



西南交通大学学报
Journal of Southwest Jiaotong University
ISSN 0258-2724, CN 51-1277/U

《西南交通大学学报》网络首发论文

题目: 无人驾驶汽车对出行方式选择行为的影响
作者: 刘志伟, 刘建荣, 邓卫
网络首发日期: 2020-12-25
引用格式: 刘志伟, 刘建荣, 邓卫. 无人驾驶汽车对出行方式选择行为的影响. 西南交通大学学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20201225.1600.010.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

无人驾驶汽车对出行方式选择行为的影响

刘志伟¹, 刘建荣^{2*}, 邓卫³

(1. 武汉轻工大学 土木工程与建筑学院, 湖北武汉, 430023; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东广州, 510640; 3. 东南大学 交通学院, 江苏南京, 211189)

摘要: 无人驾驶汽车对出行者出行选择行为具有重要影响, 进而可以影响到城市交通需求和城市空间布局和城市规划。基于扩展技术接受模型和考虑不同出行者偏好的异质性, 建立带潜变量的随机系数 Logit 模型, 研究出行者的出行特征、心理潜变量和个体的社会经济属性对无人驾驶汽车选择行为的影响。结果表明: 与传统的多项 Logit 模型相比, 带潜变量的随机系数 Logit 模型拟合度更高; 不同的出行者对出行费用的偏好具有异质性, 在效用函数中, 出行费用服从正态分布; 无人驾驶汽车选择行为不仅受到出行特征和社会经济属性的影响, 而且还受到感知信任、社会规范和行为意向等心理潜变量的影响; 降低无人驾驶汽车的出行费用可以显著提升出行者选择无人驾驶汽车出行的概率。

关键词: 交通工程; 出行方式选择; 技术接受模型; 混合选择模型

中图分类号: U121

文献标识码: A

Exploring the Factors Affecting Travel Mode Choice Behavior of Autonomous Vehicles

LIU Zhiwei¹, LIU Jianrong^{2*}, DENG Wei³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, 430023, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, 510640, China; 3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing, 211189, China)

Abstract: Autonomous vehicles have an important influence on travel mode choices of travelers, which can affect urban traffic demand, urban spatial layout and urban planning. Based on the extended technology acceptance model and considering the heterogeneity of different traveler preferences, a random parameter Logit model was established to study the impact of traveler characteristics, psychological latent variables and individual socio-economic attributes on travelers' choice behavior of autonomous vehicles. The results show that compared with the traditional multiple logit model, the random parameters logit model has a higher degree of fitting. Travelers' preferences for travel costs are different. In the utility function, the travel cost follows a normal distribution. Travelers' choice behavior of autonomous vehicles is not only affected by travel characteristics and socioeconomic attributes, but also by psychological latent variables such as perceived trust, social norms, and behavioral intention to use. The reduction in the travel cost of autonomous vehicles can significantly increase the probability that a traveler will choose to travel with autonomous vehicles.

Keywords: traffic engineering; travel mode choice; technology acceptance model; hybrid choice model

当前, 无人驾驶汽车技术日新月异, 取代传统小汽车已是指日可待, 但是相关立法者、城市管理者、规划师、工程师还没有做好准备。无人驾驶汽车对车辆行驶里程、出行方式选择和车辆行驶时间等出行者出行行为

具有重要影响^[1-3]。在假定无人驾驶汽车投入使用的背景下, 研究其对出行者出行行为的影响机理, 不仅是出行者交通出行行为理论的丰富和完善, 而且可以为将来制定适应无人驾驶汽车发展的停车规划和停车场设计、交

基金项目: 湖北省自然科学基金(2020CFB290), 国家自然科学基金(51578247)

第一作者: 刘志伟(1987-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为交通工程, E-mail: tonyliuzhiwei@whpu.edu.cn

通讯作者: 刘建荣(1984-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为交通工程, E-mail: ctjrliu@scut.edu.cn

通规划、城市规划、工程措施和政策研究提供一定参考和指导。

研究出行行为的离散选择模型主要有多项 Logit 模型和巢式 Logit 模型。多项 Logit 模型结构简单应用广泛,但是存在 IIA (independence of irrelevant alternatives) 特性。巢式 Logit 模型,部分解决了 IIA 特性问题,但是存在如何分类的难题,此外并未解决底层同一巢内选项的 IIA 特性问题^[4]。随机系数 Logit 模型 (random parameter logit model) 考虑不同消费者的偏好的异质性,通过引进随机参数假定某一变量服从某种分布,允许不同选项之间存在不同种类的相关性,从而彻底解决了传统离散选择模型 IIA 特性这一难题^[5-6]。

除了研究方法上的改进,在研究内容层面取得很大进步。在早期出行方式选择的研究中,考虑的影响因素主要包括两个方面:一方面是出行费用、出行时间等出行特征;另一方面是性别、收入、受教育程度等出行者自身属性。随着研究的发展,学者们发现出行者的心理、态度、价值观等心理潜变量对出行者出行方式选择同样具有显著影响^[7]。我们将纳入潜变量的离散选择模型称之为混合选择模型 (hybrid choice model)。Paulssen 等^[8]研究了权力、享乐主义和安全等价值观与灵活性、便利性、舒适性等态度对出行方式选择的影响。Kim 等^[9]建立混合选择模型研究共享汽车的不确定性和服务满意度对出行者出行方式选择的影响。景鹏等^[10]运用计划行为理论框架研究了行为态度、社会规范和行为控制等心理潜变量对出行者出行方式选择的影响。鞠鹏等^[11]基于混合选择模型探索感知有用性、感知易用性和行为态度等潜变量对出行者汽车共享选择行为的影响。这些研究都是对现实中已有交通方式进行研究,无人驾驶车辆尚未正式投入使用,是一种全新的技术。技术接受模型 (technology acceptance model, TAM) 最初用于研究顾客对信息技术的接受程度^[12]。因此,本文基于技术接受理论,将感知有用性、感知易用性、感知信任、社会规范和行为意向等 5 个心理潜变量纳入随机系数 Logit 模型,综合考虑步行与等待时间、出行时间、出行费用等出行特征和性别、年龄、收入、是否拥有小汽车等社会经济属性,建立混合选择模型研究无人驾驶汽车对出行者选择行为的影响因素和影响程度。

1. 理论框架及模型建立

1.1 理论框架

技术接受模型最早是由美国学者 Davis 在理性行为理论基础提出的,用于研究和预测人们对信息技术的接受程度^[13]。该理论主张人的行为意向 (behavioral

intention to use, BIU) 决定了人对新技术的使用。当人面对一项新技术时,人的行为意向取决于人们对新技术的感知有用性和感知易用性^[14]。感知有用性 (perceived usefulness, PU) 是指用户使用新技术后工作绩效和工作效率提高的程度。感知易用性 (perceived ease to use, PEU) 是指用户认同新技术易于操作程度。此外,在技术接收理论的基础上,感知信任和社会规范被认为是影响新技术接受重要因素^[15-16]。感知信任 (perceived trust, PT) 是指用户对新技术的信任程度。社会规范 (subjective norms, SN) 是指用户容易受到非常亲近的人对新技术态度影响。将感知信任和社会规范引入技术接收理论,有利于我们加强对无人驾驶汽车使用行为意向的理解。混合选择模型是将潜变量纳入选择模型效用函数的模型。因此,本文在技术接受模型基础上进一步扩展,将感知有用性等 5 个潜变量纳入随机系数 Logit 模型,建立混合选择模型研究无人驾驶汽车对出行者出行选择行为的影响因素和影响程度,研究框架见图 1 所示。

表征出行者心理潜变量“感知有用性 (PU)”的显变量包括: 1) 无人驾驶汽车可以降低交通事故率 (pu1); 2) 无人驾驶汽车可以缓解交通拥堵 (pu2); 3) 无人驾驶汽车可以降低交通成本 (pu3); 4) 无人驾驶汽车可以改善驾驶行为表现 (pu4)。“感知易用性 (PEU)”的显变量包括: 1) 学习使用无人驾驶汽车对我来说很简单 (peu1); 2) 无人驾驶汽车的使用很清晰和容易理解 (peu2); 3) 无人驾驶汽车的使用不需要太多的心理负担 (peu3)。“感知信任 (PT)”的显变量包括: 1) 无人驾驶汽车是可靠的 (pt1); 2) 无人驾驶汽车是值得信赖的 (pt2); 3) 总之,我完全相信无人驾驶汽车 (pt3)。“社会规范 (SN)”的显变量包括: 1) 对我很重要的人支持我使用无人驾驶汽车 (sn1); 2) 对我很重要的人希望我将来能使用无人驾驶汽车 (sn2); 3) 如果身边的人使用无人驾驶汽车,我也会使用的 (sn3)。行为意向 (BIU) 的显变量包括: 未来我会使用无人驾驶汽车 (biu1); 未来我会购买无人驾驶汽车 (biu2); 我会向亲朋好友推荐使用无人驾驶汽车 (biu3)。

出行者的社会经济属性主要包括: 性别 (GEND)、年龄 (AGE)、受教育程度 (EDU)、职业 (OCCU)、家庭月收入 (HINC)、家庭是否有入学儿童 (CHILD)、是否有小汽车 (CAR)、家庭总人口数等 (HSIZE)、是否有驾照 (LICEN)、是否有公交卡 (ICARD)、和通勤方式 (MODE)。

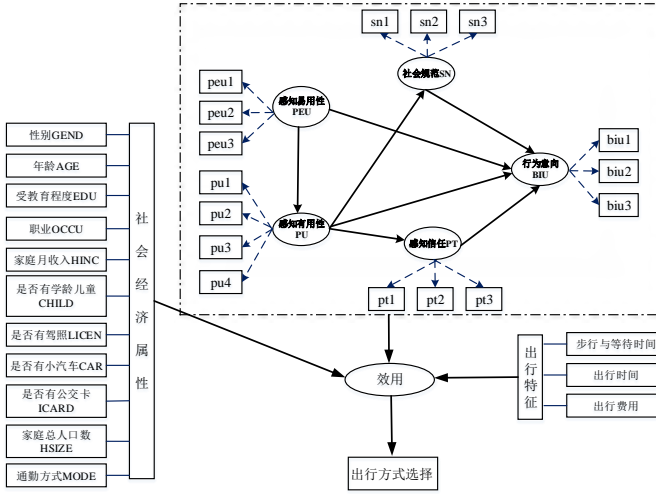


图 1 研究框架

Fig.1 Research Framework

1.2 潜变量模型

潜变量模型一般包括测量模型和结构模型。

1) 测量模型

$$X = A_x \xi + \delta, \quad (1)$$

$$Y = A_y \eta + \varepsilon, \quad (2)$$

式中： X 为自变量的测量值构成的向量； ξ 为潜在外生变量构成的向量； A_x 为 X 在 ξ 上的回归系数或者因子负荷矩阵； δ 为 X 的误差项构成的向量； Y 为因变量的测量值构成的向量； η 为潜在内生变量构成的向量； A_y 为 Y 在 η 上的回归系数或者因子负荷矩阵； ε 为 Y 的误差项构成的向量。

2) 结构模型

$$\eta = B \eta + \Gamma \zeta + \xi, \quad (3)$$

式中： B 为内生潜变量之间的关系； Γ 为外源潜变量对内生潜变量影响； ζ 为结构方程误差项。

1.3 随机系数 Logit 模型

在传统的离散选择模型中，假定个体的选择偏好都是相同的，即所有人的效用函数中的系数都是相同的。个体 i 在选择集 t 中选择选项 j 概率为 P ，计算公式如下所示：

$$P = \frac{\exp(\alpha_j + \beta^T x_{ji})}{\sum_{q=1}^{J_i} \exp(\alpha_q + \beta^T x_{qi})}, \quad (4)$$

式中： x_{ji} 为选项 j 个体 i 可观察的特征向量； β 为待估参数系数向量， α_j 和 α_q 为选项 j 的常数项； J_i 为个体 i 第 J 个选择项。

随机系数 Logit 模型与传统离散选择模型不同，主张个体选择存在异质性，即每个人的偏好是不相同的，个体 i 的系数 β_i 不是固定值，而是服从一定的随机分布：

$\beta_i \sim f(\beta | \theta)$ ， $f(\cdot)$ 为随机分布概率密度函数^[17, 18]。此时，

个体 i 在选择集 t 中选择选项 j 的概率为

$$\text{Prob}(y_{it} = j) = \frac{\exp(\alpha_{ji} + \beta_i^T x_{ji})}{\sum_{q=1}^{J_i} \exp(\alpha_{qi} + \beta_i^T x_{qi})}, \quad (5)$$

式中： α_{ji} 为常数项。

随机系数选择模型最简单的形式是：

$$\begin{cases} \beta_{ki} = \beta_k + \sigma_k v_{ik} \\ \alpha_{ji} = \alpha_j + \sigma_j v_{ji} \end{cases} \quad (6)$$

式中： β_{ki} 为向量 β_i 的第 k 分量的值； β_k 为样本总体第 k 分量均值； v_{ik} 为个体 i 第 k 分量的异质性参数，均值为 0，标准差为 1； σ_k 是 β_k 的标准差。

为了更好区分个体属性对系数向量 β_i 的影响， β_{ki} 可以表示为

$$\beta_{ki} = \beta_k + \delta_k^T z_i + \sigma_k v_{ik}, \quad (7)$$

式中： z_i 为个体 i 的一组不变的个人特征（年龄、性别等）向量； δ_k 为 v_{ik} 系数向量。

由于随机系数 Logit 模型中包含随机变量，概率函数是非封闭型的，因此，不能用传统求解 Logit 模型的方法计算式 (2) 中的概率，需要运用计算机仿真进行求解^[19]。

2. 问卷设计及样本描述性统计

2.1 问卷设计

本文主要研究无人驾驶汽车投入使用对出行者出行行为的影响。按照所有权的不同，无人驾驶汽车分为两种：私人无人驾驶汽车（private automated vehicles,

PAV) 和共享无人驾驶汽车 (shared automated vehicles, SAV)。PAV 和 SAV 对传统小汽车的保有量、车辆行驶里程、出行方式分担比例、车辆行驶时间等具有不同的显著影响^[20]。因此本文主要研究受访出行者在传统小汽车、私人无人驾驶汽车和共享无人驾驶汽车 3 种机动化出行方式中的选择。

根据研究目的和建立随机系数 Logit 模型的需要, 本文的调查内容主要包括 3 个方面: 1) 出行者的社会经济属性; 2) 基于扩展技术接受模型表征出行者对无人驾驶汽车技术接受的心理潜变量; 3) 出行方式特征变量。

问卷中关于对无人驾驶汽车态度方面的潜变量是基于扩展技术接受模型, 运用李克特五点量表对显变量进行调查, 其范围从“非常不赞同”到“非常赞同”, 赋值范围对应 1~5。

本次调查在情景设计部分, 选取步行与等待时间 (wait and walk time, WWT)、出行时间(travel time, TT) 和出行费用 (私人无人驾驶汽车和传统小汽车考虑停车费用) (travel cost, TC) 等 3 个因素作为特征属性。共设置了 16 个情景, 每个受访者对其中 4 个情景中的选项做出选择。图 2 为其中一个场景示例。



图 2 假定情景示例

Fig.2 Example of SP choice scenario

2.2 数据的描述性统计

本次调查时间: 2019 年 10 月-2020 年 1 月; 调查地点: 武汉市; 调查形式: 线下现场问卷调查和线上问卷调查相结合。线下调查选择天气良好的工作日, 调查过程坚持随机抽样原则, 主要在停车场和地铁站人流较多地方选择受访者; 线上调查主要是随机邀请受访者填写网络调查问卷。为了保证数据的有效性, 剔除掉回答时间小于 7 min, 回答时间超过 20 min 的问卷, 此外 IP 地址限定为武汉市, 答题机会限制为 1 次, 最后得到有效问卷 433 份。样本描述性统计如表 1 所示。样本整体与武汉市的人群分布差异不大。

表 1 样本描述性统计

Table 1 Descriptive Statistics of respondents

变量	表示符号	定义	百分比/%
性别	GEND	女	45.73
		男	54.27
年龄	AGE1	≤30 岁	34.47

受教育程度	AGE2	31~45 岁	28.75%
	AGE3	46~55 岁	26.85%
	AGE4	≥55 岁	9.92%
	EDU1	高中及以下	12.69%
职业	EDU2	大专	12.52%
	EDU3	本科	60.24%
	EDU4	硕士及以上	14.54%
	OCCU1	公务员\事业单位人员	28.47%
家庭月收入	OCCU2	企业员工	26.62%
	OCCU3	个体经营\自由职业	21.70%
	OCCU4	其他(兼职、学生、退休等)	23.22%
	HINC1	<5000 元	24.47%
是否有学龄儿童	HINC2	5000~10000 元	41.83%
	HINC3	10000~20000 元	21.93%
	HINC4	>20000 元	11.77%
是否有驾照	CHILD	是	50.55%
	CHILD	否	49.45%
家庭是否有小汽车	LICENSE	是	50.78%
	LICENSE	否	49.22%
是否有公交 IC 卡	CAR	是	64.92%
	CAR	否	35.08%
家庭总人口数	ICARD	是	77.55%
	ICARD	否	22.45%
家庭总人口数	HSIZE	1	6.92%
	HSIZE	2	9.46%
	HSIZE	3	43.22%
	HSIZE	4	18.47%
	HSIZE	5 人及以上	21.93%

2.3 数据的信度和效度分析

为了保证调查问卷收集数据的可靠性和稳定性, 对样本进行 KMO 样本测度、Bartlett 球体检验和 Cronbach's Alpha 对数据进行信度分析和效度分析, 分析结果如表 2 所示。感知有用性 (PU)、感知易用性 (PEU)、感知信任 (PT)、社会规范 (SN) 和行为意向 (BIU) 等 5 个潜变量 KMO 值大于 0.7, 因子载荷均大于 0.8, Cronbach's Alpha 均大于 0.8, 调查问卷的信度和效度比较理想。

表 2 样本数据的信度及效度检验

Table 2 Reliability and validity test of sample

潜变量	题项	KMO	因子载荷	Cronbach's Alpha
感知有用性	pul	0.841	0.905	0.917

(PU)	pu 2		0.913	
	pu 3		0.910	
	pu 4		0.850	
感知易用性 (PEU)	peu 1		0.945	
	peu 2	0.770	0.957	0.945
	peu 3		0.946	
感知信任 (PT)	pt1		0.960	
	pt 2	0.764	0.970	0.956
	pt 3		0.947	
社会影响 (SN)	sn1		0.967	
	sn 2	0.762	0.963	0.954
	sn 3		0.942	
行为意向 (BIU)	biu1		0.974	
	biu2	0.770	0.963	0.964
	biu3		0.959	

3. 实证分析

3.1 出行者心理潜变量分析

本文首先利用 MIMIC 模型求解感知有用性、感知易用性、感知信任、社会规范和行为意向等态度潜变量，计算潜变量模型的拟合优度指标，该模型的 $RMSEA$ 为 $0.08 \leq 0.08$, CFI 为 $0.960 \geq 0.900$, TLI 为 $0.950 \geq 0.900$, $SRMR$ 为 $0.04 < 0.08$, 表明 MIMIC 模型拟合度比较理想^[21]。

解释变量与潜变量的相关性如表 3 所示，受限于篇幅，只列出解释变量对感知易用性 (PEU) 的影响。在 5% 置信水平下，性别、年龄、受教育程度、职业、是否拥有学龄儿童、驾照和是否拥有小汽车都会影响到出行者对无人驾驶汽车新技术的感知易用性。男性、受教育程度越高、家里有学龄儿童、持有驾照、拥有小汽车和拥有公交卡的出行者感知无人驾驶汽车更加易于使用；而年龄越大、职业越灵活的以及家庭成员越多的出行者觉得无人驾驶汽车难以使用。

表 3 解释变量对潜在变量 PEU 的影响

Table 3 Effect of explanatory variables on potential variable PEU

变量	系数	P 值
性别	0.392	0
年龄	-0.135	0
受教育程度	0.047	0.004
职业	-0.108	0
家庭月收入	-0.003	0.832
是否有学龄儿童	0.0832	0
是否拥有驾照	0.235	0
家庭是否拥有小汽车	0.178	0

是否拥有公交 IC 卡	0.025	0.325
家庭总人口数	-0.022	0.012

3.2 随机系数 Logit 模型

本文主要研究无人驾驶汽车对出行者出行方式的影响，为了体现个体对步行与等待时间 (WWT)、出行时间 (TT)、出行费用 (TC) 等出行特征的异质性和克服多项 Logit 模型的多重共线性问题，将小汽车出行设置成对比项，建立 3 种出行方式的随机系数 Logit 模型。为了进行对比分析，本文同时建立带潜变量的多项 Logit 模型。

参照以往研究关于随机系数 Logit 模型的分析流程^[22]，本文先假定 WWT、TT、TC 3 个变量都是随机系数。随机系数 Logit 模型的解不是封闭的，因此必须使用仿真方法对模型进行求解，本文利用 NLogit 软件进行编程，随机抽样方法选择 Halton，抽取次数为 1000 次。结果表明在效用函数中，只有 TC 的系数为服从正态分布的随机系数，WWT 和 TT 的系数为非随机系数，出行费用对不同的出行者效用的影响不一样，此时模型拟合效果最好，相关模型最终标定结果如表 4 所示，其中传统小汽车是基准项，各个系数设置为 0，故在表中未列出。

表 4 带潜变量的随机系数 Logit 模型和带潜变量的多项 Logit 模型参数标定结果

Table 4 Estimation results of the Random Parameters Logit Model with Latent Variables and Hybrid Choice Model					
出行方式	变量	带潜变量的随机系数 Logit 模型		带潜变量的多项 Logit 模型	
		系数	Z 值	系数	Z 值
私人无人驾驶汽车	出行费用 (均值)	-0.029	-4.77	-0.029	-5.31
	出行费用 (标准差)	0.030	2.51		
	步行与等待时间	-0.099	-5.59	-0.093	-5.65
	车内时间	-0.037	-4.75	-0.033	-4.84
	年龄 30 岁及以下	1.271	5.87	1.201	6
	受教育程度为本科	0.539	1.87	0.466	1.73
	家庭月收入 20000 元以上	-2.017	-8.22	-1.928	-8.49
	是否拥有驾照	0.390	1.97	0.356	1.91
	是否拥有小汽车	0.166	0.74	0.182	0.84
	是否拥有公交卡	-0.562	-2.42	-0.575	-2.63
	是否使用小汽车通勤	0.086	0.38	0.135	0.63
	家庭总人口数	0.287	4.35	0.258	4.31
	感知信任	1.270	2.96	1.188	2.94
	社会影响	-0.499	-2.41	-0.428	-2.25
	行为意向	1.765	3.78	1.668	3.81

共享无人驾驶汽车	年龄 30 岁及以下	0.759	3.5	0.698	3.55
	受教育程度为本科	1.042	3.76	0.985	3.92
	家庭月收入 20000 元以上	-1.439	-5.9	-1.353	-6.18
	是否拥有驾照	0.056	0.28	0.047	0.25
	是否拥有小汽车	0.373	1.66	0.365	1.77
	是否拥有公交 IC 卡	-0.154	-0.65	-0.181	-0.84
	是否使用小汽车通勤	-2.005	-7.39	-1.826	-8.02
	家庭总人口数	0.303	4.25	0.269	4.31
	感知信任	0.936	2.23	0.878	2.31
	社会影响	-0.181	-0.91	-0.118	-0.66
	行为意向	1.522	3.33	1.387	3.38
伪平方值		0.320	0.284		

由表 4 可知,带潜变量的随机系数 Logit 模型和带潜变量的多项 Logit 模型的伪平方值分别为 0.320 和 0.284。两种模型都是可以接受的,相比带潜变量的多项 Logit 模型,带潜变量的随机系数 Logit 模型的拟合优度更高。

在带潜变量的随机系数 Logit 模型中,出行费用的均值和标准差均显著,表明在个体的效用函数中,出行费用的系数为随机系数,体现了不同个体出行费用的异质性,分布情况为: $TC \sim N(-0.029, 0.030^2)$ 。此外,步行与等待时间和出行时间的系数都是负值,这与先前的研究结论保持一致,步行与等待时间、出行时间、和出行费用的增加,会显著降低相应出行方式的出行需求^[23, 24]。

在个体的社会经济属性方面:性别、职业等变量影响不显著。30 岁以下的群体和受教育程度为本科的出行者选择共享无人驾驶汽车的意愿更高,这与 Chanal 等研究结论一致,即老年人更加偏向于传统汽车,受教育程度高的出行者使用无人驾驶汽车的意愿更高^[25],表明无人驾驶汽车在提高安全性的同时,还应当取得不同群体对无人驾驶技术的信任;家庭月收入 20 000 元以上的出行者选择无人驾驶汽车相对较低,主要原因是无人驾驶汽车投入使用不久,高收入群体对待新技术相对更加保守;驾照对选择私人无人驾驶汽车出行具有正影响;拥有公交卡的出行者选择私人无人驾驶汽车的意愿较低,采用小汽车通勤方式的出行者选择共享无人驾驶汽车出行的意愿较低。家庭总人口数对选择无人驾驶汽车出行具有正影响。

在心理潜变量方面:感知信任和行为意向对无人驾驶汽车具有显著正影响,表明出行者对无人驾驶汽车信任程度越高和使用行为意向越高,那么使用无人驾驶汽车的意愿越高,这与 Liu 等的研究结论一致,感知信任

对无人驾驶汽车的使用意向具有显著正影响^[26]。因此,提高大众对无人驾驶汽车的感知信任,有利于促进无人驾驶汽车的普及和应用。

为了更加深入分析出行费用对出行方式选择的影响,我们计算出行费用的边际效应。边际效应是指在其他变量保持不变的情况下,解释变量变化 1 个百分点引起各种选择概率的变化,计算公式如下:

$$\frac{dp_j}{x_k} = \beta_k p_j (1 - p_j) \quad (8)$$

式中: $j = 1, 2, 3$ 分别表示选择私人无人驾驶汽车、

共享无人驾驶汽车和传统小汽车出行的概率, x_k 是指解释变量, β_k 是指 x_k 的系数。计算各选择项效用后对选择枝的选择概率进行加权。出行费用的边际效用如表 5 所示。

表 5 出行费用的边际效用

Table 5 Marginal effects of travel costs			%
选择项	PAV 选择概率	SAV 选择概率	CAR 选择概率
PAV 出行费用增加 1%	-1.787	1.536	0.251
SAV 出行费用增加 1%	0.846	-1.071	0.225
CAR 出行费用增加 1%	0.346	0.575	-0.920

由表 5 可知,在其他变量保持不变的情况下,私人无人驾驶汽车出行费用每提高 1%,选择私人无人驾驶汽车概率下降 1.787%,共享无人驾驶汽车和传统小汽车的选择概率分别提高 1.536%和 0.251%;共享无人驾驶汽车出行费用每提高 1%,选择共享无人驾驶汽车概率下降 1.071%,私人无人驾驶汽车和传统小汽车的选择概率也上升 0.846%和 0.225%;传统小汽车出行费用每提高 1%,小汽车选择概率下降 0.920%,私人无人驾驶汽车和共享无人驾驶汽车的选择概率提高 0.346%和 0.575%。结果表明降低出行费用的方法可以显著提高选择无人驾驶汽车选择概率,这与 Rico 等研究结论一致,出行费用是影响无人驾驶汽车使用以及选择共享无人驾驶汽车的关键因素^[27]。因此,考虑到共享无人驾驶汽车的公共交通属性,可以通过免费换乘公共交通、分时段计费等方式合理制定收费标准促进共享无人驾驶汽车的发展,提高城市交通出行效率。

4. 结论

基于扩展技术接受模型,利用随机系数 logit 模型对 SP 调查数据进行建模,研究出行者无人驾驶汽车选择行

为的影响因素和影响程度。通过研究得到以下结论：

1) 出行者对出行费用的偏好具有异质性，在效用函数中，出行费用不是一个固定常数，而是服从正态分布：

$TC \sim N(-0.029, 0.030^2)$ 。

2) 无人驾驶汽车选择行为不仅受到出行特征和社会经济属性的影响，而且还受到感知信任、社会规范和行为意向等心理潜变量的影响。为了促进共享无人驾驶汽车的推广和应用，应从感知信任和社会规范等方面加大对无人驾驶汽车的宣传力度，增强大家对无人驾驶汽车技术的理解和信任程度，为未来无人驾驶汽车的普及打下基础。

3) 通过将共享无人驾驶汽车列入城市公共交通体系，允许其使用公交车专用道等措施降低出行费用和减少出行时间，可以显著提升出行者选择共享无人驾驶汽车出行的概率，促进城市交通出行的绿色发展。

参考文献：

- [1] Childress S, Nichols B, Charlton B, et al. Using an activity-based model to explore the potential impacts of automated vehicles[J]. *Transportation Research Record*, 2015,2493(1):99-106.
- [2] Auld J, Sokolov V, Stephens T S. Analysis of the effects of connected - automated vehicle technologies on travel demand[J]. *Transportation Research Record*, 2017,2625(1):1-8.
- [3] Kröger L, Kuhnimhof T, Trommer S. Does context matter? A comparative study modelling autonomous vehicle impact on travel behaviour for Germany and the USA[J]. *Transportation research part A: policy and practice*, 2019,122(4):146-161.
- [4] Gallego G, Topaloglu H. Constrained assortment optimization for the nested logit model[J]. *Management Science*, 2014,60(10):2583-2601.
- [5] Grigolon L, Verboven F. Nested logit or random coefficients logit? A comparison of alternative discrete choice models of product differentiation[J]. *Review of Economics and Statistics*, 2014,96(5):916-935.
- [6] 刘忠, 田莎, 陈青, 等. 随机系数 LOGIT 模型的最新发展及其应用[J]. *经济学动态*, 2012,12 (12) :125-130.
Liu Z , Tian S , Chen Q , et al. The Latest Development and Application of Random Parameter Logit Model [J].*Economic Perspectives*, 2012, 12(12):125-130
- [7] Ben-Akiva M, McFadden D, Train K, et al. Hybrid choice models: Progress and challenges[J]. *Marketing Letters*, 2002,13(3):163-175.
- [8] Paulssen M, Temme D, Vij A, et al. Values, attitudes and travel behavior: a hierarchical latent variable mixed logit model of travel mode choice[J]. *Transportation*, 2014,41(4):873-888.
- [9] Kim J, Rasouli S, Timmermans H. Satisfaction and uncertainty in car-sharing decisions: An integration of hybrid choice and random regret-based models[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2017,95(1):13-33.
- [10] 景鹏, 隗志才, 查奇芬. 考虑心理潜变量的出行方式选择行为模型[J]. *中国公路学报*, 2014,27(11):84-92.
JING Peng, JUAN Zhicai, ZHA Qifen. Incorporating psychological latent variables into travel mode choice model[J]. *China J. Highw. Transp.*, 2014, 27(11): 84-92
- [11] 鞠鹏, 周晶, 徐红利, 等. 基于混合选择模型的汽车共享选择行为研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2016,17(2):7-13.
Ju P , Zhou J , Xu H L , et al. Travelers' choice behavior of car sharing based on hybrid choice model[J]. *Jiaotong Yunshu Xitong Gongcheng Yu Xinxi/ Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology*, 2017, 17(2):7-13.
- [12] Davis F D, Bagozzi R P, Warshaw P R. User acceptance of computer technology: a comparison of two theoretical models[J]. *Management science*, 1989,35(8):982-1003.
- [13] Davis F D. User acceptance of information technology: system characteristics, user perceptions and behavioral impacts[J]. *International journal of man-machine studies*, 1993,38(3):475-487.
- [14] Venkatesh V, Davis F D. A model of the antecedents of perceived ease of use: Development and test[J]. *Decision sciences*, 1996,27(3):451-481.
- [15] Mou J, Shin D, Cohen J F. Trust and risk in consumer acceptance of e-services[J]. *Electronic Commerce Research*, 2017,17(2):255-288.
- [16] Bansal P, Kockelman K M, Singh A. Assessing public opinions of and interest in new vehicle technologies: an Austin perspective[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016,67(6):1-14.
- [17] Dong B, Ma X, Chen F, et al. Investigating the differences of single-vehicle and multivehicle accident probability using mixed logit model[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2018, 2702360:1-9.
- [18] Wang W, Yuan Z, Liu Y, et al. A Random Parameter Logit Model of Immediate Red-Light Running Behavior of Pedestrians and Cyclists at Major-Major Intersections[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2019,2345903: 1-13
- [19] Zeng T. Essays on the random parameters Logit model[D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2011.
- [20] Soteropoulos A, Berger M, Ciari F. Impacts of automated

- vehicles on travel behaviour and land use: an international review of modelling studies[J]. *Transport reviews*, 2019,39(1):29-49.
- [21] Wang J, Wang X. *Structural equation modeling: applications using Mplus*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2019.
- [22] Hensher D A, Rose J M, Greene W H. *Applied choice analysis: a primer*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [23] Zhou H, Norman R, Xia J C, et al. Analysing travel mode and airline choice using latent class modelling: a case study in Western Australia[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020,137(7):187-205.
- [24] Molesworth Brett RC, Koo Tay TR. The influence of attitude towards individuals' choice for a remotely piloted commercial flight: A latent class logit approach[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016,71(10):51-62.
- [25] Haboucha C J, Ishaq R, Shiftan Y. User preferences regarding autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017,78(5):37-49.
- [26] Liu P, Yang R, Xu Z. Public acceptance of fully automated driving: Effects of social trust and risk/benefit perceptions[J]. *Risk Analysis*, 2019,39(2):326-341.
- [27] Krueger R, Rashidi T H, Rose J M. Preferences for shared autonomous vehicles[J]. *Transportation research part C: emerging technologies*, 2016,69(8):343-355.