11,614 正文 246 词，摘要 123 词，参考文献 13 条，正文包含 5 个表格和 1 张图，附录包含 5 个表格和 1 张图

等待还是穿行？理解行为倾向、信任和风险感知对行人接受自动驾驶卡车编队间隙的影响

Yun Ye[1,2,3], Yuan Che[1,2], Haoyang Liang[4], Yingheng Zhang[1,2], Pengpeng Xu[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，帝国理工学院，伦敦，英国[4] 交通工程学院及道路与交通工程重点实验室，教育部，同济大学，上海，中国[5] 交通运输工程学院，中南大学，长沙，中国

† **通讯请联系**： pengpengxu@yeah.net

资助： 本研究获得以下项目资助：国家自然科学基金委员会（项目编号：72501150、52302433）、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）、广东省自然科学基金（项目编号：2024A1515011578），以及国家“111”海桥安全与智能运营中心（项目编号：D21013）。资助方未参与研究设计、数据收集与处理、论文撰写或发表决策。

等待还是穿越？理解行为倾向、信任和风险感知对行人自动驾驶卡车编队间隙接受的影响

摘要

尽管自动驾驶卡车有望提高货运效率、降低成本并缓解驾驶员短缺问题，但将两辆或更多卡车组成车队引发了人们对行人安全的广泛担忧。本研究开展了一项受控实验，考察行为倾向、信任和风险感知对行人在自动驾驶卡车编队前方过街意愿的影响。共有603名受试者参与了基于虚拟现实视频的问卷调查。结合结构方程模型和人工神经网络的优势，本研究构建了一个两阶段混合模型，以考察潜变量与间隙接受行为之间的复杂关系。结果表明，受试者在开始过街前平均观察了五个车辆间隙，接受的平均时间间隙约为5.35秒。风险感知不仅在影响行人过街决策方面发挥着最主要的作用，也作为关键的中介因素，传递行为倾向和信任对间隙接受的影响。经常违反交通规则的参与者更可能接受较小的时间间隙，而对其他道路使用者表现出积极行为的参与者则倾向于等待更大的时间间隙。经常犯错、表现出攻击性行为且对自动驾驶卡车安全性抱有较高信任的参与者，通常认为在自动驾驶卡车编队前方过马路的风险较低。基于这些发现，本研究提出了一系列有针对性的应对措施，以确保行人与自动驾驶卡车编队之间实现更安全、顺畅的交互。

关键词：自动驾驶卡车；虚拟现实；行人间隙接受；风险感知；行为倾向。

1. 引言

作为货运运输的支柱，卡车在全球供应链中发挥着不可或缺的作用。2023年，中国卡车运输占全国货运量的73.7%，较2022年增长8.7%（MTPRC，2024年）。尽管卡车运输至关重要，卡车司机短缺问题却日益严重。2022年，中国职业卡车司机短缺率高达31.60%，远高于乘用车驾驶员短缺率（CRTA，2023年）。令人欣慰的是，新兴的自动驾驶技术为缓解卡车司机短缺提供了潜在途径。

然而，自动驾驶车辆（AVs）的普及引发了公众的广泛担忧，尤其是对弱势道路使用者的安全担忧（Das，2021年；Tran 等，2021；Rezwana 和 Lownes，2024年；Li 等，2025a）。一些行人在与自动驾驶车辆互动时感到焦虑和不确定，因为这些车辆无法通过眼神接触、点头和手势等含蓄的非语言线索传达意向，导致行人在作出过街决策时犹豫不决且缺乏信心（Nuñez Velasco 等人，2019年）。另一些人则推测，自动驾驶车辆总会让行，因而采取攻击性行为，从而引发严重且出乎意料的冲突（Rodríguez Palmeiro，2018年）。

与乘用车不同，卡车的特性（例如体积大、重量重、机动性受限）会给行人带来独特的风险（He 等人，2024年）。深入的事故调查表明，行人被卡车撞击后的死亡率约为被乘用车撞击后的两倍（Roudsari 等人，2004年；Schubert 等人，2023年）。在这方面，利用网联自动驾驶技术将两辆或更多卡车组织成车队，有望通过提升道路安全、提高燃油效率、减少碳排放和缓解交通拥堵，彻底改变货运行业（Tsugawa 等人，2016年；Noruzoliaee 和 Zhou，2021年；Lourenço 等人，2024年；Li等人，2025b；Lin等人，2025）。与行人交互时，优先保障行人安全的保守编队行驶策略可能会牺牲效率，因为领头卡车停车时，所有跟随卡车都必须停车。频繁且突然的减速，尤其是对重载卡车而言，可能会增加安全隐患，并削弱卡车编队的优势。同时，为防止周边交通车辆插入而保持车队内较短的间隙，却可能促使行人在没有安全间隙的情况下仍然横穿道路。在卡车编队行驶部署初期，情况会变得更加复杂，因为在缺乏车辆与行人通信的情况下，行车意向可能无法明确传达。尽管关于行人与人工驾驶车辆交互的研究（Holland 和 Hill，2007年；Lobjois 和

Cavallo，2007年；2009年；Lobjois 等人，2013年；Petzoldt 等人，2014年；Alver 和 Onelcin，2018年；Avinash 等人，2019年；Vasudevan 等，2020年；Salducco 等人，2022年；Osorio-García 等人，2023年）以及行人与自动驾驶车辆交互的研究（Deb等人，2018年；Rodríguez Palmeiro 等人，2018年；Dey 等，2019年；Nuñez Velasco 等人，2019年；Woodman 等人，2019年；Rad 等，2020年；Camara 等人，2021年；Kalatian 和 Farooq，2021年；Zhao 等，2022年；Feng et al., 2024）在过去二十年中已得到广泛研究，但关于自动驾驶卡车编队间隙接受的研究却少得令人意外（Li等人，2025b；Lin等人，2025）。深入了解行人与卡车编队交互时的行为，不仅有助于制定基于证据的措施，以提升行人安全、信任和接受度，也有助于为卡车编队设计具有社会意识的组织算法，最终促进现实环境中人类与自动化系统之间更安全、更协调的交互。

为弥补这一研究空白，本研究开展了一项受控实验，考察行为倾向、信任和风险感知对行人在自动化卡车编队前过街意愿的影响。将虚拟现实（VR）模拟与陈述偏好调查相结合，使我们能够以安全、可重复、可控且经济高效的方式，从样本量相对较大的群体中收集语义丰富、贴近现实的数据，涵盖客观和主观测量；此外，开发结构方程模型与人工神经网络相结合的混合模型（SEM-ANN），有助于厘清潜变量与间隙接受行为之间的复杂关系。具体而言，本研究的主要贡献概括如下：

◆ 据我们所知，本研究是首批利用虚拟现实模拟和自我报告问卷调查的实用优势，探究行人对自动驾驶卡车编队的间隙接受行为的研究之一。

◆ 通过采用成熟的行人行为问卷（PBQ；Deb等，2017a）量化日常生活中危险行为的发生频数，我们进一步刻画了行人在行为倾向和过街决策方面的异质性；此前关于行人–自动驾驶汽车交互的研究对此维度关注不足。

◆ 为融合结构方程模型和人工神经网络的优势，本文建立了一种混合两阶段模型，以揭示潜变量与行人过街意图之间的相互关系。这种做法为分析人员提供了一种颇具前景且灵活的工具，可用于对潜变量之间复杂的关系进行建模；这类关系在交通心理学和出行行为研究中十分常见。

本文其余部分安排如下：第2节介绍文献综述。第3节阐述研究方法，包括数据收集、变量测量和SEM-ANN方法。第4节展示建模结果，并在第5节进行讨论。第6节总结全文，并指出未来研究方向。

2. 文献综述

2.1 自动化卡车编队

自20世纪90年代中期问世以来，利用车辆自动化和通信技术将多辆卡车连接成车队，便引起了研究者的广泛关注。早期研究主要聚焦于卡车编队行驶的组织方式、安全控制、节能效果和技术接受度。数值模拟实验和现场试验表明，内部间距约为10米的卡车编队行驶可节省10%–15%的燃油消耗（Alam et al., 2010）。除了节能之外，通过集中式控制策略优化卡车编队的横向位置，还可将路面损伤累积和生命周期成本降低多达50%（Gungor and Al-Qadi, 2020）。尽管编队技术为货运行业带来了诸多显著益处，但其最终能否推广，取决于决策者、卡车司机以及必然会在道路上与卡车编队互动的公众的接受度。在综述了共35篇文章后，Lourenço 等人（2024）总结了不同利益相关者对卡车编队接受度的看法，并发现决策者更关注运营效率，而卡车司机和周边车辆驾驶员则强调编队技术的安全性和信度。

随着道路测试的持续开展，研究人员开始探讨卡车编队对周边交通的屏障效应。Sultana和Hassan（2024年）通过对42名参与者开展受控驾驶模拟实验，探究人类驾驶员在与可识别的网联自动化卡车编队交互时，行为是否会有所不同。结果显示，在存在可识别卡车编队的情况下，汇入行为显著改善；碰撞时间提高了20%，速度标准差和加速度分别降低了约32%和29%。近期，Li等人（2025年b）对40名参与者开展了驾驶模拟实验，考察由三辆卡车组成的车队对驾驶员在高速公路出口附近变道及驶出匝道行为的影响。结果表明，较大的编队间距提高了汇入率和驾驶员超车信心，而较小的间距则导致延迟变道的比例更高。同样，Lin等人（2025年）招募了38名

参与者开展高保真驾驶模拟实验，研究车队速度（80 km/h和100 km/h）、规模（三辆卡车和五辆卡车）、内部间距（5 m和25 m）以及是否存在前导车辆对驾驶员超车行为的影响。研究发现，较高的车队速度增加了超车难度，并促使更多驾驶员采取冒险行为；较小的内部间距则显著提高了成功超车的可能性。

尽管上述研究深入揭示了人类驾驶员在高速公路上与自动驾驶卡车编队交互时如何调整变道、超车、汇入和驶离行为，但迄今尚无研究专门分析行人与卡车编队交互时的行为。全面了解影响行人接受自动驾驶卡车编队间隙的因素，不仅能提高安全性和效率，也有助于推动这项可预见技术的升级与普及。

2.2 行人间隙接受行为

过马路时，行人决定接受或拒绝两辆连续驶近车辆之间某个特定间隙，这一决策被称为间隙接受行为。其中一个值得关注的变量是临界间隙，定义为行人不会尝试过街的时间长度（Theofilatos 等，2021）。从客观角度看，特定间隙的安全程度主要取决于行人踏入车道并到达街道另一侧所需的时间（即过街时长），以及接近车辆到达所需的时间（即到达时间；Ahmed 等，2024）。安全裕度（亦称侵入后时间）可定义为行人完成过街的时间与下一辆迎面驶来的车辆到达冲突线的时间之差（Alver 和 Onelcin，2018）。量化可接受间隙和安全裕度的大小，同时揭示影响过街决策的内在机制，对于制定基于证据的措施以提升安全出行、消除步行障碍至关重要。过去二十年间，已有大量研究对行人在人工驾驶车辆前的间隙接受行为进行了剖析，相关研究汇总于表A1（见附录 A）。

基于问卷调查和受控实验，早期研究通过文本描述假设情境，并要求参与者指出其过街意向，以考察间隙接受（Holland 和 Hill，2007；Zhou等人，2009）。这种研究设计有助于纳入个人特征等不可观测的心理特征，例如

习惯、主观规范、态度和风险感知，但由于未能将感知与行动结合起来，其生态效度令人存疑（Lobjois 等人，2013）。Liu and Tung（2014）随后邀请32名参与者观看预先录制的真实世界视频，视频中一辆人工驾驶机动车正驶近一处无保护的双车道人行横道。老年行人通过按下键盘空格键表示过马路意向。研究发现，他们做出了与年轻行人相同的过街决策，却没有意识到步行能力下降使其安全余量降低。为进一步提高真实感，Soathong 等（2021）在四处没有任何过街设施的无保护路段中段，对400名参与者开展了现场问卷调查，并建立结构方程模型，以厘清冒险过街行为背后的动机。该研究指出，行人的'过街意愿主要由其习惯和态度驱动。

随着传感器和计算机视觉技术的快速发展，另一种常见做法是进行现场视频观察，即在不同地点（如路段中部人行横道（Cherry 等，2012；Liu 和 Tung，2014；Kadali 等，2015；Pawar 和 Patil，2015；2016年；Naser 等，2017；Zhang 等人，2018；Avinash 等人，2019；Zhang 等人，2019；Zhao 等，2019；Kadali 和 Vedagiri，2020；Alver 等，2021；Pawar 和 Yadav，2022；Angulo et al., 2023）、信号交叉口（Koh 和 Wong，2014；Onelcin 和 Alver，2015；Zafri，2023年）、无信号交叉口（Vasudevan 等，2020；Zafri 等人，2020；Zafri，2023年）、多车道路段（Zhuang 和 Wu，2011年；Shaaban 等人，2018年；Sheykhfard 和 Haghighi，2020；Zhang 等人，2024年）和人行天桥（Demiroz 等，2015年；Alver 和 Onelcin，2018年）等地，利用高清视频捕捉现实生活中的行人过街行为。研究发现，间隙接受取决于多种情境因素，包括行人年龄、性别、出行目的、行李携带情况、群体规模、等待时间、过街速度、穿越策略（单阶段、两阶段或滚动间隙）、车辆接近速度、到达时间、车辆尺寸、车辆类型、车道数量、是否存在行人设施、天气和照明条件。具体而言，老年行人倾向于接受更大的时间间隙（Koh 和 Wong，2014；Petzoldt，2014；Kadali 等，2015；Naser 等，2017），而在中央分隔带等待的行人（Zhao 等，2019）、采取滚动间隙穿越行为的行人（Kadali 等，2015；Naser 等，2017；Zhang 等人，2018；Zafri 等人，2020）、等待时间更长的行人（Kadali 等，2015；Lobjois 等人，2013）、行人群体规模更大的群体（Kadali 等，2015）、驶过车辆数量更多时（Lobjois 等人，2013）以及速度较慢、重量较轻的车辆接近时（Sheykhfard 和 Haghighi，2020；

Alver 等，2021），行人尝试过街的次数更多（Kadali 等，2015）以及存在实体隔离栏（Alver 等，2021）均与更小的可接受间隙相关。基于逻辑回归模型，研究发现，随着间隙大小变小（Cherry 等，2012；Naser 等，2017；Zhao 等，2019；Kadali 和 Vedagiri，2020；Sheykhfard 和 Haghighi，2020；Vasudevan 等，2020；Pawar 和 Yadav，2022）、等待时间缩短（Cherry 等，2012；Zhao 等，2019；Sheykhfard 和 Haghighi，2020；Vasudevan 等，2020）、人行横道变宽（Zhao 等，2019；Kadali 和 Vedagiri，2020；Vasudevan 等，2020）、车辆接近速度提高（Cherry 等，2012；Petzoldt，2014；Pawar 和 Patil，2015；Naser 等，2017；Kadali 和 Vedagiri，2020；Sheykhfard 和 Haghighi，2020；Pawar 和 Yadav，2022）以及大型车辆接近（Pawar 和 Patil，2015；Naser 等，2017；Kadali 和 Vedagiri，2020；Pawar 和 Yadav，2022）时，间隙接受的概率会降低。可以说，在现实中，行人过街决策并不完全由个体的人口统计特征和情境特征决定。尽管研究者已投入大量努力，将视频记录与现场问卷调查相结合，以涵盖动机因素（Arellana 等，2022），但这种实验范式仍局限于现有交通场景，无法探索行人与自动驾驶卡车编队等前所未有的技术之间的交互。

虚拟现实技术的最新进展使人们能够在交互性强、可控、可重复且无风险的环境中模拟多样化的交通场景（Schneider 和 Bengler，2020；Tran 等，2021；Li 等，2025a）。与在计算机屏幕或投影仪前单纯观看预录视频相比（Lobjois 和 Cavallo，2007；2009；Liu 和 Tung，2014；Petzoldt，2014；Madigan 等，2019；Dey 等，2019；Rad 等，2020；Leung 等，2021；Zhao 等，2022；Shen 等，2023；Feng et al., 2024），借助 3D 近眼显示器和姿态跟踪，虚拟现实能让参与者体验更具沉浸感、更逼真的交互。Woodman 等（2019）开展了一项基于头戴式显示器（HMD）的虚拟现实实验，研究由四辆自动驾驶车辆组成的车队在共享空间（没有道路标线和人行道）或带有人行道和路侧草带的单车道道路上，以恒定速度（即 1 km/h、4 k m/h、8 km/h 或 16 km/h）行驶、且车辆间保持固定时间间隙（即 2 秒、3 秒、4 秒或 5 秒）时的间隙接受情况。有趣的是，研究发现，尽管行人报告的感知安全较低，但在共享环境中，他们更可能接受较小的时间间隙。尽管该研究提供了有价值的信息，但由于样本量有限，仅有28名参与者，因此难以得出确切结论。 Tian 等（2022）提出了一种视觉逼近效应

模型，用于解释单车道无信号路段中段人行横道上的行人间隙接受行为。他们在洞穴式自动虚拟环境（CAVE）中分析了60名参与者面对由两辆自动驾驶车辆组成的车队时的过街行为；车辆以恒定接近速度（即 25 mph、30 mph 或 35 mph）行驶，并保持预设的时间间隙（即 2 秒、3 秒、4 秒或 5 秒）。研究报告称，当车辆以更高速度驶近时，行人倾向于接受更小的间隙，而视觉逼近效应在很大程度上可以解释这种由速度引发的不安全穿越行为。尽管洞穴式自动虚拟环境已被证明具有高度沉浸感、直观易用且方便用户使用的特点（Dommes等人，2014；Sobhani 和 Farooq，2018；Tapiro 等人，2018；O'Neal 等，2019；Tapiro 等，2020；Ye 等，2020；Dommes等人，2021；Jiang等人，2021；Soares等人，2021；Lee，2022；Tian 等（2022）；2023；Kalantari 等，2023；Ye 等，2024），但大型屏幕和背投投影仪确实成本高昂且占用空间（Li 等，2025a）。近年来，头戴式显示器（HMD）凭借便携、经济实惠等优点日益普及（Deb等人，2018；Sobhani 和 Farooq，2018；Morrongiello，2019；Nuñez Velasco 等人，2019；Woodman 等，2019；Deb等人，2020；Bindschädel，2021；Camara，2021；Kalatian 和 Farooq，2021；Nuñez Velasco 等人，2021；Kwon等人，2022；Wang 等人，2022；Angulo 等人，2023；Figueroa-Medina 等人，2023；Song，2023；Bennett 等人，2025；Feng 等，2025）。 Figueroa-Medina 等人（2023）开展了一项基于头戴式显示器的虚拟现实实验，招募48名受试者，模拟行人在无保护路段中段人行横道上的过街行为。研究有意收集了多种行为数据，例如过街前观察的间隙数量、接受的过街间隙、过街等待时间、步行速度和成功过街率；然而，由于缺少细粒度的心理指标，我们仍难以理解行为倾向、风险感知和决策背后的内在机制。

总之，既有研究揭示了行人与人工驾驶或自动驾驶车辆互动时的行为特点。然而，这些发现未必能直接推广至行人对自动驾驶卡车编队的间隙接受。一方面，面对卡车时，行人可能会因为卡车体型异常庞大、机动性较低，而调整行为，例如等待更长时间、接受更大的时间间隙，或更快地过街。另一方面，将多辆卡车编成车队所产生的屏障效应，加上相对较低的行驶速度，可能会促使行人采取冒险行为。然而，这一决策过程背后的动机仍鲜为人知。为弥补这一研究空白，本研究结合自我报告问卷

调查与基于头戴式显示器的虚拟现实模拟器，重点探讨行人的行为倾向、信任和风险感知如何影响其面对自动驾驶卡车编队时的过街意向。

2.3 过街决策中的行为倾向、信任与风险感知

尽管现场观察和虚拟现实模拟实验能够捕捉多样而细微的行为线索，但在动态、不受约束的情境下，似乎难以涵盖所有类型的行人行为。为以经济、安全且可重复的方式测量个体实施风险行为的倾向，Granié 等人（2013年）提出了行人行为量表，其中包含47个调查条目，并划分为四个因子结构，即违规行为、疏忽、攻击性行为和积极行为。通过将部分条目调整为适用于当地情境，Qu 等人（2016年）开发了行人行为量表中文版。然而，疏忽行为分量表的内部一致性不足，加之对攻击性行为的测量不充分（Qu 等人，2016年；Xu 等人，2018年；Shen 等，2023），使其在中国人群中的效度受到质疑（Vandroux 等人，2022年）。不久之后，Deb等人（2017a）对原始行人行为量表进行了改进，并提出了行人行为问卷（PBQ），将行人行为划分为违规行为、错误、疏忽、攻击性行为和积极行为。随后，从五个分量表中各选取因子载荷最高的四个条目，编制成简版。这个包含20个条目的PBQ版本已在多个国家得到验证，包括美国（Deb等，2017a；2017b；2018年）、英国（McIlroy 等人，2019年；2020年）、中国（McIlroy 等人，2019年；2020年）、泰国（McIlroy 等人，2019年；2020年）、越南（McIlroy 等人，2019年；2020年；Dinh 等人，2020年）、孟加拉国（McIlroy 等人，2019年；2020年）和肯尼亚（McIlroy 等人，2019年；2020年）。具体而言，Deb等人利用一份包含7个条目的人口统计问卷、一份包含4个条目的个人创新性量表、PBQ简版以及一份包含16个条目的行人对自动驾驶车辆接受度问卷，Deb等人（2017b）在美国对482名参与者开展了在线调查，以评估他们与自动驾驶车辆一同过马路的行为意向。结果表明，遵守交通规则且对其他道路使用者表现出积极行为的行人认为，推广自动驾驶车辆将提升整体交通安全；而违规行为、疏忽和攻击性行为得分较高的行人，则更有信心从自动驾驶车辆前方穿行。随后，Deb等人通过在美国斯塔克维尔开展的一项基于头戴式显示器的虚拟现实实验，对30名参与者进行了客观和主观测量，Deb等人（2018年）发现，经常犯错或对其他道路使用者表现出攻击性行为的行人，在踏上人行横道前等待的时间较短，穿越自动驾驶车辆前方所需的时间较长，而且对

即使自动驾驶车辆配备外部特征，行人对其评价也较低。相比之下，经常故意违反交通规则的行人会更加谨慎，并认可在自动驾驶车辆中加入外部界面。Rad等（2020年）然而，Rad等人得出了相反结论：报告有更多违规行为的行人更不愿意礼让自动驾驶车辆。

除了行为倾向外，对自动驾驶车辆的信任也在影响行人过街决策方面发挥着不可忽视的作用。 Zhao et al. (2022)探讨了行人在危险情境下从自动驾驶车辆或人工驾驶车辆前方穿越的意愿。基于对澳大利亚493名受访者开展的在线问卷调查，该研究发现，与人工驾驶车辆相比，参与者对自动驾驶车辆的信任度更高、感知到的风险更低，对从其前方过马路的态度也更积极。 Rad等（2020）和 Feng et al. (2024)也报告了类似发现：对自动驾驶车辆信任度较高的行人表现出更强的穿越意愿。 Nuñez Velasco 等人（2019）在荷兰代尔夫特开展了一项虚拟现实实验，邀请55名参与者，研究行人从具有不同外观和外部界面的自动驾驶车辆前方过马路的意愿。令人意外的是，尽管将车辆识别为自动驾驶车辆的行人报告了更高的信任度，但当自动驾驶车辆驶近时，他们通常表现出较低的过马路意愿。随着自动化技术的快速发展以及自动驾驶车辆的逐步普及，行人对自动驾驶车辆的信任可能也会随之变化（Wu et al., 2023）。因此，有必要进一步辨明行人对自动驾驶车辆的信任程度差异最终是否会影响其间隙接受行为。

正如表A2 附录B所示，作为对潜在交通危险的主观判断，风险感知也会影响自动驾驶车辆存在时的行人行为。Kown 等人（2022年）分析了行人感知到的风险如何影响他们在住宅街区四岔无信号交叉口的过街行为。基于在韩国蔚山和首尔对200名年轻参与者开展的虚拟现实实验，该研究指出，感知风险较高的行人开始行走所需的时间更长，而且往往匆忙过街。通过在中国对589名参与者开展的基于虚拟视频的在线问卷调查，Feng 等人（2024年）也得出了类似结论：在自动驾驶车辆前方过马路时，感知风险较高的人更加保守。

总而言之，既往研究通常分别探讨行为倾向、信任和风险感知对行人过街决策的影响，而未考虑三者之间的相互作用。理解这种相互依存的关系，不仅有助于解释行人的行为，

也能反映他们在与自动驾驶车辆互动时如何感知、决策和适应。

2.4 结构方程模型-人工神经网络模型

许多重要属性，如信任和风险感知，无法直接观测。结构方程模型（SEM）是一种强大的数据分析技术，因其能够灵活地表示潜在构念，并同时估计观测变量与非观测变量之间的关系，已广泛应用于社会科学、行为科学和健康科学领域（Zhou 等，2009；Soathong 等（2021）；Ye 等，2021；Kwon 等人（2022））。Soathong 等（2021）构建了结构方程模型，用于描述动机因素（即态度、社会规范、感知行为控制和习惯）与行人在路段中部过街意图之间的因果关系。同样，Kwon 等人（2022）采用分层结构方程模型研究环境–感知–行为交互，并发现感知风险在环境因素对行人过街行为的影响中发挥中介作用。然而，结构方程模型只能对线性关系进行建模，这过度简化了行人过街决策本身的复杂性（Deng 等人，2018）。

为解决这一局限性，我们结合结构方程模型（SEM）和人工神经网络（ANN）的优势，提出一种新颖的混合两阶段方法。结构方程模型擅长建立理论模型和测试因果效应假设，而人工神经网络则在捕捉非线性关系和揭示相互关联的模式方面表现更优。尽管近期研究已证明结构方程模型-人工神经网络（SEM-ANN）是一种可用于预测时尚购物行为（Ng 等人，2022年）、衡量电子竞技虚拟礼物中的消费者兴趣（Chen 和 Wu，2024年）、评估学生对教育机器人的准备度（Suhail 等人，2024年）以及预测加密货币采用（Arpaci 和 Bahari，2023年）的多功能工具，但交通心理学家和出行行为分析师尚未充分关注这一前景广阔的方法。通过将结构方程模型的假设检验能力与人工神经网络的非线性建模优势相结合，我们为解决动机与行为意向之间的相互联系提供了新途径。

3. 方法

3.1 研究框架

如图 1所示，本研究包括四个部分，即假设提出、实验设计、问卷调查和结构方程模型-人工神经网络分析。首先，构建一个假设模型，将技术理解、安全信任、行为倾向、风险感知和间隙接受行为等关键指标及其相互关系纳入其中。

这一设置为后续实验设计奠定了理论基础。

其次，利用虚拟现实技术制作第一人称视角视频，模拟涉及自动驾驶卡车编队的真实场景。这些受控场景让参与者能够作出过街决策，从而确保生态效度。

第三，设计与假设模型相契合的基于虚拟现实的问卷，作为主要的数据收集工具，系统地采集参与者对模拟场景的主观测量结果和客观行为反应。

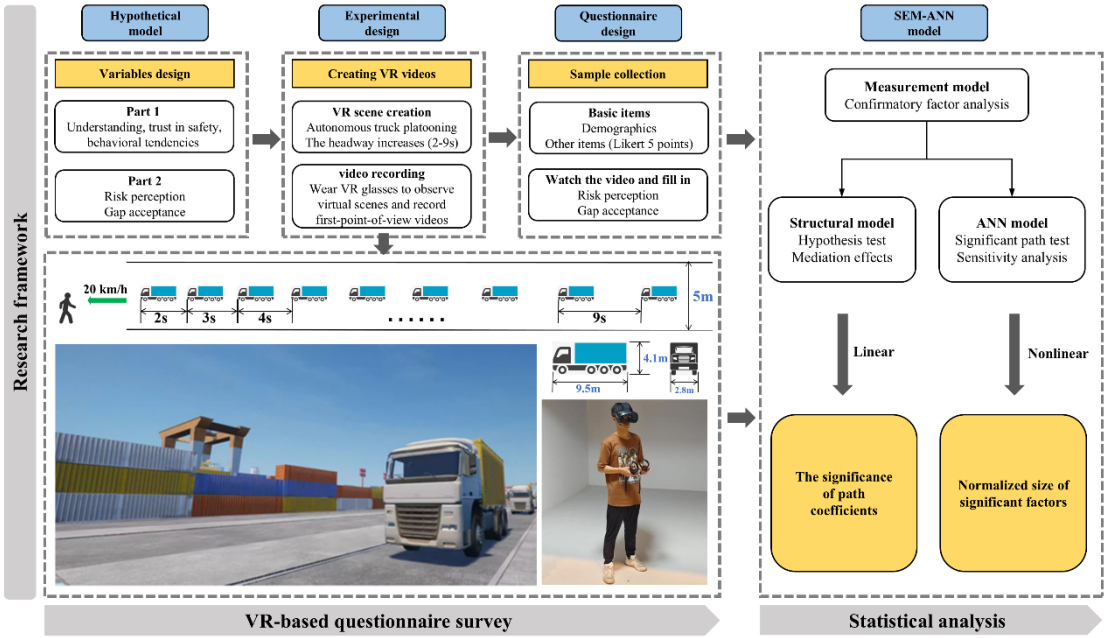


图 1. 研究框架概览。

最后，构建混合结构方程模型-人工神经网络模型。首先，结构方程模型检验变量之间的假设关系，有助于揭示因果路径并验证理论框架。随后，人工神经网络捕捉显著预测变量与结果之间的非线性交互作用，从而揭示细致的行为模式。

3.2 假设模型

如表 A3所示，附录 C 中列出了用于描述行人过街决策背后动机因素的三类潜变量。首先，采用经过充分验证的行人行为问卷（PBQ）简版（Deb等，2017a），量化行人在日常生活中的行为倾向。随后，将信任相关构念划分为五个维度：对传统卡车的理解、对自动驾驶技术的理解、对传统卡车安全性的信任、对自动驾驶技术安全性的信任，以及对自动驾驶卡车安全性的信任。最后，

我们参照Kwon 等人（2022）和Feng et al. (2024)评估了在自动驾驶卡车编队前方过街的风险感知。所有条目均采用五点李克特量表进行测量，评分范围为 1 分（非常不同意）至 5 分（非常同意）。

根据技术接受理论，对新兴技术的理解会影响个体的信任、态度和接受度（Lourenço 等人，2024年）。随着知识不断积累，人们会对系统安全、可预测地运行形成更强的预期，从而提升信任。基于这一逻辑，提出以下假设：

H1: 对传统卡车的理解会增强行人对卡车安全性的信任。

H2: 对自动驾驶技术的理解会增强行人对自动驾驶技术安全性的信任。

H3: 对传统卡车的理解会增强行人对自动驾驶卡车安全性的信任。

H4: 对自动驾驶技术的理解会增强行人对自动驾驶卡车安全性的信任。

信任转移理论认为，对某一实体的信任可以转移到另一个相关的目标实体（Lee 和 Hong，2019年）。如果行人对传统卡车安全性的信任度较高，这种信任可能会因车辆外观和功能表现的相似性而延伸至自动驾驶卡车。据此，我们提出：

H5： 对传统卡车安全性的信任会积极影响对自动驾驶卡车安全性的信任。

H6： 对自动驾驶技术安全性的信任会积极影响对自动驾驶卡车安全性的信任。

鉴于对自动驾驶车辆的信任程度较高、风险感知程度较低的行人，更愿意从自动驾驶车辆前方穿越（Zhao etal., 2022; Feng et al., 2024），我们提出以下假设：

H7： 对自动驾驶卡车安全性的信任程度越高，行人越能接受较短的时间间隙。

H8： 风险感知程度越高，行人越能接受较长的时间间隙。

同样，对自动驾驶卡车安全性的过度信任可能会降低行人过马路时自身的风险感知。因此，我们提出：

H9: 对自动驾驶卡车安全性的信任越高，风险感知程度越低。

此外，遵守交通规则并对其他道路使用者表现出积极行为的行人可能具有风险规避倾向：

H10： 对积极行为的行为倾向与较高水平的风险感知相关。

最后，基于以下发现：经常犯错或表现出攻击性行为的行人在踏入人行横道前等待的时间较短（Deb等人，2018年），而经常故意违反交通规则的人则较少让行于自动驾驶汽车（Rad 等，2020），我们提出以下假设：

H11： 违规行为、错误和攻击性行为等消极行为倾向与接受更小间隙相关。

图2展示了所提出的理论框架。

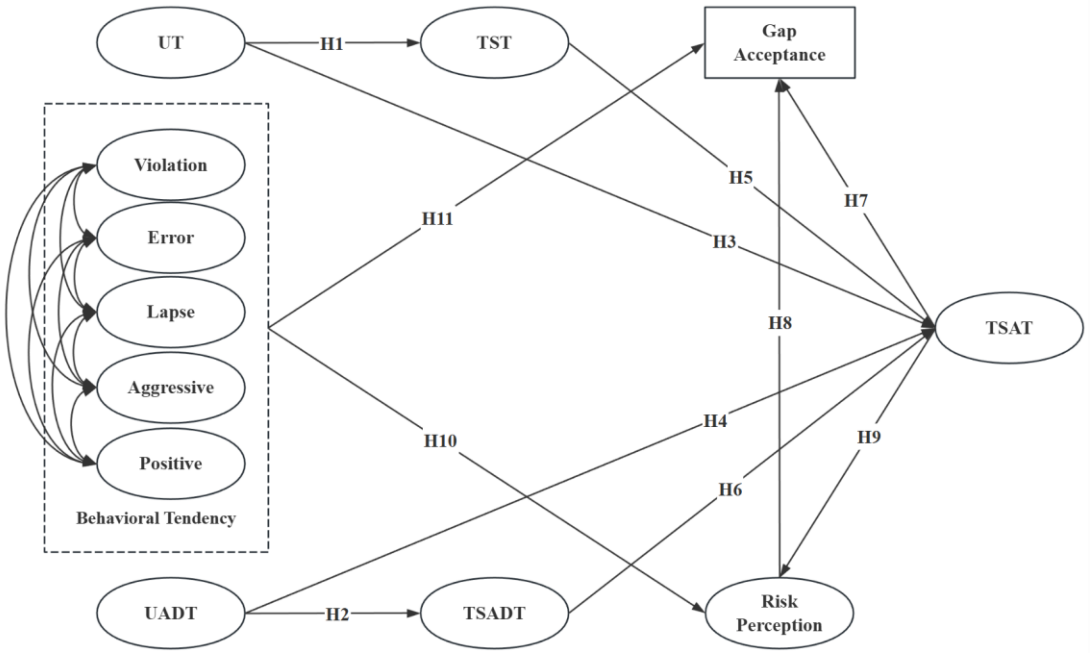


图2。 所提出的理论框架（UT：对卡车的理解；UADT：对自动驾驶技术的理解；TST：对卡车安全性的信任；TSADT：对自动驾驶技术安全性的信任；TSAT：对自动驾驶卡车安全性的信任）。

3.3 数据收集

本研究采用基于 VR 视频的问卷调查，收集行人对自动驾驶卡车编队的行为倾向、信任、风险感知和间隙接受方面的数据，这种方法具有内部效度高、可重复性强且成本效益好的优势。

实验场景设计：参与者以行人的视角体验虚拟交通情境。该场景由头戴式显示器生成。车队由九辆自动驾驶卡车组成，每辆卡车长9.5米、宽2.8米、高4.1米。卡车以20千米/小时的恒定速度从参与者右侧驶来，车头时距

逐步从2秒增加至9秒。参与者在一个晴朗的下午站在单车道道路的路缘处。随着道路测试的持续推进，这种交互情境具有代表性，未来不久，中国郊区的行人很可能会遇到卡车编队。与Rodríguez Palmeiro 等（2018）、de Clercq 等（2019）、Dey 等（2019）、Dommes 等（2021）、Lee 等（2022）和 Feng 等（2025）的做法一致，我们没有设置斑马线，因为在中国，当行人站在路缘处准备通过有标线的人行横道时，卡车必须停车让行。

实验流程：如图 3所示，我们采用了通过在线调查平台实施的基于 VR 视频、嵌入问卷的方法。首先，参与者签署知情同意书，并填写问卷，提供其背景信息、行为倾向、对卡车的理解、对卡车安全性的信任、对自动化技术的理解、对自动驾驶技术安全性的信任，以及对自动驾驶卡车安全性的信任。随后，向参与者播放一段由 VR 生成的第一人称视角视频，其中一列卡车车队正从 50 米外驶来。在第一辆卡车到达之前，参与者不得作出过街决策；他们需要在自己认为安全过街的最后时刻按下按钮（de Clercq 等人，2019年；Feng 等人，2025年）。之后，参与者填写问卷，以测量其道路过街感知风险。整个实验约需 15 分钟完成。

为确保数据完整性，我们实施了三项质量控制措施 d:

- **时间控制：**每个评估模块至少需要 80 秒。
- **设备限制：**具有相同 IP 地址的用户只能提交一次。
- **回答验证：**逻辑不一致的条目会自动排除（例如，未达到法定年龄者声称自己持有驾驶执照）。

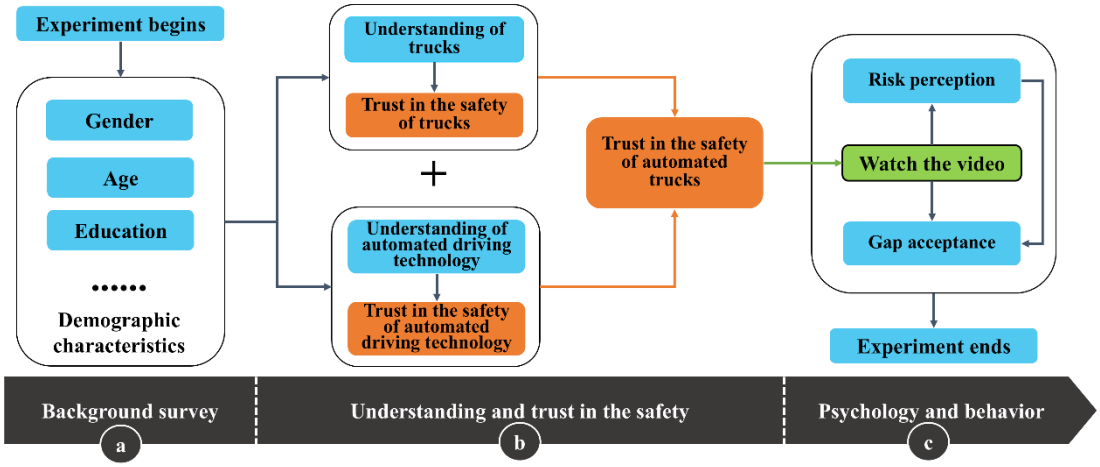


图 3。基于 VR 视频的问卷调查流程。

参与者招募：我们通过个人邀请、网站注册和校园海报，吸引了603人参与调查，其基本人口统计特征见表1。需要注意的是，鉴于老年参与者人数相对较少，且进一步细分年龄区间会降低模型估计的统计显著性，因此我们根据参与者是否未满35岁，将其分为两个子组。在中国，35岁也是就业实践和公共话语中区分年轻群体时，社会和制度普遍认可的年龄界限。

本研究已获得宁波大学人类研究伦理委员会的伦理批准。

表1. 参与者人口统计特征的描述性统计。

变量	频数	比例
性别		
女性	148	24.54%
Male	455	75.46%
Age		
< 35	477	79.10%
⩾35	126	20.90%
教育水平		
初中及以下	8	1.33%
高中	114	18.91%
大学生	400	66.34%
研究生及以上	81	13.43%
驾驶执照		
Yes	566	93.86%
No	37	6.14%
驾驶年限		
0	49	8.13%
< 1	115	19.07%
1–3	233	38.64%
3–5	108	17.91%
> 5	98	16.25%
交通运输领域专业经验		
Yes	241	39.97%
No	362	60.03%
碰撞经历		
Yes	330	54.73%
No	273	45.27%

注： 碰撞经历是指参与者此前是否曾作为行人、骑行者或其他弱势道路使用者卷入交通碰撞。

3.4 结构方程模型-人工神经网络模型设定

为揭示心理构念与观察到的间隙接受决策之间的相互依赖关系，本研究开发了一种结合结构方程模型和人工神经网络的两阶段混合方法。首先，构建结构方程模型，在满足线性假设的条件下检验因果关系和研究假设；随后，应用人工神经网络，捕捉结构方程模型识别出的显著预测变量与结果变量之间可能存在的非线性关联。

(1) 第一阶段：结构方程模型的构建

结构方程模型是一种强大的工具，它结合了因子分析和多元回归分析，用于探究多个变量之间的关系，包含两个主要部分：测量模型和结构模型。前者规定观测变量与其对应潜变量之间的关系，后者则建立潜在构念之间的关系。具体而言，测量模型可表示为：

$$x_i = \Lambda_x \eta_i + \delta_i \tag{1}$$

$$y_i = \Lambda_y \xi_i + \varepsilon_i \tag{2}$$

其中，和 分别表示 未观测的内生变量和外生变量。 和 分别为观测到的外生指标和内生指标向量。 和 用于描述观测指标与未观测构念之间的关联。此处，和 表示指标的误差项。 η_i ξ_i x_i y_i Λ_x Λ_y ε_i δ_i

与此同时，结构模型表示为：

$$\eta_j = A\eta_i + B\xi_i + v_i \tag{3}$$

其中，和 为待估计的结构参数矩阵。表示未观测误差向量。 A B v_i

为校准结构方程模型，首先进行验证性因子分析，以检验观测指标与潜在构念之间的关系。在确认测量模型的信度和效度后，采用最大似然估计量化潜在构念之间的关系。最后，采用自助法这一非参数统计模型，估计中介效应的显著性和大小。通过反复对原始数据集进行抽样，自助法能够计算中介效应的分布和置信区间，从而揭示信任在技术理解与风险感知之间关系中的中介作用，以及风险感知在行为倾向与间隙接受之间关系中的中介作用。

(2) 第2阶段：人工神经网络的构建

人工神经网络是一种模拟脑神经元行为的计算模型，能够映射输入数据与输出数据之间的复杂关系。具体而言，输入层接收原始数据，隐藏层负责提取特征，而输出层则生成预测结果。每一层都由多个通过权重连接的神经元组成。信号在网络中向前传播，并经由激活函数转换。偏置参数会被添加进来，以调整神经元的输出。与权重不同，偏置参数不与任何特定输入相关联，而是移动激活函数，使其更好地拟合数据。因此，偏置属于内部校准参数，在敏感性分析中不被视为预测变量。

图4展示了人工神经网络模型的流程，该模型旨在模拟结构方程模型中潜变量之间的关系。输入层包含从结构方程模型中估计出的显著外生变量和内生变量，这些变量通过加权连接传递至包含节点和偏置项的两个隐藏层。经过隐藏层处理后，结构方程模型中的内生变量在输出层得到预测。

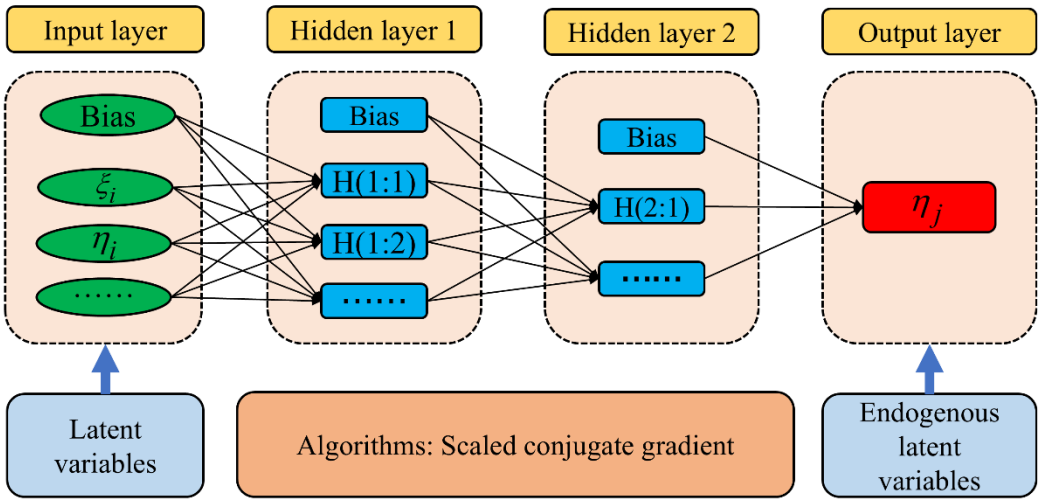


图4。 混合结构方程模型—人工神经网络方法中的人工神经网络部分。

作为人工神经网络的重要组成部分，激活函数决定神经元的输出是否应被激活。由于 Sigmoid函数能够平滑输出并为模型引入非线性，因此被选作隐藏层和输出层神经元的激活函数。为降低过拟合风险，研究进行了10折交叉验证测试，将原始观测值随机划分为10个大小相等且互不重叠的子集。每次留出一个子集用于效度验证，其余子集合并用于模型估计。研究采用尺度猜测梯度法微调变量权重，并以均方根误差（RMSE）作为评价指标。

4. 结果

4.1 描述性分析

如附录 D 中的表 A4所示，参与者平均会先观察约五个车辆间隙再决定是否穿行，并接受了 5.35 秒的间隙。仅有 0.82% 的参与者接受了 2 秒的间隙，而接受小于或等于 3 秒间隙的参与者占 10.11%。

采用单因素方差分析（方差分析）评估人口统计因素对所关注目标变量的影响。为保持简洁，未纳入在95%置信水平下不显著的关联。如表2和图5所示，年长参与者表示他们对传统卡车有更深入的理解，并且对自动驾驶卡车安全性抱有更高的信任。持有驾驶执照的参与者对传统卡车和自动驾驶技术的理解更深入，并且对自动驾驶技术和自动驾驶卡车的安全性抱有更高的信任。曾遭遇交通碰撞的参与者也表示他们对传统卡车有更深入的理解，并且对卡车安全性抱有更高的信任。

表2. 单行道方差分析结果（***： ；**： ；*：)0.00: 0.01段 0.05$p <$

自变量	因变量	自由度	F	η_p^2
Age	对卡车的理解	(1,601)	15.88***	0.02
驾驶执照		(1,601)	25.45***	0.04
碰撞经历		(1,601)	17.19***	0.03
教育水平		(3,599)	10.53***	0.05
驾驶经验		(4,598)	25.45***	0.08
交通从业者		(1,601)	34.40***	0.05
碰撞经历	对卡车安全性的信任	(1,601)	3.98*	0.01
交通从业者	卡车的	(1,601)	10.74**	0.02
驾驶执照	对自动驾驶的理解技术	(1,601)	24.88***	0.00
教育水平		(3,599)	3.74**	0.02
驾驶经验		(4,598)	24.88***	0.06
交通从业者		(1,601)	25.09***	0.04
驾驶执照	对自动驾驶技术安全性的信任的自动驾驶技术	(1,601)	7.32**	0.01
教育水平		(3,599)	8.21***	0.04
驾驶经验		(4,598)	7.32***	0.03
交通从业者		(1,601)	9.72**	0.02
Age	对自动驾驶卡车安全性的信任自动驾驶卡车的	(1,601)	4.07*	0.04
驾驶执照		(1,601)	6.49*	0.01
教育水平		(3,599)	5.00***	0.02
驾驶经验		(4,598)	6.49***	0.04
交通从业者		(1,601)	13.16***	0.02
交通从业者	风险感知	(1,601)	5.18*	0.01

此外，教育水平、驾驶经验和交通从业者身份与对卡车的理解、对自动驾驶技术的理解、对自动驾驶技术安全性的信任以及对自动驾驶卡车安全性的信任均显著相关。有趣的是，只有交通从业者认为在卡车编队前过马路的风险较高。这些发现表明，不同受试者的信任、风险感知和间隙接受存在显著差异。因此，结构方程模型中纳入了人口统计因素作为控制变量，以减轻混杂效应。

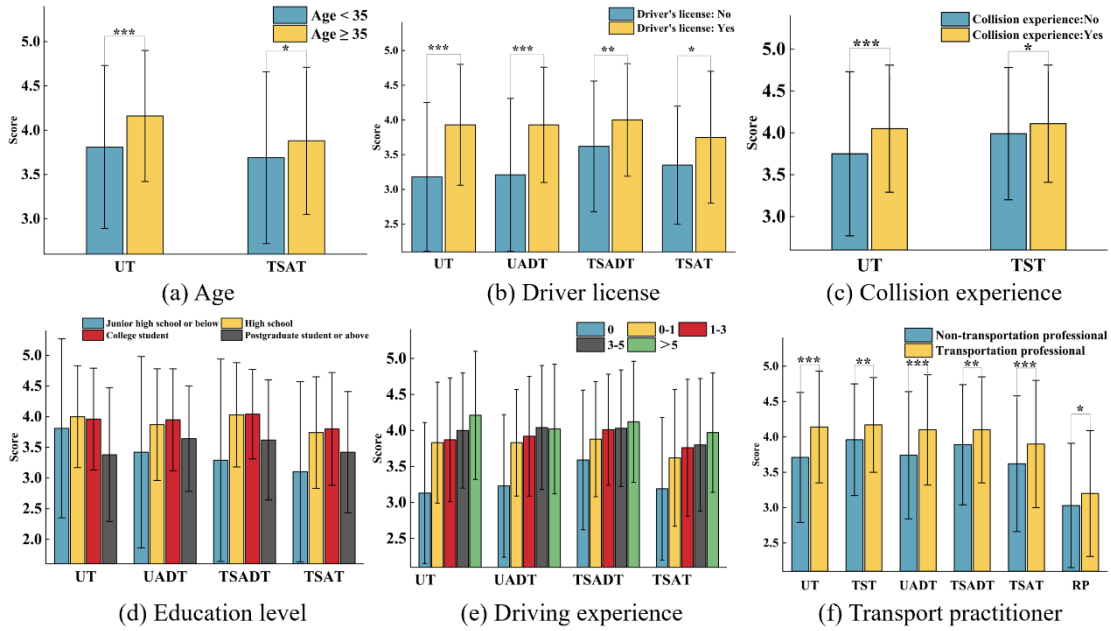


图5. 人口统计特征对目标变量的影响（***：；**：；*：；UT：对卡车的理解；TST：对卡车安全性的信任；UADT：对自动驾驶技术的理解；TSADT：对自动驾驶技术安全性的信任；TSAT：对自动驾驶卡车安全性的信任；RP：风险感知）。

4.2 测量模型

采用验证性因子分析评估测量模型的结构效度。结果见表3。

表3。 测量模型的拟合优度指标（RMSEA：近似误差均方根；GFI：拟合优度指数；CFI：比较拟合指数；TLI：Tucker–Lewis 指数；df：自由度）。

拟合类别	拟合指数	值	接受标准
绝对拟合	近似误差均方根	0.04	< 0.08 (Wheaton，1987)
	GFI	0.90	> 0.90 (Miles 和 Shevlin，2007年)
增值拟合	CFI	0.96	> 0.90 (Miles 和 Shevlin，2007年)
	TLI	0.96	> 0.90 (Miles 和 Shevlin，2007年)
简约拟合	χ^2/df	1.75	< 5.00（Marsh 和 Hocevar，1985）

如表3所示，所有拟合指标均达到或超过推荐阈值，表明测量模型整体拟合良好。包含标准化估计值的详细验证性因子分析模型见

附录 E。

除了拟合优度指标外，还计算了因子载荷、Cronbach's α、平均方差提取量和组合信度，以评估潜在构念的效度和信度。如表4所示，所有条目的结果均高度显著，p值小于 0.001。Cronbach'sα 值均大于 0.70，平均方差提取量均高于 0.50，证实了充分的信度和聚合效度（Awang，2012年）。此外，平均方差提取量的平方根也高于构念间的相关系数，如附录 F中的表 A5所示。综上，这些结果表明所构建的测量模型具有可靠性，为后续结构模型分析的效度提供了支持。

表4。 测量模型的因子载荷、克朗巴赫α系数、组合信度和平均方差提取量结果（UT：对卡车的理解；TST：对卡车安全性的信任；UADT：对自动驾驶技术的理解；TSADT：对自动驾驶技术安全性的信任；TSAT：对自动驾驶卡车安全性的信任；RP：风险感知）。

	估计值	克朗巴赫 阿尔法	平均方差 提取	组合 信度
对卡车的理解 → UT1	0.74	0.86	0.61	0.86
对卡车的理解 → UT2	0.76			
对卡车的理解 → UT3	0.80			
对卡车的理解 → 对卡车的理解4	0.82			
TST → TST1	0.76	0.80	0.59	0.81
TST → TST2	0.70			
TST → TST3	0.83			
UADT → UADT1	0.78	0.84	0.62	0.83
UADT → UADT2	0.79			
UADT → UADT3	0.78			
TSADT → TSADT1	0.81	0.82	0.60	0.82
TSADT → TSADT2	0.77			
TSADT → TSADT3	0.75			
违规 → Violation1	0.81	0.87	0.63	0.87
违规 → Violation2	0.77			
违规 → 违规3	0.82			
违规 → 违规4	0.791			
错误 → 错误1	0.76	0.84	0.57	0.84
错误 → 错误2	0.78			
错误 → 错误3	0.68			

错误 → 错误4	0.78			
失误 → 失误1	0.76	0.89	0.67	0.89
失误 → 失误2	0.85			
失误 → 失误3	0.80			
失误 → 失误4	0.86			
攻击性 → 攻击性1	0.85	0.91	0.71	0.91
攻击性 → 攻击性2	0.84			
攻击性 → 攻击性3	0.86			
攻击性 → 攻击性4	0.83			
积极 → 积极1	0.75	0.87	0.60	0.86
积极 → 积极2	0.78			
积极 → 积极3	0.79			
积极 → 积极4	0.78			
TSAT → TSAT1	0.83	0.91	0.63	0.91
TSAT → TSAT2	0.80			
TSAT → TSAT3	0.83			
TSAT → TSAT4	0.75			
TSAT → TSAT5	0.74			
TSAT → TSAT6	0.80			
风险感知 → RP1	0.71	0.81	0.52	0.81
风险感知 → RP2	0.78			
风险感知 → RP3	0.67			
风险感知 → RP4	0.71			

4.3 结构模型

基于验证性因子分析的结果，采用最大似然估计对结构模型进行了校准。如表5所示，只有绝对拟合的拟合优度指数略低于建议阈值。考虑到多变量模型似乎难以满足所有拟合标准（Schreiber 等，2010），我们的结构模型总体上是可以接受的。

表5。结构模型的拟合优度指标（RMSEA：近似均方根误差；GFI：拟合优度指数；CFI：比较拟合指数；TLI：Tucker–Lewis 指数；：自由度）。

df

拟合类别	拟合指数	数值	接受标准
绝对拟合	近似误差均方根	0.04	< 0.08（Wheaton，1987年）
	GFI	0.88	> 0.90（Miles 和 Shevlin，2007年）
增值拟合	CFI	0.94	> 0.90（Miles 和 Shevlin，2007年）
	TLI	0.93	> 0.90 (Miles 和 Shevlin，2007年)
简约拟合	$^{2}/\chi$ df	1.95	< 5.00 (Marsh 和 Hocevar, 1985)

表6汇总了假设检验的结果，图6展示了带有标准化估计值的简化路径图。请注意，此处仅纳入潜在构念之间显著的关系。

表6. 假设检验结果（***：；**：；*：） 0.00: 0.0 $0.05p <$.

假设	描述	估计值	结果
H1	对卡车的理解 → 对卡车安全性的信任	0.48***	True
H2	对自动驾驶的理解 → 对自动驾驶安全性的信任	0.71***	True
H3	对卡车的理解 → 对自动驾驶卡车安全性的信任	0.28***	True
H4	对自动驾驶的理解 → 对自动驾驶卡车安全性的信任	0.37***	True
H5	对卡车安全性的信任 → 对自动驾驶卡车安全性的信任	0.14***	True
H6	对自动驾驶安全性的信任 → 对自动驾驶卡车安全性的信任	0.38***	True
H7	对自动驾驶卡车安全性的信任 → 间隙接受	−0.02	否
H8	风险感知 → 间隙接受	0.49***	True
H9	对自动驾驶卡车安全性的信任 → 风险感知	−0.17*	True
H10	积极行为 → 风险感知	0.23**	True
H11	积极行为 → 间隙接受	0.30***	True
	违规行为 → 间隙接受	−0.16**	True

具体而言，对卡车的理解与对卡车安全性的信任呈积极关联（，），也与对自动驾驶卡车安全性的信任呈积极关联（，），分别支持假设H1和H3。同样，对自动驾驶技术的理解积极影响了对自动驾驶技术安全性的信任（，）以及对自动驾驶卡车安全性的信任（，），分别支持假设H2和H4。类似地，假设H5和H6也得到了支持：从对卡车安全性的信任以及对自动驾驶技术安全性的信任到对自动驾驶卡车安全性的信任的路径，在99%置信区间内均具有统计显著性，估计值分别为0.14和0.38。令人意外的是，对自动驾驶卡车安全性的信任对间隙接受没有直接影响（，），但与风险感知呈显著负相关（，）。因此，假设H7被拒绝，而H9成立。

$\beta = 0.14$ 0.001 $\beta = 0.28$ 0.001 $\beta = 0.37$ $\beta = 0.71$ 0.001 0.001

$\beta = -0.02$ $0.05p$

$\beta = -0.17$ $0.05p$

此外，风险感知与间隙接受之间存在正向关系（，），支持假设 H8：风险感知水平较高的行人倾向于接受较大的时间间隙。在行为倾向方面，积极行为与

$\beta = 0.49$ 0.001

具有更高水平的风险感知（，），并且更倾向于接受更大的时间间隙（，）；而错误和攻击性行为与风险感知呈负相关。值得注意的是，违规行为直接影响间隙接受（，），这支持了假设H11：经常违反交通规则的行人更有可能接受较小的时间间隙。

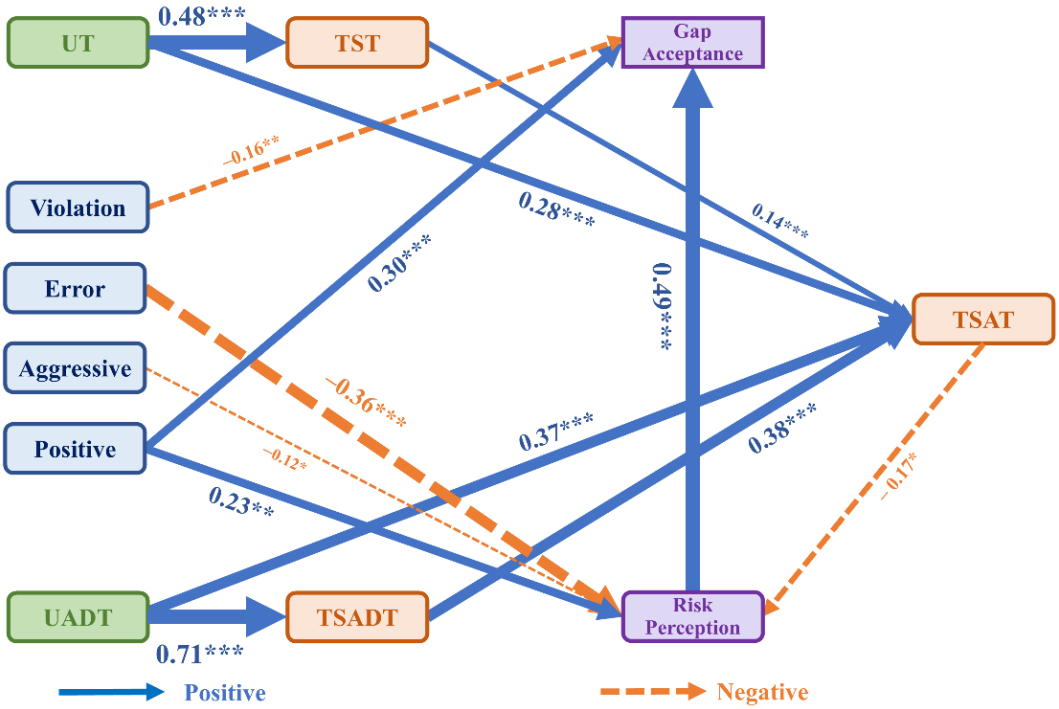


图6。结构方程模型示意图，显示显著路径的标准化估计值（***：<0.001；**：<0.01；*：p<0.05；UT：对卡车的理解；TST：对卡车安全性的信任；UADT：对自动驾驶技术的理解；TSADT：对自动驾驶技术安全性的信任；TSAT：对自动驾驶卡车安全性的信任）。

表7展示了人口统计特征对潜变量的影响。具体而言，对卡车的理解会随着年龄（，）、驾驶经验（，以及交通相关职业（，）而增强，但会随着教育水平（，）的提高而减弱。相比之下，受教育程度较高者对卡车安全的信任度更高（，），但年龄较大者（，）和女性（，）的信任度较低。此外，驾驶经验丰富的驾驶员（，）和交通从业人员（，）对自动驾驶技术的理解更深入，而持证驾驶员对自动驾驶卡车安全性的信任度较低（，）。

表7。 人口统计特征对潜变量的影响。

Path	估计值	*p*值
年龄 → 对卡车的理解	0.11	<0.01
年龄 → 对卡车安全性的信任	–0.09	<0.05
驾驶经验 → 对卡车的理解	0.18	<0.001
驾驶经验 → 对自动驾驶的理解	0.16	<0.01
驾驶执照 → 对自动驾驶卡车安全性的信任	–0.10	<0.01
教育水平 → 对卡车的理解	–0.15	<0.01
教育水平 → 对卡车安全性的信任	0.09	<0.05
性别 → 对卡车安全性的信任	–0.09	<0.05
交通从业者 → 对卡车的理解	0.23	<0.01
交通从业者 → 对自动驾驶的理解	0.22	<0.01

4.4 中介效应

通过自助法分析了中介效应，重点考察对自动驾驶卡车安全性的信任、风险感知和间隙接受之间的相互作用。如表8所示，除了直接影响之外，对卡车的理解还通过对卡车安全性的信任，间接影响对自动驾驶卡车安全性的信任。还观察到类似结果：对自动驾驶技术的理解对自动驾驶卡车安全性信任的影响，部分由对自动驾驶技术安全性的信任所中介。

表8. 中介效应（***：< 0.001；**$p < 0.01$；*：$<p0.05$；UT：对卡车的理解；TST：对卡车安全性的信任；UADT：对自动驾驶技术的理解；TSADT：对自动驾驶技术安全性的信任；TSAT：对自动驾驶卡车安全性的信任；RP：风险感知）。

关系	直接效应	间接效应	中介效应
对卡车的理解 → TST → TSAT	0.28***	0.07**	部分
UADT → TSADT → TSAT	0.37**	0.27***	部分
TST → TSAT → 风险感知	–0.07	–0.02*	完全
TSADT → TSAT → 风险感知	–0.03	–0.06*	完全
TSAT → 风险感知 → 间隙接受	–0.03	–0.08*	完全
积极 → 风险感知 → 间隙接受	0.30***	0.12**	部分
攻击性 → 风险感知 → 间隙接受	0.06	–0.06*	完全
错误 → 风险感知 → 间隙接受	0.02	–0.17**	Full

值得注意的是，对卡车安全性的信任和对自动驾驶技术安全性的信任对风险感知的影响，完全由对自动驾驶卡车安全性的信任所中介。这些结果表明，对自动驾驶卡车安全性的信任在塑造风险感知方面发挥着至关重要的中介作用。同样重要的是，风险感知是……之间的纽带

行人行为倾向与过街决策，因为对自动驾驶卡车安全性的信任、攻击性行为和错误对间隙接受的影响，完全由风险感知所中介。风险感知也部分中介了积极行为与间隙接受之间的关系。

4.5 人工神经网络分析

鉴于结构方程模型只能检验线性关系，因此采用人工神经网络来解析非线性关系。基于结构方程模型识别出的显著变量，分别针对对自动驾驶卡车安全性的信任、风险感知和间隙接受建立了模型。为评估预测准确性，计算了人工神经网络在训练和测试阶段的均方根误差。如表9所示，均方根误差介于0.008至0.022之间，表明人工神经网络与原始数据拟合良好，并能有效泛化至新的、未见过的数据。相对较低的标准化偏差进一步体现了模型性能的一致性和稳定性。

表9。 人工神经网络模型A、B和C的均方根误差，其中输出变量分别为对自动驾驶卡车安全性的信任、风险感知和间隙接受（标准差：标准差。均方根误差：均方根误差）。

	模型A		**模型B**		**模型C**	
交叉-效度验证	训练 RMSE	测试 RMSE	训练 RMSE	测试 RMSE	训练 RMSE	测试 RMSE
第1轮	0.013	0.009	0.018	0.017	0.011	0.012
第2轮	0.012	0.010	0.018	0.014	0.013	0.009
第3轮	0.011	0.012	0.018	0.016	0.013	0.011
第4轮	0.011	0.011	0.017	0.016	0.012	0.009
第5轮	0.011	0.011	0.017	0.018	0.012	0.011
第6轮	0.011	0.013	0.017	0.012	0.011	0.009
第7轮	0.012	0.008	0.017	0.014	0.012	0.011
第8轮	0.011	0.011	0.017	0.018	0.012	0.015
第9轮	0.011	0.012	0.018	0.016	0.011	0.010
第10轮	0.012	0.012	0.017	0.022	0.012	0.014
Mean	0.011	0.011	0.017	0.016	0.012	0.011
SD	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.002

为量化各特征对输出变量的贡献，我们通过随机打乱单个特征的取值，并观察模型性能随之下降的情况，计算了置换特征重要性（Pedregosa等人，2011年）。随后，我们对十折交叉验证中的重要性得分取平均，并将其数值与影响最大的输入变量的数值进行归一化比较，以计算相对重要性。

如表10所示，对自动驾驶技术的理解对自动驾驶卡车安全性的信任影响最大（100%），

其次是对自动驾驶技术安全性的信任（71.39%）、对卡车的理解（65.44%）、对卡车安全性的信任（37.39%）和驾驶证状态（8.78%）。

表10。输入变量对自动驾驶卡车安全性信任的影响（UT：对卡车的理解；TST：对卡车安全性的信任；UADT：对自动驾驶技术的理解；TSADT：对自动驾驶技术安全性的信任；NRI：归一化相对重要性）。

交叉验证	UT	TST	UADT	TSADT	驾驶执照
第1轮	0.27	0.12	0.30	0.30	0.01
第2轮	0.20	0.19	0.30	0.27	0.04
第3轮	0.19	0.14	0.42	0.23	0.02
第4轮	0.22	0.16	0.36	0.22	0.04
第5轮	0.24	0.08	0.36	0.25	0.07
第6轮	0.22	0.14	0.35	0.26	0.02
第7轮	0.23	0.12	0.38	0.24	0.03
第8轮	0.22	0.11	0.36	0.28	0.03
第9轮	0.25	0.09	0.37	0.26	0.04
第10轮	0.26	0.17	0.35	0.21	0.02
Mean	0.23	0.13	0.35	0.25	0.03
NRI	65.44%	37.39%	100.00%	71.39%	8.78%

如 表11所示，倾向于错误行为对风险感知的影响最大（100%），其次是积极行为（64.45%）、对自动驾驶卡车安全性的信任（58.96%）和攻击性行为（51.73%）。

表11. 输入变量对风险感知的重要性（TSAT：对自动驾驶卡车安全性的信任；NRI：归一化相对重要性）。

交叉验证	错误	攻击性	积极	TSAT
第1轮	0.31	0.17	0.27	0.19
第2轮	0.37	0.17	0.21	0.20
第3轮	0.30	0.19	0.28	0.19
第4轮	0.33	0.19	0.23	0.22
第5轮	0.35	0.18	0.20	0.22
第6轮	0.36	0.17	0.17	0.24
第7轮	0.38	0.16	0.15	0.21
第8轮	0.36	0.16	0.25	0.21
第9轮	0.35	0.22	0.26	0.15
第10轮	0.36	0.18	0.21	0.20
Mean	0.35	0.18	0.22	0.20
NRI	100.00%	51.73%	64.45%	58.96%

如表12 所示，风险感知对间隙接受的影响最大（100%），其次是违规倾向（43.50%）和积极行为（50.87%）。

表12。 输入变量对间隙接受的重要性（NRI：归一化相对重要性）。

交叉验证	违规行为	积极	风险感知
第1轮	0.19	0.25	0.57
第2轮	0.28	0.26	0.45
第3轮	0.32	0.27	0.42
第4轮	0.19	0.26	0.55
第5轮	0.20	0.33	0.47
第6轮	0.24	0.24	0.52
第7轮	0.20	0.29	0.51
第8轮	0.18	0.25	0.58
第9轮	0.18	0.21	0.62
第10轮	0.26	0.27	0.46
Mean	0.22	0.26	0.52
NRI	43.50%	50.87%	100.00%

我们最终比较了结构方程模型得出的路径系数与人工神经网络获得的归一化相对重要性得分。如表13所示，结构方程模型与人工神经网络的估计结果总体一致。只有对自动驾驶技术的理解和对自动驾驶技术安全性的信任在对自动驾驶卡车安全性的信任方面的重要性排名略有不同。

表13.结构方程模型与人工神经网络结果对比（TSAT：对自动驾驶卡车安全性的信任；UT：对卡车的理解；TST：对卡车安全性的信任；UADT：对自动驾驶技术的理解；TSADT：对自动驾驶技术安全性的信任）。

输入变量	结构方程模型路径	人工神经网络归一化	SEM	ANN	匹配
	系数	相对重要性	排名	排名	
输出变量：TSAT					
UT	0.28	65.44%	3	3	Yes
TST	0.14	37.39%	4	4	Yes
UADT	0.37	100.00%	2	1	No
TSADT	0.38	71.39%	1	2	No
驾驶执照	–0.10	8.78%	5	5	Yes
输出变量：风险感知					
错误	–0.36	100.00%	1	1	Yes
攻击性行为	–0.12	51.73%	4	4	Yes
积极行为	0.23	64.45%	2	2	Yes

TSAT	–0.17	58.96%	3	3	Yes
输出变量：间隙接受					
风险感知	0.49	100.00%	1	1	Yes
积极行为	0.30	50.87%	2	2	Yes
违规行为	–0.16	43.50%	3	3	Yes

5. 讨论

本节首先简要分析参与者接受的时间间隙，随后揭示动机因素如何影响行人在自动化卡车编队前的过街决策，尤其关注行为倾向、信任、风险感知与间隙接受之间的相互作用。我们还重点介绍结构方程模型-人工神经网络得出的新见解。最后，我们提出一系列循证对策，以确保行人与自动驾驶卡车编队之间的交互更加安全、顺畅。

5.1 可接受时间间隙

在我们的实验中，参与者需要分析卡车编队的接近速度以及卡车之间的可用间隙，然后决定是否穿越单车道街道。结果表明，参与者在决定过街前平均会观察卡车之间的五个间隙，且可接受的平均时间间隙约为5.35秒（标准差为1.43），显著大于Figueroa-Medina 等人（2023年）报告的4.00秒（标准差为1.03）。该研究通过虚拟现实实验，招募48名受试者，考察行人在自动驾驶车辆编队前穿越单车道标线式路段中部人行横道时的行为线索。这一发现基本在意料之中，因为卡车的独特特征，例如体积大、重量重且机动性有限，可能会给行人带来更大的视觉压力。既往研究也发现，当大型车辆驶近时，行人往往会接受更大的时间间隙（Sheykhfard 和 Haghighi，2020年；Alver 等，2021年）。

5.2 行为倾向和风险感知的影响

以往研究一致证明，行为倾向会显著影响可观察到的行为和心理反应（Vandroux 等人，2022年）。忽视这种异质性可能导致模型过度简化，无法捕捉现实世界行为的复杂性。借助经过充分验证的行人行为问卷（Deb等，2017a），我们成功刻画了行人在日常生活中表现各种行为的倾向，并证明行为倾向、风险感知与自动驾驶卡车编队的间隙接受之间存在复杂的相互作用。与Rad等（2020）的研究一致，报告有更多违规行为的行人

往往会在驶近的自动驾驶汽车完全停下前过街；我们的研究也发现，故意违反交通规则的受试者更有可能接受较小的时间间隙。相比之下，遵守交通规则且对其他道路使用者表现出积极行为的人，更倾向于等待并接受大约大30%的时间间隙。这一结果在很大程度上符合预期，因为积极的行为倾向通常与较高的安全意识和更强的交通规范遵从性相关，而两者共同促使人们采取谨慎的决策。基于在美国斯塔克维尔开展的一项有30名参与者参加的虚拟现实实验，Deb等人（2018年）报告了相似的发现：具有积极行为倾向的行人，在开始过街前会花更多时间观察并了解自动驾驶车辆的外部特征。

风险感知是个体对风险特征及其后果所作的主观判断。本研究表明，风险感知在行人应对潜在危险时起着最主要的作用。通过将行为倾向、风险感知和信任同时纳入间隙接受模型，我们发现，除了直接关联外，风险感知还发挥着重要的纽带作用，完全中介了攻击性行为、错误以及对自动驾驶卡车安全性的信任对间隙接受的影响。 Kwon 等人（2022）基于在韩国对200名年轻参与者开展的虚拟现实实验，也指出风险感知完全中介了环境属性与行人过街行为之间的关系。事实上，个体可能会根据感知风险的变化调整自己的行为。因此，感知风险较高的受试者往往会接受较大的时间间隙，这并不令人意外。Kwon 等人（2022）和Feng et al. (2024)也报告了类似结果。另一个值得一提的发现是，错误倾向和攻击性行为与风险感知呈负相关。也就是说，经常犯错并对其他道路使用者表现出攻击性行为的行人，在自动驾驶卡车编队前过马路时报告的风险感知较低。错误通常源于对交通规则缺乏了解或存在误解，而攻击性则是一种人格特征。因此，缺乏交通系统相关知识的人，以及总是认为自己拥有路权的人，很可能会低估与自动驾驶卡车交互的风险。

5.3 信任相关构念的影响

除了行为倾向和风险感知之外，对自动驾驶车辆的信任，即个体相信自动驾驶车辆能够高效地完成其预定任务的信念（Deb等人，2017b），也可能影响行人与自动驾驶车辆互动时的过街决策

。为深入探讨信任在自动驾驶卡车编队间隙接受中的作用，我们将信任界定为对传统卡车和自动驾驶技术的理解、对传统卡车和自动驾驶技术安全性的信任，以及对自动驾驶卡车安全性的信任。尽管 Rad等（2020）、Zhao et al. (2022)和Feng et al.(2024)发现，对自动驾驶车辆的信任度越高，行人在自动驾驶车辆前方的穿越意愿越强，但我们的结果表明，信任相关构念与间隙接受之间没有直接关联。相反，对自动驾驶卡车安全性的信任对间隙接受的影响，完全由风险感知所中介。也就是说，对自动驾驶卡车安全性的信任度较高的行人，由于感知到的风险较低，往往会接受更小的时间间隙。Siegrist（2021）也探讨了信任对各种技术和危险（例如基因技术和核能）接受度的这类间接影响。

此外，在评估自动驾驶卡车的安全性时，行人可能会借鉴他们对传统卡车和自动化技术的先验知识。因此，对传统卡车和自动化技术的理解与对自动驾驶卡车安全性的信任呈正相关，也就不足为奇了。同样，鉴于对某一实体的信任可以转移到相关目标实体上（Lee 和 Hong，2019年），研究发现，对传统卡车和自动化技术信任度较高的参与者，对自动驾驶卡车的信任度也较高。另一个有意思的发现是，对自动驾驶技术的理解对自动驾驶卡车安全性信任的影响最大。因此，促使公众更好地了解自动驾驶汽车'安全导航的能力，似乎是建立公众对自动驾驶卡车信任最有效、最直接的方式。

5.4 人口统计因素的影响

纳入参与者的人口统计特征旨在考察个体异质性，我们发现年龄、性别、教育水平、驾驶经验、驾驶证状态以及交通运输相关职业对理解和信任构念具有显著影响。具体而言，较年轻的参与者和女性参与者报告称，他们更加信任传统卡车的安全性，而年龄较大的参与者则更加信任自动驾驶卡车的安全性。一种合理的解释是，接触卡车运营有限的个体可能会高估传统卡车的安全性，而经验更丰富的行人可能认识到自动化技术提升卡车安全表现的潜力，因而对自动驾驶卡车安全性表现出更高的信任（Navarro et al., 2025年）。同样，广泛的

驾驶经验和交通运输领域的专业经验与对传统卡车和自动驾驶技术更好的理解相关，而持有有效驾驶执照的参与者对自动驾驶卡车安全性的信任度较低，这一发现与Holland and Hill (2007年)一致，即持证驾驶员比非驾驶员对在自动驾驶汽车前过街的风险更加敏感。

不同于以往报告人口统计特征与过街决策之间存在直接关系的研究（Holland 和 Hill，2007年；Salducco 等人，2022年；Feng 等人，2024年），本研究发现，人口统计因素对风险感知以及对自动驾驶卡车编队的间隙接受行为的影响并不显著，而是完全由对自动驾驶卡车安全性的信任所中介。基于对六个双车道信号控制交叉口处444名乱穿马路行人的现场观察，Onelcin 和 Alver (2015)指出，行人年龄和性别与间隙接受行为之间不存在显著关联。Zhao 等人（2022年）还发现，一旦纳入态度和信任等动机因素，年龄和性别对行人在自动驾驶车辆前过街意图的影响便微乎其微。

5.5 结构方程模型-人工神经网络带来的新见解

尽管结构方程模型能够提供因果关系和中介关系的明确统计证据，但它忽略了变量之间可能存在的非线性关系。相比之下，人工神经网络在捕捉相互依赖关系方面表现出色，但其黑箱特性限制了它在假设检验中的应用。本研究提出了结构方程模型-人工神经网络这一混合两阶段模型，综合运用了结构方程模型和人工神经网络各自的优势。尽管对比结构方程模型得出的路径系数与人工神经网络得出的相对重要性得分后发现，两者的估计结果总体上基本一致，但结构方程模型确实低估了对自动驾驶技术安全性的信任对对自动驾驶卡车安全性的信任的影响，这可能是由于结构方程模型无法处理非线性关系。为此，结构方程模型-人工神经网络为交通心理学家和人因工程学家提供了一种有前景的工具，可用于建模潜变量之间的复杂关系。

5.6 启示

基于上述研究发现，依据“3E”（工程、教育和执法）原则，提出量身定制的措施。

- **工程：**鉴于风险感知在过街决策中起主导作用，政策制定者应优先完善行人与自动驾驶卡车之间的沟通机制。例如，

将灯光提示或声音警告等非语言信号纳入车辆通信系统，有助于弥补缺乏眼神接触的问题，并增强人们对自动化技术的信任（Lee 和 Hess，2020年；Rezwana 和 Lownes，2024年）。通过明确传达车辆'的意图（例如是否让行），此类外部人机界面有望减少不确定性、增强信心，并降低行人与自动驾驶卡车编队互动时的风险感知（Rouchitsas 和 Alm，2019年；Fabricius 等人，2022年）。此外，鉴于频繁减速会削弱卡车编队的优势，且研究发现 99.18% 的参与者拒绝接受等于或小于 2 秒的时间间隙，因此建议在主干道上保持较短的卡车间距，以防行人穿插其中。为减少人口稠密地区行人与自动驾驶卡车之间可能发生的冲突，另一项有效的应对措施是通过设置人行天桥和地下通道等专用过街设施，将这些弱势道路使用者与卡车编队分隔开来。

◆ **教育：** 从教育角度来看，我们的研究表明，提高人们对自动驾驶卡车的了解至关重要。交通管理部门、车辆制造商和当地社区应协同合作，回应公众担忧并制定最佳实践。地方当局可以通过宣传、课程和虚拟现实培训等系统性的教育举措，阐明重型卡车的运行原理、安全特性以及自动驾驶技术，从而消除误解、缓解恐惧，并提升人们对自动驾驶卡车编队的信任（Lourenç o 等人，2024年；Feng 等人，2024年）。此外，还应推广具体的教育项目，以提高那些经常犯错、对其他道路使用者表现出攻击性行为的行人的安全意识，因为研究发现，这些人更容易低估风险并鲁莽过街。

◆ **执法：**我们的研究结果也对交通法规与执法具有深远意义。随着自动驾驶汽车逐步普及，行人可能会调整其过街行为。政策制定者在将自动化卡车编队引入公共道路时，应兼顾行人安全与交通效率。应强制部署声音信号、视觉提示等智能提醒系统，提醒行人注意自动驾驶卡车正在接近及其行驶意向。鉴于违规行为倾向对冒险型间隙接受行为产生了显著且

直接的影响，应严格执行禁止在自动驾驶卡车前乱穿马路的规定。

6. 结论

本研究旨在探讨行为倾向、信任、风险感知与间隙接受之间的关系，以弥补我们对行人在自动驾驶卡车编队前过马路意愿背后动机认识的不足。研究采用基于 VR 视频的问卷调查，收集潜在心理测量指标和观察到的间隙接受行为。我们构建了结构方程模型-人工神经网络模型，以考察潜变量之间的线性与非线性关系。

我们首次揭示了行人在道路穿越任务中如何感知并应对自动驾驶卡车编队。结果表明，行人对自动驾驶卡车编队的间隙接受主要受风险感知和行为倾向影响。具体而言，风险感知较强且对其他道路使用者表现出积极行为的受试者，更可能接受较大的时间间隙；而经常违反交通规则者则倾向于接受较小的时间间隙。同样重要的是，风险感知在行为倾向、信任与间隙接受之间起到了连接作用。对其他道路使用者表现出积极行为的人通常报告较高的风险感知；而错误倾向、违规行为以及对自动驾驶卡车安全性的过度信任，则与较低的风险感知相关。此外，对传统卡车和自动驾驶技术理解更深入、信任程度更高的参与者，也对自动驾驶卡车的安全性表现出更多信任。

基于这些发现，本文从工程、教育和执法三个方面提出循证对策，以应对自动驾驶卡车编队带来的独特挑战，从而促进人与自动化系统之间更安全、更协作的交互。

然而，我们的研究也存在一些局限性。首先，卡车以恒定的 20 km/h 速度驶近，车头时距从 2 s 逐步增加至 9 s。尽管这种场景设计有助于提高内部效度，但可能会损害外部效度。未来研究应采用连续实时交互，让人类参与者和自动驾驶卡车都能感知并响应彼此的行为。其次，由于我们仅研究了晴天时行人对单车道、无标线路段中部的过街意图，因此研究结果可能无法直接推广到有标线的路段中部过街处、多车道道路、设有信号灯的

交叉口、雨天和夜间。Feng et al., 2024由于很难通过在线问卷联系到老年人（Angulo et al., 2023），我们的样本偏向年轻受试者。未来研究应采用分层抽样，以获得年龄群体更均衡的样本。最后，为了提高虚拟现实结果的生态效度，强烈建议根据真实世界图像重建更逼真的场景（Bennett et al., 2025），并基于真实生活数据集设计虚拟实验（

利益冲突声明

作者声明，他们不存在可能被认为会影响本文所报告工作的已知竞争性财务利益或个人关系。

参考文献

Ahmed, S., Hossain, S., Shaik, M.E., & Shakik, A. (2024). 亚洲国家行人的速度特征与间隙接受行为评估：综述。《交通研究跨学科视角》, 27, 101199. Alam, A.A., Gattami, A., & Johansson, K.H. (2010). 重型车辆编队行驶的燃油削减潜力实验研究。In论文集： 13th *IEEE* 国际智能交通系统会议, 306–311. Alver, Y., & Onelcin, P. (2018). 天桥地点行人的间隙接受。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》, 56, 436–443. Alver, Y., Onelcin, P., Cicekli, A., & Abdel-Aty, M. (2021). 利用图像处理评估街区中段过街行人的临界间隙和过街速度。《事故分析与预防》, 156, 106127. Angulo, A.V., Robartes, E., Guo, X., Chen, T.D., Heydarian, A., & Smith, B.L. (2023). 展示虚拟现实仿真作为理解和评估行人于路段中部过街时安全与感知的工具。《交通研究跨学科视角》, 20, 100844. Arellana, J., Fernández, S., Figueroa, M., & Cantillo, V. (2022). 结合风险感知和显示偏好数据分析行人在城市道路过街时的行为。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》, 85, 259–275. Arpaci, I., & Bahari, M. (2023). 从网络安全视角出发，结合结构方程模型与深度人工神经网络预测加密货币的采纳情况。《人类行为中的计算机》, 143, 107678.

Avinash, C., Jiten, S., Arkatkar, S., Gaurang, J., & Manoranjan, P. (2019). 印度街区中段人行横道的行人安全余量评估。安全科学, 119, 188–198. Awang, Z. (2012). 使用 AMOS 图形界面的结构方程模型。吉兰丹：玛拉工艺大学出版社。Bao, T., Lin, D., Zhang, X., Zhou, Z., & Wang, K. (2024). 基于识别特征分析、采用双目测距的卡车行人安全报警系统。自主智能系统, 4(1), 1–10. Bennett, J.M., McGuckian, T.B., Healy, N., Lam, N., Lucas, R., Palmer, K., Crowther, R.G., Greene, D.A., Wilson, P., & Duckworth, J. (2025). 虚拟现实行人街道过街任务的开发：对危险感知和间隙接受的考察。安全科学, 181, 106706. Bindschädel, J., Krems, I., & Kiesel, A. (2021). 行人与自动驾驶车辆之间的交互：探索用于虚拟现实实验的基于运动的方法。交通研究F辑：交通心理学与行为, 82, 316–332. Camara, F., Dickinson, P., & Fox, C. (2021). 在虚拟现实中评估行人与博弈论自动驾驶车辆的交互偏好。交通研究F辑：交通心理学与行为, 78, 410–423. Chen, J., & Wu, Y. (2024). 你愿意在电竞直播中购买虚拟礼物吗？主播特征与文化特征。人类行为中的计算机, 152, 108075. Cherry, C., Donlon, B., Yan, X., Moore, S.E., & Xiong, J. (2012). 中国非法路段中部行人过街：间隙接受、冲突与过街路径分析。国际伤害控制与安全促进杂志, 19(4), 320–330. 中国道路运输协会。(2023). 《2022—2023年道路运输驾驶员短缺调查报告》。来源：http://www.jxsdx.com/luyunyaowen/10816.html。[2025-02-20]Das, S. (2021). 自动驾驶车辆安全：理解行人和骑自行车者的感知。交通研究F辑：交通心理学与行为, 81, 41–54. de Clercq, K., Dietrich, A., Núñez Velasco, J.P., de Winter, J., & Happee, R. (2019). 自动驾驶车辆上的外部人机界面：对行人过街决策的影响。人为因素, 61(8), 1353–1370.

Deb, S., Strawderman, L., DuBien, J., Smith, B., Carruth, D. W., & Garrison, T. M. (2017a). 评估行人在行人横道上的行为：针对美国人口的行人行为问卷效度验证。《事故分析与预防》，106, 191–201. Deb, S., Strawderman, L., Carruth, D.W., DuBien, J., Simth, B., & Garrison, T.M. (2017b). 一份用于评估行人对全自动驾驶车辆接受度的问卷之开发与验证。《交通研究：*C*辑：新兴技术》, 84, 178–195. Deb, S., Strawderman, L.J., & Carruth, D.W. (2018). 探究行人对全自动驾驶车辆外部特征的建议：一项虚拟现实实验。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》, 59, 135–149. Deb, S., Carruth, D.W., & Hudson, C.R. (2020). 通信特征如何帮助提升自动驾驶汽车存在时的行人安全：虚拟现实实验。*IEEE*人机系统汇刊, 50(2), 176–186. Demiroz, Y.I., Onelcin, P., & Alver, O.Y. (2015). 行人在天桥地点违法横穿道路的行为：影响间隙接受、过街时间和天桥使用的因素。《事故分析与预防》, 80, 220– 228. Deng, L., Yang, M., & Marcoulides, K.M. (2018). 含多个变量的结构方程模型：问题与发展的系统综述。《心理学前沿》, 9, 580. Dey, D., Martens, M., Eggen, B., & Terken, J. (2019). 行人的过马路意愿与车辆自动化、外观及驾驶行为的关系。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》, 65, 191–205. Dinh, D. D., Vũ, N. H., McIlroy, R. C., Plant, K. A., & Stanton, N. A. (2020). 对交通安全的态度和风险感知对越南行人行为的影响。*IATSS*研究, 44(3), 238–247. Dommes, A., Cavallo, V., Dubuisson, J.B., Tournier, I., & Vienne, F. (2014). 横穿双向街道：年轻与老年行人的比较。《安全研究杂志》, 50, 27–34. Dommes, A., Merlhiot, G., Lobjois, R., Dang, N., Vienne, F., Boulo, J., Oliver, A., Crétual, A., & Cavallo, V. (2021). 年轻及老年成年行人在传统汽车和自动驾驶汽车前过街时的行为。《事故分析与预防》, 159, 106256.

Fabricius, V., Habibovic, A., Rizgary, D., Andersson, J., and Wärnestål, P. (2022). 重型卡车与弱势道路使用者之间的交互–为高度自动化卡车的交互能力提供参考的系统综述。《机器人与人工智能前沿》, 9, 818019. Feng, Y., Xu, Z., Farah, H., & van Arem, B. (2025). 另一名行人是否重要？一项关于共享空间中多名行人与自动驾驶车辆交互的虚拟现实研究。《*IEEE*智能交通系统汇刊》, 26(1), 196–209. Feng, Z., Gao, Y., Zhu, D., Chan, H.Y., Zhao, M., & Xue, R. (2024). 风险感知和对自动驾驶车辆的信任对行人过街决策的影响：运用ICLV模型探索社会—技术交汇点。《交通政策》， 152, 71–86. Figueroa-Medina, A.M., Valdés-Díaz, D., Colucci-Ríos, B., Cardona-Rodríguez, N., & Chamorro-Parejo, A. (2023). 运用虚拟现实仿真分析路段中部过街的步行速度和成功率。《事故分析与预防》, 183, 106987. Granié, M.A., Pannetier, M., & Gueho, L. (2013). 开发一种自我报告法，以测量各年龄段行人的行为。《事故分析与预防》， 50, 830–839. Gungor, O.E., & Al-Qadi, I.L. (2020). 为了全体的利益：通过对卡车编队进行集中式优化提升道路基础设施可持续性。《交通研究*C*辑：新兴技术》, 114, 84–98. He, C., Xu, P., Pei, X., Wang, Q., Yue, Y., & Han, C. (2024). 驾驶时疲劳：一种通过多特征融合检测卡车驾驶员疲劳的非视觉方法。《事故分析与预防》, 199, 107511. Holland, C., & Hill, R. (2007). 年龄、性别和驾驶员身份对行人在危险情境中过马路意向的影响。《事故分析与预防》, 39(2), 224–237. Jiang, Y., O'Neal, E.E., Zhou, S., Plumert, J.M., & Kearney, J.K. (2021). 与计算机生成代理一起过马路：对感知—行动调节的持续影响。《*ACM*应用感知汇刊》, 18(1), 1–16. Kadali, B.R., Vedagiri, P., & Rathi, N. (2015). 混合交通条件下无信号路段中部人行横道的行人间隙接受行为分析模型。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》, 32, 114–126.

Kadali, B.R., Vedagiri, P. (2020). 交通车道数量对无信号控制人行横道地点的行人间隙接受和风险承担行为的影响。《交通与健康杂志》，19, 100950. Kalatian, A., & Farooq, B. (2021). 利用沉浸式虚拟现实和可解释深度学习解读行人与自动驾驶车辆的交互。《交通研究：C辑：新兴技术》，124, 102962. Kalantari, A.H., Yang, Y., de Pedro, J.G., Lee, Y.M., Horrobin, A., Solernou, A., Holmes, C., Merat, N., & Markkula, G. (2023). 谁先行？一项关于车辆—行人交互的分布式模拟器研究。《事故分析与预防》，186, 107050. Koh, P.P., & Wong, Y.D. (2014). 信号控制人行横道上违规者的间隙接受。《事故分析与预防》，62, 178–185. Kwon, J., Kim, J., Kim, S., & Cho, G. (2022). 狭窄城市街道上的行人安全感知与过街行为：一项使用沉浸式虚拟现实技术的实验研究。《事故分析与预防》，174, 106757. Lee, D., & Hess, D.J. (2020). 网联与自动驾驶车辆道路测试的法规：评估实现全球安全协调的潜力。《交通研究：A辑：政策与实践》，136, 85–98. Lee, J., & Hong, I.B. (2019). 消费者对电子口碑的采纳：信任转移视角。《国际电子商务杂志》，23(4), 595–627. Lee, Y.M., Madigan, R., Uzondu, C., Garcia, J., Romano. R., Markkula, G., & Merat, N. (2022). 学习解读新型电子人机界面：车辆运动学和电子人机界面熟悉度对行人过街行为的影响。《安全研究杂志》，80, 270–280. Leung, K.Y.K., Loo, B.P.Y., Tsui, K.L., So, F.L., & Fok, E. (2021). 过街还是不走：深入探讨儿童在道路上的决策。《交通研究：A辑：政策与实践》，149, 1–11. Li, D., Mao, W., Pereira, F.C., Xiao, Y., Su, X., & Krueger, R. (2025a). 通过受控实验分析行人与骑行者和自主系统交互时的行为：文献综述。《交通研究F辑：心理学与行为》，114, 270–307. Li, X., Zhang, W., Li, Q., & Chen, F. (2025b). 卡车编队影响下高速公路出口处驾驶员变道行为分析：一项驾驶模拟研究。《交通研究F辑：心理学与行为》，113, 174–193。

Lin, Z., Chen, F., Öztürk, İ., & Merat, N. (2025). 超车自动化卡车编队：编队组织形式和交通状况对附近手动驾驶车辆驾驶员驾驶行为的影响。《交通研究F辑：心理学与行为》，109, 1208–1228. Liu, Y., & Tung, Y. (2014). 行人过马路决策的风险分析：年龄、时间间隙、一天中的时段和车辆速度的影响。《安全科学》，63, 77–82. Lobjois, R., Benguigui, N., & Cavallo, V. (2013). 年龄和交通密度对街道穿越行为的影响。《事故分析与预防》，53, 166–175. Lobjois, R., & Cavallo, V. (2007). 街道穿越决策中的年龄差异：估计任务中车辆速度和时间限制对间隙选择的影响。《事故分析与预防》，39(5), 934–943. Lobjois, R., & Cavallo, V. (2009). 年龄增长对街道穿越行为的影响：从估计到实际穿越。《事故分析与预防》，41(2), 259–267. Lourenço, V., Duarte, S.P., Lobo, A., Ferreira, S., & Cunha, L. (2024). 卡车司机、决策者和公众对卡车编队行驶接受度的认知：系统综述。《交通研究F辑：心理学与行为》，104, 359–373. Madigan, R., Nordhoff, S., Fox, C., Amini, R.E., Louw, T., Wilbrink, M., Schieben, A., & Merat, N. (2019). 了解自动化道路运输系统与其他道路使用者之间的交互：视频分析。《交通研究F辑：心理学与行为》，66, 196–213. Marsh, H.W., & Hocevar, D. (1985). 验证性因子分析在自我概念研究中的应用：一阶和高阶因子模型及其组间不变性。《心理学通报》，97(3), 562. McIlroy, R.C., Nam, V.H., Bunyasi, B.W., Jikyong, U., Kokwaro, G.O., Wu, J., & Stanton, N.A. (2020). 探讨六个国家行人行为与交通安全态度之间的关系。《交通研究F辑：交通心理学与行为》，68, 257–271. McIlroy, R.C., Plant, K.L., Jikyong, U., Hoài, N.V., Bunyasi, B., Kokwaro, G.O., Wu, J., Hoque, M.S., Preston, J.M., & Stanton, N.A. (2019). 低收入、中等收入和高收入国家的弱势道路使用者：行人行为问卷的效度验证。《事故分析与预防》，131, 80–94. Miles, J., & Shevlin, M. (2007). 增值拟合指数的适用时机与场合。《人格与个体差异》，42(5), 869–874。

中华人民共和国交通运输部。（2024）。2023年公路和水路运输量。取自：https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202404/t20240416_4128382.html。[2025-02-20]Morrongiello, B.A., Seasons, M., McAuley, K., & Koutsoulianos, S.（2019）。儿童行人行为：同伴社会规范的影响，以及自我报告与过街行为之间的一致性。《安全研究杂志》，68，197–201。Naser, M.M., Zulkiple, A., Al bargi, W.A., Khalifa, N.A., & Daniel, B.D.（2017）。混合交通条件下行人间隙穿越指数的建模。《安全研究杂志》，63，91–98。Navarro, J., Multon, M., Petit, M., Ouimet, M. C., & Reynaud, E.（2025）。我们都会中招：驾驶经验、认知控制投入程度以及实际驾驶情境接触对邓宁-克鲁格效应的影响。《交通研究F辑：交通心理学与行为》，109，1–18。Ng, F.Z.X., Yap, H.Y., Tan, G.W.H., Lo, P.S., & Ooi, K.B.（2022）。随时随地时尚购物：关于使用行为、体验反应和跨品类使用的双阶段预测分析SEM-ANN分析。《零售与消费者服务杂志》，65，102851。Noruzoliaee, M., Zou, B., & Zhou, Y.J.（2021）。美国国家公路网上的卡车编队行驶：一种系统级建模方法。《交通研究E辑：物流与交通运输评论》，145，102200。Nuñez Velasco, J.P., Farah, H., van Arem, B., & Hagenzieker, M.P.（2019）。利用虚拟现实研究行人与自动驾驶车辆交互时的过街行为。《交通研究F辑：交通心理学与行为》，66，1–14。Nuñez Velasco, J.P., Lee, Y.M., Uttley, J., Solernou, A., Farah, H., van Arem, B., Hagenzieker, M., & Merat, N.（2021）。行人会在自动驾驶车辆驶来之前横穿道路吗？驾驶员注意力和是否在场对行人道路穿越行为的影响。《交通研究跨学科视角》，12，100466。Onelcin, P., & Alver, Y.（2015）。信号交叉口行人的非法横穿行为：影响间隙接受的因素。《交通研究F辑：交通心理学与行为》，31，124–132。

O’Neal, E.E., Jiang, Y., Brown, K., Kearney, J.K., & Plumert, J.M.（2019）。与朋友一起过马路会如何影响青少年和成年人的冒险行为？《儿科心理学杂志》，44(6)，726–735。Osorio-García, D., Hernández-Pulgarín, G., & Escobar, D. A.（2023）。行人过街时的风险行为特征。《安全科学》，163，106120。Pawar, D.S., & Patil, G.R.（2015）。发展中世界街区中段过街时行人的时间和空间间隙接受。《安全研究杂志》，52，39–46。Pawar, D.S., & Patil, G.R.（2016）。高速主干道无信号街区中段过街行人的临界间隙估计。《安全科学》，86，295–303。Pawar, D.S., & Yadav, A.K.（2022）。无信号街区中段路段行人困境区的建模。《安全研究杂志》，80，87–96。Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., et al.（2011）。Scikit-learn：Python机器学习。《机器学习研究杂志》，12，2825– 2830。Petzoldt, T.（2014）。行人间隙接受与到达时间估计之间的关系。《事故分析与预防》，72，127–133。Qu, W., Zhang, H., Zhao, W., Zhang, K., & Ge, Y.（2016）。认知错误、正念和人格特质对中国样本行人行为的影响。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》，41，29–37。Rad, S.R., de Almeida Correia, G.H., & Hagenzieker, M.（2020）。自动驾驶车辆前方行人的道路穿越行为：基于智能体建模的行人模拟实验结果。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》，69，101–119。Rezwana, S., & Lownes, N.（2024）。行人与自动驾驶车辆的交互与行为：综述。《未来交通》，4(3)，722– 745。Rodríguez Palmeiro, A., van der Kint, S., Vissers, L., Farah, H., de Winter, J.C., & Hagenzieker, M.（2018）。行人与自动驾驶车辆之间的交互：绿野仙踪实验。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》，58，1005–1020。Roudsari, B.S., Mock, C.N., Kaufman, R., Grossman, D., Henary, B.Y. & Crandall, J.（2004）。行人交通事故：更高的伤害严重程度和

轻型卡车与乘用车的死亡率比较。《伤害预防》，10，154–158。Rouchitsas, A., & Alm, H.（2019）。用于自动驾驶车辆与行人通信的外部人–机界面：实证研究综述。《心理学前沿》，10，2757。Salducco, A., Abati, D., Bina, M., Bertani, B., Calarco, S., Balzarotti, S., & Biassoni, F.（2022）。年轻行人的行为与风险感知：一项针对意大利青春期早期青少年的试点研究。《交通研究F辑：交通心理学与行为》，90，512–523。Schneider, S., & Bengler, K.（2020）。虚拟世界真的一样吗？利用虚拟现实分析行人行为。《交通研究F辑：心理学与行为》，68，231–256。Schreiber, J.B., Nora, A., Stage, F.K., Barlow, E.A., & King J.（2010）。结构方程模型和验证性因子分析结果的报告：综述。《教育研究杂志》，99(6)，323–338。Schubert, A., Babisch, S., Scanlon, J.M., Campolettano, E.T., Roessler, R., Unger, T., & McMurry, T.L.（2023）。乘用车和重型车辆与行人的碰撞：损伤机制与风险评估。《事故分析与预防》，190，107139。Shaaban, K., Muley, D., & Mohammed, A.（2018）。分隔式主干道上行人违法横穿行为分析。《交通研究F辑：心理学与行为》，54，124–137。Shen, Z., Ma, J., & Wang, N.（2023）。儿童街道过街安全基于视频的评估工具的开发与效度验证。《交通与健康杂志》，33，101716。Sheykhfard, A., & Haghighi, F.（2020）。采用两种不同方法评估行人过街安全：固定摄像（FV）与移动摄像（IMV）。《事故分析与预防》，144，105661。Siegrist, M.（2021）。信任与风险感知：文献批判性综述。《风险分析》，41(3)，480–490。Soares, F., Silva, E., Pereira, F., Silva, C., Sousa, E., & Freitas, E.（2021）。过街还是不过街：视觉和听觉线索对行人过街决策的影响。《交通研究F辑：心理学与行为》，82，202–220。Soathong, A., Chowdhury, S., Wilson, D., & Ranjitkar, P.（2021）。探究城市路段中部行人危险过街行为的动机。《Travel Behaviour and Society》，22，155–165。

Sobhani, A., & Farooq, B.（2018）。智能手机分心对行人过街行为的影响：头戴式沉浸式虚拟现实的应用。《交通研究F辑：心理学与行为》，58，228–241。Song, Y., Jiang, Q., Chen, W., Zhuang, X., & Ma G.（2023）。行人面对在隔离交通和混合交通条件下行驶的配备电子人机界面的自动驾驶车辆时的道路过街行为。《事故分析与预防》，188，107115。Suhail, F., Adel, M., Al-Emran, M., & AlQudah, A.A.（2024）。学生准备好迎接高等教育中的机器人了吗？结合UTAUT2和任务—技术匹配，采用混合结构方程模型—人工神经网络方法考察机器人应用。《技术与社会》，77，102524。Sultana, T., & Hassan, H.M.（2024）。网联与自动驾驶车辆（CAV）车队的可识别性是否会影响驾驶员行为与安全？《交通研究F辑：心理学与行为》，103，368–386。Tapiro, H., Oron-Gilad, T., & Parmet, Y.（2018）。环境干扰对儿童行人过街行为的影响。《安全科学》，106，219–229。Tapiro, H., Oron-Gilad, T., & Parmet, Y.（2020）。行人分心：道路环境复杂度和年龄对行人视觉注意与过街行为的影响。《安全研究杂志》，72，101–109。Theofilatos, A., Ziakopoulos, A., Oviedo-Trespalacios, O., & Timmis, A.（2021）。过街还是不过街？街区中段过街时行人间隙接受决策的综述与元分析。《交通与健康杂志》，22，101108。Tian, K., Markkula, G., Wei, C., Lee, Y.M., Madigan, R., Merat, N., & Romano, R.（2022）。运用基于心理物理学的间隙接受模型解释不安全的行人道路过街行为。《安全科学》，154，105837。Tian, K., Tzigieras, A., Wei, C., Lee, Y.M., Holmes, C., Leonetti, M., Merat, N., Romano, R., & Markkula, G.（2023）。减速度参数作为隐式通信信号，用于行人过街决策及对自动驾驶车辆行为的估计。《事故分析与预防》，190，107173。Tran, T.T.M., Parker, C., & Tomitsch, M.（2021）。自动驾驶车辆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。

Tsugawa, S., Jeschke, S., & Shladover, S.E.（2016年）。卡车编队行驶项目的节能综述。*IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 1(1), 68–77. Vandroux, R., Granié, M. A., Jay, M., Sueur, C., & Pelé, M.（2022年）。行人行为量表：对其在世界各地的效度验证进行系统综述。《事故分析与预防》, 165, 106509. Vasudevan, V., Mehta, M., & Dutta, B.（2020年）。印度坎普尔无信号交叉口行人的时间间隙接受行为。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》, 74, 95–103. Wang, H., Wang A., Su, F., & Schwebel, D.C.（2022年）。年龄和感觉寻求对虚拟现实街道中行人过街安全的影响。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》, 88, 99–110. Wheaton, B.（1987年）。潜变量过度识别模型的拟合度评估。*Sociological Methods & Research*, 16(1), 118–154. Woodman, R., Lu, K., Higgins, M.D., Brewerton, S., Jennings, P.A., & Birrell, S.（2019年）。虚拟环境中行人穿越自动驾驶车辆编队间隙的间隙接受研究。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》， 67, 1–14. Wu, M., Wang, N., & Yuen, K.F.（2023年）。自动化水平和拟人化特征会影响公众对共享自动驾驶车辆的接受度和信任吗? *Technological Forecasting andSocial Change*, 189, 122384. Xu, J., Ge, Y., Qu, W., Sun, X., & Zhang, K.（2018年）。交通安全氛围在行人不便与行人行为之间的中介作用。《事故分析与预防》, 119, 155–161. Ye, Y., Wong, S.C., Li, Y.C., & Lau, Y.K.（2020年）。驾驶规则陌生地区交通系统中的行人风险：一种虚拟现实方法。《事故分析与预防》, 142, 105565. Ye, Y., Wong, S.C., Meng, F., & Xu, P.（2021年）。驾驶规则陌生地区行人的向右观察习惯与适应不良。《事故分析与预防》, 150, 105921. Ye, Y., Zheng, P., Liang, H., Chen, X., Wong, S.C., & Xu, P.（2024年）。安全还是效率？运用逆向强化学习估计醉酒行人的过街动机。*Travel Behaviour andSociety*, 35, 100760.

Zarfi, N.M.（2023年）。步行还是奔跑？运用规则挖掘技术探索孟加拉国达卡交叉口行人过街决策的观察性研究。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》, 94, 83–98. Zarfi, N.M., Sultana, R., Himal, M.R.H., & Tabassum, T.（2020年）。影响孟加拉国达卡交叉口行人采用冒险滚动间隙穿越策略过马路决策的因素。《事故分析与预防》, 142, 105564. Zhang, C., Zhou, B., Qiu, T.Z., & Liu, S.（2018年）。发展中世界无信号多车道路段中部人行横道处的行人过街行为。《安全研究杂志》, 64, 145–154. Zhang, C., Chen, F., & Wei, Y.（2019年）。评估中国不同车道数的无信号路段中部人行横道处的行人过街行为与安全。《事故分析与预防》, 123, 263–273. Zhang, Z., Li, H., & Ren, G.（2024年）。躲避还是冲刺？探究乱穿马路的行人在无过街设施的路段中部所作的连续过街决策。*Travel Behaviour and Society*, 36, 100799. Zhao, J., Malenje, J.O., Tang, Y., & Han, Y.（2019年）。基于逻辑回归的无信号路段中部人行横道行人间隙接受概率模型。《事故分析与预防》, 129, 76–83. Zhao, X., Li, X., Rakotonirainy, A., Bourgeois-Bougrine, S., & Delhomme, P.（2022年）。预测危险情境下行人从自动驾驶车辆前方过马路的意愿。《交通研究*F*辑：交通心理学与行为》, 90, 524–536. Zhou, H., Romero, S.B., & Qin, X.（2016年）。运用结构方程模型扩展计划行为理论，以预测行人的违规过街行为。《事故分析与预防》， 95, 417– 424. Zhou, R., Horrey, W.J., & Yu, R.（2009年）。从众倾向对中国行人过马路意愿的影响：计划行为理论的应用。《事故分析与预防》, 41, 491–497. Zhuang, X., & Wu, C.（2011年）。中国无标线路段行人的过街行为与安全。《事故分析与预防》, 43, 1927– 1936.

附录 A 1**表A1**。 过去二十2年间关于行人在人工驾驶车辆前的间隙接受行为的代表性研究汇总。未明确对行人接受的间隙进行建模的研究（例如，行人对不同过街设施的偏好）3不在此列。4

研究	地区	实验	场景	目标变量	分析方法	主要发现
Holland and Hill (2007年)	Birmingham，英国	问卷调查与293参与者	三个假设情境与高风险道路	过街意愿	理论计划行为和结构方程模型	◆ 女性和老年人感知到的风险更高，在危险情境。
Lobjois 和 Cavallo （2007年）	卡昂，法国	虚拟基于视频的对78名参与者	单车道城市街道	时间/距离可接受间隙，过街时间，反应时间，以及安全裕度	逻辑斯蒂回归模型	◆ 老年参与者接受了更大的用于过街的时间间隙比年轻人更大。 ◆ 在有时间限制的情况下，所有年龄组在更高的车辆接近速度下接受了更小的时间间隙。 ◆ 在没有时间限制的情况下，年轻人无论车辆速度，而老年人在较高的车辆接近速度下接受了更小的时间间隙。
Lobjois 和 Cavallo （2009年）	卡昂，法国	虚拟基于视频的调查，共有78名参与者	单车道城市街道	时间间隙可接受，开始过街时间，过街时间和安全裕度	逻辑斯蒂和线性回归模型	◆ 老年参与者接受了更大的时间间隙，并更早开始过街。 ◆ 老年人接受了更小的时间间隙当车辆接近速度更快时。 ◆ 所有群体都会根据可用时间调整过街时间可用时间。

Zhou等人（2009年）	北京，中国	问卷调查与426参与者	两个假设情境，其中违反了交通信号灯以穿过街道	过街意向	计划行为理论计划的和结构方程模型结构方程模型	• 老年人的过街意愿较低过街。 • 受访者表示有更强的过街意愿当其他行人正在过马路时。 • 从众性较高的受访者倾向的人过街意向更强。 • 随着感知风险增加，态度和主观规范变得更加消极，且感知行为控制降低。
Zhuang 和 Wu（2011年）	杭州，中国	现场视频观察与254名行人	非法横穿道路行为，在一个未标线、双向、无隔离的，六车道道路	安全裕度	多元线性回归模型	• 行人倾向于谨慎地过街而不是等待。 • 行人更倾向于选择安全而非短路径并且更快地走完道路的后半段。 • 中年行人参与人数更多的群体，在过街前观察车辆的次数更多，并且与公交车而非私家车互动时具有更大的安全裕度。
Cherry 等人（2012年）	昆明，中国	现场视频观察与330名行人	有标线的、无保护的、双向，八车道人行横道	时间间隙可接受间隙，规避采取的行动驾驶员	Probit回归模型	• 平均可接受间隔为 8.8 秒，且平均拒绝间隔为 5.3 秒。 • 接受间隙的概率为与间隙大小呈正相关，且与等待时间呈正相关，但呈负相关与车辆接近速度。

Lobjois 等人（2013年）	卡昂，法国	虚拟现实实验 与67名参与者	单车道 城市街道	时间间隙 可接受，过街启动时间， 以及安全裕度	逻辑斯蒂回归模型	• 老年人的过街行为与年轻同龄人相似在单车道单行街道上。 • 可接受时间间隙会随着等待时间和驶过车辆数量的增加而减少。
Dommes等人（2014年）	凡尔赛，法国	虚拟现实实验 共84名参与者	有标线的，无保护的，双向双车道 路段中部 人行横道	时间间隙 接受、等待时间、过街时间和安全裕度	逻辑斯蒂回归模型	• 老年参与者过街速度较慢，且安全余量较小。 • 老年参与者主要依据近侧车道的可用间隙做出决定，而忽略了远侧车道。
Koh 和 Wong（2014年）	新加坡	现场视频观察 其中188个被拒绝，且104 已接受间隙，分别	非法横穿道路行为发生在七个 信号 交叉口	拒绝的时间间隙和接受的	逻辑斯蒂回归模型	• 平均而言，违规者接受的时间间隙更大，这一现象出现在近端（6.3 秒），而远端穿越的时间间隙为 5.2 秒。 • 时间间隙每增加一秒，非法横穿道路的几率就增加 1.4 倍（近端），而远端穿越。
Liu and Tung（2014年）	台湾	预先录制 现实生活 基于视频的调查，共有16名年轻参与者和16名老年人参与者	一个无保护的，双车道 人行横道上有一辆人工驾驶车辆驶近 正午时分和黄昏	步行时间， 时间间隙 可接受，安全裕度， 置信水平， 以及步行策略	逻辑斯蒂回归模型	• 行人作出了过街决策主要依据距离间隔。 • 过马路的剩余时间更长，行人采取了黄昏时的快速步行策略。 • 老年人没有意识到步行能力下降，却做出了相同的过街决策，与年轻人一样，导致安全裕度较小。

Petzoldt（2014年）	开姆尼茨，德国	基于视频的调查，共有53人 本科生 学生参与 实验一 和44名 参与者参与 实验二	实验一：一个 虚拟视频，展示一辆 未设保护设施的 街区中段，设有一条 单车道。 实验二：一个 一段现实生活中的视频 航空机场的滑行道 真实场景视频。	时间间隙 可接受，且 到达时间 估计值由 参与者	逻辑斯蒂 回归模型	• 参与者倾向于接受更小的时间间隙，当车辆以更高的速度接近。 • 年轻人接受的时间间隙更小。 • 更高的接近速度导致更高的到达时间估计值。 • 车辆接近速度的影响在使用到达时间时减弱用于预测间隙接受的估计值。
Demiroz 等（2015年）	伊兹密尔， 土耳其	现场视频 观察 与 454 名 乱穿马路的行人	非法横穿道路 行为发生在四处 天桥地点	过街速度， 时间间隙，以及 安全裕度	描述性 统计数据	• 约46%的行人没有使用人行天桥并非法横穿道路。 • 行人接受的时间间隙更大在限速更高的道路上。 • 安全裕度随着行人年龄和限速的增加而增大。 • 违规行人意识到了非法过街而不 使用人行天桥的危险。
Kadali 等人（2015年）	孟买， 印度	现场视频 观察 与384名 行人	一处无保护的 街区中段 一处人行横道 有中央分隔带的六车道 城市街道	可接受 时间间隙	多元线性 回归和 人工神经网络模型	• 人工神经网络的预测性能更好而线性回归模型产生了更易于解释的结果。 • 老年行人更有可能选择较大的时间间隙。 • 可接受间隙大小随着等待时间、行人 群体规模、行人为过街所做的尝试次数以及滚动行为的增加而减小。

Onelcin 和 Alver（2015年）	伊兹密尔，土耳其	现场视频观察 与444一起乱穿马路的行人	非法横穿道路 六种行为 双车道 信号控制的 交叉口	距离间隔，过街时间，以及安全裕度	描述性统计数据	• 车辆接近速度对过街决策和过街时间的影响最显著。 • 行人性别和年龄未显示出与过街时间及距离—可接受间隙存在显著关联。
Pawar 和 Patil（2015年）	科尔哈布尔 and 孟买，印度	现场视频观察 包含 1107 个间隙 针对 140 名行人	两个无信号控制路口，有标线的街区中段 人行横道上 四车道分隔式 主干道	时间/距离可接受间隙和拒绝	逻辑斯蒂回归模型	• 接受空间间隙的概率随着.....的增加而降低车辆接近速度和车辆尺寸。 • 第50^{th} 百分位的可接受间隙变化范围为 4.1 至 4.8 秒，距离为 67 至 79 米。 • 第85^{th} 百分位的可接受间隙变化范围为 5.0 至 5.8 秒，距离为 82 至 95 米。
Pawar 和 Patil（2016年）	科尔哈布尔 and 孟买，印度	现场视频观察 包含1107个间隙 针对 140 名行人	两处无信号控制的、有标线的路段中部 人行横道，位于 四车道分隔式道路上 主干道	临界间隙	确定性和概率方法	• 时间间隔和距离间隙遵循对数正态分布。 • 通过确定性方法估计的那些概率方法。 • 临界间隙介于 3.6–4.3 秒之间和 60–74 米。
Naser 等人（2017年）	吉隆坡，马来西亚	现场视频观察 样本量未知 样本量	无信号控制的 街区中段 人行横道	时间间隙可接受	多元线性回归和逻辑斯蒂回归模型	• 老年人接受了更大的时间间隙，而滚动间隙穿越与较小的可接受间隙相关。 • 间隙接受的概率随着间隙大小变小以及更高的车辆速度，以及大型车辆。

Alver 和 Onelcin （2018 年）	伊兹密尔，土耳其	现场视频观察 涉及377名乱穿马路的行人	非法横穿道路行为，发生在两个天桥地点	时间间隙可接受、临界间隙和安全裕度	逻辑斯蒂回归模型	• 平均可接受间隔为 7.22 秒。 • 近端车道的临界间隙在 3 至 3.3 秒之间近端车道。 • 平均安全裕度为 7.08 秒。单独过街且年龄较小的人且未携带任何条目的人，其安全性较低余量。
Shaaban 等人 （2018 年）	多哈，卡塔尔	现场视频观察 包含2766名行人	违法穿越行为发生在一条六车道分隔式主干道路	等待时间，穿越路径，过街时间，以及过街距离	多元线性回归模型	• 男性更有可能违规横穿马路。 • 当等待时间增加时行人从路缘横穿，另一名行人从对面横穿，且在缺少车辆。
Sobhani 和 Farooq（2018年）	蒙特利尔 and 多伦多，加拿大	VR 实验 与42名参与者	分心过街行为在单车道上一个人行横道无信号控制的交叉路口	穿越时长，等待时间，碰撞时间，以及后侵入e侵入时间	多项逻辑回归模型	• 分心参与者等待时间更长，并且以更快的速度穿过街道。 • 女性的危险穿行行为更多在分心状态下。 • LED灯提高了分心行人的安全性，并提升了成功过街率。
Tapiro 等人 （2018 年）	贝尔谢巴，以色列	VR 实验 共有52名参与者	分心过街行为在双向双车道街道	时间间隙可接受、安全余量、过街开始时间，和反应时间	线性混合模型	• 分心参与者选择了较小的过街间隙，花费了更多时间过街决策，响应速度更慢对过街机会，并分配了较少的视觉注意于道路。 • 视觉干扰对行人行为的影响大于听觉干扰。

Zhang 等人（2018年）	武汉，中国	现场视频观察以及未知样本	五个无信号控制的、有标线的、双向的、六车道中段人行横道	穿越策略，时间间隙可接受，并且侵入后时间	多项式Logit回归模型	• 选择单阶段、两阶段和滚动式过街策略的行人比例分别为10.7%、23.2%和66.1%。 • 女性行人更倾向于选择滚动式过街策略。
Avinash 等人（2019年）	印度	现场视频观察对4885名行人	四名未受保护的、无中央分隔的、四车道街区中段人行横道	安全裕度	多元线性回归模型	• 安全裕度随……增加而增加过街速度、可用车辆间隙和行人群体规模，而随……减少与行人滚动行为相关。 • 老年人和儿童行人的安全裕度较低安全裕度。 • 行人更可能保持轻型车辆的临界间隙。
Morrongiello 等（2019年）	圭尔夫，加拿大	VR实验与86名儿童参与者	一条双向、双车道城市道路	时间间隔接受，等待时间，以及被撞比例	描述性统计数据	• 儿童对……持有相似看法过马路，因为他们认为自己的同伴也持有相同看法，而他们的规范也反映在他们近期的过街行为中。 • 据报告，过去几周冒险过街行为更多的儿童过去几周的冒险过街行为选择了更小的时间间隙，等待时间更短，并在虚拟现实中遭遇了更多碰撞。

Zhang 等人（2019 年）	武汉，中国	现场视频 观察 与3427名 行人	12处 无信号控制的、 有标线的路段中部 人行横道	安全裕度	有序概率单位模型 模型	• 随着车道数量增加 采用的行人比例 滚动间隙穿越模式，穿越 与街道上的其他人同行，并改变 速度或路径也相应增加。 • 行人–车辆 双向六车道人行横道上的冲突数量是 双车道人行横道上的 5.96 倍， 人行横道，且是.....的 2.04 倍高于 四车道人行横道的情况。
Zhao 等人（2019 年）	上海，中国	现场视频 观察 与11,500名 行人	十三 无保护的 街区中段 人行横道	时间间隙 已接受	逻辑斯蒂 回归模型	• 间隙接受的概率 随着间隙增大而增加，随着过街距离缩短 以及等待时间延长而增加 。 • 在中央分隔带等待的行人 更有可能接受较小的时间间隙。
Kadali和 Vedagiri（2020 年）	孟买，印度	现场视频 观察 共有 46,170 个 接受/拒绝的 间隙	八个 无信号控制 街区中段 人行横道	时间间隙 已接受	逻辑斯蒂 回归模型	• 老年行人，较大的行人 群体、接近的大型车辆， 较高的车辆速度、较小的间隙大小， 以及较宽的人行横道与 较低的间隙 接受概率相关。

Sheykhfard 和 Haghighi （2020 年）	伊朗巴博勒	现场视频 观测值 以及车载 视频 观测值 与27名驾驶员	两条道路位于 城市地区，另有两条 道路郊区 地区	时间间隙 可接受	多元线性 回归和 逻辑斯蒂 回归 模型	• 女性行人、大型车辆，较大的行人群体规模和较高的车辆速度与一种接受了更大的时间间隙，而那些立即过街而不等待的行人可能接受了更小的时间间隙。 • 间隙接受的概率随着车辆速度降低而增加，距离间隙更大、行人群体规模，以及更长的等待时间。
Tapiro 等人 （2020 年）	贝尔谢巴，以色列	VR 实验 与83名 参与者	分心 过街行为 在一条双向 双车道街道上	安全裕度，错失 机会，以及 反应时间	线性混合 模型	• 参与者错过了更多过马路机会，因为他们身处更杂乱的道路环境中。 • 环境负荷较高时，儿童的视线分布范围更广，遍及整个场景负载很高。
Vasudevan 等人 （2020年）	坎普尔，印度	现场视频 观察 包含 2401 个间隙	六个无信号控制路口，未标线 交叉口	临界间隙和 可接受的时间间隙	逻辑斯蒂 回归模型	• 老年人的临界间隙有所增加，分心行人、大型车辆、车队以及更长的等待时间。 • 间隙接受的概率随间隙大小增加而增加，并且在车队前方，但随着过街宽度增加、等待时间延长，以及大型车辆驶近而降低。

Zafri 等人（2020 年）	达卡，孟加拉国	现场视频观察 涉及546名行人	滚动间隙 过街行为 在人行横道上 六个交叉口	采用决策 滚动间隙 穿越策略	逻辑斯蒂 回归模型	◆ 无信号交叉口，较小的可用间隙、繁忙交通流，年轻行人、较大的行人群体规模以及不使用人行横道与更高的可能性相关即发生滚动间隙穿越行为。
Alver等人（2021 年）	伊兹密尔，土耳其	现场视频观察 与498名行人	两个无防护的、未标线 路段中部 人行横道	时间间隙 可接受的、临界的 间隙和过街 速度	多元线性 回归模型	◆ 博尔诺瓦的临界间隙为 4.1 秒，希林耶尔第一车道和 第二车道的临界间隙分别为 6.2 秒和 5.7 秒。 ◆ 在建有实体隔离栏时，行人接受的间隙更小；建造了实体隔离栏时，以及当久久久久久驶近车辆是私家车时也是如此。
Leung 等人（2021 年）	香港，中国	预先录制 现实生活 基于视频的调查与 906名儿童参与者	一条无防护的、单行道、双车道 街区中段 人行横道	反应时间和 安全裕度	逻辑斯蒂 广义 估算 方程	◆ 儿童难以对安全性作出判断驶来的车辆 远侧车道上速度超过30公里/小时的车辆。 ◆ 视觉干扰与较差的道路穿越决策。
Soares等人（2021 年）	葡萄牙	VR 实验 与30 参与者	两个无保护的、有标线、单行道、双车道路段中部 人行横道	百分比 穿越行为，反应时间，以及 到达时间	描述性 统计数据	◆ 较低的速度和较大的距离导致导致更高比例的穿越行为，并延长反应时间。 ◆ 参与者的过街决策基于他们对 驶近车辆的视觉感知，尤其是其速度和距离。

Soathong 等（2021）	奥克兰，New 新西兰	现场问卷调查对象 400 参与者	危险和违法的穿越行为在四个无保护的街区中段没有行人设施	过街意愿	理论计划的行为与结构方程模型	• 过街意愿主要受习惯和态度驱动。 • 一些行人内化了这样的信念即冒险过马路行为是一种社会中可接受的行为。 • 女性受到其自身态度的强烈影响而男性则受到其朋友感知的影响。
Pawar 和 Yadav（2022年）	孟买 and 科尔哈布尔，印度	现场视频观察与 1107 名行人	两个无信号控制路口路段中部人行横道	时间间隙和距离间隔可接受	逻辑斯蒂回归模型	• 间隙接受的概率随着车辆速度提高而降低，大型车辆、较小的距离间隙，等待时间较长，以及当行人独自行走时。
Wang 等人（2022 年）	南通，中国	VR 实验有193名有效参与者	一条有标线的，双车道、双向人行横道无信号控制交叉口城市地区	起步延迟，错失机会，以及危险过街	分层多元线性回归模型	• 感觉寻求水平较低的行人错失了更多过马路机会。 • 交通状况较差以及错失过马路机会与儿童更多危险过马路行为相关。 • 感觉寻求程度较高且面临更拥堵的交通、起步延迟更长的人，危险过马路行为更多。

Angulo 等人 (2023年)	弗吉尼亚州, US	现场视频观察与 153 行人和虚拟现实实验与49名参与者	一条有标线的, 无信号控制街区中段人行横道双向双车道城市街道	时间间隙接受并过街速度	描述性统计数据	• 现实世界和虚拟现实中的临界间隙分别为 5.12 秒和 7 秒。 • 虚拟现实中的行人更加保守，等待时间更长，并选择更大的时间间隙。 • 两者之间没有显著差异：虚拟现实与现实世界中的过街速度。
Figueroa-Medina 等人 （2023年）	马亚圭斯, Puerto, Rico	VR 实验与48名参与者	有标线的、单车道和一条有标线的双车道、无保护的街区中段一处人行横道城市街道	时间间隙可接受，步行速度，以及成功过街 rate	多元线性和逻辑斯蒂回归模型	• 参与者平均观看了约过街前的五个车辆间隙并接受了 4.5 秒的间隙。 • 双车道街道上的老年参与者往往接受更大的时间间隙。 • 被撞概率上升随着老年人年龄增长以及车辆速度，但随着时间间隙增大而降低间隙增大且步行速度更快时。
Kalantari 等人 等人（2023年）	英国利兹	分布式模拟器实验与64名参与者	两种有标线的和两种未标线的街区中段人行横道双向城市道路	行人是否穿过比……先驾驶员	混合效应二元逻辑回归模型	• 行人倾向于在较大的……处先行穿越时间间隙，以及在有标线的人行横道上。 • 等待时间较长的行人更不可能率先横穿。 • 行人决策主要受到车辆运动学的影响。 • 人格特质的影响有限关于无标线人行横道处的交互。

Shen 等人（2023 年）	沈阳，中国	预先录制 现实生活 基于视频的 调查，包含 60 名 儿童 参与者	几辆有标线的 ， 无保护的， 三车道 人行横道 郊区	危险 穿行，安全 穿行率，以及 接触时间	描述性 统计数据	• 六岁行人的安全性较低， 在行为和 眼动追踪维度上均如此。 • 行人行为量表中文版 行为量表呈正相关。 接触时间呈正相关。
Zafri（2023年）	达卡， 孟加拉国	现场视频 观察 涉及546名 行人	六个繁忙 交叉口	过马路 通过步行或 跑步	关联规则 挖掘	• 跑步与.....密切相关 无信号交叉口 ，宽阔道路 ， 狭窄中央分隔带、男性和年轻 行人、滚动间隙穿越、过街 独自，以及在灯光前过街，并且 速度较快的车辆。
Zhang 等人（2024 年）	南京， 中国	现场视频 观察 与319名 乱穿马路者	非法横穿道路 种行为 双向双车道 街区中段，无 过街设施	顺序的 过街决策	分组随机 参数 多项式 Logit 模型	• 曾经仓促决策的乱穿马路的行人 往往会继续做出 仓促决策。 • 车辆状态较为保守，例如 减速、停车或急转向，均属于 与更高概率的 行人仓促决策有关。
Bennett 等人（2025 年）	墨尔本 and 悉尼， 澳大利亚	VR 实验 32名 儿童和 44名成年人	77段视频片段 以 24 帧预先录制 地点中的 现实世界 环境	危险感知 和间隙 接受	描述性 统计数据	• 成年人更常在 危险与间隙窗口内作出回应，且 反应时间显著更快，并且 更频繁地准确识别出危险 比儿童更频繁。

1

附录B 1**表A2**。 与自动驾驶车辆交互时影响行人过街行为的动机因素相关代表性研究综述。2

研究	地区	实验	目标变量	动机变量	分析方法	主要发现
Deb等人 (2017b)	US	在线问卷调查与482参与者	过街意愿前方道路AVs	行为倾向，个人创新性，和行人接受度对自动驾驶车辆	负责人分析，验证性因子分析，以及有序逻辑回归模型	◆ 自动驾驶车辆前过马路意愿显著受到安全和交互评分，但不受兼容性评分的影响。 ◆ 男性、较年轻的城市居民，以及个人创新性较高的人对自动驾驶车辆的接受度更高。 ◆ 表现出积极行为的行人认为自动驾驶车辆将改善整体交通安全，而在违规行为、疏忽和攻击性行为方面得分较高的人更有信心在自动驾驶车辆前方穿行。
Deb等人（2018年）	斯塔克维尔，US	虚拟现实实验与30名参与者	过街行为在自动驾驶车辆前方具有不同的外部特征，位于一个四岔路口、双车道和无信号控制的交叉路口	行为倾向，个人创新性，和行人接受度对自动驾驶车辆	线性回归模型	◆ 行人对自动驾驶车辆的接受度随着.....的加入，显著增加外部特征。 ◆ 经常犯错或表现出攻击性行为的行人对自动驾驶车辆的评价较差，过街耗时更长，且过街前等待时间更短。 ◆ 经常违反交通规则的行人更加谨慎，并且认可加入外部特征。

罗德里格斯帕尔梅罗等人（2018年）	代尔夫特，荷兰	一位巫师Oz实验包含24名参与者	过街意愿双向六车道、无标线道路在自动驾驶车辆或人工驾驶车辆	感觉寻求与对自动驾驶车辆的信任	描述性统计数据	• 临界间隙无显著差异且观察到自我报告的压力在自动驾驶车辆和人工驾驶车辆之间。 • 男性接受了更短的间隙，并且更高的感觉寻求得分。 • 临界间隙的大小没有显著差异临界间隙大小与自我报告的压力水平、对自动驾驶车辆的信任，以及感觉寻求之间。
Dey等人 (2019年)	代尔夫特，荷兰	预先录制幽灵驾驶员的视频名驾驶员，50参与者	穿越意愿一段无标线路段在某校园内在自动驾驶汽车前方或由人类驾驶的车辆	总体而言果断性和知识的影响自动驾驶车辆	描述性统计数据	• 车辆自动化，果断性，and对自动驾驶车辆的认知并未对行人的产生显著影响穿越意愿。 • 车辆让行行为发挥了主导作用，影响行人是否决定穿越。
Nuñez Velasco 等人（2019年）	代尔夫特，荷兰	虚拟现实实验与55名参与者	过街意愿前方道路上的具有不同外观和外部人机界面	行为倾向，感知行为控制，以及对自动化	混合二项逻辑回归模型	• 斑马线的存在以及更大的间隙增大，过街意图随之增加。 • 识别出该车辆为自动驾驶汽车的行人过街意愿较低。 • 识别出该车辆为自动驾驶车辆的行人表现出更高的信任度，AVs. • 两者之间存在显著的积极关系过街意向与感知行为控制之间的关系。

Woodman 等（2019年）	华威，UK	虚拟现实实验与28名参与者	过街意愿在一列由四辆自动驾驶车辆组成的共享空间上或在一条单车道道路	感知安全	描述性统计数据	• 行人更有可能接受较小的共享道路中的时间间隙环境，尽管较低的感知安全性得到了报告。
Deb等人（2020年）	斯塔克维尔，US	虚拟现实实验与24参与者	过街行为在自动驾驶车辆前方具有不同的操作员状态和在.....处的外部特征一个四岔路口，双车道 ，and无信号控制的交叉路口	个人创新性和行人接受度对自动驾驶车辆	描述性统计数据	• 行人更喜欢文本中的“可以通行”以及口头信息中的“可以安全通过”认为它们是清晰且令人安心的界面。 • 行人更信任没有操作员的自动驾驶汽车，而不是有一名心不在焉的操作员。 • 年龄较大者认为外部界面更有帮助，而创新性较高者对功能创意的评分更高。
Rad等人（2020年）	代尔夫特，荷兰	模拟实验与60名参与者	过街意愿这条单向单车道道路前方自动驾驶车辆或人工驾驶车辆	行为倾向、风险感知、以及态度对自动驾驶车辆	主要成分分析和广义线性混合模型	• 与接近车辆的距离以及是否存在斑马线是最重要的两个因素，可用于预测行人的过街意图。 • 行人在自动驾驶车辆前方的过马路意愿显著高于人工驾驶车辆。 • 熟悉自动驾驶车辆的行人，对自动驾驶车辆的信任度更高，且报告称违规行为更多的人更有可能从自动驾驶车辆前方穿过道路。

Bindschädel 等（2021年）	魏萨赫，德国	虚拟现实实验与 51 参与者	过街行为 在自动驾驶车辆前方 有和没有 外部 人机 单行道上的界面 单行道，o ne-lane, 以及无标线的 路段中部人行横道	感知 安全	线性混合 模型	• 参与者更早地穿过道路，并且遇到配备 外部人机界面。 • 在只有部分 自动驾驶车辆配备了外部 界面后，参与者在面对没有 对于没有遭遇的情况较为保守 外部人机界面。 • 主观安全感可由实际过街行为显著 根据实际过街行为预测。
Dommes等人（2021年）	凡尔赛，法国	虚拟现实实验与30 年轻参与者和30名 年长 参与者	过街行为 在混合 交通中面对自动驾驶车辆 和人工驾驶 车辆在一条 双向双车道、且无标线的 路段中部人行横道	行人 接受度 对自动驾驶车辆的	线性混合 模型	• 参与者犹豫着是否从前方穿过 一辆自动驾驶汽车，启动时间更晚，且 过街时间。 • 参与者倾向于在 较短的间隙时过街，当自动驾驶车辆在 近侧车道让行，而传统车辆正在 远侧车道驶近时。 • 接受度没有显著差异 对自动驾驶车辆的态度存在差异，涉及 年轻和年长参与者。

Nuñez Velasco 等（2021）	英国利兹	虚拟现实实验与 20 参与者	过街行为 在自动驾驶车辆前方 具有不同的 驾驶员状况 在单车道上 单行道	对自动驾驶车辆的信任, 感知 行为 控制，以及 感知风险	混合效应 线性 回归 模型	• 时间间隙和 自动驾驶车辆的让行行为是最重要的因素 影响行人过街行为。 • 那些认为车辆是自动驾驶车辆的人 过街的可能性较低。 • 对自动驾驶车辆的信任和感知风险与过街 决策并无显著关联 。 • 感知行为控制较高的人 更有可能选择穿过。 • 当自动驾驶车辆中的 驾驶员看起来注意力集中时，感知行为控制较高, 感知风险较低。
Kwon等人（2022 年）	蔚山和 首尔, 韩国 韩国	虚拟现实实验与200名年轻 参与者	过街行为 在一个四岔 无信号控制的 交叉口中 住宅街区	Risk 感知	随机效应 线性 回归和 分层 SEM	• 视野受阻时，风险感知更高 没有几何图案时, 没有路面标线时，以及在夜间, 以及在共享街道上。 • 感知风险较高的参与者 开始行走所需时间更长，并且倾向于 过马路时匆忙行走。 • 风险感知在.....之间起中介作用 建成环境与过街 行为。

Zhao 等人 (2022年)	澳大利亚	在线问卷调查，包含493参与者	过街意愿 危险情境下的道路前方情境 自动驾驶车辆或人工驾驶的车辆	计划行为理论 行为，感知风险，和信任	分层多元线性回归模型	• 行人的意愿显著更高，会在自动驾驶车辆前过马路比人工驾驶车辆。 • 行人报告的风险较低，且在过马路时对自动驾驶车辆的信任度更高。 • 态度、主观规范和感知行为控制具有显著影响参与冒险行为意向的预测因素过街行为。
Feng 等人 (2024)	中国	虚拟基于视频的在线问卷调查与589参与者	过街意愿 双向双车道，无信号控制的，且有标线的路段中部前方的人行横道 自动驾驶车辆或由人类驾驶的车辆	Risk感知和信任	综合选择与潜变量模型	• 车辆接近速度增加且距离间隔缩短，会增加行人等待的倾向。 • 中年行人以及感知风险较高的人更在道路穿越方面较为保守决策。 • 对自动驾驶汽车的信任度越高，越能提升行人的穿越意愿。

1

附录 C 1**表 A3**。 问卷调查中包含的条目和变量。2

变量	**条目**
违规行为	即使行人信号灯为红灯，我也会过街。 为了节省时间，我会斜穿街道。 即使不到50米远处就有人行横道（斑马线），我仍会在横道外过街。 为了节省时间，我会走行人禁行的通道。
错误	交通堵塞时，我会从停在车行道上的车辆之间穿行。 即使有车辆驶来，我也会过街，因为我认为它们会为我停车。 明明可以走人行道，我却走自行车道。 我赶时间，所以没看就跑着穿过街道。
疏忽	我意识到自己在没有留意交通状况的情况下，已经穿过了好几条街道和交叉口。 我想着别的事情，忘了过街前先看一看。 我一边和别人说话，一边没看就过了街。 我忘了过街前先看一看，因为我想去对面的人行道上找某个人。
攻击性行为	我会对其他道路使用者（行人、驾驶员、骑行者等）感到愤怒，并冲他大喊。 我会故意慢慢过马路，以惹恼驾驶员。 我会对其他道路使用者（行人、驾驶员、骑行者等）感到愤怒，并做出手势。 我曾对一名驾驶员感到愤怒，并打了他的车辆。
积极行为	我感谢那位停车让我过马路的驾驶员。 有人同行时，我会在狭窄的人行道上排成单列纵队行走，以免妨碍 迎面遇到的行人。 我在人行道上靠右侧行走，以免妨碍迎面遇到的行人。 即使我有优先通行权，只要后面没有其他车辆，我也会让一辆汽车先通过。
对卡车的理解	我了解卡车的主要用途和功能。 我了解卡车运输的优势和劣势。 我熟悉卡车的驾驶和操作技能。

	我熟悉卡车运输相关的交通法律法规。
卡车安全信任	我认为，卡车在城市道路上行驶时会对行人构成重大安全风险。 我担心卡车的体积可能会限制驾驶员的视野，从而增加发生事故的可能性。 与普通汽车相比，我认为人们在道路上更难避开卡车
对.....的理解 自动驾驶 技术	我了解自动驾驶车辆的用途和功能。 我了解自动驾驶车辆的运行方式及其工作原理。 我了解自动驾驶汽车产业的历史和前景。
对.....的安全信任 自动驾驶 技术	我认为自动驾驶车辆能够很好地探测行人并避免碰撞。 我认为自动驾驶车辆与行人互动时发生事故的风险很低。 我认为自动驾驶技术能够在紧急情况下有效保障行人的安全。
对.....安全的信任 自动驾驶卡车	在自动驾驶卡车前过马路时，我会觉得更安全。 自动驾驶卡车的出现会让整个道路交通更加安全。 如果我的家人在有自动驾驶卡车行驶的街道上过马路，我会更安心。 在自动驾驶卡车前过马路时，我会觉得做其他事情（例如使用我的 手机、与同伴交谈）更加自在。 遇到自动驾驶卡车时，我会减少观察周围环境和过马路所花的精力。 自动驾驶卡车将能够与其他车辆和行人有效互动。
风险感知	我认为，在视频所示的情境中过马路非常危险。 如果我在视频所描述的情境中过马路，发生事故的后果会非常严重。 自动驾驶卡车驶近时，我会提高警惕。 我觉得视频中的自动驾驶卡车可能会失控并造成危险。
间隙接受	请在你觉得可以安全穿过虚拟环境的最后一刻按下手持遥控器上的按钮

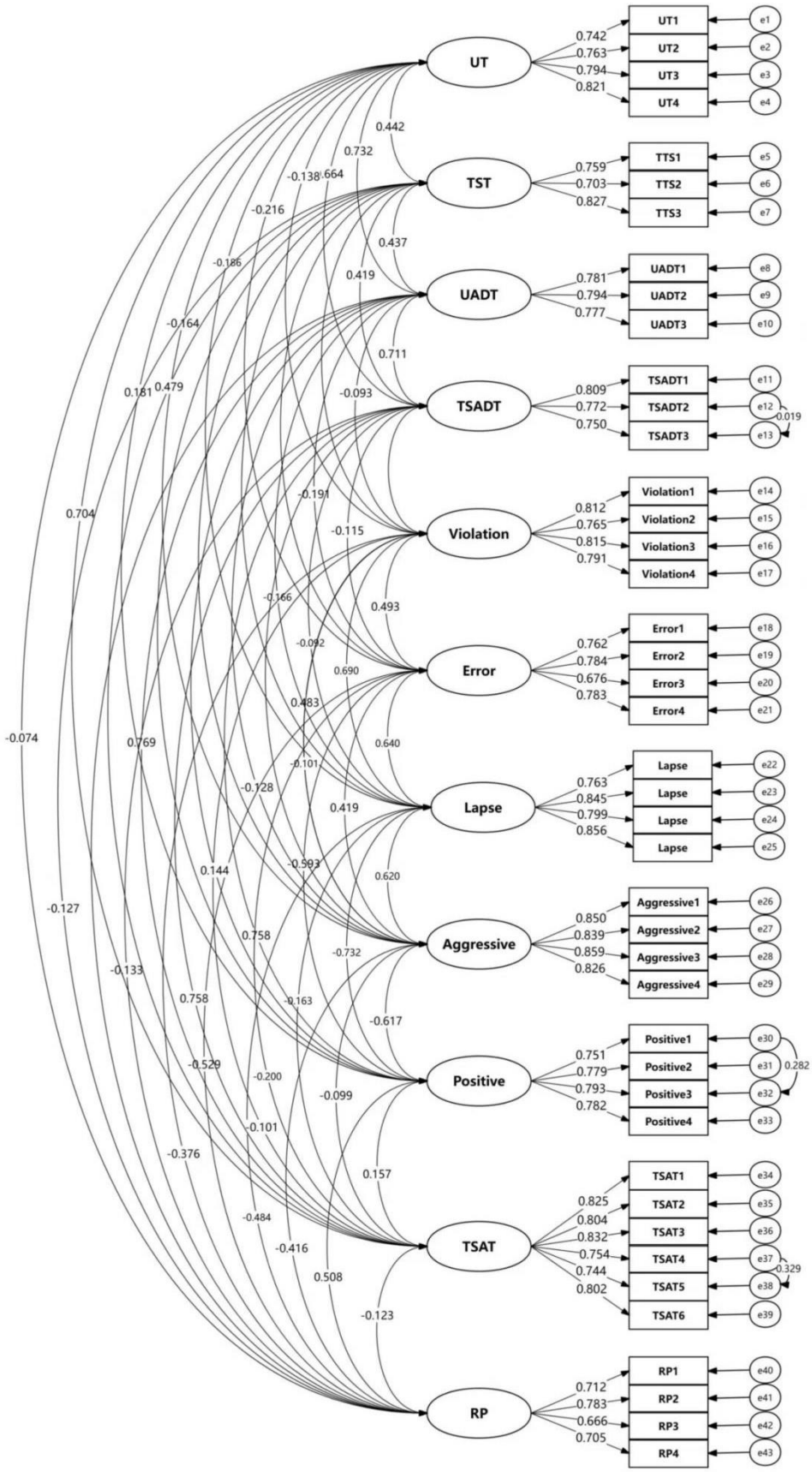
附录 D 1表 A4。 可接受间隙大小的描述性统计（单位：秒）。 2

	2 s	**3 s**	**4 s**	**5 s**	**6 s**	**7 s**	**8 s**	**9 s**
频数	5	56	86	211	140	44	50	11
比例	0.82%	9.29%	14.26%	34.99%	23.22%	7.30%	8.29%	1.82%
Mean	5.35 秒							
标准差	1.43 秒							

3

附录 E

图 A1. 测量模型的估计结果。



附录 F 1表 A5。 判别效度检验结果（UT：对卡车的理解；TST：对卡车安全性的信任；UADT：对自动驾驶技术的理解；TSADT：对自动驾驶技术安全性的信任；TSAT：对自动驾驶卡车安全性的信任）。 4

	UT	TST	UADT	TSADT	违规行为	错误 失		攻击性	积极	TSAT 厉	
UT	0.78										
TST	0.44	0.77									
UADT	0.73	0.44	0.78								
TSADT	0.66	0.42	0.71	0.78							
违规行为	–0.14	0.03	–0.09	–0.02	0.80						
错误	–0.22	–0.08	–0.19	–0.12	0.49	0.75					
疏忽	–0.19	0.03	–0.17	–0.09	0.69	0.64	0.82				
攻击性	–0.16	–0.03	–0.13	–0.05	0.48	0.42	0.62	0.84			
积极	0.18	0.04	0.14	0.12	–0.64	–0.59	–0.73	–0.62	0.78		
TSAT	0.70	0.48	0.77	0.76	–0.10	–0.20	–0.16	–0.10	0.16	0.79	
风险感知	–0.07	–0.13	–0.07	–0.13	–0.38	–0.53	–0.48	–0.42	0.51	–0.12	0.72

5