞风险更高（$M = 1.907$, $SD = 1.415$）。

表19 相对于基线，外部人机界面类型对车道的侵入后时间影响的方差分析结果。

变量	eHMI 组合	描述性统计			方差分析			
		样本 size	Mean	SD	*df*	*F*	*p*	ηp^2
PET1	0 0	45	2.631	1.412	(4,449)	5.284	***	0.045
	0 1	45	1.982	1.592				
	0 2	45	2.006	1.629				
	1 0	45	1.675	1.317				

	2 0	45	1.817	1.574				
	0 0	45	2.631	1.412				
	1 1	45	1.611	1.254				
PET2	2 2	45	1.907	1.415	(4,449)	18.910	***	0.145
	1 2	45	1.208	0.815				
	2 1	45	1.422	1.017				

* p ≤ 0.05，** p ≤ 0.01，*** p ≤ 0.001



(a) (b)

图19。 车道1中与行人 PET 相关的方差分析结果：(a) 单车道外部人机界面与基线的比较；(b) 多车道外部人机界面与基线的比较（误差线表示标准误）。

4.6.2 影响行人过街风险的因素

由于冲突指标是二元变量（根据PET阈值，将严重冲突标记为“1”，将非严重冲突标记为“0”），因此再次选择logit函数作为广义线性混合模型的链接函数。前文提到的认知负荷、分心和误导行为指标，以及主观问卷指标，均作为自变量纳入模型。结果见表20。

关于车道1中的冲突，外部人机界面类型的主效应显著。具体而言，无论车道1还是车道2的车辆上是否配备单个外部人机界面，都会显著增加车道1中的过街风险。具体来说，车道1自动驾驶车辆上的他我中心型外部人机界面（ = 1.962， = 4.59， < 0.001）、车道1自动驾驶车辆上的自我中心型外部人机界面（ = 1.466， = 3.50， < 0.001）以及车道2自动驾驶车辆上的他我中心型外部人机界面（ = 1.131， = -2.75， < 0.01）均显著增加了风险。然而，外部人机界面类型之间的某些交互效应显著缓解了这一风险，具体而言，当两条车道上的自动驾驶车辆均配备他我中心型外部人机界面时（ = -1.748， = -3.02， < 0.01），或者当车道1

和 β
1 2 p = 分别配备了自我中心型和他我中心型外部人机界面的自动驾驶车辆时（-1.494， z = -2.61， < 0.01）。2 此外，车道 β
3 p 2 = 1 668 z = 自动驾驶车辆的误导效应（. , 3.64， < 0.001）显著增加了车道1中的过街风险。在认知负荷方面，过街前对车道 β
5 p 1 = 车辆的注视时间较短（-0.067， z = -2.49， < 0.05）与较高的风险相关。关于分心，对车道 β
7 p 2 = 1 729 z = 2 42, 车辆的注视比例较高（. , .< 0.05）与车道8 1中过街风险升高显著相关。主观问卷回答显示，具有专业背景（= 1.442， z = 3.48， < 0.001）以及对自动驾驶车辆（ β p
11 β = 0 118 z = 2 77 p < 0 01 β = 0 146 z = 2 66 p < . , . , . ）或外部人机界面（. , . , 0.01 ）有较高信任度，都与过街风险增加相关。相反，对外部人机界面系统有更多知识的参与者，面临的过街风险显著较低（= -0.207， z = -3.08， < 0.01）。14

β p

对车道2冲突的分析显示，外部人机界面类型具有15显著主效应。在车道2自动驾驶车辆上仅配备一种外部人机界面，16会显著增加过街风险，尤其是车辆17配备他我中心型外部人机界面时（= 1.475， z = 3.88， < 0.001）或18自我中心型外部人机界面时（= 0.904， z = 2.55， < 0.05）。19 β p

β p

此外，车道
20 p 1 β = 0 877 z = 2 27, 自动驾驶车辆的误导效应（. , .< 0.05）显著增加了车道2的过街风险。关于21分心相关指标，过街前注视22车道23 2 β = -1 349 z = 2 18, 自动驾驶车辆外部人机界面的比例较高（. ,.< 0.05）与风险降低显著相关，这表明24关注外部人机界面内容有助于做出更安全的过街决策。主观问卷变量均未显示出对25车道2过街风险具有统计显著性的26影响。 27 p

1 **表20。** 与第1和第2车道中严重的自动驾驶车辆与行人冲突相关的广义线性混合模型结果。

变量	车道1冲突				车道2冲突			
	β	SE	z	p	β	SE	z	p
eHMI_AV1								
1	1.961	0.427	4.59	***	0.408	0.383	1.07	0.287
2	1.466	0.419	3.50	***	0.121	0.388	0.31	0.756
eHMI_AV2								
1	1.131	0.412	2.75	**	1.475	0.380	3.88	***
2	0.524	0.415	1.26	0.206	0.904	0.355	2.55	*
eHMI_AV1* 外部人机界面_AV2								
1 1	-1.748	0.578	-3.02	**	-0.539	0.546	-0.99	0.323
1 2	-0.947	0.577	-1.64	0.101	-0.371	0.526	-0.71	0.480
2 1	-1.494	0.573	-2.61	**	-0.695	0.538	-1.29	0.196
2 2	-0.987	0.602	-1.64	0.101	-0.150	0.546	-0.27	0.784
误导行为1	—	—	—	—	0.877	0.386	2.27	*
误导行为2	1.668	0.458	3.64	***	—	—	—	—
车道1自动驾驶车辆注视时间	-0.067	0.027	-2.49	*	0.009	0.025	0.35	0.728
车道注视比例1号车道电子人机界面	-1.173	0.927	-1.27	0.206	-0.209	0.853	-0.24	0.807
过街前等待时间	0.016	0.023	0.70	0.485	-0.001	0.022	-0.05	0.957
NASA-TLX	0.008	0.007	1.29	0.198	-0.005	0.006	-0.86	0.390
车道注视比例2 AV	1.729	0.714	2.42	*	-0.625	0.629	-0.99	0.321

车道注视比例	1.219	0.656	1.86	0.063	-1.349	0.619	-2.18	*
2 号外部人机界面								
性别	0.077	0.309	0.25	0.803	-0.195	0.293	-0.67	0.505
Age	0.150	0.100	1.51	0.131	-0.046	0.094	-0.49	0.626
驾驶执照	-0.605	0.575	-1.05	0.293	0.487	0.540	-0.90	0.367
驾驶经验	0.257	0.150	1.71	0.087	0.212	0.142	1.49	0.136
教育	-0.152	0.532	-0.29	0.775	-0.071	0.496	-0.14	0.887
从业者	1.442	0.415	3.48	***	0.295	0.383	0.77	0.441
让行策略 _AV1	-1.652	0.191	-8.67	***	—	—	—	—
让行策略 _AV2	—	—	—	—	-1.380	0.175	-7.89	***
对自动驾驶汽车的理解	-0.017	0.057	-0.30	0.765	-0.028	0.053	-0.53	0.598
对自动驾驶汽车的信任	0.118	0.043	2.77	**	0.062	0.040	1.55	0.121
对自动驾驶汽车的风险感知	0.011	0.047	0.24	0.812	0.034	0.045	0.75	0.456
对电子人机界面的理解	-0.207	0.067	-3.08	**	-0.066	0.063	-1.04	0.298
对外部人机界面的信任	0.146	0.055	2.66	**	0.017	0.051	0.34	0.737
过街关注度	0.091	0.056	1.62	0.105	0.042	0.053	0.81	0.419
过街遵从度	0.044	0.047	0.94	0.346	0.052	0.045	1.15	0.252
对他人的态度	-0.070	0.047	-1.47	0.141	-0.080	0.045	-1.77	0.076
AIC	924.195				1026.141			
BIC	1074.500				1176.446			
对数似然	-430.098				-481.070			

* $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$

1

5. 讨论

本研究考察了自动驾驶车辆上显示的外部人机界面如何影响复杂交互情境中行人的过街决策。研究基于沟通视角考察了两种外部人机界面类型：他我中心型外部人机界面和自我中心型外部人机界面。他我中心型外部人机界面从行人的视角提供建议性信息，例如“通行”和“停止”；而他我中心型通信则从行人的视角提供建议性信息，例如“通行”和“停止”，而异我中心通信则从车辆视角提供指示性建议，例如“行驶”和“制动”。本研究评估了不同外部人机界面组合在各种情景下对行人过街行为的影响，重点关注复杂交互中多源信息可能造成的冲突和干扰，同时比较两种外部人机界面类型。此外，本研究还探讨了行人与不同外部人机界面组合交互时，主观认知风险与客观行为风险之间的关系，从而获得可为未来外部人机界面的设计与应用提供指导的见解。

5.1 外部人机界面对行人造成的认知负荷

首先，研究探讨了以下问题：配备不同电子人机界面配置的车辆组合是否会增加行人在过街期间的认知负荷?

将两个车道上的车辆均无外部人机界面作为参照条件，对客观行为指标的分析表明，单个车道上的车辆配备外部人机界面后，1号车道车辆的行人注视时间以及过街前等待时间均显著缩短。这表明，在涉及单源信号的情景中，行人的认知负荷较低。这些观测结果印证了Mührmann等（2019）的研究发现。该研究证明了在适当条件下外部人机界面的潜在益处，同时也验证了早期研究提出的外部人机界面能够提高行人决策效率的观点。

更具体地聚焦于与行人互动的主动车辆，自我中心型外部人机界面在缩短注视时间和等待时间方面均比他我中心型外部人机界面更有效。此外，对1号车道车辆外部人机界面的注视比例进行分析后发现，与基线条件（1号车道自动驾驶车辆配备他我中心型外部人机界面，2号车道自动驾驶车辆未配备外部人机界面）相比，自我中心型外部人机界面引发的注视比例显著更低；这

表明，与他我中心型外部人机界面提供的基于运动的提示相比，行人更偏好自我中心型外部人机界面所提供的直接1行为引导，且能更高效地处理这类信息。23

关于双车道 eHMI 配置的交互效应，当两条车道上的4车辆均配备外部人机界面时，行人的注视时间和等待时间都显著增加。这表明，多源信息可能5造成冗余，并增加整合信息的认知成本6（7Tran 等人， 2024年），从而显著增加认知负荷。 8

采用 NASA-9TLX 量表测得的主观认知负荷结果，与行为指标所呈现的模式一致。10 单车道 eHMI 配置与较低的感知 11 工作负荷相关，而双车道 eHMI 的交互效应则导致主观认知负荷显著升高。此外，对12Van Der Laan 接受度量表得分的分析进一步证实，与异我中心型外部人机界面相比，自我中心型外部人机界面13更为适用，尤其是在清晰度14和可用性方面。 1516

对实验后17问卷所收集的个体差异进行分析后还发现，对外部人机界面更熟悉、且18过街行为更遵规的参与者报告的认知负荷显著较低。这可能是因为更了解外部人机界面的个体19往往更容易信任相关信息，因此不需要过多的视觉20确认；而遵守规则的行人可能更依赖既有的21启发式规则和结构化决策规则，从而减少解决认知冲突的22需要。此外，让行车辆显著降低了认知23负荷，因为它们向行人提供了清晰的行为提示，从而减少了24过度集中注意力的必要。 2526

值得注意的是，年龄对认知负荷指标的影响呈现出27不同模式：老年行人对车道128车辆的注视时间更短，但过街前等待时间更长。这表明，尽管老年29个体可能更高效地加工视觉信息并更快地做出30知觉判断，但他们往往会采取更加谨慎和保守的31行为策略。这些发现凸显了32知觉加工与行为决策之间的区别，进一步支持了这样的观点：认知负荷33

是一种通过多种行为1机制体现出来的多维构念，不应被解释为单一现象。2**5.2 分心效应**3第二个问题是：其他车道车辆提供的信息是否会分散4行人的注意力？正如 Lee 和 Daimon（2025年）所指出的，长时间接触外部人机界面5信息可能导致行人的注意力重新分配，使其6忽视周围的交通环境，从而增加7事故的风险。我们使用两个客观的8行为指标评估行人分心：过街前注视车道29车辆的注视比例，以及过街前注视车道210车辆上外部人机界面的注视比例。11

首先，以两条车道上的车辆均无外部人机界面作为参照12组，研究发现，2号车道车辆上出现外部人机界面13会显著提高对该外部人机界面的注视比例。具体而言，14他我中心型外部人机界面的增幅比自我中心型外部人机界面更为明显。15进一步分析以1号车道车辆无外部人机界面、162号车道车辆配备他我中心型外部人机界面为基线后发现，172号车道车辆上的自我中心型外部人机界面显著降低了对该界面的注视比例；18这再次印证了Eisma 等人（2019年）的研究结果，他们报告称，他我中心型19外部人机界面比自我中心型外部人机界面更容易引发行人分心。20

关于两条车道上不同外部人机界面配置的交互效应，21相较于参照条件（两条车道上的车辆均无外部人机界面），22两条车道上均没有车辆显示他我中心型23外部人机界面的配置，显著提高了对2号车道车辆的注视比例。这24表明，2号车道车辆上的他我中心型外部人机界面对25行人分心有显著影响。此外，以1号车道车辆无外部人机界面、262号车道车辆配备他我中心型外部人机界面为参考情境时，27双车道自我中心型外部人机界面配置显著降低了对282号车道车辆外部人机界面的注视比例。这再次支持了以下结论：29他我中心型外部人机界面比自我中心型外部人机界面更容易引发分心。30

基于实验后31问卷回答的个体差异分析表明，分心水平显著更高32的行人是年龄较大、驾驶经验更丰富或表达了33对自动驾驶汽车更高信任的行人。这可能是因为老年行人以及那些具有34

更多驾驶经验的人往往在过街时更1广泛地监测整个道路环境。相比之下，对自动驾驶汽车信任程度更高的人可能会感到2对当前交互车辆的行为更有信心，从而使3他们将部分注意力转移到非交互车道上的车辆。4在复杂的交通环境中，由冲突信息引发的注意力转移和分心5可能会提高碰撞风险。因此，未来的6电子人机界面设计应更加重视所显示信息的7一致性，并应采用适当的模态配置8以减少分心并提升行人安全。9

5.3 潜在误导效应 10

本研究探讨的第三个研究问题是： 11多辆配备电子人机界面的自动驾驶车辆是否可能在 12多车道环境中的街道过街过程中误导行人？ 13

14 Lau 等人（2021年）发现，传递模糊让行意图和相互矛盾信息的动态外部
15 人机界面会显著增加行人的过街风险。在此基础上，研究考察了两种误导行为：
16 误导行为1——由车道1车辆传递的让行信息触发的误导；误导行为2——由车
17 道2车辆传递的让行信息触发的误导。
18
19

首先，研究发现不同类型的外部人机界面对20误导行为的影响存在显著差异。在误导行为1中，车道1自动驾驶车辆上的外部人机界面21类型显著影响行人22被误导的可能性。以车道1自动驾驶车辆上的他我中心型外部人机界面为参考23条件，自我中心型外部人机界面的存在显著增加了24误导行为的发生率。这表明，自我中心型外部人机界面更容易被行人理解，但相比他我中心型外部人机界面，其诱发误判的25风险更高。在误导行为262中也发现了类似模式：车道2自动驾驶车辆上的外部人机界面类型对27误导行为的发生率具有显著主效应；与他我中心型外部人机界面相比，自我中心型外部人机界面同样会显著提高28误导行人的可能性。29其次，研究发现，当前交互车辆所在车道（即未发送误导信息的车道）上的30外部人机界面信息有助于减少误导行为的发生。31在误导行为1中，外部人机界面32.....33效应34

两条车道上车辆的配置显著降低了1误导行为的发生率。此外，当两条车道上的车辆配备相同类型的2外部人机界面时，自我中心型外部人机界面在减少3误导行为方面比他我中心型外部人机界面更有效。对此现象的一种合理解释是，当4交互车道上的车辆也显示外部人机界面信息时，行人5不太可能过度依赖非交互车道上车辆的外部人机界面，6并转变其决策策略。此外，自我中心型外部人机界面7通常更容易被行人理解，这可能有助于减轻困惑，进一步8抑制误导行为。这一推论与9Eisele等人的研究结果一致（2024年），他们强调，过度依赖外部人机界面可能会10导致误导效应，并可能造成不良后果。11

12 此外，个体差异显著影响行人被误导的风险。老年行人更容易受到误导，
13 而男性行人、过街时注意力更集中的行人，以及对自动驾驶车辆了解更多的行
14 人，则表现出更强的抵御能力。总之，在设计和部署外部人机界面系统时，必
15 须仔细考虑信号一致性和跨车道协调机制，以防范由信息不平衡或沟通不完整
16 引发的误导行为风险。
17
18
19

5.4 自动驾驶车辆–行人交互的风险 20

21 需要回答的最后一个研究问题是：在多车辆交互环境中，不同外部人机界面的
22 组合是否会显著增加行人的过街风险？
23
24 Subramanian等人（2024年）报告称，外部人机界面可能有助于行人更快
25 地开始过街，从而提高过街效率。然而，如果判断有误，效率的提升可能伴随
26 着风险的增加。对此，我们综合三个维度的研究结果—认知负荷、分心效应和
27 误导行为—，并将其纳入基于侵入后时间阈值定义的二元高风险过街事件建模，
28 以全面评估复杂外部人机界面配置对行人安全的影响。
29
30
31
32 关于车道1的冲突，车道1上的外部人机界面类型主效应显著增加了行人的
33 过街风险。此外，车道2车辆上的他我中心型外部人机界面表现出显著的正向
34 主效应。

这表明，交互车道车辆上的单个外部人机界面可以1大幅提高过街风险，而非2交互车道车辆上的外部人机界面也可能导致风险上升。3

关于外部人机界面对两条车道上车辆的交互效应，涉及车道2车辆的两种4他我中心型外部人机界面组合显示出显著的5负面影响。这表明，虽然交互车道上的自动驾驶车辆配备外部人机界面会6增加风险，但同时也能减轻非交互车道上自动驾驶车辆的外部人机界面信号所带来的风险。7在复杂的多车道环境中，当8交互车道上的车辆未提供明确的外部人机界面指引时，9行人可能会将注意力转向其他车道，以补充其10决策，从而增加过街风险。然而，当交互车道上的自动驾驶车辆11配备外部人机界面时，行人往往会将其作为主要的决策参考，12从而减少对13非交互车道上的车辆的依赖，并显著降低发生14冲突的可能性。15

结合早期研究结果，对认知负荷的分析16显示，过街前对车道1车辆的注视时间越长，与越低的过街风险相关；17这表明，虽然认知负荷增加可能会18降低效率，但也可能在一定程度上提高安全性。相比之下，就19分心而言，注视20车道2车辆的比例越高，车道1的过街风险就显著增加。这一结果21凸显出，将注意力从交互车道上的车辆移开22是一个关键风险因素。此外，误导场景2——在该场景中，行人23在与车道1车辆交互时，受到车道2车辆发出的误导性让行信号的影响24——显著增加了车道1的风险。25这进一步支持了误导效应假设，即行人受到车道2自动驾驶车辆的让行线索误导后，26可能会忽视车道1自动驾驶车辆带来的风险，从而27增加不安全交互的可能性。28

29 关于车道2的冲突，只有车道2自动驾驶车辆的外部人机界面类型对行人风
30 险产生了显著影响；这再次表明，单车道外部人机界面配置可能会增加过街风
31 险。

32 关于认知负荷，与行人过街前注视车辆相关的指标并未显著影响车道2的风
33 险。然而，注视车道2自动驾驶车辆外部人机界面的比例显著降低了过街风险。

34

这可能是因为，过街前分心提高了行人对车道2车辆的注意力，从而降低了这一过街阶段的风险。此外，误导情境1——行人在穿越车道2时受到车道1自动驾驶车辆交通信号灯的影响——显著增加了过街风险。这一观测也与此前的发现相呼应，表明受到车道1车辆让行信息误导的行人可能会降低对车道2车辆的警觉性，从而增加不安全交互的可能性。

5.5 局限性与未来研究范围

尽管本研究为理解配备外部人机界面的自动驾驶车辆在复杂交互情境下对行人过街决策的影响提供了宝贵见解，但仍存在一些局限性。

首先，在参与者构成方面，大多数个体都是年轻的大学生，因此，未成年人或老年人等其他行人群体可能未得到准确体现。未来研究应努力纳入年龄范围更广的个体。

其次，本研究仅关注单个行人在过街过程中的决策和行为模式，未考虑多名行人结伴过街的影响。正如 Hübner等人 (2024年)所指出的，其他行人的出现会显著影响行为和风险感知。为了全面评估外部人机界面对复杂交通环境中行人行为的影响，未来研究应采用涉及多名行人和车辆的实验设计。

第三，本实验未考虑车辆相关因素，例如车辆类型（如乘用车或卡车）或车辆速度，而这些因素都可能显著影响行人的风险感知和行为（Ye等人，2024年）。在现实交通中，不同车辆类型所带来的感知威胁或安全水平可能有所不同，而车辆速度是影响过街决策的一个众所周知的决定因素。未来研究应纳入范围更广的车辆特征，以提高研究结果的生态效度。

最后，实验在虚拟现实仿真环境中进行。该先进平台不仅实现了沉浸式交互，还生成了丰富的高分辨率行为数据，而这些数据在真实世界环境中很难

捕捉到。然而，虚拟现实无法完全再现真实交通的1复杂性与不可预测性。参与者还在相似环境中2进行了多次试验，这可能使虚拟3交通情景比现实世界中的条件更具可预测性。未来研究4应引入更多样化的场景参数，以丰富交通5情景，并减少虚拟环境可能引入的偏差。6

6. 结论 7

本研究探讨了不同类型以及不同组合的8自动驾驶车辆上的外部人机界面如何影响行人在9复杂多车道交互场景中的过街行为。通过考察四个关键参数，10即认知负荷、分心效应、误导行为和过街风险，11确定了外部人机界面在自动驾驶车辆–行人交互过程中可能造成的干扰12。13

1 研究结果表明，在单车道场景中，外部人机界面能够有效4降低行人的认知负荷，1简化其过街决策。5然而，在双车道环境中，外部人机界面的存在显著6增加了认知1负荷和分心，尤其是在车道7配备了不同视角的外部人机界面或信号类型不一致的情1况下。8在这些条件下，行人更容易受到分心。此外，9与自我中心型外部人机界面1相比，他我中心型外部人机界面引发了更高的认知负荷和更强的分心0，这表明行人1更倾向于回应1行为引导，而不是解读车辆的意图。
1

2

2

22

关于误导行为，本研究量化了不同 eHMI 组合导致的跨车道误解23机制。研究表明，行人主要会受到非交互车道上自动驾驶车辆显示的让行信号误导，尤其是在24信号不对称的条件下。当交互车辆没有配备外部人机界面时，25行人往往会依赖相邻非交互车道上车辆发出的外部人机界面信号，26并错误地将这种决策策略套用到实际的27交互车道上。这常常导致行人误判交通环境，28从而增加发生不安全交互的风险。进一步分析发现，29在这种条件下，自我中心型外部人机界面比他我中心型外部人机界面更容易引发30误判，这凸显了31保持外部人机界面信号对称，并在部署外部人机界面时确保其32一致性的重要性。33

在多车道场景中，保持各车道外部人机界面信号的一致性1至关重要。最后，将认知负荷、分心和2误导行为相关发现纳入过街风险分析后，研究发现，在3复杂的多车道环境中，外部人机界面引发的认知需求增加、注意力4转移和决策错误，会显著提高高风险车辆5与行人交互的可能性。这些发现凸显了6确保外部人机界面类型一致并加强车道间协调的必要性，–以降低行人过街时发生潜在碰撞的风险。7虽然本研究为多车交互情境中外部人机界面相关干扰8和风险提供了实证依据，但仍存在一些局限性。9此外，研究结果强调了个体差异对10行人反应的影响。因此，未来研究应扩大参与者11样本，纳入多行人和多车辆场景，并引入12更多情境变量，以便更全面地评估外部人机界面对13行人行为的影响。141516

参考文献

Asaithambi, G., Kuttan, M. O., & Chandra, S. (2016年). 混合交通条件下的行人道路过街行为：实施管控措施前后交叉口的比较研究。《发展中经济体交通》, 2(2), 14. Barendse, M. (2019 年). 自动驾驶车辆上的外部人机界面：信息类型对行人过街决策的影响。代尔夫特理工大学. Berchialla, P., Baldi, I., Notaro, V., Barone-Monfrin, S., Bassi, F., & Gregori, D. (2009). 贝叶斯广义线性混合模型在口腔健康研究中的灵活性。《医学统计学》, 28(28), 3509–3522. Betz, J., Lutwitzi, M., & Peters, S. (2024年). 自动驾驶的新分类体系：根据运行设计域、自动化等级和自动化准备度对应用进行结构化。*arXiv*预印本 *arXiv:2404.17044*. Bouchard, S., Robillard, G., & Renaud, P. (2007年). 修订模拟器晕动症问卷的因素结构。《网络治疗与远程医疗年度评论》, 5, 128–137.

Bungum, T. J., Day, C., & Henry, L. J. (2005年). 行人在有信号灯的人行横道上表现出的分心与谨慎之间的关联。《社区健康杂志》, 30(4), 269–279. Campisi, T., Otković , I. I., Šurdonja, S., & Deluka-Tibljaš, A. (2022年). 社会分心和技术分心对行人过街行为的影响：西西里岛恩纳的一项案例研究。《交通运输研究进展》, 60, 100– 107. Carmona, J., Guindel, C., Garcia, F., & De La Escalera, A. (2021年). 外部人机界面：自动驾驶汽车上的应用综述与指南。《传感器》, 21(9), 2912. Chang, C. M., Toda, K., Igarashi, T., Miyata, M., & Kobayashi, Y. (2018年, September). 比较自动驾驶汽车与行人之间通信模态的视频研究。载于国际汽车用户界面与交互式车载应用会议第十届会议附录论文集 (pp. 104–109). Chang, C. M., Toda, K., Sakamoto, D., & Igarashi, T. (2017年, September). 关注汽车：用于自动驾驶汽车与行人之间通信的界面设计。载于国际汽车用户界面与交互式车载应用会议第九届会议论文集 (pp. 65–73). Chen, X., Li, X., Hou, Y., Yang, W., Dong, C., & Wang, H. (2025年). 配备外部人机界面的自动化车辆对行人过街行为和安全的影响：聚焦盲区场景。《事故分析与预防》, 212, 107915. Clamann, M., Aubert, M., & Cummings, M. L. (2017年, January). 自动驾驶车辆车对行人通信显示器的评估。交通运输研究委员会第*96*届年会, 华盛顿特区, 美国. Colley, M., Bajrovic, E., & Rukzio, E. (2022年, April). 行人行为、时间压力和重复暴露对行人与配备外部通信系统的自动化车辆相遇时过街决策的影响。载于*2022*年计算机系统中的人为因素会议论文集 (pp. 1–11).

Cooper, P. J. (1984). 加拿大交通冲突研究经验，重点介绍“侵入后时间”技术。载于 E. Asmussen（编），交通冲突技术国际标定研究（第 75–96 页）。施普林格柏林海德堡。Das, P. (1998). 理论与实践中的计量经济学。Springer。Deb, S., Strawderman, L., Carruth, D. W., DuBien, J., Smith, B., & Garrison, T. M. (2017). 用于评估行人对完全自动驾驶车辆接受度的问卷开发与验证。《交通研究*C*辑：新兴技术》，84，178–195。de Winter, J., & Dodou, D. (2022). 外部人机界面：噱头还是必需品？《交通研究跨学科视角》，15，100643。Dey, D., Matviienko, A., Berger, M., Pfleging, B., Martens, M., & Terken, J. (2021). 向行人传达自动化车辆的意图：外部人机界面和车辆行为的作用。《*it*——信息技术》，63(2)，123–141。Dommes, A. (2019). 年轻行人与老年人的过街负荷。《事故分析与预防》，128，175–184。Eisele, D., Kraus, J., Schlemer, M. M., & Petzoldt, T. (2024). 自动化车辆应传达其状态还是意图？外部人机界面激活与未激活对行人信任形成和过街行为的影响。《多媒体工具与应用》，在线优先发表。Eisma, Y. B., Reiff, A., Kooijman, L., Dodou, D., & de Winter, J. C. F. (2021). 外部人机界面：信息视角的影响。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》，78，30–41。Eisma, Y. B., van Bergen, S., Ter Brake, S. M., Hensen, M. T. T., Tempelaar, W. J., & de Winter, J. C. (2019). 外部人机界面：显示位置对过街意图和眼动的影响。《信息》，11(1)，13。Esmaili, A., Aghabayk, K., Parishad, N., & Stephens, A. N. (2021). 通过验证行人行为问卷（PBQ）调查行人行为与碰撞事故之间的相互作用。《事故分析与预防》，153，106050。

Febiyani, A., Febriani, A., & Ma'Sum, J. (2021). 使用NASA任务负荷指数和瑞典职业疲劳量表方法计算电子学习学生的心理负荷。工业系统与管理期刊，5(1)，35–42。Ferenchak, N. N., & Shafique, S. (2022). 行人对自动驾驶车辆外部人机界面的感知。*ASCE-ASME*工程系统风险与不确定性杂志*B*辑：机械工程，8(3)，034501。Field, A. (2024). 使用*IBM SPSS Statistics*探索统计学。SAGE出版社。Geruschat D. R., Hassan S. E., & Turano K. A. (2003). 穿越复杂交叉路口时的注视行为。验光与视觉科学，80(7)，515。Gruden, C., I štoka Otković, I., & Šraml, M. (2021). 环形交叉口的行人安全：行人与车辆交通互动时的过街和扫视行为。《事故分析与预防》，159，106290。Guo, J., Yuan, Q., Yu, J., Chen, X., Yu, W., Cheng, Q., Wang, W., Luo, W., & Jiang, X. (2022). 行人视角下自动驾驶车辆的外部人机界面：一项调查研究。《传感器》，22(9)，3339。Habibovic, A., Lundgren, V. M., Andersson, J., Klingegård, M., Lagström, T., Sirkka, A., ..., & Larsson, P. (2018). 向行人传达自动化车辆的意图。心理学前沿，9，1336。Holländer, K., Wintersberger, P., & Butz, A. (2019, September). 对自动化车辆外部提示的过度信任：一项实验调查。载于第*11*届国际汽车用户界面与交互式车载应用会议论文集（第 211–221 页）。Hossain, M. M., Zhou, H., Sun, X., Hossain, A., & Das, S. (2024). 涉及分心行人的碰撞事故：识别风险因素及其与行人伤害严重程度等级和分心类型的关系。《事故分析与预防》，194，107359。Howlader, M. M., Mannering, F., & Haque, M. M. (2024). 综合考虑多种交通冲突和碰撞类型估算碰撞风险与伤害严重程度：一种双变量极值方法。事故研究分析方法，42，100331。Hsiao, C. (2007). 面板数据分析——优势与挑战。《测试》，16(1),

1–22. 1 Islam, Z., Abdel-Aty, M., Goswamy, A., Abdelraouf, A., & Zheng, O.（2023）。2 交通信号配时对交叉口车辆险些碰撞事件的影响。《Scientific Reports》，13(1)，9065。4 Izquierdo, R., Martín, S., Alonso, J., Parra, I., Sotelo, M. A., & Fernaádez–5 Llorca, D.（2023年9月）。自动驾驶车辆在人行横道场景中的人车交互：与行人和乘客开展的现场实验。载于《2023 IEEE第26届智能交通系统国际会议（ITSC）》（第2473–2478页）。IEEE。9 Kaleefathullah, A. A., Merat, N., Lee, Y. M., Eisma, Y. B., Madigan, R., Garcia, 0 J., & Winter, J. de.（2022）。外部人机界面可能产生误导：在基于CAVE的行人模拟环境中考察信任发展与误用。《Human Factors》，64(6)，1070–1085。4 Kellogg, R. S., Kennedy, R. S., & Graybiel, A.（1965）。失重机动期间迷路功能缺陷者与正常受1试者的晕动症状。《航空航天医学》，36，315–318。7 Kooijman, L., Happee, 1R., & de Winter, J. C. F.（2019）。外部人机界面如何影响行人过街行为？一项结合1头戴式显示器与动作捕捉服的研究。《信息》，10(12)，文章12。0 Krishna, K. 1V., Kapruwan, R., & Choudhary, P.（2024）。理解分心行人的风险行为：通过现1场研究探讨步行与视觉特征的作用。《交通研究F辑：交通心理学与行为》，101，1111–129。4 Lau, M., Jipp, M., & Oehl, M.（2021年9月）。探讨自动驾驶公交车外1部人机界面与驾驶员人机界面之间的相互作用：相互矛盾的信号会如何影响行人的1过街意愿？载于《第13届汽车用户界面与交互式车载应用国际会议》（第152–155 1页）。9 Lee, J., & Daimon, T.（2025）。并非总是好的：通过自动化车辆上的外部1人机界面减少行人不够谨慎的过街行为。《International Journal of Human–1Computer Interaction》，41(8)，4528–4540。

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

3

3

3

33

Lee, Y. M., Sidorov, V., Madigan, R., Garcia de Pedro, J., Markkula, G., & Merat, N.（2025）。你好，你停车是在等我吗？外部人机界面熟悉度对模糊情境下行人过街行为的影响。《Human Factors》，67(3)，264–279。4 Li, X., You, Z., Ma, X., Pang, X., Min, X., & Cui, H.（2024）。自动驾驶车辆对人类驾驶员跟驰行为的影响：基于结构方程模型的分析。《Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications》，633，129360。8 Liu, H., & Hirayama, T.（2025）。与配备外部人机界面的自动驾驶车辆交互前对行人进行预先指导：对其心理和步行行为的影响。《IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems》。在线优先发表。2 Liu, H., Hirayama, T., Morales Saiki, L. Y., & Murase, H.（2023）。与自动驾驶个人移动载具的隐式交互：行人注视行为与情境意识及感知风险的关系。《International Journal of Human–Computer Interaction》，39(10)，2016–2032。7 Liu, H., Hirayama, T., Saiki, L. Y. M., & Murase, H.（2020年9月）。自动驾驶车辆应在何时传达驾驶意图，才能让行人理解并提升其安全感知？载于《2020 IEEE第23届智能交通系统国际会议（ITSC）》（第1–6页）。IEEE。2 Lyu, W., Zhang, W., Wang, X., Ding, Y., & Yang, X.（2024）。行人对配备不同外部人机界面的可扩展自动化车辆的反应：来自基于视频的眼动追踪实验的证据。《交通研究F辑：交通心理学与行为》，103，112–127。7 Mohammed, H. A.（2021）。路段中部人行横道处分心行人过街行为评估。《IATSS Research》，45(4)，584–593。9 Mührmann, L.（2019）。探索自动驾驶车辆（AV）通过车外人机界面（外部人机界面）与行人之间的通信[硕士论文，特文特大学]。

O’Dell, A., Morris, A., Filtness, A., & Barnes, J. (2023). 行人分心对有信号控制和无信号控制的人行横道上安全行为的影响。*Future Transportation*, 3(4), 1195–1208. Raoniar, R., & Maurya, A. K. (2024). 数字和社交分心对信号控制交叉口人行横道上行人道路过街行为的影响。*Transportation Letters*, 16(7), 672–687. Rasouli, A., & Tsotsos, J. K. (2019). 与行人交互的自动驾驶车辆：理论与实践综述。*IEEE Transactions onIntelligent Transportation Systems*, 21(3), 900–918. Rosenholtz, R., Li, Y., & Nakano, L. (2007). 视觉杂乱的测量。*Journalof Vision*, 7(2), 17. Sarstedt, M., Ringle, C. M., & Hair, J. F. (2022). 偏最小二乘结构方程模型。载于*Handbook of Market Research*（第587–632页）。Springer, Cham。Schneider, S., Ratter, M., & Bengler, K. (2019, October). 虚拟现实中的行人行为：游戏化与分心的影响 [会议报告]。Road Safety and Simulation International Conference，爱荷华城，IA，美国。Schwebel, D. C., Canter, M. F., Hasan, R., Griffin, R., White, T. R., & Johnston, A. (2022). 分心行人行为：不同情境环境下风险的观察性研究。*Traffic Injury Prevention*, 23(6), 346–351. Song, Y., Jiang, Q., Chen, W., Zhuang, X., & Ma, G. (2023). 行人在隔离交通和混合交通条件下对配备外部人机界面的自动驾驶车辆的道路过街行为。《事故分析与预防》, 188, 107115. Subramanian, L. D., O'Neal, E. E., Kim, N. Y., Noonan, M., Plumert, J. M., & Kearney, J. K. (2024). 决定何时从自动驾驶车辆前方过街：儿童和成年行人如何响应外部人机界面时序和车辆运动学。《事故分析与预防》, 202, 107567. Sweller, J. (2011). 认知负荷理论。载于*Psychology of Learning andMotivation*（第55卷，第37–76页）。Elsevier。Tapiro, H., Oron-Gilad, T., & Parmet, Y. (2020). 行人分心：道路环境复杂性和年龄对行人视觉注意与过街行为的影响。*Journal of Safety Research*, 72, 101–109.

Thompson, L. L., Rivara, F. P., Ayyagari, R. C., & Ebel, B. E. (2013). 社交和技术分心对行人过街行为的影响：一项观察性研究。《伤害预防》, 19(4), 232–237. Tian, K., Markkula, G., Wei, C., Sadraei, E., Hirose, T., Merat, N., & Romano, R. (2022). 视觉和认知分心及时间压力对行人过街行为的影响：一项模拟器研究。《事故分析与预防》, 174, 106770. Tran, T. T. M., Parker, C., & Tomitsch, M. (2021). 自动驾驶汽车与行人交互的虚拟现实研究综述。《*IEEE* 人机系统汇刊》, 51(6), 641–652. Tran, T. T. M., Parker, C., Hoggenmüller, M., Wang, Y., & Tomitsch, M. (2024, 五月). 探讨自动驾驶车辆互联式外部界面对行人安全和体验的影响。载于*2024*年*CHI*计算机系统人因大会论文集（第1–17页）。Van Der Laan, J. D., Heino, A., & De Waard, D. (1997). 评估先进交通远程信息系统接受度的简便程序。《交通研究*C*辑：新兴技术》, 5(1), 1–10. Verkuilen, J., & Smithson, M. (2012). 使用贝塔分布对连续有界响应进行混合与混合物回归建模。《教育与行为统计学杂志》, 37(1), 82–113. von Janczewski, N., Kraus, J., Engeln, A., & Baumann, M. (2022). 基于NASA-TLX的主观单题测量，用于评估驾驶员—车辆交互中的认知工作负荷。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》, 86, 210–225. Wang, H., Li, D., Wang, Q., Schwebel, D. C., Miao, L., & Shen, Y. (2022). 分心如何影响行人反应：来自行为模式和大脑皮层氧合血红蛋白变化的证据。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》, 91, 414–430. Wang, K., Li, G., Chen, J., Long, Y., Chen, T., Chen, L., & Xia, Q. (2020). 自动驾驶车辆在中国城市地区对行人的适应性与挑战。《事故分析与预防》, 145, 105692. Weiß, S. L., Eisele, D., & Petzoldt, T. (2022). 自动化车辆上的外部人机界面：哪种信息和视角

行人在过街情境下最容易理解什么？载于智能人类系统集成（*IHSI 2022*）：融合人类与智能系统（第*22*卷）。 AHFE International。Wilbrink, M., Lau, M., Illgner, J., Schieben, A., & Oehl, M.（2021）。自动化车辆外部人机界面–机器界面通信策略对行人的过街决策和行为的影响，研究场景为城市环境。《可持续发展》，13(15)，8396。Wilbrink, M., Nuttelmann, M., & Oehl, M.（2021年9月）。将自动化车辆的外部人机界面通信设计扩展至与多名行人的交互–对外部人机界面进行测试。载于第*13*届国际汽车用户界面与交互式车载应用会议（第119–122页）。Williams, L. J., & Abdi, H.（2010）。Fisher最小显著差异（LSD）检验。《研究设计百科全书》，*218*（4），840-853。世界卫生组织。2023年。《*2023*年全球道路安全状况报告》。世界卫生组织。htt
ps://www.who.int/southeastasia/publications/i/item/9789240086517Yang, J., Rahardja, S., & Fränti, P.（2019年12月）。离群值检测：如何设定异常值分数的阈值？载于国际人工智能、信息处理与云计算会议论文集（第1–6页）。Ye, Y., Che, Y., & Liang, H.（2024）。探究行人态度、倾向性和风险感知对编队行驶的自动驾驶卡车之间间隙接受的影响。载于*2024*年*IEEE*第*27*届智能交通系统国际会议（*ITSC*）（第3645–3650页）。Ye, Y., Wong, S. C., Li, Y. C., & Choi, K. M.（2023）。不熟悉当地交通规则的醉酒行人的过街行为。《安全科学》，~~157，105924。Ye, Y., Wong, S. C., Li, Y. C., & Lau, Y. K.（2020）。陌~~生驾驶规则下交通系统中行人面临的风险：一种虚拟现实方法。《事故分析与预防》，142，105565。

Zheng, L., Ismail, K., & Meng, X.（2016年）。采用超阈值峰值1方法确定的冲突后时间阈值的异
2。《交通研究记录》，2601(1)，17–23。3Zhu, H., Han, T., Alhajyaseen, W. K., Iryo-Asano, M., &
Nakamura, H.（2022）。4自动驾驶能否避免与分心行人发生碰撞？对5无信号灯路段中段人行横道
的探索。6《事故分析与预防》，173，106711。 7

附录 A 1

2 **表 A1**。NASA-TLX 问卷概述。

指标	描述
心理需求 (MD)	需要多少心理和知觉活动（例如思考、判断、计算、记忆、观察，或搜索）？这项任务是轻松还是费力、简单还是复杂、要求严格还是宽松?
身体需求 (PD)	需要多少身体活动（例如推、拉、转动、控制或启动）？任务是否轻松或费力、缓慢或快速、松弛或剧烈、舒适还是劳累?
时间需求 (TD)	任务或任务要素出现的速度或节奏给你带来了多大的时间压力？这个节奏是缓慢悠闲，还是迅速紧张?
表现 (OP)	你认为自己在完成实验员（或你自己）设定的任务目标方面有多成功？你你对自己完成这些目标的表现满意吗?
努力程度（EF）	为了达到这一表现水平，你需要付出多大的努力（脑力和体力）要达到你的表现水平?
挫败感程度（FR）	在不安全、气馁、恼怒、紧张和烦躁与安全、满足、满意、放松和自得之间您在任务期间感受如何?

3

4 **表 A2**。 NASA-TLX 的解释评分。

工作负荷	价值
Low	0–9
中等	10–29
略高	30–49
High	50–79
非常高	80–100

5

6 **表A3**。 NASA-TLX 的加权得分。

MD□	PD□	TD□

PD□	TD□	EF□
MD□ TD□	PD□ OP□	TD□ FR□
MD□ OP□	PD□ EF□	OP□ EF□
MD□ EF□	PD□ FR□	OP□ FR□
MD□ FR□	TD□ OP□	EF□ FR□

1

2 **表A4**。 范德拉恩量表。

异我中心通信：主要传达3的当前驾驶状态

车辆，例如“行驶”或“制动”。4

我认为这种类型的外部人机界面通信.....5

无用的				有用的
bad				good
多余的				有效的
毫无价值的				辅助的
睡眠- 诱导				警觉性- 提升
令人不愉快的				令人愉快的
烦人的				nice
令人恼火的				讨人喜欢的
不理想的				理想的

自我中心通信：主要从车辆的角度传达期望的行人行为6，例如“停止”或“通行”。

7

我认为这种电子人机界面通信.....8

无用的				有用的
bad				good
多余的				有效的
毫无价值的				辅助的
睡眠- 引发				警觉性- 提高
令人不愉快的				令人愉快的

烦人的				nice
令人恼火的				讨人喜欢的
不理想的				理想的

1

附录B 1 风险感知测量 2 调查问卷 3 A. 人口统计背景 4 1. 您的年龄是多少？（请填写）5 2. 您的性别是什么？（男性、女性）6 3. 您的姓名是什么？7 4. 您有驾驶执照吗？（有、没有）8 5 1 9 . 您有多长时间的驾驶经验？（没有驾驶经验、不足一年、1–3年、3–5年、超过5年）10 6. 您的最高学历是什么（包括目前在读的学历）？ 11 （初中以下、高中、职业学校、大专、本科、硕士及以上）12 7. 您是否是交通运输领域（例如物流、交通规划、交通研究）的研究人员或从业者？（是、否）15 B. 自动驾驶车辆 16 （1）知识 17 自动驾驶车辆（也称为自动驾驶汽车）是无需人为干预即可运行的智能车辆，依靠人工智能、计算机视觉、雷达、监控系统和全球定位系统安全地自动驾驶。20 1. 在阅读上述描述之前，我已经了解自动驾驶车辆的原理。22 （非常不同意、不同意、中立、同意、非常同意）23 2. 在阅读上述描述之前，我已经了解自动驾驶车辆的运行和工作方式。25 （非常不同意、不同意、中立、同意、非常同意）26 3. 在阅读上述描述之前，我已经了解自动驾驶车辆目前的优缺点（例如更安全、更方便）。29 （非常不同意、不同意、中立、同意、非常同意）30 4. 在阅读上述描述之前，我已经了解自动驾驶汽车产业的历史和未来前景。32 （非常不同意、不同意、中立、同意、非常同意）33 （2）信任 34

1. 自动驾驶车辆上市后，我计划在今后的出行中使用1它们。2（非常不同意、不同意、中立、同意、非常同意）32. 我认为自动驾驶车辆能够提升道路安全并减少交通4事故。5（非常不同意、不同意、中立、同意、非常同意）63. 乘坐自动驾驶车辆时，我不会觉得有必要7持续观察周围环境并做好接管车辆的准备。8（非常不同意、不同意、中立、同意、非常同意）94. 我会向家人和朋友推荐自动驾驶车辆，并10相信他们使用时会感到放心。11（非常不同意、不同意、中立、同意、非常同意）125. 与非自动驾驶汽车相比，当我在自动驾驶车辆前过13马路时，我会更放心地做其他事情（例如用智能手机查看电子邮件、与同伴聊天）。1415（非常不同意、不同意、中立、同意、非常同意）166. 我会鼓励家人和朋友在17自动驾驶车辆前过马路时感到放心。18（非常不同意、不同意、中立、同意、非常同意）19（3）风险感知201. 我担心自动驾驶车辆的系统或21设备故障。22（非常不同意、不同意、中立、同意、非常同意）232. 我担心涉及自动驾驶车辆的事故发生时的24法律责任。25（非常不同意、不同意、中立、同意、非常同意）263. 我认为自动驾驶车辆在运行过程中可能会干扰人工驾驶车辆27。28（非常不同意、不同意、中立、同意、非常同意）294. 我认为自动驾驶车辆可能会对行人和非30机动车道路使用者产生负面影响。31（非常不同意、不同意、中立、同意、非常同意）325. 我认为自动驾驶车辆与行人互动时，事故风险33相对较高。34

(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 1C. 外部人机界面（外部人机界面）2(1) 知识3外部人机界面是指负责在两个实体（即用户和4系统）之间建立物理通信的外部人机界面。信息（即“反馈”）通过带有灯光5信号的控制面板、显示区域或按钮，或通过用户设备上的软件提供。671. 阅读上述描述之前，我已经了解外部人机界面的概念8和功能。9(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 102. 阅读上述描述之前，我已经了解11外部人机界面的发展背景。12(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 133. 阅读上述描述之前，我已经了解外部人机界面的优缺点。1415(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 16(2) 信任171. 我认为外部人机界面能够保障行人安全。18(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 192. 我认为外部人机界面能够提高道路安全并减少交通事故。20(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 213. 外部人机界面普及后，我打算在自己的车辆上安装它。22(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 234. 我会向朋友和家人推荐外部人机界面。24(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 25D. 行人过街激进性26(1) 注意力271. 过马路时，我会用手机聊天或听音乐。28(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 292. 我会因为思绪走神，过街前忘记观察交通状况。3031(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 323. 我曾在没有注意交通状况的情况下穿过多条街道和交叉口。3334

(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 14. 我有时会在行走时没有注意到其他行人或障碍物。2(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 3(2) 遵从41. 我总是靠右侧行走，以免撞到别人。5(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 62. 在设有中央隔离带的街道上，我先走过一半，在中间等待，7然后再走过另一半。8(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 93. 如果有地下通道或人行天桥，我会选择从那里通过，而不是10直接过马路。11(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 124. 即使行人信号灯变为绿灯，我也会等待并观察交通状况13后再过街。14(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 155. 在狭窄的人行道上，我会和其他人排成一列行走，以免打扰16其他行人。17(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 186. 即使跟着别人过马路，我也总会观察交通状况。19(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 20(3) 对其他道路使用者的态度211. 我感谢每一位停车让我过街的驾驶员。22(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 232. 我不会对其他道路使用者（例如行人、驾驶员、24骑自行车者）生气或大喊大叫。25(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 263. 我不会故意慢吞吞地过马路来惹恼驾驶员。 27(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 284. 即使我对驾驶员生气，也绝不会损坏他们的汽车。 29(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 305. 如果有车辆驶近，我不会过马路，因为我不31认为他们会为我停车。32(非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意) 33

6. 如果一辆车后面没有其他车辆，即使我拥有1优先通行权，我也会让它先行。2（非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意）37. 过马路时，我不会强迫其他行人给我让路。4（非常不同意，不同意，中立，同意，非常同意）5