

考虑 eHMI 的行人过街行为研究与决策模型构建

陈子昂, 徐娟芳*

(江南大学 设计学院, 无锡 214122)

摘要: **目的** 针对行人与自动驾驶汽车的交互过程, 从行人的角度出发, 探索性地提出行人在自动驾驶汽车前的过街行为决策模型。**方法** 首先, 将行人过街情景进行分析定义, 针对行人的过街意向和与自动驾驶汽车沟通意愿总结出两个典型场景; 然后, 利用潜变量分析方法将行人在自动驾驶汽车前过街行为的影响因素进行降维分类, 并对车外人机交互界面进行设计定义, 构建各潜变量的影响因子与测量量表; 最后, 运用有序 Logistic 回归方法分析各影响因素对行人过街意向和沟通意愿的影响, 构建行人在自动驾驶汽车前的过街行为决策模型。**结果** 量化分析行人过街行为影响因素与其过街决策间相关性及其内在关系, 提出过程中决定性人车交互方式及各影响因素的变化过程。**结论** 研究提出考虑 eHMI 的行人过街行为决策模型, 将行人过街决策过程分为三个阶段, 并总结出车辆行为线索和 eHMI 线索作用过程的决定性变化曲线及行人与自动驾驶汽车交互流程与关键性节点。

关键词: 有序 Logistic 回归; 自动驾驶汽车; 车外人机交互; 外部人机交互界面 (eHMI); 行人过街决策模型

中图分类号: TB472 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)22-0191-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.22.021

Pedestrian Crossing Behavior Research and Decision-making Model Construction Considering eHMI

CHEN Zi-ang, XU Juan-fang*

(School of Design, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: Aiming at the interaction process between pedestrians and autonomous vehicles, the work aims to propose an exploratory decision-making model of pedestrians crossing the road in front of autonomous vehicles from the perspective of pedestrians. Firstly, the pedestrian crossing scene was analyzed and defined. According to the pedestrian crossing intention and traffic intention, two typical pedestrian crossing scenes were summarized. Then, the influencing factors of pedestrians crossing the road in front of autonomous vehicles were classified by latent variable analysis. The external human-machine interface was designed, and the influencing factors and measurement scale were constructed. Finally, the orderly Logistic regression method was used to analyze the influencing factors of pedestrian crossing behavior on pedestrian crossing intention and traffic intention, and a decision-making model of pedestrian crossing the road in front of autonomous vehicles was constructed. The correlation and internal relationship between the influencing factors of pedestrian crossing behavior and their crossing decisions were analyzed quantitatively and the decisive interaction mode between pedestrians and vehicles and the changing process of each influencing factor in the process were put forward. A pedestrian crossing behavior decision-making model considering eHMI is proposed in this work, which divides the pedestrian crossing decision-making process into three stages, and summarizes the decisive change curve of vehicle behavior cues and eHMI cues, as well as the interaction process and key nodes between pedestrians and autonomous vehicles.

KEY WORDS: orderly Logistic regression; autonomous vehicle; external human-machine interaction; external human-machine interface (eHMI); pedestrian crossing decision-making model

收稿日期: 2023-06-22

基金项目: 浙江省健康智慧厨房系统集成重点实验室 (2014E10014); 教育部人文社科规划基金项目 (21YJA760075)

*通信作者

近年来,自动驾驶领域的技术进步使得更多搭载智能驾驶系统的车辆开始在现有交通环境中出现。自动驾驶汽车也被认为是一种减少与人为错误相关道路事故的有效解决方案,更加有助于行人安全^[1]。Markkula^[2]将道路交通中的交互定义为“至少两方道路使用者因意图在相同时间内使用同一道路空间而使各自行为受到影响的情境”。因此,行人与自动驾驶汽车的交互主要体现在行人通过隐性或显性交互方式接受车辆的交互信息,理解并预测车辆运动行为的过程。对于没有明确交通信号的低速模糊交互场景,自动驾驶汽车则需要通过车外人机交互界面(external Human-machine Interface, eHMI)提供额外的交互信息,以弥补驾驶员线索的缺失^[3]。为了帮助更好理解行人通过eHMI与自动驾驶汽车的交互过程,本文对行人过街决策行为的影响因素进行定义,运用有序Logistic回归方法分析潜变量对其过街意向和沟通意愿的影响,探讨行人在eHMI辅助下与自动驾驶汽车的交互流程与关键性节点。

1 行人与自动驾驶汽车的交互

1.1 隐性交互方式

隐性交互方式是指自动驾驶汽车在行驶过程中使用非规范的交互信息(如速度变化等行为线索)来传递车辆信息的方式。现有文献对行人与自动驾驶汽车之间的隐性交互方式的研究,主要集中在车辆的减速参数和横向移动两个方面。现有研究表明^[4],一方面,车辆的温和减速行为能够对行人的过街决策产生积极影响,促进人车交互过程;另一方面,Sripada等^[5]的研究指出车辆的横向运动能够作为表达行驶意图的直观信号。然而,当车辆表现出不符合行人预期的行为时,行人会主动寻求明确的驾驶员线索^[6]。因此,自动驾驶领域的eHMI概念被提出,即通过显示屏、灯条等方式向行人传达明确的车辆信息,满足行人与自动驾驶汽车的交互需求。

1.2 显性交互方式

显性交互方式在通常情况下指自动驾驶汽车使用单独设计的灯光或声音信号来传达车辆意图^[6]。现有研究普遍表明,eHMI的存在能够增强行人与自动驾驶汽车的交互行为。Holländer等^[7]通过实验指出行人在设有正确eHMI的自动驾驶汽车前过马路会感到安全,增强行人过街信心。Dey等^[8]的研究则指出eHMI在低速交互场景下表现出更为显著的辅助效果。行人与搭载eHMI的自动驾驶汽车的有效交互需要车辆隐性和显性交互方式的正确协作。因此,需要对人车交互过程与事件进行梳理定义,明确行人自身特性对其过街决策的影响,探索自动驾驶汽车的隐性交互(行为线索)和显性交互(eHMI)发挥作用的关键节点,以提高人车交互的效率和安全性。

2 实验设计

2.1 研究方法 with 变量定义

行人过街决策是一个复杂的过程,行人自身特性是该过程的重要影响因素。过往文献对人车交互行为的研究大多基于单车的交互情境,这有助于被试聚焦于与自动驾驶汽车的交互从而得出更加具有针对性的研究结论^[3]。因此,研究在考虑实际情况后决定沿用单人单车的交互情境进行考虑eHMI的行人过街行为与决策研究。本文采用有序Logistic回归分析方法,研究相关因素对行人过街意向与沟通意愿的影响,研究通过对现有文献的梳理提出行人过街决策行为的6个影响因素,具体定义如下。

1) 态度。现有研究表明,个体对事物的使用态度对其自身的行为意向存在显著影响^[9]。景鹏等^[10]和Rahman等^[11]在研究自动驾驶汽车接受度时同样发现态度存在显著性影响。为此,研究将态度定义为行人对于自动驾驶汽车及技术的积极或消极的感觉。

2) 信任。信任是影响自动驾驶汽车使用意向的主要决定因素^[12],在车外人机交互中,信任能够影响行人的感知安全性^[13],更高的信任会增强行人在自动驾驶汽车前的过街意图。Hensch等^[14]的研究指出行人在过街过程中需要对eHMI保持适当的信任度,以确保自身安全。为此,研究将信任定义为行人认为自动驾驶汽车能够正确且高效完成预定任务的程度。

3) 感知风险。感知风险对行人对自动驾驶汽车的接受度有显著负向影响^[15],这可能会导致行人拒绝与车辆进行交互。为此,研究将感知风险定义为行人预知自动驾驶汽车带来的负面结果,并对其可能产生伤害程度的评估。

4) 感觉寻求倾向。于凯等^[16]通过实验表明感觉寻求倾向对风险决策具有显著性影响;尹佳雯^[17]的研究指出感觉寻求倾向对于行人过街决策同样具有显著影响。为此,研究将感觉寻求倾向定义为行人在过街过程中为了追求经济效益最大化而采取冒险行为的倾向。

5) 知觉行为控制。葛鹏^[18]通过测量研究表明,行人的知觉行为控制能力越强,越有能力处理过街过程中可能出现的突发情况。为此,研究将知觉行为控制定义为行人能够控制自身意愿并进行某种特定行为的能力。

6) 沟通主动性。在传统人车交互中,行人会选择主动与驾驶员进行沟通以确保自身安全,行人与司机的眼神接触能够增强行人过街的安全感^[19]。为此,研究将沟通主动性定义为行人表现出的与驶来车辆进行主动沟通的意愿。

2.2 研究情境

现有研究表明,在应用自动驾驶技术的人车交互中,自动驾驶汽车仅依靠其自身的精准控制和驾驶员

对交通规则的精准确掌握, 仍不足以保证驾驶员和行人在交互过程中的安全^[20]。同时, 也有研究指出当行人在与车辆交互时遇到车内没有驾驶员或驾驶员在车内从事与驾驶无关行为的情况, 行人会表现出犹豫和不安^[21]。在车辆的预期行为未得到满足时, 行人同样会寻求与车辆进行明确的交互^[6]。

目前, 随着“自动驾驶小巴体系”、“行泊一体”等自动驾驶技术应用场景概念的提出与逐渐成熟, 行人在实际过街场景中需要对交互车辆的运行状态与驾驶人传递的信息进行整合, 做出过街决策, 并在执行过程中进行动态调整。根据我国现行交通法律法规, 行人在人行横道处过街通行享有优先路权。然而, 在没有明确交通信号指示的交通情境, 如没有人行横道的社区街道、驶出停车场地、非主干道右转等情况, 这类交通情境被定义为模糊、低速的城市交通情境^[22-23]。在这些交通情境下, 行人无法准确得知车辆的具体意图, 因此难以做出决策, 这就需要通过明确的人车交互方式来解决^[24]。

2.3 车外人机交互界面要素组成

综合现有研究的结论, 置于车辆的前散热器格栅

的车外显示屏是 eHMI 较为合理的呈现形式, 针对界面的颜色、呈现形式和信息类型三类设计要素的分析如下。

1) 颜色: 现有研究表明可以在 eHMI 中沿用当前交通信号灯的颜色^[25]。因此, 在 eHMI 的设计中沿用红绿灯的颜色隐喻, 将绿色与车辆的让行意图相关联, 红色与通行意图相关联。

2) 呈现形式: Stadler 等^[26]的研究表明图形形式的 eHMI 具有最高的满意度, 有着理解性高等优势; Eisma 等^[27]的研究则指出文本呈现形式的 eHMI 效果最优, 其优势在于更强的指向性和明确性。因此, 研究 eHMI 同时以图形和文本两种形式呈现。

3) 信息类型: Faas 等^[28]的研究表明对行人来说, 有关车辆意图的信息更符合其需求; Ackermann 等^[29]的研究指出 eHMI 直接指示过马路信息优于显示车辆的状态信息, 传达建议信息的 eHMI 能够提高行人与车辆之间交互的效率^[26]。因此, 研究 eHMI 传达车辆意图和建议指示两类交互信息。

综上所述, 对研究中所使用的 eHMI 进行了设计要素与信息类型两个层面的设计定义 (见表 1), 并在调查问卷中以场景渲染图的形式呈现, 见图 1。

表 1 eHMI 设计要素与信息类型
Tab.1 Design elements and information types of the eHMI

界面类型	信息内容	信息类型	信息含义	颜色	界面图片
图形界面	行走拟态图标	建议信息	车辆让行	绿色	
	静止拟态图标	建议信息	车辆通行	红色	
文本界面	正在通行	车辆意图	车辆通行	红色	
	正在减速	车辆意图	车辆让行	绿色	
	请通行	建议信息	车辆让行	绿色	
	请等待	建议信息	车辆通行	红色	



图 1 eHMI 场景渲染图
Fig.1 eHMI scene rendering

3 数据调查与统计分析

3.1 问卷设计

基于已有文献和较为成熟的量表, 设计了“行人在自动驾驶汽车前过街行为影响因素调查”的问卷。问卷中每个自变量因子设置 3 个问题项, 通过 Likert 七点量表测量; 基于有序 Logistic 回归对因变量因子的定义, 对行人的过街意向和沟通意愿分别设计了假设情景, 每个情景设置具有 5 个有序选项的问题项,

以被调查者对问题项的打分作为因变量。为了保证问卷质量的同质性和可靠性,在问卷的最开始给出了自

动驾驶汽车和 eHMI 的概述与示例图片。行人在搭载 eHMI 自动驾驶汽车前过街行为的影响因素测量见表 2。

表 2 行人过街行为影响因素测量量表
Tab.2 Scale for influencing factors of pedestrian crossing behavior

量表维度	题项	测量问题项	来源
态度	At1	对自动驾驶汽车持有支持态度	Rahman 等 ^[11]
	At2	我觉得自动驾驶汽车的加入能让交通系统变得更加完善	
	At3	如果自动驾驶汽车加入现有交通系统,可以减少我观察周围环境和精力	
信任	Trust1	过马路时,我相信自动驾驶汽车能够准确避让行人	Deb 等 ^[30]
	Trust2	如果我和朋友过马路时遇到自动驾驶汽车,我会叫他们不要感到紧张	
	Trust3	在自动驾驶汽车前过马路时,我会放心地做其他事情	
感知风险	Pr1	过马路时,我会担心自动驾驶汽车出现设备或系统故障而撞到我	景鹏等 ^[10]
	Pr2	过马路时,我会担心自动驾驶汽车不能像公交车一样礼让行人而撞到我	
	Pr3	过马路时,如果看到自动驾驶汽车驶来我会感到不安全	
感觉寻求倾向	Ple1	在路边等待较长时间,我会尝试进行冒险穿越	尹佳雯 ^[17]
	Ple2	在无交通信号路段过马路时,我会向驶来车辆索要通行权	Deb 等 ^[30]
	Ple3	在有信号灯的路段,我会为了节省时间,提前 1~2 s 起步过马路	葛鹏 ^[18]
知觉行为控制	Pbc1	我能够判断自己过马路行为是否危险	葛鹏 ^[18]
	Pbc2	我在过马路时有能力处理突发情况	
	Pbc3	我能够注意到交通状况的变化并应对	
沟通主动性	Ar1	过马路时,我会寻求司机的眼神交流	Onkhar 等 ^[19]
	Ar2	过马路时,我会向驶来车辆伸手以告知司机“我想通过,请等一下”的意图	尹佳雯 ^[17]
	Ar3	过马路时,我会向司机点头或挥手致谢	

3.2 数据分析

调查问卷采用线下线上相结合的形式进行发放,线下填写问卷的被调查者还被邀请进行了一次半结构化访谈以确认行人在与搭载 eHMI 自动驾驶汽车交互的场景中可能的事件、影响因素与事件间的相关性及可能的关键交互节点,共 12 位被调查者被邀请参加此次访谈。现有研究指出,25~34 岁的人对自动驾驶汽车的态度比其他人更积极,但其他年龄组的态度差异并没有统计学意义^[31]。鉴于此,并结合研究人员所处地区与线下被试者招募的实际情况,研究选取被试者主要集中在高校校园及部分企业员工。研究共回收 216 份问卷,经筛查得到有效问卷 209 份。其中,男性占比 53.6%,女性占比 46.4%,年龄段处于 18~30 岁区间占比 94.7%,97.6% 的被调查者听说或了解过自动驾驶汽车。

问卷使用克隆巴赫系数 (Cronbach α) 和 KMO & Bartlett 检验分别进行信度和效度检验,通过 SPSS

软件分析得出 Cronbach α 系数为 0.895 (> 0.8),KMO 值为 0.842 (> 0.8),说明研究数据可信度较高且适合进行信息提取。问卷的收敛效度通过潜变量的平均方差提取值 (AVE 值) 和组合信度 (CR 值) 来检验,结果显示各潜变量的平均方差提取值 (AVE 值) 在 0.714~0.830,均大于 0.5;组合信度 (CR 值) 在 0.882~0.936,均大于 0.6,说明各潜变量均具有较好的收敛效度和内部一致性。使用有序 Logistic 回归分析前,需要通过方差膨胀因子和容忍度检验各自变量之间是否存在多重共线性,分析结果显示各自变量的方差因子膨胀范围为 3.601~7.962,容忍度范围为 0.126~0.278,不存在多重共线性,可以进行有序 Logistic 回归分析。

3.3 结果统计

被调查者在实验所定义情景下过街意向与沟通意愿回答选项的统计性描述见表 3。由表 3 得出,92.8% 的被调查者能够接受在搭载 eHMI 自动驾驶汽

车前过街, 其中 24% 的被调查者表现出了较高的过街意向; 90% 的被调查者表现出了与自动驾驶汽车的沟通意愿, 其中 85.7% 的被调查者表现出愿意通过 eHMI 了解车辆意图的倾向。

表 3 行人过街意向与沟通意愿统计
Tab.3 Statistics of pedestrian crossing intention and communication intention

情境占比序号	过街意向	沟通意愿
1	15 (7.2%)	21 (10.0%)
2	65 (31.1%)	9 (4.3%)
3	79 (37.7%)	31 (14.8%)
4	39 (18.7%)	51 (24.4%)
5	11 (5.3%)	97 (46.5%)
总计	209 (100%)	209 (100%)

使用 SPSS 软件进行分析, 模型通过似然比检验, 表明构建有意义, 表 4 给出了 6 个影响因素在两个假设场景中的回归系数和 P。由表 4 得出, 对于行人的过街意向, 信任和知觉行为控制表现出了正向的显著性影响, 感知风险表现出了负向的显著性影响。对于行人的沟通意愿, 态度、信任、感觉寻求倾向和沟通主动性均表现出正向的显著性影响。

4 考虑 eHMI 的行人过街行为决策模型构建

基于上述实验分析、用户访谈结果及现有文献中的理论研究, 提出考虑 eHMI 的行人过街行为决策模型。该模型旨在构建行人在过街决策过程中与搭载 eHMI 自动驾驶汽车交互典型场景的整体理解, 将行人在搭载 eHMI 自动驾驶汽车前过街决策过程分为观

表 4 行人过街意向与沟通意愿分析结果
Tab.4 Analysis of pedestrian crossing intention and communication intention

情景问题	潜变量	回归系数	χ^2
当您过马路时遇到搭载有 eHMI 的自动驾驶汽车 (见图 1) 时, 您会做出什么样的过街行为意向?	态度	0.016	0.477
	信任	0.161	13.172**
	感知风险	-0.041	8.761*
	知觉行为控制	0.207	11.406**
	感觉寻求倾向	-0.042	0.843
	沟通主动性	0.045	0.552
当向您驶来的自动驾驶汽车 (如图 1 所示) 尝试与您沟通车辆意图时, 最符合您意愿的一项是?	态度	0.245	8.319*
	信任	0.374	15.705**
	感知风险	-0.020	0.807
	知觉行为控制	0.042	0.422
	感觉寻求倾向	0.229	13.701**
	沟通主动性	0.250	14.638**

注: *表示 $P < 0.05$; **表示 $P < 0.01$ 。

察与感知、分析与预测、理解与决策三个阶段, 并将整个过程细分为 18 个事件, 将 6 个影响因素在每个事件中进行了关键性标注, 并绘制了车辆行为线索和 eHMI 线索作用过程的决定性变化曲线, 见图 2。

4.1 观察与感知阶段

信任与态度: 该阶段信任和态度主要体现在行人对车辆外观的评估, 对自动驾驶汽车不信任的行人在更具未来感造型车辆面前会表现出较低的过街信心^[32], 而持有消极态度的行人可能会将外观的新颖性转化为车辆的攻击性, 从而降低自身过街意向。因此, 在自动驾驶汽车的设计和研发过程中需要在各方面充

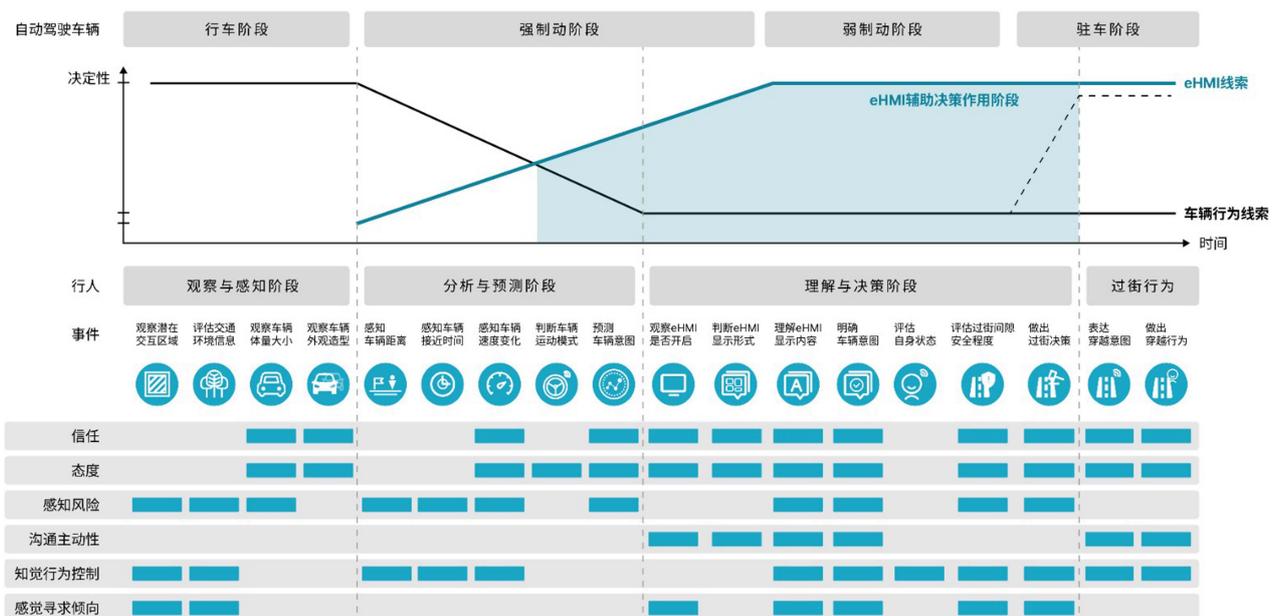


图 2 考虑 eHMI 的行人过街行为决策模型

Fig.2 Pedestrian crossing behavior decision-model considering eHMI

分考虑信任问题,例如在造型设计上表现出循序渐进的趋势,避免贸然出现过高未来感的车辆造型。

感知风险、知觉行为控制与感觉寻求倾向:以上三个影响因素在该阶段主要体现在行人对环境信息的感知,前两者更多影响行人对过街间隙安全性及自身因素匹配程度的初步评估;后者则会在较高急迫程度下,促使行人会表现出更强的过街倾向,此时他们对环境的评估可能会低于实际水平,从而产生冒险的过街行为,这也就需要更为明确的 eHMI 信息来表明车辆意图,帮助行人提早获取准确的车辆信息,提高过街效率和安全性。

综上所述,在观察与感知阶段,行人主要对交通环境(道路特征、交通流量等)进行感知和预评估,当外部环境因素符合他们的安全预期时,他们会开始选择理想的过街间隙。在通常情况下,行人会倾向于选择更长的过街间隙^[33],这也就意味着延长了人车交互的过程。因此,需要车辆通过更明确的 eHMI 传达自身意图,以主动沟通的方式开始人车交互过程。

4.2 分析与预测阶段

1) 信任与态度:该阶段信任和态度主要体现在行人对车辆行为线索的评估和对车辆意图的预测,具有较高信任和较好态度的行人表现出对自动驾驶汽车的行驶行为更高的宽容度,从而促使他们产生对车辆意图的积极预测,例如具有良好信任和态度的行人倾向于相信车辆总会为他们让出通行权,这会是造成交通冲突的潜在因素。然而一旦车辆的实际行为与行人的预期不符时,行人则会表现出强烈的信任下降和犹豫不决,因此车辆需要在自身行为线索趋于模糊时使用 eHMI 作为辅助手段传递交互意图。

2) 感知风险与知觉行为控制:该阶段感知风险主要影响行人对车辆行为线索的感知,具有较高感知风险的行人在选择过街间隙上表现出更高的犹豫,这容易造成过街效率的下降。知觉行为控制则体现在行人对自身能力和过街行为水平的匹配,两者共同作用影响行人对车辆运动模式的判断。

综上所述,在分析与预测阶段,行人与自动驾驶汽车进行第一次交互,该过程行人主要接收车辆通过行为线索传递的隐性交互信息。然而,由于隐性信息通常为无意识交互且易受到行人自身因素和车辆运动模式的影响,人车之间仅通过隐性交互可能带来歧义甚至冲突。因此,在人车交互中还需要通过 eHMI 进一步明确车辆的行驶意图,以保证行人充足的决策时间和准确性。

4.3 理解与决策阶段

该阶段 eHMI 逐渐表现出对行人过街决策过程的决定性作用,但车辆行为线索也持续保持着一定的影响力,行人与自动驾驶汽车的交互逐渐转变为行人与 eHMI 的交互。研究实验所设定假设情境均主要发生

在理解与决策阶段,因此在本段结合实验结果对模型进行分析,具体讨论如下。

1) 信任:该阶段行人对自动驾驶汽车的信任逐渐转移到对 eHMI 的信任,实验结果表明,信任对行人的过街意向和沟通意愿均表现出正向的显著性影响,是对行人过街决策的关键影响因素。行人对车辆的信任也促进了自身与车辆的沟通意愿,这是 eHMI 能够发挥作用的重要前提,也是设计的关键所在。因此,eHMI 的设计需要着重考虑行人的信任水平,在设计阶段从呈现形式、界面美感、界面可用性、信息透明度和信息视角等方面保持以行人为中心的设计,维持行人目标与系统目标之间的共性。同时,要注意保持行人主观信任水平与车辆自动化系统客观能力的适当校准^[24],过高或过低的信任都会产生不良的交互后果,因此 eHMI 的设计需要呈现车辆的状态和意图信息,以促进人车交互过程的安全和有效性。此外,还可以通过宣传、培训等方式让行人熟悉 eHMI 的运行方式,提高对 eHMI 的认知和信任度,进而提高行人的信任水平,确保 eHMI 发挥应有作用。

2) 态度:态度对行人的沟通意愿表现出了正向的显著性影响,行人的积极态度可以提高自身对 eHMI 的接受度,进而保障更为流畅的交互过程,因此 eHMI 的设计需要充分考虑自身可用性和行人接受度。例如在 eHMI 形式上采用置于车辆的挡风玻璃或进气格栅处的车外屏幕形式,避免使用较难理解的复杂灯带或环境适应性较低的车辆投影方式。此外,行人的态度是影响自动驾驶技术普及速度的重要影响因素,用户访谈结果表明,自动驾驶汽车表现出的交通安全和相关企业道德观点对行人态度的影响同样具有关键作用。因此,自动驾驶汽车应一方面在技术层面持续创新,减少因技术水平引发的交通事故;另一方面在设计层面保持 eHMI 内容反馈与车辆性能体现的一致性,以增进行人的积极态度,从而促进行人与车辆的积极交互。

3) 感知风险:实验结果显示感知风险对行人的过街意向具有负向影响,较高的感知风险会降低行人的过街意向,他们会将对车辆运动模式和 eHMI 显示内容的评估表现出更高的谨慎。因此,eHMI 的呈现形式和内容应与车辆运动模式保持高度一致,并且可以采用温和的减速方式来降低行人的感知风险,另外有研究表明,使用多通道交互的 eHMI 形式也是降低行人感知风险的有效手段^[34]。此外,用户访谈结果表明,行人对相关企业的认知和口碑评价同样会增加自身对特定品牌汽车的感知风险。因此,企业同样需要做好技术迭代创新,通过具有友好表达性的 eHMI 界面风格来降低用户的额外感知风险,保障人车交互过程的顺利进行。

4) 知觉行为控制:实验结果表明,知觉行为控制对行人的过街意向有显著的正向影响,这与行人的

自信密切相关,客观的生理条件与产生的主观自信共同促进行人的过街意图。由此可见,自动驾驶汽车的运动模式应尽可能表现出对行人的友好,同时从技术层面避免突发情况的产生。此外,用户访谈的结果表明,即使是知觉行为控制较好的被试,仍需要车辆显示明确的意图来增强自身的过街信心。因此,eHMI的设计需要充分发挥人车交互过程的额外辅助作用,例如提前eHMI显示信息的时间点,给行人预留更多的反应和决策时间,以确保行人有充足的时间思考自身能力是否能够与过街情境正确匹配。

5) 感觉寻求倾向:实验结果表明,感觉寻求倾向对行人的沟通意愿表现出正向显著影响。也就是说,行人的感觉寻求倾向在过街决策过程中表现为便捷倾向心理,他们对于过街经济效益的最大化追求转化成为与自动驾驶汽车的积极沟通意愿,他们希望通过积极有效的沟通来减少过街过程所花费的时间。因此,eHMI的设计应突出关键交互信息,如车辆意图或建议信息,而避免使用不易理解或易引发歧义的方式,如不显著的灯光变化或道路投影。另一方面,用户访谈的结果显示,eHMI中对行人的建议或指示性信息更容易被他们所理解,从而促进行人的过街意愿。不过需要注意的是,一些研究表现出了对建议性信息的担忧,认为这可能会在多人交互场景中引起误解或混乱。因此,可以在eHMI的设计中采用模块化设计,将建议信息和监测反馈信息分别呈现,给行人更为具体和明确的信息指示;或是采用多模态的交互方式,同时使用视觉和听觉通道传递不同交互信息。此外,也可以与行人的智能设备或道路智能设施进行联动,打造更为系统的人车协同道路智慧场景。

6) 沟通主动性:实验结果表明,沟通主动性同样对行人的沟通意愿表现出正向显著影响,越强的沟通主动性意味着越高的沟通意愿。尤其对于低速模糊过街场景,行人更加表现出与车辆的沟通意愿以确保自身被车辆所检测,来保障过街的行为安全。由此可见,对于缺乏驾驶员线索的车辆来说,需要eHMI来促进行人主动积极的沟通,推动人车交互过程向有序化、高效化方向发展。此时,在eHMI的设计上应保持以行人为中心的设计视角,使用如车辆对行人的感知、给行人的建议等以行人为中心的交互信息来传达自身意图,以保证eHMI的可用性和可接受性,这同样也可以促进行人的信任水平,进一步提高交互过程的效率及安全性。

5 结语

研究将行人与搭载eHMI车辆的人车交互过程分为三个阶段,第一阶段以车辆隐性交互方式为主,行人通过车辆运动学线索预测车辆的行驶意图;后两个阶段加入eHMI的辅助,向行人传递明确的行驶意图,辅助行人做出过街决策,增强行人的过街信心,促进

人车交互过程,为行人在搭载eHMI的自动驾驶汽车前的过街行为决策研究提供一个可用的理论模型。另外,由于研究基于“一人一车”的交互情境,与真实的交通环境存在一定差异,因此在未来研究中应综合考虑复杂交通情境中各因素对人车交互过程的综合影响,统一eHMI的标准化设计,匹配市场对于车辆造型的需求,从安全性、运行设计范围(ODD)和经济性三个方面考虑智慧交通系统的各方需要,建立能够灵活应对复杂交通环境的eHMI系统设计。

参考文献:

- [1] VAN BRUMMELEN J, O'BRIEN M, GRUYER D, et al. Autonomous Vehicle Perception: The Technology Of Today and Tomorrow[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 89: 384-406.
- [2] MARKKULA G, MADIGAN R, NATHANAEL D, et al. Defining Interactions: A Conceptual Framework for Understanding Interactive Behaviour in Human and Automated Road Traffic[J]. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2020, 21(6): 728-752.
- [3] 蒋倩妮, 庄想灵, 马国杰. 自动驾驶汽车与行人交互中的沟通界面设计:基于行人过街决策模型的评估[J]. *心理科学进展*, 2021, 29(11): 1979-1992.
JIANG Qian-ni, ZHUANG Xiang-ling, MA Guo-jie. Evaluation of External HMI in Autonomous Vehicles Based on Pedestrian Road Crossing Decision-Making Model[J]. *Advances in Psychological Science*, 2021, 29(11): 1979-1992.
- [4] WANG Pei, MOTAMEDDI S, QI Shou-ming, et al. Pedestrian Interaction with Automated Vehicles at Uncontrolled Intersections[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2021, 77: 10-25.
- [5] ANIRUDH S, PAVLO B, DE W J. Automated Vehicles that Communicate Implicitly: Examining the Use of Lateral Position within the Lane[J]. *Ergonomics*, 2021, 64(11): 11-15.
- [6] FUEST T, SOROKIN L, BELLEM H, et al. Taxonomy of Traffic Situations for the Interaction between Automated Vehicles and Human Road Users[C]// Stanton N. *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. Cham: Springer, 2018: 708-719.
- [7] HOLLÄNDER K, WINTERSBERGER P, BUTZ A. Overtrust in External Cues of Automated Vehicles: An Experimental Investigation[C]// *Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. Utrecht, Netherlands. New York: ACM, 2019: 211-221.
- [8] DEY D, MATVIIENKO A, BERGER M, et al. Communicating the Intention of an Automated Vehicle to Pedestrians: The Contributions of eHMI and Vehicle Behavior[J]. *It-Information Technology*, 2021, 63(2): 123-141.

- [9] CHEN C F, CHEN Pei-chun. Applying the TAM to Travelers' Usage Intentions of GPS Devices[J]. *Expert Systems With Applications*, 2011, 38(5): 6217-6221.
- [10] 景鹏, 王伟, 吴麟麟. 老年人对自动驾驶汽车接受度研究[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(6): 158-171.
JING Peng, WANG Wei, WU Lin-lin. Acceptance of Autonomous Vehicles for the Elderly[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(6): 158-171.
- [11] RAHMAN M M, DEB S, STRAWDERMAN L, et al. How the Older Population Perceives Self-Driving Vehicles[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 65: 242-257.
- [12] CHOI J K, JI yong gu. Investigating the Importance of Trust on Adopting an Autonomous Vehicle[J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2015, 31(10): 692-702.
- [13] NUÑEZ VELASCO J P, FARAH H, VAN AREM B, et al. Studying Pedestrians' Crossing Behavior when Interacting with Automated Vehicles Using Virtual Reality[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 66: 1-14.
- [14] CHRISTIN H A, ISABEL K, MATTHIAS B, et al. The Effect of eHMI Malfunctions on Younger and Elderly Pedestrians' Trust and Acceptance of Automated Vehicle Communication Signals[J]. *Frontiers in Psychology*, 2022, 13: 866475.
- [15] HULSE L M, XIE Hui, GALEA E R. Perceptions of Autonomous Vehicles: Relationships with Road Users, Risk, Gender and Age[J]. *Safety Science*, 2018, 102: 1-13.
- [16] 于凯, 邢强. 感觉寻求对风险决策影响的认知神经机制[J]. *广州大学学报(社会科学版)*, 2015, 14(4): 22-28.
YU Kai, XING Qiang. The Effect of Sensation Seeking on the Performance of Risky Decision-Making: A Study Based on ERPs[J]. *Journal of Guangzhou University (Social Science Edition)*, 2015, 14(4): 22-28.
- [17] 尹佳雯. 无人行横道路段行人穿越行为研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2020.
YIN Jia-wen. Study on Pedestrian Crossing Behavior in Non-crosswalk Section[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2020.
- [18] 葛鹏. 老年人过街行为特性分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
GE Peng. Analysis on the Behavior Characteristics of the Elderly Crossing the Street[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [19] ONKHAR V, BAZILINSKY P, DODOU D, et al. The Effect of Drivers' Eye Contact on Pedestrians' Perceived Safety[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2022, 84: 194-210.[LinkOut]
- [20] 陈鑫, 宋臻, 高艺轩, 等. 行人过街安全研究进展[J]. *人类工效学*, 2022, 28(2): 82-87.
CHEN Xin, SONG Zhen, GAO Yi-xuan, et al. Research Progress on Pedestrian Crossing Safety[J]. *Chinese Journal of Ergonomics*, 2022, 28(2): 82-87.
- [21] ROTHENBÜCHER D, LI J, SIRKIN D, et al. Ghost Driver: A Field Study Investigating the Interaction between Pedestrians and Driverless Vehicles[C]//2016 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN). New York, NY, USA. IEEE, 2016: 795-802.
- [22] FÄRBER B. Communication and Communication Problems between Autonomous Vehicles and Human Drivers[M]// *Autonomous Driving*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016: 125-144.
- [23] LIU Yuan, LYU Yuan, BÖTTCHER K, et al. External Interface-Based Autonomous Vehicle-to-Pedestrian Communication in Urban Traffic: Communication Needs and Design Considerations[J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2020, 36(13): 1258-1272.
- [24] FAAS S M, KRAUS J, SCHOENHALS A, et al. Calibrating Pedestrians' Trust in Automated Vehicles[Z]. *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2021: 1-17.
- [25] 黎兰平, 郭修远. 自动驾驶汽车车外人机交互界面设计研究[J]. *包装工程*, 2020, 41(2): 57-64.
LI Lan-ping, GUO Xiu-yuan. EHMI Design for Automated Vehicles[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(2): 57-64.
- [26] STADLER S, CORNET H, NOVAES THEOTO T, et al. A Tool, not a Toy: Using Virtual Reality to Evaluate the Communication between Autonomous Vehicles and Pedestrians[M]// *Augmented Reality and Virtual Reality*. Cham: Springer, 2019: 203-216.
- [27] EISMA Y B, REIFF A, KOOIJMAN L, et al. External Human-Machine Interfaces: Effects of Message Perspective[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2021, 78: 30-41.
- [28] FAAS S M, MATHIS L A, BAUMANN M. External HMI for Self-Driving Vehicles: Which Information shall be Displayed?[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2020, 68: 171-186.
- [29] ACKERMANN C, BEGGIATO M, SCHUBERT S, et al. An Experimental Study to Investigate Design and Assessment Criteria: What is Important for Communication between Pedestrians and Automated Vehicles?[J]. *Applied Ergonomics*, 2019, 75: 272-282.
- [30] DEB S, STRAWDERMAN L, CARRUTH D W, et al. Development and Validation of a Questionnaire to Assess Pedestrian Receptivity Toward Fully Autonomous Vehicles[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 84: 178-195.
- [31] FAGNANT D J, KOCKELMAN K. Preparing a Nation for Autonomous Vehicles: Opportunities, Barriers and Policy Recommendations[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 77: 167-181.